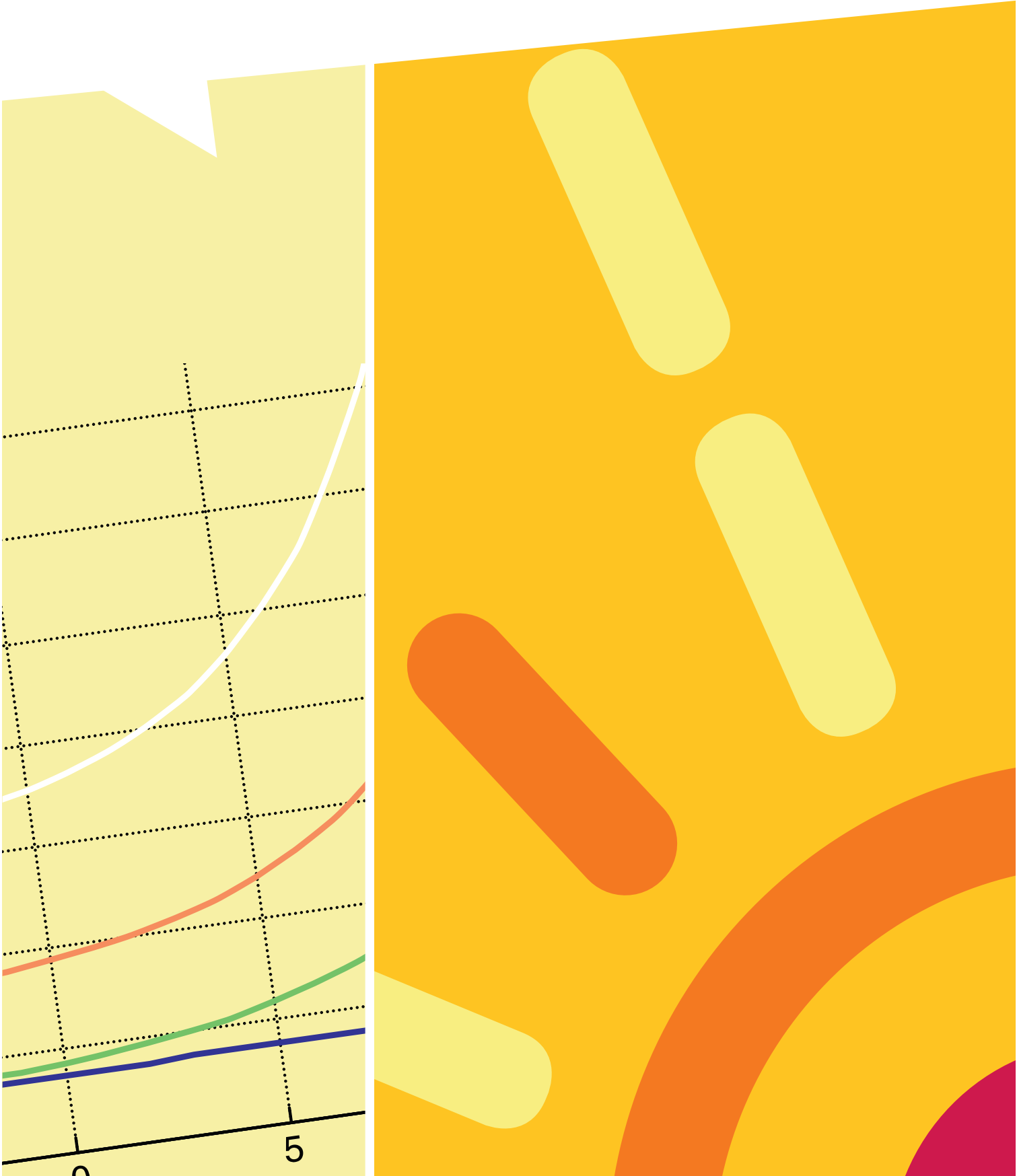


VÄRMETRANSPORT MED FASOMVANDLING



RAPPORT 2011:4



VÄRMETRANSPORT MED FASOMVANDLING

FREDRIK SETTERWALL VIKTORIA MARTIN OLA KLEVARD
WEILONG WANG JINJUE YAN

FÖRORD

Detta arbete har startats och drivits av en eldsjäl, Fredrik Setterwall. Med all sin erfarenhet och entusiasm för teknikens möjligheter myntade han begreppet ”värme på väg” och dammade därmed av det urgamla konceptet att transportera termisk energi i fasändringsmaterial. Detta har ju gjorts med stor framgång och god ekonomi tidigare när man handlade med is.

Rapporten summerar resultaten från den första etappen av Fjärrsynprojektet Värmetransport med fasomvandling och ingår i forskningsprogrammet Fjärrsyn som finansieras av Svensk Fjärrvärme och Energimyndigheten. Fjärrsyn ska stärka konkurrenskraften för fjärrvärme och fjärrkyla genom ökad kunskap om fjärrvärmens roll i klimatarbetet och för det hållbara samhället till exempel genom att bana väg för affärs-mässiga lösningar och framtidens teknik.

Eva-Katrin Lindman
Ordförande i Svensk Fjärrvärmes teknikråd

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Fjärrsyns styrelse eller Svensk Fjärrvärme har tagit ställning till innehållet.

SAMMANFATTNING

Transport av värme med lastbil, tåg eller båt - ”värme på väg” - är ett lovande komplement till dagens rörbundna fjärrvärmesystem. För konceptet krävs det att värme lagras i ett material med hög s.k. energidensitet, dvs i ett material som kan lagra in mycket värme per vikts- och volymsenhet. Ett exempel på sådant värmebärande materialet är fasändringsmaterial eller PCM (eng. Phase Change Materials). Med PCM kan mycket värme omsättas, ca 70 kWh/ton material, vid konstant temperatur i samband med att materialet (t ex ett salt) smälter/stelnar. Denna rapport presenterar resultaten från en studie rörande potential, teknik och material för ”värme på väg”. Studien har haft som övergripande syfte att ge underlag för ett framtida pilotprojekt med energibolag, universitet och gärna en teknikleverantör i samarbete. Dels har två utformningar av PCM-teknik för transport via lastbil jämförts, och dels har nya PCM-material karakteriserats med avseende på smältpunkt, energilagringsskapacitet och underkylning.

En potential för ”värme på väg” i Svenska fjärrvärmesystem har analyserats och med givna förutsättningar visar resultaten att ca 11 TWh av den värme som per år produceras i tätorter med hetvattenpanna (olika bränslen) skulle kunna ersättas av värmetransport från centrala kraftvärmeverk. Detta skulle då ge ett teoretiskt underlag på ca 7 TWh/år ökad elproduktion i kraftvärme. Vid en jämförelse med rörbunden värme visar en fördjupad studie att värmetransport med PCM-teknik är lönsam upp till ett värmebehov på t ex 35 GWh/år då transportavståndet är 15 km och kostnad för rörläggning är 3000 kr/m.

En kritisk punkt för att ”värme-på-väg” ska kunna ersätta rördistribuerad värme är att tillgängligheten på tekniken måste vara jämförbar, dvs i det närmaste 24 timmar om dygnet, 365 dagar om året. Ett alternativ är att PCM-moduler enbart levererar värme till orter som redan har ett eget värmeverk under tider då PCM-värmen är billigare än ortens egen produktion, t ex om PCM-värmen kommer från industriell spillvärme och det lokala värmeverket eldas med olja. Potentialen blir mindre än de 11 TWh indikerade ovan, men det ställer mindre krav på PCM-systemets tillgänglighet.

Eritrytol har utvärderats som ett nytt tänkbart PCM för värmetransport i fjärrenergisystem. Dels har det en bra smältpunkt runt 120 °C som kommer att minska behovet av tillsatseldning vid urladdningsplatsen, och dels har materialet en mycket hög energidensitet. Inledande försök visar dock på en tänkbar underkylningsproblematik (materialet måste kylas väsentligen under 120 °C för att börja kristallisera så att värmen erhålls vid urladdning). Denna problematik kan kringgås med den ”dynamiska” lagringsteknik som testats i detta projekt eftersom den på ett naturligt sätt eliminerar underkylningen.

