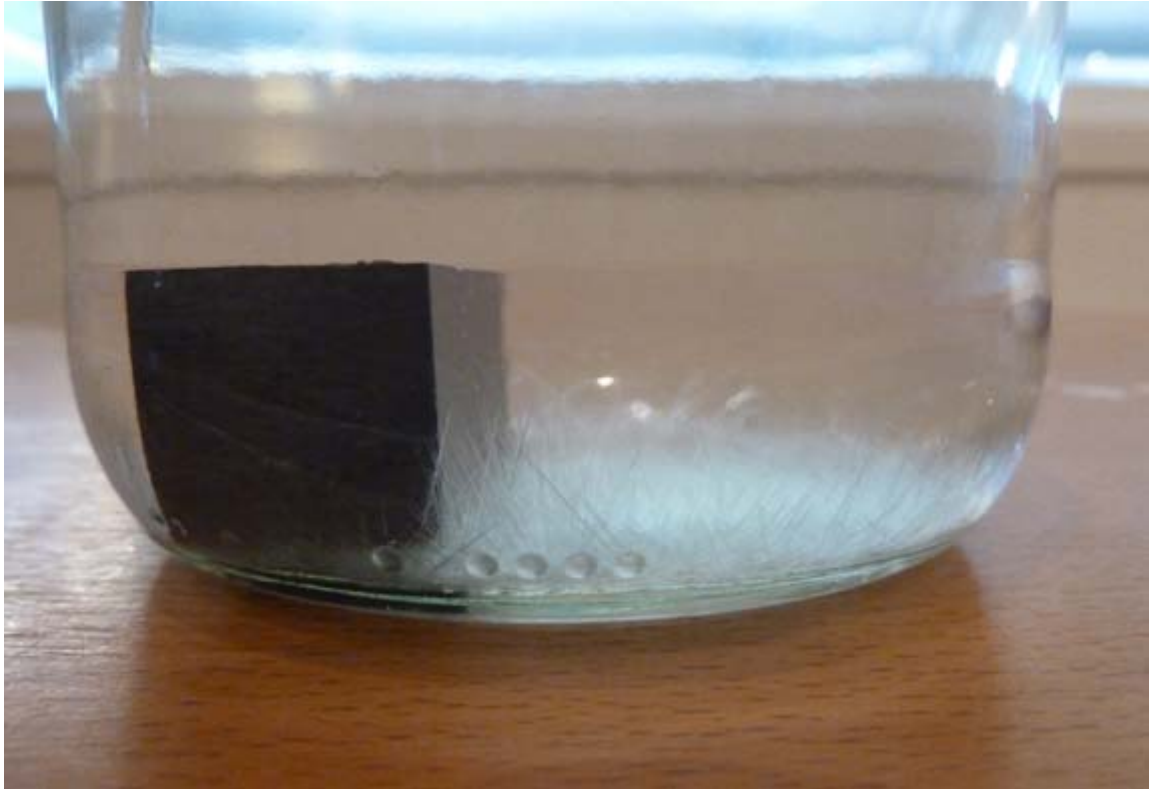


Säsongslagring av termisk energi

Med underkyllt natriumacetat



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**Institutionen för Bygg- & Miljöteknologi
Avdelning Byggnadsmaterial
TVBM-5081 Lund 2011**

Tobias Arnesson
Johan Haglund
Dennis Nielsen

© Copyright Tobias Arnesson, Johan Haglund, Dennis Nielsen

Lunds Tekniska Högskola
Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi
Avdelning Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 LUND

ISRN: LUTVDG/TVBM --11/5081--SE (1-52)

ISSN:0348-7911TVBM

Sammanfattning

I vår rapport undersöks möjligheterna att säsongslagra värmeenergi med natriumacetat, med syftet att utveckla ett förnyelsebart alternativ för uppvärmning av byggnader på vintern. Natriumacetat är ett salt av natriumhydroxid och ättiksyra, som bland annat används i en såkallad handvärmare. Med en handvärmare kan värmeenergi lagras under en längre period genom att saltlösningen underkyls. Det finns idag ingen etablerad teknik på marknaden som utnyttjar natriumacetat i större skala för att säsongslagra energi. Däremot pågår det ett forskningsprojekt i Danmark som syftar till att lagra solvärme från sommar till vinter med denna teknik. Vårt examensarbete är delvis framtaget i samråd med de danska forskarna och vi har undersökt hur stabiliteten hos underkylt natriumacetat påverkas av olika material, vilken värme natriumacetatet avger vid en fasomvandling samt hur ett system för säsongslagring kan utformas. Arbetet omfattar även egna analyser där alternativa användningsområden utforskas. Undersökningen är till stor del experimentell och olika mätmetoder har använts för att karakterisera natriumacetat. Dessa resultat har sedan analyserats utifrån teoretiska energi- och flödesberäkningar i syfte att dimensionera en lagringsmodul.

Undersökning visar att det borde vara fullt möjligt att lagra värmeenergi under en längre tid med underkylt natriumacetat och vi fann inte att underkylningen påverkades negativt av något material. Dock är denna typ av lagring volymkrävande eftersom smältentalpin är relativt låg. Vårt resultat visar att smältentalpin varierar vid olika initialtemperaturer då lösningen består av 58-vikt% natriumacetat och 42-vikt% vatten. Då lagringsmodulen förvaras i rumstemperatur (20 °C) är smältentalpin 187 J/g och när modulen placeras utomhus i -3,6 °C är den 144 J/g. Vanligtvis används 265 J/g oavsett initialtemperatur.

Vi har utfört en analys där två olika användningsområden studerats och implementerats i ett passivhus. Värmekällan i respektive fall är solfångare och spillvärme. Beräkningarna utgår ifrån energibehovet för tappvarmvattnet eftersom det ger bäst effektivitet. Resultatet visar att det krävs ett lager på 4,2 m³ natriumacetat för att värma tappvarmvattnet under en månad samt en extra solfångarmodul utöver ett normaldimensionerat solvärmesystem. En modul som placeras inomhus ger närmare 70 procent mer värme till tappvarmvattnet än en modul utomhus.

De generella slutsatserna som kan dras utifrån detta arbete är att det finns ett stort behov av att säsongslagra värme såväl storskaligt som i mindre skala. Att lagra värme med natriumacetat möjliggör en förvaring även i mindre skala, oberoende av markförhållanden. Dock är det skrymmande, vilket gör systemet kostsamt. Tekniken att utnyttja förskjutet smältentalpi för att säsongslagra värme är intressant. Med fortsatt materialforskning inom IEA (International Energy Agency) kan ännu bättre material utvecklas och utformas till system som går att använda för att minska användningen av fossila bränslen för uppvärmning av byggnader, vilket är en mycket viktig uppgift i framtiden.

Nyckelord: Säsongslagring, värmeenergi, natriumacetat och fasändringsmaterial

Abstract

Our report examines the possibilities of using sodium acetate as seasonal thermal energy storage, with the purpose to develop a renewable alternative to heat up buildings during winter. Sodium acetate is a salt of sodium hydroxide and acetic acid, which is currently used in so called hand warmers. The hand warmer stores thermal energy through supercooling of the brine. There is currently no established technology on the market that uses sodium acetate in a larger scale to store energy. However, a Danish research group is currently working on the development of using sodium acetate to store solar heat over season. Our report is partly developed in partnership with the Danish group and we have investigated how the stability of supercooled sodium acetate is affected by different materials, the amount of heat of fusion and how a system for seasonal storage can be designed. The work contains our analyses where two different areas of application are explored. The study is mostly experimental where separate measure methods have been used to characterize sodium acetate. These results have been analyzed from theoretical energy and flow calculations with the purpose to design a module.

Our research shows that it should be possible to store thermal energy, in a larger scale, for a long time with super cooled sodium acetate. Furthermore, during the cooling progress no material affected the stability of the super cooling negatively. However, this method is volume-consuming due to the relatively low heat of fusion. Our result demonstrate that the heat of fusion vary at different initial temperatures, when the mixture consists of 58–weight% sodium acetate and 42–weight% water. When the storage module is stored at room temperature (20 °C) the heat of fusion is 187 J/g and when it is stored outdoors (-3.6 °C) it drops to 144 J/g. The most common value is 265 J/g regardless the initial temperatures.

An analysis of two different application areas were studied and implemented in a passive house. The heat source in the respective areas is solar heating and industrial waste heat. Calculations are based on heating tap water because it will yield higher efficiency. The result shows that a module of 4.2 m³, filled with sodium acetate with one solar collector beyond a normal dimensioned solar system, is required to cover the tap water demand for one month during winter. A module that is placed at room temperature, will approximately give 70 percent more heat to the tap water compared with a module placed outdoors.

The overall conclusion of our work is that there is a great need for seasonal heat storage both at a small and large scale. To store heat with sodium acetate enables a seasonal storage, even in a small scale, independent of the conditions of the soil. However, it is volume expensive resulting in elevated financial costs. Nevertheless, the concept is interesting, and with further investigation by the Danish group along with the IEA (International Energy Agency) aiming to develop superior materials and thereby minimizing the use of fossil fuel to heat up the buildings, which is an important assignment in the future.

Keywords: seasonal storage, thermal energy, sodium acetate, phase change material.

Förord

Examensarbetet skrevs under hösten 2010 på avdelningen Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska Högskola av Tobias Arnesson, Johan Haglund och Dennis Nielsen, samtliga studerande på Väg- och vattenprogrammet. Examinator och tillika handledare var Lars Wadsö och biträdande handledare Elisabeth Kjellsson avdelningen för Byggnadsfysik, LTH.

Idén till vårt arbete uppkom under ett experiment i kursen Byggmateriälvetenskap där vi studerade termodynamiken bakom en handvärmare. Möjligheten att lagra värme under lång tid med handvärmaren fångade vår uppmärksamhet och tankarna kring att utnyttja denna teknik för att lagra solvärme växte fram. Via vår handledare, Elisabeth, kom vi i kontakt med Simon Furbo som idag forskar kring denna teknik på Danmarks Tekniske Universitet. Det visade sig att de hade en del frågor kring natriumacetat, vilket senare blev utgångspunkt för vårt arbete.

Under arbetets gång har vi varit i kontakt med ett flertal personer som arbetar med värmelagring. Vi vill speciellt tacka Lars Wadsö som väglett oss genom hela arbetet med ett stort engagemang och gett oss ett mycket bra mottagande på avdelningen. Vi vill också tacka vår biträdande handledare Elisabeth Kjellsson som genom sina kunskaper om värmelagringsteknik och solvärme hjälpt oss på vägen. Tack till Simon Furbo som besvarat många frågor och Lars Jensen från avdelningen för installationsteknik som hjälpt oss med diverse flödesberäkningar.

Januari 2011, Lund

Tobias Arnesson, Johan Haglund och Dennis Nielsen

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Pågående forskning	2
1.3 Syfte och frågeställning	3
1.4 Avgränsningar	3
1.5 Metod	4
1.6 Disposition	4
2 Teori och nulägesbeskrivning	5
2.1 Energi	5
2.1.1 Exergi	5
2.2 Termodynamik	6
2.2.1 En-komponentsystem	8
2.2.2 Två- och trekomponentsystem	9
2.2.3 Underkylning	10
2.3 Energi i bebyggelse	10
2.3.1 Fjärrvärme	11
2.3.2 Spillvärme	11
2.3.3 Solvärme	12
2.4 Fasändringsmaterial för dygnslagring av värmeenergi	13
2.5 Fasändringsmaterial för säsongslagring av värmeenergi	15
2.5.1 Natriumacetat	15
2.6 Fasändringsmaterial för transporter av värmeenergi	18
2.7 Metoder för att säsongslagra värmeenergi	19
3 Empiri	21
3.1 Experiment 1 - Materialpåverkan	21
3.2 Experiment 2 - Smältentalpi	24
3.3 Experiment 3 - Temperaturförlopp i glasburk	28
3.4 Experiment 4 - Värmeledning och värmekapacitet	29
4 Analys	30
4.1 Dimensionering av natriumacetatmodul	30
4.1.1 Fall 1- Dimensionering	32
4.1.2 Fall 2- Dimensionering	32
4.2 Uppladdning	32
4.2.1 Fall 1 - Uppladdning	32
4.2.2 Fall 2 - Uppladdning	33
4.3 Urladdning	34
4.3.1 Fall 1 - Urladdning	36
4.3.2 Fall 2 - Urladdning	37
4.4 Systemutformning	38
4.4.1 Fall 1- Systemutformning	38
4.4.2 Fall 2- Systemutformning	39
4.5 Kostnad	40
4.5.1 Fall 1 - Kostnad	40
4.5.2 Fall 2 - Kostnad	40

5 Diskussion och slutsatser	41
Källförteckning	43
Bilaga 1 - Experiment smältentalpi	47
Bilaga 2 - Beräkning av urladdning.....	49

Figurförteckning

Figur 1 - Fasövergångsprocessen.	7
Figur 2 - Temperaturvariation vid konstant värmetillförsel för ett fasändringsmaterial.....	8
Figur 3 - Fasdiagram för vatten vid olika temperatur- och tryckförhållanden.....	9
Figur 4 - Fasdiagram koppar-nickel.	9
Figur 5 - Effektvariation i ett hus i Sverige.....	10
Figur 6 - Tillförd energi till fjärrvärmeverk inom Sverige 2008.....	11
Figur 7 - Geografisk solinstrålning i Sverige under ett år.....	13
Figur 8 - Överdimensionerat solvärmesystem.....	13
Figur 9 - Normaldimensionerat solvärmesystem	13
Figur 10 - Smältentalpi i förhållande till smälttemperatur för olika fasändringsmaterial.....	15
Figur 11 - Handvärmare.	15
Figur 12 - Fasdiagram natriumacetat-vatten.	16
Figur 13 - Värmelagringskapacitet för natriumacetat jämfört med vatten.....	17
Figur 14 - Modul med natriumacetat från DTU.....	18
Figur 15 - Specialcontainer.	19
Figur 16 - Experimentförberedelser.	21
Figur 17 - Saltutfällning i blandningen.	24
Figur 18 - Flytande natriumacetat.	24
Figur 19 - Kalorimeter laddad inför experiment.	25
Figur 20 - Resultat från kalorimeter	25
Figur 21 - Sammanställning av kristallisationsentalpi från mätningar.	26
Figur 22 - Förhållandet smältvärme-temperatur	27
Figur 23 - Temperaturprofil vid olika initialtemperaturer.....	28
Figur 24 - Energianvändningen i Villa Box för uppvärmning och tappvarmvatten.	30
Figur 25 - Tank inomhus	31
Figur 26 - Tank utomhus	31
Figur 27 - Fall 1, Solvärme.....	32
Figur 28 - Fall 2, Spillvärme	32
Figur 29 - Energibehovet i Villa Box i jämförs mot energitillskottet från 4 m ² respektive 6 m ² vakuumrörsolfångare över ett år (simulering från Winsun).....	33
Figur 30 - Temperaturprofil i modul	36
Figur 31 - Temperaturprofil vatten.....	37
Figur 32 - Temperaturprofil i modul	38
Figur 33 - Temperaturprofil.....	38
Figur 34 - Systemutformning fall 1	39
Figur 35 - Systemutformning fall 2	39

Tabellförteckning

Tabell 1 - Exergifaktorer för olika energislag.....	6
Tabell 2 - Egenskaper för natriumacetat och vatten.....	17
Tabell 3 - Materialpåverkan, test 1.....	22
Tabell 4 - Materialpåverkan, test 2.....	23
Tabell 5 - Temperaturhöjning med avseende på smältentalpi.....	28
Tabell 6 - Resultat HotDisk.....	29
Tabell 7 - Hetvattenflöde på Väröbruk.....	34
Tabell 8 - Parameterförteckning.....	34
Tabell 9 - Kostnader för ett hus.....	40
Tabell 10 - Kostnader för spillvärmealternativet	40

1 Inledning

I följande kapitel behandlas utgångspunkterna för rapporten genom att syfte, metod och avgränsningar presenteras. I avsnittet ”Bakgrund” sätts undersökningen även in i ett större forskningssammanhang.

1.1 Bakgrund

Redan under tidigt 80-tal skrev byggforskningsrådet om hur termokemisk energilagring kan bidra till en lägre energianvändning, då med syftet att reducera oljeberoendet:

En bred satsning på termokemisk energilagring kan bidra till att skapa ett mindre oljeberoende energisystem, speciellt genom att möjliggöra användning av spillvärme, solvärme mm som ligger ur fas med behovet. Även om andra energiformer än t.ex. solenergi kommer att utnyttjas och ersätta oljeanvändningen i framtiden kommer det att finnas lagringsbehov. Ett exempel är utjämning för att erhålla en jämn belastning och därmed god förbränning i energi från produktion till användning och i dessa fall kan termokemisk lagring ha betydelse.¹

Idag är situationen annorlunda. Då oljan i princip är urfasad som uppvärmningsalternativ i Sverige, ligger fokus istället på hur utsläpp av växthusgaser kan minimeras. Det finns idag stora frågetecken kring hur klimatpolitiken ska utformas för att tillgodose samhällets krav och behov. Energianvändningen i bebyggelse står för 40% av Sveriges totala energianvändning och är således en av de viktigaste faktorerna att optimera för en hållbar energiförsörjning.²

Idag ställs högre krav på energianvändningen i byggnader. Moderna lösningar som värmepumpar och värmeväxling av ventilationsluften blir allt vanligare. Detta är åtgärder som kan reducera energianvändningen markant. Till exempel kan en bergvärmepump sänka energianvändningen med mer än 50%.³ Även när det gäller tätning och isolering av byggnader har en utveckling skett under de senaste åren. Trots detta, finns det fortfarande mycket energi att spara. I framtiden är det troligt att det främst kommer att handla om att utföra många mindre energieffektiviserande åtgärder som tillsammans sänker energianvändningen, till exempel genom att lagra värme från en årstid till en annan.

Passivhus och lågenergihus blir allt vanligare i byggsammanhang och att bygga ett hus med låg energianvändning ses idag som något värdefullt i sig. För att minimera den totala energianvändningen under ett helt år installeras ofta solfångare eller

¹ Termokemisk energilagring, underlag för BFR:s programplan 1981-1984 (1980), Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm: Byggforskningsrådet, s. 30.

² Svensk fjärrvärme (2006), *Energianvändning och försörjning för byggnader ur ett systemperspektiv – ett samarbete mellan bygg- och energibranschen*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Global/Rapporter_och_Dokument/Ovriga_rapporter/Energieffektivisering/Energieffektiva%20byggnader/Energisamverkan-Effektiv%20energianvandning%20och%20energif%C3%B6rs%C3%B6rjning.pdf (090516), s. 7.

³ Energimyndigheten, *Bergvärmepumpar*, Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Tester/Testresultat/Bergvarmepumpar1/?tab=3> (100920).

solceller, vilket visserligen sänker energianvändningen under sommartid, men det är ingen direkt hjälp under vintertid eftersom solvärmens då är försumbar. Ett alternativ för att minimera vinterenergianvändningen är att lagra värme från sommar till vintertid. Problemen med att lagra värmeenergi mellan säsongerna är att det krävs stora volymer och välisolerade magasin för att minimera värmeförlusterna, vilket försvårar tillämpningen såväl ekonomiskt som byggtekniskt.⁴

En energikälla som sällan utnyttjas är industriell spillvärme. 2008 fanns 100 TWh outnyttjad industriell spillvärme i Sverige. Svårigheterna med att ta till vara spillvärme beror på att värmen produceras punktvis och ofta för långt bort från bebyggelse för att kunna transporteras med fjärrvärmekulvert.⁵ Sveriges totala värmebehov för uppvärmning och för varmvatten låg 2008 kring 81,3 TWh,⁶ vilket innebär att bara spillvärmens från industrier skulle kunna täcka det årliga värmebehovet. Det skulle således vara mycket givande att finna metoder för att lagra spillvärme på ett effektivt sätt.

De svenska miljömålen för energianvändningen i bebyggelse är högt satta. Den totala energianvändningen ska minska med 20 procent till år 2020 och 50 procent till år 2050. Till år 2020 skall också beroendet av fossila bränslen för energianvändningen i bebyggelse vara brutet, samtidigt som andelen förnybara energikällor skall öka.⁷

1.2 Pågående forskning

Idag pågår det mycket forskning om hur energiproblematiken ska lösas i framtiden. I samband med oljekrisen under mitten av 70-talet, inledde en grupp OECD länder samarbetet *International Energy Agency* (IEA). Syftet med gruppen var till en början att skydda sig mot kommande energikriser genom att undersöka oljetillgången, men fokus har på senare tid övergått till att utreda framtida förnyelsebara energikällor samt energihushållning. Idag är Sverige medlem i organisationen som består av 28 länder.⁸

IEA är uppdelat i olika program/ämnesområden varav två utav programmen är mer relevanta för denna rapport. Det första är *The Solar Heating and Cooling program* (SHC) där frågor som berör solvärme och kylenergi utreds. Inom programmet har man sedan 1977 tagit fram olika projekt (Task/Annex⁹) där forskare undersökt ämnen inom ramen för sol- och kylteknik. Fram till idag har 44 stycken projekt påbörjats, varav åtta stycken är pågående.¹⁰

⁴ Intervju: Elisabeth Kjellsson, Lunds tekniska högskola, 101220.

⁵ Svensk Fjärrvärme (2009), *Transport av industriell överskottsvärme*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/FoU-rapporter/Fjarrsyn/Teknik/ (100922), s. 4.

