



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Bestemmelse af energiindhold i

Højtemperatur ener- gilagre

Titel:

Højtemperatur energilagre

Udarbejdet for:

| Resultatkontrakt | A3 | MP1.5 |

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Installation og Kalibrering

December 2016

Forfatter: MOKR

Indholdsfortegnelse

1. Indledning	4
2. Beregninger	4
3. Konklusion og videre arbejde	8
4. Litteraturliste	9

1. Indledning

Der er i de foregående år, i Energi & Klima på Teknologisk Institut, blevet arbejdet på forskellige projekter vedrørende højtemperatur varmelagring. Det forudgående projekt¹ [1] og det igangværende projekt² fokuserer begge på højtemperatur energilagring ved at lagre varme i et faseskiftende materiale. For at opnå en tilstrækkelig høj lagereffektivitet fokuseres der på metaller som faseskiftende materiale hvor temperaturen for faseskiftet ligger forholdsvist højt, og fordi metaller typisk har en høj varmekapacitet og andre gode termofysiske egenskaber såsom fx en særdeles god varmeledningsevne. Sidstnævnte er særlig vigtig i forhold kompleksiteten af de systemer der skal anvendes til op og afladning af det faseskiftende materiale.

De studier der findes vedrørende lagring af varme i faseskiftende medier fokuserer ofte på andet end teknikker til at monitøre lagerets tilbageværende varmeindhold. Herudover findes der kun meget få studier vedrørende lagring af varme i faseskiftende metaller, og de få der er lavet fokuserer typisk på selve lagringsmaterialet [2]–[5] eller effektiviteten af varmevekslersystemet [6], [7].

I forbindelse med projektet "Storing electricity from renewable energy sources" og arbejdet under resultatkontrakten (A3 – EnergyFlexStorage) er der lavet studier der skan anvendes som input til udvikling af metoder til bestemmelse af energiindhold i termiske lagre der anvender den latente varme. For at holde udviklingsudgifter og produktionsudgifter nede, og for at minimere risiko for fejl, er det vigtigt at den udviklede monitoreringsmetode er meget simpel, både hvad angår de nødvendige sensorer, og også hvad angår selve databehandlingen af målinger indsamlet af de sensorer der er monteret på lagersystemet. Da vi fokuserer på den latente varme er det derfor oplagt at monitorere temperaturgradienter i lagermaterialet, da disse gradienter på en simpel måde, giver et forholdsvis præcist estimat af lagerets latente varmeindhold. Monitorering af lagerets sensible varmeindhold er teoretisk set også muligt vha. monitorering af temperaturændringer, men dette er langt mere kompliceret i praksis, idet det kræver meget nøjagtige og velkalibrerede temperatur-sensorer hvilket højst sandsynlig ikke er rentabelt i forbindelse med eventuelle kommercielle faseskiftende varmelagre.

2. Beregninger

I beregningerne præsenteret i dette notat tages der udgangspunkt i et modelsystem der beskriver et varmelager som udnytter den latente varme i aluminium. Lageret har cylindergeometri og aflades ved hjælp af damp igennem et stålrør der går igennem aluminiummaterialet (se Figure 1). For mere detaljeret beskrivelse af modelsystemet og implementering af beregningerne se [1], [8]. Princippet der vedrører bestemmelse af lagerets varmeindhold er gyldige uanset lager og varmevekslingsmedium, og den simple cylindergeometri kan bruges som approksimation af mere avancerede geometrier.