I projektet har två tekniker för lagring utvärderats:

1. statisk lagring där en värmeväxlare nedsänks i PCM-et vilket leder till höga lagringstätheter, enkelt urladdnings-/laddningsförlopp, men risk för låga effekter per volymsenhet.
2. dynamisk lagring som har potential till höga effekter, men potentiellt lägre lagringsskapaciteter pga den värmebärare (olja) som finns i lagringstanken tillsammans med PCM-et och därmed upptar en stor del av volymen i lagret. Dessutom kan styr-och-regler komma att vara mer komplext för denna teknik jämfört med den statiska.

Den sammantagna bedömningen av de tester som utförts här är att respektive teknik har sina för- och nackdelar enligt ovan, och att en utvärdering i pilotskala av båda två vore av stort värde för att bygga erfarenheter och utvärdera styr-och-reglerstrategier.

SUMMARY

LATENT HEAT TRANSPORTATION

Transport of heat by lorry, train or ship, “heat on wheels”, is a promising supplement to the currently used systems of piped heat in district heating. The concept requires that heat be stored in a material with a high energy density, which can store a large quantity of heat per unit of weight and volume. Examples of such materials are “phase change materials” or PCMs. Turnover of heat in PCMs can be considerable, approximately 70 kWh/tonne at constant temperature, during the process of the material (which may be, for example, a salt) melting and solidifying. This report presents results from a study into the potential, technology and materials required for “heat on wheels”. The overall aim of the study has been to provide background material for future pilot projects to be carried out by energy companies, universities and, preferably, technology suppliers in collaboration. Two alternatives for the use of PCMs in lorry transport have been compared, and new PCMs have been characterised with respect to melting point, energy storage capacity and undercooling.

The potential for “heat on wheels” in Swedish district heating systems has been analysed given certain preconditions. The results show it would be possible to replace approximately 11 TWh of the heat that is produced annually in urban areas from hot-water boilers (using various fuels) by heat transport from central CHP (combined heat and power) plants. This would give a theoretical basis of approximately 7 TWh/year in increased electricity production in CHPs. A study in greater depth that compared this with distributed heat in pipelines has shown that heat transport using PCM technology is profitable up to a heat requirement of, for example, 35 GWh/year, given a transport distance of 15 km and a cost of laying pipes of SEK 3,000 per metre.

One critical requirement if “heat on wheels” is to replace conventional heat distribution is that the availabilities of the technologies must be comparable, which essentially means 24 hours a day, 365 days a year. An alternative would be that PCM modules supply heat only to locations that already have a CHP plant in periods during which the PCM heat is cheaper than the on-site production. Such may occur, for example, if the PCM heat arises as industrial waste heat, and the local CHP plant is fuelled by oil. The potential will be lower than the 11 TWh mentioned above, but the demands on the availability of the PCM system will be lower.

Erythritol has been evaluated as a possible new PCM to be used for heat transport in district heating systems. Not only does it have a suitable melting point of around 120 °C, which will reduce the requirement for supplementary heating at the discharge site, but it also has a very high energy density. Initial experiments have shown, however, that there may arise a problem with undercooling (by which it is necessary to cool the material considerably below 120 °C in order to initiate crystallisation and the delivery of heat during discharge). This problem can be avoided using the “dynamic” storage technology that has been tested in this project, since it eliminates the undercooling effect in a natural manner.

The project has evaluated two technologies for energy storage:

1. Static storage, in which a heat exchanger is immersed in the PCM, leading to high storage density and simple charging/discharging procedures, while introducing the risk of obtaining lower powers per unit volume.
2. Dynamic storage, which has the potential for achieving high power, while having a lower storage capacity due to the presence of a heat carrier (oil) in the storage tank

together with the PCM, thus occupying a large fraction of the storage space available. Further, the control and regulation procedures required for dynamic technology may be more complex than those required by static storage.

The overall assessment drawn from the tests that have been carried out is that both technologies have advantages and disadvantages, as described above. An evaluation of both at pilot-plant scale would be extremely valuable in gaining experience and evaluating control and regulation strategies.

INNEHÅLL

Förord	4
Sammanfattning	5
Summary	6
1. Inledning	9
1.1 Projekt mål	9
1.2 Tillvägagångssätt	9
2. Polyalkoholer som fasändringsmaterial	11
2.1 Under kylning	11
2.2 Styrning av smältpunkt	13
3. Olika lagringstekniker för värmetransport	15
3.1 Utvärdering av dynamiskt lager	15
3.2 Utvärdering av statiskt lager	17
4. Teknisk och ekonomisk potential för värmetransport med lastbil, tåg eller båt.	18
4.1 Jämförelse mellan värmetransport i rör och med lastbil	19
4.2 Jämförelse mellan pelletseldning och transport med lastbil	20
5. Slutkommentarer	22
6. Beteckningslista	24
Referenser	25

1. INLEDNING

Transport av termisk energi med lastbil, tåg eller båt har nyligen undersökts av Ecostorage i samarbete med KTH och Mälardalens Högskola i ett av Fjärrsyn finansierat projekt [1]. För konceptet värmetransport förutsätts en hög s.k. energidensitet på det värmebärande materialet varför fasändringsmaterial (PCM – Phase Change Materials) valdes. PCM är t ex saltblandningar eller organiska föreningar som smälter/stelnar vid en för ändamålet lämplig temperatur. I själva fasändringen kan mycket värme omsättas, ca 70 kWh/ton material [1]. Projektet kom fram till att ekonomisk lönsamhet kunde finnas under förutsättning av ett transportavstånd som tur och retur inte överstiger 80 km. Vidare är kravet att kostnaden för produktion av den transporterade värmen inte överstiger 150 SEK/MWh. Rapporten visar också på behovet av vidare utvecklingsarbete beträffande material och teknik. Föreliggande rapport behandlar just ”material och teknik” för värmetransport. För en mer detaljerad beskrivning av konceptet hänvisas till det tidigare redovisade projektet [1].

1.1 Projekt mål

- visa på potentialen för icke rörbunden transport av värme
- jämförelse mellan rörbunden transport och lastbilstransport av värme med avseende på transportavstånd och värmebehov hos mottagaren
- ge enkla samband för att beräkna lönsamhet för lastbilstransport av värme
- föreslå fasändringsmaterial (PCM) med för transport av värme lämpliga egenskaper såsom
 - o smältpunkt
 - o energilagringsskapacitet
- undersöka underkylningen hos dessa material samt föreslå åtgärder för att bemästra underkylningen
- utvärdera och jämföra de två tekniker som kan komma ifråga för värmetransport med lastbil.

1.2 Tillvägagångssätt

Några tänkbara PCM lämpliga för värmetransport i fjärrvärmeställningar har studerats här map: 1) värmekapacitet (vid smältning/frysning men även ren uppvärmning/kylning) och 2) underkylning (dvs att kristallisation ej sker vid materialets fryspunkt utan långt under). Dessa PCM har varit av typen polyalkoholer. Egenskaperna av olika blandningar har undersökts experimentellt med en förenklad s.k. T-history-metod [2] som innebär att under väldefinierade förhållande jämföra värmeupptag hos ett prov av PCM med värmeupptaget hos ett referensmaterial (i allmänhet vatten, men vid temperaturer över 100 oC en olja).

