BRANDFORSK
2020:8

Fasomvandlingsmaterial: Risker och möjligheter

Michael Försth, Alexandra Byström, Jonathan Wolf

Brandforsk

REFERENSGRUPP

Leif Andersson, fristående sakkunnig
Mats Björs, Byggmaterialindustriernas brandutskott, Swedisol
Ola Cederfeldt, Sveriges Brandkonsultförening, P&B Brandkonsult AB
Mattias Delin, Brandforsk
Thomas Jennlinger, Byggherrarna, Akademiska Hus
Richard Johansson, RISE
Per Sjölander, If
Henrik Tornberg, Vattenfall

Denna rapport utgör ett slutligt arbetsmanuskript för det rubricerade projektet. Den officiella projektrapporten, till vilken referens bör ske återfinns på Luleå tekniska universitets hemsida:

Fasomvandling: risker och möjligheter

www.ltu.se

BRANDFORSK 2020:8

Brandforsk

Brandforsks verksamhet möjliggörs av stöd från olika organisationer i samhället. Läs mer om våra stödorganisationer på www.brandforsk.se

Abstract

Phase change materials are used to stabilize and change temperature variations over time. This is achieved when the materials undergo a phase change, when *latent heat* is absorbed (melting) or emitted (solidification). A classic example of phase change is melting of ice. When 1 kg of ice melts at 0 ˚C 334 kJ of latent heat is transferred to the material. This can be compared with the sensible heat, which is related not to phase change but to temperature change. The sensible heat that is absorbed to warm up 1 kg of water from -2 ˚C to 2 ˚C is 12 kJ , excluded the 334 kJ of latent heat that is required for the melting at 0 ˚C. The relatively large amount of latent heat as compared to the sensible heat acts to stabilize the temperature at 0 ˚C. An example of the use of latent heat in ice/water is the ice bath, which is used for example to calibrate thermometers. The relatively large heat exchange for phase changes also takes place for many other materials than water and is the reason why phase change materials receives more and more attention as a tool for energy saving. The melting point of water is rarely useful for buildings, except for cold storages. There are however other materials, such as paraffin for example, that have melting points at room temperature. This could be useful for temperature stabilization of buildings. The corresponding latent and sensible heat required to warm up 1 kg of a specific type of paraffin with melting temperature 22 ˚C from 20 ˚C to 24 ˚C is 167 kJ latent heat (melting heat) and 11 kJ sensible heat. Similarly to ice/water the phase change material, the paraffin, stabilizes the temperature around the melting point. If, for example, there is a strong solar irradiation during the day the heating of a building with paraffin in the construction will be delayed because a relatively large amount of energy is required to pass the melting point of the paraffin. The opposite is true on the evening when the outdoor temperature decreases. When the temperature of the paraffin decreases from 24 ˚C to 20 ˚C 11 kJ sensible heat is released, but as much as 167 kl latent heat. The cooling down of a room or building can thereby be delayed which implies a decreased energy consumption for heating, and decreased need for cooling systems in the morning. As a comparison, concrete has no melting temperature in the relevant temperature range and for 1 kg of concrete 4 kJ of sensible heat will be absorbed, and no latent heat, when the temperature of the concrete is increased from 20 ˚C to 24 ˚C.

Energy consumption for heating and cooling constitutes a large fraction of society's total energy consumption, approximately 50 % in the EU. Many actions are called for in order to reduce this consumption and phase change material is one candidate that has been pointed out by the IEA (International Energy Agency) to be able to contribute to this feat. In addition to the reduced energy requirement, a time delay in the energy consumption requirements is obtained by the phase change material. Because of the absorbed or released latent heat the peak energy (power) requirement is delayed but also reduced, which improves flexibility in the energy supply system. For example electricity can be purchased during times of the day when the price per unit of electrical energy is lower. Reducing the peak energy requirement also means that the capacity of heating and cooling installations can be reduced, which in itself yields lower environmental impact since smaller heating and cooling systems can be installed.