⁶ Energimyndigheten, *Uppvärmning i Sverige 2008*. Tillgänglig: <http://www.energimarknadsinspektionen.se/Bibliotek/Rapporter-2008/Uppvarmning-i-Sverige-2008/> (100920).

⁷ Naturvårdsverket, *God bebyggd miljö*. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/sv/Sveriges-miljomal--for-ett-hallbart-samhalle/Miljokvalitetsmal/Bebyggd-miljo/> (101201).

⁸ IEA, *About the IEA*. Tillgänglig: <http://www.iea.org/about/index.asp> (100906).

⁹ Inom SHC kallas dessa projekt "Task" medan de inom ECES kallas "Annex". När programmen senare samarbetat benämns projekten "Task/Annex".

¹⁰ SHC, *Welcome*. Tillgänglig: <http://www.iea-shc.org/index.html> (100906).

SHC:s *Task 32 – Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings* avslutades 2007. Syftet var att undersöka nya avancerade lösningar för att lagra värme i lågenergibyggnader.¹¹ Den första delen av projektet bestod av att ta fram ett värmesystem till ett sydeuropeiskt passivhus som enbart värms med solenergi. Därefter arbetades ett lagringssystem fram för andra värmekällor än solen, till exempel värme från värmepumpar.¹²

Det andra programmet med relevans för denna rapport är *Energy Conservation through Energy Storage program* (ECES) som idag har inlett ett projekt (*Task /Annex 42/24*) i samarbete med SCH. ECES syftar till att underlätta forskning och utveckling av energilagringsteknik.¹³ I *Task/Annex 42/24* undersöker man nya material som kan användas för att lagra energi.¹⁴

En del av forskningen i *Task/Annex 42/24* handlar om lagring av solvärme med hjälp av underkyllt natriumacetat. I detta projekt arbetar Simon Furbo med sina kollegor på Danmarks Tekniske Universitet (DTU). Under ett studiebesök på DTU visade det sig att det fanns behov av att undersöka vilka material som är möjliga att kombinera med natriumacetat samt vilken smältentalpi som avges vid en kristallisationsprocess. Detta blev två av utgångspunkterna i denna rapport.

1.3 Syfte och frågeställning

Arbetets övergripande syftet är att undersöka hur natriumacetat kan implementeras i ett värmesystem i en byggnad för att säsongslagra värmeenergi. Detta görs genom att undersöka vilka material som kan kombineras med underkyllt natriumacetat utan att spontan kristallisation uppstår, samt genom att bestämma storleken på smältentalpin, värmekonduktivitet och värmekapaciteten. I en avslutande analysdel dimensioneras två moduler för två skilda tillämpningsområden med avseende på upp- och urladdningsegenskaper.

Frågeställningen är således:

- Vilka material kan kombineras med underkyllt natriumacetat utan att spontan kristallisation uppstår?
- Vilken smältentalpi avges vid kristallisation?
- Vad har natriumacetat för värmekapacitet och värmeledningsförmåga?
- Hur kan ett system dimensioneras med avseende på upp- och urladdningsegenskaper?

1.4 Avgränsningar

Utgångspunkten för denna rapport är forskningen kring natriumacetatets möjligheter som värmelagringsmaterial vid DTU. Rapport avgränsas till att undersöka det underkylda natriumacetatets materialkänslighet samt vilken smältentalpi som avges vid

¹¹ SHC, *Task 32 - Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings*. Tillgänglig: <http://www.iea-shc.org/task32/index.html> (100906).

¹² Ibid.

¹³ ECES, *Strategy plan*. Tillgänglig: http://www.iea-eces.org/files/eces_strategy.pdf (101020).

¹⁴ SHC, *Compact Thermal Energy Storage*. Tillgänglig: <http://www.iea-shc.org/task42/index.html> (100906).

kristallisation. Denna frågeställning är vald utifrån det danska forskningsprojektets behov.

I de experimentella undersökningarna har även en rad avgränsningar och prioriteringar varit nödvändiga, till exempel vad gäller hur många och vilka material som ska undersökas tillsammans med natriumacetatet. Vilka dessa avgränsningar är och hur de motiveras redogörs för i avsnitt 3 ”Empiri”.

Vad gäller dimensioneringen av två moduler, som utförs i rapportens analysavsnitt, ligger fokus på hur tekniken fungerar och hur den kan förbättrats. Endast en enklare kostnadsbedömning är utförd, där materialkostnaden är uppskattad från konsulterande företag och forskare från DTU.

1.5 Metod

För att besvara frågeställningen har vi utfört en rad experiment. En detaljerad experimentbeskrivning återfinns i rapporten. Teorin bakom experimenten och de tänkta användningsområdena är hämtad från litteratur och artiklar. Tekniken bakom fasändringsmaterial är relativt ny och fakta hämtades mestadels från internationella artiklar och rapporter. För att få en uppfattning av hur långt forskningen har kommit och vad som idag är av kommersiellt intresse har en del intervjuer genomförts.

Beräkningsprogram som använts är IDA 4 för energiberäkningar och Winsun för solvärmesimuleringar.

1.6 Disposition

Rapporten är uppdelad i fyra delar. Under rubriken ”Teori och nulägesbeskrivning” redogörs för grundläggande fysik och kemi. Därefter övergår rapporten till de empiriska undersökningarna som redovisar resultat från experimenten. Resultaten från experimenten används därefter i en analysdel där de appliceras i olika system. Arbetet avslutas med slutsatser och diskussion.

2 Teori och nulägesbeskrivning

I detta kapitel ges en presentation av fysikaliska och kemiska begrepp samt av de beräkningar som används i empiridelen. Kapitlet avslutas med en nulägesbeskrivning av forskning och utveckling rörande fasadändringsmaterial.

2.1 Energi

Energi mäts i joule (J). I denna rapport kommer även den mer konventionella enheten kilowattimme (kWh) att användas, eftersom den är vanligare inom byggbranschen.

$$1000 \text{ J} = 1 \text{ kJ} = 1 \text{ kWs} = \frac{1}{3600} \text{ kWh}$$

Enligt termodynamikens första huvudsats kan inte energi försvinna eller nyskapas, bara omvandlas till en annan energiform. Dock kan energi övergå till en annan form, vilket till exempel sker när elenergi blir värmeenergi i belysning. Energi kan förekomma i olika former såsom mekanisk, elektrisk, magnetisk, termisk (värme) och kemisk energi samt strålnings- och kärnenergi.¹⁵

2.1.1 Exergi

Det är viktigt att skilja på olika former av energi. Att bara ange energiinnehållet i joule ger information om hur mycket energi som kan tillgodoräknas men inte vilken kvalitet energin har. Därför är exergi ett viktigt begrepp som viktar energin efter kvalitet. Exergi definieras enklast som ”den andel av en given energiform som kan omvandlas till mekaniskt arbete”.¹⁶ För mekaniskt arbete är exergin lika med energiinnehållet, medan den för värme alltid är lägre än energiinnehållet. Exergi är ur uppvärmningssynpunkt ett centralt begrepp som bör beaktas i analyser av vad som är miljöeffektivt. Idag värms fortfarande delar av Sveriges byggnader upp med elektricitet och olja, istället för med termisk energi.

Göran Wall, professor inom energiteknik förklarar begreppet exergi genom en analogi med vatten:

Låt oss göra en analogi mellan värmeprocesser och vatten som rinner mellan olika behållare. Då säger energilagen att summan av allt vatten alltid är detsamma, dvs inget vatten försvinner. Förutsatt att vi inte spiller ut något vatten, förstås. Exergilagen säger att vatten, av sig självt, bara kan hållas från en högre till en lägre belägen behållare. Om vi gör det så finns allt vatten fortfarande kvar men kan inte hållas tillbaks i den övre behållaren utan att vi tillför arbete, dvs lyfter upp den nedre behållaren. Det arbete som då erfordras är exakt lika mycket som vi hade kunnat utvinna då vattnet första gången föll ned i den nedre behållaren. Således går exergi, dvs arbete,

¹⁵ Nationalencyklopedin (sökord: exergi). Tillgänglig: http://www.ne.se/ludwig.lub.lu.se/energi/omvandling-av-energi?i_h_word=exergi (100916).

¹⁶ Ibid.

förlorat då vatten faller fritt till en lägre nivå. På samma sätt går exergi förlorat då värme faller i temperatur utan att man utnyttjar själva fallet. Detta kan vi lätt förstå och acceptera för vatten och principen är exakt densamma för värme. När vi således använder direktverkande elvärme för att värma ett hus förlorar vi mer än 95 procent av exergin trots att all energi finns kvar.¹⁷

Tabell 1 visar olika exergifaktorer för olika uppvärmningsalternativ. Som Wall skriver är det ett stort slöseri att använda energi med hög exergifaktor för att värma en byggnad, när det räcker med energi med exergifaktor runt 0,3. Det är således av stor vikt att ta tillvara på den termiska energin då den kan återanvändas för uppvärmning i ett senare skede. För att förverkliga detta måste dock möjligheten att lagra energi från ett tillfälle till ett annat finnas.

Energiform	Exergifaktor
Lägesenergi	1,00
Rörelseenergi	1,00
Elektriskenergi	1,00
Kärnenergi	1,00
Olja	0,95
Kol	0,95
Gas	0,95
Solljus	0,93
Het ånga	0,60
Fjärrvärme	0,30
Spillvärme	0,05
Värmestrålning från Jorden	0,00

Tabell 1 - Exergifaktorer för olika energislag.¹⁸

2.2 Termodynamik

Ett material kan bestå av en eller flera komponenter som samverkar i ett system. Systemet kan uppträda i olika faser beroende av vilken temperatur och vilket tryck som råder. De olika fasernas stabilitetsgränser visas bäst i ett fasdiagram, där tillståndet i jämvikt beskrivs vid olika tryck och temperaturer.¹⁹

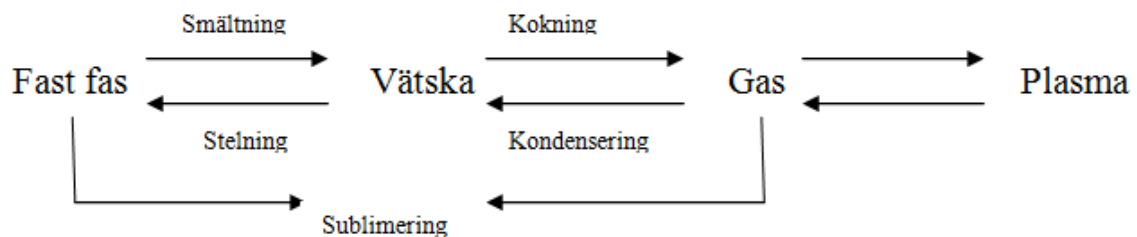
Ett fasändringsmaterial växlar mellan fast form, vätska och gas (ytterligare en fas som kallas plasma förekommer ibland, men det nämns inte vidare i denna rapport). Figur 1 visar hur processen mellan de olika faserna går till.²⁰

¹⁷ Professor Göran Walls hemsida, *Vad är energi och exergi*. Tillgänglig: <http://exergy.se/goran/swedish/index.html> (100916).

¹⁸ Wall, Göran (2009), *Exergetics*, Professor Göran Walls hemsida. Tillgänglig: <http://www.exergy.se/ftp/exergetics.pdf> (100916), s. 78.

¹⁹ Wadsö, Lars (2010), *Kompendium i byggmaterialvetenskap*, Lund: KFS AB, s. 14 ff.

²⁰ Jönsson, Göran (2006), *Fysik i vätskor och gaser*, upplaga 6 (första upplagan 2003), Lund: Teach Support, s. 33.



Figur 1 - Fasövergångsprocessen.²¹

Ett material befinner sig alltid i någon av dessa faser beroende på temperatur- och tryckförhållande. När ett material går från fast fas till vätska sker en smältningsprocess, och omvänt sker en stelningsprocess. När materialet övergår från vätskefas till gasform sker en kokning och när materialet återigen övergår till vätska sker en kondensation. När materialet går direkt från fast fas till gasform kallas det sublimering.²²

Innehållet av termisk energi i ett material beräknas i förhållande till den absoluta nollpunkten (noll Kelvin) och är beroende av materialets värmekapacitet.²³ Om en kropp med massan m och den specifika värmekapaciteten C_p ändrar temperatur från T_1 till T_2 ändras värmemängden Q enligt nedanstående formel:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m * C_p * dT = m * C_p * \Delta T \quad [J] \quad [\text{ekv. 1}]$$

När ett material har två olika temperaturer uppstår alltså en energiinnehållsskillnad. Denna skillnad brukar benämnas "sensibel energi" eller "sensibel värme". Om kroppens temperatur rör sig i temperaturintervall där en fasomvandling sker ska hänsyn också tas till smältvärmen (smältentalpi), vilket är den energi som frigörs/åtgår när materialet ändrar fas.²⁴ När den totala energin ska beräknas används således följande formel:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m * C_p * dT + l_s * m = m * (C_p * \Delta T + l_s) \quad [J] \quad [\text{ekv. 2}]$$

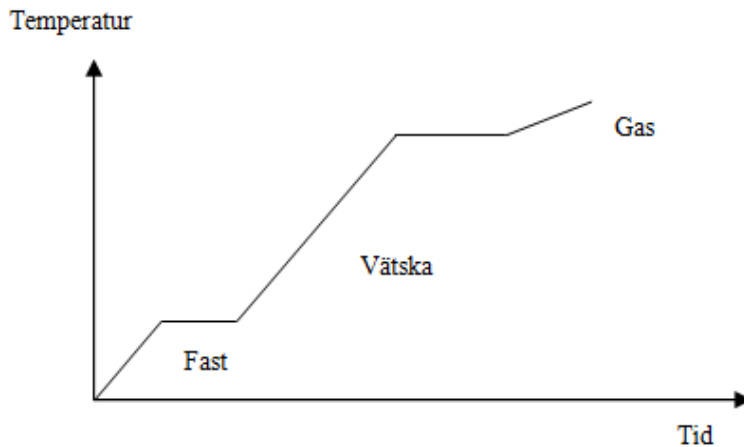
I ekvation 2 är l_s den specifika smältentalpin vid fasomvandlingen. Figur 2 visar schematiskt hur temperaturen varierar vid konstant värmetillförsel till ett material. Temperaturen stiger konstant tills smältningsprocessen påbörjas, därefter ligger temperaturen konstant tills allt material har smält, för att sedan stiga ytterligare. Detta beror på att det går åt värme vid fasomvandlingen från fast till flytande, så kallad smältvärme.

²¹ Jönsson (2006), s. 33.

²² Ibid.

²³ Nationalencyklopedin (sökord: värmekapacitet). Tillgänglig: <http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/lang/v%C3%A4rmekapacitet> (100916).

²⁴ Nationalencyklopedin (sökord: sensibel värme). Tillgänglig: <http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/sensibeltv%C3%A4rme> (100916).



Figur 2 - Temperaturvariation vid konstant värmeförsörjning för ett fasändringsmaterial.²⁵

Att få ett material att gå från en fas till en annan är ofta mycket energikrävande. Det går till exempel åt ca 2,26 kJ för att koka bort 1 g vatten vilket kan jämföras med att det krävs 0,34 kJ för att värma 1 g vatten från 20 till 100 °C.²⁶ Enligt termodynamikens första huvudsats kan energi varken skapas eller försvinna, endast omvandlas.²⁷ Detta betyder att den mängd energi som tillförs för att genomföra en fasövergång kommer på motsvarande sätt att avges när processen går åt motsatt håll. Om vatten till exempel tappas på ett hett bastuaggregat övergår vattnet först till gasform. Håller man sedan en arm över vattenången så kondenserar vattenången på armen och en stor mängd energi (ångbildningsentalpi) avges från gasen till armen och det blir väldigt varmt.²⁸ Att det avges mycket energi i övergången från gas till flytande form är inte unikt för vatten utan sker också med andra material vid olika typer av fasomvandlingar.

2.2.1 En-komponentsystem

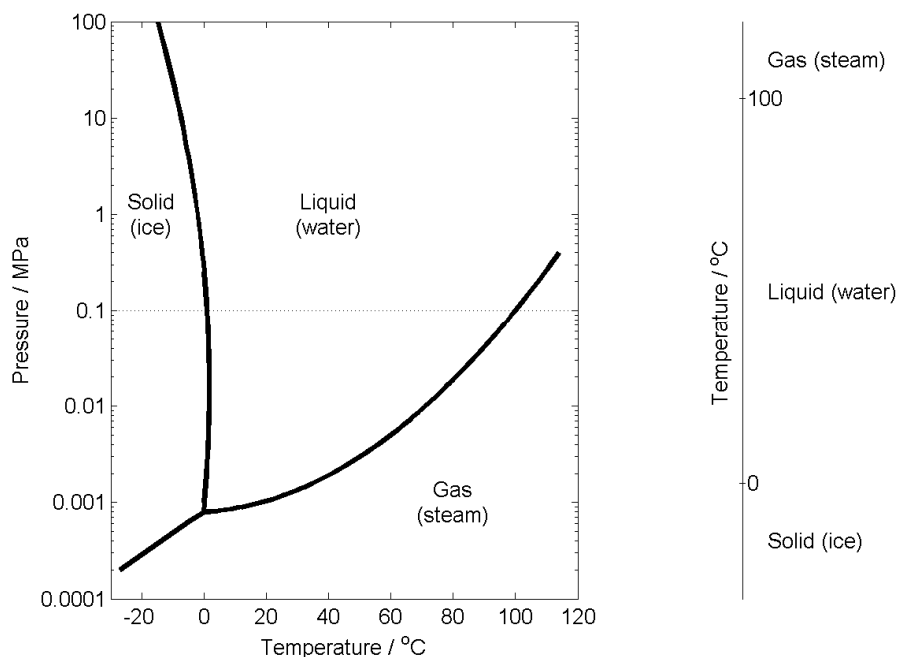
Ett en-komponentsystem är ett system som endast består av en komponent. Det enklaste exemplet är vatten, som vid atmosfärstryck har fast form när temperaturen understiger 0 °C, flytande form mellan 0-100 °C och slutligen gasform över 100 °C. I figur 3 illustreras hur vatten vid olika temperaturer och tryckförhållanden övergår i olika faser.

²⁵ Jönsson (2006), s. 32.

²⁶ Ibid. s. 35.

²⁷ Nationalencyklopedin (sökord: termodynamikens första huvudsats). Tillgänglig: <http://www.ne.se/f%C3%B6rsta-huvudsatsen> (100916).

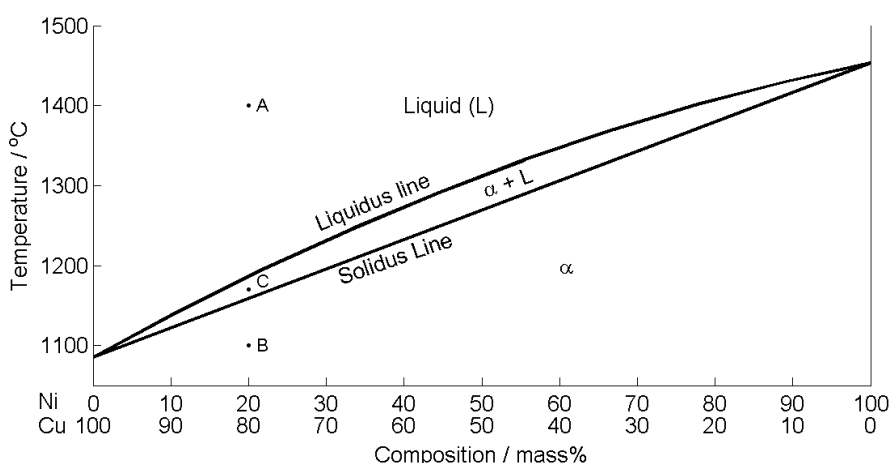
²⁸ Jönsson (2006), s. 35.



Figur 3 - Fasdiagram för vatten vid olika temperatur- och tryckförhållanden.²⁹

2.2.2 Två- och trekomponentsystem

Det finns också system som består av flera komponenter. Figur 4 visar vilken fas ett system, bestående av nickel och koppar, befinner sig i vid olika massandelar och temperaturer. Detta tvåkomponentsystem består av en flytande fas (L = Liquid), en fast fas (ofta benämnt α eller β) samt ett tvåfasområde ($\alpha+L$) som ligger mellan den fasta och den flytande fasen. Om systemet till exempel består av 50% nickel och 50% koppar och har en temperatur på 1280 °C, ligger systemet i ett tvåfasområde och är således delvis fast och delvis flytande.³⁰



Figur 4 - Fasdiagram koppar-nickel.³¹

²⁹ Wadsö (2010), s. 16.

³⁰ Ibid. s. 17.