Vidare har två typer av tekniker för lagring av värme i PCM utvärderats:

- 1.dynamisk värmetransport, innebärande att värmetransporten sker mellan en i PCM dispergerad olja och PCM
- 2.statisk värmetransport innebärande att värmetransporten sker genom en i PCM nedsänkt värmeväxlare

Den första tekniken utvärderas i en experimentanläggning vid Mälardalens Högskola i Västerås. I denna anläggning har visuella observationer gjorts avseende hur stor en eventuell bäddexpansion är vid urladdning av lagret. Farhågor, baserade på tidigare experiment, är att oljan innesluts i det stelnde PCM och därför kommer att ta upp stor plats och därmed minska lagringskapaciteten.

Den andra tekniken har utvärderats hos Ecostorage i Sollentuna, se figur 1. Effekten (W) genom testanordningen mäts genom att in- och utgående temperaturer jämte flödet registreras. I denna anläggning studerades även hur värmeöverföringen kunde förbättras genom inblandning av grafitpartiklar i PCM där grafit har hög konduktivitet varför sådan inblandning kan resultera i såväl hög energitäthet (kWh/m³) som effektkapacitet (kW/m³ lager).



Figur 1 Experimentell testanläggning – Ecostorage, Sollentuna

Slutligen har teoretiska beräkningar av potential och lönsamhet genomförts. Beräkningarna baseras på uppgifter i litteratur och på internet beträffande basdata om behov av värme i olika samhällstyper. De ekonomiska kalkylerna baseras dels på litteraturdata, dels på inhämtade uppgifter från olika fjärrvärmelieferantörer.

2. POLYALKOHOLER SOM FASÄNDRINGSMATERIAL

Polyalkoholer, $R-(H-C-OH)_{n+1}-H$, kan användas som fasändringsmaterial. Speciellt har sockeralkoholer, $H-(H-C-OH)_{n+1}-H$, och då framför allt erytritol ($n=3$) studerats [3]. För att undersöka om dessa material kan användas för värmetransport har här undersökts hur stor underkylningen är och hur man ska kunna bemästra den. Underkylning kan förenklat beskrivas som skillnaden i temperatur mellan smältning och stelning av ett material. Teoretiskt borde ”frysunkten”, dvs temperaturen för stelning, vara densamma som för smältning. Det är dock vanligt att material underkyls och inte stelnar förrän temperaturen är långt under smältpunkten. För konceptet ”värmetransport” är det framförallt viktigt att veta hur stor underkylningen är så att en värmebärare som ska ladda ur värme ur lagret, vilket görs när PCM stelnar, har tillräckligt låg temperatur. Idealt bör inte underkylningen vara för stor då processen blir svårkontrollerad om så är fallet.

Vidare har här undersökts om man genom att blanda olika ämnen, främst sockeralkoholer, kan reglera smältpunkten på materialet. Materialets värmekonduktivitet, som är av betydelse för att uppnå hög effekt, har korrigerats genom inblandning av olika ämnen, främst grafit.

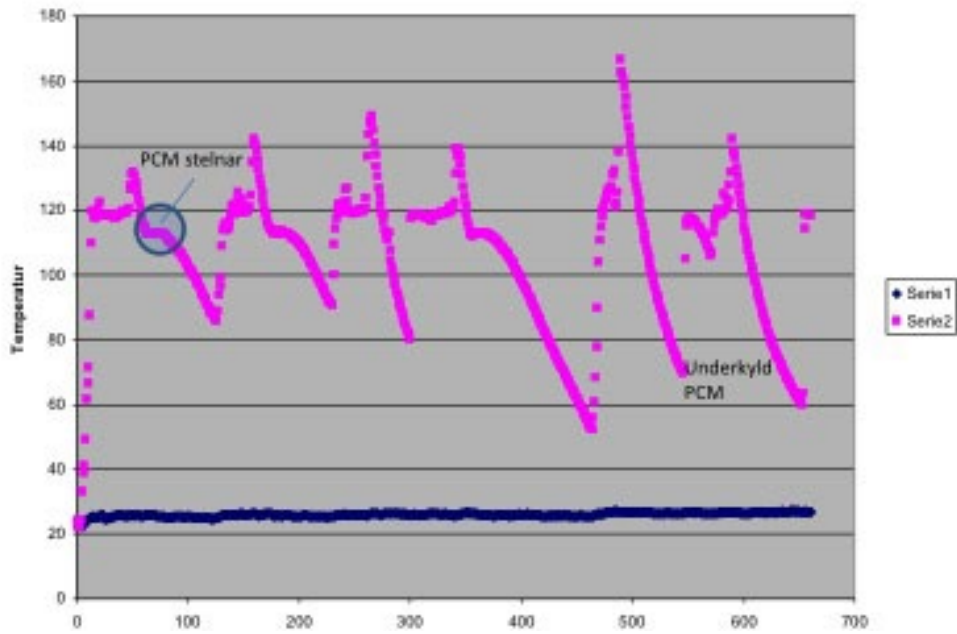
2.1 Underkylning

Två olika studier av underkylning av erytritol har utförts. Den första studien visar att underkylning av erytritol normalt uppgår till ett tiotal grader men att om materialet upphettats till höga temperaturer (> 143 °C) blir underkylningen betydande. Den andra undersökningen visar att efter ett antal cykler – uppvärmning till smältning (upp till 135 °C) följt av nedkylning till frysning -- ökar underkylningen markant.

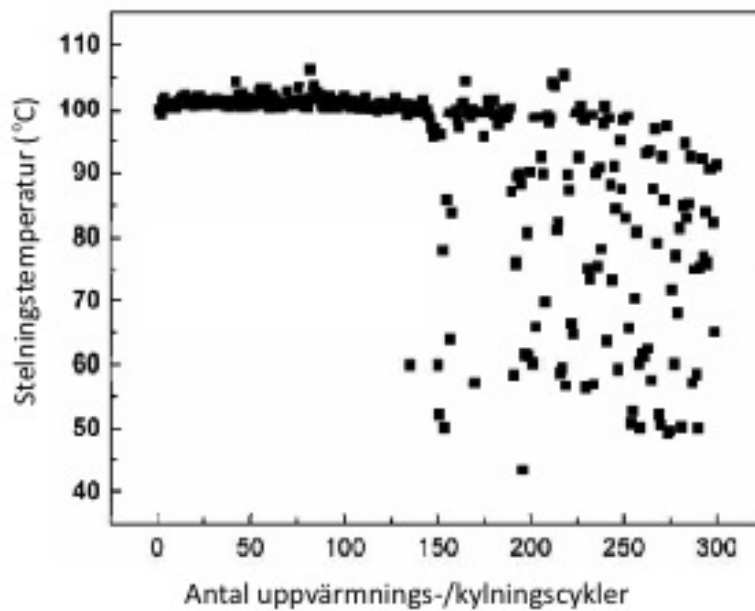
Figur 2 visar hur materialet först värms (rosa kurva – den blå kurvan är en referenspunkt för temperaturmätning) och sedan kyls. I den första cykeln i diagrammet värms materialet till ca 130 grader och kyls därefter – materialet stelnar här vid ca 110 °C i stället för det ”ideala” 120 °C. Denna stelning syns genom den ”plata” som erhålls i temperaturkurvan under själva infrysningen. I nästa uppvärmning värms materialet till strax över 140 °C och stelnar återigen vid 110 °C då det kyls. Längre fram i cyklerna, där uppvärmning sker till över 140 °C visar figuren att ingen stelning alls har erhållits ens vid 70 °C, dvs materialet är kraftigt underkylt.

Figur 3 visar en utförlig cyklisk utvärdering av erytritol som PCM utförd av Mälardalens högskola inom ramen för projektet. Figuren visar hur temperaturen för stelning till att börja med är relativt konstant runt 100 °C men sedan efter några hundra cykler blir underkylning alltmer påtaglig.

Båda studierna visar dock att genom omröring kan underkylningen återställas till det värde som uppmätts vid ideala förhållanden. Detta betyder att någon form av mekanisk igångsättning av kristallisationen är en möjlig väg att hantera problematiken, något som bör utvecklas framöver.



