

# Termisk lagringsystem for vedovner

**Marie Seltveit Haugen**

Master i energi og miljø

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Erling Næss, EPT

Medveileder: Kolbeinn Kristjansson, EPT  
Inge Saanum, Sintef Energiforskning  
Øyvind Skreiberg, Sintef Energiforskning

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosesseteknikk



EPT-M-2012-78

## MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Marie Haugen Seltveit

Våren 2012

Termisk lagringssystem for vedovner

*Thermal storage systems for woodstoves*

### Bakgrunn og målsetting

For å redusere fremtidens energiforbruk i boligoppvarming vil boligene isoleres vesentlig mere enn dagens løsninger. Dette setter nye krav til oppvarmingskildene, som bør kunne levere stabil varmeavgivelse med effekt ned mot 1 kW. Vedforbrenning er en fornybar energikilde med sterke tradisjoner innen boligoppvarming i Norden. Det er derfor en målsetting å kunne utvikle nye generasjoner vedovner som er tilpasset de fremtidige behovene.

An måte å oppnå en jevnere varmeavgivelse på er å utstyre vedovnen med et termisk lager som absorberer effekttoppene fra vedovnen og avgir denne varmen over en lengre periode. Et viktig moment ved slike lagringsmetoder er at de har en høy volumetrisk og gravimetrisk varmekapasitet, slik at volum og vekt begrenses. Materialer basert på faseovergang fast stoff/væske kan vise seg egnet for dette formålet, og skal undersøkes i denne oppgaven.

Målet med oppgaven er å utarbeide en anbefalt løsning for et varmelager som kan jevne ut effekttopper ved vedforbrenning i små vedovner.

### Opgaven bearbejdes ut fra følgende punkter

- 1 Det skal gjennomføres et litteraturstudium innen faseovergangsmaterialer som kan anvendes som varmelagringsmateriale for vedovner. Materialene skal beskrives og sammenliknes. Egnede temperaturområder, eventuelle begrensninger samt gravimetriske/volumetriske varmekapasiteter skal presenteres. Ett eller flere materialer skal anbefales for anvendelse som termisk lager for vedovner.
- 2 Ulike teknikker for å unngå overoppheting av varmelagringsmaterialet skal undersøkes. Både passive og aktive teknikker skal vurderes. De ulike teknikkene skal presenteres, diskuteres og sammenliknes.
- 3 Med basis i anbefalingene fra oppgavens pkt. 1 og 2 skal et konsept for varmelagring anbefales. Det skal gjennomføres numeriske beregninger av realistiske oppvarmings- og nedkjølingssykluser med den anbefalte løsningen. Eventuelle krav til intern varmedistribusjon skal spesifiseres.
- 4 Det skal utarbeides forslag til videre arbeid.

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

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

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

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

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen.

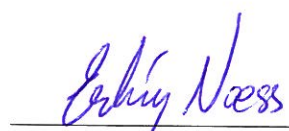
I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 16. januar 2012



Olav Bolland  
Instituttleder



---

Erling Næss  
Faglig ansvarlig/veileder

Medveiledere:  
Kolbeinn Kristjansson, NTNU/EPT  
Inge Saanum, Sintef Energiforskning AS  
Øyvind Skreiberg, Sintef Energiforskning AS

## Forord

Denne rapporten er skrevet i forbindelse med min hovedoppgave ved Institutt for energi- og prosessteknikk, NTNU, i perioden 16. januar til 18. juni 2012. Rapporten er tenkt lest uten noen form for tilleggslitteratur. Det er likevel å anbefale at leseren har noe kjennskap til varmetransport.

Arbeidet er utført med Erling Næss som hovedveileder og Kolbeinn Kristjansson, Inge Saanum, Øyvind Skreiberg som medveiledere. Jeg vil gjerne benytte anledningen til å takke dem. De har vært til stor hjelp og det hadde ikke vært mulig å gjennomføre dette arbeidet uten dem. De har blant annet inkludert meg i det overordnede prosjektet, og arrangert jevnlig møter med faglig veiledning. Videre vil jeg takke Erlend Kristiansen i COMSOL AS for hjelp med modellene, når jeg i blant har stått helt fast. Til slutt vil jeg takke mine gode klassekamerater som har støttet meg gjennom dette studiet, og delt utallige kaffekopper med meg.

Trondheim, 18. juni 2012



Marie Seltveit Haugen

Stud techn.

## Sammendrag

En ny generasjon vedovner tilpasset dagens nye boliger er under utvikling, og i den sammenheng skal vedovner med varmelagring vurderes. Varmelagring bidrar blant annet til en mer stabil varmeavgivelse fra vedovnen ved at varmelageret absorberer effekttoppene.

Hensikten med denne oppgaven er å beskrive en første gjennomgang av et konsept for et latent varmelager for vedovner. Latent varmelagring vil si at varmen lagres i et materiale som gjennomgår faseovergang. Fordelen med latent varmelagring, i forhold til tradisjonelle lagringsmetoder med kleberstein og keramikk som lagringsmedium, er at vekt og volum reduseres for samme mengde lagret varme, og at varmen tas opp og avgis ved tilnærmet konstant temperatur. Latent varmelagring for vedovner, er så vidt forfatteren kjenner til, ikke tidligere rapportert om i litteraturen.

I dette studiet er ulike faseovergangsmaterialer (Phase Change Material, PCM) for varmelagring undersøkt, og blant dem har salthydratet natriumacetat trihydrat og sukkeralkoholet erythritol vist seg å ha egenskaper som gjør dem egnet for formålet.

To utfordringer knyttet til bruk av PCM for vedovner er lav termisk konduktivitet og risiko for overoppheting med påfølgende degradering av materialeegenskaper. Metoder for å unngå overoppheting av faseovergangsmaterialene er vurdert i rapporten, og et konsept for et varmelager foreslått. Lageret har konsentrisk geometri med innvendige metallfinner og oppvarmingen skjer hovedsakelig ved stråling. Et luftsjikt mellom lageret og ovnsoverflater gir mulighet for konveksjonskjøling, og luftstrømmen kan stenges og åpnes med spjeld.

Det er gjennomført numeriske beregninger av modellen med tre ulike finneløsninger, ved bruk av simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics®, for henholdsvis oppvarmings- og nedkjølingssykluser. Sukkeralkoholet erythritol ble brukt som PCM i simuleringene, og faseovergangen er beregnet ved bruk av ekvivalent varmekapasitetsmetode. Den mest lovende modellen, med fri luftgjennomstrømning og seks konsentriske finner, kan unngå overoppheting i to timer og førtito minutter ved konstant firing. De numeriske resultatene må imidlertid benyttes med forbehold, på grunn av forenklingene som er forklart i rapporten. Når mer informasjon om samspillet mellom ovnstemperaturer og varmelager etterhvert blir kjent, kan modellen videreutvikles og optimaliseres, og konseptet kan testes eksperimentelt i laboratorium.

## Summary

A new generation of wood stoves adapted for new buildings is under development, and in this context, wood stoves with heat storage are being evaluated. Heat storage contributes to absorption of effect peaks, and therefore more stable heat release from the oven.

The purpose of this report is to describe a first review of a concept of latent heat storage for wood stoves. Latent heat storage means that heat is stored in a material which undergoes phase transition. The benefits of using latent heat storage, compared to traditional heat storage methods with lime stone or ceramics as storage material, are that weight and volume is reduced for the same amount of stored heat, and the heat is stored and extracted at nearly constant temperatures. Latent heat storage for wood stoves is to the knowledge of the writer, not previously reported in the literature.

In this study, different phase change materials (PCM) for heat storage are investigated, and among them, the salt hydrate sodium acetate trihydrate and the sugar alcohol erythritol were found to have properties which make them suited for the purpose.

Two challenges related to the use of PCM for wood stoves are low heat conductivity and the risk of overheating of the material, which can cause degradation of the material properties. Methods to control the temperature of the PCM are described in the report, and a concept for heat storage is suggested. The storage has a concentric geometry with internal metal fins, and the heating is mainly by radiation. An air gap between the storage and the top of the oven allows for convective cooling, and the air stream can be regulated by a damper.

Numerical computations are conducted on a model of the concept with three different fin configurations, using COMSOL Multiphysics®. Both heating and cooling of the storage are considered. The sugar alcohol erythritol was used in the simulations, and the phase transition was modeled using the equivalent heat capacity method. The most promising model, with free air stream and six concentric fins, can avoid overheating of the PCM for two hours and forty-two minutes of constant combustion. The numerical results must be used with precaution due to the simplifications explained in the report. When more information about the interaction between the stove and storage eventually is obtained, the model can be modified and optimized, and the concept can be tested experimentally in the laboratory.

## Nomenklatur

|                   |   |
|-------------------|---|
| $k_s$             | Konduktivitet i fast stoff [W/mK]                 |
| $k_l$             | Konduktivitet i væske [W/mK]                      |
| $h_{sl}$          | Latent varme/smelteentalpi [kJ/kg]                |
| $T_i$             | Initialtemperatur [°C]                            |
| $T_f$             | Sluttemperatur [°C]                               |
| $T_{m1}$          | Temperatur hvor smeltingen starter [°C]           |
| $T_{m2}$          | Temperatur hvor smeltingen er ferdig [°C]         |
| $X$               | Posisjonen til fasefronten [m]                    |
| $C_{ps}$          | Varmekapasitet i fast stoff [kJ/kgK]              |
| $C_{pl}$          | Varmekapasitet i væske [kJ/kgK]                   |
| $C_{pm}$          | Varmekapasitet for faseovergangsområdet [kJ/kgK]  |
| $\rho_s$          | Tetthet i fast stoff [kg/m <sup>3</sup> ]         |
| $\rho_l$          | Tetthet i væske [kg/m <sup>3</sup> ]              |
| $Q$               | Lagret varme [kJ, kWh]                            |
| $V$               | Volum [m <sup>3</sup> ]                           |
| $m$               | Masse [kg]  |
| $a_m$             | Smeltefraksjon                                    |
| $\Delta r$        | Radiell romkoordinat [m]                          |
| $\Delta z$        | Aksiell romkoordinat [m]                          |
| $\Delta t$        | Tidsskritt [s]                                    |
| $Gr$              | Grashoftallet                                     |
| $g$               | Gravitasjonsakselerasjon [m/s <sup>2</sup> ]      |
| $\beta$           | Volumetrisk, termisk ekspansjonskoeffisient [1/K] |
| $\nu$             | Kinematisk viskositet [m <sup>2</sup> /s]         |
| $T_s$             | Overflatetemperatur [°C]                          |
| $T_\infty$        | Omgivelsestemperatur [°C]                         |
| $L$               | Karakteristisk lengde [m]                         |
| $Ra_L$            | Rayleightallet                                    |
| $Pr$              | Pradtlallet                                       |
| $\alpha$          | Termisk diffusivitet [m <sup>2</sup> /s]          |
| $\overline{Nu}_L$ | Gjennomsnittlig Nusselttall                       |
| $A_s$             | Overflateareal [m <sup>2</sup> ]                  |
| $P$               | Perimeter [m]                                     |
| $\Delta X$        | Bredde [m]  |
| $h_i$             | Indre varmetransportkoeffisient [W/mK]            |
| $h_o$             | Ytre varmetransportkoeffisient [W/mK]             |
| $u$               | Hastighetsfelt [m/s]                              |
| $F$               | Kraft [N]   |
| $\mu$             | Viskositet [kg/s·m]                               |
| $p$               | Trykk [Pa]  |
| $\rho_\infty$     | Omgivelsestetthet [kg/m <sup>3</sup> ]            |



|               |   |
|---------------|---|
| $\mathbf{n}$  | Normalvektor                                      |
| $\bar{h}$     | Gjennomsnittlig konveksjonskoeffisient [W/mK]     |
| $\varepsilon$ | Emissivitet                                       |
| $\sigma$      | Stefan-Boltzman konstant ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ ) |
| $G$           | Innstråling [W/m <sup>2</sup> ]                   |
| $J$           | Utstråling [W/m <sup>2</sup> ]                    |
| $F_{amb}$     | Formfaktor til omgivelsene                        |

## Innholdsfortegnelse

|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 1     | Innledning .....  | - 1 -  |
| 1.1   | Bakgrunn.....   | - 1 -  |
| 1.2   | Mål.....  | - 2 -  |
| 1.3   | Oppbygging av rapport.....                                | - 2 -  |
| 2     | Faseovergangsmaterialer (PCM, Phase Change Material)..... | - 3 -  |
| 2.1   | Metoder for termisk energilagring.....                    | - 3 -  |
| 2.2   | Materialegenskaper .....                                  | - 6 -  |
| 2.3   | Krav til PCM for termisk energilagring.....               | - 7 -  |
| 2.4   | Materialklasser.....                                      | - 10 - |
| 2.4.1 | Eutektiske vann-salt løsninger og klatrater.....          | - 11 - |
| 2.4.2 | Salthydrater .....  | - 11 - |
| 2.4.3 | Parafiner .....   | - 12 - |
| 2.4.4 | Fettsyrer.....  | - 13 - |
| 2.4.5 | Sukkeralkoholer.....                                      | - 13 - |
| 2.4.6 | Saltblandinger .....                                      | - 13 - |
| 2.5   | Vurdering av PCM for en vedovn.....                       | - 14 - |
| 2.5.1 | Natriumacetat trihydrat.....                              | - 15 - |
| 2.5.2 | Erythritol.....   | - 17 - |
| 2.6   | Numeriske beregninger av varmetransport i PCM.....        | - 19 - |
| 3     | Teknikker for temperaturkontroll av PCM.....              | - 23 - |
| 3.1.  | Termiske aktuatorer for varierende luftspalte .....       | - 24 - |
| 3.1   | Konveksjonskjøling med stråleskjold og spjeld.....        | - 26 - |
| 3.2   | Termiske sjalusier .....                                  | - 27 - |
| 3.3   | Termotropiske/termokromiske systemer .....                | - 28 - |
| 3.4   | Varmerør.....   | - 29 - |
| 3.5   | Varmerørkrets .....                                       | - 31 - |
| 3.6   | Finnesystem.....  | - 32 - |
| 4     | Analyse av konsept for varmelagring .....                 | - 33 - |
| 4.1   | Introduksjon.....   | - 33 - |
| 4.2   | Geometri og dimensjoner.....                              | - 34 - |

|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 4.2.1 | Autodesk® Inventor® Professional 2011.....                              | - 34 - |
| 4.2.2 | 2D aksesymmetrisk modell.....   | - 34 - |
| 4.2.3 | 3D modell .....   | - 36 - |
| 4.2.4 | Energüinnhold.....  | - 39 - |
| 4.3   | Numerisk modell .....   | - 40 - |
| 4.3.1 | COMSOL Multiphysics® 4.2a.....  | - 40 - |
| 4.3.2 | Materialegenskaper .....  | - 40 - |
| 4.3.3 | Beregning av frikonveksjon i modellen.....                              | - 43 - |
| 4.3.4 | Grensebetingelser i simuleringene .....                                 | - 48 - |
| 4.3.5 | Nodenettverk og tidsskritt.....   | - 51 - |
| 4.4   | Resultat og diskusjon .....   | - 52 - |
| 4.4.1 | Oppvarmingsforløp.....  | - 52 - |
| 4.4.2 | Nedkjølingsforløp.....  | - 59 - |
| 4.4.3 | Diskusjon av den numeriske modellen .....                               | - 62 - |
| 5     | Alternativt konsept.....  | - 65 - |
| 5.1   | Introduksjon.....   | - 65 - |
| 5.2   | Geometri og dimensjoner.....  | - 65 - |
| 5.3   | Numerisk modell .....   | - 65 - |
| 5.4   | Resultat og diskusjon .....   | - 66 - |
| 6     | Konklusjon og forslag til videre arbeid .....                           | - 69 - |
| 7     | Kilder .....  | - 71 - |
|       | Vedlegg A: Konduktivitet- og tetthetsfunksjoner for erythritol.....     | - 73 - |
|       | Vedlegg B: Temperatur- og hastighetsprofil for alternativt konsept..... | - 74 - |
|       | Vedlegg C: Resultater fra simuleringene .....                           | - 76 - |
|       | Vedlegg D: Flytskjema for latent varmelagring .....                     | - 80 - |

## Tabelliste

|   |        |
|---|--------|
| Tabell 1 – Fordeler og ulemper med organisk og uorganisk PCM [12] .....   | - 11 - |
| Tabell 2 – Aktuelle kandidat-PCM for varmelagring i vedovn.....   | - 15 - |
| Tabell 3 – Materialeegenskaper for natriumacetat trihydrat .....  | - 16 - |
| Tabell 4 – Materialeegenskaper for erythritol .....   | - 17 - |
| Tabell 5 – Dimensjoner for modellen med konsentriske finner .....   | - 36 - |
| Tabell 6 – Volum og vekt for modellen med 4 og 6 konsentriske finner .....  | - 36 - |
| Tabell 7 – Dimensjoner for 3D-modellen.....   | - 37 - |
| Tabell 8 – Energiinnhold i varmelageret .....   | - 39 - |
| Tabell 9 – Materialeegenskaper for stållegering og aluminium brukt i modellen .....   | - 41 - |
| Tabell 10 – Materialeegenskapene til erythritol definert med kontinuerlige Heaviside-funksjoner, benyttet i simuleringene ..... | - 42 - |
| Tabell 11 – Alternativ definisjon av materialeegenskapene for erythritol med logiske funksjoner .....                           | - 42 - |
| Tabell 12 – Materialeegenskaper og resultater for beregning av varmetransportkoeffisienter .....                                | - 45 - |
| Tabell 13 – Antall timer før PCM i de mest utsatte delene av lageret når kritisk temperatur.....                                | - 56 - |
| Tabell 14 – Dimensjoner for modellen med og uten stråleskjold .....   | - 65 - |
| Tabell 15 – Strålingsflukser i modellen uten stråleskjold .....   | - 66 - |
| Tabell 16 – Strålingsflukser på overflaten til ovnen, lageret og strålingsskjoldet.....   | - 68 - |

## Figurliste

|  |      |
|--|------|
| Figur 1-1. Vedovn med varmelager på sidene .....   | 2 -  |
| Figur 2-1. Temperaturendring ved kun følbare varmelagring og ved latent varmelagring med faseovergang [3].....   | 4 -  |
| Figur 2-2. Oversikt over materialer for varmelagring med vekt på PCM [6].....  | 5 -  |
| Figur 2-3. Nedkjøling av salhydratet $\text{NaOAc}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ved en omgivelsestemperatur på $40^\circ\text{C}$ , med ca. $2^\circ\text{C}$ underkjøling [3]..... | 8 -  |
| Figur 2-4. Aluminiumskum .....   | 9 -  |
| Figur 2-5. PCM materialklasser som funksjon av smelteentalpi og smeltetemperatur [3].....  | 10 - |
| Figur 2-6. Natriumacetat trihydrat i fast form .....   | 16 - |
| Figur 2-7. Sukkeralkoholet erythritol i fast form .....  | 18 - |
| Figur 2-8 Faseovergang som en distinkt front og som et kontinuerlig sjikt [21] .....   | 19 - |
| Figur 2-9. Varmekapasitet- og entalpifunksjoner for PCM bestående av én komponent og flere komponenter .....   | 20 - |
| Figur 3-1. Varmelager på siden av ovnen med konveksjonskjøling.....  | 24 - |
| Figur 3-2. Virkemåte for termiske aktuatorer og kommersiell utgave [29] .....  | 25 - |
| Figur 3-3. Varmelager på siden av ovnen, med fri luftgjennomstrømning og spjeld og stråleskjold .....  | 26 - |
| Figur 3-4. Termiske sjalusier [31].....  | 27 - |
| Figur 3-5. Skisse av varmerør med hovedkomponenter og prinsipp for virkemåte [37] .....  | 29 - |
| Figur 3-6. Varmelager på veggen, med varmerørkrets og ekspanderende væskelager ..  | 31 - |
| Figur 3-7. Skisse av varmelager med utvendige finner, for økt varmetransport til omgivelsene .....   | 32 - |
| Figur 4-1. Valgt konsept for varmelager for vedovn .....   | 33 - |
| Figur 4-2. Skisse av prinsippet for aksesymmetri .....   | 35 - |
| Figur 4-3. Konsept for varmelager med fire konsentriske finner .....   | 35 - |
| Figur 4-4. Konsept for varmelager med radielle finner .....  | 36 - |
| Figur 4-5. Finneløsning for 3D modell og utsnitt av 3D modellen sett ovenfra med to halve finner inkludert .....   | 37 - |
| Figur 4-6. De ulike deler 3D-modellen består av .....  | 38 - |
| Figur 4-7. Utsnitt av 3D-modellen benyttet i simuleringene .....   | 38 - |
| Figur 4-8. Tverrsnitt av den aksesymmetriske modellen med materialer.....  | 40 - |
| Figur 4-9. Tverrsnitt av 3D-modellen med materialer.....   | 41 - |
| Figur 4-10. Varmekapasitet for erythritol som funksjon av temperatur.....  | 43 - |
| Figur 4-11. Grensebetingelsen temperatur på røykrør og ovnsverflate .....  | 48 - |
| Figur 4-12. Overflater som antas isolerte eller symmetriske under oppvarmingen i 3D modellen og den aksesymmetriske modellen .....   | 49 - |

|  |      |
|--|------|
| Figur 4-13. 3D modell med grensebetingelsen "stråling mellom overflater" og "stråling mot omgivelser" .....              | 50 - |
| Figur 4-14. Maskenett benyttet i simuleringene for aksesymmetrisk modell og 3D-modell .....                              | 51 - |
| Figur 4-15. Utsnitt av maskenettet, med rektangulære masker på fluidsiden for nøyaktig beregning av grensesjikt .....    | 51 - |
| Figur 4-16. Punkter i den aksesymmetriske modellen hvor temperaturene hentes fra .                                       | 52 - |
| Figur 4-17. Temperaturforløpet i ulike deler av PCM med fire finner og lukket spjeld                                     | 53 - |
| Figur 4-18. Temperaturforløpet i ulike deler av PCM med fire finner og åpent spjeld                                      | 53 - |
| Figur 4-19. Indre energi i fasefronten etter 1.5 timer .....   | 54 - |
| Figur 4-20. Punkter i den aksesymmetriske modellen hvor temperaturene hentes fra .                                       | 54 - |
| Figur 4-21. Temperaturutviklingen i ulike deler av PCM under oppvarming, med seks finner og lukket spjeld .....          | 55 - |
| Figur 4-22. Temperaturutviklingen i ulike deler av PCM, med seks finner og åpent spjeld .....                            | 55 - |
| Figur 4-23. Skisse over PCM-området i 3D- modellen, med punktene hvor temperaturene hentes fra inntegnet i et plan ..... | 57 - |
| Figur 4-24. Temperaturutvikling i ulike deler av PCM under oppvarmingsforløpet for 3D-modellen .....                     | 58 - |
| Figur 4-25. Nedkjølingsforløpet i ulike deler av PCM i den aksesymmetriske modellen .....                                | 59 - |
| Figur 4-26. Fasefronten vist som en økning i indre energi etter 20 minutter og etter Fire timer .....                    | 60 - |
| Figur 4-27. Nedkjølingsforløpet for sideflatene på den aksesymmetriske modellen .....                                    | 61 - |
| Figur 4-28. Avgitt varme fra varmelageret til røykrøret og rommet .....  | 61 - |
| Figur 5-1. Temperaturplot og hastighetsplot for modell uten stråleskjold .....   | 66 - |
| Figur 5-2. Temperaturplot og hastighetsplot for modell med stråleskjold .....  | 67 - |
| Figur 5-3. Temperatur som funksjon av stråleskjoldets høyde .....  | 67 - |

# Kapittel 1

## 1 Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Norge og Norden har lange tradisjoner for bruk av ildsteder i form av vedovner, og hvert år brennes over 1.3 millioner tonn ved i norske boliger [1]. Det meste av denne veden er hugget i nærområdene og er dermed kortreist. CO<sub>2</sub> som frigjøres ved forbrenning tas opp i voksende trær og inngår i det naturlige CO<sub>2</sub>-kretsløpet. Ved er en fornybar ressurs, og vedfyring anses å være 100 % klimanøytralt. Nye ovner utnytter inntil 82 % av energien i en kubbe, og ovner med 90 % utnyttelsesgrad er under utvikling. Til sammenligning utnytter kullkraft mindre enn 50 % av energien i kull [1].

Det store fokuset på isolasjon ved bygging av nye, så vel som ved restaurering av gamle bygninger, har ført til lavere behov for oppvarming. De fleste vedovner som er i bruk i dag har for stor effekt i forhold til moderne boligens varmebehov, og mange skrur ned tilførselen av forbrenningsluft for å redusere varmen. I verste fall forsøker brukeren å fyre natten over ved å redusere luften til et absolutt minimum, noe som resulterer i høye utslipp av skadelige gasser og partikler.

Det er ønskelig å jevne ut effekttoppene knyttet til et fyringsforløp, og dette kan oppnås ved å integrere et varmelager. Lageret tar opp varme i løpet av noen gjentatte fyringssykluser, og avgir deretter varmen til romluften over en lengre tidsperiode. Dersom varmelageret kan opprettholde romtemperaturen gjennom natten, vil det bidra til at uhensiktsmessig fyringsadferd hos brukeren unngås.

Tradisjonelt har termiske lagre for vedovn bestått av kleberstein eller keramikk. I denne rapporten skal bruk av såkalt faseovergangsmaterialer (PCM, Phase Change Material) som lagringsmedium undersøkes. Den største fordelen ved å benytte PCM, er at både vekt og volum reduseres for samme mengde lagret varme. Det er videre ønskelig å redusere overflatetemperaturene på vedovn og varmelager, da varme overflater genererer brent støv. Brent støv gir dårlig inn klima og er uheldig for astmatikere. Bruken av faseovergangsmaterialer gir kontrollerte overflatetemperaturene og stabil varmeavgivelse, ettersom de kan velges med passende lav operativ temperatur (smeltetemperatur).

## 1.2 Mål

Målet med denne oppgaven er å undersøke latent varmelagring for vedovn. En slik bruk av latent varmelagring er ikke tidligere rapportert i litteraturen, og oppgaven er ment å være en første gjennomkjøring av problemet. De ulike gruppene PCM skal kartlegges, og egnede kandidater for varmelagring for vedovn skal foreslås. Videre skal metoder for å unngå overoppheting av de aktuelle materialene undersøkes. Et konsept for varmelagring med én eller flere av disse metodene i bruk skal modelleres, og det skal utføres numeriske beregninger på modellen. Hensikten er å undersøke hvordan et beregningsprogram som COMSOL Multiphysics® kan benyttes for å utvikle et slikt konsept. På dette stadiet er ikke koblingen mellom vedovnen og lageret fullt ut kjent, og det inngår ikke i oppgaven å modellere selve forbrenningsforløpet til ovnen eller å utarbeide funksjoner for realistiske overflatetemperaturer på ovnsveggene. Målet med oppgaven er å etablere en modell av konseptet der det gjøres antagelser om ovnens overflatetemperatur og røykgassens temperatur, og studere oppvarmingen og nedkjølingen av lageret separat. I videre arbeid skal modellen forbedres og optimaliseres.

## 1.3 Oppbygging av rapport

Denne oppgaven er inndelt i seks kapitler. *Kapittel 1* inneholder en gjennomgang av varmelagring med faseovergangsmaterialer. Her er de ulike materialklassene presentert, og to kandidater for varmelagring i vedovn er foreslått. *Kapittel 3* tar for seg ulike metoder for å unngå overoppheting av PCM. I *kapittel 4* beskrives et konsept for et varmelager, og hvordan den numeriske modellen av konseptet er satt opp. Resultatet av oppvarmings- og nedkjølingssykluser er presentert og diskutert i dette kapittelet. I *kapittel 5* er det gjort en vurdering av et alternativt konsept for temperaturkontroll av faseovergangsmaterialet, og *kapittel 6* inneholder konklusjoner og forslag til videre arbeid. I vedlegget er noen flere resultater fra simuleringene vist, samt et flytdiagram med oversikt over de forskningsområdene som er aktuelle ved utvikling av latente varmelagringssystemer.