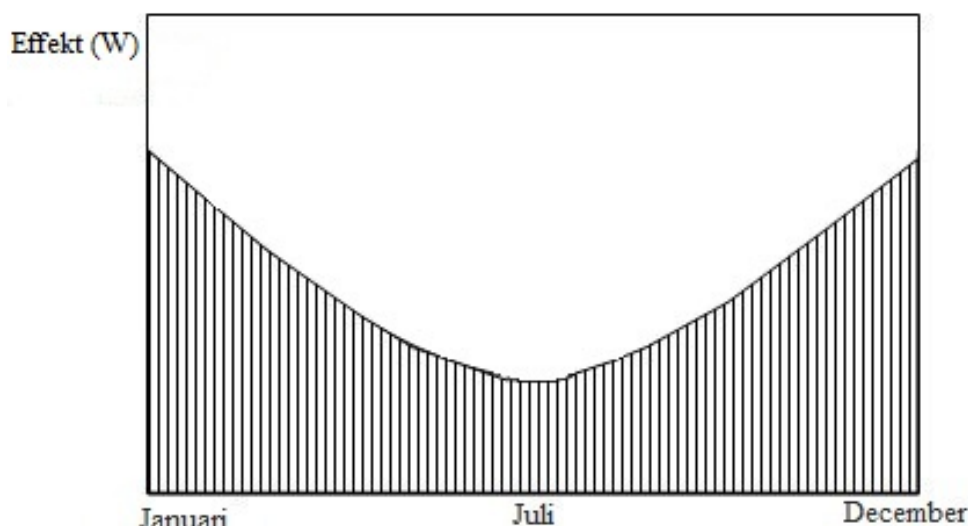
³¹ Ibid. s. 18.

2.2.3 Underkylning

En kemiskt ren vätska kan kylas en bit under den normala fryspunkten utan att vätskan övergår till fast form. Fenomenet kallas underkylning. Vatten kan till exempel underkylas till cirka $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ om förutsättningarna är perfekta. Vattnet måste då vara fritt från föroreningar (destillerat) och får inte utsättas för andra störningar som till exempel vibrationer. En riktigt ren plastflaska med destillerat vatten kan relativt enkelt kylas till lägre än $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ om den får stå orörd. I det tillståndet är vätskan underkyld och strävar efter att övergå till fast tillstånd. När fasomvandlingen (kristallisationsprocessen) startar frigörs värmen och temperaturen stiger mot smälttemperaturen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.³²

2.3 Energi i bebyggelse

Energianvändningen för en byggnad i Sverige fördelas över året enligt figur 5, där värmeeffekten är som störst under vintermånaderna och som minst under sommartiden. Under sommartid är det endast tappvarmvattnet som ska värmas.



Figur 5 - Effektvariation i ett hus i Sverige.

Ett vanligt hushåll har en energianvändning för uppvärmning och tappvarmvatten om ca 20 000 kWh/år. De vanligaste uppvärmningsalternativen är fjärrvärme, värmepumpar, elvärme, biobränsle, olja, naturgas och solvärme.³³ Det dimensionerande effektbehovet blir mycket högt i förhållande till det faktiska behovet stora delar om året. På sommaren används endast en bråkdel av toppeffekten. Om dessa variationer kan minskas skulle det leda till både ekonomiska och miljömässiga fördelar.

I takt med ökade energikrav och ett ökat miljötänkande, har hus med låg energiförbrukning blivit allt vanligare. Till exempel har det utvecklats passivhus och nollenergihus där behovet av uppvärmning är mycket lågt. Det finns idag ingen enhetlig

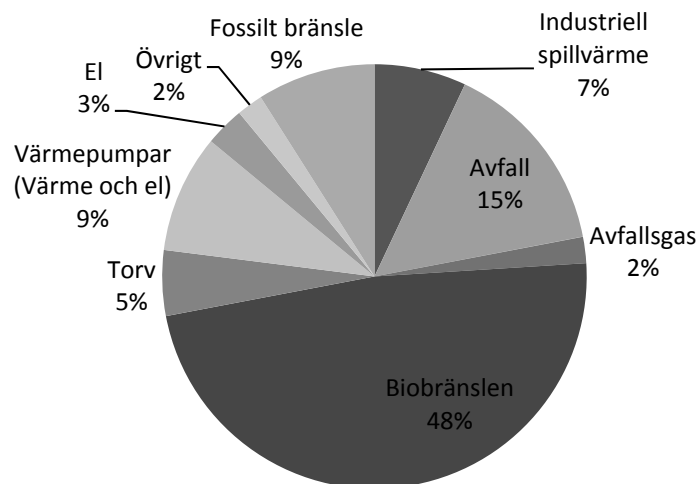
³² Jönsson (2006), s. 93.

³³ Energimyndigheten, *Din uppvärmning*. Tillgänglig: [http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/\(101010\)](http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/(101010)).

beskrivning av hur nollenergihus definieras. Ursprungsidén var att huset skulle vara helt självförsörjande, men på grund av ekonomiska, tekniska och ekologiska problem har ett nytt koncept vuxit fram. Ett mer realistiskt tillvägagångssätt är att koppla huset mot ett yttre energiförsörjningssystem för el och värme, där energibalansen under ett år är noll. Det betyder att energi överproduceras på sommaren med till exempel solceller eller solfångare och distribueras från huset till andra abonnenter. Medan det omvända förhållandet råder på vintern, då energi köps för uppvärmning och elanvändning i huset.³⁴ Energibalansen är således noll över ett år.

2.3.1 Fjärrvärme

Fjärrvärme är det vanligaste uppvärmningsalternativet i Sverige och användes 2008 till 50 procent av den totala energianvändningen för uppvärmning och varmvatten i byggnader.³⁵ Den tillförda energin till fjärrvärmeverken kommer framförallt från förnyelsebara bränslen såsom biobränslen och torv men även från en del fossila bränslen. Fossila bränslen, som till exempel olja, används huvudsakligen till spetsproduktion, det vill säga vid effektoppar under kalla vinterdagar.³⁶



Figur 6 - Tillförd energi till fjärrvärmeverk inom Sverige 2008.³⁷

2.3.2 Spillvärme

Sveriges industrier använder årligen stora mängder energi till sina tillverkningsprocesser och en stor del av den energin går förlorad som spillvärme. I takt med höjda energipriser har dock det ekonomiska incitamentet ökat för att ta tillvara spillvärmerna, som i Sverige uppgår till ca 100 TWh/år.³⁸ Av de 100 TWh bedömer

³⁴ Wall, Maria (2008), *Lågenergihus – en flora av begrepp*. Tillgänglig: http://www.cerbof.se/documents/Info/Lagenergihus_VVSForum_april_08.pdf (110101).

³⁵ Energimyndigheten, *Uppvärmning i Sverige 2008*, s. 10.

³⁶ Svensk Fjärrvärme (2006), *Förnybar ersättning av olja i spetslastproduktion*, Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/Ovriga-rapporter/Energitillforsel-och-Produktion/ (100922), s. 8.

³⁷ Svensk Fjärrvärme, *Tillförd energi*. Tillgänglig: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Statistik-Pris/Fjarrvarme/Energitillforsel/> (100916).

³⁸ Svensk Fjärrvärme, *Fjärrvärme från spillvärme kan värma 200 000 villor*. Tillgänglig: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Asikter/Pressmeddelanden/Pressmeddelande-2010-02-021/> (101101).

organisationen Svensk Fjärrvärme att det finns cirka 600 realistiska spillvärmeleverantörer som totalt kan ge 6-8 TWh.³⁹ Vid denna ekonomiska och praktiska bedömning har man beaktat fjärrvärmeverkens storlek, belastningsprofil samt avstånden till industrierna. Då fjärrvärmens konsumenter har betydligt lägre behov av värme under sommarhalvåret, kan spillvärmen dock inte utnyttjas i full utsträckning.⁴⁰

Hur stora mängder spillvärme som kommer ut ur en industriell process är starkt kopplat till den mängd energi som förbrukas under processen. Branscher som producerar stora mängder spillvärme är främst den energiintensiva basindustrin, till exempel massa- och pappersindustrin, järn- och stålindustrin, kemiindustrin och raffinaderierna.⁴¹ Dessa står för 90% av spillvärmeleveranserna i Sverige.⁴²

I Sverige finns det en stor andel mellanstora industrier som tillsammans står för en betydande energianvändning. Processer som kan generera spillvärme är framförallt torkning, rökgaskylning, produktkylning och indunstning/kondensering, vilka kan förekomma i rad olika branscher. Livsmedelsindustrin har ett brett utbud av produkter med spillvärmegenererande processer, till skillnad från pappersindustrin där spillvärme främst genereras via torkning. Det utesluter dock inte att livsmedelsindustrin kan leverera mer spillvärme eftersom enskilda processer kan generera stora mängder spillvärme.⁴³

2.3.3 Solvärme

Det finns en stor tillgång till solvärme under sommarhalvåret, problemet med solvärmen är att tillgången är som störst då värmebehovet i byggnader är som lägst. Den solenergi som är tillgänglig mellan april och september ligger mellan 900-1000 kWh/m².⁴⁴ Energin från solen är förnyelsebar och ger låg miljöpåverkan, vilket är ett viktigt argument för att ta till vara på solenergin i högre utsträckning än vad som görs idag.

³⁹ Svensk Fjärrvärme (2009), *Spillvärme från industrier och lokaler*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/FoU-rapporter/Fjarrsyn/Omvarld/200912-Spillvarme-fran-industrier-och-lokaler/ (100922), s. 7.

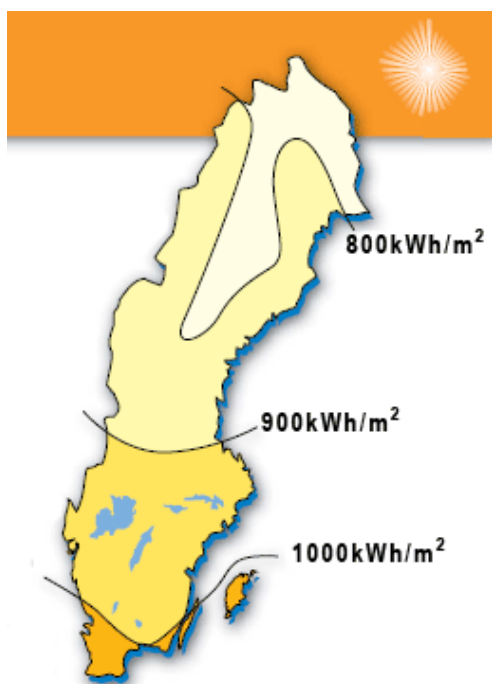
⁴⁰ Svensk Fjärrvärme (2002), *Industriell spillvärme processer och potentialer 2002*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/Ovriga-rapporter/Energitillforsel-och-produktion/Spillvarme-fran-industrin-till-fjarrvarmenat/Industriell-spillvarme---processer-och-potential-2002/ (100916), s. 8.

⁴¹ Ibid. s. 7.

⁴² Svensk Fjärrvärme (2009), *Spillvärme från industrier och lokaler*, s. 15.

⁴³ Svensk Fjärrvärme (2002), *Industriell spillvärme processer och potentialer 2002*, s. 7.

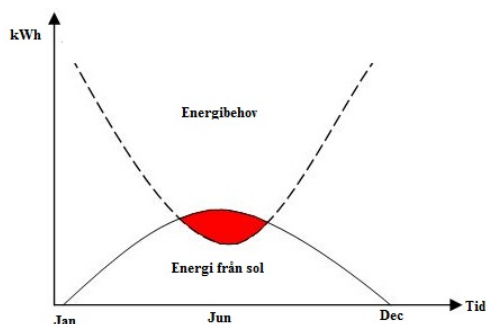
⁴⁴ Energimyndigheten, *Solvärme*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/Solvärme/> (100917).



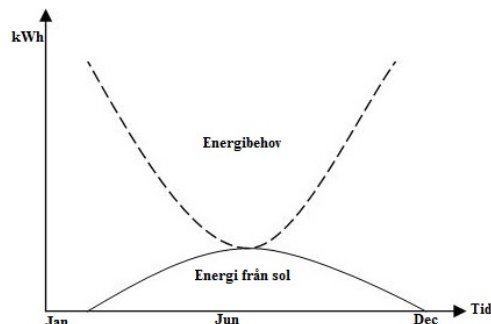
Figur 7 - Geografisk solinstrålning i Sverige under ett år.⁴⁵

Solinstrålningen varierar mellan södra och norra Sverige. Figur 7 illustrerar hur medelvärdet av solenergin som träffar marken fördelas geografiskt över landet.

Solfångare dimensioneras ofta efter max-effekten under sommarhalvåret, vilket för byggnader är tappvarmvattenbehovet. Detta på grund av att det inte är ekonomiskt hållbart att ha ett överdimensionerat system eftersom en stor del av värmen inte går att utnyttja.⁴⁶ Figur 8 och 9 illustrerar dimensioneringskurvor för solfångare i förhållande till värmebehovet i ett hus. Figur 8 visar ett överdimensionerat system och figur 9 visar ett korrekt dimensionerat system.



Figur 8 - Överdimensionerat solvärmesystem



Figur 9 - Normaldimensionerat solvärmesystem

2.4 Fasändringsmaterial för dygnslagring av värmeenergi

Temperaturvariationerna i en byggnad kan, under ett dygn, vara stora. För att minska variationerna kan fasändringsmaterial användas i byggnadsmaterialen. Fasändringsmaterialiet håller en konstant temperatur vid fasövergången vilket kan utnyttjas för komfortkyla. Det gör också byggnaden värmetrögare.⁴⁷

Att använda fasändringsmaterial i byggnader är känt sedan länge, till exempel har människan under lång tid använt is för kylning. Redan på 40-talet byggde Maria Telkes tillsammans med arkitekten Eleanor Raymond det första huset som enbart försörjdes med hjälp av solenergi. Huset var kilformat och två våningar högt vid ena fasaden. Den höga södra fasaden var täckt av fönster för att släppa in solljuset. En

⁴⁵ Svensk solenergi, Informationsbroschyr. Tillgänglig: www.svensksolenergi.se (100917).

⁴⁶ Andrén, Lars (2001), *Solenergi. Praktiska tillämpningar i bebyggelse*, Stockholm: Svensk Byggtjänst, s. 23, 68.

⁴⁷ ECES (2001), *Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage. Annex 17*. Tillgänglig: <http://www.fskab.com/annex17/> (101201), s. 69.

kanal, bestående av metall och glas, placerades innanför fönstren där luft passerade. Luften värmdes upp i denna kanal när den passerade en behållare med 21 ton Glaubersalt (natriumsulfat). Saltet smälte under varma dagar och kylde på så vis ner luften som passerade. När temperaturen sjönk stelnade saltet, vilket värmdes luften.⁴⁸

Den definitiva starten för storskalig forskning kring fasändringsmaterial skedde 1973 i samband med att oktoberkriget mellan Israel och arabländerna bröt ut. Oron över oljehandeln mellan länder ledde till att organisationer bildades för att forska och utveckla nya förnyelsebara energikällor och energilagring.⁴⁹ Sverige var redan då ett av föregångsländerna när det gällde energilagring, med fokus på latent värmelagring med salthydrater och organiska ämnen.⁵⁰

Efter 1980 påbörjades försök med att integrera fasändringsmaterial, i form av paraffin, i byggmaterial. Byggmaterial som främst användes var gips, betong och puts.⁵¹

Idag finns det några etablerade företag som försörjer sig på denna teknik. Climator AB är exempel på ett svenskt företag som sedan 80-talet specialiserat sig på produkter där fasändringsmaterial kan användas. En produkt som finns på marknaden idag är Climsell. Denna produkt fungerar på samma sätt som Telkes system och används bland annat för komfortkyla på stadsbiblioteket i Skövde. Där har salthydrat installerats i taket och integrerats med ventilationssystemet. När temperaturen når smältpunkten smälter hydratet och värmen från omgivningen upptas i salthydratet under fasförändringen.⁵² En fördel med Climsell är, enligt Nils Julin på Climator, att systemet är aktivt och går att styra för att dämpa dygnsvariationerna, vilket gör systemet mer effektivt än ett passivt system.

De vanligaste fasändringsmaterialen som används idag har en smältpunkt mellan 0-100 °C. I det intervallet återfinns salthydrater och paraffiner enligt figur 10, där smältentalpin för olika typer av fasändringsmaterial är angivna i förhållande till smälttemperaturen. Det går att utläsa ett mönster ur figuren där en högre smälttemperatur ger en högre smältentalpi.⁵³

⁴⁸ Sherburne, Morgan (2010) "The House of the Day After Tomorrow", *Technology Review*, 113:4.

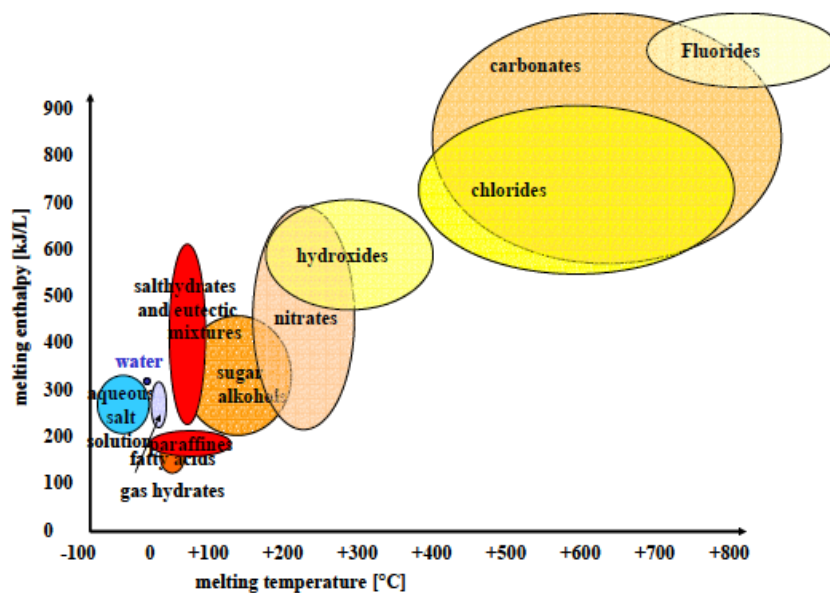
⁴⁹ Vener, Carl (1997), *Phase Change Thermal Energy Storage*. Tillgänglig: http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener's_dissertation.htm (101015), kapitel 3.4.

⁵⁰ *Termokemisk energilagring, underlag för BFR:s programplan 1981-1984* (1980), s. 22.

⁵¹ Castellon, C. et al. (2010), "Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels", *Renewable Energy*, 35:10.

⁵² Intervju: Nils Julin, Climator AB, 101018.

⁵³ ECES (2001), s. 8.



Figur 10 - Smältentalpi i förhållande till smälttemperatur för olika fasändringsmaterial.⁵⁴

2.5 Fasändringsmaterial för säsongslagring av värmeenergi

Fasändringsmaterial är ofta förknippat med korttidslagring av värme, som i exemplen ovan, men det går även att utnyttja vid långtidslager. Natriumacetat är en typ av saltlösning som räknas till kategorin fasändringsmaterial och som går att utnyttja för långtidslager.

2.5.1 Natriumacetat

Natriumacetat är ett salt av natriumhydroxid och ättiksyra som har många olika användningsområden, bland annat används det i så kallade handvärmare, se figur 11. En handvärmare är en plastbekladd ”kudde” som innehåller en lösning med natriumacetat och vatten samt en metallbit. Den används ofta som en extra värmekälla vid till exempel fjällvandringar.⁵⁵



Figur 11 - Handvärmare.

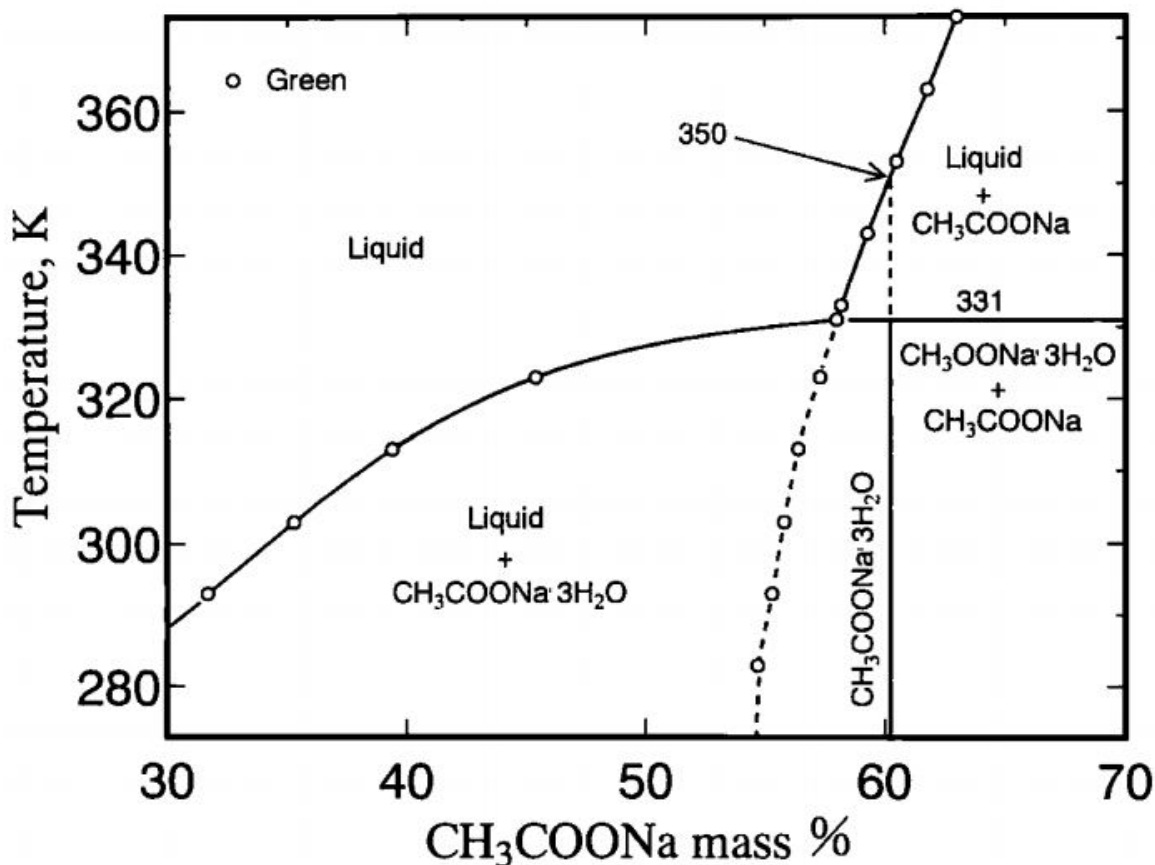
Figur 12 visar ett fasdiagram för natriumacetat blandat med vatten. Där anges hur aggregationstillstånd varierar vid olika temperaturer och massfördelningar. Lösningen i en handvärmare består av cirka 58% natriumacetat och 42% vatten, vilket betyder att lösningen, enligt fasdiagrammet, ska vara i fast tillstånd när temperaturen understiger 58° (331 K). Dock kan natriumacetat i en sluten behållare underkylas långt under smälttemperaturen och kristalliseras således inte när den befinner sig i rumstemperatur.⁵⁶

⁵⁴ ECES (2001), s. 8.