¹ Storing electricity from renewable energy sources, ForskEL, (<http://energiforskning.dk/da/project/storing-electricity-renewable-energy-sources>)

² Energilagring i aluminiums faseovergang, ForskEL (<http://www.energiforskning.dk/node/7825>)

Figure 2 og Figure 3 viser et radiale cylinder-tværsnit ($l := [0 - L], r := [r_1 - r_n]$) af henholdsvis afladningsgraden og temperaturen i lageret efter 6 timers simuleringstid. Det ses at afladningen sker forholdsvis jævnt fordelt over de 10 meter i længderetningen, og at temperaturgradienten er forholdsvis lille både aksialt og radiale. Størrelsen af temperaturgradienten er på intet tidspunkt under lagerets afladning større end ca. 200 mK hen over hele lageret (se Figure 4). Herudover ses det på Figure 5 at temperaturgradienten kan bruges til at indikere hvor stor en del lageret er afladt. Områder i lageret med fuld eller delvist fuld latent varme indhold ligger på en konstant temperatur på 660 °C (temperaturen for faseovergangen mellem fast og smeltet aluminium). I områder hvor temperaturen er lavere end 660 °C er hele den latente varme afladt, og den sensible varme medvirker her til afladningen. Figure 4 viser desuden hvordan afladningsgraden indikeres vha. temperaturgradienten for forskellige simuleringstider. Fx ses det på Figure 4 at efter 11 timers afladning er energiindholdet svarende til den latente varmemængde indenfor 55 % af radius opbrugt.

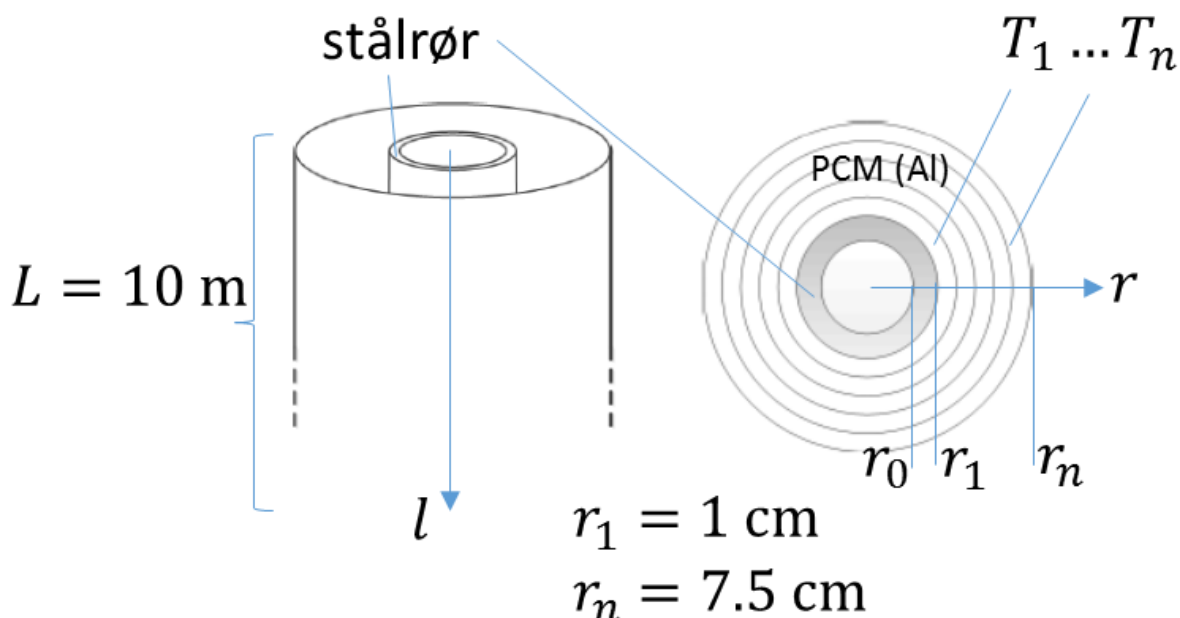


Figure 1: Skitse af geometrien i det modelsystemet der ligger til grund for de numeriske beregninger. Beregningerne er simplificeret ved den valgte cylinder-symmetri. Lageret er 10 meter langt og stålrøret til dampføringen har en ydre diameter på ca. 1 cm. PCM-materialet (aluminium) der ligger omkring stålrøret har en indre og ydre diameter på hhv. 1 cm og 7.5 cm.