Figur 1-1. Vedovn med varmelager på sidene



## Kapittel 2

# 2 Faseovergangsmaterialer (PCM, Phase Change Material)

Energilagring generelt, og faseovergangsmaterialer spesielt, har vært viktige tema i forskningen de siste 20 årene, og det finnes svært mye og variert informasjon i litteraturen. Ved gjennomføring av dette litteraturstudiet har et utvalg artikler fra tilgjengelige databaser ved NTNU blitt vurdert, samt to relevante bøker. Den første boken er utgitt av Dincer og Rosen [2], og er et omfattende verk om termisk energilagring hvor latent varmelagring har fått en sentral plass. Den andre boken ble utgitt i 2008 av Mehling og Cabeza [3], og tar i sin helhet for seg varmelagring med PCM. Andre viktige referanser i forbindelse med faseovergangsmaterialer er Zalba et al. [4], Lane [5], Abhat [6], Agyem [7], Kenisarin [8] og Sharma et al. [9].

### 2.1 Metoder for termisk energilagring

Termisk energilagring (varmelagring) er en viktig del av løsningen på verdens energiproblemer. Minkende energiressurser og stigende energipriser har gjort energieffektivisering lønnsomt. Varmelagring er nyttig der det finnes en tidsforsinkelse mellom tilgjengelig energi og behov (solenergi, kraft-varmeproduksjon o.l.), behov for temperaturkontroll (bygninger, elektronikk o.l.) eller behov for forsyningsikkerhet (sykehus, datasentraler o.l.) [2, 4]. Varmelagring klassifiseres ofte etter varigheten på lagringen. For eksempel snakker man om døgnlagring og sesonglagring for solvarme. Varmelagring i vedovner kan betegnes som korttidslagring, der varmen samles opp i løpet av noen timers fyringsforløp og avgis over et lengre tidsrom, for eksempel over natten.

Metoder for termisk energilagring kan deles inn i kjemiske og fysiske prosesser, der de fysiske prosessene igjen kan deles inn i følsom varme og latent varme. For å kunne lagre og hente ut varme eller kulde fra et varmelager, må metoden være reversibel. Kjemiske reaksjoner med høy reaksjonsvarme kan benyttes til lagring dersom produktet kan lagres og frigis når den motsatte reaksjonen finner sted, men av tekniske og økonomiske grunner benyttes de sjeldent i praktiske applikasjoner [7].

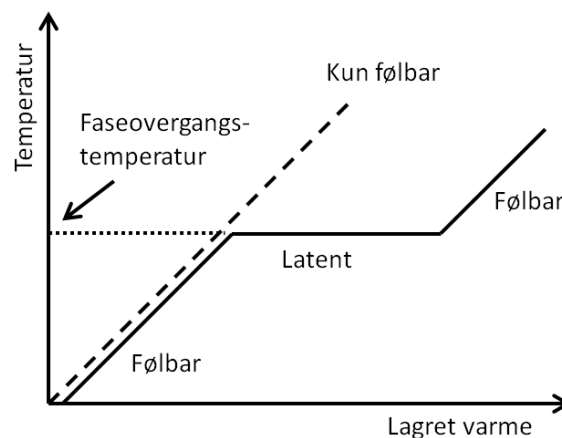
Den vanligste metoden for termisk energilagring er lagring som *følbar* varme (eng. sensible heat), som betyr at varmen som overføres til lagringsmediet fører til en merkbar temperaturøkning. Dette er tilfellet med varmelagring i stein, luft, olje, jord og sand, eller i vann, som benyttes i mange boliger til lagring av varmtvann. Materialets varmekapasitet bestemmer hvor mye varme som kan lagres ved en bestemt temperaturøkning, og oppgis per mol, volum eller masse. Denne ønskes så høy som mulig, slik at varmen kan

konsentreres. Gasser har generelt lav volumetrisk varmekapasitet, noe som gjør dem uegnet som lagringsmedium [2]. Tradisjonelle vedovner med varmelager lagrer energien som følbare varme, ved å benytte lagringsmaterialer som keramikk eller kleberstein [10]. Varmen som kan lagres i en gitt masse av materialet, er uttrykt i Ligning 2.1 [9].

$$Q = mC_p\Delta T = \rho C_p V \Delta T \quad (2.1)$$

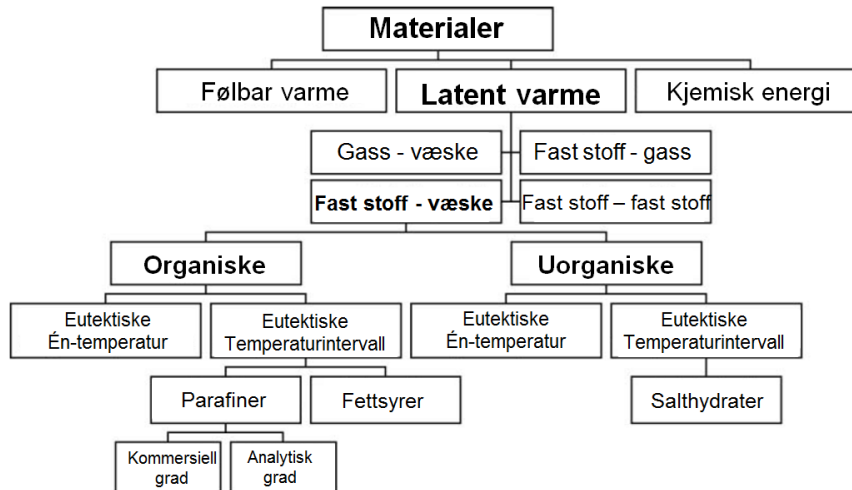
$Q$  [kJ] er varmen som lagres i massen  $m$  er massen,  $C_p$  er materialets varmekapasitet,  $\rho$  er tetthet,  $V$  er volum og  $\Delta T$  er endringen i temperatur.

En alternativ måte å lagre varme på er lagring som *latent* varme. Latent varmelagring er en attraktiv metode sammenlignet med lagring som følbare varme, da 5-14 ganger mer varme per enhetsvolum kan lagres ved tilnærmet konstant temperatur [9]. Når termisk energi lagres som latent varme benyttes faseovergangen til materialet. Det mest kjente eksempelet er bruk av is til kjøling, der smeltingen skjer ved konstant temperatur. Andre bruksområder er temperaturkontroll i bygninger, varmepumper, kuldelagring, elektronikk, solvarme, termisk komfort i kjøretøy, romfart, intelligente klær og kommersielle håndvarmere.



Figur 2-1. Temperaturendring ved kun følbare varmelagring (stiplet linje) og ved latent varmelagring med faseovergang (heltrukket linje) [3]

Figur 2-1 viser temperatureøkningen i to materialer som blir varmet opp. Den stiplete linjen er temperaturendringen i et materiale som ikke gjennomgår faseovergang, og all varmetilførsel fører til temperatureøkning i materialet. Den andre linjen viser oppvarmingen av et PCM, hvor en del av varmen tas opp ved konstant temperatur. Varmen som tas opp under faseovergang kalles *latent varme*, fusjonsentalpi eller smelteentalpi – dersom faseovergangen er fra fast stoff til væske. Latent varme oppgis vanligvis i energi per masse [3]. I 1983 gav Abhat [6] en nyttig klassifisering av materialer brukt for termiske lagringssystemer med fokus på latent varmelagring, som vist i Figur 2-2.



Figur 2-2. Oversikt over materialer for varmelagring med vekt på PCM [6]

Faseoverganger kan skje på fire måter; fra fast stoff til fast stoff, fra fast stoff til væske, fra væske til gass og direkte fra fast stoff til gass, som inndelingen i Figur 2-2 viser. Fast stoff-fast stoff-overganger skyldes omstruktureringer i materialet og har vanligvis lav latent varme. På grunn av store volumendringer er væske-gass-overgangen uegnet for varmelagring i lukkede beholdere, selv om denne overgangen ofte har stor latent varme [2, 11]. Faseovergangen som oftest benyttes ved lagring av termisk energi er fast stoff-væske, og det er denne formen som diskuteres videre. Ved smelting tar faseovergangsmaterialet opp store mengder energi fra omgivelsene, og den samme energien frigis ved størkning [2]. Før materialet oppnår smeltetemperatur, og etter at smeltingen er fullført, vil varmetilførsel føre til følbare varmelagring, som vist før og etter det flate partiet i Figur 2-1. Varmen som kan lagres i en gitt masse PCM, er uttrykt i Ligning 2.2 og Ligning 2.3 [9].

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m h_{sl} + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (2.2)$$

$$Q = m[C_{ps}(T_m - T_i) + a_m h_{sl} + C_{pl}(T_f - T_m)] \quad (2.3)$$

$Q$  er total mengde varme lagret i et faseovergangsmateriale med masse  $m$ , som varmes opp fra temperatur  $T_i$  til smeltetemperaturen  $T_m$ , og videre til temperatur  $T_f$ .  $h_{sl}$  er materialets latente varme (smelteentalpi) og  $a_m$  er smeltefraksjonen.  $C_{ps}$  er gjennomsnittlig varmekapasitet mellom  $T_i$  og  $T_m$ , i fast stoff, og  $C_{pl}$  er gjennomsnittlig varmekapasitet mellom  $T_m$  og  $T_f$ , i væske.

## 2.2 Materialeegenskaper

Siden man begynte å forske på faseovergangsmaterialer på 80-tallet har sannsynligvis flere tusen stoffer og blandinger blitt studert og vurdert. Likevel er bare et fåtall kommersialisert [4].

Den vanligste metoden å fastslå termiske egenskaper hos PCM, er DTA (Differential Thermal Analysis) og DSC (Differential Scanning Calorimetry). Resultater oppnådd ved bruk av disse kan avvike betydelig fra andre, mer omfattende termo-fysiske metoder [8]. Ofte analyseres kun små mengder stoff selv om oppførselen til PCM til dels avhenger av kvantitet [12]. De betydelige avvikene i publisert data for egenskaper hos PCM, viser at nøyaktigheten ved bruk av de vanlige metodene ikke er tilstrekkelig høy. Det mangler standardiserte metoder å fastsette egenskaper hos PCM, og det anbefales derfor å gjøre egne DSC-målinger med materialet som skal benyttes [8]. Dessverre er slike metoder både kompliserte og kostbare.

Fordi mange PCM består av flere stoffer, har de ikke bare én smeltetemperatur men et smelteområde og materialeegenskapene er funksjoner av temperatur. Per i dag finnes det sjeldent tilstrekkelig nøyaktig data om varmekapasitet, konduktivitet, tetthet og entalpi for PCM som funksjon av temperatur. Ofte er kun én verdi for fast stoff og én for væske tilgjengelig, noe som medfører betydelig usikkerhet for resultatene ved numeriske beregninger.

## 2.3 Krav til PCM for termisk energilagring

Noen materialegenskaper er særlig viktige for at et faseovergangsmateriale skal kunne benyttes til varmelagring. Derfor er et sett med kriterier som gjelder generelt, presentert i dette kapittelet. I det enorme utvalget av faseovergangsmaterialer er det en utfordring å velge passende materiale for en gitt situasjon.

Normalt sett er ikke ett materiale i stand til å oppfylle alle kriteriene, og det er nødvendig å prioritere enkelte egenskaper, og utvikle strategier for å takle problemene [2, 9]. Lane et al. 1983 [5] har diskutert disse kriteriene og hvordan velge kandidatmaterialer, og der finner man også en beskrivelse av måter å overkomme problemer knyttet til de ulike materialene.

To opplagte krav til materiale er en passende smeltetemperatur og høy latent varme. Vanligvis blir et førstevalg tatt på basis av krav til smeltetemperatur, smelteentalpi, syklusstabilitet og underkjøling. I tillegg finnes det en rekke andre ønskede egenskaper for PCM, som kan deles inn i fysiske, tekniske og økonomiske kriterier [3].

### Fysiske kriterier

- Passende smeltetemperatur
- Høy smelteentalpi
- Høy tetthet
- Stabilitet ved gjentatte lagringssykluser
- Lite eller ingen underkjøling
- Moderat/høy konduktivitet i smelte og fast stoff

### Tekniske kriterier

- Lavt damptrykk
- Liten volumendring
- Kjemisk stabilitet
- Kompatibilitet med andre materialer
- Sikkerhetsbegrensninger
- Ikke giftig, brennbart eller forurensende

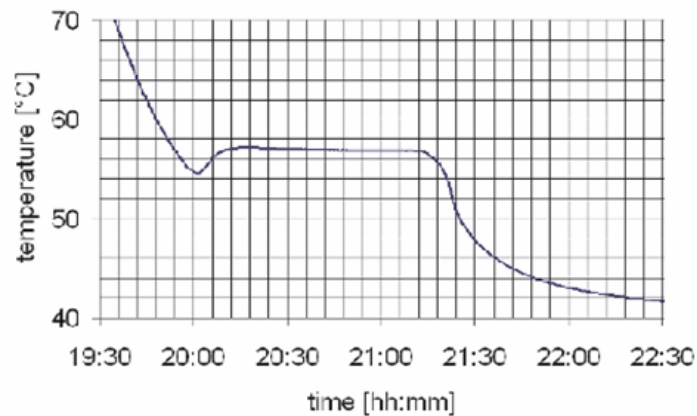
### Økonomiske kriterier

- Lav pris
- Lett å få tak i
- Mulighet for resirkulering (økonomi og miljø)

Smeltetemperaturen kan være én temperatur for stoffer bestående av én komponent, eller et temperaturintervall som er tilfellet for blandinger. Smelteentalpien ønskes så høy som mulig for å redusere vekten på varmelageret. Dersom også stoffets tetthet er høy, vil en kunne lagre en stor mengde varme per volum [2].

Stabiliteten til faseovergangsmaterialet er avgjørende for levetiden til lageret, og for lønnsomheten av investeringen. Det er derfor svært viktig at materialet kan gjennomgå mange sykluser av oppvarming og nedkjøling uten å degradere eller få utfelling av komponenter. Materialeegenskapene bør fortrinnsvis være uendret gjennom gjentatte sykluser. Det gjelder særlig den latente varmen.

Underkjøling (eng. subcooling, supercooling) er et fenomen som observeres hos mange PCM. Underkjøling har ingen betydning under oppvarmingen av PCM, men viser seg under avkjølingen ved at den latente varmen ikke ved frigis smeltetemperaturen. Faseovergangsmaterialet må kjøles ned til en temperatur som ligger *lavere* enn smeltetemperaturen, før krystalliseringsprosessen setter i gang. Figur 2-3 viser effekten av underkjøling ved et nedkjølingsforløp med NaOAc·3H<sub>2</sub>O. Etter at krystalliseringen har startet ved en temperatur på ca. 55 °C, stiger temperaturen raskt til den når smeltetemperaturen på 57 °C. For å motvirke denne effekten kan man tilsette krystalldannende ingredienser, noe som gjøres med mange kommersielle PCM [2].



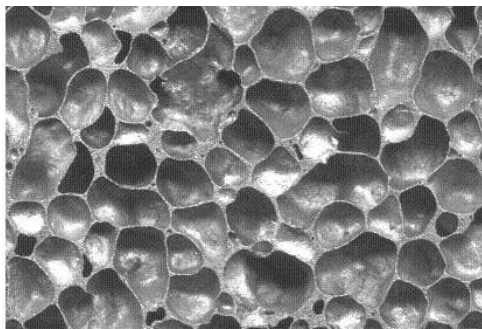
**Figur 2-3. Nedkjøling av salthydratet NaOAc·3H<sub>2</sub>O ved en omgivelsestemperatur på 40°C, med ca. 2°C underkjøling [3]**

Alle ikke-metalliske væsker, inkludert PCM, har lav termisk varmeledningsevne/konduktivitet [3]. Fordi PCM lagrer store mengder varme i et lite volum, og det er nødvendig å transportere varmen ut av lageret for å benytte den, kan lav termisk konduktivitet være et problem. I væskefase kan konveksjonseffekter øke varmetransporten, men ofte ikke tilstrekkelig, og i fast stoff er det ingen konveksjon.

Når det er nødvendig med rask varmeoverføring, kan én måte å øke konduktiviteten på være å tilsette materialer med høy termisk konduktivitet. Dette kan for eksempel gjøres

ved innsetting av metallstrukturer i PCM som for eksempel finner eller grafittmatriser, eller ved å tilsette høykonduktivetspartikler, som for eksempel grafittpulver og fiber. Sistnevnte kan imidlertid medføre problemer med utfelling [7, 8]. Imidlertid vil det å tilsette noe til PCM være med på å redusere konveksjonseffekten i smeltefasen, derfor er det nødvendig å undersøke hva som har størst effekt på varmeoverføringen [3].

Et alternativ er å sette PCM inn i metallskum. Teknologien for å produsere metallskum av ulik porøsitet og struktur, har avansert betraktelig de siste årene. Hackeschmidt et al. [3] har testet parafin som PCM med ulike aluminiumskum. Resultatene viser at med en tetthet på 6 %, det vil si 94 % porøsitet, kan man oppnå termisk konduktivitet på hele 6 W/mK.



**Figur 2-4. Aluminiumskum**

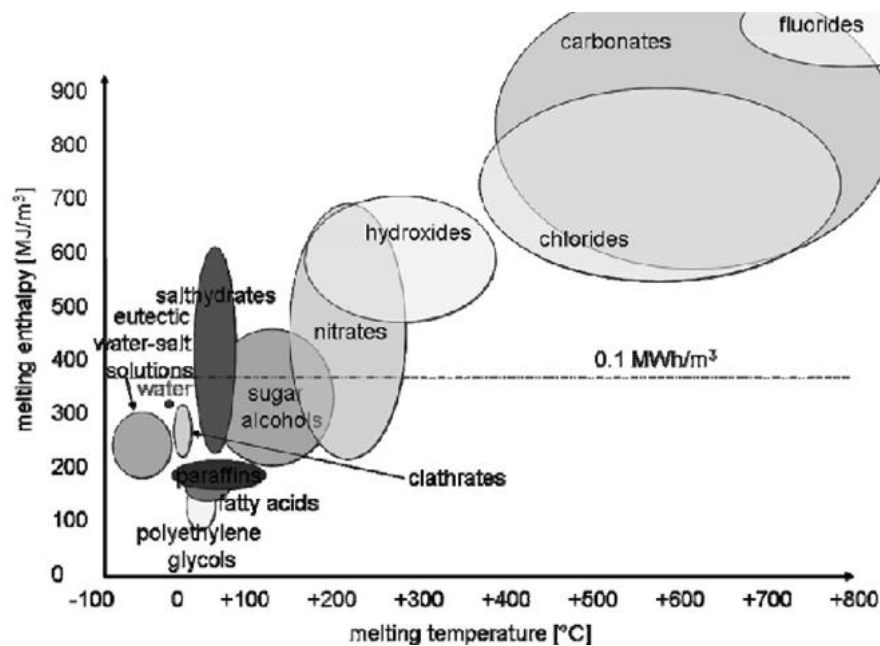
Et annet alternativ er å innkapsles PCM i mindre celler (kuler, rektangulære panel osv.) bestående av alt fra noen gram til et kg PCM. Dette forbedrer i mange tilfeller varmeoverføringen, i tillegg til at enhetene blir lettere å håndtere, har mindre faseparasjon og en selvstøttende struktur [13].

Faseovergang ledsages ofte av en endring i volum, opp til 10 %. Volumendring og damptrykk ønskes så lite som mulig, da det medfører større krav til tetthet og styrke for beholderen eller kapselen som inneslutter materialet. Faseovergangsmaterialet bør heller ikke reagere kjemisk med andre materialer, for eksempel ved korrosjon.

Fortrinnsvis bør materialet finnes i overflod i naturen, være trygt å håndtere og ufarlig dersom det kommer i kontakt med omgivelsene. Kostnadene bør også være så lave som mulig for å kunne konkurrere med alternative lagringssystemer [3].

## 2.4 Materialklasser

Fordi smeltetemperatur og smelteentalpi avhenger av molekylære effekter, vil materialer innenfor samme klasse oppføre seg lignende [3]. I Figur 2-5 er en slik lineær sammenheng vist. Tendensen er at jo høyere smeltetemperatur et stoff har, desto høyere er den latente varmen. For temperaturer under 0°C brukes vanligvis eutektiske vann-salt-løsninger. Mange materialklasser dekker temperaturene 0 °C -130 °C, for eksempel organiske materialer som parafiner, fettsyrer og sukkeralkoholer og uorganiske materialer som salhydrater. Ved temperaturer over 150°C kan ulike salter og saltblandinger benyttes [3].



Figur 2-5. PCM materialklasser som funksjon av smelteentalpi og smeltetemperatur [3]

De to hovedklassene PCM er organiske og uorganiske materialer, som oversikten i Figur 2-2 viser. De organiske materialene dekker temperaturområde mellom 0°C og 200°C. På grunn av kovalente bånd i organisk materiale er de færreste stabile ved høye temperaturer. I de fleste tilfeller er tettheten til organisk materiale lavere enn hos de uorganiske, og de har (med unntak av sukkeralkoholene) lavere smelteentalpi per volum [3].

De uorganiske materialene dekker et stort temperaturområde. Deres største ulempe er materialkompatibiliteten med metaller, da alvorlig korrosjon kan utvikles i noen kombinasjoner av metall og PCM. Salhydrater velges ofte på grunn av deres høye volumetriske latente varme, men de sliter med problemer som underkjøling og dekomponering ved smelting. Fordeler og ulemper for organiske og uorganiske materialer er presentert i Tabell 1. Videre følger en oversikt over de viktigste gruppene PCM.



Tabell 1 – Fordeler og ulemper med organisk og uorganisk PCM [12]

| Organiske  | Uorganiske  |
|--|---|
| <b>Fordeler</b><br>-Ingen korrosjon<br>-Lite eller ingen underkjøling<br>-Kjemisk og termisk stabilitet<br>-Lavt damptrykk | <b>Fordeler</b><br>-Høy smelteentalpi<br>-Relativt høy termisk konduktivitet<br>-Lavere kostnader |
| <b>Ulemper</b><br>-Lavere smelteentalpi<br>-Lav termisk konduktivitet<br>-Eksplosjonsfare                                  | <b>Ulemper</b><br>-Underkjøling<br>-Korrosjon<br>-Faseseparasjon<br>-Lav termisk stabilitet       |

#### 2.4.1 Eutektiske vann-salt løsninger og klatrater

For temperaturer under 0°C brukes vanligvis vann-salt løsninger med eutektisk sammensetning. Termisk konduktivitet og underkjøling er omtrent som for vann, men smeltetemperaturen er lavere på grunn av det tilsatte saltet [3]. Eutektiske sammensetninger brukes for å unngå faseseparasjon og oppnå god stabilitet. Komponentene størkner simultant fra væske ved et minimums frysepunkt, og dermed kan ingen av fasene synke til bunns på grunn av ulik tetthet. De er generelt kjemisk stabile men kan forårsake korrosjon hos andre materialer som metaller, og de gjennomgår betydelige volumforandringer ved smelting og størkning. De fleste løsningene er ufarlige og forholdsvis billige med god lagringstetthet, og blir derfor brukt i stor-skala PCM-applikasjoner [3].

En klasse som er verken organisk eller uorganisk er klatratene, som dekker temperaturområde fra ca. 0 °C til 30 °C . Disse smelter *kongruent*, som vil si at sammensetningen av begge faser er den samme før og etter smeltingen, og de kan også underkjøle [3, 14].

#### 2.4.2 Salthydrater

Salthydrater utgjør en viktig klasse blant faseovergangsmaterialene på grunn av høy volumetrisk varmelagringstetthet, ca. 350 MJ/m<sup>3</sup> [15]. De består av salter med stor og definert mengde krystallvann, og på grunn av den stabile krystallstrukturen til salthydratene, er smeltetemperaturen høyere enn for vann. Salthydratene dekker temperaturområdet mellom 5°C og 130°C. Termisk konduktivitet er relativt høy i forhold til andre PCM, ca. 0.6 W/mK [2].

Fase-separasjon er et vanlig problem blant salhydrater [12]. På grunn av ulik tetthet hos komponentene, vil ofte noe skilles ut og synke som bunnfall. Et annet problem er at de fleste salhydrater underkjøler, noen så mye som 80°C. Hos de kommersielle salhydratene er gjerne sammensetningen av stoffet endret for å overkomme noen av disse problemene, for eksempel ved at en nukleator (eng. nucleating agent) er tilsatt eller materialet er tyknet [3].

Det anbefales å bruke hermetisk lukkede beholdere for salhydrater for å hindre uttørring, og det må tas hensyn til volumendringen, som er opp mot 10 %. Salhydrater med mye vann har høyere latent varme, men også høyere damptrykk [2]. Damptrykket er generelt noe lavere enn for vann, selv om de som smelter nært 100°C eller over viser et betydelig damptrykk ved smelting.

Salhydrater er i de fleste tilfeller kjemisk stabile, men mange er potensielt korrosive til metaller. Generelt er de verken giftige eller brennbare [2]. De er også forholdsvis billige, om enn ikke i ren form [3]. Et eksempel på et kommersielt og mye anvendt salhydrat, særlig i solenergi-sammenheng, er Glauber salt (31.5°C, 280 kJ/kg,) [2, 15].

### 2.4.3 Parafiner

Parafiner er det mest brukte faseovergangsmaterialet og har voksaktig konsistens ved romtemperatur. Smeltetemperatur varierer mellom 4°C og 70°C og de har moderat lagringstetthet på ca. 200 kJ/kg eller 150 MJ/m<sup>3</sup> [15].

Parafiner smelter og størkner med lite eller ingen underkjøling, og damptrykk er av liten betydning [2]. Volumøkning ved smelting er opp mot 10 vol % som er felles for mange av de uorganiske materialene, men parafin er mykere og bygger opp mindre krefter under ekspansjonen [2]. Parafin er vannavstøtende og reagerer sjelden med andre kjemiske komponenter. Generelt er de brennbare men har ellers få sikkerhetsbegrensninger [3]. De fleste går godt sammen med metaller og legeringer, men kan reagere med plastikk [2]. Det er enighet blant forskere om at gjentatte sykluser ikke degraderer den termiske oppførselen til parafin, og at de har generelt god stabilitet [4, 9, 12].

Til tross for de mange gode egenskapene, har parafiner svært lav termisk konduktivitet, ca. 0.2 W/mK, som begrenser bruken av dem og stiller krav om store varmeoverføringsoverflater. De er ikke egnet for høye temperaturer, da parafinbindingene kan brytes ned og molekyler fordampe. Rene alkaner er dyrt, så kommersielle parafiner stammer vanligvis fra petroleums-destillasjon og inneholder ulike hydrokarboner, noe som senker smeltetemperatur- og entalpien noe [11]. En parafin som er mye anvendt som PCM er parafinvoks [9].

#### 2.4.4 Fettsyrer

Fettsyrene kjennetegnes av strukturen  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ . Smeltetemperaturer varierer mellom  $-5^\circ\text{C}$  og  $71^\circ\text{C}$  med smelteentalpier på mellom 45 og 210 kJ/kg [8]. Fordi de består av kun én komponent kan det ikke oppstå fase-separasjon, og de kan derfor brukes igjen og igjen. Som parafinene har de lite eller ingen underkjøling, og lav termisk konduktivitet [3]. Fettsyrenes ulempe er pris, som ofte er 2-2.5 ganger høyere enn for parafiner, samt sterk lukt. Ettersom de har ideelle smelte- og fryse-karakteristikker kan de bli svært aktuelle for varmelagring dersom prisene synker [2]. Materialene er svært brennbare og bør ikke eksponeres for høye temperaturer eller flammer [9].

#### 2.4.5 Sukkeralkoholer

Sukkeralkoholer er en relativt ny materialklasse og det er begrenset informasjon tilgjengelig. De har smeltetemperaturer i området  $90^\circ\text{C}$  til  $200^\circ\text{C}$ , og de fleste har høy massespesifikk smelteentalpi, noen opptil 340 kJ/kg. I tillegg er tettheten høy, noe som resulterer i høye volumspesifikke smelteentalpier. I motsetning til de andre organiske materialene viser sukkeralkoholene noe underkjøling, og de har noe høyere konduktivitet [3]. Blant andre Agyenim [7], Kaizawa [16], Kaikuchi [17] og Shukla [18] har studert sukkeralkoholer, og funnet at erythritol har egenskaper som gjør det til et egnet PCM for varmelagring.