Figur 2 Utvärdering av erytritol som PCM – underkylning av materialet som funktion av uppvärmningstemperatur.

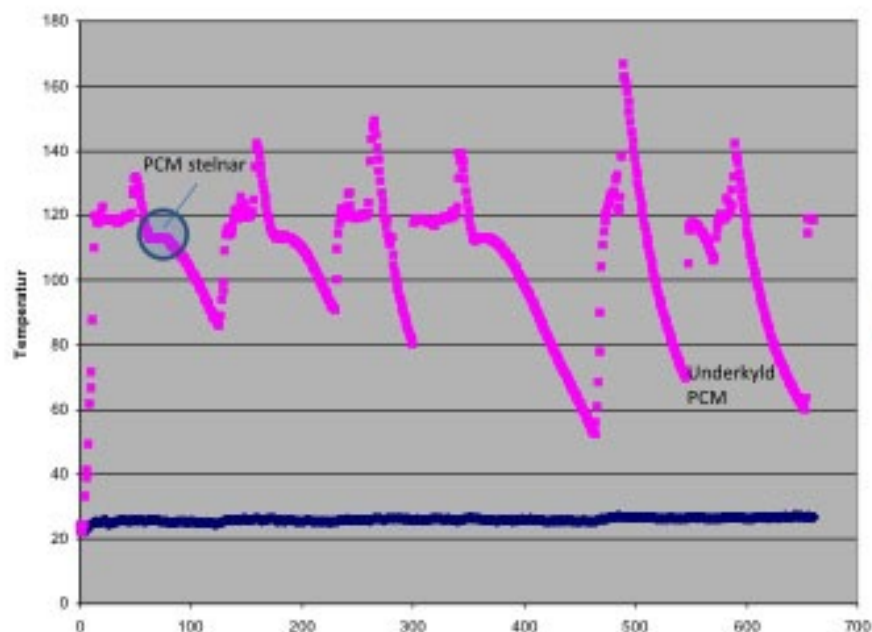


Figur 3 Cyklisk utvärdering av erytritol som PCM – underkylning av materialet som funktion av antal cykler.

2.2 Styrning av smältpunkt

Erytritol smälter vid 120 °C vilket kan vara för högt för många tillämpningar, särskilt i fjärrvärmesystem. Dock har materialet som tidigare nämnts ett attraktivt s.k. smältvärme som är högt (89 kWh/ton). För att få ner smältpunkten har erytritol blandats med polyalkoholer som TMP (trimetylolpropan) och TME (trimetyloletan). På detta sätt har tidigare studier visat att smältpunkten kan sänkas ner till 80 °C från erytritols egen smältpunkt, 120 °C [4].

Undersökningar som vi har utfört på PCM 80, (Blandning av erytritol, TME och TMP) visar dock att detta material inte smälter i vedertagen mening. I stället bildas en lösning av de olika polyalkoholerna i varandra. Lösligheten av de olika alkoholerna varierar med temperaturen. När temperaturen sjunkit så att löslighetsgränsen uppnåtts faller materialet ut och värme frigörs. Utfällningen fortsätter dock med sjunkande temperatur. I fallet PCM 80 kan man se att kraftig värmeutveckling sker också vid drygt 50 °C och ca 35 °C – här visas detta i figur 4.

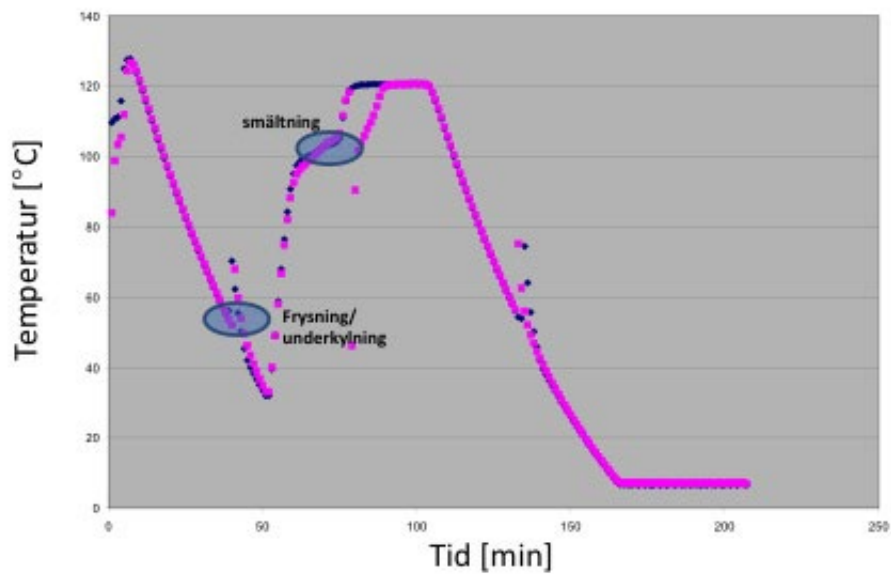


Figur 4 Justering av fasändringstemperatur – Erytritol blandat med TMP.

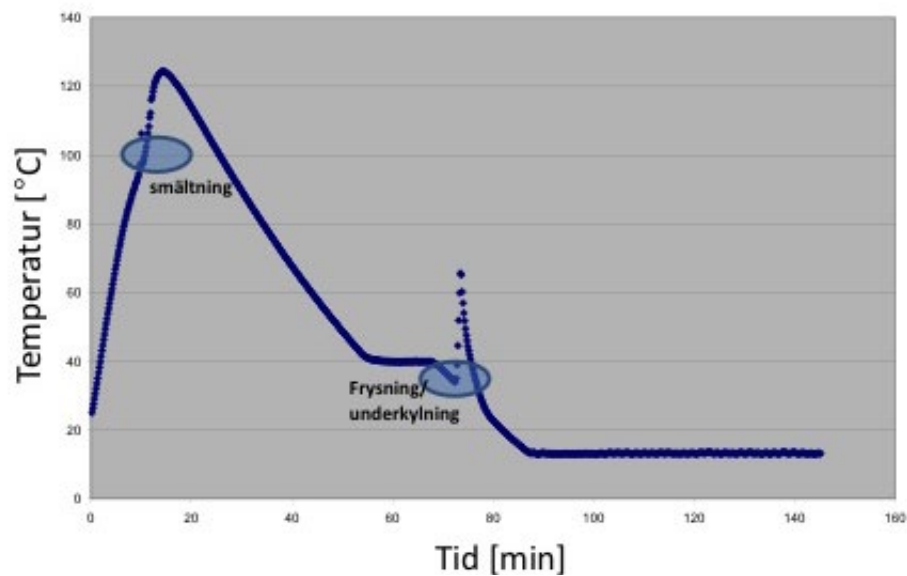
Ett billigare alternativ till blandning med polyalkoholer skulle vara att blanda erytritol med den enklaste av alla sockeralkoholer, etylenglykol. Fasändringskurvor för en sådan inblandning visas i figur 5 där man kan se att smältpunkten justerats till ca 100 °C. Vidare kan man i samma figur se att underkyllning sker till ca 50 °C.

Försök har också utförts att ersätta etylenglykolen med vatten. Liknande resultat erhålls, dvs smältpunkten sänks och en kraftig underkyllning noteras (figur 6). Underkyllningen kan dock korrigeras med hjälp av mekanisk igångsättning av kristallisationen. Vid utfällningen omkring 40 °C kan man dock konstatera en fassetparation. Det bildas

en utfällning samt en klar lösning, något som gör att blandningen inte kan användas utan att gela vattnet med alkoholen så att de ingående komponenterna hålls i blandning över många cykler fasändring



Figur 5 Justering av fasändringstemperatur – Erytritol blandat med etylenglykol.



Figur 6 Justering av fasändringstemperatur – Erytritol blandat med vatten.

3. OLIKA LAGRINGSTEKNIKER FÖR VÄRMETRANSPORT

Två olika tekniker har utvärderats – ett dynamiskt lager och ett statiskt lager.