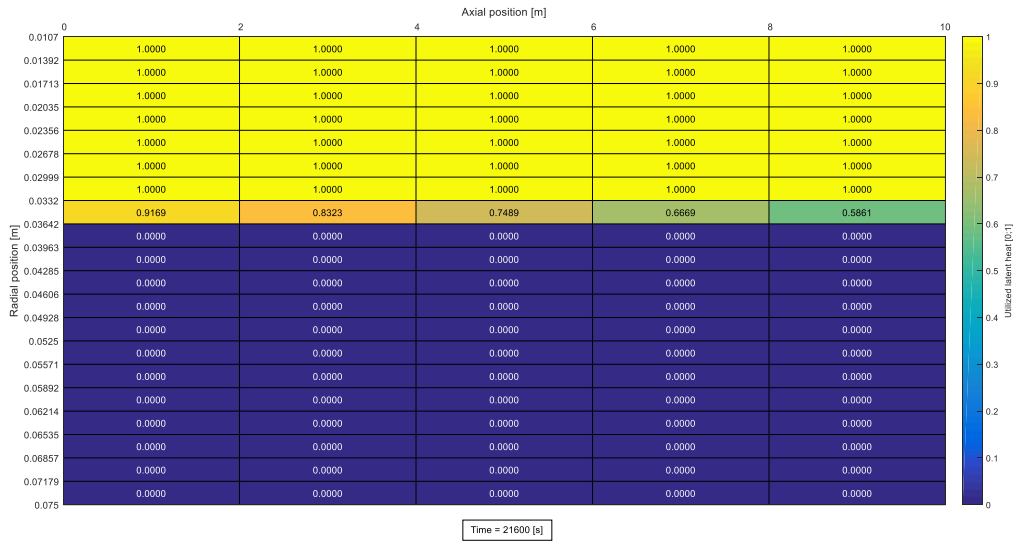


Figure 2: Viser hvor stor en del af lageret der er afladet efter 6 timer. Graden af afladning per beregnings-celle angives fra 0 til 1, hvor 1 er fuldstændig afladet (smeltet) og 0 angiver at alt latent energi stadig er i behold (fast form).

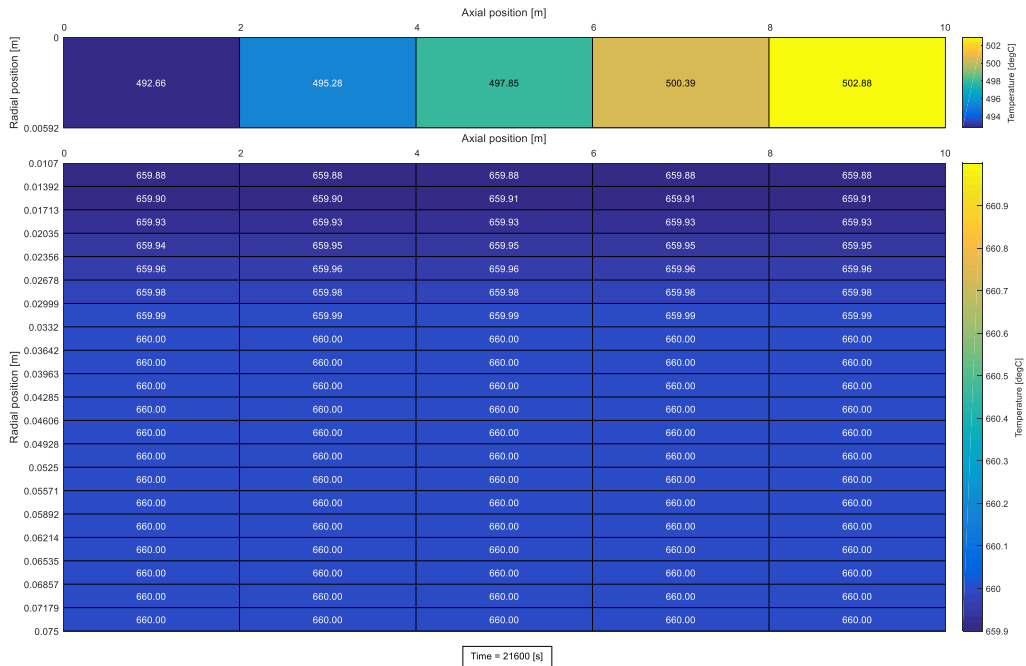


Figure 3: Viser temperaturen i damprøret (øverst) og temperaturen i lageret (nederst). 6 timer efter påbegyndt afladning ses det at udgangstemperaturen på damprøret er stabiliseret på 503 °C. Indgangstemperaturen er valgt til 490 °C. Simuleringen viser at lageret aflader med en effekt på 250 W.