#### 2.4.6 Saltblandinger

Ved temperaturer over  $150^\circ\text{C}$  kan ulike salter (nitrater) brukes. Fordi smelteentalpien øker proporsjonalt med smeltetemperaturen har disse ofte høy smelteentalpi. Et salt består alltid av to komponenter, men i de fleste tilfeller er likevel ikke fase-separasjon mulig [3]. Termisk konduktivitet for salter kan være ganske god, underkjølingseffekten er ikke mer en et par grader og damptrykket svært lavt. Saltene har som regel betydelig volumendring fra fast form til væske, opp til 10 vol %. Både pris og sikkerhet varierer mye blant de ulike saltene [3].

## 2.5 Vurdering av PCM for en vedovn

I tillegg til kriteriene diskutert i kapittel 2.2, stilles det noen ytterligere krav til et lagringsmedium for en vedovn. Faseovergangsmaterialet må være et fast stoff ved stuetemperatur, smelte ved varmepåvirkning fra en vedovn, samt ha høy makstemperatur. Ved valg av smeltetemperatur er man forholdsvis fleksibel. Lageret skal ikke tilpasses én bestemt ovn, og det er mulig å ta ut varme over en rekke temperaturer. Som en første tilnærming antas det at smeltetemperaturen skal ligge mellom 45°C og 170°C og ha så høy smelteentalpi, tetthet og makstemperatur som mulig. For å kunne konkurrere med andre lagringsmuligheter som kleberstein må den også være økonomisk konkurransedyktig, og fortrinnsvis passiv i drift.

På grunn av de lave smeltetemperaturene er verken eutektiske vann-salt-løsninger eller klatrater egnet for varmelagring i vedovn. Det gjelder også for saltblandingene, som på grunn av høye smeltetemperaturer sannsynligvis ikke rekker å fullføre smeltingen på et fyringsforløp, og som vil gi uønskede høye temperaturer på overflatene på lageret ved varmeavgivelse. Saltydratene har høy smelteentalpi og bruken av dem er utbredt, noe som gjør dem til en aktuell materialklasse. Noen materialer verd å nevne her er natriumacetat trihydrat og magnesium hexahydrat, hvorav sistnevnte har vist seg å ha stabil latent varme gjennom 1000 termiske sykluser [8]. Bruken av disse medfører riktignok bruk av nukleatorer og tykkelsesagenter for å minimere underkjøling og faseparasjon.

En aktuell kandidat blant parafinene er den kommersielle P116. Parafiner kan være egnet på grunn av god stabilitet, men velges bort på grunn av den lave konduktiviteten. Blant fettsyrene kan stearinsyre være aktuell. Sukkeralkoholer har mange av de gode egenskapene til organiske PCM, i tillegg til at de har eksepsjonelt høy latent varme, og relativt høy konduktivitet. Aktuelle sukkeralkoholer er erythritol, mannitol og xylitol. Mannitol kan operere ved temperaturer helt opp til 280°C og har dermed en høyere operativ  $\Delta T$  (differanse mellom smeltetemperatur og maksimaltemperatur), enn erythritol som degraderes ved 160°C [16]. Det er derimot andre ulemper ved denne, for eksempel den noe høye smeltetemperaturen, og høyere kostnader [8].

Tabell 2 – Aktuelle kandidat-PCM for varmelagring i vedovn. \* ikke oppgitt

|                                | $T_s$ [°C] | $h_{sl}$ [kJ/kg] | $k_{avg}$ [W/mK] |         |
|--------------------------------|------------|------------------|------------------|---------|
| <b>Parafin P116</b>            | 48         | 210              | -*               | [15]    |
| <b>Natriumacetat trihydrat</b> | 58         | 260              | 0.55             | [8]     |
| <b>Parafinvoks</b>             | 64         | 173.4            | 0.26             | [15]    |
| <b>Stearinsyre</b>             | 69         | 200, 210         | -*               | [8, 9]  |
| <b>Magnesium hexahydrat</b>    | 89         | 170, 163         | 0.55             | [8, 15] |
| <b>Xylitol</b>                 | 93         | 263              | -*               | [16]    |
| <b>Erythritol</b>              | 118        | 340              | 0.53             | [16]    |
| <b>Mannitol</b>                | 167        | 316              | -*               | [16]    |

På grunnlag av tabeller over tilgjengelige faseskiftmaterialer med tilhørende egenskaper, samt et utvalg artikler, er to materialer valgt som kandidater for varmelagring i vedovn; salthydratet natriumacetat-trihydrat og sukkeralkoholen erythritol. Videre følger en diskusjon av disse stoffene.

### 2.5.1 Natriumacetat trihydrat

Natriumacetat trihydrat fortjener spesiell oppmerksomhet blant faseovergangsmaterialene på grunn av den høye latente varmen, 260 kJ/kg [2]. Natriumacetat er natriumsaltet av eddiksyre, og vist i Figur 2-6. Når saltet løses i vann, krystalliserer natriumacetat med krystallvann og danner natriumacetat-trihydrat. Salthydratet er farveløst og har en svak lukt av eddik.

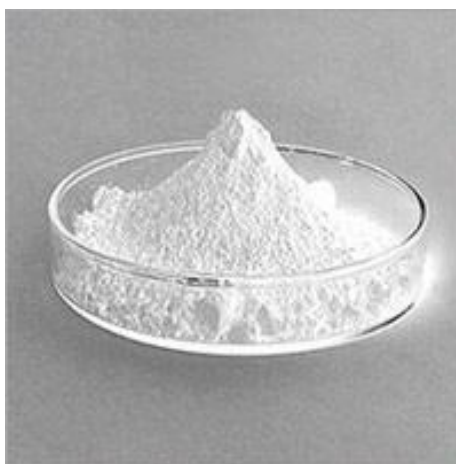
Natriumacetat trihydrat har relativt høy konduktivitet i forhold til andre organiske PCM. Det har også moderate kostnader sammenlignet med for eksempel parafinvoks. Volumendringen ved faseovergang er på ca. 9.3 % [8]

De to største utfordringene knyttet til bruk av natriumacetat trihydrat, er underkjøling før størkning og fase-separasjon. For å unngå fase-separasjon kan ulike teknikker slik som tykningsagenter, roterende lagringseenheter og direktekontakt-varmetransport benyttes [12]. «Ekstra vann-prinsippet» [12], som går ut på at for eksempel 5 % vann tilsettes løsningen, benyttes i noen tilfeller for å øke stabiliteten. Ulempen er at også lagringstettheten reduseres. Tykningsagenter (Bentonite clay) kan minske fase-separasjonen, men reduserer krystalliseringsraten og varmetransport som følge av lavere konduktivitet. Nukleatorer minsker underkjøling men krever igjen tykningsagenter for å hindre bunnfall av denne [3]. Til tross for slike problemer har mange firmaer utviklet nukleatorer og stabilisatorer for salthydrater.

Tabell 3 viser et sett av de rapporterte materialeegenskapene til natriumacetat trihydrat. Det er betydelige uoverensstemmelser i data for salhydrater i litteraturen. Data for smeltetemperatur- og entalpi varierer med opp til 10 %, og andre egenskaper opp til 50 %, avhengig av materialets renhet og bestemmelsesmetode [8].

Tabell 3 – Materialeegenskaper for natriumacetat trihydrat

|  |  |                   |
|--|--|-------------------|
| <b>Molekylformel</b>                               | Na CH <sub>3</sub> COO·3H <sub>2</sub> O | -                 |
| <b>CAS-nummer</b>                                  | 6131-90-4                                | -                 |
| <b>Molmasse</b>                                    | 136.08                                   | g/mol             |
| <b>Smeltetemperatur</b>                            | 58                                       | °C                |
| <b>Makstemperatur</b>                              | 115                                      | °C                |
| <b>Smelteentalpi</b>                               | 260±11                                   | kJ/kg             |
| <b>Spesifikk varmekapasitet, væske</b>             | 3  | kJ/kgK            |
| <b>Spesifikk varmekapasitet, fast stoff (20°C)</b> | 2.79                                     | kJ/kgK            |
| <b>Konduktivitet, væske</b>                        | 0.4                                      | W/mK              |
| <b>Konduktivitet, fast stoff (20°C)</b>            | 0.7                                      | W/mK              |
| <b>Tetthet, væske</b>                              | 1280                                     | kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Tetthet, fast stoff (20°C)</b>                  | 1420                                     | kg/m <sup>3</sup> |



Figur 2-6. Natriumacetat trihydrat i fast form

## 2.5.2 Erythritol

Erythritol er et søtningsmiddel og hovedingrediensen i Sukrin. Erythritol har ingen påviste skadelige effekter og finnes i naturen, i blant annet meloner, pærer og sopp [18]. På industrielt nivå produseres det fra glukose.

Smelteentalpien er hele 339.8 kJ/kg som er nesten like høy som for is, og i tillegg er tettheten høy. Det er også en 10 % endring i volum under fast stoff-væske-overgangen, og lageret må derfor utformes for å ta dette med i betraktningen [8].

Kakuichi et al. [17] har undersøkt ulike sukkeralkoholer, blant annet erythritol som ble funnet til å være svært attraktivt for en rekke høytemperaturapplikasjoner. Smelteentalpien ble målt med et Seiko DSC (Differential Scanning Calorimeter) og spesifikk varmekapasitet ble bestemt ved bruk av et adiabatisk kalorimeter [17]. Materialet som er undersøkt er kommersiell erythritol fra Mitsubishi Chemical Co. Et underkjøling-fenomen ble observert under de eksperimentelle forsøkene. Shukla et al. [18] har rapportert at kommersiell erythritol ikke viser tegn på degradering etter 75 sykluser, og etter 100 sykluser er smelteentalpien fortsatt over 300 kJ/kg. De observerte også at erythritol underkjølte med 15°C.

Verdiene for de termo-fysiske egenskapene for erythritol er presentert i Tabell 4 og er hentet fra Mitsubichi Chemical Co, 2005 [8, 17], med unntak av maksimaltemperaturen som oppgis av Kaizawa [16]. Erythritol er i samråd med instituttet benyttet som PCM i de numeriske beregningene.

Tabell 4 – Materialeegenskaper for erythritol

|   |   |                   |
|---|---|-------------------|
| <b>Molekylformel</b>                            | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> | -                 |
| <b>CAS-nummer</b>                               | 10030-58-7                                    | -                 |
| <b>Molmasse</b>                                 | 122.12  | g/mol             |
| <b>Smeltetemperatur</b>                         | 118   | °C                |
| <b>Makstemperatur</b>                           | 160   | °C                |
| <b>Smelteentalpi</b>                            | 339.8   | kJ/kg             |
| <b>Spesifikk varmekapasitet, væske</b>          | 2.76  | kJ/kgK            |
| <b>Spesifikk varmekapasitet, fast stoff</b>     | 1.38  | kJ/kgK            |
| <b>Termisk konduktivitet, væske (140°C)</b>     | 0.326   | W/mK              |
| <b>Termisk konduktivitet, fast stoff (20°C)</b> | 0.733   | W/mK              |
| <b>Tetthet, væske (140°C)</b>                   | 1300  | kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Tetthet, fast stoff (20°C)</b>               | 1480  | kg/m <sup>3</sup> |



**Figur 2-7. Sukkeralkoholet erythritol i fast form**



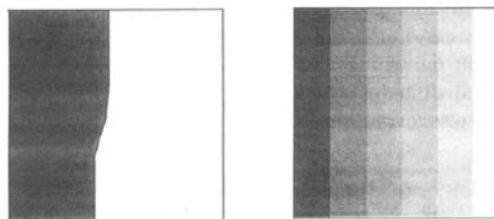
## 2.6 Numeriske beregninger av varmetransport i PCM

Varmetransport i PCM er et tidsavhengig og ulineært fenomen, med bevegelig fasegrensesnitt. Få analytiske løsninger eksisterer for faseovergangsproblemer, og begrenser seg til konduksjons-kontrollerte og én-dimensjonale problemer [19]. Numeriske metoder benyttes derfor for å oppnå tilstrekkelig nøyaktige løsninger for ulike geometrier.

PCM bestående av én komponent smelter og størkner ved en fast temperatur, og faseovergangen kan observeres som en distinkt, glatt front, som vist til venstre i Figur 2-8. Det er for eksempel tilfellet for vann og rene metaller. For å løse faseovergangsproblemer med slike materialer må posisjonen til fasefronten bestemmes. Fasefrontens posisjon beveger seg gjennom faseovergangen og forblir ukjent til hele systemet er løst, noe som medfører ekstra utfordringer [7, 19]. Løsningsmetodene som benyttes kalles frontsporingsmetoder (eng. front tracking methods), og inkluderer løsning av Ligning 2.4, hvor  $s$  og  $l$  står for fast stoff og væskefase,  $h_{sl}$  er latent varme og  $X$  er posisjonen til fasefronten [19, 20].

$$k_s \vec{\nabla} T_s - k_l \vec{\nabla} T_l = \rho h_{sl} \frac{dX}{dt} \quad (2.4)$$

Dersom faseovergangsmaterialet består av flere komponenter, vil faseovergangen skje over et temperaturområde ( $T_{m1}$ ,  $T_{m2}$ ), med en slags grøtaktig konsistens. Til høyre i Figur 2-8 er en slik overgang vist. Ved temperaturer over  $T_{m2}$  er materialet flytende og under  $T_{m1}$  er det fast stoff. For å løse denne typen problemer må temperaturdistribusjonen i alle tre områdene (fast, overgang og flytende), samt to fasefronter beregnes. Slike beregninger blir svært kompliserte, og bruk av numeriske metoder er nødvendig.



Figur 2-8 Faseovergang som en distinkt front (venstre) og som et kontinuerlig sjikt (høyre) [21]

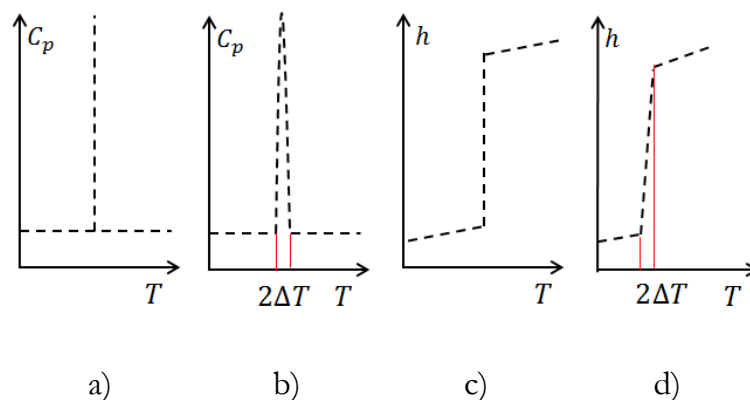
De numeriske metodene for løsning av faseovergangsproblemer kan deles inn i *klassiske løsninger* og *faste nett-løsninger* (eng. fixed grid methods). Klassiske løsninger benytter transformerte koordinatsystem eller deformerte nett for å behandle fasegrensesnittet, og kan brukes ved distinkte fasefronter, med eller uten konveksjonseffekter. Ulempen med disse er at de er vanskelige å programmere og krever lang beregningstid [19].

Faste nett-metoder er generelt enklere enn klassiske løsninger. Varmeligningen uttrykkes på en form som gjelder for hele faseovergangsområdet, både for fast stoff og væske. Posisjonen til fasegrensesnittet bestemmes etter at den konvergente temperaturdistribusjonen for området er bestemt [19]. Den latente varmen inkluderes i energiligningen ved enten å definere en entalpifunksjon, en ekvivalent varmekapasitet  $C_{pm}$  eller en varmekildeterm  $Q$  [21]. Eksempler på en slik entalpifunksjon er vist i Figur 2-9. Deretter kan den numeriske løsningen utføres på et nodenett som ikke endrer posisjon gjennom beregningen. Fordelen er at den numeriske behandlingen av faseovergangen oppnås ved enkle modifikasjoner av eksisterende numeriske varmetransportmetoder og programvare.

Faste nett-metoder løses vanligvis med differensialmetoden (eng. finite difference method) eller elementmetoden (eng. finite element method) [21]. I elementmetoden, som benyttes i denne oppgaven, er området som betraktes diskretisert i et fint nett av elementer i to eller tre dimensjoner. Typisk er disse elementene triangler, rektangler eller polyhedroner, med nodepunkter i hjørnene. Problemet får dermed et endelig antall ukjente variabler som kan løses ut for hver node [21].

De tre viktigste faste nett-metodene er entalpipimetoden, ekvivalent varmekapasitetsmetode (eng. equivalent/effective heat capacity method) og den temperatur-transformerende modellen [19]. Sistnevnte kombinerer fordelene til de to første metodene, og har muligheten til å inkludere konveksjonseffekter. Ekvivalent varmekapasitetsmetode er egentlig et spesialtilfelle av den temperaturtransformerende metoden [19].

Entalpipimetoden og ekvivalent varmekapasitetsmetode er beskrevet og testet av Voller [22, 23], Rabin [24], Dalhuijsen [25] og Dantzig [26]. Lamberg et al. [27] har sammenlignet numeriske og eksperimentelle resultater for et lager med PCM, med henholdsvis entalpipimetoden og ekvivalent varmekapasitetsmetode, og funnet sistnevnte til å være den mest presise.



Figur 2-9. Varmekapasitet- og entalpifunksjoner for PCM bestående av én komponent; a) og c), og flere komponenter; b) og d)

I dette studiet er faseovergang implementert med ekvivalent varmekapasitet-metode [19, 20, 27, 28]. Dersom faseovergangsmaterialet har lite rom for bevegelse fordi det er adskilt av finner som står tett, kan konveksjonseffekter i smeltefasen neglisjeres [20]. I geometrien foreslått i Kapittel 4 er nettopp en slik finnekonfigurasjon benyttet, og denne metoden kan gi en god tilnærming.

Når PCM absorberer eller avgir varme skjer dette ved tilnærmet konstant temperatur  $T_m$ , noe som tilsier at varmekapasiteten til PCM ved  $T_m$  går mot uendelig. I den ekvivalente varmekapasitetsmetoden antas det at faseovergangen skjer over et temperaturintervall,  $2\Delta T$ , som vist i Figur 2-9. Dersom stoffet består av flere komponenter, kan  $\Delta T$  basere seg på det reelle faseovergangsintervallet. Den ekvivalente varmekapasiteten for faseovergangen inkluderer både effekten av latent varme (første ledd) og følbare varme (andre ledd).

$$C_{pm} = \frac{h_{sl}}{T_{m2} - T_{m1}} + \frac{C_{pl} + C_{ps}}{2} \quad (2.5)$$

$C_{pm}$  kan ved faseovergang uttrykkes som i Ligning 4.5.  $h_{sl}$  er latent varme,  $T_{m1}$  er temperaturen der faseovergangen starter og  $T_{m2}$  er temperaturen der faseovergangen er fullført. Konduktiviteten i faseovergangen blir da en lineær funksjon av temperatur, uttrykt i Ligning 2.6, hvor  $2\Delta T = T_{m2} - T_{m1}$ .  $C_{pm}$  og  $k$  inngår i varmeligningen for fast stoff, uttrykt i Ligning 2.7.

$$k = k_s + \frac{k_l - k_s}{2\Delta T} (T - T_m + \Delta T) \quad (2.6)$$

$$\rho C_{pm} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + Q \quad (2.7)$$

Det bør nevnes her at mange studier har påvist vanskeligheter med å velge tidskritt  $\Delta t$ , nettstørrelse ( $\Delta r, \Delta z$ ) og faseovergangsområde. Dersom disse variablene ikke velges riktig, kan den forutsette posisjonen til fasegrensesnittet og temperaturene inneholde urealistiske oscillasjoner. Derfor er entalpiemetoden mer utbredt, til tross for en mer komplisert kode og stabilitetsbegrensninger [19].



## Kapittel 3

### 3 Teknikker for temperaturkontroll av PCM

Ved fyring i vedovnen stiger temperaturen i brennkammeret til flere hundre grader, og gir overflatetemperaturer som er høyere enn maksimal driftstemperatur for mange PCM. For tradisjonelle varmelagringsmaterialer som kleberstein og keramikk er dette uproblematisk, fordi de generelt tåler høye temperaturer. Overoppheting av PCM medfører degradering og/eller koking, som reduserer reversibiliteten til materialet. Metoder for å unngå overoppheting av lageret er derfor vurdert i dette kapitlet.

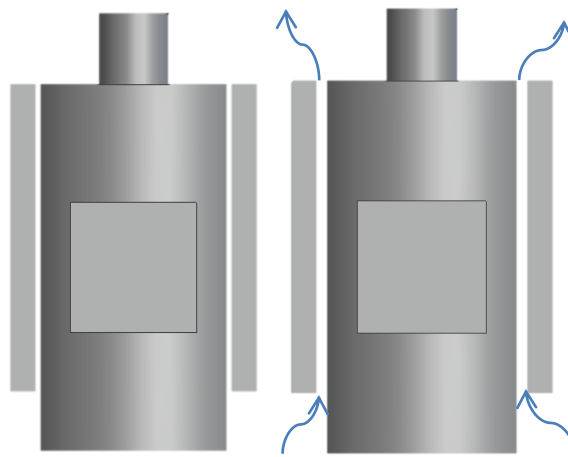
Det er lite informasjon om temperaturkontroll av PCM ved høye temperaturer i litteraturen, så forfatteren har i denne fasen av studiet vært nødt til å tenke nytt og hente idéer fra andre områder. Disse områdene inkluderer temperaturkontroll i bygninger, beskyttelse mot overoppheting av sol-ovner og romfart. Metodene som kan deles inn i aktive og passive teknikker, vil i stor grad påvirke hvordan ovnen med lager vil se ut.

Aktive metoder krever påfyll av arbeidsfluid eller kraft for å fungere, og inkluderer bruk av pumper, vifter eller elektrisitet på andre måter. Passive metoder er tekniske innretninger som justerer seg selv og som kan operere over lang tid uten innblanding fra brukeren. For eksempel kan de inneholde bevegelige deler som drives av temperaturendringer. Man ønsker i utgangspunktet et system som er uavhengig av elektrisitet. For eksempel kan det være ønskelig å installere vedovnen på hytta, eller å bruke den som varmekilde ved høye strømpriser eller strømbrudd.

Den optimale løsningen er et passivt system som avskjærer varmeoverføringen til lageret når materialet er tilstrekkelig smeltet, men før det har nådd kritisk temperatur. Alternativt kan overoppheting hindres ved at varmeavgivelsen ut til rommet øker, slik at netto energitilførsel til lageret blir lik null. Noen forslag til slike teknikker er beskrevet i de følgende delkapitlene.

### 3.1. Termiske aktuatorer for varierende luftspalte

Dersom varmelageret plasseres inntil ovnsvegg, overføres varmen ved konduksjon i materialene. Alternativt kan man tillate en åpning mellom ovnsvegg og varmelager, slik at oppvarmingen skjer ved stråling og konduksjon i lufta. På grunn av de varme flatene, oppstår det en naturlig konveksjonsstrøm av luft mellom ovn og lager, drevet av oppdriftskrefter. Figur 3-1 viser konseptet med varmelager på sidene av ovnen, med fri luftgjennomstrømning. Luft har lav termisk konduktivitet, og sammen med den kjølede luftgjennomstrømning, vil varmeoverføringen til lageret reduseres, sammenlignet med direkte kontakt mellom beholdermateriale og ovnsvegger. Kjøleeffekten kan varieres ved å variere bredden på åpningen.

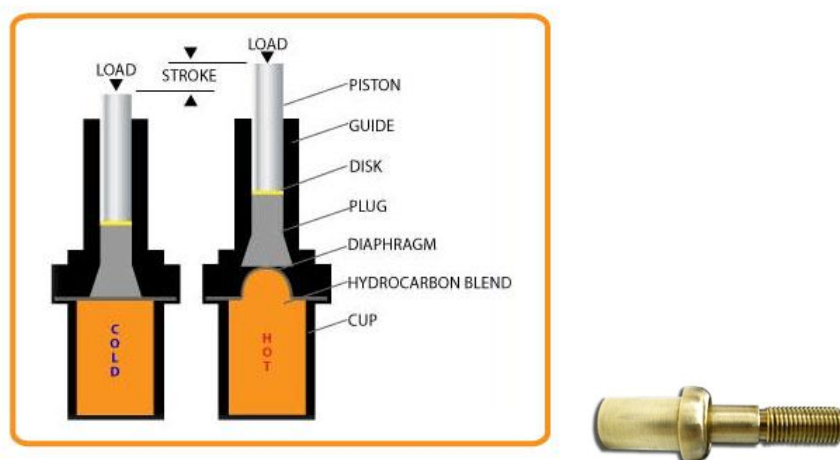


Figur 3-1. Varmelager på siden av ovnen med konveksjonskjøling

En passiv metode for temperaturkontroll, er en varierende avstand mellom ovn og lager, som reguleres av temperaturforandringer. Avstanden kan være liten til lageret har tatt opp en viss mengde varme, og temperaturen nær lagerveggen nærmer seg kritisk temperatur for faseovergangsmaterialet. Temperaturøkning fører deretter til utvidelse eller utslag av en bolt, slik at mer luft slipper til. Avstanden kan for eksempel reguleres med fjærer, termiske aktuatorer eller bimetaller, som fysisk endrer form og forskyves ved temperaturforandringer.

Termiske aktuatorer (Figur 3-2) er vurdert som en slik passiv innretning. En termisk aktuator er en mekanisk innretning laget for å bevege eller kontrollere en mekanisme eller en prosess. Ved temperaturøkning ekspanderer det følsomme materialer inne i aktuatoren, og dytter stampelet ut til designlengden med lineær bevegelse. Ved temperaturfall skjer det motsatte; materialet krymper eller trekker seg sammen, slik at stampelet vender tilbake

i opprinnelig posisjon. I Figur 3-2 er prinsippet til en termisk aktuator vist, der en væskeblanding inne i aktuatoren opptar et større volum ved høye temperaturer enn ved lave temperaturer, og ekspansjonen fører til et utslag av stempelet. Kommersielle termiske aktuatorer, som vist til høyre i Figur 3-2, har svært presise utslag og finnes for en rekke ulike utslagstemperaturer (86-572°C) [29]. Et problem med de kommersielle termiske aktuatorene er at de generelt har små utslag, opp til 1.3 cm [29]. Et annet problem er at det oppstår direkte kontakt der aktuatorene er festet, hvor varme overføres ved konduksjon, og som igjen kan føre til lokal overoppheting av faseovergangsmaterialet. En mer stabil løsning vil derfor være fast avstand mellom lager og ovn og alternativ luftregulering.

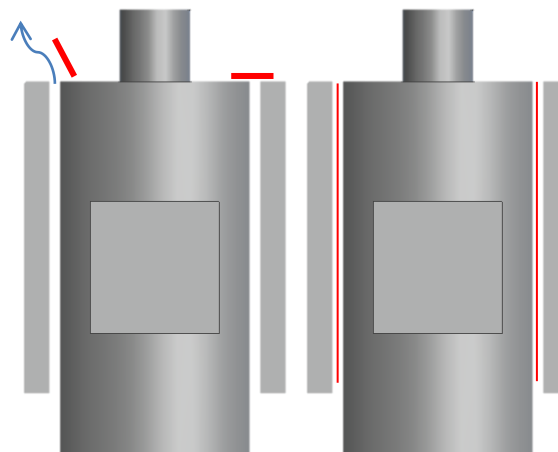


Figur 3-2. Virkemåte for termiske aktuatorer (venstre) og kommersiell utgave (høyre) [29]

### 3.1 Konveksjonskjøling med stråleskjold og spjeld

Et alternativ til varierende avstand mellom ovn og lager, er fast avstand på luftkanalen og regulering av luftmengde med spjeld. Et spjeld kan plasseres oppe eller nede på lageret og dermed hindre fri luftgjennomstrømning, som vist til venstre i Figur 3-3. En fordel ved å plassere spjeldet oppe, er at støv forhindres i å komme ned i åpningen.

Ved oppvarmingsforløpets begynnelse holdes spjeldet stengt, for raskere å oppnå smeltetemperatur i PCM. Deretter blir spjeldet åpnet for å tillate konveksjonsstrøm og hindre overoppheting. For passiv forskyvning av spjeldet, kan ulike bimetaller eller termiske aktuatorer benyttes.