The need for thermal stabilization has been accentuated the last decades within the building sector. One reason for this is the lightweight construction that have grown in popularity. This partly depends on the fact that transport of light material reduces the environmental impact. Such constructions, for example wood, sandwich and/or steel constructions, have a relatively small thermal mass and the temperature in the buildings will fluctuate substantially between cold nights and hot days. One way of increasing the thermal mass is to add phase change materials.

Phase change material for energy saving and temperature stabilization in buildings is popular within the research literature but seems to, in comparison to the research literature, have a relatively small prevalence within the building sector in Sweden. From a fire safety perspective it is important to bear in mind that among the buildings materials with added phase change materials that can be found on the international market, it is relatively common with mixing of combustible organic phase change materials, above all different types of paraffines. Phase change materials can also be built in into walls, ceilings and floors without being mixed into the actual building materials. Considered as a lining the inclusion of combustible phase change material do not formally put any new challenges on the legal system, that is the CPR (Construction Products Regulation) and the BBR (regulations of the Swedish National Board of Housing, Building and Planning), since the legal system is material neutral and already takes account of combustible materials. On the other hand, the introduction of new combustible materials into buildings means that the building process will be more sensible to errors, mistakes, and deficiencies. For example, a gypsum plasterboard with combustible phase change material can easily, by mistake, be placed as the outer lining, when in fact this board was supposed to be protected by a non-combustible plasterboard. Another example is the increased sensitivity of the execution and the permanency of bushings through walls where there is combustible phase change material built into the wall.

Before combustible phase change materials are accepted in building projects it is important with a holistic analysis, where pros and cons are compared and weighted against each other. The pros are energy savings and temperature stabilization. Cons are among other things increased sensitivity to fire protective errors, other impaired properties such as load bearing capacity of the building material, as well as the environmental impact of the building seen from a lifetime perspective, including demolition and recycling. Phase change materials are categorized into organic (often combustible), inorganic (often non-combustible), and a mix of materials called eutectics. Pure organic phase change materials often give rise to a very fast fire growth. Largely this also applies to building materials where phase change materials are added as a minor substance. It is therefore very important to carefully consider if alternative phase change materials, such as inorganic salt hydrates, can be employed. These latter are however subject to other deficiencies, such as limited lifetime performance for example, which also must be considered in the holistic analysis of the project. Also alternatives to phase change materials should be considered. Concrete for example can be added to increase the thermal mass of a building, using sensible instead of latent heat. In the research literature, a large amount of the studies focuses on improving the fire properties of organic phase change materials, for example by adding flame-retardants. It seems as if substantial material development for phase changes materials is required before these will be widely adapted within the building sector. Phase change materials are expected to be more useful when such materials are available that are cost effective, environmentally friendly, fire safe, durable, and when these materials do not deteriorate other important properties of the building materials such as load bearing capacity and insulation capacity.

Förord

Detta arbete (projektnr 320 001) finansierades av Insamlingsstiftelsen Brandforsk genom stöd från olika organisationer i samhället.

Till projektet har knutits en referensgrupp som har bidragit till projektet främst genom deltagande i två referensgruppsmöten samt genomläsning av slutrapporten innan dess publicering. I vissa fall har referensgruppsmedlemmar även bistått projektet med ytterligare synpunkter och hjälp. Referensgruppen har bestått av:

Leif Andersson, fristående sakkunnig
Mats Björs, Byggmaterialindustriernas brandutskott, Swedisol
Ola Cederfeldt, Sveriges Brandkonsultförening, P&B Brandkonsult AB
Mattias Delin, Brandforsk
Thomas Jennlinger, Byggherrarna, Akademiska Hus
Richard Johansson, RISE
Per Sjölander, If
Henrik Tornberg, Vattenfall

Rapportförfattarna vill rikta ett stort tack till Brandforsk för att de har möjliggjort projektet och till referensgruppsdeltagarna för att de bidragit med sin expertis. Ett stort tack riktas också till respondenterna i intervjustudien. Dessa presenteras i rapportens huvuddel.