⁵⁵ Wadsö (2010), s. 26.

⁵⁶ Ibid.

För att reglera när processen i handvärmaren ska påbörjas har en metallbit inneslutits i kudden. Metallbiten i lösningen har studerats vid universitet i Oslo, där en rad experiment har utförts vilka syftat till att analysera startmekanismen i en handvärmare. Slutsatsen som drogs var att det sitter kvar kristaller i sprickorna på metallbiten som fungerar som kärnor för kristallisationen när metallplattan knäcks.



Figur 12 - Fasdiagram natriumacetat-vatten.⁵⁷

Anledningen till att kristallerna i sprickorna inte smälter trots att temperaturen överstiger smälttemperaturen är att de befinner sig i ett lokalt övertryck, vilket påverkar smälttemperaturen. Därmed smälter inte dessa kristaller när kudden kokas över den normala smälttemperaturen, 58 °C. Enligt Sandnes krävs att temperaturen överstiger 166 °C för att kristallerna i sprickorna ska smälta. Handvärmaren fungerar alltså genom att små kristaller utsöndras från metallbiten när den knäcks.⁵⁸

De egenskaper som finns hämtade från litteratur för natriumacetat och vatten är givna i tabell 2.

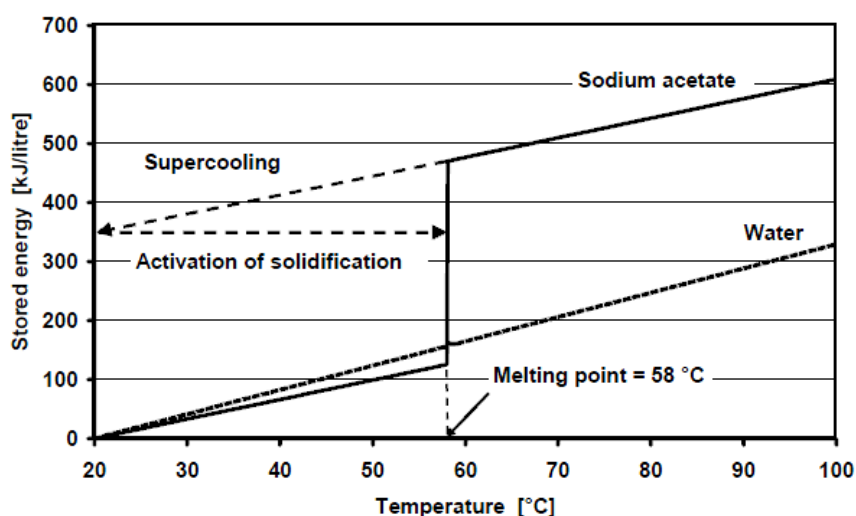
⁵⁷ Araki, N. et al. (1995), "Measurements of thermophysical properties of sodium acetate hydrate", *International Journal of Thermophysics*, 16:6.

⁵⁸ Sandnes, B. (2007), "The physics and the chemistry of the heat pad", *American Journal of Physics*, 76:6.

	NaAc+3H₂O	(Källa)	H₂O	(Källa)
Densitet, ρ [kg/m ³]	1290	(59)	1000	(60)
Specifik värmekapacitet, C_p [J/gK]	2,9 (L), 2,1 (S)	(61)	4,18	(60)
Värmekapacitet, C [kJ/m ³ K]	3770 (L), 2730 (S)	(61)	4180	(60)
Smälttemperatur, T_s [°C]	58	(61)	0	(60)
Värmeledning, λ [W/mK]	0,41 – 0,65	(61)	0,6	(60)
Specifik smältentalpi, l_s [J/g]	226 - 264	(62)	334	(60)

Tabell 2 - Egenskaper för natriumacetat och vatten.

Som beskrivits tidigare kan vätskor ibland underkylas och vara i flytande tillstånd trots att temperaturen är lägre än smälttemperaturen. Natriumacetat har en stabil underkylning vilket innebär att det enkelt underkyls till låga temperaturer. Smältpunkten är i teorin 58 °C men det kan enkelt underkylas ända ner till -15 °C.⁶³ Figur 13 visar hur energidensiteten för natriumacetat förhåller sig till vatten. Det går att utläsa att smältpunkten är runt 58 grader för natriumacetat samt att materialet har ungefär samma volymetrisk värmekapacitet som vatten, vilket innebär att det kan lagra ungefär samma mängd värmeenergi per volymenhet i flytande form. Den sträckande linjen illustrerar hur natriumacetatet fortsätter att vara flytande trots att temperaturen ligger långt under smälttemperaturen.⁶⁴



Figur 13 - Värmelagringskapacitet för natriumacetat jämfört med vatten.⁶⁵

⁵⁹ Furbo, Simon, Elsa Andersen & Jørgen M. Schultz (2006), *Advanced storage concepts for solar thermal systems in low energy buildings*, DTU. Tillgänglig: <http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-sr0601.pdf> (101201), s. 6.

⁶⁰ Nevander, Lars Erik & Bengt Elmarsson (2006), *Fukthandbok. Praktik och teori*, upplaga 3 (första upplagan 1994), Stockholm: Svensk Byggtjänst, s. 472.

⁶¹ Araki, N. et al. (1995).

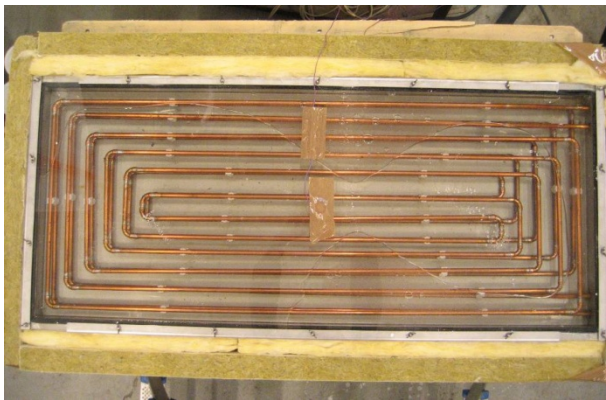
⁶² Sandnes, B. & J. Rekstad (2005), "Supercooling salt hydrates. Stored enthalpy as a function of temperature", *Solar Energy*, 80:5.

⁶³ Intervju: Simon Furbo, Danmarks tekniska universitet, 101022.

⁶⁴ Schultz, Jørgen M., Elsa Andersen & Simon Furbo (2008), *Advanced storage concepts for solar and low energy buildings*, IEA-SHC Task 32, DTU. Tillgänglig: <http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-sr0801.pdf> (101201), s. 5.

⁶⁵ Schultz, Andersen & Furbo (2008), s. 5.

På DTU studeras möjligheten att med hjälp av natriumacetat värma ett passivhus. Solfångare värmer upp ett lager med natriumacetat som sedan lagrar solvärmen i underkyllt tillstånd. När värmebehovet finns startas kristallisationen i saltlösningen genom att temperaturen i lösningen lokalt sänks till $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modulen bygger på värmeväxling mellan natriumacetatet och det värmebärande vattnet i röret. Som figur 14 visar finns två kopparslingor dragna inuti modulen. Kopparslingorna har ett inlopp respektive ett utlopp och är fyllda med cirkulerande vatten med ett specifikt flöde. Den ena kopparslingan är kopplad till solfångarsystemet och den andra slingan används för att växla över värmen till värmesystemet. Värmen som uppstår vid kristallisation växlas vidare till energibäraren i värmesystemet.



Figur 14 - Modul med natriumacetat från DTU.⁶⁶

Forskningsprojektet på DTU har bland annat haft problem med vilka material som kan användas till modulen för att motverka att natriumacetatet spontant kristalliserar. De råder också oklarhet om vilken smältentalpi som frigörs vid en kristallisation. Ytterligare tekniska svårigheter som uppstått gäller fassetparation i natriumacetatet, då mediet skiktat sig. En viktig fråga är hur detta påverkar värmeutvecklingen och hur rören ska

placeras.⁶⁷ Enligt Furbo har det visat sig att små lagerhöjder minskar risken för fassetparation. En annan lösning är att tillsätta förtjockningsmedlet Xantangummi.⁶⁸

2.6 Fasändringsmaterial för transporterering av värmeenergi

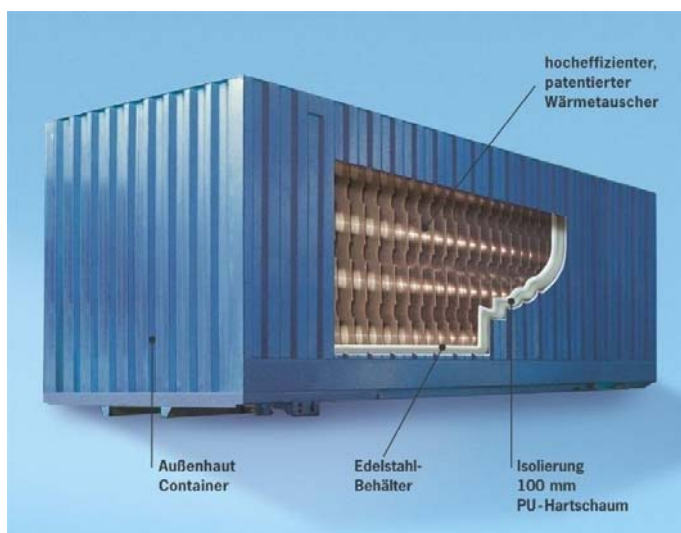
Ibland finns det omständigheter som inte gör det ekonomiskt försvarbart att anlägga en kulvert för att transportera värme, främst på grund av höga investeringskostnader. Därför har alternativa lösningar utforskats och ett av dessa bygger på att värme lagrat i fasändringsmaterial transporteras i containrar. Fasändringsmaterialet ökar energidensiteten i lagringsmediet i förhållande till vanligt vatten eftersom den latent energi kan utnyttjas. Ett värmetransportsystem med container är flexibelt, vilket gör det möjligt att även transportera värme till avlägsna friliggande byggnader samt att hämta värme från avlägsna industrier och transporteras till värme-konsumenten.⁶⁹

⁶⁶ Ibid. s. 17.

⁶⁷ Intervju: Simon Furbo, Danmarks tekniska universitet, 100903.

⁶⁸ Intervju: Simon Furbo, Danmarks tekniska universitet, 101111.

⁶⁹ Wang, Weilong (2010), *Mobilized thermal energy storage for heat recovery for distributed heating*, Mälardalens Högskola. Tillgänglig: <http://mdh.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:371257> (110101), s. 3.



Figur 15 - Specialcontainer.⁷⁰

I Tyskland har en prototyp för en specialcontainer som kan transportera värme med fasändringsmaterial tagits fram. Containern, som illustreras i figur 15, består av en relativt enkel konstruktion. Den är isolerad och inuti är en värmewäxlare placerad omgiven av ett fasändringsmaterial. Denna teknik forskas det mycket kring idag och demonstrationsprojekt finns runt om i världen.⁷¹ Det har även gjorts ett projekt i Oxelösund som nyligen slutförts där Ecostorage Sweden

AB, Climatwell och Svensk stål AB (SSAB) har samarbetat för att undersöka möjligheterna att transportera industriell spillvärme med bland annat fasändringsmaterial från ett stålverk.⁷² För att transporten av värme ska vara effektiv är det viktigt med en hög energidensitet. Enligt Chris Bales, deltagare inom IEA, är det tre saker som är viktiga att tänka på vid transporter av värme med fasändringsmaterial:

1. Vilken temperatur som ska levereras.
2. Att källan för värmen ska vara 10-15 grader högre än den som ska tillföras på grund av potentiella värmeförluster.
3. Att välja ett lämpligt PCM som passar för det aktuella temperaturintervallet.⁷³

2.7 Metoder för att säsongslagra värmeenergi

Det finns idag en del mer eller mindre etablerade metoder för att lagra värmeenergi, både på storskalig nivå och i mindre omfattning. När solvärmesystemen etablerades på marknaden påbörjades också forskning kring hur värmeenergin kunde lagras under längre perioder.⁷⁴

De etablerade systemen för säsongslagring av värmeenergi är:

- Groplager
- Bergrumslager
- Marklager
- Salt/kemisk värmepump

⁷⁰ Ibid. s. 6.

⁷¹ Svensk Fjärrvärme (2009), *Transport av industriell överskottsvärme*, s. 11.

⁷² Ibid. s. 10.

⁷³ Intervju: Chris Bales, Dalarnas universitet, 100913.

⁷⁴ Andrén (2001), s. 50.

Att säsongslagra värme med fasändringsmaterial är som tidigare nämnts inte etablerat på marknaden. De tre översta metoderna utnyttjar enbart värmekapaciteten i lagret och magasinerar värme i varmt tillstånd medan den salt/kemiska värmepumpen lagrar värme kemiskt i saltlager.⁷⁵

Ett groplager är ett lager där en grop har grävts vid markytan och kompletterats med omslutande tätskikt och isolering. Det fanns år 2001 fem stycken groplager i Sverige för säsongslagring av solvärme och de är i storleksordningen 100–30 000 m³.⁷⁶

När värme lagras i bergrum utnyttjas stora bergrum som tidigare använts till exempelvis skyddsrum, oljelager och tunnlar. Detta var den främsta tekniken för att lagra värmeenergi år 2001. Bland annat byggdes 1984 ett värmelager i Lyckebo om 100 000 m³.⁷⁷

Värmelagring i mark utnyttjar värmekapaciteten i marken för att lagra solvärmen. Detta kan göras i lera, berg eller akvifärer. Tekniken bygger på att värme förs ner i marken och växlas med omgivningen. Det fanns år 2001 ett tiotal anläggningar i Sverige som utnyttjade denna teknik. Lagervolymen varierar mellan 10 000–100 000 m³.⁷⁸

Ett exempel på energilagring i akvifär är Arlandas system för uppvärmning vintertid och kylning sommartid. Denna akvifär var år 2010 världens största energilagrande akvifär, med en volym på 2 000 000 m³ och ger en årlig energiminskning på 15–20 GWh.⁷⁹ Viktigt vid värmelagring i akvifär är att ha en stor volym i förhållande till omslutande area och att värmeledningsförmågan i berget omkring är liten för att minimera värmeförlusterna.⁸⁰

Salt/kemiska värmepumpar undersöktes av forskare på Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm redan år 1977. Då togs det fram en kemisk värmepump som innehöll två substanser, vilka kunde lagra värmeenergi. Substanserna var natriumsulfid och vatten. Förenklat byggde tekniken på att natriumsulfid torkades och uppfuktades och på så vis kunde värme lagras.⁸¹ Denna metod är idag förhållandevis etablerad och det finns bland annat ett svenskt företag, ClimatWell AB, som är specialiserade på detta och har ett patent på en modul för ändamålet. Deras system kan fungera mobilt och var ett av alternativen som undersöktes vid projektet i Oxelösund som nämndes i föregående kapitel.⁸²

⁷⁵ Ibid. s. 76 ff.

⁷⁶ Ibid. s. 51.

⁷⁷ Ibid. s. 53.

⁷⁸ Ibid. s. 53.

⁷⁹ TAC, *Arlanda energi*. Tillgänglig: <http://www.tac.com/se/data/internal/data/08/44/1249887766618/Akvifar.pdf> (100922).

⁸⁰ Intervju: Elisabeth Kjellsson, Lunds tekniska högskola, 101220.

⁸¹ Andrén (2001), s. 55.

⁸² Svensk fjärrvärme (2009), *Transport av industriell överskottsvärme*, s. 10.

3 Empiri

I detta kapitel redovisas de experiment som ingår i rapporten. Sammanlagt har fyra experiment gjorts. Delar av resultaten används i nästkommande kapitel där analyser och dimensionering utförs.

3.1 Experiment 1 - Materialpåverkan

Experimentet gjordes för att studera om olika material kan påverka den underkyllda lösningens stabilitet. Som tidigare beskrivits kan natriumacetat underkylas. Furbo vid DTU förklarade vid ett tidigt möte i projektet att de haft flera problem med att kristallisationen skedde för tidigt, vid icke önskvärda tillfällen. Denna rapport syftar som bekant till att undersöka om natriumacetat kan användas för att säsongslagra värmeenergi. Det är av stor vikt att energin som lagras behålls från sommaren till vintern, vilket förutsätter att natriumacetatet behåller sin flytande struktur och inte avger energin i till exempel september genom en spontan kristallisation. Det är därför viktigt att få natriumacetatet så stabilt som möjligt.

Våra försök gjordes genom att placera en blandning med 58-vikt% natriumacetat och 42-vikt% vatten i burkar om 750 ml. I dessa burkar placerades också olika material enligt första kolumnen i tabell 3. Därefter placerades burkarna i ett temperaturskåp och värmdes upp till 75 °C för att sedan sänkas successivt.



Figur 16 - Experimentförberedelser.

Enligt teorin ska ingen kristallisation ske i lösningen förrän temperaturen når -15 °C. Förhoppningen med experimentet var att undersöka om lösningen var speciellt känslig för något av nedanstående material samtidigt som underkylningsförmågan undersöktes.

Det visade sig att systemet var mer komplicerat än att bara gå mellan $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ och $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Vid flera försök bildades det nämligen även en tredje fas. Utöver material redovisas därför också vid vilken temperatur det skett en

förändring i strukturen.”SU” betyder att någon form av saltutfällning skett iblandningen och ”KR” betyder att lösningen har kristalliserat (bildat $C_2H_3NaO_2 \cdot 3H_2O$).

Prov	Material	75 °C	55 °C	50 °C	30 °C	-16 °C
1	Referens	Smält	Smält	Smält	SU	KR
2	Rostigt Järn	Smält	Smält	Smält	SU	KR
3	Plexiglas	Smält	Smält	Smält	SU	KR
4	PE	Smält	Smält	Smält	SU	KR
5	Delin	Smält	Smält	Smält	SU	KR
6	PVC	Smält	Smält	SU	SU	KR
7	Aluminiumspån	Smält	Smält	Smält	SU	KR
8	PP	Smält	Smält	Smält	SU	KR
9	Teflon, Vattenslang, PVDF	Smält	Smält	Smält	SU	KR
10	Peek spån	Smält	Smält	Smält	SU	KR
11	Aluminiumcylinder	Smält	Smält	Smält	SU	KR
12	Stålspån	Smält	Smält	Smält	SU	KR
13	Koppar	Smält	Smält	Smält	SU	KR
14	Rostfritt stål	Smält	Smält	Smält	SU	KR
15	Stålull	Smält	Smält	Smält	SU	KR
16	Järntråd	Smält	Smält	Smält	SU	KR
17	Mässing	Smält	Smält	Smält	SU	KR
18	Svets på rostfritt stål	SU	SU	SU	SU	KR
19	Referens	SU	SU	SU	SU	KR
20	Referens	Smält	Smält	Smält	SU	KR
21	Skum och foam	Smält	Smält	Smält	SU	KR
22	Trä	Gul/Smält	Smält	Smält	SU	KR
23	Mutter & avsågad armering	Smält	Smält	Smält	SU	KR

Tabell 3 - Materialpåverkan, test 1.

De flesta proverna följer samma mönster. Vid 75 °C är de fullt lösta och vid temperatursänkning fälls delar av natriumacetatet ut i små kristaller. När temperaturen är -16 °C sker en fullständig kristallisation. När saltutfällningen sker i lösningen ser det ut som en viss kristallisation startat, men kristallerna som bildas är genomsiktliga, diffusa och fyller ut en mindre del av varje burk. Möjligheten att starta den normala kristallisationen och få en hög värmeutveckling påverkas inte. Vid normal kristallisation blir hela provet vitt och man ser ett mönster av långa kristallnålar i det fasta materialet. Något som kan diskuteras och som utreds i experiment längre fram med kalorimeter är hur denna saltutfällning påverkar smältvärmerna.

Slutsatsen är att de undersökta materialproverna inte påverkar underkylningen. Försöket upprepas ytterligare en gång genom att alla burkar återigen värmdes upp till 75 °C tills all lösning var smält. I detta försök sänktes temperaturen direkt ner till rumstemperatur. Resultatet redovisas i tabell 4.