Den dynamiska tekniken kännetecknas av att värmetransporten mellan fasändringsmaterialet och värmebäraren i laddnings- eller urladdningssystemet sker med hjälp av en sekundär värmebärare. Den sekundära värmebäraren, en olja; dispergeras i fasändringsmaterialet. De problem som kan uppstå är

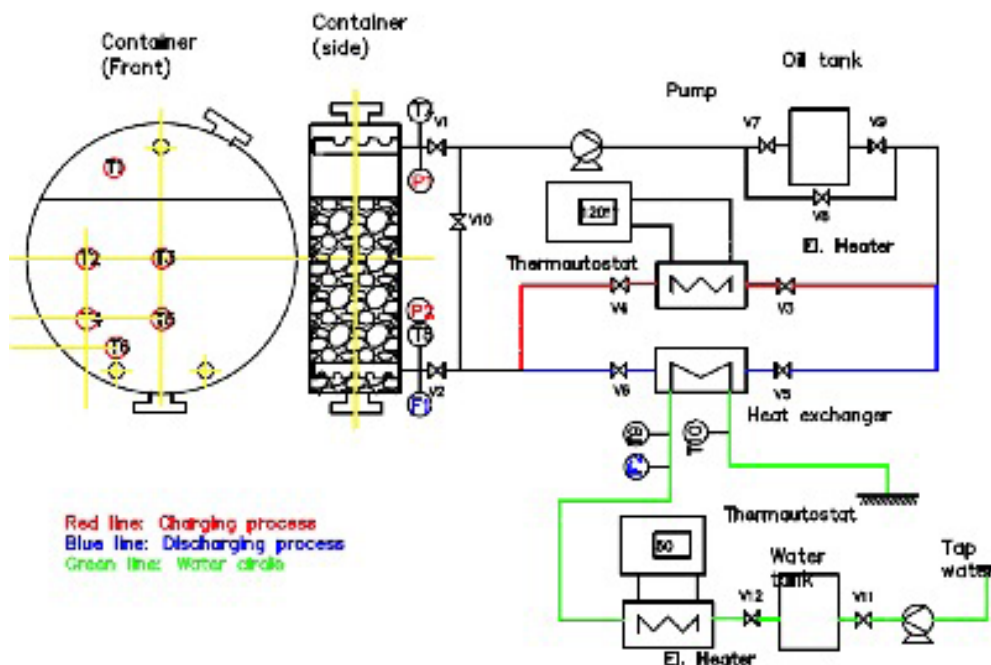
1. Inneslutning av värmebäraren i fasändringsmaterialet. Detta medför minskad energidensitet i lagret.
2. Det stelade fasändringsmaterialet sätter igen dispergeringshålerna och försvårar kraftigt laddande av lagret.

Fördelen med den dynamiska tekniken är möjligheten till bättre värmetransport och därmed högre effektkapacitet på lagret.

Den statiska tekniken kännetecknas av att lagret utformas med en värmeväxlare nedsänkt i lagerkärlet fyllt med PCM. Här är det viktigt att jobba med en så stor värmeöverförande yta som möjligt, men att samtidigt bibehålla energidensiteten på lagret.

3.1 Utvärdering av dynamiskt lager

I ett s.k. dynamiskt lager är PCM i direkt-kontakt med olja som är värmebärare under laddning/urladdning. Detta koncept har utvärderats vid Mälardalens högskola under ledning av Professor Jinjue Yan. En bild på den experimentella riggen visas nedan.



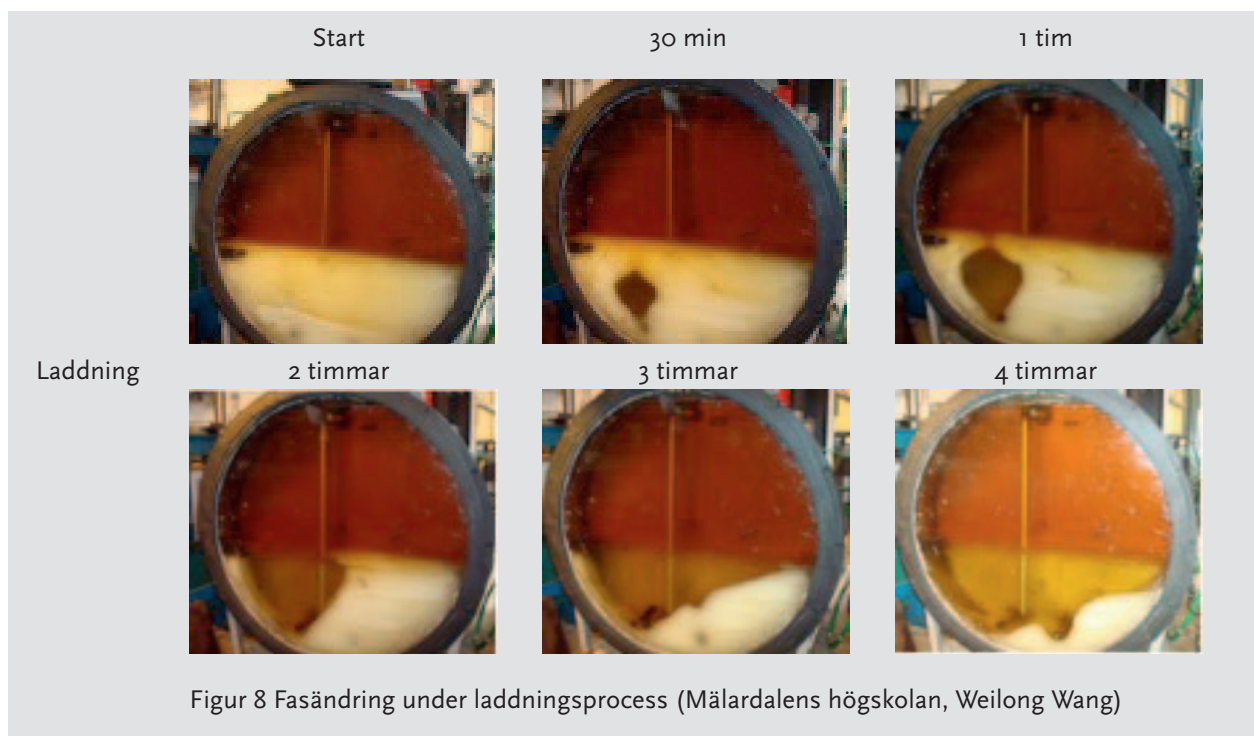
Figur 7 Dynamisk testanläggning – Mälardalens högskola (Weilong Wang).

Vid laddning stängs ventilerna V5 och V6 och oljan upphettas av en elpatron. Därefter pumpas oljan in i tanken genom två bottenrör och därefter in i tanken genom fem hål per rör för att fördelas jämnt i tanken. Genom direktkontakt med Eritrytol överförs värme så att Eritrytol smälter. Då oljan och Eritrytol har olika densitet separerar de från varandra – den lättare oljan hamnar som ett lager på toppen och lämnar så småningom tanken genom ett topp-rör i tanken. Vid urladdning stängs V3 och V4 och oljan som tar upp värme i tanken värmer i sin tur en vattencykel med tillhörande tank.

Figur 8 visar en exemplifierande bildsekvens på laddningen av lagret.

Slutsatserna från de inledande experimenten är:

- Eritrytol är ett organisk PCM-material som har potential för hög lagringskapacitet och hög smältpunkt jämfört nuvarande kommersiella PCM-material. Problem med underkylning har visats möjliga att hantera via den dynamiska utformningen där olja och PCM är i direktkontakt med varandra.
- Vid laddning smälter Eritrytol snabbare ju högre flödes hastighet på oljan som används. Dock kan stora block Eritrytol observeras och dessa är svåra att smälta pga den låga konduktiviteten. Oljan och Eritrytol separerar väl då Eritrytol är smält.
- Vid urladdning observeras ingen underkylning, och kristaller som bildas sjunker ned till botten. Vid lägre oljeflöden observeras en större avkylning av värmebäraren.