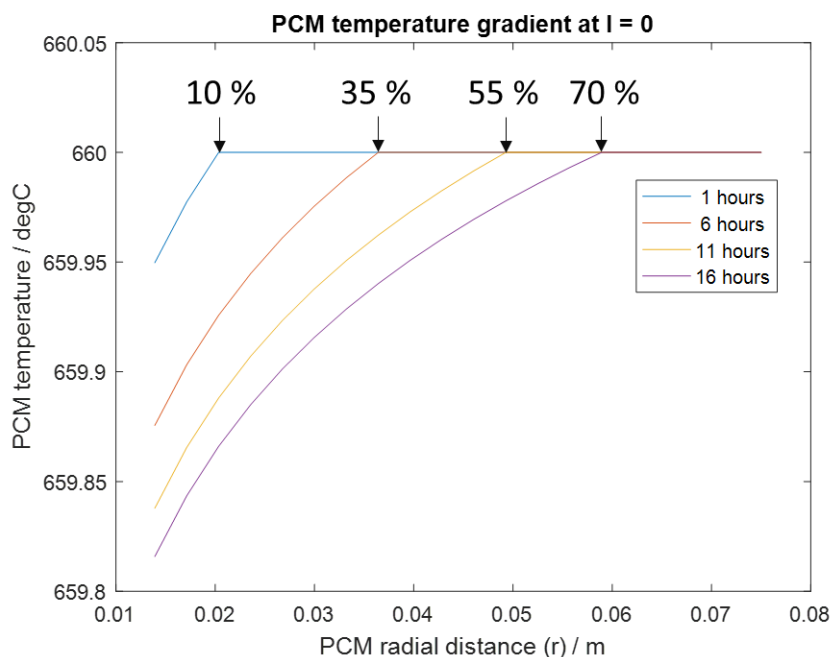


Figure 4: Viser den radiale temperaturgradient som funktion af afladningstid ved $l = 0$ (ved lagerindgangen).

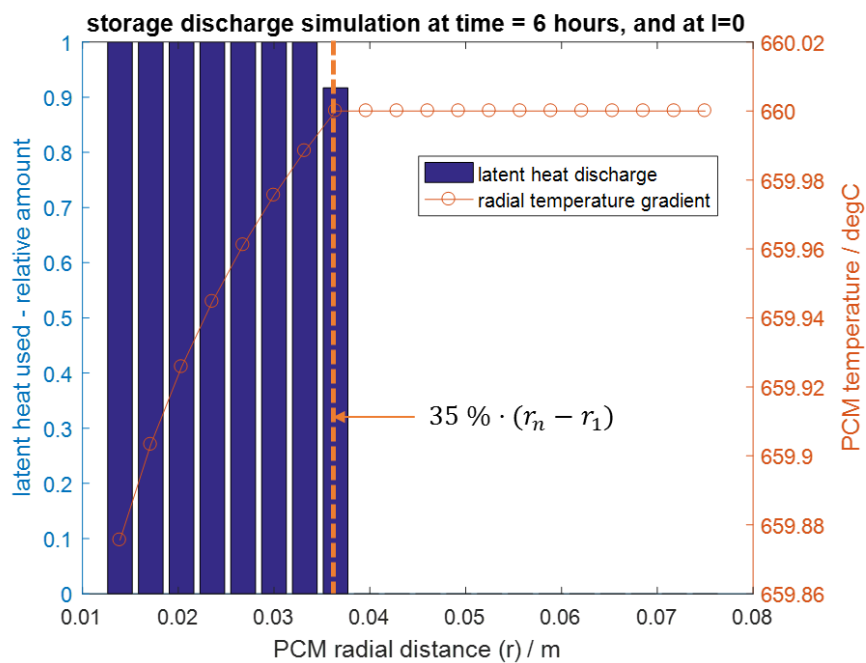


Figure 5: Viser afladningsgraden og den radiale temperaturgradient ved $l = 0$ (ved lagerindgangen).