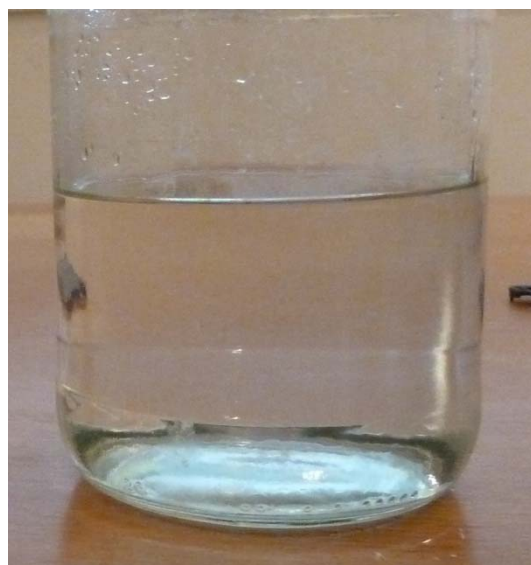
Prov	Material	75 °C	20 °C
1	Referens	Smält	SU
2	Rostigt Järn	Smält	SU
3	Plexiglas	Smält	SU
4	PE	Smält	SU
5	Delin	Smält	SU
6	PVC	Smält	SU
7	Aluminiumspån	Smält	SU
8	PP	Smält	SU
9	Teflon, Vattenslang, PVDF	Smält	SU
10	Peek spån	Smält	SU
11	Aluminiumcylinder	Smält	SU
12	Stålspån	Smält	SU
13	Koppar	Smält	SU
14	Rostfritt stål	Smält	SU
15	Stålull	Smält	SU
16	Järntråd	Smält	SU
17	Mässing	Smält	SU
18	Svets på rostfritt stål	SU	SU
19	Referens	SU	SU
20	Referens	Smält	SU
21	Skum och foam	Smält	SU
22	Trä	Gul/Smält	SU
23	Mutter & avsågad armering	Smält	SU

Tabell 4 - Materialpåverkan, test 2.

Resultatet visar även i detta experiment att det sker en viss saltutfällning vid en temperatursänkning. Prov 18 och 19 har små kristaller även vid 75 grader. Det är svårt att förklara varför dessa kristaller inte smält. En tänkbar förklaring skulle kunna vara osäkerheter vid blandningen och att prov 18 och 19 därigenom skulle ha en högre koncentration salt och att masskompositionen av misstag istället är 60-vikt% natriumacetat och 40-vikt% vatten. I fasdiagrammet (figur 12) hamnar lösningen då i den övre högra kvadranten då den flytande lösningen även innehåller kristaller. För att kontrollera om detta stämmer gjordes ytterligare ett nytt försök där alla prover värmdes upp till 80 °C (Enligt fasdiagrammet borde kristallerna smälta vid denna högre temperatur). Resultatet blev dock likartat.



Figur 17 - Saltutfällning i blandningen.



Figur 18 - Flytande natriumacetat.

Problem som kan uppstå när salt utfälls är att de tyngre partiklarna faller till botten och det blir en tydlig fassparation vilket kan ses i figur 17 (jämför figur 18). Detta kan påverka hur rören i modulen ska placeras. Dock har några experiment utförts med en extra tillsats av Xantangummi. Xantangummi är ett förtjockningsmedel som kan användas för att få en homogen lösning genom att minska fassparationen. Resultat blev en krämig, homogen blandning med en obefintlig fassparation.

Observationerna rörande underkylningen stämmer överens med vad de danska forskarna har kommit fram till i sina experiment. Den saltutfällningen som skett i alla burkar har inte visat sig påverka möjligheten att säsongslagra värmeenergi med natriumacetat. Dock är det möjligt att saltutfällningen påverkar smältentalpin för blandningen, vilket behandlas i nästa avsnitt.

3.2 Experiment 2 - Smältentalpi

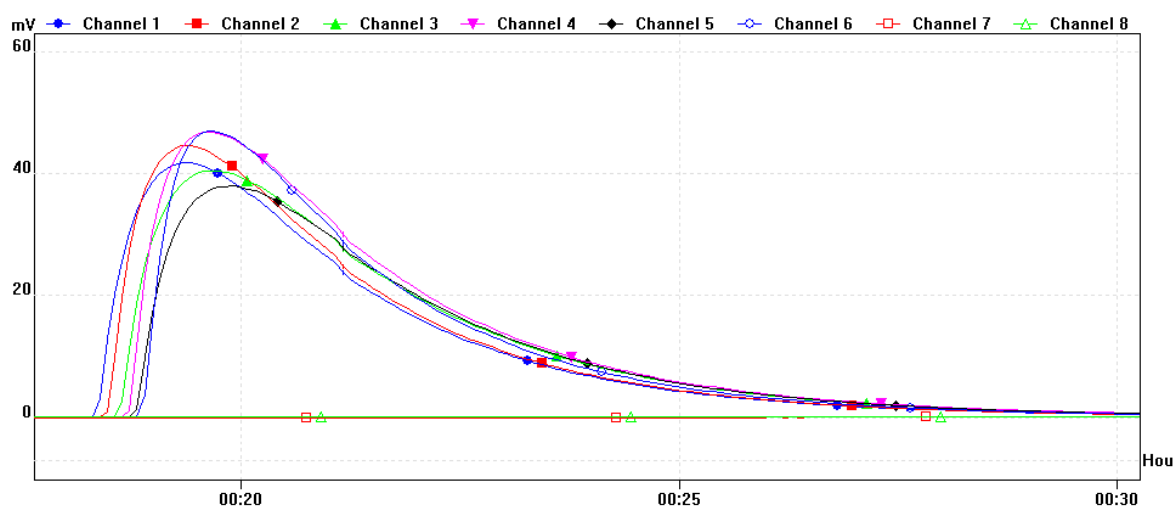
Syftet med experiment 2 var att mäta smältentalpin för natriumacetat. Enligt Furbo på DTU finns det en stor variation av smältentalpi mellan olika litteraturkällor, vilket motiverar undersökningen.

Mätningen för experiment 2 gjordes i ampuller i en isoterm kalorimeter (även kallad värmeledningskalorimeter). Detta är ett mätinstrument för att mäta hur mycket värme som frigörs eller upptas vid en kemisk reaktion; det vill säga entalpiförändringen. Små prover av okristalliserad natriumacetatlösning placerades i ampuller som placerades i kalorimetrar av typen TAM Air, se figur 19.



Figur 19 - Kalorimeter laddad inför experiment.

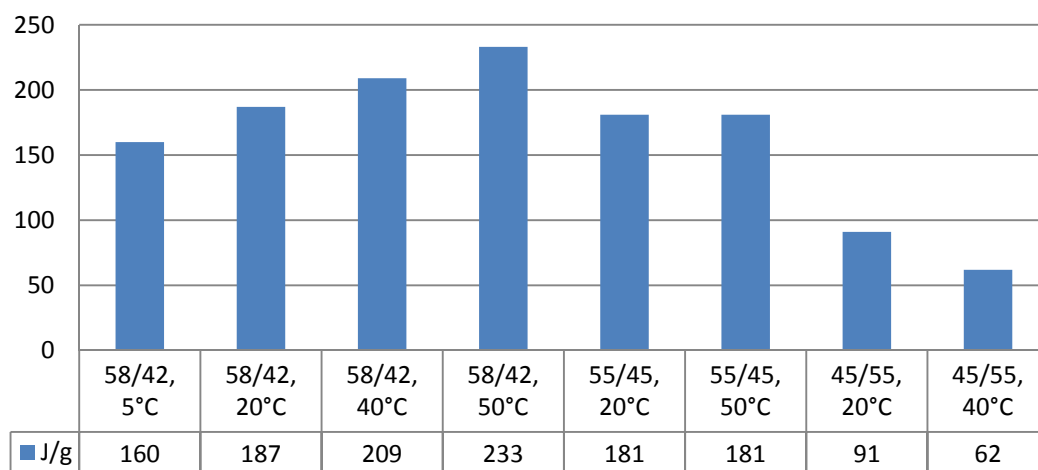
Genom tunna rör som gick genom locken på ampullerna släpptes stålkanylet med små partiklar av natriumacetat ned för att starta reaktionen. Den utvecklade värmeeffekten kunde sedan avläsas som funktion av tiden, och integreras för att få den utvecklade värmen enligt figur 20. Figur 20 visar ett resultat från en mätning i kalorimeter, där 8 stycken ampuller har använts.



Figur 20 - Resultat från kalorimeter

Entalpin för processen är värmets dividerat med massan (eller antal mol). Observera att mätningarna utfördes vid konstant temperatur. Det som mättes vid till exempel 20 °C är entalpin för kristallisationen av provet vid just 20 °C. Proven var så små att temperaturhöjningen i dem var maximalt 1 K, men eftersom temperaturen var densamma vid mätningens slut som vid mätningens början är det som mäts isoterma kristallisationsentalpier.

Mätningarna gjordes med tre olika koncentrationer vid olika temperaturer. Enligt fasdiagrammet kan maximalt 58-vikt% natriumacetat upptas flytande vid 58 °C och det är den koncentrationen som de danska forskarna använder. Därför är flera mätningar gjorda med detta recept, se resultaten i figur 21.



Figur 21 - Sammanställning av kristallisationsentalpi från mätningar.

Resultatet visade att det var en tydlig skillnad mellan proverna och det är möjligt att dra vissa slutsatser utifrån resultatet:

1. Kristallisationsentalpin vid 58–vikt% natriumacetat och 42–vikt% vatten är temperaturberoende.
2. Kristallisationsentalpin vid 55–vikt% natriumacetat och 45–vikt% vatten är inte lika temperaturberoende som för blandningen 58/42.
3. Kristallisationsentalpin vid 45–vikt% natriumacetat och 55–vikt% vatten är temperaturberoende.
4. Den högsta kristallisationsentalpin fås i 58–vikt% natriumacetat och 42–vikt% vatten blandningen vid 50 °C.

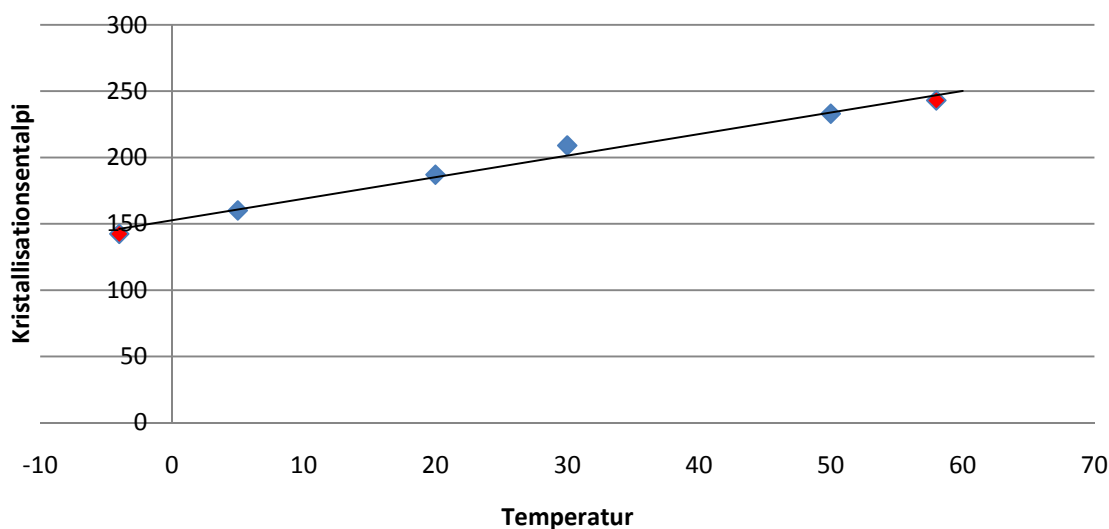
Det är tydligt att kristallisationsentalpin med blandningen 58–vikt% natriumacetat och 42–vikt% vatten varierar. Troligtvis beror detta på att lösningen vid 58 °C är mättad. För att undersöka om så var fallet, ökades saltkoncentrationen till 60–vikt% natriumacetat och 40–vikt% vatten. Resultatet blev att en del saltkristaller inte löste sig i vattnet, vilket överensstämmer med vad fasdiagrammet i figur 12 visar i den övre högra kvadranten. Således är lösningen som innehåller 58–vikt% natriumacetat och 42–vikt% vatten mättad när temperaturen i lösningen är 58 °C. När temperaturen stegvis sänks, bildas anhydrat (små kristaller) i lösningen och vårt antagande är att det är salt som faller ut. I fasdiagrammet finns en streckad linje i den nedre vänstra kvadranten som troligtvis illustrerar den saltkoncentrationen som kan blandas utan att det sker en saltutfällning. Det vill säga att när temperaturen är 20 °C borde ingen saltutfällning ske om koncentrationen är 55–vikt% natriumacetat och 45–vikt% vatten. För att undersöka om detta stämmer gjordes ett antal prover som förvarades i 20 °C. Resultatet visade att det inte bildades några kristaller. Det borde också innebära att smältentalpin i blandningen 55–vikt% natriumacetat och 45–vikt% vatten är konstant, det vill säga oberoende av vilken initialtemperatur proverna förvaras i innan kristallisation. Flera mätningar gjordes och resultatet i figur 21 visar att smältentalpin för blandningen 55–vikt% natriumacetat och 45–vikt% vatten är konstant 181 J/g.

För att undersöka hur smältentalpin varierar vid en kraftig förändring av saltkoncentrationen utfördes även några mätningar med blandningen 45-vikt% natriumacetat och 55-vikt% vatten, vid initialtemperaturen 20 °C respektive 40 °C. Det visade sig att resultatet blev motsatt mot vad tidigare mätningar visat, vilket är något förbryllande. Resultatet blev således högre då initialtemperaturen var lägre, enligt figur 21. Smältentalpin var 91 J/g vid initialtemperaturen 20 °C och 62 J/g vid 40 °C. Vad detta beror på har vi inte undersökt vidare i denna rapport.

För att återgå till blandningen 58-vikt% natriumacetat och 42-vikt% vatten så är det tydligt att den högsta smältentalpin fås vid så hög initialtemperatur som möjligt, vilket i vår mätning är när initialtemperaturen är 50 °C. Det är således viktigt att veta vilken temperatur som lagringsmodulen ska placeras i.

Under fallstudierna senare i rapporten placeras modulen i olika temperaturer, 20 °C respektive -3,6 °C. Det förstnämnda är en normal inomhustemperatur och det sistnämnda är enligt SMHI medeltemperaturen i Malmö under januari. Resultatet i figur 21 visar att vid 20 °C är kristallisationsentalpin 187 J/g. I kalorimetern var den lägsta temperaturen som gick att mäta 5 °C så för att uppskatta smältentalpin vid -3,6 °C extrapoleras ett värde. I figur 22 är värdena för blandningen 58-vikt% natriumacetat och 42-vikt% vatten markerade. Entalpiförändringen är linjärt vilket möjliggör en extrapolering. Värdet vid initialtemperaturen -3,6 °C blir då 143 J/g vilket motsvarar 0,04 kWh/kg.

Ytterligare en extrapolering gjordes för få fram den högsta möjliga smältentalpin vilket infaller vid 58 °C. Resultatet blev 243 J/g. Smältentalpin i tabell 2 anger variationen av värdena hämtade från olika källor. De varierar mellan 226 J/g och 264 J/g. I figur 22 redovisas sex punkter. De fyra innersta punkterna är våra tidigare mätvärden från figur 21 och de två yttersta de extrapolerade.

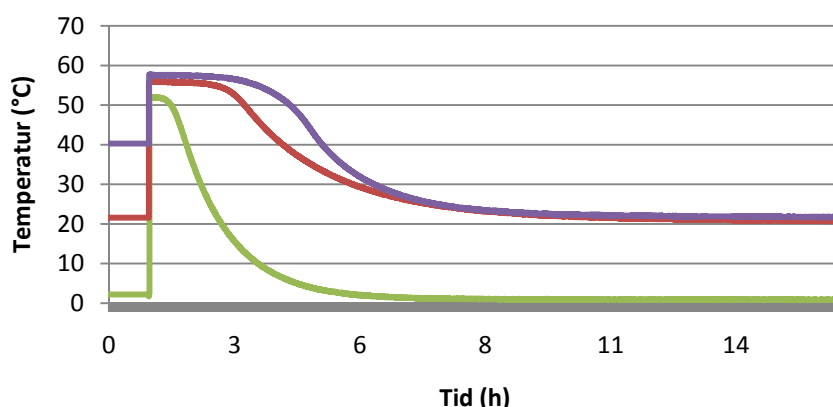


Figur 22 - Förhållandet smältvärme-temperatur

En utförligare redogörelse över lösningarnas vikt, antal prover, initialtemperatur finns i bilaga 1.

3.3 Experiment 3 - Temperaturförlopp i glasburk

I experiment 3 testas hur temperaturen i natriumacetatlösningen varierar när den kristalliseras vid olika initialtemperaturer. Syftet med mätningarna är att få en uppfattning om hur temperaturförloppet varierar och hur länge lösningen håller sig vid smälttemperaturen. Natriumacetat trihydratet värmdes till flytande tillstånd i en glasburk som rymmer 600 ml. Därefter svalnar lösningen till önskad starttemperatur. Efter detta startades kristallisationen och temperaturen mitt i provet loggades under kristallisationen tills provet åter hade svalnat till omgivningstemperaturen. Resultatet framgår i figur 23. Observera att kristallisationen startade vid tre olika initialtemperaturer, men att de svalnade till två olika sluttemperaturer (omgivande temperaturer).



Figur 23 - Temperaturprofil vid olika initialtemperaturer

Mätningarna visar att en del av den latent energi går åt för att värma lösningen från initialtemperaturen till smälttemperaturen. Ju lägre initialtemperaturen är desto kortare tid befinner sig natriumacetatet vid smälttemperaturen. Den mätningen som gjordes vid initialtemperaturen 2 °C visade att den latent energi inte är tillräcklig för att höja temperaturen till smälttemperaturen, utan avstannade istället på 53 °C. Därefter föll temperaturen relativt snabbt till omgivningstemperatur. Temperaturhöjningen som smältentalpin medför beräknas enligt ekvation 3, där Q är smältentalpin och $C_{p,naac}$ är värmekapaciteten i natriumacetat.

$$\Delta T = \frac{Q}{C_{p,naac}} [^{\circ}\text{C}] \quad [\text{ekv. 3}]$$

I denna beräkning varierar smältentalpin enligt tidigare experiment och värmekapaciteten antas vara konstant.

Q [J/g]	Initialtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	Maxtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
143	-3,6	49,3	45,7
160	5,0	55,2	58,0
187	20,0	64,5	58,0
209	40,0	72,1	58,0

Tabell 5 - Temperaturhöjning med avseende på smältentalpi

Vid initialtemperaturerna 22 °C och 42 °C är temperaturen redan så hög att delar av den latent energin finns kvar när lösningen når 58 °C, vilket innebär att temperaturen i dessa försök ligger konstant på 58 °C tills den latent värmen är slut. Därefter svalnar vätskan exponentiellt mot rumstemperaturen. Mätningen med initialtemperaturen 2 °C höjs enligt mätningen till 53 °C, vilket stämmer bra med den teoretiska beräkningen.

3.4 Experiment 4 - Värmekonduktivitet och värmekapacitet

För att räkna på den värme som är möjlig att få ut ur en modul eller en container, är värmeledningsförmågan och värmekapaciteten för salthyratet viktiga parametrar. Det är värmeledningsförmågan som bestämmer hur goda förutsättningarna är för värmen att ledas från en specifik punkt till en annan. Värmekapaciteten bestämmer hur mycket energi som ryms i modulen. Dessa parametrar behövs för att kunna räkna ut urladdningstiden för respektive lagringstank.

Mätningarna gjordes med en HotDisk 1500, ett mätinstrument som mäter värmeledningsförmåga och värmekapacitet. En sensor placerades i blandningen och två mätningar utfördes, först i underkyllt natriumacetat (flytande) och sedan i ett kristalliserat system (fast). Resultaten redovisas i tabell 6 nedan.

	Flytande	Kristalliserat
Temperatur (° C)	24	22
Värmekonduktivitet (W/mK)	0,42	0,38
Specifik värmekapacitet (J/gK)	3,3	1,6

Tabell 6 - Resultat HotDisk

Värdena från resultatet har jämförts med tabell 2 som bygger på värden hämtade från litteraturen. Enligt manualen till HotDisk var mätningar på vätska en komplicerad procedur. HotDisk-tillverkaren rekommenderar en specialsensorn med radien 3,2 mm för mätningar i vätskor och puder. Eftersom en sådan sensor inte fanns tillgänglig, fick mätningen genomföras med den minsta tillgängliga sensorn med radien 9,2 mm.

Resultatet i den underkylda vätskan visade ungefär samma värden som angavs i tabell 2. Dock gav mätningen i det kristalliserade natriumacetat ett resultat som inte stämmer överens med litteraturen. Faktorer som kan ha påverkat mätningen är kristallernas olika riktningar samt sensorns position i det kristalliserade natriumacetatet. På grund av osäkerheten i dessa mätningar kommer beräkningarna i kommande fallstudie bygga på litteraturvärdena enligt tabell 2.