Sammanfattning

Fasomvandlingsmaterial är benämningen på material som kan användas för att jämna ut och förskjuta temperaturvariationer genom att materialet genomgår en fasomvandling, då materialets *latenta värme* används för att uppta (smältning) eller avge (stelning) värme. Ett klassiskt exempel på fasomvandling är smältning av is. När 1 kg is vid 0 ˚C smälter upptas 334 kJ latent värme. Detta kan jämföras med den *sensibla värmen*, som höjer materialets temperatur. Den sensibla värmen som upptas för att värma 1 kg vatten från -2 ˚C till 2 ˚C är 12 kJ, bortsett från de 334 kJ latent värme som behövs för smältningen vid 0 ˚C. Den relativt stora mängden latent värme i förhållande till sensibel värme gör att temperaturen stabiliseras vid 0 ˚C. Isbad, för exempelvis kalibrering av termometrar, är ett exempel på när detta används. Det relativt stora energiutbytet vid fasomvandling gäller även för många andra material än vatten och är orsaken till varför fasomvandlingsmaterial får mer och mer uppmärksamhet i energibesparingssammanhang. Vattnets frys-/smälttemperatur är sällan attraktiv för byggnader, förutom vid exempelvis kyllagring. Det finns dock andra material, t.ex. paraffiner, som kan ha en smältpunkt vid rumstemperatur vilket är mer användbart som stabiliseringstemperatur för t.ex. bostäder. Motsvarande latent och sensibel energi för att värma 1 kg av en typ av paraffin med smälttemperatur på 22 ˚C från 20 ˚C till 24 ˚C är 167 kJ latent värme (smältvärme) och 11 kJ sensibel värme. Återigen fungerar fasomvandlingsmaterialet, dvs. paraffinet, som en stabilisator av temperaturen. Detta innebär att vid exempelvis stark solinstrålning fördröjs uppvärmningen pga. att en relativt stor mängd energi krävs för att passera paraffinets smälttemperatur. Det omvända gäller på kvällen när temperaturen sjunker. När temperaturen på paraffinet sjunker från 24 ˚C till 20 ˚C frigörs 11 $kJ \cdot kg^{-1}$ sensibel värme, men så mycket som 167 $kJ \cdot kg^{-1}$ i latent värme. Nedkylningen av rummet fördröjs alltså vilket leder till minskat energibehov för uppvärmning, på samma sätt som energibehovet för eventuell kylning minskar på morgonen/förmiddagen. Som jämförelse har betong ingen smälttemperatur i det relevanta temperaturområdet och upptaget av energi blir 4 $kJ \cdot kg^{-1}$ sensibel värme, och ingen latent värme, för att värma betongen från 20 ˚C till 24 ˚C.

Energiförbrukningen för uppvärmning och kylning i byggnader utgör en stor andel av människans totala energiförbrukning, cirka 50% i EU. Många olika åtgärder krävs för att minska denna förbrukning och fasomvandlingsmaterial är en kandidat som av IEA (International Energy Agency) lyfts fram för att kunna bidra till detta. I tillägg till det minskade energibehovet sker en tidsförskjutning vad gäller uppvärmnings- och eventuellt kylbehov. På grund av den frigjorda eller absorberade latenta värmen i fasomvandlingsmaterialet senareläggs och minskar toppeffektbehovet. Byggnadens toppeffektbehov förskjuts då vilket skapar flexibilitet i energiförsörjningssystemet, exempelvis kan inköp av el ske under tiden då elpriset inte är på topp. Att toppeffektbehovet minskar innebär samtidigt att kapaciteten på uppvärmnings- eller kylinstallationen kan minskas, vilket i sig leder till lägre miljöpåverkan eftersom mindre anläggningar då kan installeras.

Behovet av termisk stabilisering har accentuerats inom byggbranschen på grund av de prefabricerade lättviktskonstruktioner som blivit populära de senaste decennierna, en popularitet som bland annat beror på att det ger miljömässiga fördelar att transportera lätta konstruktioner. Sådana konstruktioner, t.ex. trä, sandwich- och/eller stålkonstruktioner, har en relativt liten termisk massa vilket gör att temperaturfluktuationer mellan kalla nätter och varma dagar kan bli stora. Ett sätt att öka den termiska massan är att tillföra fasomvandlingsmaterial.