Figur 3-3. Varmelager på siden av ovnen, med fri luftgjennomstrømning og spjeld (venstre) og stråleskjold (høyre)

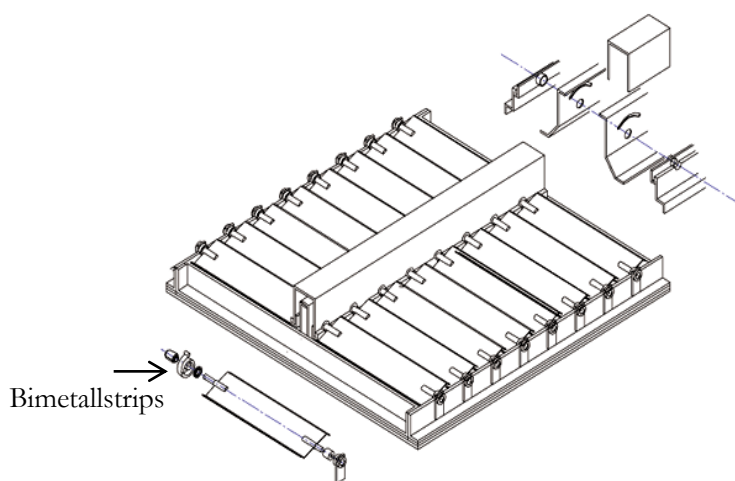
Konveksjonskjøling kan også kombineres med stråleskjold, som vist i Figur 3-3, til høyre. Et enkelt, eller flere strålingsskjold av reflekterende eller sort ugjennomsiktig materiale, er en effektiv måte å redusere varmeoverganger fra overflater med høy temperatur. Et slikt skjold kan enten stå fast mellom lager og ovn, eller det kan slå ned når temperaturene blir høye nok. Et enkelt strålingsskjold med emissivitet lik 1, vil halvere varmefluksen mellom to plater sammenlignet med situasjonen uten strålingsskjold, dersom man antar vakuum [30]. Om man inkluderer en luftstrøm som genereres av oppdriftskreftene, vil det påvirke temperaturen på strålingsskjoldet, og ytterligere redusere varmefluksen. Et slikt tilfelle er simulert og presentert i kapittel 5.



## 3.2 Termiske sjalusier

Termiske sjalusier (eng. thermal louvers) er passive strålingsskjold, hvis bruksområdet først og fremst er romfart og temperaturkontroll i bygninger. De består av små parallelle plater som ligger horisontalt for lavere temperaturer og som justeres slik at de hindrer stråling ved høyere temperaturer. Figur 3-4 viser en skisse av passive termiske sjalusier. Justeringen skjer ved at bimetaller eller form-hukommelseslegeringer (eng. memory shape alloys) utvider seg eller trekker seg sammen på grunn av temperaturendringer [31]. Bimetaller er strips av to ulike metaller festet sammen, med ulik utvidelseskoeffisient for samme temperatur, slik at utvidelse av det ene vil føre til en bøy på stripsen. Legeringene fungerer på lignende måte ved at de er «trent opp» til å innta en ny form ved oppvarming, og prosessen er reversibel.

Fordelen med denne løsningen er at strålingen varmer opp lageret til temperaturen oppnår en bestemt verdi og stenger sjalusiene, og deretter er innstrålingen betydelig redusert. Termiske sjalusier tillater i tillegg luftgjennomstrømning. Ulempen med dette systemet er at det er forholdsvis komplisert og plasskrevende. Et beregningstilfelle på et system med termiske sjalusier er vist i vedlegg C.



Figur 3-4. Termiske sjalusier [31]

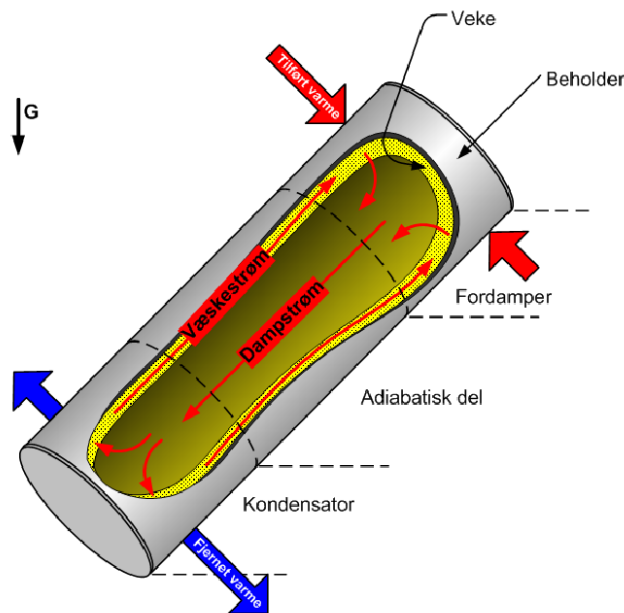
### 3.3 Termotropiske/termokromiske systemer

Termotropiske systemer består av et belegg som legges på en transparent overflate og som endrer transmittans (gjennomsiktighet) ved en bestemt temperatur. Bruksområdet for disse er først og fremst på vinduer i bygninger, for å redusere solinnstråling til rommet [32]. De brukes også for å unngå overoppheting i solsammlere (eng. flat plate collectors) [33]. Resch og Wallner [34] har vurdert termotropiske systemer, og gir en oversikt over overgangstemperaturer og transmittans før og etter, samt reversibilitet og hysteres. Termokromiske systemer opererer på lignende vis, men i stedet for endring i gjennomsiktighet, fører temperaturendring til endring i farge [32].

I en vedovn kan termotropiske eller termokromiske belegg på for eksempel en glassplate, benyttes på tilsvarende måte som stråleskjold. En utfordring med et slikt system i en vedovn, er at overflaten med tiden kan dekket av et lag med sot, og må da hentes ut for rengjøring. Et annet problem er at de materialene som er mest stabile ved høye temperaturer har en endring i transmittans på bare 25 % [34].

### 3.4 Varmerør

Et varmerør (eng. heat pipe) er et lukket rør fylt med et arbeidsmedium, som fungerer som en termisk superleder. Varmerøret frakter varme fra varmekilden, hvor arbeidsmediet fordamper, og til varmesluket der det kondenserer. Varmerørene kan operere horisontalt eller til og med mot tyngdekraften, fordi røret er kledd med et porøst material på innsiden som fungerer som en veke som suger opp arbeidsmediet. Når fordampingsområdet er plassert i samme høyde som, eller ovenfor kondensatorområdet, vil det være kapillærkrefter som frakter væsken opp til fordampingsområdet etter kondensasjon. En skisse av et varmerør med de viktigste komponentene, er vist i Figur 3-5. Dersom kondensatorområdet plasseres øverst, vil dampen stige opp, og tyngdekraften være med på å drive væsken tilbake ned til fordampingsområdet. Når varmerøret er laget for å operere på denne måten, kalles det thermosyphon [35, 36].



Figur 3-5. Skisse av varmerør med hovedkomponenter og prinsipp for virkemåte [37]

Varmerør er egnet for termiske varmelagringsystemer på grunn av høy effektiv termisk konduktivitet og passiv drift. For eksempel kan varmerør benyttes for effektivt å frakte varme fra varmekilden og inn i et lager. Dersom varmekilden er en vedovn, og lageret er plassert oppå ovnen, kan vertikale varmerør eller thermosyphoner, lede varmen opp i lageret. Det finnes ulike varianter varmerør for å kontrollere mengde varme som overføres. En metode er varmerør med variabel konduktivitet [35]. Disse er tilsatt en mengde gass som ikke kan kondensere. I begynnelsen, når temperaturen på varmekilden ikke er så høy, tar gassen opp noe av plassen i kondensatordelen av varmerøret og varmen avgis kun i et begrenset område. Når temperaturen på varmekilden stiger øker trykket på

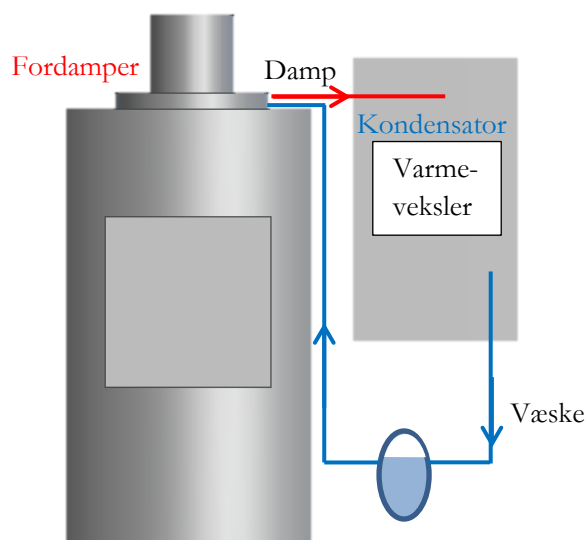
gassen, og den komprimeres og slipper til en større del av kondensatorområdet for varmeavgiving.

Idéen for varmelageret i vedovnen er å plassere fordamperdelen i røykgassen, og la røret gå gjennom både varmelageret og ut i romlufta, vertikalt. Når temperaturene blir høye, vil mer av varmen avgis til lufta, mens varmeavgivelsen til lageret vil være mer eller mindre konstant. Et annet problem som kan løses ved bruk av varmerør er at man kan hindre at varmen går den andre veien, nemlig fra lager til ovn når denne blir kaldere enn lageret. Det kan oppnås ved å bruke en varmerør-diode [35], og isolere godt mellom ovn og lager slik at all varmetransport skjer via varmerørene.

### 3.5 Varmerørkrets

En varmerørkrets (eng. loop heat pipe, capillary pumped loop) fungerer på samme måte som et enkeltstående varmerør, bortsett fra at arbeidsmediet sirkulerer i en sløyfe, og gass og væske ikke befinner seg på samme sted. Med en varmerørkrets står man relativt fritt til å plassere lageret der man vil. Det er selvsagt en fordel å plassere lageret og dermed kondensasjonsområdet høyere enn varmeuttaket, slik at tyngdekraften hjelper til med å flytte arbeidsmediet tilbake til fordamprområdet. En skisse over en varmerørkrets der varmekilden er øvre del av vedovnen, og varmelageret henger på veggen, er vist i Figur 3-6. En mulighet for passivt å kontrollere varmetilførselen i lageret, er å benytte et ekspanderende væskelager som plasseres noe nedenfor fordamprområdet [35]. Væskemengden kan dimensjoneres slik at når trykk og temperatur i rørsloyfen blir høye nok som følge av høy temperatur på varmekilden, vil det ikke være tilstrekkelig av arbeidsmediet i væskeform til å væte veken ved fordamperen, og varmetransporten i sløyfa vil stoppe helt opp.

Når arbeidsmediet er tilstrekkelig nedkjølt begynner det å sirkulere igjen. På grunn av det ekspanderende væskelageret, kan man holde tilnærmet atmosfærisk trykk i sløyfa, da væskelageret tar opp trykkendringene. Dersom man antar at vann benyttes som arbeidsmedium, vil veken tørke ut for temperaturer over  $100^{\circ}\text{C}$ . Dette systemet blir relativt kompleks og man løser heller ikke problemet med å fordele varmen i mediet.

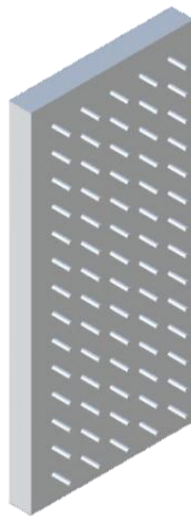


Figur 3-6. Varmelager på veggen, med varmerørkrets og ekspanderende væskelager

### 3.6 Finnesystem

En metode for å hindre overoppheting av PCM, er å sørge for at varmen blir raskt nok fjernet fra de utsatte stedene i varmelageret. Dette kan gjøres ved å øke konduktiviteten i PCM som diskutert i kapittel 2.3. Finner er en måte å øke varmeoverføringsarealet på, som er rimelige og enkle å produsere. Av ulike metoder for å øke varmeledning i PCM på, er finnesystemer de mest praktiske og mest analyserte [38]. Finner kan benyttes inne i lageret for å lede varme fra den varme veggen nær ovnen og inn i faseovergangsmaterialet, og videre ut til lufta. Det er mulig å benytte finner på utsiden av lageret, som vist i Figur 3-7, for å øke varmeavsetningen til lufta, men er ikke den mest estetiske løsningen. Slike hensyn vil være av betydning for det endelige produktet, som vil oppta en sentral plass i oppholdsrom.

Finnene kan plasseres asymmetrisk, for å stimulere til bevegelse i det smeltede materialet som følge av forskjeller i temperatur og tetthet [20]. Dersom finnene plasseres tettere der varmekilden er svakest, oppnås en mer uniform oppvarming. Plasseringen av finner både utenpå og inne i lageret kan optimaliseres i forhold til tykkelse, pitch og høyde, for eksempel ved hjelp av numerisk verktøy.



Figur 3-7. Skisse av varmelager med utvendige finner, for økt varmetransport til omgivelsene

## Kapittel 4

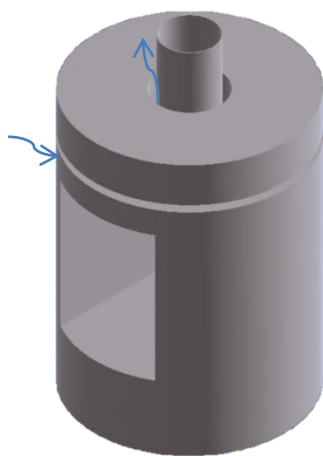
### 4 Analyse av konsept for varmelagring

#### 4.1 Introduksjon

I dette kapitlet beskrives valg av konsept og geometri for varmelageret, samt simuleringsverktøy, varmetransportberegninger og definisjoner benyttet i modellen.

Energieffektiviteten i vedovner avhenger av en rekke faktorer. For eksempel ønskes partikkelutslipp og varmetap til utelufta så lave som mulig, ved lave overflatetemperaturer på ovnen [10]. Ved utgangen er det ønskelig at røykgassen holder mellom 150 og 200°C av hensyn til trekken. Det er viktig at temperaturen i brennkammeret ikke blir så lav (under ca. 800°C) at det resulterer i dårlig forbrenning og dermed høye utslipp [39]. I valg av konsept er det lagt vekt på å holde temperaturen i brennkammeret høy, og å ta ut det meste av varmen etter brennkammeret. Dermed kan brennkammeret isoleres godt og man får en bedre forbrenning.

Konseptet som er valgt er inspirert av en sylindrisk type ovn med klebersteinsplater på toppen. Varmen hentes hovedsakelig fra ovnsens toppplate som holder høy temperatur, i tillegg til noe varme fra røykrøret. Lagergeometrien er en konsentrisk sylinder som vist i Figur 4-1. Det er tenkt en åpning mellom lager og ovn, som vil gi en kjølede konveksjonsstrøm. I modellen er bena som lageret holdes oppe av utelatt. Disse vil en forsøke å isolere slik at de ikke bidrar til lokal overoppheting, og de må utformes slik at de ikke forstyrrer luftstrømmen mer enn nødvendig. Et spjeld kan plasseres på lagerets toppplate inntil røykrøret, og hindre fri luftgjennomstrømning. Det kan tenkes å bestå av to flate, halvsirkelskiver som festes på lagerets toppplate med et passivt system.



Figur 4-1. Valgt konsept for varmelager for vedovn

Beholdermaterialet bør kunne lede varme godt og tåle gjentatte endringer i volum. Det bør også motstå korrosjon og transport av vann gjennom veggene så materialet ikke tørker ut, samt beskytte PCM fra skadelig interaksjon med miljøet. Et mye brukt beholdermateriale med kjemisk kompatibilitet med organiske materialer er rustfritt stål. Stål tilfredsstillende mange av de overnevnte kriteriene, og en stållegering er foreslått som beholdermateriale. Materialeegenskapene er presentert i Tabell 9 i kapittel 4.3.2.

Varmeledningen i faseovergangsmaterialet er relativt lav, noe som medfører risiko for overoppheting dersom ikke tilstrekkelig varme blir avsatt i romlufta. På grunn av dette er det lagerdesignet som har størst potensial til å påvirke varmetransporten. Det er derfor valgt å benytte finner av aluminium, som kan lede varmen fra de varme flatene og ut i materialet. Disse er utformet som sirkulære plater, som sveises fast i lagerbunnen, og deler beholderen inn i flere «rom». I tillegg til at varmen fordeles bedre, blir lageret mer stabilt mot volumendringer. Finner på utsiden av lageret er utelatt av estetiske hensyn.

Videre er et konsept med radielle stålfinner foreslått. Radielle finner har den fordelen at de kan transportere varme fra både bunnplaten og den indre veggen som varmes opp av røykrøret, og videre ut til ytterveggen og topplaten som skal avgi varme til romlufta.

Erythritol er valgt som faseovergangsmateriale i simuleringene. Problemet med volumendring vil i virkeligheten løses ved ikke å fylle helt opp med PCM, men tillate et luftlag som kan romme ekspansjonen. Erythritol, har i likhet med de fleste PCM med unntak vann, størst tetthet i fast stoff og utvider seg ved smelting [19].

## 4.2 Geometri og dimensjoner

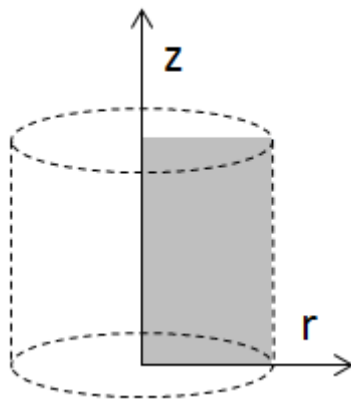
### 4.2.1 Autodesk® Inventor® Professional 2011

Geometrien er tegnet med Autodesk® Inventor®, en 3D dataassistert konstruksjonsprogramvare (DAK), som brukes til å lage tekniske tegninger og digitale prototyper. Ved å visualisere produktet før eksperimentell testing, oppnås ofte betydelig reduksjon av utviklingskostnader og risikoen for feilkonstruksjoner reduseres. Alle dimensjoner kan parametriseres og enkelt endres, for eksempel gjennom et eksternt regneark.

### 4.2.2 2D aksesymmetrisk modell

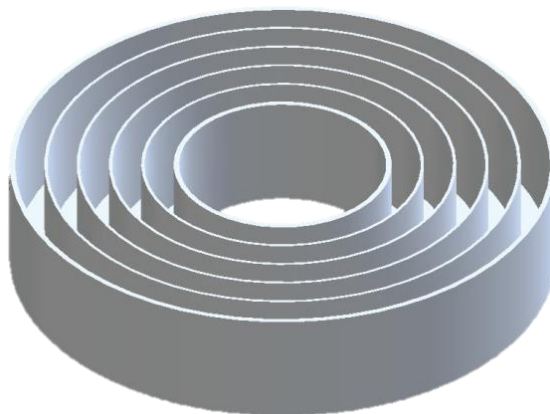
En 2D aksesymmetrisk modell av konseptet er foreslått på grunn av den forenklete beregningen det medfører. I 2D aksesymmetriske modeller er det to geometriske koordinater, romkoordinatene  $z$  og  $r$ , og tidskoordinaten  $t$ . Beregningsområdet som vises i grått i Figur 4-2, speiles rundt  $z$ -aksen.





Figur 4-2. Skisse av prinsippet for aksesymmetri

Finnene i denne modellen er utformet som vertikale, konsentriske plater. Det er valgt vertikale finner ettersom varmen hovedsakelig hentes fra bunnplaten. Det vil i realiteten være konveksjonseffekter til stede i faseovergangsmaterialet, som vil bidra til raskere smelting [4, 7]. Oppdriftskrefter i smelten fører til at varme fraktes oppover, og vertikale finner har den fordel over horisontale finner, at de gir mer rom for denne bevegelsen. Agyenim [38] har rapportert om dette fenomenet for erythritol. I de numeriske beregningene neglisjeres likevel konveksjonseffektene.



Figur 4-3. Konsept for varmelager med fire konsentriske finner

Tabell 5 viser en oversikt over dimensjonene til modellen med sirkulære finner. Lagerets diameter ble dimensjonert til å være 50 cm. Det vil være tilstrekkelig stort til å dekke en vedovn med brennkammer på  $48 \text{ dm}^3$  (30 cm bredde, 40 cm høyde og 40 cm dybde) [39]. I Tabell 6 er beregnet volum og vekt for de to ulike finneløsningene presentert.

Tabell 5 – Dimensjoner for modellen med konsentriske finner

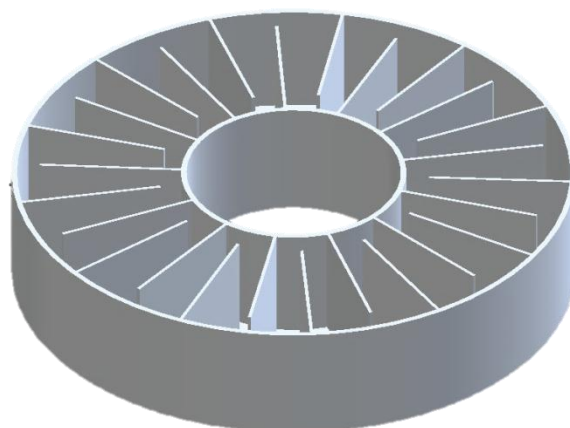
| <i>2D aksesymmetrisk modell</i> |     |    |
|---------------------------------|-----|----|
| Ytre diameter lager             | 50  | cm |
| Veggtykkelse                    | 0.5 | cm |
| Indre diameter lager (mot luft) | 19  | cm |
| Luftåpning                      | 2   | cm |
| Ytre diameter røykrør           | 15  | cm |
| Tykkelse topp/bunn              | 0.5 | cm |
| Indre høyde lager               | 10  | cm |
| Bredde finner                   | 0.3 | cm |
| Høyde finner                    | 10  | cm |

Tabell 6 – Volum og vekt for modellen med 4 og 6 konsentriske finner

|                     | 4 finner | 6 finner |                 |
|---------------------|----------|----------|-----------------|
| Finnevolum          | 1.3      | 1.9      | dm <sup>3</sup> |
| Volum PCM           | 14.4     | 13.8     | dm <sup>3</sup> |
| Volumprosent finner | 8.3      | 11.9     | %               |
| Vekt PCM            | 18.7     | 18.0     | kg              |
| Total vekt          | 43.7     | 44.5     | kg              |

### 4.2.3 3D modell

En 3D modell av lageret er foreslått for å kunne simulere varmeovergangen med radielle finner som samtidig er i kontakt med bunnplate, toppplate og indre og ytre vegg. Varmen fra ovnsoverflaten og røykrøret fraktes dermed raskere ut i faseovergangsmaterialet, og videre ut i romlufta.

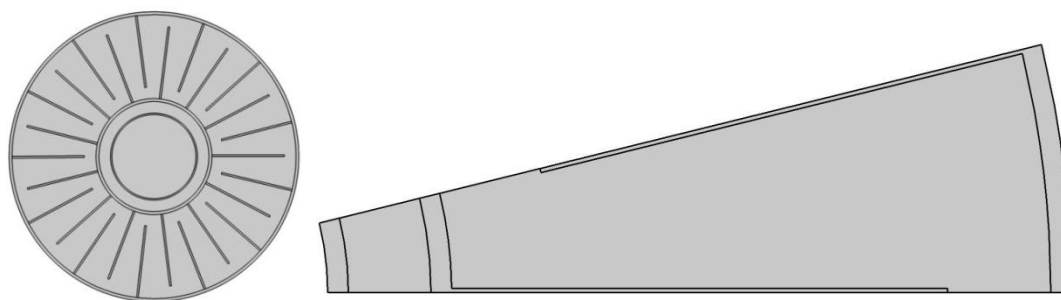


Figur 4-4. Konsept for varmelager med radielle finner

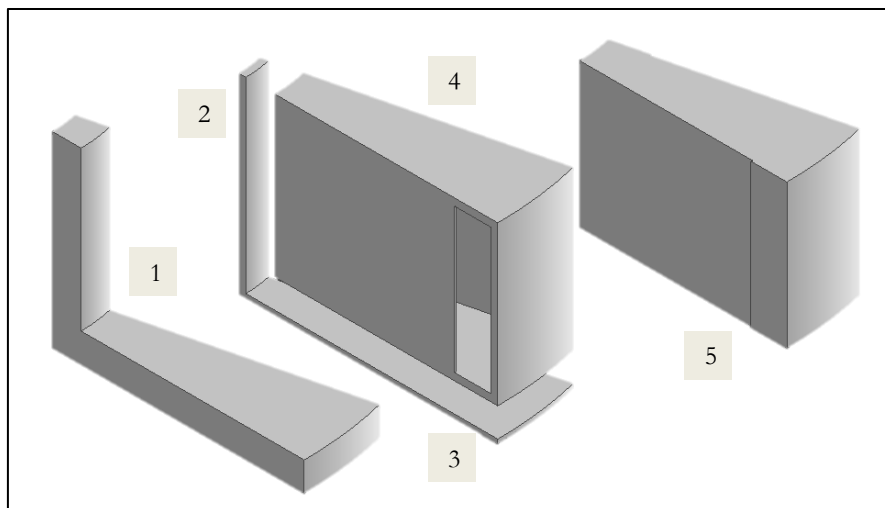
Tabell 7 – Dimensjoner for 3D-modellen

| <i>3D-modell</i>                |              |                 |
|---------------------------------|--------------|-----------------|
| Ytre diameter lager             | 50           | cm              |
| Veggtykkelse                    | 0.5          | cm              |
| Indre diameter lager (mot luft) | 19           | cm              |
| Luftåpning                      | 2            | cm              |
| Ytre diameter røykrør           | 15           | cm              |
| Indre høyde lager               | 10           | cm              |
| Tykkelse bunn/topp              | 0.5          | cm              |
| Antall finner                   | 26           | -               |
| Lengde finner                   | 12.4         | cm              |
| Bredde finner                   | 0.2          | cm              |
| Høyde finner                    | 10           | cm              |
| Volum finner                    | 0.64         | dm <sup>3</sup> |
| Volumprosent finner             | 4.3          | %               |
| Vekt PCM                        | 19.6         | kg              |
| Total vekt                      | 42.8         | kg              |
| Andel av lageret modellert      | 1/26 (13.8°) | -               |

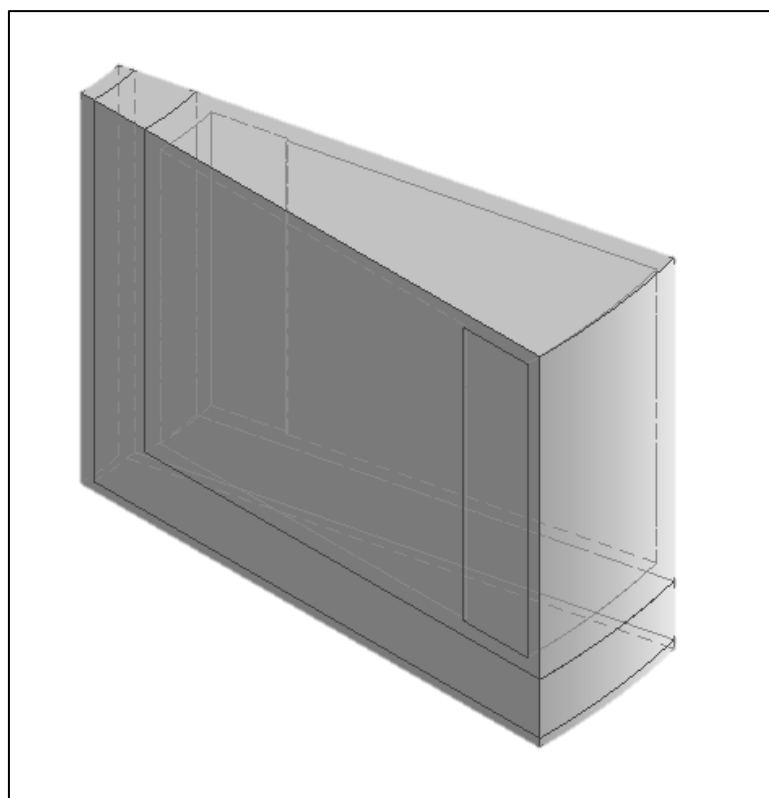
Det er tilstrekkelig å beregne varmeutviklingen i ett av de 26 kambersene, ettersom konveksjonseffekter i faseovergangsmaterialet neglisjeres, og det behandles som fast stoff under beregningene. Et utsnitt av lageret ble tegnet i Autodesk Inventor®, og importert til COMSOL via en LiveLink™. Utsnittet tar for seg et kammer, som vist i Figur 4-5, Figur 4-6 og Figur 4-7, og inkluderer to halve finner delt på midten. I de numeriske beregningene antas symmetri på sideflatene.