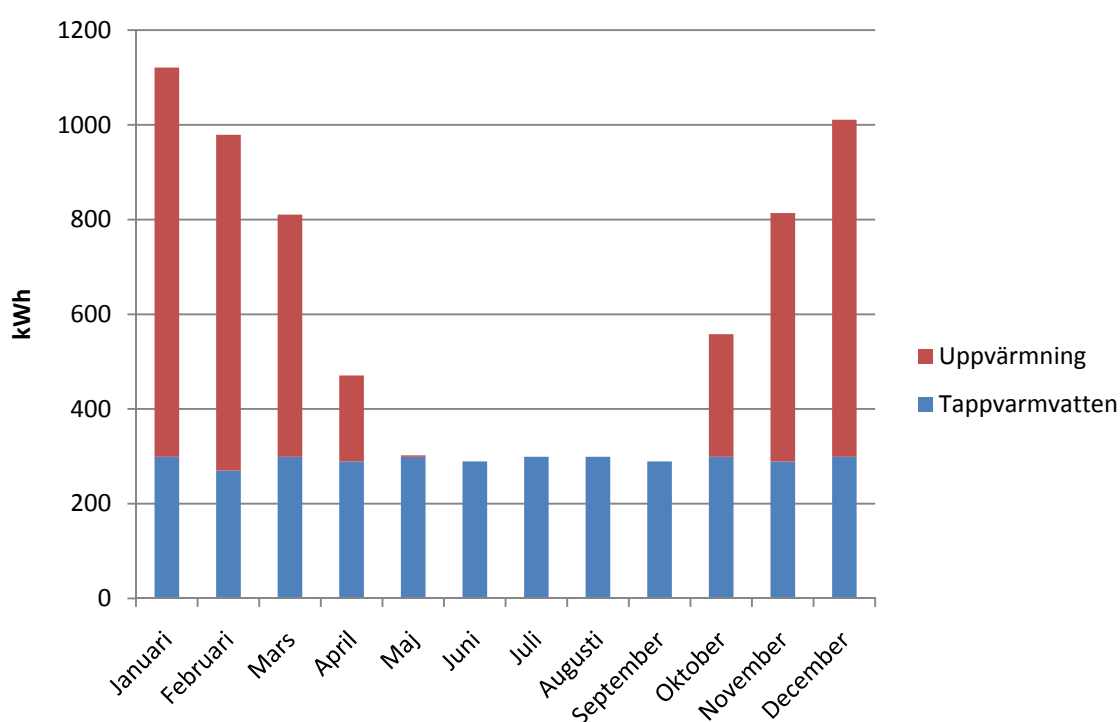
4 Analys

Analysen av hur ett värmesystem med natriumacetat som värmelager ska utformas bygger på två fallstudier där volymer, rörlängder, urladdningstid och uppladdningsenergi beräknad för två skilda tillämpningsområden:

Fall 1: *Ett* hus med solvärme som uppladdningskälla och modul inomhus

Fall 2: *Sex* hus med spillvärme som uppladdningskälla och modul utomhus

Beräkningarna för energiförbrukningen under ett år bygger på befintliga handlingar från passivhustillverkaren Emrahus; deras hus "Villa Box" har använts i simuleringen med beräkningsprogrammet IDA 4. Brukarvanor och annan indata till simuleringen följer kraven för ett passiv-hus. Huset är placerat i Malmö.



Figur 24 - Energianvändningen i Villa Box för uppvärmning och tappvarmvatten.

Figur 24 visar att uppvärmningsbehovet är störst under vinterhalvåret samt att mycket av energianvändningen i ett passivhus går till att värma tappvarmvattnet. Om solfångare installeras reduceras främst den köpta energin under sommarmånaderna. Den största delen av värmebehovet, vinterenergianvändningen, är fortfarande stor och står för en stor del av den årliga energianvändningen. Ett sätt att minska den är att lagra värmeenergi över säsong.

4.1 Dimensionering av natriumacetatmodul

Vid dimensionering av en modul med natriumacetat är det viktigt att modulen arbetar mot låga temperaturer. Då kan en större del av smältvärmnet utnyttjas till uppvärmning. Med anledning av detta är dimensioneringsberäkningarna anpassade efter energibehovet för uppvärmning av tappvarmvattnet under en månad.

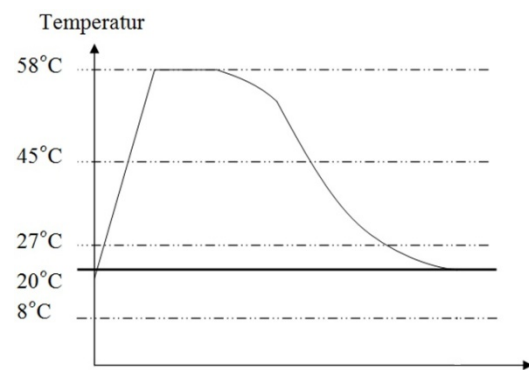
Villa Box använder 287 kWh varje månad för att värma tappvarmvattnet. Lagringsvolymen beräknas genom att dividera månadsbehovet med densiteten och smältentalpin för natriumacetat:

$$\text{Volym} = \frac{\text{Månadsbehov}}{\text{Smältentalpi} * \text{Densitet}} \quad [\text{m}^3] \quad [\text{ekv. 4}]$$

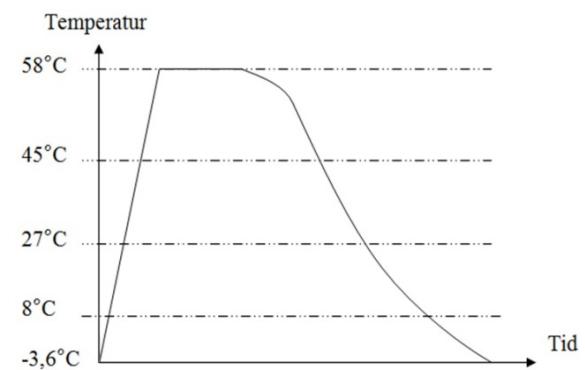
Volymen är också beroende av vilken temperatur lagringsmodulen arbetar emot. Några olika alternativ följer nedan:

- På inkommande tappvarmvatten.
- Till ett uppvärmningssystem bestående av radiatorer, där arbetstemperaturen är 55/45 °C.
- Till ett uppvärmningssystem med golvvärme, det vill säga ett lågtemperatursystem med en temperatur på 27 °C.

Om lagringsmodulen kopplas mot ett högtempererat system förloras delar av energin eftersom lagret först ska upp till 45 °C innan det tillför någon effekt. Konsekvensen blir att stora delar av den latent energi går förlorad. Figur 25 och 26 visar hur detta kan fungera. Om säsongslagret istället arbetat mot ett lågtemperatursystem går mindre energi förlorad eftersom natriumacetatet bara behöver värmas till cirka 27 °C. Det mest intressanta alternativet är att koppla säsongslagret mot tappvarmvattensystemet, eftersom det bara är 8 °C.



Figur 25 - Tank inomhus



Figur 26 - Tank utomhus

Det två fallen i figur 25 och 26 har olika omgivande temperaturer och natriumacetatets temperatur är antagen till 20 °C respektive -3,6 °C (normal inomhus-temperatur respektive medeltemperaturen i Malmö under januari). När natriumacetatet har temperaturen -3,6 °C går delar av den latent energi åt för att höja lagret till 8 °C. När säsongslagret däremot håller 20 °C redan vid start är lagret ”före” och kan direkt värma det kalla vattnet och förlorar därmed ingen energi. Hur mycket energi som går förlorad för att höja temperaturen från initialtemperaturen -3,6 °C till 8 °C beräknas med ekvation 1:

$$Q = Cp * \Delta T = 2900 * (8 - (-3,6)) = 33640 \text{ J/kg} = 9,34 \text{ Wh/kg}$$

Det innebär att 9,34 Wh av totala 40 Wh/kg (experiment 2) går förlorad.

4.1.1 Fall 1- Dimensionering

I fall 1 förvaras modulen inomhus där den omgivande temperaturen är 20 °C vilket ger smältentalpin 0,053 kWh/kg enligt experiment 2. Enligt ekvation 4 beräknas den volym natriumacetat som krävs under dessa omständigheter för att täcka månadsbehovet:

$$\text{Volym} = \frac{287}{0,053 * 1301} = 4,2 \text{ [m}^3\text{]}$$

4.1.2 Fall 2- Dimensionering

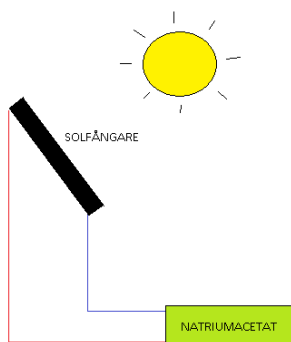
I fall 2 förvaras modulen utomhus där omgivande temperaturen är -3,6 °C vilket ger smältentalpin 0,040 kWh/kg enligt experiment 2. Energiförlusten för att höja temperaturen från -3,6 till 8 °C är 9,34 Wh/kg (33,62 J/g). Utav de tidigare 143 J/g från experiment 2 finns nu bara 109 J/g kvar att utnyttja. Följande volym natriumacetat krävs under dessa omständigheter för att täcka månadsbehovet för sex hus:

$$\text{Totalt energibehov} = 6 * 287 = 1722 \text{ kWh}$$

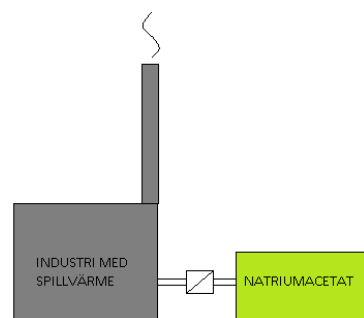
$$\text{Volym} = \frac{1722}{(0,040 - 0,00934) * 1301} = 43,9 \text{ [m}^3\text{]}$$

4.2 Uppladdning

Uppladdningsmetoden varierar mellan fall 1 och fall 2, eftersom två olika uppladdningskällor används. De två uppladdningskällorna som analyserats är solvärme och spillvärme. En schematisk bild över hur det kan fungera visas i figur 27 och 28.



Figur 27 - Fall 1, Solvärme

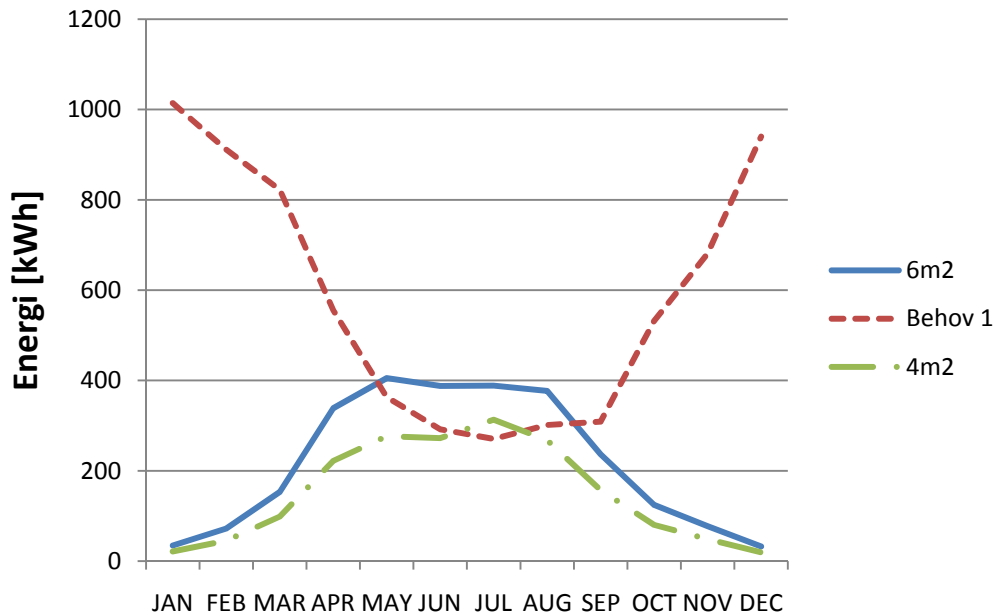


Figur 28 - Fall 2, Spillvärme

4.2.1 Fall 1 - Uppladdning

I fall 1 används solvärme för att ladda modulen som är tänkt att placeras i ett hus. En simulering har gjorts med programmet Winsun, där energibehovet för uppvärmning och tappvarmvatten i ett passivhus jämförs med energitillförseln från solfångarna

över ett år. Figur 29 visar hur mycket energi två vakuumrörsolfångaranläggningar om 4 m² och 6 m² tillför Villa Box. Anläggningen på 4 m² är en normal dimensionering för ett hus där effekten från solfångarna överensstämmer med effektbehovet för tappvarmvattnet under sommaren.



Figur 29 - Energiförbehovet i Villa Box jämförs mot energitillskottet från 4 m² respektive 6 m² vakuumrörsolfångare över ett år (simulering från Winsun).

Simuleringen visar att 6 m² ger ett överskott på cirka 330 kWh, vilket möjliggör smältning av 4 m³ natriumacetat. Viktigt att poängtera är att en anläggning med 6 m² även utökar det totala årliga solenergitillskottet.

4.2.2 Fall 2 - Uppladdning

I fall 2 utnyttjas spillvärme som uppladdningskälla. För att konkretisera hur detta kan fungera har kontakt tagits med Södra Cells pappersmassafabrik Värö Bruk utanför Varberg. De har följande spillvärmekällor i överskott under sommaren:

- Lågtryckånga, 150 °C
- Hetvatten, 65-70 °C
- Varmvatten, 50 °C

Eftersom natriumacetatet har en smältpunkt på 58 °C är det sistnämnda alternativet inte aktuellt. Enligt Södra Cells processingenjör Gustav Collin strävar företaget efter att spara lågtrycksånga i största möjliga utsträckning. Därför lämpar sig hetvattnet bäst för att ladda natriumacetatet. Idag levererar Värö bruk 80 °C vatten till fjärrvärmenätet i Varberg. Dock finns det ett stort överskott sommartid. Överskottet av hetvatten under månaderna maj till augusti är:

Maj	Juni	Juli	Augusti
$\approx 7,7 \text{ m}^3/\text{min}$	$\approx 10,1 \text{ m}^3/\text{min}$	$\approx 12,1 \text{ m}^3/\text{min}$	$\approx 11,3 \text{ m}^3/\text{min}$

Tabell 7 - Hetvattenflöde på Våröbruk.⁸³

4.3 Urladdning

Det är viktigt att undersöka hur temperaturen i modulerna påverkas av energiförluster i form av transmission och flödesförluster. Genom att beräkna modulernas temperatur i olika tidssteg och ta hänsyn till ovan nämnda förluster är det möjligt att beräkna urladdningstiden. Tabell 8 redovisar de parametrar som ingår i kommande beräkningar. Beräkningsgången redovisas nedan (och mer precist i bilaga 2).

Förkortn.	Fall 1	Fall 2	Enhet	Förklaring
T_M	-	-	°C	Temperatur i modul (NaAc)
T_{ute}	20	-3,6	°C	Temperatur utanför modul
T_{in}	8	8	°C	Temperatur inkommande vatten in i modul
T_{ut}	-	-	°C	Temperatur utkommande vatten från modul
C_M	15,7	144,0	MJ/K	Värmekapacitet (NaAc)
$C_{p,NA}$	2900	2900	J/kgK	Specifik värmekapacitet NaAc
U	0,2	0,2	W/m ² K	Värmeöverföringskoefficient modul
A_M	15,6	74,7	m ²	Omslutande area modul
$A_{rör}$	5,9	46,0	m ²	Fiktiv omslutande area rör i modul
Q	6,27	37,62	W/K	Borttransporterad energi
h	4,46	2,72	W/m ² K	Värmeöverföringskoefficient rör
t	-	-	s	Tid
m_{NA}	5418	56631	kg	Massa natriumacetat
q	0,0000015	0,000009	m ³ /s	Flöde vatten
C_{p,H_2O}	4180	4180	J/kgK	Specifik värmekapacitet vatten
ρ_{H_2O}	1000	1000	kg/m ³	Densitet vatten
d_{NA}	0,13	0,22	m	Avstånd för värmetransport (Bilaga 2)
λ_{NA}	0,6	0,6	W/mK	Värmeledningsförmåga kristalliserat NaAc

Tabell 8 - Parameterförteckning

Temperaturen i modulen är en funktion av flera variabler och beräknas enligt Lars Jensen, professor på avdelningen installationsteknik LTH, genom följande beräkningssteg:

$$C_{p,NA} * m_{NA} * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - q * C_{p,H_2O} * \rho * (T_{ut} - T_{in}) \quad [\text{ekv. 5}]$$

Temperaturen ut från modulen beräknas enligt:

$$T_{ut} = T_{in} - \left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} - T_M) \leftrightarrow (T_{ut} - T_{in}) = \left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} + T_M) \quad [\text{ekv. 6}]$$

⁸³ Intervju: Gustaf Collin, Södra Cell AB, 101126.

[6] → [5] ger:

$$C_{p,NA} * m_{NA} * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - q * C_{p,H2O} * \rho * \left(\left(1 - e^{-\frac{Ar_{\ddot{o}} * h}{Q}} \right) * (T_{in} + T_M) \right) \quad [\text{ekv. 7}]$$

$$Q = q * \rho * C_{p,H2O} \quad [\text{ekv. 8}]$$

$$C_M = C_{p,NA} * m_{NA} \quad [\text{ekv. 9}]$$

$$h = \frac{d_{NA}}{\lambda_{NA}} \quad [\text{ekv. 10}]$$

$$a = \left(1 - e^{-\frac{Ar_{\ddot{o}} * h}{Q}} \right) \quad [\text{ekv. 11}]$$

Med insatta förenklingar blir ekvation 5:

$$C_M * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - Q * a * (T_{in} + T_M) \leftrightarrow$$

$$\frac{C_M}{U * A_M + Q * a} * \frac{dT_M}{dt} = -T_M + \frac{U * A * T_{ute} + Q * a * T_{in}}{U * A + Q * a}$$

Ytterligare förenklingar:

$$S = \frac{C_M}{U * A_M + Q * a}$$

$$T_{M\infty} = \frac{U * A * T_{ute} + Q * a * T_{in}}{U * A + Q * a}$$

Slutligen:

$$S * \frac{dT_M}{dt} = -T_M + T_{M\infty}$$

Integrering ger sambandet:

$$T_M(t) = e^{-\frac{t}{S}} * T_M(0) + \left(1 - e^{-\frac{t}{S}} \right) * T_{M\infty} \quad [\text{ekv. 12}]$$

För att optimera rördimension och röravstånd måste iterativa beräkningar genomföras. Tappvarmvattenanvändningen är enligt Emrahus 47,5 m³/år vilket ger ett medelflöde på 1,5*10⁻⁶ m³/s.

4.3.1 Fall 1 - Urladdning

Initialtemperaturen i fall 1 är 20 °C. När kristallisationen startar i natriumacetatet stiger temperaturen snabbt mot smälttemperaturen 58 °C. Smältvärmes är 187 J/g vilket räcker till att först höja temperaturen till 58 °C och därefter bibehålla en konstant temperatur ett antal dygn. Beräkningen för hur lång tid temperaturen är konstant följer nedan:

Temperaturhöjning enligt ekvation 1 = $Q/C_p = 187000/2900 = 64,5$ °C

Fiktiv maxtemperatur = $20 + 64,5 = 84,5$ °C, dock max 58 °C

$\Delta T = 84,5 - 58 = 26,5$ °C vilket motsvarar en energimängd på:

$$Q = C_{p,naac} * m_{naac} * \Delta T = 2900 * 5418 * 26,5 = 41637,3 \text{ kJ} = 115,66 \text{ kWh}$$

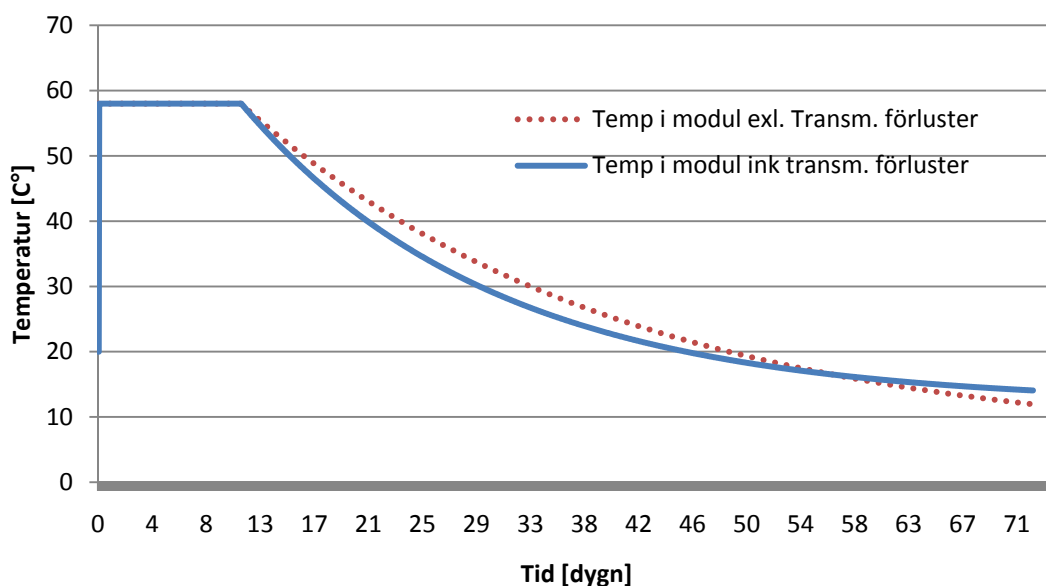
De totala effektförlusterna från modulen är:

$$P = U * A * \Delta T_{modul} + q * \rho * C_p * \Delta T_{flöde} \quad [W] \quad [\text{ekv. 13}]$$

$$P = 0,2 * 15,62 * (58 - 20) + 1,5 * 10^{-6} * 1000 * 4180 * (58 - 8) = 432 \text{ W}$$

$$t = Q/P = 115660/432 = 267 \text{ h} = 11,2 \text{ dygn} \quad [\text{ekv. 14}]$$

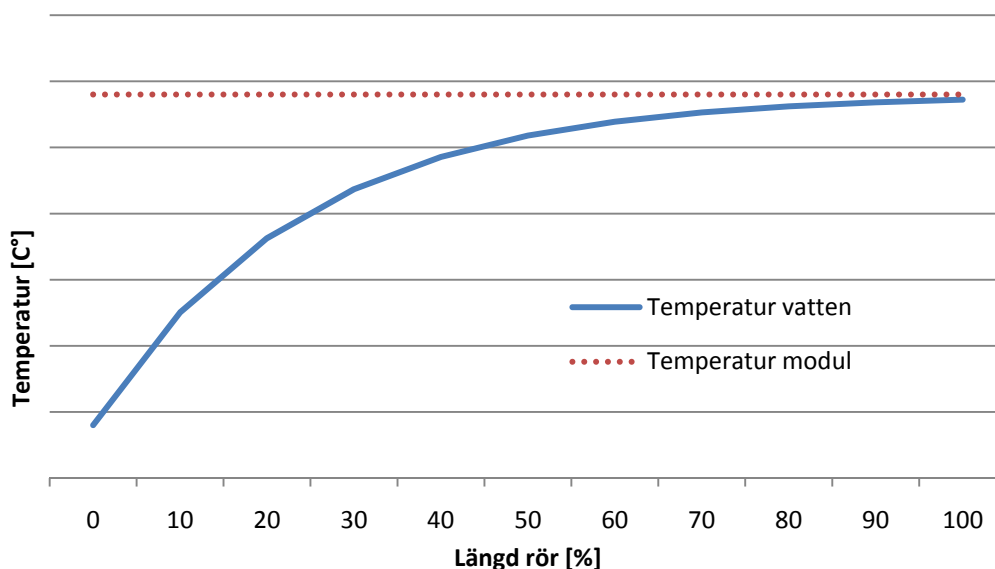
Temperaturen avtar därefter under två månader ner till tappvattnets temperatur. Den temperatur som går åt i uppvärmningsfasen kan i urladdningsfasen återges i form av värme till vattnet. Ekvation 3 styr avsvlningsprocessen och motsvarar den hel-dragna linjen i figur 30. Den streckade linjen visar hur temperaturprofilen ser ut om hänsyn inte tas till transmissionsförluster från modulen till omgivningen.