Fasomvandlingsmaterial för energibesparing och temperaturstabilisering i byggnader är populärt i forskningslitteraturen men verkar i dagsläget ha en mycket begränsat spridning inom byggandet i Sverige. Ur ett brandskyddstekniskt perspektiv är det viktigt att känna till att bland de byggmaterial

med fasomvandlingsmaterial som finns på den internationella marknaden är det relativt vanligt med inblandning av brännbara organiska fasomvandlingsmaterial, framförallt olika typer av paraffiner som nämndes ovan. Fasomvandlingsmaterial kan också byggas in i väggar, tak och golv utan att vara uppblandat med själva byggmaterialen. Regelverket, framförallt i form av byggproduktförordningen och klassifikationsstandarden EN 13501-1, hanterar redan idag brännbara material genom att exempelvis ytskikt kan klassificeras med en Euroklass som motsvarar en viss nivå av brännbarhet. Införande av ännu fler brännbara material gör dock att byggprocessen blir mindre förlåtande mot fel och brister och därmed kommer behovet av uppföljning och kvalitetskontroll att bli större i byggprojekt där brännbara fasomvandlingsmaterial används. Exempelvis kan en gipsskiva med brännbart fasomvandlingsmaterial av misstag hamna som ytskikt, trots att den inte var avsedd att användas som ytskikt utan tänkt att skyddas av en obrännbar gipsskiva, dvs. av en gipsskiva utan fasomvandlingsmaterial. Sådana misstag i montering av byggmaterial på en byggarbetsplats kan vara svåra att undvika och ännu svårare att upptäcka när väl misstaget gjorts.

Innan brännbara fasomvandlingsmaterial anammas i ett byggprojekt är det viktigt att en helhetsanalys görs där för- och nackdelar vägs mot varandra. Fördelarna är energibesparing och temperaturstabilisering. Nackdelar är bland annat ökad sårbarhet för brandskyddstekniska fel och brister, eventuellt försämrade byggnadstekniska egenskaper såsom bärförmåga, samt byggnadens miljöpåverkan ur ett livstidsperspektiv, med demolering och återvinning inkluderat i miljöbelastningsbudgeten. Fasomvandlingsmaterial finns inom kategorierna organiska (oftast brännbara), oorganiska (oftast obrännbara) samt en blandning av fasomvandlingsmaterial som kallas eutektiska material. Rena organiska fasomvandlingsmaterial ger en mycket snabb brandtillväxt. Detta gäller i stor utsträckning även byggmaterial såsom exempelvis gips med inblandning av organiska fasomvandlingsmaterial. Det är därför viktigt att överväga om alternativa fasomvandlingsmaterial, exempelvis oorganiska salthydrater, kan användas. De senare har dock andra olägenheter som exempelvis begränsad beständighet vilket måste beaktas i en helhetsanalys av byggprojektet. Även alternativ till fasomvandlingsmaterial (brännbara såväl som obrännbara) bör övervägas. Exempelvis kan betong användas för ökad termisk massa med sensibel värmelagring. I forskningslitteraturen är en stor del av publikationerna inriktade på studier av förbättring av brandegenskaperna hos organiska fasomvandlingsmaterial, t.ex. genom tillsats av flamskyddsmedel. Det förefaller som att en väsentlig teknikutveckling av fasomvandlingsmaterial behövs innan dessa material kan få ett stort genomslag inom byggbranschen. Fasomvandlingsmaterial kan förväntas bli mer användbara när sådana finns som är kostnadseffektiva, miljövänliga, brandsäkra, beständiga och som vid inblandning i byggmaterial inte försämrar dessas övriga byggnadstekniska egenskaper, såsom exempelvis bärförmåga och isoleringsförmåga.