3. Konklusion og videre arbejde

Idet der ikke umiddelbart, i litteraturen, findes nogen direkte anvendelige metoder til bestemmelse af energiindhold i højtemperatur varmelagre foreslås det derfor at ovenstående beregninger kan anvendes som indikation på lagerets energiindhold. På baggrund af ovenstående simuleringer ses det, at den radiale temperaturgradient kan beregnes som funktion af tiden og lagerets geometri, og derfor er anvendelig som indikation på lagerets energiindhold. Rent eksperimentelt kan denne temperaturgradient fastlægges ved at placere temperatur-sensorer langs den radiale dimension, og derefter monitorere temperatur gradienten hvorefter den aflagte latente energimængde kan beregnes. Temperaturgradienterne er små (i størrelsesordenen 200 mK) men målbare med standard laboratorieudstyr.

Desuden er udbyttet i denne arbejdsopgave også den anvendte beregnings-algoritme som kan bruges i mange andre sammenhænge, hvor simulering af dynamikken i latente varmelagre skal undersøges. Algoritmen kan anvendes til beregning af andre PCM materialer end aluminium, og varmevekslingsmediet kan også varieres. I simuleringen præsenteret her anvendes vand-damp som varmevekslingsmedium, og set i lyset af den relativt lave afladningseffekt (250 W) kunne med fordel forsøge sig med medier med bedre termofysiske egenskaber. Flaskehalsen i dette system er varmevekslingsmediet (vanddamp), idet temperatur-gradienten i PCM-materialet (aluminium) ift. varmeoverførslen, i alle praktiske henseender, er ikke-eksisterende.

Ovenstående metode til bestemmelse af energiindhold tager ikke højde for degradering af PCM-materialet, men giver, uanset lagerets størrelse og hvor stor en andel af lagermediet der er degraderet, et relativt estimat for, hvor stor en andel af den latente varme der er trukket ud af PCM-materialet. Beregningmodellens noget forsimplede cylinder-symmetri er tilstrækkelig til overordnet at give en indikation på dynamikken i et varmelager, også selvom den faktiske geometri er mere kompliceret.

4. Litteraturliste

- [1] Danish Technological Institute, "Storing electricity from renewable energy sources - Energinet.dk - project no. 12016," 2014.
- [2] J. Q. Sun, R. Y. Zhang, Z. P. Liu, and G. H. Lu, "Thermal reliability test of Al – 34 % Mg – 6 % Zn alloy as latent heat storage material and corrosion of metal with respect to thermal cycling," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, pp. 619–624, 2007.
- [3] T. Nomura, N. Okinaka, and T. Akiyama, "Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application : A Review," *Rev. Lit. Arts Am.*, vol. 50, no. 9, pp. 1229–1239, 2010.
- [4] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
- [5] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*, vol. 23, no. 3. 2003.
- [6] D. Laing, T. Bauer, W.-D. Steinmann, and D. Lehmann, "ADVANCED HIGH TEMPERATURE LATENT HEAT STORAGE SYSTEM – DESIGN AND TEST RESULTS," *11th Int. Conf. Therm. Energy Storage*, no. June, pp. 1–8, 2009.
- [7] M. Keinanen, "LATENT HEAT RECOVERY FROM SUPERCOOLED SODIUM ACETATE TRIHYDRATE USING A BRUSH HEAT EXCHANGER," 2007.
- [8] J. Gomboc, D. Taini, and T. T. Jensen, "Modelling an aluminium based latent thermal energy storage," Aalborg University.