Figur 30 - Temperaturprofil i modul

Modulen laddades med 287 kWh enligt föregående avsnitt ("Uppladdning"). Med de indata som används i urladdningsberäkningen kommer det ta lite mer än två månader innan energin tar slut i modulen. Efter 70,8 dagar är temperaturen i modulen 14 °C vilket betyder att det fortfarande finns lite energi att hämta ut. Att kurvorna korsar varandra beror på att värmen byter riktningen när temperaturen är under 20 °C.

Figur 31 bygger på många parametrar bland annat den utgående temperaturen som vattnet från modulen har. För att beräkna denna temperatur används ekvation 2. Hur beräkningarna går till beskrivs i bilaga 2. Resultatet från beräkningarna är redovisade i figur 31 där det framgår att temperaturen i det utgående vattnet är lika hög som temperaturen i modulen. I denna beräkning är längden på rørslingan varierad tills den utgående temperaturen är samma som den i modulen. Det vill säga, vattentemperaturen ska vara lika med modultemperaturen när vattnet passerat 100 procent av röret.



Figur 31 - Temperaturprofil vatten

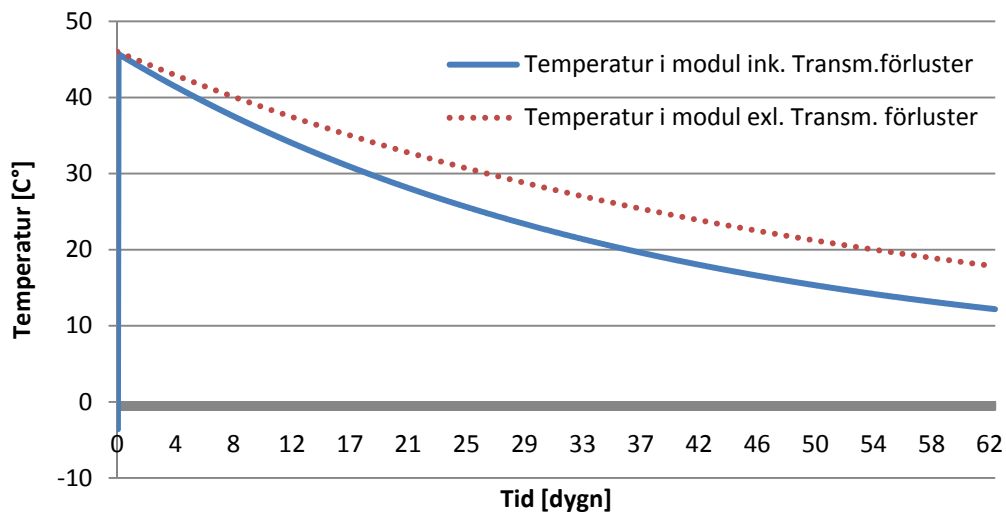
4.3.2 Fall 2 - Urladdning

Initialtemperaturen för fall 2 är -3,6 °C. Det betyder att smältvärmen är 143 J/g. Temperaturen stiger snabbt mot 58 °C vid kristallisationsögonblicket men eftersom smältvärmen inte är tillräckligt hög så avstannar värmeutvecklingen vid 45,7 °C enligt nedanstående beräkningar.

$$\text{Temperaturhöjning} = 143000/2900 = 49,3 \text{ °C}$$

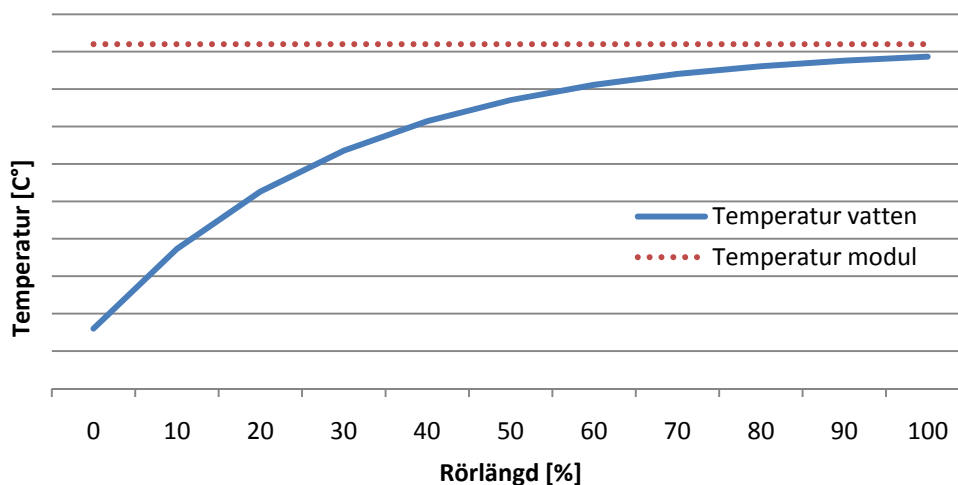
$$\text{Maxtemperaturen} = -3,6 + 49,3 = 45,7 \text{ °C}$$

Därefter styr ekvation 3 temperaturprofilen och avsvalningsprocessen startar direkt. Det framgår i figur 32 att det tar ungefär två månader innan modulen är tömd på energi. Transmissionsförlusterna är i detta fall större än i fall 1 eftersom den omgivande temperaturen är lägre.



Figur 32 - Temperaturprofil i modul

En beräkning av vattnets utgående temperatur redovisades för fall 1 i bilaga 2. Enligt samma princip görs beräkningarna i fall 2. Resultatet är redovisat i figur 33.

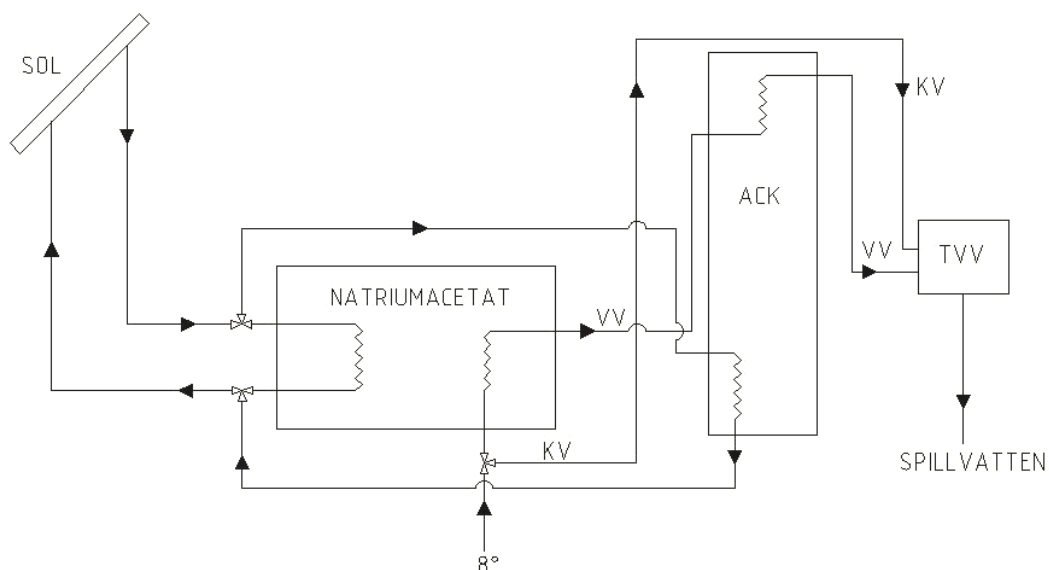


Figur 33 - Temperaturprofil

4.4 Systemutformning

4.4.1 Fall 1- Systemutformning

Kopplingsschemat för det första fallet bygger endast på att värma tappvarmvattnet, till skillnad från de danska forskarna som även kopplar modulen mot värme-systemet.

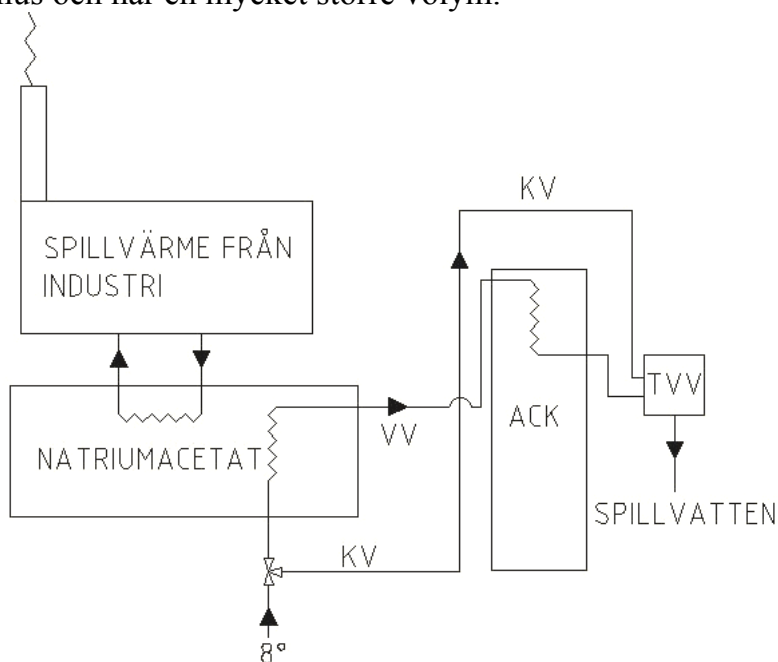


Figur 34 - Systemutformning fall 1

Det inkommande tappvattnet har en temperatur på cirka 8 °C. När modulen används transporteras tappvarmvattnet först genom natriumacetatet och växlar då temperatur till modulens temperatur. Därefter går det vidare till en ackumulatortank där vattnet vid behov eftervärms. När energin i modulen är slut kopplas vattnet direkt till ackumulatortanken och fungerar då som ett vanligt värmesystem.

4.4.2 Fall 2- Systemutformning

Det andra fallet använder industriell spillvärme för att värma lagringsmodulen. Lagringsmodulen måste därefter transporteras till en grupp av värmekonsumenter. Där kopplas modulen in på tappvattenledningen och förvärmer tappvarmvattnet innan det kommer in i huset. Skillnaden mot fall 1 är att denna modul är placerad utomhus och har en mycket större volym.



Figur 35 - Systemutformning fall 2

4.5 Kostnad

En enklare ekonomisk beräkning är gjord och ger en fingervisning om hur mycket dessa system kan kosta. I beräkningarna ingår endast materialkostnad för lagringstank och natriumacetat. Enligt Furbo vid DTU är kostnaden för färdigblandad natriumacetat 3,66 kr/kg (enligt valutakurs 2010-12-13). Priset för lagringstankar är tagna från företaget Borö, som tillverkar lagringstankar.

4.5.1 Fall 1 - Kostnad

	Borö
Tankvolym	5 m ³
Kostnad för tank (kr, exkl moms)	17 500
Rör i tank (15m)	4 700

Tabell 9 - Kostnader för ett hus

Totalkostnaden: $17\,500 + 4\,700 + 5400 \times 3,66 \approx 42\,000$ sek

4.5.2 Fall 2 - Kostnad

En lagringstank på 43,9 m³ (56 631 kg) finns inte hos Borö. Den största de säljer är 20 m³ och prisbilden för den antas kunna multipliceras med två för att uppnå den ungefärliga önskade volymen på 42,5 m³. Spillvärmekostnaden är inte inkluderad i kostnadsberäkningen.

	Borö
Tankvolym (20×2)	40 m ³
Kostnad för tank (kr, exkl moms)	202 990
Rör i tank (Antas 160 m)	47 000

Tabell 10 - Kostnader för spillvärmealternativet

Totalkostnaden: $202\,990 + 4\,7000 + 56\,631 \times 3,66 \approx 457\,300$ sek

5 Diskussion och slutsatser

Utifrån dagens kunskaper kring miljöfrågor är det uppenbart att byggsektorn har en enormt viktig uppgift framför sig. Med tanke på att energianvändningen i bebyggelse står för 40 procent av Sveriges totala energianvändning är det ett av de absolut viktigaste områdena att optimera, inte minst för att nå de högt satta miljömålen i framtiden.

Det blir allt svårare att sänka energianvändningen i de nya energieffektivare byggnaderna, därför bör nya åtgärder beaktas för att ytterligare sänka energianvändningen. Energin till tappvarmvattnet ökar i betydelse när byggnaderna blir mer energisnåla och det är svårt att minska den under vintertid. Det pågår forskning om nya tekniker och en utav de viktigaste uppgifterna är att minska andelen fossila bränslen. Att hitta ett effektivt sätt att säsongslagra värmeenergi skulle vara ett steg i rätt riktning. Sverige har ett tempererat klimat, vilket innebär stora temperaturvariationer över ett år. Det är märkligt att vi inte utnyttjar det på ett bättre sätt genom att säsongslagra såväl värme som kyla. Det finns dock en del intressanta projekt i Sverige som utnyttjar värmemagasin för detta ändamål, till exempel Arlanda flygplats. Arlanda är dock ett projekt som nyttjar mycket stora volymer. Det hade varit positivt med lager i mindre volymer så också enstaka värmekonsumenter kan börja tänka i dessa banor.

En värmekälla som sällan utnyttjas är spillvärme från industrier och även på detta område skulle samhället kunna göra stora miljövinster. Det har visserligen blivit vanligare med värmeåtervinning till den egna verksamheten, men det finns fortfarande mycket att göra med spillvärme som inte utnyttjas på sommaren; här går mycket energi förlorad. Natriumacetat är ett fasändringsmaterial som har en relativt låg smälttemperatur, vilket medför att det finns ett stort utbud av industriella spillvärmeleverantörer. Ett värmelagringsystem med natriumacetat går också tillämpa som ett mobilt system genom att använda containrar som kan transporteras från en plats till en annan. Detta kan vara mycket värdefullt, framförallt på landsbygden och till friliggande byggnader. Att möjliggöra säsongslagring av spillvärme ökar möjligheterna för industrierna att bli mer miljövänliga.

Att lagra värme med natriumacetat är en teknik som skulle kunna fungera för säsongslagring av värme i mindre moduler. Fördelen med tekniken är att vätskan kan förvaras i låg temperatur utan att energi går förlorad, därmed är den inte beroende av stora isolertjocklekar. Tekniken är heller inte beroende av speciella markförhållanden, som till exempel ett groplager. Att lagra värme med natriumacetat är med andra ord en flexibel teknik i jämförelse med andra etablerade värmelagrings-tekniker. Dock är storleken på smältentalpin avgörande, eftersom det styr hur stora volymer som måste lagras och således också kostnaden.

Under experimenten har det framkommit att smältentalpin för natriumacetatet inte går att fastställa till ett konstant värde. Det är därför viktigt att vara medveten om i vilken temperatur som natriumacetatet förvaras i. Smältentalpin för natriumacetatet

har visat sig minska med minskad temperatur, vilket troligen beror på att salt fälls ut i lösningen och därigenom inte bidrar till kristallisationsvärmen.

Två olika fall har studerats i analysavsnittet och det är uppenbart att fall 1, där modulen förvaras inomhus i 20 °C, är mer fördelaktigt än fall 2, där modulen förvaras utomhus i -3,6 °C. Anledningen till detta är att smältentalpin är mycket högre när natriumacetatet förvaras i 20 °C samt att det inte går åt någon energi till att höja temperaturen till 8 °C. Den energin som går att utnyttja i fall 1 är 187 J/g jämfört med 109 J/g i fall 2. Det är således cirka 70 procent effektivare att förvara modulen inomhus. Forskarna i Danmark använder 265 J/g så våra resultat talar för att de använder för höga värden i sina beräkningar.

Det är också av stor betydelse att underkylningen av natriumacetatet är stabil så inte lösningen kristalliserar vid fel tillfälle. Materialkänsligheten har studerats utan att något speciellt material kan anses påverka underkylningen, vilket är positivt. Dock har man vid DTU haft problem med för tidig kristallisation, vilket kan tala för att det är större risk för spontan kristallisation vid storskaliga moduler. Eftersom handvärmare startas genom att små kristaller fastnar i sprickor, är det inte omöjligt att något liknande kan hända med material som omsluter natriumacetat. Det krävs en ”knäckning” i handvärmaren för att kristallerna i metallblecket ska exponeras så att lösningen kristalliserar, vilket hypotetiskt skulle kunna ske i en modul. Spontan kristallisation är alltså ett problem vid värmelagring med natriumacetat, vilket våra experiment inte har kunnat ge någon slutgiltig lösning till. Vi har dock kunnat konstatera att natriumacetatet inte påverkas av de materialkombinationer vi har provat.

Tekniken för värmelagring med natriumacetat kommer förmodligen inte att bli kommersiellt gångbar inom en överskådlig framtid, då den i nuläget är kostsam. Däremot har det på senare år blivit allt vanligare att företag ser miljöfrågor som goodwill och att energibesparingar ger ett ökat värde i byggnaden. På så sätt kan även system som detta komma in på marknaden utan att det från början har de rätta ekonomiska förutsättningarna.

De generella slutsatserna som kan dras utifrån detta arbete är att det finns ett stort behov av att säsongslagra värme såväl storskaligt som i mindre skala. Att lagra värme med natriumacetat möjliggör en förvaring även i mindre skala oberoende av markförhållanden. Dock är det skrymmande, vilket gör systemet kostsamt. Tekniken att utnyttja förskjuten smältentalpi för att säsongslagra värme är intressant. Med fortsatt materialforskning inom IEA (International Energy Agency) kan bättre material utvecklas och utformas till system som går att använda för att minska användningen av fossila bränslen för uppvärmning av byggnader, vilket är en mycket viktig uppgift i framtiden.

Källförteckning

Elektroniska källor

ECES, *Strategy plan*. Tillgänglig: http://www.iea-ec.es.org/files/eces_strategy.pdf (101020).

Energimyndigheten, *Bergvärmepumpar*, Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Tester/Testresultat/Bergvarmepumpar1/?tab=3> (100920).

Energimyndigheten, *Din uppvärmning*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/> (101010).

Energimyndigheten, *Solvärme*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/Solvarme/> (100917).

Energimyndigheten, *Uppvärmning i Sverige 2008*. Tillgänglig: <http://www.energimarknadsinspektionen.se/Bibliotek/Rapporter-2008/Uppvarmning-i-Sverige-2008/> (100920).

IEA, *About the IEA*. Tillgänglig: <http://www.iea.org/about/index.asp> (100906).

Nationalencyklopedin (sökord: akvifär). Tillgänglig: <http://www.ne.se/lang/akvifer> (100920).

Nationalencyklopedin (sökord: exergi). Tillgänglig: http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/energi/omvandling-av-energi?i_h_word=exergi (100916).

Nationalencyklopedin (sökord: sensibel värme). Tillgänglig: <http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/sensibelt-v%C3%A4rme> (100916).

Nationalencyklopedin (sökord: termodynamikens första huvudsats). Tillgänglig: <http://www.ne.se/f%C3%B6rsta-huvudsatsen> (100916).

Nationalencyklopedin (sökord: värmekapacitet). Tillgänglig: <http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/lang/v%C3%A4rmekapacitet> (100916).