Innehållsförteckning

Abstract 2
Förord 4
Sammanfattning 5
Innehållsförteckning 7
Beteckningar 9
1 Inledning 10
2 Metod 12
2.1 Intervjustudie 12
2.1.1 Kvalitativ intervjustudie 12
2.1.2 Respondenter 12
2.1.3 Datainsamling: intervjuernas genomförande 13
2.1.4 Databearbetning: Analys av intervjuerna 14
2.2 Litteraturstudie 14
3 Resultat 15
3.1 Branschinformation: intervjustudie 15
3.1.1 Tillämpningsområden 15
3.1.2 Fasomvandlingsmaterial i byggnader 16
3.1.3 Materialval 19
3.1.4 Marknaden 23
3.1.5 Miljö 26
3.2 Grundläggande funktion och egenskaper för fasomvandlingsmaterial 28
3.2.1 Latent och sensibel värme 28
3.2.2 Systematisering av fasomvandlingsmaterial 30
3.2.3 Inkapsling 35
3.3 Översikt av användningsområden för fasomvandlingsmaterial 39
3.3.1 I byggnader 39
3.3.2 Solpaneler 40
3.3.3 Exempel på övriga användningsområden 41
3.4 Fasomvandlingsmaterial i byggmaterial 41
3.5 Brandegenskaper 46
3.5.1 Paraffinbaserade fasomvandlingsmaterial 46
3.5.2 Esterbaserade fasomvandlingsmaterial 49
3.5.3 Flamskyddsmedel 49

4 Diskussion 58
4.1 Byggproduktförordningen är materialneutral och täcker fasomvandlingsmaterial 58
4.2 Risker utanför regelverket 58
4.2.1 Byggfel 58
4.2.2 Solpaneler 59
4.2.3 Renovering 60
4.2.4 Lös inredning 60
4.3 Möjligheter 60
5 Slutsatser 61
5.1 Själv- och källkritik 61
5.2 Förslag på fördjupningslitteratur 62
5.3 Förslag på fortsatt arbete 62
Referenser 63
Bilaga A Intervjustudie, intervjuguide 71
Bilaga B Intervjustudie, första kontakten 73
Bilaga C Intervjustudie, andra kontakten 74
Bilaga D Intervjustudie, tematisk analys 75
Bilaga E Brandprovningsresultat 107

Beteckningar

AO – Antimontrioxid

APP – Ammonium polyfosfat

BBR – Boverkets byggregler

EG – Expanderbar grafit

FB – Fosforbaserad

HDPE – Högdensitetspolyeten

HVAC – Heating, Ventilation, and Air Conditioning system

IFR – Intumescerande flamskyddsmedel (IFR - från engelska Intumescent flame retardant)

MA – Melamin

MCA – Melamincyanurat

MPP – Melaminfosfat

MMT – Montmorillonite lera

PER – Pentaerytritol

PCM – Phase change material

phr – Parts per Hundred Rubber

RF – Röd fosfor

ZB – Zinkborat

1 Inledning

Fasomvandlingsmaterial är benämningen på material som används för att stabilisera temperaturer och för att lagra värme eller kyla genom att utnyttja dessa materials *latenta värme*, dvs. genom att materialet undergår fasomvandling. Ett klassiskt exempel på fasomvandling är smältning av is. Latent värme är den energi som upptas eller avges vid en fasövergång, t.ex. fasövergången från is till flytande vatten, med andra ord smältning. För att omvandla 1 kg is vid 0 °C till flytande vatten vid 0 °C upptas 334 kJ värme[1], vilket benämns smältvärme, eller *latent värme*. Detta kan jämföras med den värme som behöver tillföras för att höja temperaturen, vilket benämns den *sensibla värmen*. För att höja temperaturen hos 1 kg is från -2 °C till 0 °C upptas 4 kJ och för att ytterligare värma det flytande vatten från 0 °C till 2 °C, efter att 334 kJ smältvärme tillförts, krävs ytterligare 8 kJ. Den absolut största delen av energin 4 + 334 + 8 = 346 kJ som behövs för att höja temperaturen från -2 °C till 2 °C består alltså av latent värme, i detta fall 334 kJ smältvärme.