3.2 Utvärdering av statiskt lager

Ett ”statiskt” lager avser här en värmeväxlare nedsänkt i PCM-tank. Värmebäraren cirkulerar genom värmeväxlaren och är därmed inte i direktkontakt med PCM.

I projektet har en designmetod tagits fram genom försök i en plexiglas-kontainer, 190x270x70 mm (figur 1). Vid försöken användes ett annat PCM än ovan nämnda Eritrytol, nämligen Climsel 21 som är ett saltbaserat PCM med smältpunkt runt 21 °C. Detta möjliggjorde enklare utvärderingsförsök av värmeöverföringen utan risk för stora värmeförluster som onödig störning av mätdata. En koppartub var nedsänkt i PCM och tempererat vatten cirkulerade genom mät-riggen. Flödes hastighet och temperaturer uppmättes. Vidare var volymen PCM stor i förhållande till värmeväxlaren varför inte all PCM smälte vid laddning utan i stället fungerade som isoleringsmaterial så att eventuella värmeförluster kan anses som försumbara.

Ett viktigt nyckeltal för design av denna typ av lager är ett volymetriskt värmeöverföringstal α [kW/m³,K] där volymen refererar till totala volymen som upptas av värmeväxlaren (dvs INTE volymen på tanken). Uppmätta värden för rör-värmeväxlare uppgick till mellan 30-100 kW/m³-K för oflänsat rör och 100-400 kW/m³-K för flänsat rör. Faktorer, utöver värmeväxlartyp, som påverkade värdet på α är flödes hastighet och temperaturskillnad.

För att dra nytta av information om α vid design används följande procedur.

Energiinnehållet i en lagringstank ges av:

$$E = IPF \cdot V \cdot \Delta H$$

(E=energi kWh, IPF= Ice packing factor m³/m³, V=tankvolym m³, ΔH =ändring i entalpi över temperaturintervallet kWh/m³)

Effekten ges av:

$$P = \alpha \cdot V_{vax} \cdot \theta_{lm}$$

(α = volymetrisk värmeöverföringskoefficient kW/m³,K and θ_{lm} =logaritmisk medeltemperatur)

Som ett exempel kan volymen för 4 MWh lagringskapacitet och 1 MW effekt beräknas. Antag ett PCM med entalpiändringen $\Delta H=150$ kWh/m³ över temperaturintervallet 45-120 oC. Vi använder sedan ett experimentellt α -värde för flänsad värmeväxlare på 125 kW/m³,K.

Med hjälp av ΔH beräknas erforderlig volym PCM för 4 MWh till 26,7 m³.

Antag vidare att PCM smälter vid 90 C och att temperature på inkommande värmebärare är 45 C och att önskad temperatur ut ur lagret är 85 C, då blir $\theta_{lm}=18$ och erforderlig volym på värmeväxlaren för 1 MW beräknas till 0,4 m³. Totala volymen blir då 27,1 m³ och IPF 98%.

Om en oflänsad värmeväxlare används sjunker α -värdet ned till ca 30 kW/m³,K. Den erforderliga volymen på värmeväxlaren blir då 1,9 m³ och IPF 93%.

4. TEKNISK OCH EKONOMISK POTENTIAL FÖR VÄRMETRANSPORT MED LASTBIL, TÅG ELLER BÅT.

För att uppskatta hur stor potential det kan finnas för att transportera värme med lastbil, tåg eller båt har statistik från Svensk Fjärrvärme avseende tätortsstorlekar och fjärrvärme använts [5]. Denna statistik anger antal tätorter med en befolkning inom ett visst intervall samt andel av dessa tätorter som har tillgång till fjärrvärme. Vid bearbetning av detta material har antagits att ett hushåll i genomsnitt förbrukar 20 MWh/år värme samt att varje hushåll består av i genomsnitt 2,5 personer. För beräkningarna har vidare antagits att befolkningen i tätorten i genomsnitt ligger på medelvärdet av övre och undre befolkningsmängd inom skiktet. På detta sätt kan man uppskatta att den totala värmeförbrukningen i tätorter med en befolkning mellan 200 och 10 000 personer utgör drygt 30 TWh/år. Den andel av tätorterna som redan i dag har fjärrvärme (och då sannolikt i flertalet fall pellets- eller oljeeldade värmeverk) förbrukar totalt drygt 11 TWh/år. Genomsnittet för värmeförbrukningen ligger för de minsta tätorterna på knappt 5 GWh/år (för de större tätorterna ligger förbrukningen högre). Storleken på de betraktade tätorterna gör det möjligt att med lönsamhet transportera värme till dem. Resultaten av bedömningarna framgår av nedanstående Tabell 1. Antalet tätorter med utbyggd fjärrvärme är omkring 450.

Under förutsättning att värmetransport sker från ett kraftvärmeverk till de aktuella tätorterna skulle alltså ett värmeunderlag på ytterligare 11 TWh/år innebära en potentiell ökning av elproduktionen med ca 7 TWh/år. Detta är en ansevärd ökning från dagens ca 10 TWh/år elproduktion i kraftvärmeverk.

Uppvärmning av den byggda miljön i små samhällen med ett begränsat värmebehov kan tänkas ske på tre olika sätt:

Pelletseldning eller oljeeldning i ett eget värmeverk.

Rörbunden värmetransport från centralt beläget (kraft)värmeverk.

Transport av värme med lastbil från centralt beläget (kraft)värmeverk eller från industrier med överskottsvärme.

Nedan jämförs de tre metoderna genom en ekonomisk uppskattning.

Storlek av tätort. Personer	Antal hushåll/ tätort	Antal tätorter	GWh/ tätort,år	Totalt TWh/år	Varav utbyggd fjärrvärme, TWh/år
3000-10000	2 600	228	52	11,9	9,5
1000-3000	800	380	7,6	2,9	1,4
200-1000	240	1 220	4,8	5,6	0,4
Summa				30,4	11,3

Tabell 1. Bedömning av potential för utbyggnad av fjärrvärme i Svenska orter

4.1 Jämförelse mellan värmetransport i rör och med lastbil

Kostnaden för lägga ner fjärrvärmerör är mellan 3 och 6 Mkr/km. En 40 fots lagertank för transport kostar i inköp omkring 1 Mkr. Driftkostnaderna för lastbilstransport är dock högre än för rörtransporterad värme. Detta innebär att vid längre transportavstånd och transport till värmeverk med relativt lågt värmebehov kan lastbilstransport vara mer ekonomiskt fördelaktigt än rörtransport.

Vid den här jämförelsen har kapitalkostnaden för rörtransport jämförts med summan av kapitalkostnad och driftkostnad för lastbilstransport. Driftkostnaden (pumpdrift) samt värmeförluster för rörbunden värmedistribution har försumrats.