Figur 4-5. Finneløsning for 3D modell (venstre) og utsnitt av 3D modellen (høyre) sett ovenfra med to halve finner inkludert



Figur 4-6. De ulike deler 3D-modellen består av. 1: luftlag, 2: røykrør, 3: ovnsøverflate, 4: lagerbeholder og finner og 5: PCM



Figur 4-7. Utsnitt av 3D-modellen benyttet i simuleringene

#### 4.2.4 Energiinnhold

Dersom det antas at lageret varmes opp fra omgivelsestemperaturen, 20°C til maksimal driftstemperatur, 155°C, kan energien som lagres i faseovergangsmaterialet, og totalt i lageret beregnes. For metallene benyttes ligning 4.1 og varmekapasiteten er hentet fra kapittel 4.3.2.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT \quad (4.1)$$

$$Q = m[C_{p,l}(T_{m1} - T_i) + C_{pm}(T_{m2} - T_{m1}) + C_{p,s}(T_f - T_{m2})] \quad (4.2)$$

For faseovergangsmaterialet kan ligning 4.2 benyttes, hvor  $C_{pm}$  er uttrykt i ligning 2.5. Erythritol begynner faseovergangen ved  $T_{m1}$  og fullfører ved  $T_{m2}$ , og verdiene for disse, samt for varmekapasitetene i fast stoff, faseovergang og væskefase er hentet fra kapittel 4.3.2.

Massen til erythritol er beregnet ved å benytte den laveste tettheten, som er for væskefasen, 1300 kg/m<sup>3</sup>. Ved å dimensjonere etter fasen med størst volum vil det faste stoffet få plass til å ekspandere. Tabell 8 viser en oversikt over energiinnholdet i de tre modellene av varmelageret med ulike finnekonfigurasjoner, varmet opp fra 20°C til 155°C.

Tabell 8 – Energiinnhold i varmelageret

| <i><b>Energiinnhold</b></i> | <b>4</b>                       | <b>6</b>                       | <b>26</b>                  |     |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----|
|                             | <b>konsentriske<br/>finner</b> | <b>konsentriske<br/>finner</b> | <b>radielle<br/>finner</b> |     |
| <b>Energi i PCM</b>         | 3.4                            | 3.3                            | 3.6                        | kWh |
| <b>Total energi i lager</b> | 7.2                            | 7.4                            | 6.9                        | kWh |

### 4.3 Numerisk modell

Ved hjelp av numerisk modellering kan varmelagerets parametere og geometri enkelt endres, for eksempel kan materialegenskaper skiftes ut og finner inkluderes i modellen. Systemet som skal beregnes består av varmetransport i både faste legemer og i fluid. Strømning er ikke-isoterm, og Navier-Stokes-ligningene må derfor løses sammen med varmeligningen. Varmetransportproblemet inkluderer alle tre former for varmetransport; konduksjon, konveksjon og stråling [30].

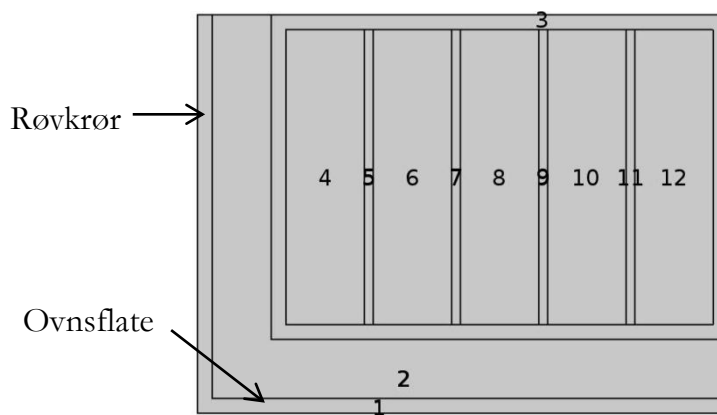
#### 4.3.1 COMSOL Multiphysics® 4.2a

De numeriske beregningene er utført med COMSOL Multiphysics® 4.2a. COMSOL baserer seg på elementmetoden, som er en numerisk metode for å tilnærme løsninger for partielle differensial- og integralligninger. Programmet har en rekke forhåndsdefinerte fysikkgrensesnitt for problemer som inneholder fluidstrøm, varmetransport, elektronikk, og akustikk for å nevne noen, og er spesielt egnet for koblede fenomener. Geometrien kan enten defineres i programmet eller importeres fra eksterne DAK-programmer via en LiveLink™. For import av geometrier fra Autodesk Inventor er en slik link benyttet.

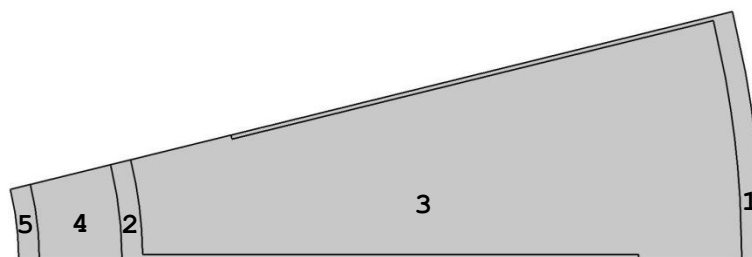
Når modellen settes opp defineres fysikkgrensesnitt, geometri, materialegenskaper, grensebetingelser, nodenettverk, tidskritt og løsningsmetode. Materialegenskaper og grensebetingelser kan defineres som funksjoner av avhengige variabler.

#### 4.3.2 Materialelegenskaper

I Figur 4-8 og Figur 4-9 er beregningsområdene med de aktuelle materialene presentert.



Figur 4-8. Tverrsnitt av den aksesymmetriske modellen med materialer angitt som følgende: Stål: 1 og 3, aluminium: 5, 7, 9 og 11, luft: 2, PCM: 4, 6, 8, 10 og 12



Figur 4-9. Tverrsnitt av 3D-modellen med materialer angitt som følgende: Stål: 5, 2, 1, luft: 4, PCM: 3

Beholdermaterialene benyttet i simuleringene er en stållegering og aluminium, med termofysiske egenskaper presentert i Tabell 9. For enklere konstruksjon i Inventor Autodesk har 3D-modellen fått stålfinner. Materialeegenskaper for luft er hentet fra COMSOLs innebygde materialbibliotek, og er funksjoner av temperatur. I 3D-modellen har imidlertid luftas konduktivitet blitt justert for å inkludere effekten av frikonveksjon, som vist i kapittel 4.3.4.

Tabell 9 – Materialeegenskaper for stållegering og aluminium brukt i modellen

| <b>High-strength alloy steel</b> |      |                   |
|----------------------------------|------|-------------------|
| Konduktivitet                    | 44,5 | W/mK              |
| Tetthet                          | 7850 | kg/m <sup>3</sup> |
| Varmekapasitet                   | 475  | J/kgK             |
| Emissivitet                      | 1    | -                 |
| <b>Aluminium</b>                 |      |                   |
| Konduktivitet                    | 160  | W/mK              |
| Tetthet                          | 2700 | kg/m <sup>3</sup> |
| Varmekapasitet                   | 900  | J/kgK             |

Faseovergangsmaterialets termiske konduktivitet, tetthet og varmekapasitet er definert som funksjoner av temperatur. I følge Agyenim [40] skjer faseovergangen for erythritol over ca. 4°C. Materialet begynner og fullfører smeltingen, ved henholdsvis 115.6 °C og 119.7 °C, med gjennomsnittlig smeltetemperatur på 117.7°C. Ved å benytte ekvivalent varmekapasitetsmetode har den latente varmen blitt integrert i varmekapasiteten til stoffet på følgende måte:

$$C_{pm} = \frac{h_{sl}}{T_{m1} - T_{m2}} + C_{p,avg} \quad (4.3)$$

$$= \frac{339.8 \text{ kJ/kg}}{4^\circ\text{C}} + \frac{(2.76 + 1.38) \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}}{2} = 87.02 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

$$C_p(kJ/kg^{\circ}C) = \begin{cases} 2.76, & T \leq 116^{\circ}C \\ 87.02, & 116^{\circ}C < T < 120^{\circ}C \\ 1.38, & T \geq 120^{\circ}C \end{cases} \quad (4.5)$$

I COMSOL er dette definert som i Tabell 10, ved bruk av Heaviside-funksjonen [41]. Dette er et alternativ til logiske funksjoner som vist i Tabell 11, og gir i enkelte tilfeller bedre konvergens da overgangene defineres som kontinuerlige funksjoner og ikke steg-funksjoner.

Overgangen mellom verdiene for tetthet og konduktivitet glattes ut over 4°C, og blir dermed lineære funksjoner av temperatur. Grafen til varmekapasiteten er vist under, i Figur 4-10. Grafen til henholdsvis konduktivitet og tetthet er vist i vedlegg A.

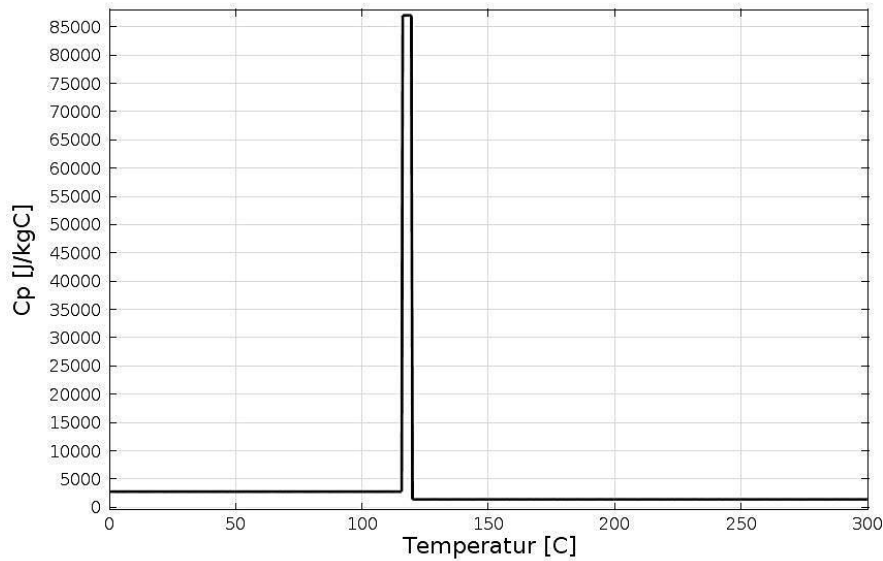
Tabell 10 – Materialeegenskapene til erythritol definert med kontinuerlige Heaviside-funksjoner, benyttet i simuleringene

| Heaviside-funksjoner |  |
|----------------------|--|
| $C_p$                | $2760 + 84260*(flc2hs(T-389, 0.1))-85640*(flc2hs(T-393, 0.1))$ |
| $k$                  | $0.733-0.407*(flc2hs(T-391,4))$                                |
| $\rho$               | $1480-180*(flc2hs(T-391,4))$                                   |

Tabell 11 – Alternativ definisjon av materialeegenskapene for erythritol med logiske funksjoner

| Logiske funksjoner |   |
|--------------------|---|
| $C_p$              | $2760*(T<389)+87020*(T>=389)-85640*(T>393)$ |
| $k$                | $0.733*(T<=391)+0.326*(T>391)$              |
| $\rho$             | $1480*(T<=391)+1300*(T>391)$                |





Figur 4-10. Varmekapasitet for erythritol som funksjon av temperatur, som definert i COMSOL

### 4.3.3 Beregning av frikonveksjon i modellen

Varmetransportproblemet som skal løses, inneholder kjøling ved frikonveksjon på utsiden av lageret. Det er to måter å tilnærme seg frikonveksjonsproblemer på; enten ved bruk av varmetransportkoeffisienter, eller ved å modellere konveksjonsstrømmen rundt det varme legemet. I simuleringene er fri konveksjon delvis modellert med varmetransportkoeffisienter, og delvis med å beregne strømningsfeltet.

For å undersøke om konveksjonsstrømmingen er laminær eller turbulent, beregnes det dimensjonsløse Grashoftallet ( $Gr_L$ ), som spiller samme rolle for fri konveksjon som Reynoldstallet gjør for tvungen konveksjon [30]. Overgangen fra laminær til turbulent strømning avhenger av den relative størrelsen på oppdrifts- og viskøse krefter i fluidet, og kan relateres til Rayleightallet ( $Ra_L$ ).

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (4.6)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (4.7)$$

$L$  er karakteristisk lengde,  $\beta$  er termisk ekspansjonskoeffisienten,  $\nu$  kinetisk viskositet,  $\alpha$  termisk diffusivitet, og  $g$  gravitasjonsakselerasjonen.  $T_s$  og  $T_\infty$  er henholdsvis overflatetemperatur og omgivelsestemperatur.

#### 4.3.3.1 Beregning av $h$ -verdier

Den konvektive varmetransportkoeffisient,  $\bar{h}$ , for lagerets yttersider er beregnet for hånd med empiriske håndbok-korrelasjoner.  $\bar{h}$  angir raten varme som avgis ved en gitt temperaturforskjell mellom overflate og omgivelser, og inngår i Newtons nedkjølings-lov [30]. Denne benyttes i grensebetingelsene i kapittel 4.3.4 for å beskrive varmetapet til lageret.

Empiriske ligninger for ekstern strømming over en del vanlige geometrier uttrykkes generelt på formen i ligning 4.7 [30].

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k_f} = C Ra_L^n \quad (4.8)$$

$\overline{Nu}_L$  er gjennomsnittlig Nusselttall,  $L$  er karakteristisk lengde,  $k_f$  er konduktivitet for fluidet som strømmer (i dette tilfellet luft), og  $C$  og  $n$  er konstanter.

Beregningen er forenklet ved at det antas en temperatur på  $60^\circ\text{C}$  over hele lagerets ytterside gjennom tidsforløpet. Luftegenskaper evalueres ved filmtemperaturen  $T_f \equiv (T_s + T_\infty)/2$ , og ved å interpolere i tabeller finner man verdiene vist i Tabell 12. Luft antas å være en ideell gass og dermed kan tilnærmingen  $\beta = 1/T_f(K)$  benyttes.

For lagerets vertikale ytterside er ligningen for *vertikal plate* benyttet, vist i ligning 4.9 som gir gjennomsnittlige Nusselttallet for platen. For vertikale plater skjer overgangen til turbulent strømming ved kritisk Rayleightall,  $Ra_L \approx 10^9$ , hvor  $L$  er høyden på den vertikale platen. Ved utregning ble strømmingen funnet til å være laminær som vist i Tabell 12.

$$\overline{Nu}_L = 0.59 Ra_L^{1/4} \quad (Ra_L \lesssim 10^9) \quad (4.9)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7) \quad (4.10)$$

$$L \equiv \frac{A_s}{P} \quad (4.11)$$

For *horisontale plater* med øvre overflate oppvarmet gjelder uttrykket i ligning 4.10, hvor  $L$  beregnes fra ligning 4.11 med  $A_s$  og  $P$  som henholdsvis platens overflateareal og perimeter

(ytre + indre omkrets). Det beregnede Rayleightallet er i størrelsesorden  $10^6$  som tilsier laminær strømning, og gjennomsnittlig Nusselttall for lagerets topplate er vist i Tabell 12.

Tabell 12 – Materialeegenskaper og resultater for beregning av varmetransportkoeffisienter

|                       | Vertikal vegg         | Horisontal plate      |                         |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>L</b>              | 0.11                  | 0.077                 | m                       |
| <b>A<sub>s</sub></b>  | -                     | 0.168                 | m <sup>2</sup>          |
| <b>P</b>              | -                     | 2.168                 | m                       |
| <b>T<sub>f</sub></b>  | 40                    | 40                    | °C                      |
| <b>v</b>              | 17.2·10 <sup>-6</sup> | 17.2·10 <sup>-6</sup> | m <sup>2</sup> /s       |
| <b>α</b>              | 24.4·10 <sup>-6</sup> | 24.4·10 <sup>-6</sup> | m <sup>2</sup> /s       |
| <b>β</b>              | 3.20·10 <sup>-3</sup> | 3.20·10 <sup>-3</sup> | 1/K                     |
| <b>k</b>              | 27.3·10 <sup>-3</sup> | 27.3·10 <sup>-3</sup> | W/mK                    |
| <b>Ra<sub>L</sub></b> | 3.97·10 <sup>6</sup>  | 1.33·10 <sup>6</sup>  | -                       |
| <b>Nu<sub>L</sub></b> | 26.34                 | 18.45                 | -                       |
| <b><u>h</u></b>       | <b>6.47</b>           | <b>6.53</b>           | <b>W/m<sup>2</sup>K</b> |

Beregnete gjennomsnittlige h-verdier for vertikal og horisontal plate er presentert i siste linje i Tabell 12. I simuleringene er gjennomsnittlig varmetransportkoeffisient,  $\bar{h}=6.5$  W/m<sup>2</sup>K brukt for både den ytre vertikale veggen og den horisontale toppлата.

Å beregne strømningsfeltet for 3D-modellen i COMSOL viste seg å være for krevende i forhold til datakapasitet, til tross for at beregningsområdet var redusert til et minimum. I stedet er lufta definert som fast stoff. I COMSOL ble effekten naturlig konveksjon inkludert i luftas konduktivitet som funksjon av varmetransportkoeffisienter, uttrykt i ligning 4.12. Ligningen kan utledes fra uttrykket for varmefluks som funksjon av termisk motstand, og Fourier's lov [30],  $Q = \Delta T/R_{tot} = kA \cdot \Delta T/\Delta X$ , hvor  $R_{tot} = 1/h_i A + 1/h_o A$ .

$$k = \frac{\Delta X}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (4.12)$$

Luftåpningen,  $\Delta X$  er 2 cm og  $h_i$  og  $h_o$ , henholdsvis indre og ytre varmetransportkoeffisient, er begge antatt å være 5 W/m<sup>2</sup>K. I COMSOL benyttes derfor  $k=0.05$  W/mK for luft i 3D-modellen.

### 4.3.3.2 Beregning av strømningsfelt med Boussinesq-tilnærmingen

For de aksesymmetriske modellene er selve luftstrømmen mellom ovnen og lageret modellert, for å beregne luftkjølingen av lageret. En slik modell gir detaljerte resultater for strømningsmønsteret rundt legemet, i tillegg til temperaturdistribusjonen. Samtidig er den mer kompleks og krever betydelig større beregningsressurser enn bruk av varmetransportkoeffisienter.

For problemer med varmetransport i både fast stoff og fluider har COMSOL en egen Non-Isothermal Flow-modus, som benytter Navier-Stokes-ligningene sammen med varmeligningen. Varmeligningen er en energikonserveringsligning som balanserer tidsavhengig temperaturendring og konvektiv og konduktiv varmetransport, med en varmekilde,  $Q$  (viskøs oppvarming og trykkarbeid er neglisjert). Dersom hastighetsfeltet er lik null uttrykker ligning 4.13 konduktiv varmeoverføring, som gjelder for varmetransport i fast stoff.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (4.13)$$

Hastighetsfeltet,  $\mathbf{u}$ , i varmeligningen kommer fra Navier-Stokes-ligningene. Navier-Stokes er bevegelsesligninger med viskøse ledd for newtonske fluider. Alle gasser og mange væsker kan antas newtonske, men for eksempel ikke flytende metall og honning [42]. Dersom temperaturendringene i en strømning er små kan én-fase-fluider ofte antas inkompressible, dvs. tettheten er konstant eller nesten konstant. Dette gjelder for alle væsker og for gasser som for eksempel luft, ved lave hastigheter. Den laminære, inkompressible formen av Navier-Stokes er uttrykt i ligning 4.15.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.14)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mathbf{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (4.15)$$

$\mu$  er konstant viskositet, og  $p$  er statisk trykk. Viskøs dissipasjon og trykkarbeid er neglisjert i ligningen. Venstre side av ligningen uttrykker kraft/impuls som transient og konvektiv akselerasjon, mens høyre side uttrykker stress (trykkgradient og viskositet) og andre krefter  $\mathbf{F}$ . Ligning 4.13-4.15 må løses simultant for distribusjonen av temperatur-, hastighet- og trykkfelt i tid og rom.

Boussinesq-tilnærmingen [30, 43], vist i ligning 4.16, er en måte å behandle noen enkle tilfeller av oppdrifts-strømninger, uten å bruke den kompressible formen av Navier-Stokes-ligningen. Det antas at tetthetsvariasjonene ikke påvirker strømningsfeltet, bortsett

fra å gi opphav til en oppdriftskraft,  $\mathbf{F}$ . Tetthetsvariasjoner i kontinuitetsligningen neglisjeres slik at ligning 4.14 reduseres til  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ .

Tetthetsforskjellen som driver strømmingen forenkles videre, til kun å avhenge av temperatur (trykkeffekter neglisjeres). Boussinesq-tilnærmingen gjelder for et utvalg av tilfeller, der den viktigste antagelsen er at tetthetsforskjellene må være små, dvs.  $\Delta\rho/\rho_0 \ll 1$  [30].

$$\rho_\infty - \rho \approx \rho\beta(T - T_\infty) \quad (4.16)$$

COMSOLs Non-Isothermal flow inkluderer også ulike turbulensmodeller. Disse benytter Reynold-Averaged Navier-Stokes (RANS)-ligninger, og løses for gjennomsnittlig hastighetsfelt og trykk. I simuleringene med turbulent strømming, det vil si når spjeldet er lukket, er en «Low Reynolds  $k$ - $\epsilon$ »-turbulensmodell valgt. Varmetransportmodellen som brukes i simuleringene er Kays-Crawford. For utfyllende informasjon om den turbulente modellen henvises det til COMSOLs dokumentasjon for CFD Module.

#### 4.3.4 Grensebetingelser i simuleringene

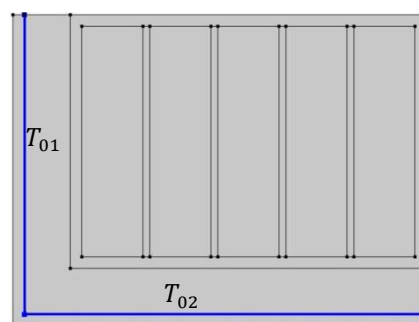
I COMSOL defineres beregningsområder for varmetransport i fast stoff og varmetransport i fluid. Det er kun området med luft som betraktes som fluid, og faseovergangsmaterialet defineres som fast stoff. Initialtemperaturen i oppvarmingsforløpet er satt til 20°C over hele beregningsområdet, og initialhastighet for luften er 0 m/s. For nedkjølingsforløpet antas det at hele lageret er varmet opp til 155°C når simuleringen begynner. Initialtrykket er i alle simuleringene lik referansetrykket, 1 atmosfære. COMSOL setter automatisk kontinuitet for varmefluks og temperatur over grenser.

I simuleringene av oppvarmingsforløpet er varmekilden definert med konstante temperaturer, 400°C på ovnsøverflaten og 200°C på røykrøret luftsiktet, som i ligning 4.17. Temperaturene er steppet opp med glattende Heaviside-funksjoner som gir bedre konvergens ved løsning av transiente systemer. Funksjonene er definert i ligning 4.18 og i ligning 4.19, og grensene de gjelder for er vist i Figur 4-11. Ved å benytte nevnte definisjon, øker temperaturen fra systemets initialverdi til grenseverdien i løpet av det første halve sekundet.

$$T = T_0 \quad (4.17)$$

$$T_{01} = 293.15 + (473.15 - 293.15) \cdot \text{flc}2\text{hs}(t[1/\text{s}] - 0.5, 0.5) \quad (4.18)$$

$$T_{02} = 293.15 + (673.15 - 293.5) \cdot \text{flc}2\text{hs}(t[1/\text{s}] - 0.5, 0.5) \quad (4.19)$$

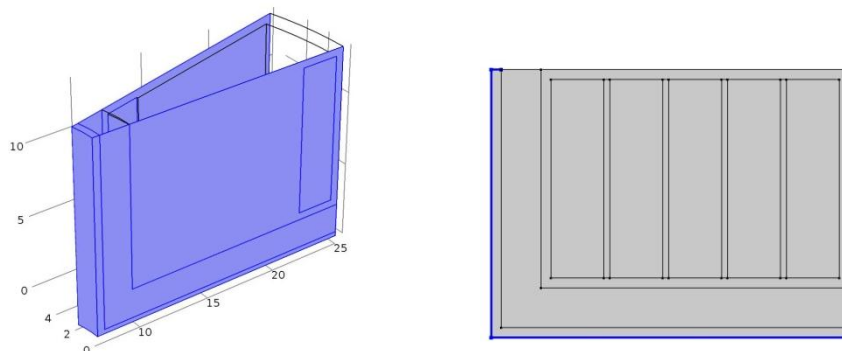


Figur 4-11. Grensebetingelsen temperatur på røykrør og ovnsøverflate.  $T_{01}=200^{\circ}\text{C}$  og  $T_{02}=400^{\circ}\text{C}$

Videre defineres grensene (2D) eller overflatene (3D) hvor det er konveksjonsavkjøling. Ligning 4.20 uttrykker kontinuitet for konduktiv varmefluks i materialet, og konvektiv varmefluks til omgivelsene. For grenser eller overflater som er isolerte eller skal ha symmetri, gjelder ligning 4.21 som uttrykker ingen varmefluks ut av grensen.

$$\mathbf{n} \cdot (k\nabla T) = h \cdot (T_{\infty} - T) \quad (4.20)$$

$$\mathbf{n} \cdot (k\nabla T) = 0 \quad (4.21)$$



Figur 4-12. Overflater som antas isolerte eller symmetriske under oppvarmingen i 3D modellen (venstre) og den aksesymmetriske modellen (høyre)

I fluidområder benyttes grensebetingelsen «vegg», ligning 4.22, for å uttrykke at hastigheten langs flater hvor fluid strømmer er lik 0 m/s. I simuleringstilfellene med spjeld er denne benyttet for å hindre at luft kan strømme ut av geometrien.

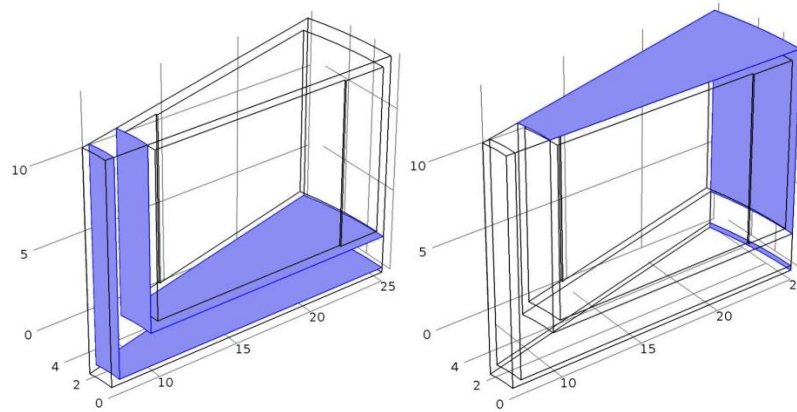
$$\mathbf{u} = 0 \quad (4.22)$$

I fluidområdet er grensebetingelsen «volumkraft» brukt. Den uttrykker løftekraften i Navier-Stokes ligningene som funksjon av den lokale endringen i tetthet. Volumkraften er definert i ligning 4.23, hvor  $\rho_\infty$  er omgivelsestettheten og  $g$  er gravitasjonsakselerasjonen.  $\rho_\infty$  er satt til 1.2 kg/m<sup>3</sup> i beregningene, som er tettheten for luft ved 20°C. I COMSOL er dette definert med uttrykket i ligning 4.24, der nitf (non-isothermal flow) er forkortelsen på fysikkgrensesnittet som er brukt, og g\_const er en innebygd konstant i COMSOL.

$$\mathbf{F}_z = -g(\rho - \rho_\infty) \quad (4.23)$$

$$-g\_const*(nitf.rho-1.2) \quad (4.24)$$

Grensebetingelsen «åpen grense» brukes for å uttrykke at et fluid kan strømme inn eller ut av en grense. Denne grensebetingelsen antar at ingen krefter virker på fluidet, og at området ekspanderer til uendelig. For modellene med åpent spjeld benyttes den på to grenser mens i modellene med lukket spjeld benyttes den kun på én. Denne betingelsen kan være vanskelig å få til å konvergere, og for lettere å oppnå konvergens ved transiente analyser er pådraget, i dette tilfellet veggtemperaturen, steppet opp med en Heaviside-funksjon.