Naturvårdsverket, *God bebyggd miljö*. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/sv/Sveriges-miljomal--for-ett-hallbart-samhalle/Miljokvalitetsmal/Bebyggd-miljo/> (101201).

Professor Göran Walls hemsida, *Vad är energi och exergi*. Tillgänglig: <http://exergy.se/goran/swedish/index.html> (100916).

SHC, *Compact Thermal Energy Storage*. Tillgänglig: <http://www.iea-shc.org/task42/index.html> (100906).

SHC, *Task 32 - Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings*. Tillgänglig: <http://www.iea-shc.org/task32/index.html> (100906).

SHC, *Welcome*. Tillgänglig: <http://www.iea-shc.org/index.html> (100906).

Svensk Fjärrvärme, *Fjärrvärme från spillvärme kan värma 200 000 villor*. Tillgänglig: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Asikter/Pressmeddelanden/Pressmeddelande-2010-02-021/> (101101).

Svensk Fjärrvärme, *Tillförd energi*. Tillgänglig: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Statistik--Pris/Fjarrvarme/Energitillforsel/> (100916).

Svensk solenergi, *Informationsbroschyr*. Tillgänglig: www.svensksolenergi.se (100917).

TAC, *Arlanda energi*. Tillgänglig: <http://www.tac.com/se/data/internal/data/08/44/1249887766618/Akvifar.pdf> (100922).

Vener, Carl (1997), *Phase Change Thermal Energy Storage*. Tillgänglig: http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener's_dissertation.htm (101015).

Wall, Maria (2008), *Lågenergihus – en flora av begrepp*. Tillgänglig: http://www.cerbof.se/documents/Info/Lagenergihus_VVSForum_april_08.pdf (110101).

Rapporter

ECES (2001), *Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage. Annex 17*. Tillgänglig: <http://www.fskab.com/annex17/> (101201).

Furbo, Simon, Elsa Andersen & Jørgen M. Schultz (2006), *Advanced storage concepts for solar thermal systems in low energy buildings*, DTU. Tillgänglig: <http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-sr0601.pdf> (101201).

Schultz, Jørgen M., Elsa Andersen & Simon Furbo (2008), *Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, IEA-SHC Task 32*, DTU. Tillgänglig: <http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-sr0801.pdf> (101201).

Svensk fjärrvärme (2006), *Energianvändning och försörjning för byggnader ur ett systemperspektiv – ett samarbete mellan bygg- och energibranschen*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Global/Rapporter_och_Dokument/Ovriga_rapporter/Energieffektivisering/Energieffektiva%20byggnader/Energisamverkan-Effektiv%20energianv%C3%A4ndning%20och%20energif%C3%B6rs%C3%B6rjning.pdf (090516).

Svensk Fjärrvärme (2006), *Förnybar ersättning av olja i spetslastproduktion*, Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/Ovriga-rapporter/Energitillförsel-och-Produktion/ (100922).

Svensk Fjärrvärme (2002), *Industriell spillvärme processer och potentialer 2002*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/Ovriga-rapporter/Energitillförsel-och-produktion/Spillvarme-fran-industrin-till-fjarrvarmenat/Industriell-spillvarme---processer-och-potential-2002/ (100916).

Svensk Fjärrvärme (2009), *Spillvärme från industrier och lokaler*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/FoU-rapporter/Fjarrsyn/Omvarld/200912-Spillvarme-fran-industrier-och-lokaler/ (100922).

Svensk Fjärrvärme (2009), *Transport av industriell överskottsvärme*. Tillgänglig: http://www.svenskfjarrvarme.se/Rapporter--Dokument/Rapporter_och_Dokument/FoU-rapporter/Fjarrsyn/Teknik/ (100922).

Wall, Göran (2009), *Exergetics*, Professor Göran Walls hemsida. Tillgänglig: <http://www.exergy.se/ftp/exergetics.pdf> (100916).

Wang, Weilong (2010), *Mobilized thermal energy storage for heat recovery for distributed heating*, Mälardalens Högskola. Tillgänglig: <http://mdh.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:371257> (110101).

Litteratur

Andrén, Lars (2001), *Solenergi. Praktiska tillämpningar i bebyggelse*, Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Jönsson, Göran (2006), *Fysik i vätskor och gaser*, upplaga 6 (första upplagan 2003), Lund: Teach Support.

Nevander, Lars Erik & Bengt Elmarsson (2006), *Fukthandbok. Praktik och teori*, upplaga 3 (första upplagan 1994), Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Termokemisk energilagring, underlag för BFR:s programplan 1981-1984 (1980), Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm: Byggnadsforskningsrådet.

Wadsö, Lars (2010), *Kompendium i byggmaterialvetenskap*, Lund: KFS AB.

Artiklar

Araki, N. et al. (1995), "Measurements of thermophysical properties of sodium acetate hydrate", *International Journal of Thermophysics*, 16:6.

Castellon, C. et al. (2010), "Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels", *Renewable Energy*, 35:10.

Sandnes, B. (2007), "The physics and the chemistry of the heat pad", *American Journal of Physics*, 76:6.

Sandnes, B. & J. Rekstad (2005), "Supercooling salt hydrates. Stored enthalpy as a function of temperature", *Solar Energy*, 80:5.

Sherburne, Morgan (2010) "The House of the Day After Tomorrow", *Technology Review*, 113:4.

Muntliga källor

Intervju: Chris Bales, Dalarnas universitet, 100913

Intervju: Elisabeth Kjellsson, Lunds tekniska högskola, 101220.

Intervju: Gustaf Collin, Södra Cell AB, 101126.

Intervju: Nils Julin, Climator AB, 101018.

Intervju: Simon Furbo, Danmarks tekniska universitet, 101111.

Intervju: Simon Furbo, Danmarks tekniska universitet, 100903.

Bilaga 1 - Experiment smältentalpi

Nedan redogörs de experiment som tidigare sammanfattades under rubrik 3.2. Här redovisas också antalet prover som gjordes och vilka vikter lösningen hade i varje ampull. Anledningen till att det är olika antal prov beror på att vissa försök inte fungerade eller att resultaten bedömdes som orimliga.

Mätning 1

Temperaturen var 5 °C i kalorimetern. Blandning med 55 –vikt% natriumacetat och 45 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5
Vikt [g]	0,90	1,06	1,04	1,02	0,96
Smältentalpi [J/g]	162,16	160,43	162,15	156,89	158,09

Medelvärde: 160 J/g.

Mätning 2

Temperaturen var 20 °C i kalorimetern. Blandningen 55 –vikt% natriumacetat och 45 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5	6	7
Vikt [g]	0,82	0,96	0,77	0,81	0,84	0,80	0,96
Smältentalpi[J/g]	183,61	182,97	183,44	181,10	180,41	176,35	180,68

Medelvärde: 181 J/g.

Mätning 3

Temperaturen var 20 °C i kalorimetern. Blandning med 58 –vikt% natriumacetat och 42 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3
Vikt [g]	0,713	0,787	0,869
Smältentalpi [J/g]	176,063	191,681	192,798

Medelvärde: 187 J/g.

Mätning 4

Temperaturen var 40 °C i kalorimetern. Blandningen 58 –vikt% natriumacetat och 42 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5
Vikt [g]	0,524	0,516	0,818	0,577	0,702
Smältentalpi [J/g]	214,503	209,564	209,766	210,161	200,963

Medelvärde: 209 J/g.

Mätning 5

Temperaturen var 50 °C i kalorimetern. Blandning med 58 –vikt% natriumacetat och 42 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5	6	7
Vikt [g]	0,986	1,269	1,019	1,152	1,177	1,037	1,243
Smältentalpi[J/g]	235,17	233,09	233,43	232,96	228,09	231,46	233,40

Medelvärde: 233 J/g.

Mätning 6

Temperaturen var 50 °C i kalorimetern. Blandning med 55 –vikt% natriumacetat och 45 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5	6	7
Vikt [g]	0,732	0,722	0,745	0,841	0,700	0,863	0,938
Smältentalpi[J/g]	179,567	182,321	181,272	179,784	181,2036	181,422	178,42

Medelvärde: 181 J/g.

Mätning 7

Temperaturen var 20 °C i kalorimetern. Blandning med 45 –vikt% natriumacetat och 55 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5	6	7	8
Vikt [g]	0,523	0,551	0,499	0,672	0,505	0,507	0,626	0,545
Smältentalpi[J/g]	96,00	94,72	88,08	88,78	96,00	92,94	83,73	91,03

Medelvärde: 91,41 J/g.

Mätning 8

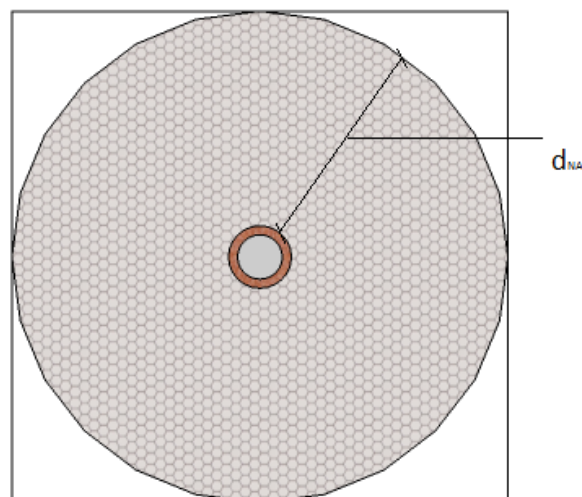
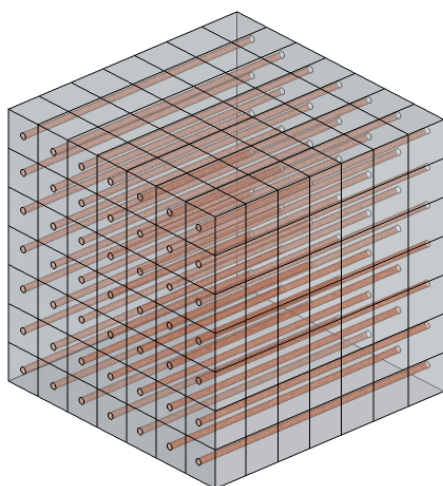
Temperaturen var 40 °C i kalorimetern. Blandning med 45 –vikt% natriumacetat och 55 –vikt% vatten.

Provnr	1	2	3	4	5	6	7
Vikt [g]	0,476	0,500	0,510	0,440	0,460	0,460	0,590
Smältentalpi[J/g]	63,90	63,04	61,07	63,49	63,20	58,75	63,47

Medelvärdet: 62,47 J/g.

Bilaga 2 - Beräkning av urladdning

För att bilda sig en uppfattning om värmeledningsförmågan beaktas den verkliga modulen som flera mindre kuber. Beräkningsgången redovisas nedan, figurerna är från fall 1.



Förkortn.	Fall 1	Fall 2	Enhet	Förklaring
T_M	-	-	°C	Temperatur i modul (NaAc)
T_{ute}	20	-3,6	°C	Temperatur utanför modul
T_{in}	8	8	°C	Temperatur inkommande vatten in i modul
T_{ut}	-	-	°C	Temperatur utkommande vatten från modul
C_M	15,7	144,0	MJ/K	Värmekapacitet (NaAc)
$C_{p,NA}$	2900	2900	J/kgK	Specifik värmekapacitet NaAc
U	0,2	0,2	W/m ² K	Värmeöverföringskoefficient modul
A_M	15,6	74,7	m ²	Omslutande area modul
$A_{rör}$	5,9	46,0	m ²	Fiktiv omslutande area rör i modul
Q	6,27	37,62	W/K	Borttransporterad energi
h	4,46	2,72	W/ m ² K	Värmeöverföringskoefficient rör
t	-	-	s	Tid
m_{NA}	5418	56631	kg	Massa natriumacetat
q	0,0000015	0,000009	m ³ /s	Flöde vatten
$C_{p,H2O}$	4180	4180	J/kgK	Specifik värmekapacitet vatten
ρ_{H2O}	1000	1000	Kg/m ³	Densitet vatten
d_{NA}	0,13	0,22	m	Avstånd för värmetransport (Bilaga 2)
λ_{NA}	0,6	0,6	W/mK	Värmeledningsförmåga kristalliserat NaAc

Temperaturen i natriumacetatet beräknas enligt följande differentialekvation:

$$C_{p,NA} * m_{NA} * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - q * C_{p,H2O} * \rho * (T_{ut} - T_{in}) \quad [\text{ekv. 5}]$$

Ekvation 5 är ett uttryck för hur energinnehållet i modulen förändras vid transmissionsförluster och flödesförluster .

Temperaturen ut från modulen beräknas enligt:

$$T_{ut} = T_{in} - \left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} - T_M) \quad [\text{ekv 6}]$$

Genom att införa en normerad längd, x där x = 0 vid inloppet av röret och x= 1 vid utloppet på röret kan man genom iterativa beräkningar beräkna vilken längd rör som behövs i modulen. Den optimala profilen är att temperaturen i röret har nästan samma temperatur som modulen när vattnet passerat 100 procent av rörsträckan.

$$T_{ut} = T_{in} - \left(1 - e^{-\frac{x * A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} - T_M) \quad [3]$$

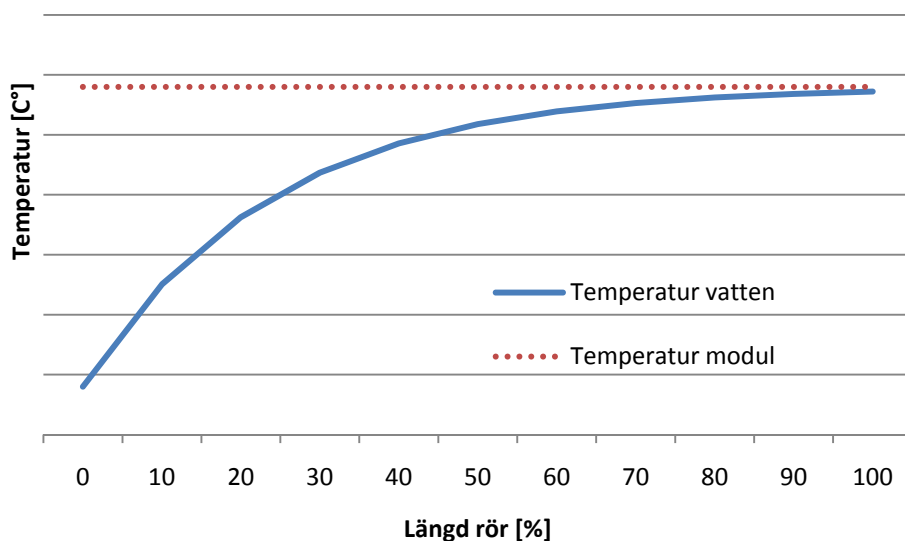
Värmeöverföringen är avgränsad till att endast påverkas av kristalliserad natriumacetat då ytövergångsmotstånden och materialvärmemotståndet är litet i förhållande till kristalliserat natriumacetat trihydrat. Tjockleken på det kristalliserade natriumacetat trihydratet är beroende av hur stor den ”lilla” kuben är. Antaget värde är att kubens sida är 0,5 m (dvs cc-avståndet mellan rören är 0,5 m). Den längsta sträckan som värmen ska transporteras är således 0,25 m och den kortaste sträckan är 0 m ett medelavstånd är således 0,125 m och är benämnt d_{NA} .

$$h = \frac{d_{NA}}{\lambda_{NA}} \quad [\text{ekv. 10}]$$

$$h = \frac{0,125}{0,6} = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$A_{rör}$ är den fiktiva omslutande rörarean vid medelavståndet 0,125 m och är

$$A_{rör} = d_{NA} * 2 * \pi * L_{rör} = 0,125 * 2 * \pi * x * L_{rör}$$



Denna profil är beroende av flera parametrar enligt ekvation 3. Alla parametrar utan $L_{rör}$ är konstant, så iterativa beräkningar görs tills profilen ovan ges. $L_{rör}$ för denna profil är 6,5 m.

Nu är längden på röret bestämt, nu återstår att se hur lång tid det tar att ladda ur modulen. Differentialekvation [5] används nu för första gången:

$$C_{p,NA} * m_{NA} * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - q * C_{p,H2O} * \rho * (T_{ut} - T_{in}) \quad [\text{ekv. 5}]$$

Urladdnings ekvationen ovan är beroende av vilken temperatur som natriumacetat trihydratet har i modulen. Denna förändras över tiden, så det är nödvändigt att integrera över tiden för att få förloppet.

Ekvationen 6 ger utloppstemperaturen:

$$T_{ut} = T_{in} - \left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} - T_M) \quad [\text{ekv. 6}]$$

[6] → [5] ger:

$$C_{p,NA} * m_{NA} * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - q * C_{p,H2O} * \rho * \left(\left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} + T_M)\right) \quad [\text{ekv. 7}]$$

Då flera parametrar i ekvationen är konstant kan vissa förenklingar göras.

$$C_{p,NA} * m_{NA} * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - q * C_{p,H2O} * \rho * \left(\left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) * (T_{in} + T_M)\right) \quad [\text{ekv. 8}]$$

$$Q = q * \rho * C_{p,H2O}$$

$$C_M = C_{p,NA} * m_{NA} \quad [\text{ekv. 9}]$$

$$h = \frac{d_{NA}}{\lambda_{NA}} \quad [\text{ekv. 10}]$$

$$a = \left(1 - e^{-\frac{A_{rör} * h}{Q}}\right) \quad [\text{ekv. 11}]$$

Med insatta förkortningar blir ekvation 1:

$$C_M * \frac{dT_M}{dt} = -U * A_M * (T_M - T_{ute}) - Q * a * (T_{in} + T_M) \leftrightarrow$$

$$\frac{C_M}{U * A_M + Q * a} * \frac{dT_M}{dt} = -T_M + \frac{U * A * T_{ute} + Q * a * T_{in}}{U * A + Q * a}$$

Ytterligare förenklingar:

$$S = \frac{C_M}{U * A_M + Q * a}$$

$$T_{M\infty} = \frac{U * A * T_{ute} + Q * a * T_{in}}{U * A + Q * a}$$

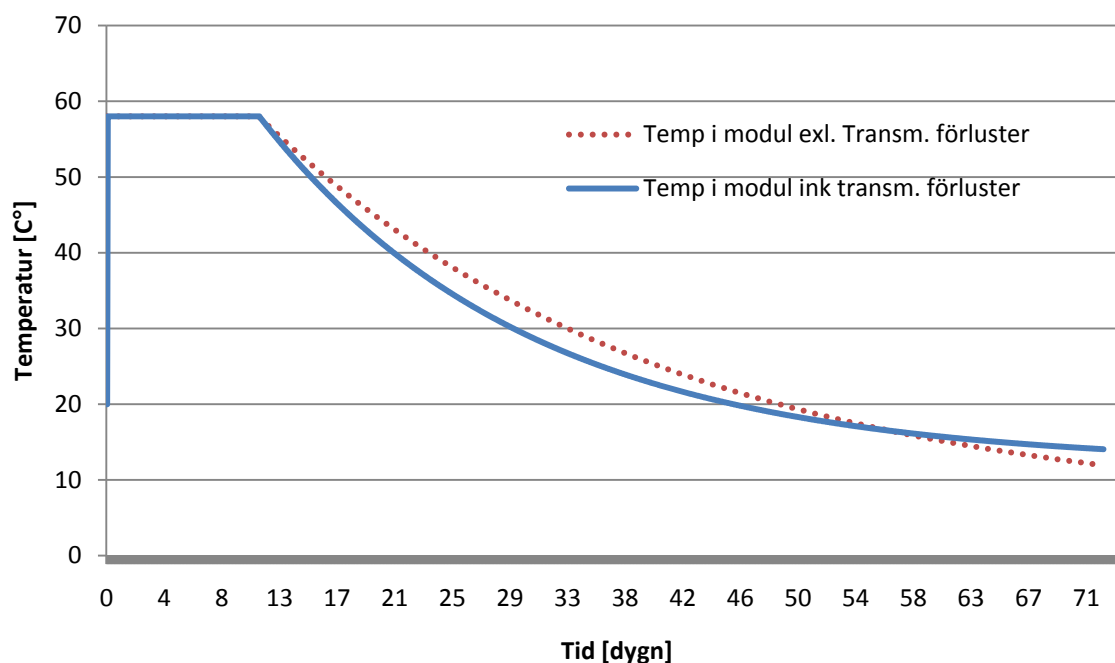
Efter förenklingar blir ekvation 1:

$$S * \frac{dT_M}{dt} = -T_M + T_{M\infty}$$

Integrering ger sambandet:

$$T_M(t) = e^{-\frac{t}{S}} * T_M(0) + \left(1 - e^{-\frac{t}{S}}\right) * T_{M\infty} \quad [\text{ekv. 12}]$$

Ekvation 12 är en funktion som ger temperaturen i boxen efter en viss tid. För att få en uppfattning av temperaturprofilen vid tidssteg om 1 timme görs iterativa beräkningar. Den första beräkningen har temperaturen $T_0 = 58^\circ$ och den nya temperaturen blir efter en timme $57,85^\circ$. Denna sätts nu som T_0 och motsvarande beräkning görs igen. Detta resulterar i avsvalningsdelen i figuren nedan.



Den streckade kurvan är beräknad på samma sätt men utan några transmissionsförluster. När temperaturen i modulen är nere på tappvarmvattnets temperatur är modulen tömd på energi. Detta sker efter ungefär två månader.