Vid konstant energitillförsel kommer temperaturen under ökningen från -2 °C till 2 °C under den största delen av tiden att vara 0 °C. Detta används exempelvis vid kalibrering av termometrar när en referenstemperatur önskas. Det är mycket enkelt att skapa en referenstemperatur vid 0 °C genom att blanda vatten och isbitar, dvs. genom att skapa ett isbad. Temperaturen i isbadet kommer genom den latenta energin (smält-/stelningsvärmen) att stabiliseras vid 0 °C. Om energi tillförs till eller avges från isbadet behöver all is smältas, eller allt vatten frysas, innan temperaturen kan börja avvika från 0 °C. På grund av den låga smälttemperaturen används inte is i byggmaterial, förutom i igloos[2], men snö är ett fasomvandlingsmaterial som används för att lagra kyla för användning i byggnaders kylanläggningar[3]. För användning i byggnader och byggnadsmaterial behövs fasomvandlingsmaterial som har en högre smälttemperatur. Den önskade stabiliseringstemperaturen är ofta i intervallet 21 – 29 °C[4]. Organiska fasomvandlingsmaterial, som exempelvis paraffiner, används i viss utsträckning i byggnadsmaterial. Sådana material är brännbara vilket är bevekelsegrunden för denna rapports tillkomst.

Regeringen har satt som mål att Sverige 2050 ska vara fossilfritt, eller mer exakt inte ge några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären[5]. Energiförbrukningen för uppvärmning och kylning i byggnader utgör en stor andel av människans totala energiförbrukning, cirka 50% i EU[6]. Många olika åtgärder krävs för att minska denna förbrukning och fasomvandlingsmaterial är en kandidat som av IEA (International Energy Agency) lyfts fram för att kunna bidra till detta[7].

Fasomvandlingsmaterial har länge använts inom olika områden såsom värmepumpar, kyltransporter, och temperaturkontroll av elektronik, t.ex. datorer, batterier och solpaneler[8]. I byggnader har implementeringen av fasomvandlingsmaterial gått förhållandevis långsamt och så sent som i november 2019 fick en installation av fasomvandlingsmaterial i en byggnad på Chalmers relativt stor uppmärksamhet i Ny Teknik[9]. Orsakerna till den relativt långsamma utvecklingen är flera, bland annat kostnader, toxicitet hos vissa fasomvandlingsmaterial, och brandfaror[10]. En grupp av fasomvandlingsmaterial som är termiskt lämpade för att minska uppvärmningsbehovet i byggnader är som tidigare nämnts paraffiner[11] varav flera har smälttemperaturer som sammanfaller med komforttemperaturer på cirka 25 ˚C. Funktionen är snarlik den med is och flytande vatten men vid en högre smälttemperatur: Om rumstemperaturen överskrider smälttemperaturen, exempelvis på grund av ökad lufttemperatur och solinstrålning på dagen, absorberas en del av värmen av paraffinet då det smälter. Detta ger bättre komfort (lägre temperatur) och minskat kylbehov för de fall rummet är utrustat med klimatkontroll. När temperaturen senare under dygnet sjunker under 25 ˚C frigörs värme från paraffinet när det stelnar, vilket minskar uppvärmningsbehovet. I tillägg till det minskade

energibehovet sker en tidsförskjutning vad gäller uppvärmnings- och eventuellt kylbehov. På grund av den frigjorda eller absorberade latenta värmen i fasomvandlingsmaterialet senareläggs och minskar toppeffektbehovet. Byggnadens toppeffektbehov förskjuts då vilket skapar flexibilitet i energiförsörjningssystemet, exempelvis kan inköp av el ske under tiden då elpriset inte är på topp, för de fall el används till uppvärmning eller kylning. Att toppeffektbehovet minskar betyder att den totala energiförbrukningen för uppvärmning eller kylning minskar samtidigt som kapaciteten på uppvärmnings- eller kylinstallationen kan minskas, vilket i sig leder till lägre miljöpåverkan eftersom mindre anläggningar då kan dimensioneras.

Behovet av termisk stabilisering har accentuerats inom byggbranschen på grund av de prefabricerade lättviktskonstruktioner som blivit populära de senaste decennierna, en popularitet som bland annat beror på att det ger miljömässiga fördelar att transportera lätta konstruktioner. Sådana konstruktioner, t.ex. sandwich- och/eller stålkonstruktioner, har en relativt liten termisk massa vilket gör att temperaturfluktuationer mellan kalla nätter och varma dagar kan bli stora. Ett sätt att öka den termiska massan, utan att tillföra exempelvis stora mängder betong, är att tillföra fasomvandlingsmaterial.