Figur 4-13. 3D modell med grensebetingelsen "stråling mellom overflater" (venstre) og "stråling mot omgivelser" (høyre)

Til sist er varmetransport ved stråling definert i modellen. Denne formen for varmetransport skjer ved transport av fotoner, som kan absorberes eller reflekteres ved faste overflater. Strålingen påvirker bare grenseflatene. Luften antas å være transparent, og påvirkes ikke direkte av strålingsvarmen, men av varmen fra veggene. Ligning 4.25 uttrykker stråling mot omgivelsene, mens ligning 4.26-4.28 uttrykker stråling mellom overflater.  $G$  og  $J$  er henholdsvis innstråling og utstråling, og  $F_{amb}$  er formfaktoren mot omgivelsene.

Strålingsretningen i simuleringene kontrolleres av opasitet, det vil si at det stråler ut av ugjennomsiktige områder. Alle områder definert som fast stoff i modellen, er definert ugjennomsiktige (eng. opaque).

$$\mathbf{n} \cdot (k\nabla T) = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4) \quad (4.25)$$

$$\mathbf{n} \cdot (k\nabla T) = \varepsilon(G - \sigma T^4) \quad (4.26)$$

$$G = G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4 + G_{ext} \quad (4.27)$$

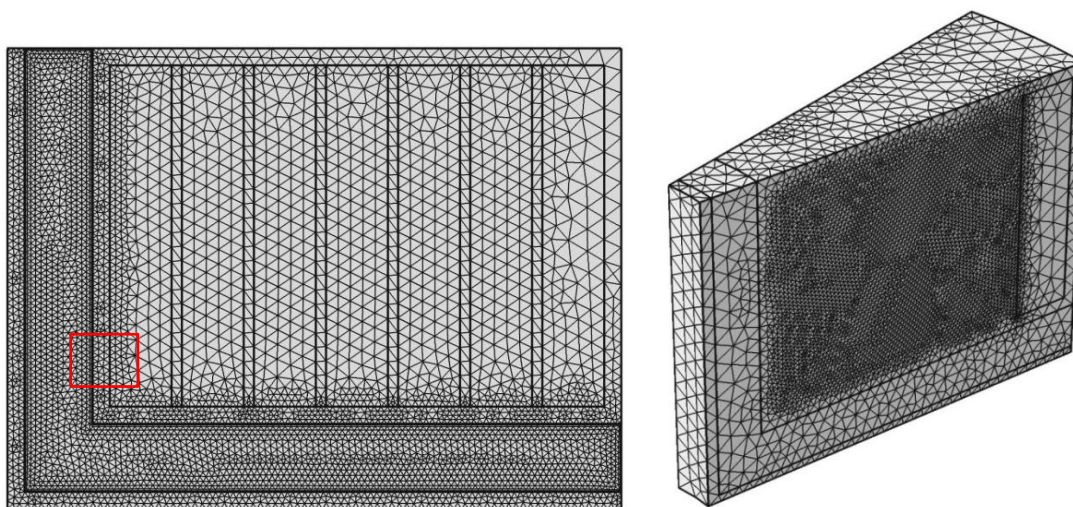
$$J = (1 - \varepsilon)G + \varepsilon\sigma T^4 \quad (4.28)$$



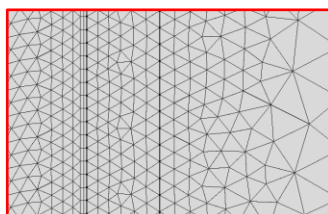
### 4.3.5 Nodenettverk og tidsskritt

I simuleringene er et fysikkdefinert nodenettverk benyttet. I de todimensjonale modellene benyttes et nett bestående av trekantede masker (eng. free triangular mesh), som vist i Figur 4-14. I tillegg benyttes et tynt lag med rektangulære maskeelementer på grensene der fluidet strømmer, for nøyaktig beregning av grensesjikt, som vist i Figur 4-15. Beregningsområdet med fluidstrøm og grensene til denne, er satt til å være «ekstra fint». Områdene med varmetransport i fast stoff har fått et litt grovere nettverk, avhengig av geometrien («fint» og «finere»). I 3D modellen, som vist i Figur 4-14, benyttes et nett bestående av tetraeder, i størrelsen «finere».

Ved kombinasjon av varmetransport i fluider og fast stoff oppstår problemet med at strømningsfeltet utvikler seg svært raskt, mens varmetransporten i PCM og stålbeholderen skjer mye saktere. Dette problemet er løst i de transiente analysene ved å dele opp simuleringen i to, der første del tar for seg utviklingen av hastighetsfeltet og andre del fokuserer på varmeoverføringen i resten av systemet. Den første simuleringen beregner de første 30 sekundene, med tidsoppløsning på 0.75 sekunder. Deretter brukes løsningen fra første del som initialbetingelse for andre del, som simulerer for opp til fire timer med tidsoppløsning på 30 sekunder. For avkjølingsforløpet simuleres det for sju timer, med tidsoppløsning på 30 sekunder.



Figur 4-14. Maskenett benyttet i simuleringene for aksesymmetrisk modell (venstre) og 3D-modell (høyre)



Figur 4-15. Utsnitt av maskenettet, med rektangulære masker på fluidsiden for nøyaktig beregning av grensesjikt

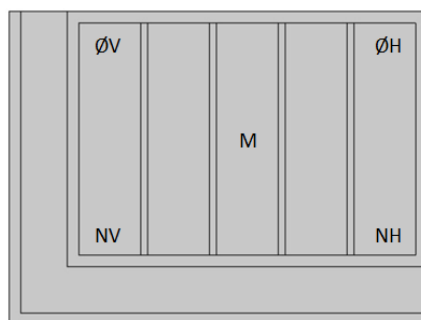
## 4.4 Resultat og diskusjon

I dette kapitlet presenteres resultatet fra de transiente simuleringene av oppvarmingen og nedkjølingen av lageret. Først betraktes den aksesymmetriske modellen med henholdsvis fire og seks konsentriske finner, og deretter oppvarmingsforløpet for 3D-modellen med alternativ finneløsning. Nedkjølingsforløpet er simulert på den aksesymmetriske modellen for en tidsperiode på sju timer.

### 4.4.1 Oppvarmingsforløp

#### 4.4.1.1 Geometri med fire konsentriske finner

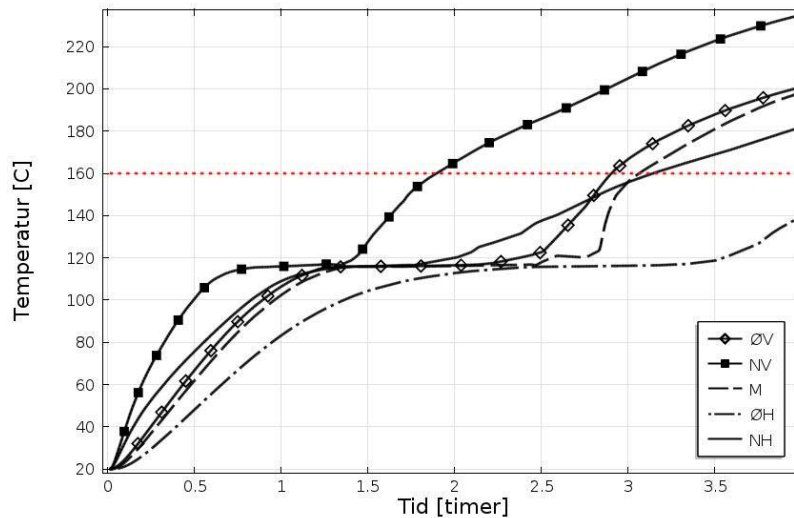
Figur 4-17 og Figur 4-18 viser temperaturutviklingen i modellen med fire aluminiumfinner, simulert i fire timer, fra en initialtemperatur på 20°C. Varmepådraget kommer fra ovnsens topplate (400 °C) og røykrør (200 °C). De fem kurvene viser temperaturutviklingen i fem punkter i lagerets tverrsnitt, som vist i Figur 21. Ettersom dette er en aksesymmetrisk modell, vil temperaturprofilene være like for alle tverrsnitt rundt z-aksen.



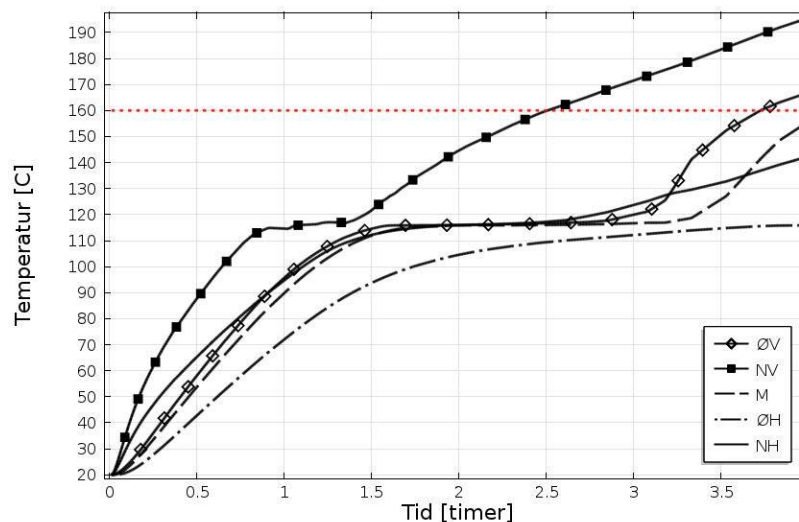
Figur 4-16. Punkter i den aksesymmetriske modellen hvor temperaturene hentes fra. ØV = øverst til venstre, NV = nederst til venstre, M = midten, ØH = øverst til høyre og NH = nederst til høyre

Figur 4-17 viser resultatet av simuleringen der luftstrømmen mellom de varme overflatene og lageret, er stengt med et spjeld på toppen. Faseovergangen kan ses som et flatt parti på kurvene, der varmen fra ovnen tas opp i materialets modifiserte varmekapasitet. Den røde, stiplede linjen viser kritisk temperatur for erythritol: 160°C.

Som forventet stiger temperaturen raskest i punktet NV, og denne delen av lageret er den første til å begynne faseovergangen. PCM som befinner seg i motsatt hjørne av tverrsnittet, i punktet ØH, er det siste som begynner å smelte. Når temperaturkurven i de andre delene av lageret flater ut, er all PCM i punktet NV smeltet, og temperaturen begynner igjen å stige. Etter én time og førtiåtte minutter overstiger temperaturen kritisk temperatur. Lufta mellom ovn og lager blir i dette tilfellet ikke helt stillestående, men får en svak, sirkulerende bevegelse, som vist i vedlegg C.



Figur 4-17. Temperaturforløpet i ulike deler av PCM med fire finner og lukket spjeld

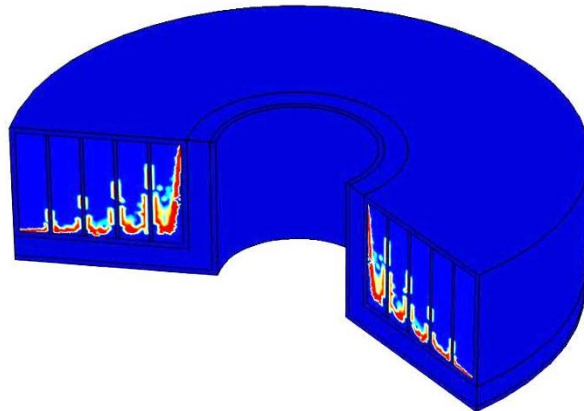


Figur 4-18. Temperaturforløpet i ulike deler av PCM med fire finner og åpent spjeld

Figur 4-18 viser temperatordistribusjonen i modellen simulert med åpent spjeld, det vil si fri luftgjennomstrømning. Luftstrømmen bidrar til å flytte varme bort fra lageret, gjennom åpningen. Det fremkommer på grafen, ved at alle temperaturene stiger saktere enn i Figur 4-17. Faseovergangsmaterialet i det mest utsatte området av lageret, holder seg i dette tilfellet under maksimaltemperaturen i to og en halv time.

I Figur 4-19 er indre energi ( $U = C_p T$ ) vist, etter én og en halv time med oppvarming for modellen med lukket spjeld. Fronten der faseovergangen finner sted, er kan ses som en forstørret verdi av indre energi (rødt). Finnene bidrar til å frakte varme oppover i lageret, og smeltingen skjer raskest nær det varme metallet. Deretter brer smeltefronten seg utover. Det smeltede PCM avgir varme til nabomolekylene, men på grunn av den lave

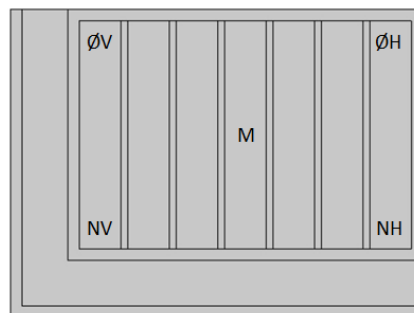
konduktiviteten i smeltet PCM, skjer denne varmeovergangen langsommere enn ved metallet.



Figur 4-19. Indre energi i fasefronten etter 1.5 timer. Smelteranden vises som en sterk økning i indre energi

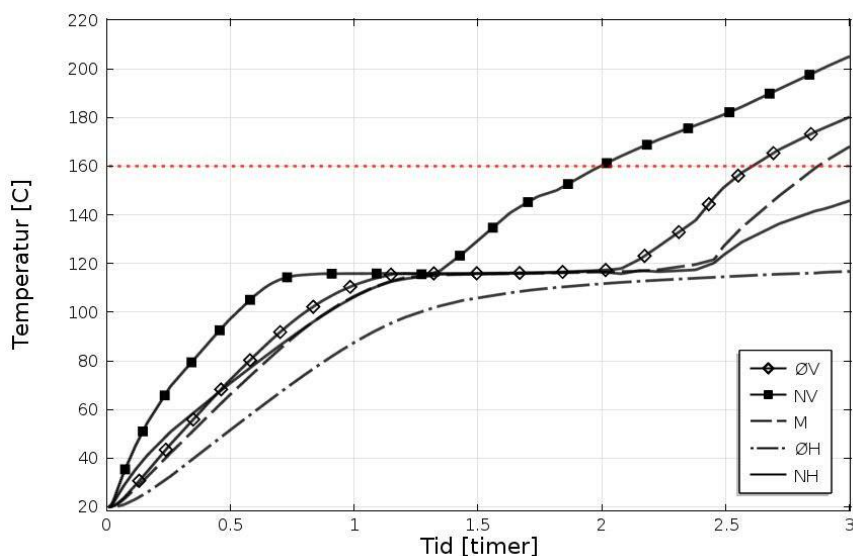
#### 4.4.1.2 Geometri med seks konsentriske finner

Tilsvarende som for modellen med fire finner, er det utført simuleringer på en modell med seks finner. Flere finner vil i teorien føre til en økning av varmetransporten fra varmekilden og ut i faseovergangsmaterialet. Figur 4-21 og Figur 4-22 viser temperaturforløpet i fem punkter i lagerets tverrsnitt. De fem punktene temperaturen er hentet fra, er vist i Figur 4-20.

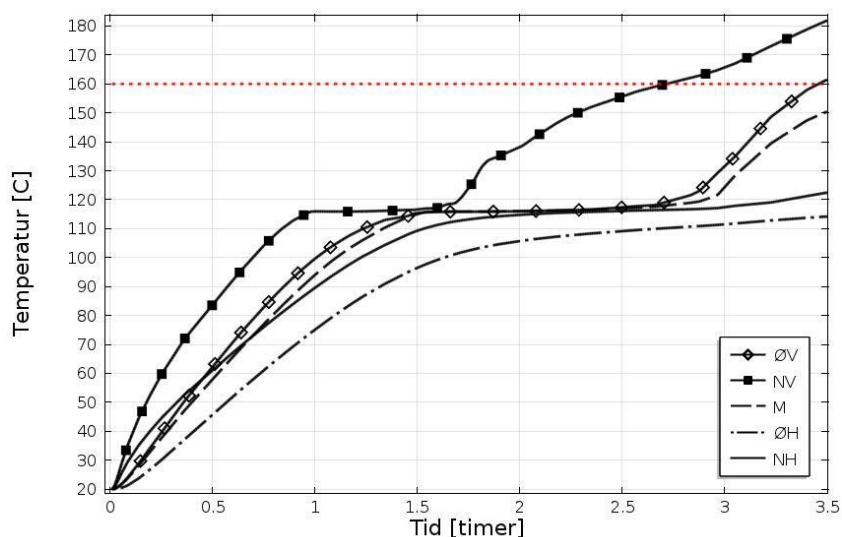


Figur 4-20. Punkter i den aksesymmetriske modellen hvor temperaturene hentes fra. ØV = øverst til venstre, NV = nederst til venstre, M = midten, ØH = øverst til høyre og NH = nederst til høyre

Figur 4-21 viser resultatet fra simuleringen med lukket spjeld. Det mest utsatte området i lageret, punkt NV, når kritisk temperatur etter to timer, som er en forbedring fra modellen med fire finner og lukket spjeld. Dette skyldes at varmeoverføringen ut i lageret er bedre, som et resultat av økt antall finner.



Figur 4-21. Temperaturutviklingen i ulike deler av PCM under oppvarming, med seks finner og lukket spjeld



Figur 4-22. Temperaturutviklingen i ulike deler av PCM, med seks finner og åpent spjeld

Figur 4-22 viser temperaturforløpet i lageret med seks finner og åpent spjeld. Konveksjonsstrømmen bidrar sammen med finneantallet til å holde temperaturen i punkt NV under degraderingstemperatur i to timer og førtito minutter, som er lengre enn for noen av de andre modellene. I Tabell 13 er de viktigste resultatene fra simuleringene presentert i tabellform.

Tabell 13 – Antall timer før PCM i de mest utsatte delene av lageret når kritisk temperatur

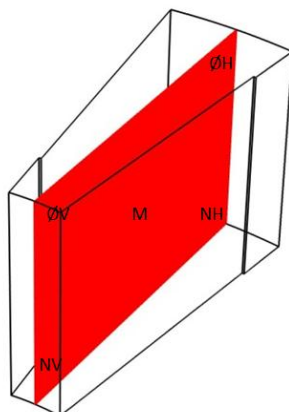
|                 | Lukket spjeld | Åpent spjeld |       |
|-----------------|---------------|--------------|-------|
| <b>4 finner</b> | 1.8           | 2.5          | timer |
| <b>6 finner</b> | 2             | 2.7          | timer |

Resultatet av simuleringene viser at det ved å benytte lukket spjeld i forhold til fri luftstrømning, ikke er mye å vinne på oppvarmingshastigheten. Derimot vil temperaturen de utsatte områdene i lageret stige til kritisk temperaturen betydelig raskere. Det anbefales derfor å beholde spjeldet åpent under hele oppvarmingen.

Å øke antall finner gir som ventet, en mer uniform oppvarming og forlenger perioden før PCM blir for varmt. Asymmetrisk finnekonfigurasjon er et alternativ, som kan benyttes for å få en jevnere transport av varme ved at finnene plasseres tettere der varmekilden er svakest.

#### 4.4.1.3 3D modell med radielle finner

For tilfellet med 3D modellen ble det som nevnt, med den tilgjengelige datakapasiteten, for tungt å beregne det transiente strømningsfeltet mellom ovnsflate og lager. Derfor ble luften definert som fast stoff og varmetransportkoeffisienter ble inkludert i luftas konduktivitet. Strålingsbetingelsene og varmetransportkoeffisienter på utsiden av ovnsoverflatene, samt de andre definisjonene fra den aksesymmetriske modellen, er uendret.

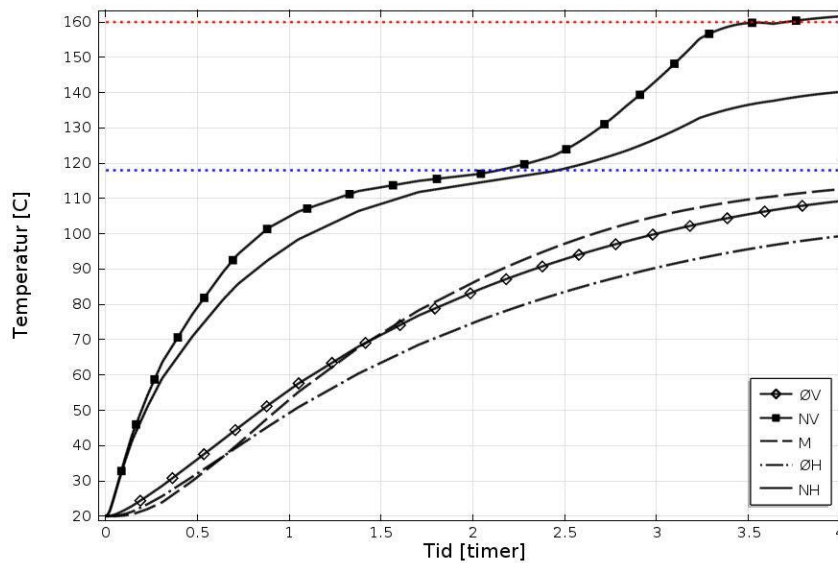


Figur 4-23. Skisse over PCM-området i 3D- modellen, med punktene hvor temperaturene hentes fra inntegnet i et plan. ØV = øverst til venstre, NV = nederst til venstre, M = midten, ØH = øverst til høyre og NH = nederst til høyre

Figur 4-24 viser resultatet av oppvarmingen av modellen. Temperaturene er hentet fra tilsvarende punkter som i den aksesymmetriske modellen, på et plan i midten av beregningsområdet, som vist i Figur 4-23.

Resultatet fra simuleringen viser et noe annerledes temperaturforløp enn for den aksesymmetriske modellen. Også i dette tilfellet skjer oppvarmingen raskest i punkt NV og sist i punkt ØH, men det er større temperaturforskjeller i de ulike delene av lageret i første del av oppvarmingen. Punktet NH stiger raskere i forhold til de andre punktene i modellen, sammenlignet med den aksesymmetriske modellen. Dette kan skyldes at det er en større overflate som varmes opp.





Figur 4-24. Temperaturutvikling i ulike deler av PCM under oppvarmingsforløpet for 3D-modellen

Det mest utsatte punktet i varmelageret, NV, overskrider kritisk temperatur først etter tre og en halv time. Ulempen er at PCM i de midtre og øvre delene av lageret ikke rekker å påbegynne smeltingen. Gjennomsnittlig faseovergangstemperatur er vist som blå stiplet linje i Figur 4-24, og smeltefronten når ikke opp til punkt M på de fire timene simuleringen går over. Varmeøkningen er generelt tregere oppover i høyden i 3D-modellen enn i de aksesymmetriske modellene. Det kan tyde på at finneløsningen ikke er effektiv nok, og at finnene burde stå tettere eller være laget av aluminium. Resultatet fra 3D-modellen er likevel ikke direkte sammenlignbart med den aksesymmetriske modellen, ettersom luftstrømmen mellom ovn og lager er modellert forskjellig, samt at det er benyttet stålfinner.

Ønsket resultat fra simuleringene av oppvarmingsforløpene, er et lager der all PCM smeltet raskt og jevnt i hele lageret, og der temperaturene flatet ut før de nærmet seg kritisk temperatur. For å oppnå bedre resultater på modellen kan dimensjonene, og dermed lagerkapasiteten, reduseres noe. Mest effektivt vil det være å redusere høyden på lageret ettersom det meste av varmen hentes fra ovenns topplate. En alternativ finneløsning kan forsøkes, og luftåpningen mellom ovn og lager kan gjøres større. Det er spesielt viktig å få kjennskap til mer realistiske grensebetingelser for oppvarmingen av lageret, slik at oppvarmingen ved flere etterfølgende fyringsforløp kan modelleres.



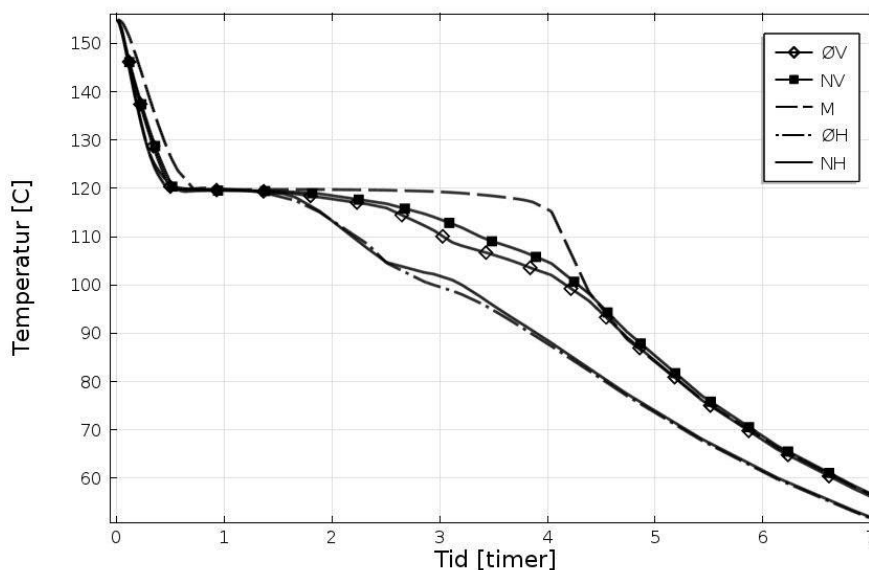
## 4.4.2 Nedkjølingsforløp

I dette kapittelet presenteres resultatet fra simuleringen av lagerets nedkjølingsforløp. Det er antatt at faseovergangsmaterialet er fullstendig smeltet og at lageret inkludert PCM har en initialtemperatur på 155°C.

Etterhvert som lageret nedkjøles vil noe av varmen stråle til røykrøret og varme opp dette, samt luftlaget mellom ovnen og røykrøret. Varmen som transporteres gjennom røykrørveggen fjernes i modellen, ved å definere konveksjonskjøling på innsiden av røret. Det sikrer at noe varme går tapt i til røykrøret, i tillegg til varmen som fraktes ut med lufta. For konveksjonskjølingen er det benyttet samme varmeovergangstall som for den vertikale veggen, og en omgivelsestemperatur på 20°C, da det antas at det er temperaturen inne i røykrøret når det ikke fyres i ovnen. Ovnens toppplate antas derimot å være isolert under, ettersom den har en betydelig varmekapasitet og masse, og lite varme går tapt her.

### 4.4.2.1 2D aksesymmetrisk modell

Resultatet for simuleringen med fire finner er vist i Figur 4-25. Temperaturforløpet er svært likt som for modellen med seks finner ettersom finnene er inne i lageret, og har samme temperatur til å begynne med, og den er derfor ikke tatt med her.



Figur 4-25. Nedkjølingsforløpet i ulike deler av PCM i den aksesymmetriske modellen

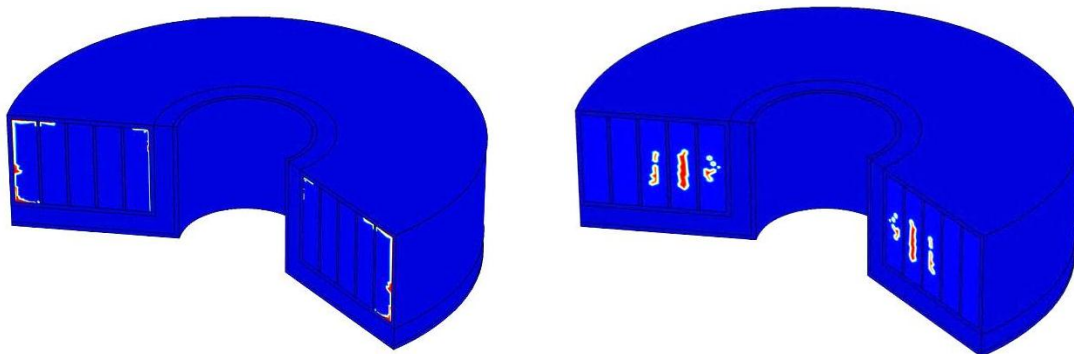
I Figur 4-25 ser man at temperaturen faller raskt til faseovergangstemperaturen i alle deler av lageret. Dette skyldes varmetap til omgivelsene gjennom stråling og konveksjonskjøling. Etter omtrent en halv time begynner størkningen av materialet. På grunn av nedkjøling fra alle lagerets sideflater, vil fasefronten danne seg ytterst i lageret og

bre seg innover, som vist i Figur 4-26. Perioden med faseovergang varer lengst for de midtre delene av lageret, vist som stiplet linje i Figur 4-25.