Kapitalkostnaden för rörtransport kan beräknas med följande formel:

$$RK = ar \cdot R \cdot A$$

På liknande sätt beräknas summan av kapitalkostnad och driftkostnad för lastbilstransport med nedanstående formel

$$TK = at \cdot I + K/E \cdot 2 \cdot A \cdot L$$

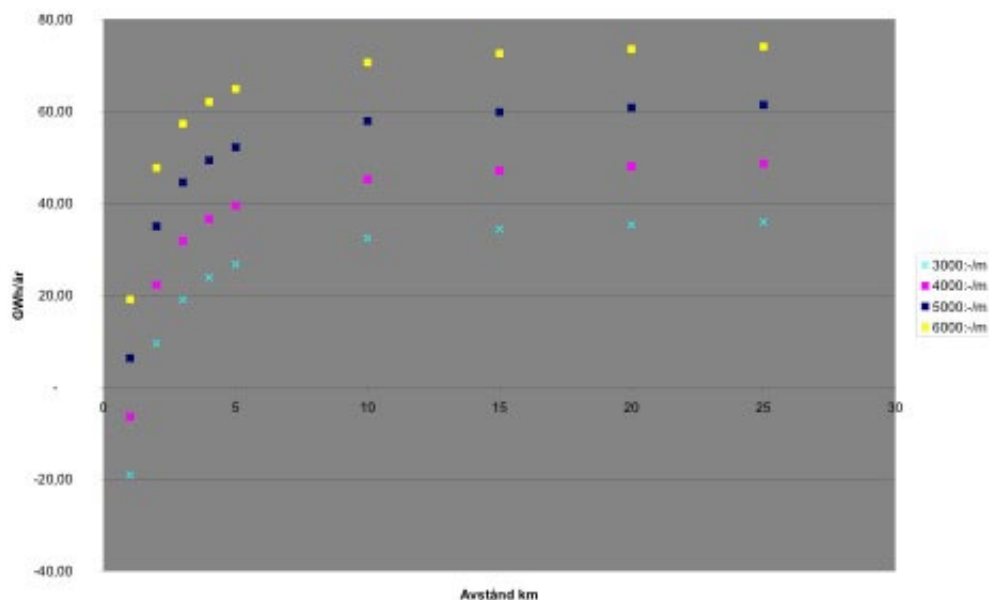
Använda beteckningar

ar	annuitetsfaktor för rörinstallation %
at	annuitetsfaktor för lastbilstransport
A	avstånd km
E	Energiinnehåll i varje lass MWh/lass
I	Investerat kapital för lastbilstransport SEK
K	Transportkostnad SEK/km
L	Årsförbrukning MWh
R	Kostnad för rörläggning SEK/km
RK	Kostnad för rörtransport SEK/år
TK	Kostnad för lastbilstransport SEK/år

Med hjälp av dess formler kan man beräkna den erforderliga årsförbrukningen [GWh/år] vid vilken kostnaden för rörtransport blir lägre än kostnaden för lastbilstransport av värme, givet ett visst transportavstånd. Med följande värden insatta i formlerna beskrivs sambandet enligt Figur 9:

ar	0,08
at	0,16
E	3,5 MWh/lass
I	Investerat kapital för lastbilstransport 3 000 kSEK
K	Transportkostnad 11 SEK/km
R	Kostnad för rörläggning 3 000 – 6 000 kSEK/km

Som framgår av figur 9, måste t ex årsförbrukningen ligga över 35 GWh/år för att rörtransport ska vara billigare än lastbilstransport om transportavståndet överstiger 15 km och kostnaden för rörläggning är 3 000:-/m och över 70 GWh/år om kostnaden för rörläggning är 6 000:-/m.



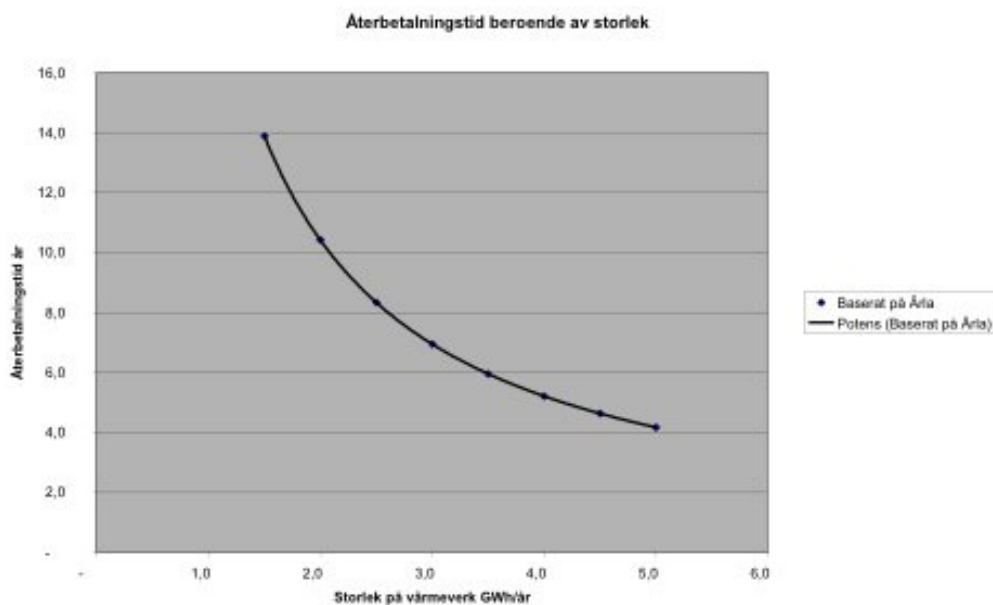
Figur 9 Årsförbrukning vid vilken rörtransport blir billigare än lastbilstransport av värme – som funktion av transportavstånd (x-axeln) och kostnad för rörläggning (de olika kurvorna med respektive symboler).

4.2 Jämförelse mellan pelletseldning och transport med lastbil

Transport av värme med lastbil från central kraftvärmeanläggning till ett mindre samhälle ska också jämföras med eldning i lokalt placerat värmeverk

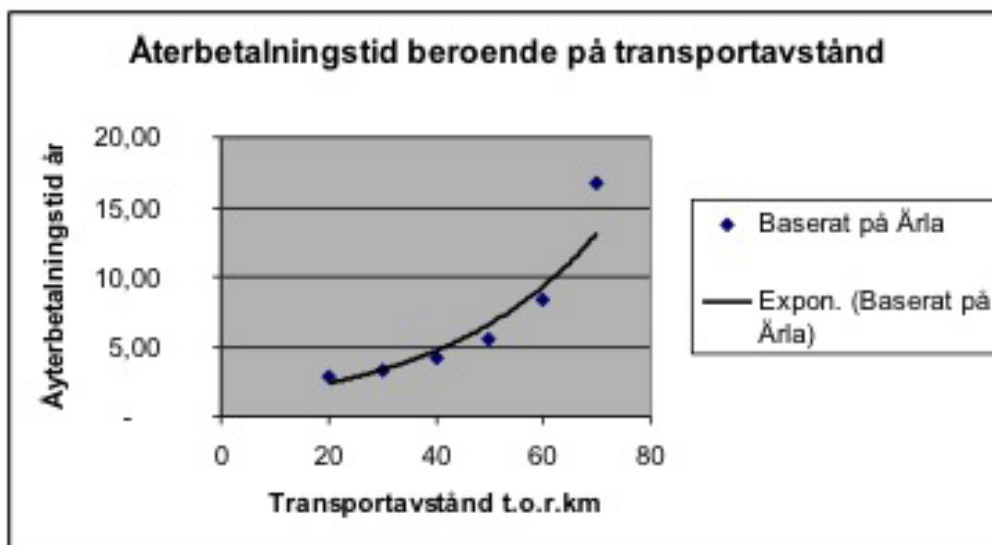
En variabel att ta hänsyn till är storleken på värmebehovet hos det mottagande värmeverket. Ju större detta behov är desto bättre utnyttjas det i transporten investerade kapitalet. Å andra sidan om värmebehovet är tillräckligt stort kan rörtransporterad värme vara ett alternativ (se 4.1). Figur 10 är hämtat ur rapporten från det tidigare arbetet för Fjärrsyns räkning [1]. I den studien undersöktes transport av värme från det centralt placerade bibränsleeldade kraftvärmeverket i Eskilstuna till en mindre ort Ärla ca 30 km från Eskilstuna. Resultaten i figur 10, som delvis är baserade på fallet Ärla, visar på ett starkt beroende av värmebehovet på det ekonomiska utfallet. Årsbehov över 3 GWh/år tycks kunna ge en rimlig avkastning på investerat kapital.