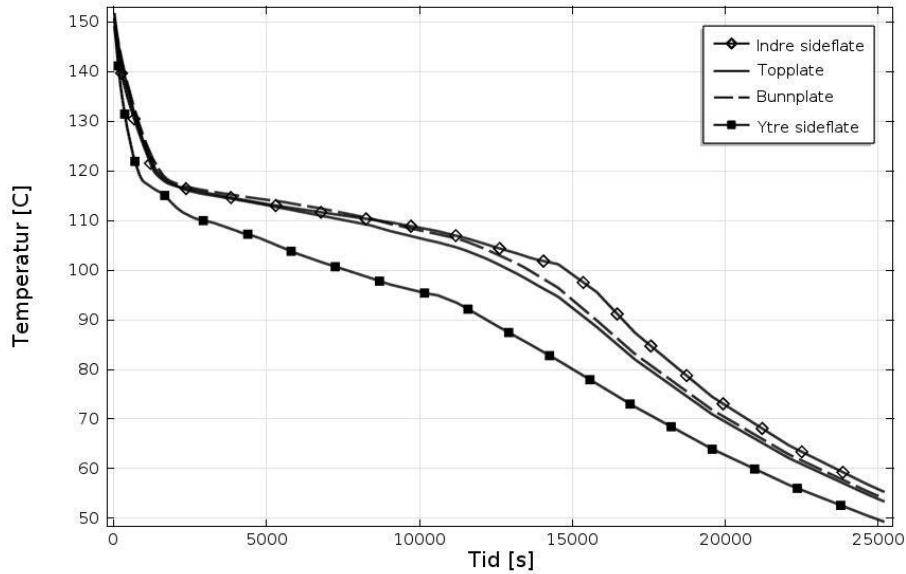
Ytterpunktene til høyre (ØH, NH) har lignende avkjølingsforløp, som skyldes at begge ligger nær lagerveggen mot rommet. Disse områdene har det største varmetapet i form av fri konveksjonskjøling fra romluften og stråling mot omgivelsene. Som ventet er det faseovergangsmaterialet i midten (M), som holder faseovergangstemperaturen lengst. At ytterpunktene til venstre (ØV, NV) holder høyere temperaturer enn høyre side, skyldes at romluften som strømmer mellom lageret og ovnen allerede har tatt til seg varme, samt at stråling skjer mot en annen overflate.

Etter omtrent fire timer er det ikke mer smeltet PCM igjen i lageret, og videre varmeavgivelse skjer i form av følbar varme. Som vist i Figur 4-25 er det etter sju timer, fremdeles mye varme igjen i lageret. Det er i modellen antatt at all PCM i lageret har smeltet når avkjølingen begynner. Dermed er det gunstig ikke å benytte utvendige finner, slik at lageret holder bedre på varmen. Det kan likevel være nødvendig å benytte utvendige finner for å hindre overoppheting av materialet under oppvarmingen.

I Figur 4-26 er indre energi ( $U = C_p T$ ) plottet, for henholdsvis tjue minutter, og fire timer ut i nedkjølingsforløpet. Fronten der faseovergangen finner sted er vist som en forstørret verdi av indre energi. Etter tjue minutter har faseovergangsmaterialet begynt å størkne i kantene, og etter fire timer er det bare et lite område med smeltet PCM igjen. Etter at også dette området størkner, vil videre nedkjøling skje ved følbar varmeavgivelse i hele lageret.

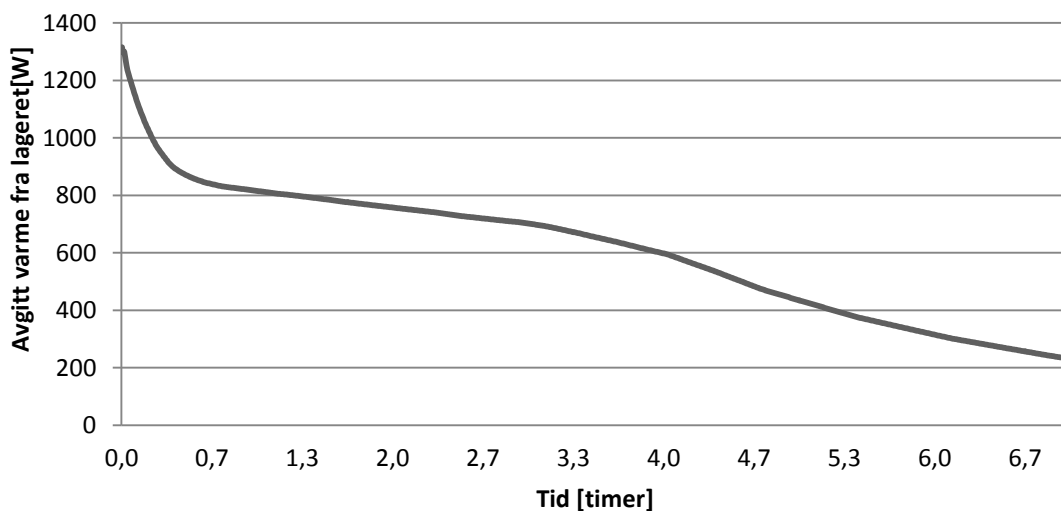


Figur 4-26. Fasefronten vist som en økning i indre energi, etter 20 minutter (venstre) da størkningen foregår i kantene, og fire timer (høyre) da størkningen har nådd midten av lageret



Figur 4-27. Nedkjølingsforløpet for sideflatene på den aksesymmetriske modellen. Indre sideflate = siden som vender inn mot røykrøret, ytre sideflate = siden som vender ut mot rommet

I Figur 4-27 er overflatetemperaturen til lageret vist som gjennomsnittverdier for hver overflate. Etter sju timer er alle overflatene mellom 50 og 60°C. Fra overflatetemperaturer, konveksjonskoeffisienter og emissivitet, er avgitt varmefluks til rommet beregnet som funksjon av tid. Overflateareal er ganget opp med total varmefluks for hver av flatene, og total varme avgitt fra lageret er vist i Figur 4-28, for et tidsløp på sju timer. Varmen avgitt fra lageret inkluderer varme avgitt til røykrøret. Den reelle mengden varme avgitt til rommet vil være noe mindre.



Figur 4-28. Avgitt varme fra varmelageret til røykrøret og rommet

Resultatet av nedkjølingsforløpet viser at temperaturen på lageret synker raskt til faseovergangstemperaturen (ca. en halv time), og deretter ligger avgitt varme fra lageret på mellom 800 W og 600 W i omtrent tre timer.

#### 4.4.3 Diskusjon av den numeriske modellen

Ved numerisk modellering av kompliserte fysiske prosesser er det nødvendig å gjøre forenklinger. Konsekvensen av å inkludere mange detaljer er ofte at løsningen blir uhensiktsmessig tung å beregne. Det er enklere å vurdere resultatet av en modell med lav grad av kompleksitet, og en god regel ved numerisk modellering er å øke kompleksiteten trinnvis. Å modellere i 3D er beregningsmessig svært dyrt, og det er vanlig å forenkle systemet til en aksesymmetrisk 2D-modell der det er mulig. Det går imidlertid på bekostning av enkelte 3D-effekter. 3D-modellen ble i dette studiet beregnet med modifisert konduktivitet i luftsjiktet, fordi datakapasiteten gjorde det vanskelig å beregne full strømning.

For modellen i dette studiet er modelleringen av faseovergang forenklet ved at konveksjonseffekter i smeltefasen er utelatt. Det er sannsynlig at smeltingen vil skje noe raskere dersom det tas hensyn til oppdrift i smelten, det vil si konveksjonseffekter. Fasefrontens posisjon og hastighet er ikke beregnet, men den latente varmen inkluderes i varmeligningen. Andre fenomener, som for eksempel underkjøling, er heller ikke inkludert i modellen. For tilfellet med erythritol kan underkjølingen være opptil 15°C, og det fremgår ikke i grafene. Det vil også foregå en volumendring på inntil 10 %. Modellen antar at hele beholderen er fylt med PCM, mens man i virkeligheten ville ha tillatt et luftlag som gir plass til ekspansjonen. Endring i tetthet vil øke hastigheten på bevegelsen i fasefronten ettersom tettheten for de fleste PCM er størst i fast stoff [19].

I virkeligheten vil de utvendige varmetransportkoeffisienter være funksjoner av temperaturer som varierer både i tid og rom, men disse er i modellen antatt konstante. Videre er det transiente temperaturforløpet til ovnsoverflatene forenklet til en konstant temperatur. Varmekilden er i denne modellen antatt å være konstant, og er uttrykt ved to konstante overflatetemperaturer, henholdsvis 200 °C for røykrøret og 400 °C for ovnsoverflaten. Dersom man på det nåværende tidspunkt hadde hatt tilstrekkelig kunnskap om temperaturforløpet i forbrenningscyklusen, kunne temperaturer eller varmekilder uttrykt som funksjoner av tid, blitt implementert i COMSOL. Røykgassen i røret kunne også vært inkludert i modellen som en strømning med inngangshastighet, noe som naturlig nok ville resultert i en mer kompleks modell.

Oppvarmings- og nedkjølingsforløp er modellert separat, selv om de i realiteten ikke er uavhengige av hverandre. I følge resultatet for oppvarmingsforløpet vil det være temperaturgradienter i lageret også mot slutten av oppvarmingsforløpet. Det vil sannsynligvis være tilfellet, også når en optimalisert finneløsning er på plass eller

konduktivitetsproblemet er løst på annen måte. Derfor vil ikke all PCM være smeltet ved avkjølingsforløpets begynnelse slik som antatt i simuleringen.

Som nevnt i kapittel 2.6. er det viktig å velge korrekt masketetthet og tidskritt ved bruk av ekvivalent varmekapasitetsmetode. Ujevnheter i kurvene i resultatene kan skyldes at maskenett eller tidsoppløsning ikke er valgt tilstrekkelig små. Løsningenes maskesensitivitet er ikke fullstendig testet ved å kjøre simuleringer med ulike maskevidder for å se hvor små maskene må være for at løsningen skal være uendret. En tidsskritt-sensitivitetsanalyse bør også utføres for å sikre at løsningen er uavhengig. Modellen bør i videre arbeid utvikles og alle varmeflukser bør valideres. Dersom det viser seg å bli vanskelig å finne en uavhengig løsning, kan bruk av entalpimetoden vurderes. Til sist må det nevnes muligheten for at det er noen feil i modellens beregning av fri konveksjon med luftstrøm. Den numeriske modellen kan forbedres ved å inkludere et større område rundt lageret hvor luft entrer og forlater lageret, noe som kan redusere eventuelle kanteffekter.



## Kapittel 5

### 5 Alternativt konsept

#### 5.1 Introduksjon

I dette kapittelet er et alternativt konsept vurdert, med varmelager på sidene av ovnen, og med åpning for luftgjennomstrømning, som vist i Figur 3-1. I modellen av konseptet ser man bort fra varmetransporten i lageret, og antar at all varme blir effektivt transportert gjennom faseovergangsmaterialet og ut til romluften. Derfor er en overflatetemperatur på 155°C (5°C lavere enn maksimaltemperaturen til erythritol) satt som grensebetingelse på lagersiden. Ovnsveggen antas å holde 400°C. De varme veggene fører til tetthetsforskjeller i lufta og gir opphav til en kjølede konveksjonsstrøm, drevet av oppdriftskrefter. Hensikten med simuleringene er å bestemme netto varmefluks som treffer lageret, og effekten av å innføre et strålingskjold.

#### 5.2 Geometri og dimensjoner

Når varmelageret festes på ovnsidene med en fast avstand mellom ovn og lager, som i Figur 3-1, i stedet for på toppen av ovnen, blir luftgjennomstrømningen mer effektiv. Det er satt opp en modell for et 30 cm høyt lager, som er plassert 5 cm fra ovnen. Netto innkommende stråling på lageret (når det antas ugjennomsiktig) er beregnet, med og uten stråleskjold. Tabell 14 viser dimensjonene for modellen.

Tabell 14 – Dimensjoner for modellen med og uten stråleskjold

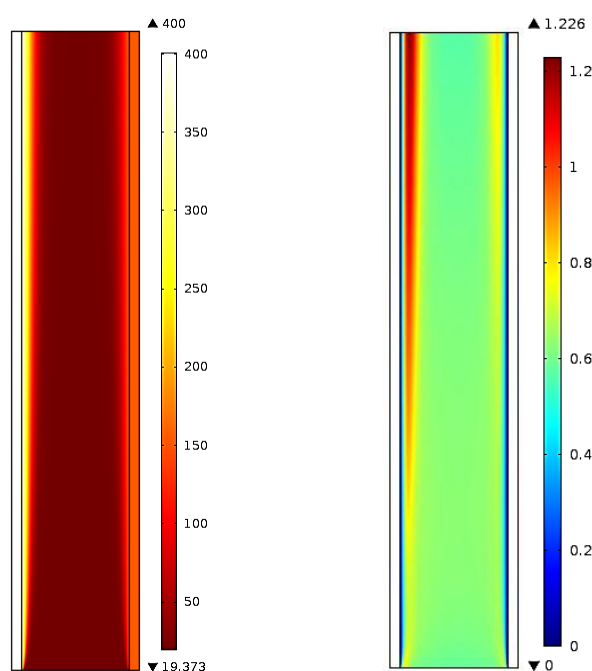
| <i>Alternativt konsept</i> |     |    |
|----------------------------|-----|----|
| Høyde                      | 30  | cm |
| Bredde på luftåpning       | 5   | cm |
| Bredde på stråleskjold     | 0.1 | cm |

#### 5.3 Numerisk modell

Den numeriske modellen inneholder de samme grensebetingelsene som beskrevet i kapittel 4.3.3, med unntak av varmetransport i fast stoff. Luftsjiktet er modellert på samme måte som luftsjiktet mellom ovn og lager i den aksesymmetriske modellen, med varmetransport i fluid, volumkraft og åpne grenser. Grensene til luftsjiktet, henholdsvis ovnen og lageret, har «no slip»-betingelsen, konstante overflatetemperaturer (400°C og 155°C) og stråling mellom overflater. Et «ekstra fint» maskenett er benyttet over hele modellen, og løsningen er stasjonær.

## 5.4 Resultat og diskusjon

Først ble en modell uten stråleskjold satt opp. Temperatur og hastighet som et 2D overflateplot er vist i Figur 5-1, med tilhørende temperatur- og hastighetsprofil ved ulike høyder, fremstilt i vedlegg B. Ovn er på venstre side av luftsiktet, og holder konstant 400°C, og lageret er på høyre side og holder konstant 155°C. I figuren er det termiske grensesjiktet som dannes, etter at likevekt har innstilt seg, vist til venstre, og hastighetsgrensesjiktet er vist til høyre. De høyeste hastighetene befinner seg nær den varme ovnsveggen.



Figur 5-1. Temperaturplot målt i °C (venstre) og hastighetsplot målt i m/s (høyre) for modell uten stråleskjold

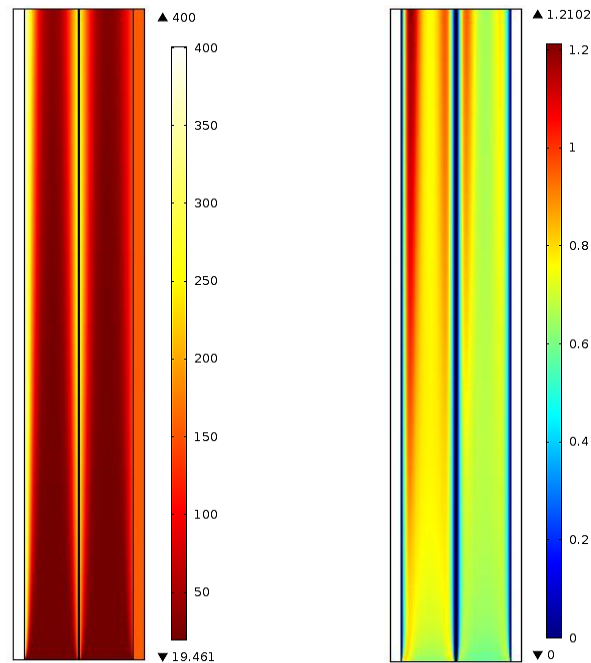
I COMSOL er verdier for utgående og innkommende stråling fra de to veggene beregnet med et linjeintegral over lengden på vegg. Utgående stråling tar utgangspunkt i overflatetemperature og innkommende stråling på motsatt vegg blir lavere på grunn av formfaktoren mot omgivelsene. Total strålingsrate er i størrelsesorden lik utgående minus innkommende stråling og for lagerveggen er denne lik 2.4 kW per meter dybde, eller gjennomsnittlig 8 kW/m<sup>2</sup>. Avviket mellom total stråling og differansen mellom utgående stråling og innstråling, kan skyldes numeriske unøyaktigheter og randeffekter.

Tabell 15 – Strålingsflukser i modellen uten stråleskjold

|                            | Ovn (400°C) | Lager (155°C) |     |
|----------------------------|-------------|---------------|-----|
| <b>Utgående stråling</b>   | 3492.9      | 571.6         | W/m |
| <b>Innstråling</b>         | 484.3       | 2958.9        | W/m |
| <b>Total strålingsrate</b> | 2989.4      | 2406.5        | W/m |

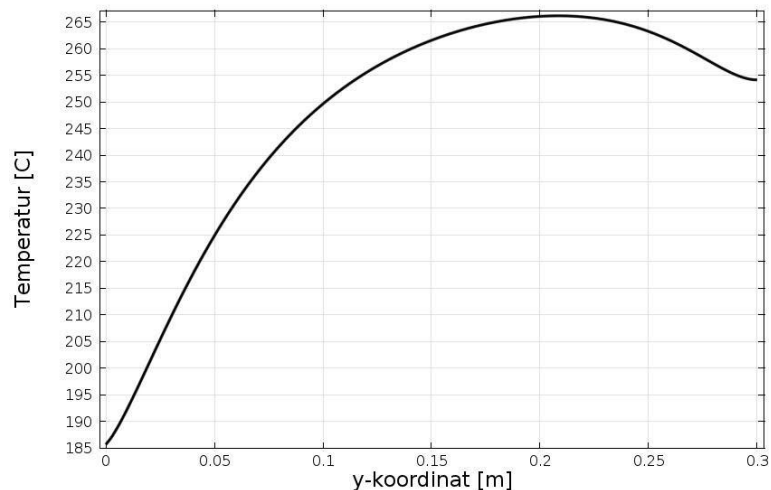


Videre ble en modell med strålingskjold med emissivitet lik 1 satt opp. Temperatur og hastighet som et 2D overflateplot er vist i Figur 5-2, med tilhørende temperatur og hastighets-profil ved ulike høyder, fremstilt i vedlegg B.



Figur 5-2. Temperaturplot målt i °C (venstre) og hastighetsplot målt i m/s (høyre) for modell med stråleskjold

På kurven i Figur 5-3 ser man at ved stabil løsning, vil temperaturen på strålingskjoldet variere med posisjon, fra 186°C ved luftinntaket til en maksimaltemperatur ved 2/3 av høyden. Derfra avtar temperaturen på grunn av åpningen mot rommet.



Figur 5-3. Temperatur som funksjon av stråleskjoldets høyde

Tilsvarende som for modellen uten strålingskjold er strålingsfluksen på de fire overflatene presentert i Tabell 16.

Total strålingsrate på grensen til lagerveggen er i dette tilfellet bare 0.61 kW per meter dybde, eller 2 kW/m<sup>2</sup>, som er en reduksjon på 74 %.

Tabell 16 – Strålingsflukser på overflaten til ovnen, lageret og strålingsskjoldet. VS = venstre side av skjoldet, HS = høyre side av skjoldet

|                             | Ovn    | Skjold VS | Skjold HS | Lager  |     |
|-----------------------------|--------|-----------|-----------|--------|-----|
| <b>Utgående stråling</b>    | 3492.9 | 1268.4    | 1268.1    | 571.6  | W/m |
| <b>Innstråling</b>          | 1179.7 | 3219.2    | 526.9     | 1179.4 | W/m |
| <b>Total strålingsfluks</b> | 2303.4 | 1960.7    | 731.4     | 617.6  | W/m |

Temperaturen på stråleskjoldet avtar ved utgangen på grunn av stråling mot omgivelsene. Resultatet viser at kombinasjonen med strålingsskjold og fri konveksjon har en betydelig effekt på reduksjon av varmetransporten. Dersom lageret klarer å kvitte seg med 26 % av energien gjennom god ledning vil overoppheting kunne unngås.

Luftstrømningen kunne vært begrenset ved å benytte spjeld oppe og nede. Dersom en antar vakuum mellom overflatene, vil temperaturen på skjoldet ikke variere i høyde, men holde konstant temperatur. Utrekninger viser at strålereduksjonen i det tilfellet, med emissivitet lik 1 på alle overflater, er på 50 % [30]. Det vil si at det er 24 % mer effektivt å kombinere stråleskjold med konveksjonskjøling. Temperatur og hastighetsprofiler (vedlegg B) viser temperatur og hastighetsprofiler for modellene, som ser ut som forventet. Likevel er det mulig også her at resultatet er påvirket av randeffekter, og at et større luftområde skulle vært modellert for presise varmefluksberegninger. For øvrig henvises det til den generelle diskusjon av numeriske modeller og frikonveksjon i kapittel 4.

## Kapittel 6

### 6 Konklusjon og forslag til videre arbeid

I dette arbeidet er varmelagring med faseovergangsmaterialer vurdert. To materialer som kan være egnet for varmelagring i vedovner er beskrevet i rapporten, henholdsvis natrumacetat trihydrat og erythritol. Videre er det undersøkt metoder for temperaturkontroll av PCM, med den hensikt å unngå overoppheting og degradering av materialene. Metodene er fremstilt på konseptuelt plan.

Et konsept for et varmelager foreslått, hvor varmen tas opp fra vedovnens topplate og røykrør. Tre ulike finnekonfigurasjoner er vurdert, og numeriske beregninger av konseptet er utført med simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics®. To geometrier med konsentriske finner er modellert i 2D med aksesymmetri, og én geometri med radielle finner er modellert i 3D. Resultatet av sistnevnte viser at PCM holder seg under kritisk temperatur lengre enn for de to andre geometriene, men varmeledningen i lageret er for lav, og det tar uakseptabelt lang tid før de øvre delene av lageret smelter. Den mest lovende modellen er geometrien med seks konsentriske finner og fri luftgjennomstrømning, hvor overoppheting av materialet forekommer først etter to timer og førtito minutter med kontinuerlig fyring. Da dette arbeidet, som nevnt innledningsvis, har vært ment som en første gjennomgang av problemstillingen, foreligger det flere forslag til videre arbeid.

For å gjøre modellen som presenteres i denne rapporten i stand til å forutsi oppførselen til et virkelig varmelager under oppvarming, må de faktiske temperaturene på ovnens topplate være kjent. Disse vil variere avhengig om ett eller flere fyringsforløp betraktes. Kjennskap til varmeutviklingen i brennkammeret er nødvendig for å beregne varmetransporten gjennom vegg som grenser til lageret. Når de nevnte verdiene er tilgjengelige, kan de i COMSOL uttrykkes som tidsvarierende varmeflukser eller temperaturer.

For å redusere kanteffekter ved modellering av fri konveksjonsstrøm, kan det være hensiktsmessig å inkludere et større beregningsområde utenfor området av interesse. Det kan for eksempel være 2-5 ganger større enn geometrien som betraktes [44]. Nøye valg av tidsskritt og maskestørrelse er en nødvendighet for en uavhengig løsning av den endelige numeriske modellen, spesielt ved bruk av ekvivalent varmekapasitetsmetode. Dersom det viser seg vanskelig å finne en slik løsning, må man vurdere å benytte en alternativ beregningsmetode for faseovergangen. Slike metoder kan være den temperaturtransformerende modellen eller entalpiemetoden, som nevnt i kapittel 2.6. For å kunne benytte disse metodene behøves informasjon om entalpier som kan skaffes fra eksperimenter.

En viktig oppgave er å forbedre konduktiviteten i faseovergangsmaterialet. De numeriske resultatene har vist at det å øke antall finner, er med på å fordele varmen og senke temperaturen i PCM nær varmekilden. For å forbedre modellen kan det benyttes en alternativ finnekonfigurasjon, for eksempel tettere radielle finner. Videre kan lagerdimensjonene reduseres i høyden for å redusere avstanden smeltefronten må vandre fra varmekilden. Det anbefales å studere metoder som for eksempel aluminiumskum, som nevnt i kapittel 2.3. Et videre skritt er å integrere slike løsninger i den numeriske modellen.

Når endelig valg av faseovergangsmaterialet er tatt, anbefales det at det kjøpes inn og testes. Temperaturavhengige, termodynamiske egenskaper hos faseskiftematerialet kan bestemmes i laboratoriet med nøyaktig utstyr. Videre kan de realistiske materialegenskapene kurvetilpasses som funksjon av temperatur, og defineres i den numeriske modellen. Det anbefales å følge videre forskning som gjøres på erythritol, ettersom det er et relativt nytt stoff i PCM-sammenheng. Natriumacetat trihydrat er derimot et godt etablert PCM, og mye litteratur er tilgjengelig.

I laboratoriet kan også de ulike metodene for temperaturkontroll av PCM testes. Når en tilstrekkelig pålitelig numerisk modell er etablert, kan den optimaliseres i forhold til design. Videre kan de numeriske resultatene valideres mot eksperimentelle resultater. I vedlegg D er en oversikt over aktuelle områder som må vurderes ved utvikling av nye, latente varmelagringskonsepter. Oppsummert anbefales følgende punkter til videre arbeid:

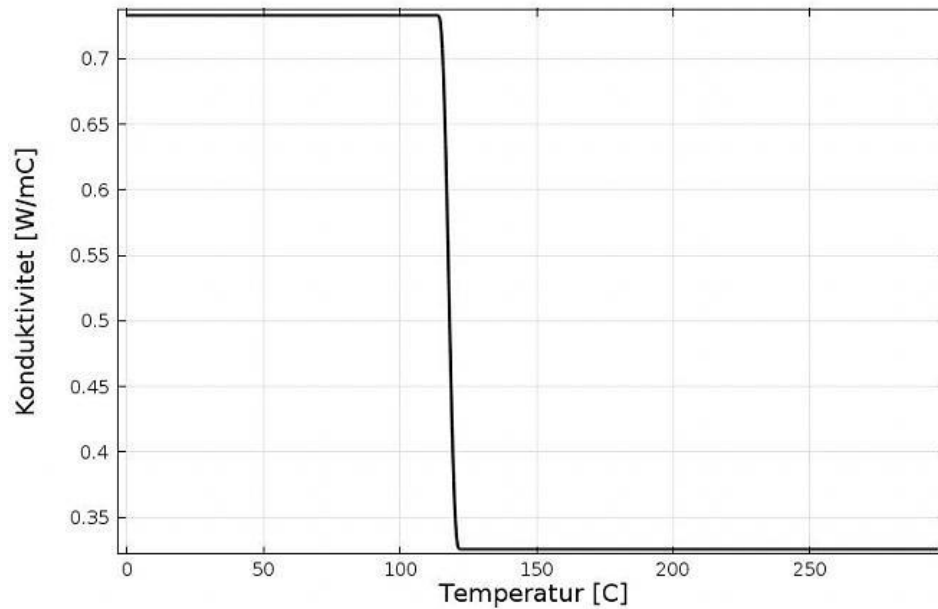
- Validering av varmeflukser i COMSOL og/eller inkludere større luftområde rundt modellen
- Undersøke alternative metoder for økning av varmetransport i erythritol
- Optimalisering av geometri/finnekonfigurasjon i COMSOL
- Fastslå materialegenskaper for erythritol i laboratorium med for eksempel DSC, og etablering av materialegenskaper som funksjoner av temperatur. Disse kan deretter implementeres i COMSOL
- Modellere forbrenningsprosessen for å oppnå realistiske temperaturforløp, og implementere disse i COMSOL
- Eksperimentell testing av optimalisert konsept i laboratorium
- Testing av stabilitet ved gjentatte oppvarmings- og nedkjølingssykluser

## 7 Kilder

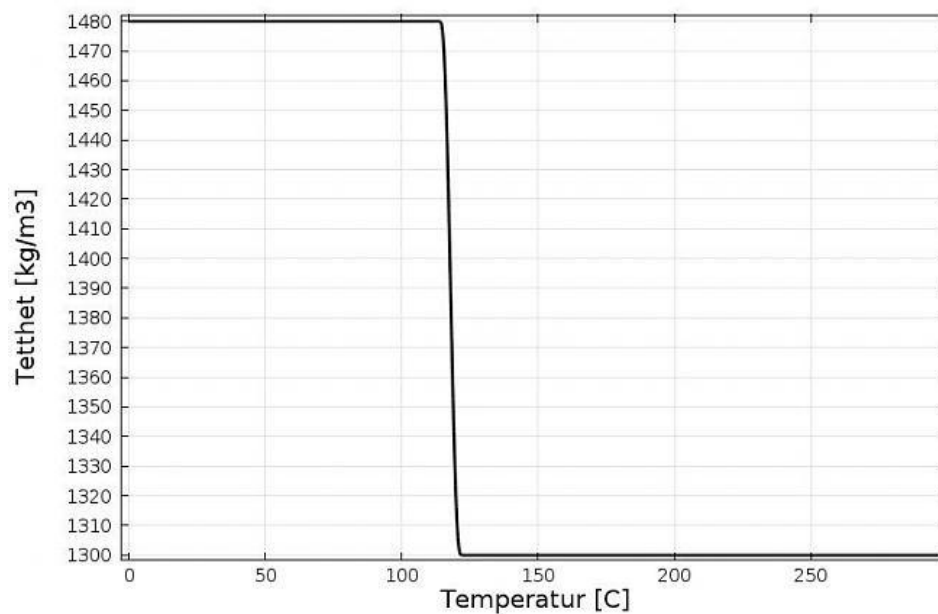
1. [www.norskvarme.org](http://www.norskvarme.org). *Spar strøm - spar miljøet. Fakta om vedfyring*. 2011.
2. Dincer, İ. and M.A. Rosen, *Thermal energy storage: systems and applications*2011, Chichester: Wiley. XVIII, 599 s.
3. Mehling, H. and L.F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*2008, Berlin: Springer. xvi, 308 s.
4. Zalba, B., et al., *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering, 2003. **23**(3): p. 251-283.
5. Lane, G.A., *Solar heat storage: Latent heat materials*1983. Medium: X; Size: Pages: 248.
6. A, A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials*. Solar Energy, 1983. **30**(4): p. 313-332.
7. Agyenim, F., et al., *A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(2): p. 615-628.
8. Kenisarin, M. and K. Mahkamov, *Solar energy storage using phase change materials*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(9): p. 1913-1965.
9. Sharma, A., et al., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(2): p. 318-345.
10. Van Loo, S. and J. Koppejan, *The handbook of biomass combustion and co-firing*2007, London: Earthscan. xix, 442 s.
11. S.M, H., *Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques*. Energy Conversion and Management, 1998. **39**(11): p. 1127-1138.
12. Luisa Cabeza, A.H., Wolfgang Streicher, *Inventory of Phase Change Materials (PCM)*, 2005, IEA Solar Heating and Cooling programme.
13. Regin, A.F., S.C. Solanki, and J.S. Saini, *Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**(9): p. 2438-2458.
14. Mehling, H., et al., *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*2008, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
15. Farid, M.M., et al., *A review on phase change energy storage: materials and applications*. Energy Conversion and Management, 2004. **45**(9-10): p. 1597-1615.
16. Kaizawa, A., et al., *Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system*. Heat and Mass Transfer, 2008. **44**(7): p. 763-769.
17. H Kakuichi, M.y., M Yabe, S Chihara. *A study of erythritol as phase change material*. in *Phase change material and chemical reactions for thermal energy storage*. 1998. Sofia, Bulgaria.
18. Shukla, A., D. Buddhi, and R.L. Sawhney, *Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials*. Renewable Energy, 2008. **33**(12): p. 2606-2614.
19. Faghri, A., Y. Zhang, and J.R. Howell, *Advanced heat and mass transfer*2010, Columbia, MO: Global Digital Press.
20. Ogoh, W. and D. Groulx, *Effects of the heat transfer fluid velocity on the storage characteristics of a cylindrical latent heat energy storage system: a numerical study*. Heat and Mass Transfer, 2012. **48**(3): p. 439-449.
21. Voller, V.R., C.R. Swaminathan, and B.G. Thomas, *Fixed grid techniques for phase change problems: A review*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990. **30**(4): p. 875-898.
22. Voller, V.R., M. Cross, and N.C. Markatos, *An enthalpy method for convection/diffusion phase change*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1987. **24**(1): p. 271-284.

23. Voller, V.R. and L. Shadabi, *Enthalpy methods for tracking a phase change boundary in two dimensions*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1984. **11**(3): p. 239-249.
24. Rabin, Y. and E. Korin, *An efficient numerical solution for the multidimensional solidification (or melting) problem using a microcomputer*. International Journal of heat and mass transfer, 1993. **36**(3): p. 673-683.
25. Dalhuijsen, A.J. and A. Segal, *Comparison of finite element techniques for solidification problems*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1986. **23**(10): p. 1807-1829.
26. Dantzig, J.A., *Modelling liquid–solid phase changes with melt convection*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1989. **28**(8): p. 1769-1785.
27. Lamberg, P., R. Lehtiniemi, and A.-M. Henell, *Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage*. International Journal of Thermal Sciences, 2004. **43**(3): p. 277-287.
28. Foong, C.W., *Experimental and numerical investigations of a small scale double-reflector concentrating solar system with latent heat storage*, in *Department of Energy and Process Engineering*2011, NTNU.
29. <http://www.thermalactuators.com/>.
30. Incropera, F.P., et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*2010, New York: Wiley.
31. [http://www.orbital.com/NewsInfo/Publications/TSD/Thermal Louvers Brochure.pdf](http://www.orbital.com/NewsInfo/Publications/TSD/Thermal_Louvers_Brochure.pdf).  
*Thermal Control Louvers*.
32. Seeboth, A., R. Ruhmann, and O. Mühling, *Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control*. Materials, 2010. **3**(12): p. 5143-5168.
33. Wallner, G.M., K. Resch, and R. Hausner, *Property and performance requirements for thermotropic layers to prevent overheating in an all polymeric flat-plate collector*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008. **92**(6): p. 614-620.
34. Resch, K. and G.M. Wallner, *Thermotropic layers for flat-plate collectors—A review of various concepts for overheating protection with polymeric materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009. **93**(1): p. 119-128.
35. Reay, D.A., P.A. Kew, and P.D. Dunn, *Heat pipes*2006, Burlington, MA: Butterworth-Heinemann. xvii, 377 s.
36. Faghri, A., *Heat pipe science and technology*1995, Washington, D.C.: Taylor & Francis. XXXIII, 874 s.
37. Idsø, B.R., *Beregningsprogram for varmerør*, in *Institutt for energi og prosessteknikk*2009, NTNU.
38. Agyenim, F., P. Eames, and M. Smyth, *A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins*. Solar Energy, 2009. **83**(9): p. 1509-1520.
39. Skreiberg, Ø., *Veiledning på E-mail*, 2012.
40. Agyenim, F., P. Eames, and M. Smyth, *Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling system*. Renewable Energy, 2011. **36**(1): p. 108-117.
41. Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*2006: John Wiley.
42. White, F.M., *Fluid mechanics*2011, New York: McGraw-Hill. XV, 862 s.
43. Kakaç, S., R.K. Shah, and W. Aung, *Handbook of single-phase convective heat transfer*1987, New York: Wiley. Chapter 12.2.2 Approximations in Natural Convection.
44. Matia, Y., *COMSOL Forum*, 2012.

## Vedlegg A: Konduktivitet- og tetthetsfunksjoner for erythritol

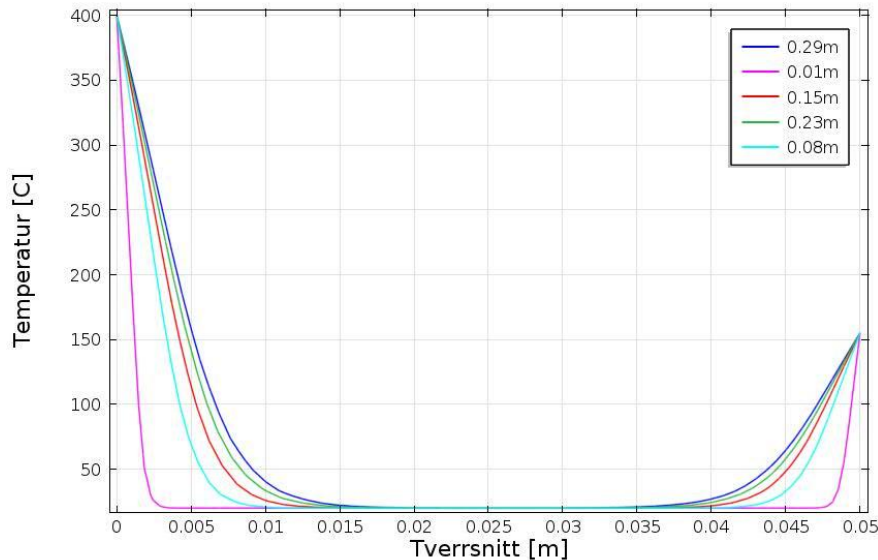


Konduktivitet i erythritol som funksjon av temperatur, slik den er definert i COMSOL

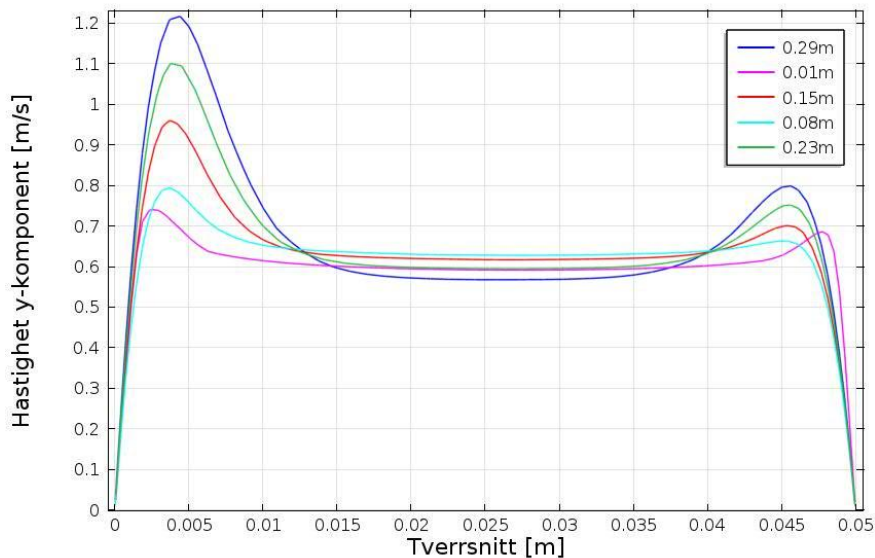


Tetthet i erythritol som funksjon av temperatur, slik den er definert i COMSOL

## Vedlegg B: Temperatur- og hastighetsprofil for alternativt konsept

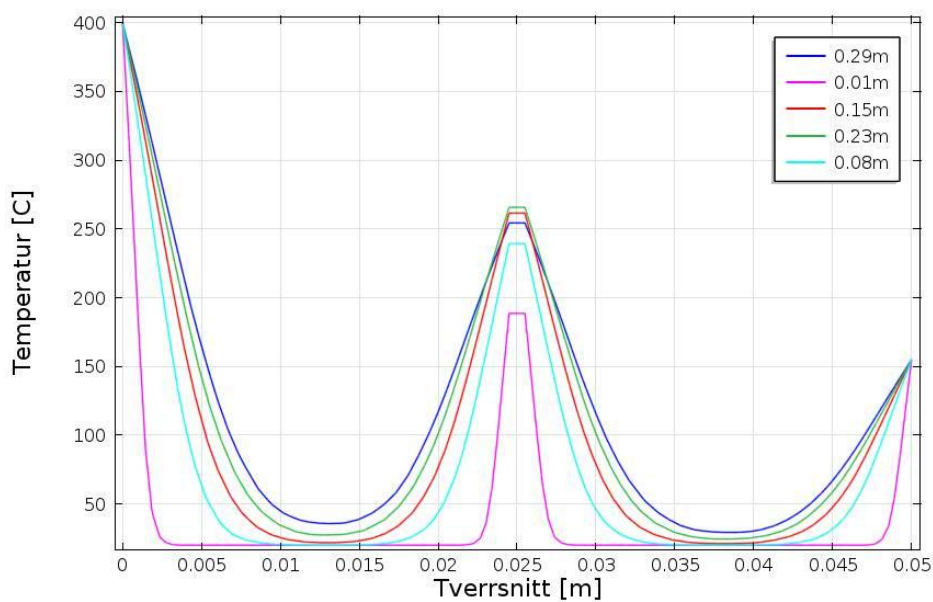


Temperaturprofiler i den stasjonære modellen uten stråleskjold. 0.01m er ved inngangen nede hvor lufttemperaturen er lavest, og 0.29m er ved utgangen oppe hvor lufttemperaturen er høyest. Figuren viser at midtsjiktet har omgivelsestemperatur og de termiske grensesjiktene ikke gror sammen.

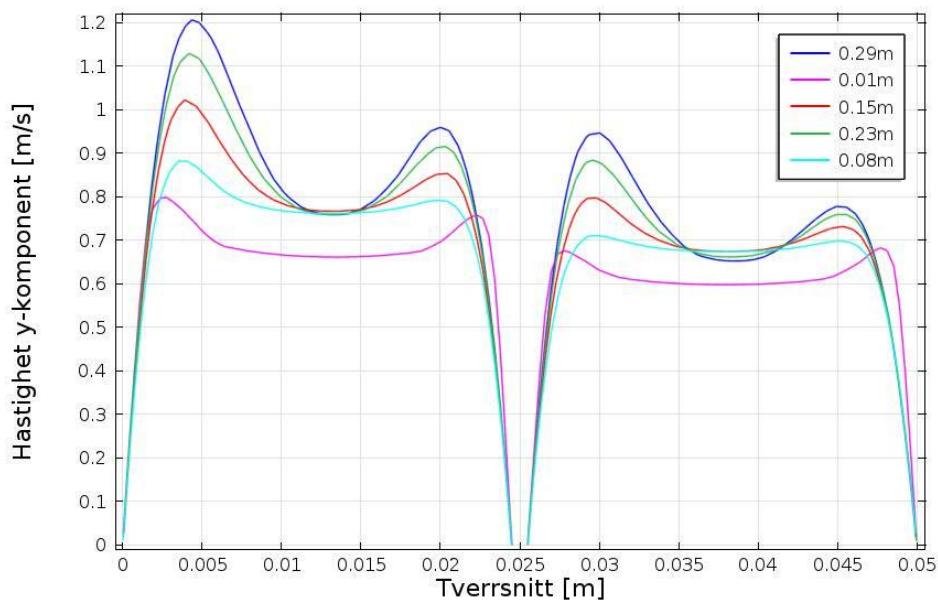


Hastighetsprofiler i den stasjonære modellen uten stråleskjold. 0.01m er ved inngangen nede hvor lufthastigheten er lavest, og 0.29m er ved utgangen oppe hvor lufthastigheten er størst



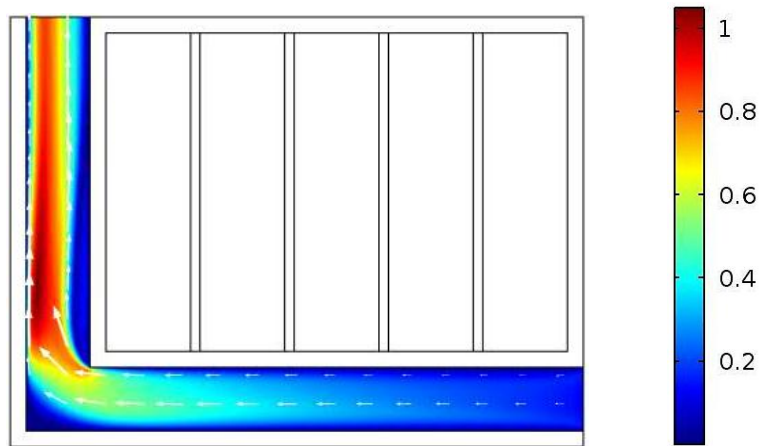


Temperaturprofiler i den stasjonære modellen med stråleskjold. 0.01m er ved inngangen nede, hvor lufttemperaturen er lavest, og 0.29m er ved utgangen oppe, hvor lufttemperaturen er høyest. Figuren viser at det termiske grensesjiktet vokser sammen ca. halvveis oppe

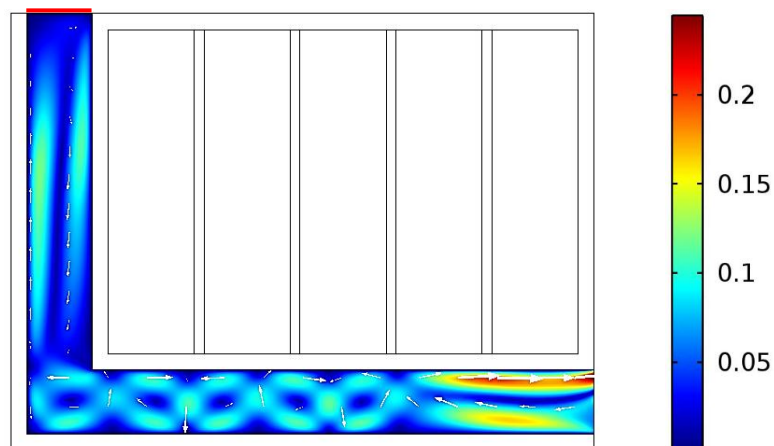


Hastighetsprofiler i den stasjonære modellen med stråleskjold. 0.01m er ved inngangen nede hvor lufthastigheten er lavest, og 0.29m er ved utgangen oppe hvor lufthastigheten er størst.

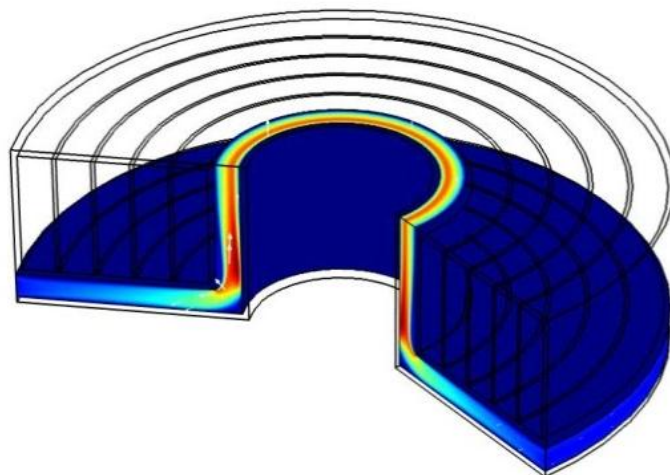
## Vedlegg C: Resultater fra simuleringene



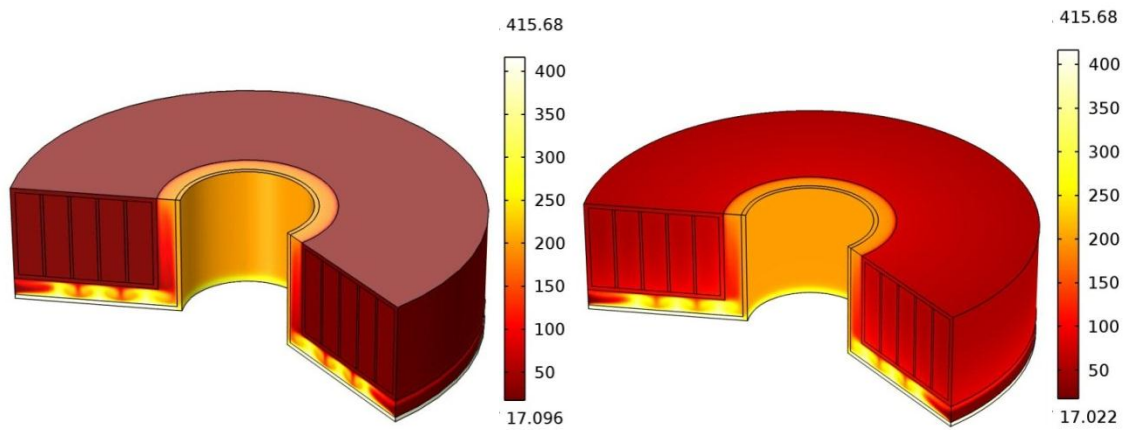
Eksempel på strømningsmønster i modell med åpent spjeld under oppvarming. Hastigheten er målt i m/s. Pilene i hvitt viser retningen på hastighetsfeltet



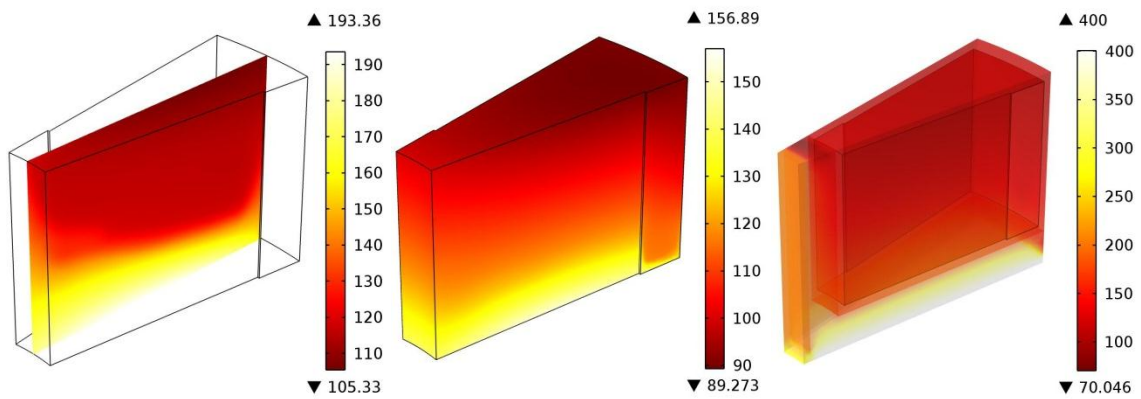
Eksempel på strømningsmønster i modell med lukket spjeld (rød strek) under oppvarming. Hastigheten er målt i m/s. Pilene i hvitt viser retningen på hastighetsfeltet



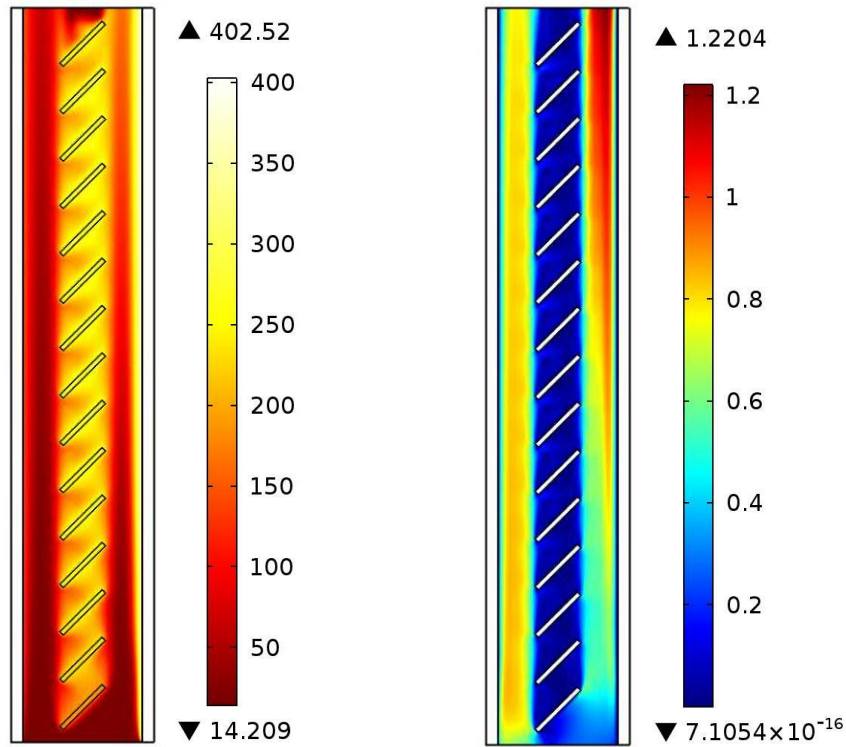
Hastighetsplotet med laminær strømning speilet rundt z-aksen



Temperaturen i varmelageret med lukket spjeld målt i °C, etter 30 sekunders oppvarming (venstre) og 30 minutters oppvarming (høyre)

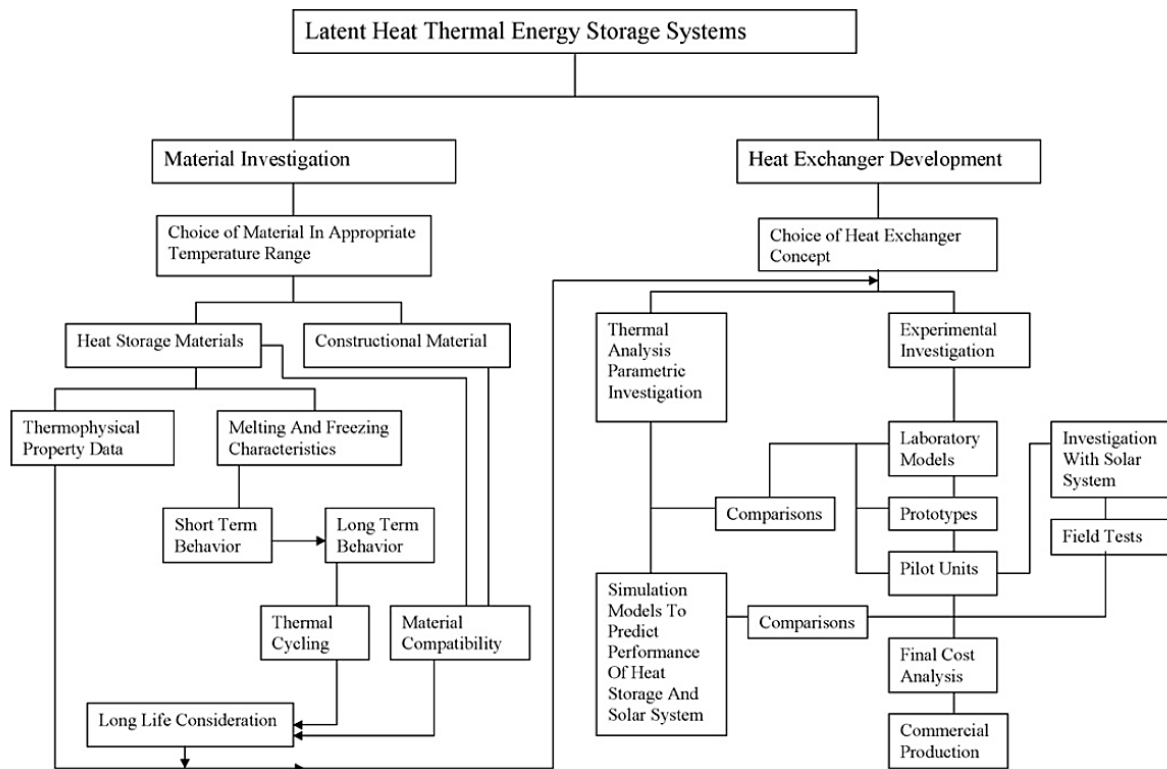


3D modellen under oppvarming. Temperaturer målt i °C i plan (venstre), PCM (midten) og hele utsnittet med luftsjikt, røykrør, beholder og PCM (høyre)



Stasjonær løsning av modell med termiske sjalusier, med ovnen (400°C) på høyre vegg og lageret (155°C) på venstre vegg. Temperaturplot målt i °C (venstre) og hastighetsplot målt i m/s (høyre)

## Vedlegg D: Flytskjema for latent varmelagring



Flytskjema med de aktuelle forskningsområdene for utvikling av et nytt, latent varmelagringssystem [4]