¹ Antaget värde för energikapacitet på en 40-fotscontainer fylld med PCM enligt tidigare beskrivna statiska konceptet – värdet delvis baserat på tidigare studier i Ahnemark m fl, Transport av industriellt överskottsvärme, Svensk fjärrvärme, rapport nr 2009:34[1].



Figur 10 Återbetalningstid för lastbilsburen transport från centralt kraftvärmeverk jämfört med eldning i ett befintligt, lokalt pellet-eldat värmeverk – inverkan av värmeverkets storlek.

Återigen måste även transportavståndet beaktas. Av nedanstående diagram (figur 11) framgår sambandet mellan återbetalningstid och transportavstånd.



Figur 11 Återbetalningstid för lastbilsburen transport från centralt kraftvärmeverk jämfört med eldning i ett befintligt, lokalt pellet-eldat värmeverk – inverkan av transportavstånd.

5. SLUTKOMMENTARER

Potentialen för ”värme på väg” har analyserats och med givna förutsättningar visar resultaten på en potential om ca 11 TWh/år för transport till hushåll i tätorter. I kombination med kraftvärme skulle detta ge ett teoretiskt underlag för ca 7 TWh/år ökad elproduktion.

Vidare har tekniken ”värme-på-väg” jämförts med rörbunden värme i en potentialbedömning. Resultaten visar t ex att värmetransport med PCM-teknik är lönsam jämfört rörbunden transport upp till ett värmebehov om 35 GWh/år då transportavståndet är 15 km och kostnad för rörläggning är 3000 kr/m.

Sammantaget visar dessa båda bedömningar på att ”värme-på-väg” är ett koncept med stor potential, förutsatt att utveckling sker vad gäller själva transportmodulerna såväl som av systemen inklusive styr- och körstrategier samt logistik.

En kritisk punkt där modul-transport/värme-på-väg ska ersätta rördistribuerad värme är att tillgängligheten på tekniken måste vara jämförbar, dvs i det närmaste 24 timmar om dygnet, 365 dagar om året.

Ett alternativ är att PCM-moduler enbart levererar värme till orter som redan har ett eget värmeverk under tider då PCM-värmen är billigare än ortens egen produktion, t ex om PCM-värmen kommer från industriell spillvärme och det lokala värmeverket eldas med olja. Potentialen blir mindre än de 11 TWh indikerade ovan, men det ställer mindre krav på PCM-systemets tillgänglighet. Kanske kan då tekniken prövas i praktiken inom en snar framtid.

I projektet har två tekniker för lagring utvärderats:

- 1) statisk lagring där en värmeväxlare nedsänks i PCM-et vilket leder till höga lagringstätheter, enkelt urladdnings-/laddningsförlopp, men risk för låga effekter per volymsenhet.
- 2) Dynamisk lagring som har potential till höga effekter, men potentiellt lägre lagringskapaciteter pga den värmebärare (olja) som finns i lagringstanken tillsammans med PCM-et och därmed upptar en stor del av volymen i lagret. Dessutom kan styr-och-regler komma att vara mer komplext för denna teknik jämfört med den statiska.

Den sammantagna bedömningen av de tester som utförts här är att respektive teknik har sina för- och nackdelar enligt ovan, och att en utvärdering i pilotskala av båda två vore av stort värde för att bygga erfarenheter och utvärdera styr-och-reglerstrategier. Det är dock möjligen ett för stort steg att gå från nuvarande labskaleförsök direkt till en 20-fotskontainer eller större. Detaljerad teoretisk modellering av en kontainerlösning, tillsammans med fortsatta försök i mindre skala (omkring 100 kWh lager) rekommenderas.

Eritrytol har utvärderats som ett tänkbart PCM för värmetransport i fjärrenergisystem. Dels har det en bra smältpunkt runt 120 C som kommer att minska behovet av tillsatseldning vid urladdningsplatsen, och dels har materialet en mycket hög energidensitet. Inledande försök visar dock på en tänkbar underkylningsproblematik (materialet måste kylas väsentligen under 120 C för att börja kristallisera så att värmen erhålls vid urladdning). Denna problematik kan kringgås med den ”dynamiska” lagringsteknik som testats i detta projekt eftersom den på ett naturligt sätt eliminerar underkylningen.

Intresset för ”värme på väg” är stort, även internationellt. Firman LaTherm i Tyskland förbereder ett demonstrationsprojekt med transport av värme med lastbil. Tekniken är den ”stationära” värmetransporten, dvs med en värmeväxlare omgiven av PCM. Fasändringsmaterialet är natriumacetat med en smältpunkt på 58 °C. I projektet skall en container fyllas med natriumacetat medan en andra container skall förses med natriumacetat blandat med grafit. Avsikten är att utvärdera hur laddnings-/urladdningseffekten kan påverkas av den ökade värmekonduktiviteten som erhålls vid tillsats av grafit. I projektet skall värme transporteras till en badanläggning. Detta medför att temperaturen som kommer ur lagret inte behöver vara så hög som det som krävs vid fjärrvärmeställningar.

6. BETECKNINGSLISTA

ar	annuitetsfaktor för rörinstallation
at	annuitetsfaktor för lastbilstransport
A	avstånd [km]
E	energi [kWh] alt energiinnehåll i varje lass [MWh/lass]
ΔH	ändring i entalpi över temperaturintervallet [kWh/m ³]
I	Investerat kapital för lastbilstransport [SEK]
IPF	Ice packing factor [m ³ /m ³]
K	Transportkostnad [SEK/km]
L	Årsförbrukning [MWh]
P	Effekt [kW]
PCM	Phase Change Material (sv. Fasändringsmaterial)
R	Kostnad för rörläggning [SEK/km]
RK	Kostnad för rörtransport [SEK/år]
TK	Kostnad för lastbilstransport [SEK/år]
TMP	trimetylolpropan
TME	trimetyloletan
V	tankvolym [m ³]
α	volymetrisk värmeöverföringskoefficient [kW/m ³ ,K]
θ_{lm}	logaritmisk medeltemperatur

REFERENSER

- [1] Ahnemark J, Martin V, Setterwall F och Wang W, 2009, Transport av industriell överskottsvärme, Svensk fjärrvärme, rapport nr 2009:34.
- [2] Yinping, Z., and J. Yi, 1999 "A simple method, the T-History method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials." Measurement Science and Technology, sid 201-205.
- [3] Kakiuchi et al, 1998, "A Study of Erythritol as Phase Change Material", Annex 10 2nd workshop Sofia, Bulgaria www.fskab.com/annex10/WS2.htm
- [4] Hidaka et al., 2004, "New PCMs Prepared from Erythritol-Polyalcohols Mixtures for Latent Heat Storage between 80 and 100°C", Journal of Chemical Engineering of Japan, vol 37, sid 1155-1162.
- [5] Svensk fjärrvärme, 2004, Fjärrvärme och kraftvärme i framtiden, ISSN 1401-9264, Art. Nr 041110.



Fjärrsyn – forskning som stärker konkurrenskraften för fjärrvärme och fjärrkyla genom ökad kunskap om fjärrvärmens roll i klimatarbetet och för ett hållbart samhälle, till exempel genom att bana väg för affärsmässiga lösningar och framtida teknik. Programmet drivs av Svensk Fjärrvärme med stöd av Energimyndigheten. Mer information finns på www.fjarrsyn.se

VÄRMETRANSPORT MED FASOMVANDLING

Den här rapporten redovisar potentialen för att transportera värme med hjälp av fasomvandling. Här beskrivs framför allt material och teknik för värmetransport. Fasändringsmaterial är till exempel saltblandningar eller organiska föreningar som smälter och stelnar vid en viss temperatur. Det visar sig till exempel att metoden är ekonomiskt lönsam under förutsättning att transportavståndet tur och retur inte överstiger 80 kilometer.

Intresset för det här konceptet som kallas ”värme på väg” är stort, även internationellt. Studien visar att tekniken har stor potential om det sker en utveckling av transportmodulerna och av systemen för styr- och körstrategier och logistik.