I resultatdelen i denna rapport presenteras först en intervjustudie i avsnitt 3.1 där aktörer inom olika branscher ger sin syn på fasomvandlingsmaterial och dess framtidsutsikter för användning i byggnader. Därefter följer en litteraturstudie bestående av en allmän beskrivning av fasomvandlingsmaterial i avsnitt 3.2 - 3.4 följt av avsnitt 3.5 där en fördjupning om materialens brandegenskaper ges. Avsnitt 4 innehåller en diskussion där fasomvandlingsmaterial analyseras ur ett brandskyddsperspektiv. Fasomvandlingsmaterial är en relativt ny teknologi i byggnader och det är viktigt att föregå utvecklingen med kunskapsöverföring och därmed förhoppningsvis undvika att olämpliga lösningar byggs in som sedan blir mycket svåra att åtgärda. Exempel på sådana problem inom den moderna byggnadstekniska historien är flytspackel med hälsovådligt kasein, radonhaltig blåbetong och fuktkänsliga enstegstätade putsfasader[12], eller för den delen, vad gäller brandsäkerhet, vindar med lättbyggnadsteknik i radhus och flerbostadshus[13, 14].

Syftet med rapporten är att ge verksamma inom den brandtekniska ingenjörsvetenskapen ett kunskapsunderlag om fasomvandlingsmaterial för att kunna göra bedömningar om risker och möjligheter förknippade med denna teknologi.

2 Metod

I rapportens resultatdel, avsnitt 3, finns primärdata från en intervjustudie presenterat i avsnitt 3.1. Sekundärdata (redan existerande data, i form av publikationer) finns presenterade i avsnitt 3.2-3.5. Metoderna för insamlandet av dessa data presenteras i avsnitt 2.1 respektive 2.2.

2.1 Intervjustudie

I detta avsnitt presenteras intervjustudiens metod. Avsnittet är indelat i fyra delar, *Kvalitativ intervjustudie, Respondenter* där urvalet och en presentation av respondenterna ges, *Intervjuernas genomförande* samt *Analys av intervjuerna.*

2.1.1 Kvalitativ intervjustudie

I denna studie har en kvalitativ intervjumetod tillämpats[15]. Frågorna karakteriseras av öppenhet vilket gjorde det möjligt för respondenterna att förutom att svara på frågorna, även utveckla och fördjupa svaren. Genom att ha öppna frågor kunde respondenterna ha mer frihet och formulera sitt svar på det sätt som gör det lättare för dem att förklara ämnet. Detta leder även till att följdfrågor kan ställas och eventuella fördjupningar kan ske. Intervjuaren får även en chans att omformulera frågorna och avgöra vilken ordning frågorna skulle besvaras.

2.1.2 Respondenter

I det kommande avsnittet kommer en presentation av tillvägagångssättet för att finna personer med intresse att ställa upp på intervju angående fasomvandlingsmaterial att presenteras. Ursprungsidén var att undersöka kunskapsutbredningen om fasomvandlingsmaterial. Det insågs dock ganska tidigt att fasomvandlingsmaterialets utbredning var väldigt låg vilket innebar att finna respondenter villiga att ställa upp på intervjun var komplicerat. För att det skulle kunna bli en intervjustudie behövdes respondenter hittas med åtminstone viss kunskap om fasomvandlingsmaterial. Istället infördes vissa frågor i intervjuguiden för att få reda på respondenternas egna uppfattningar om fasomvandlingsmaterials utbredning på marknaden, se Bilaga A Intervjustudie, intervjuguide. Exempelvis: *Finns det mycket kunskap om ämnet på marknaden* eller *ser ni en ökad trend i att använda sig av fasomvandlingsmaterial.* Den sista frågan är dock lite mer personlig än den första och kan besvaras väldigt enkelt men beskriver även respondenternas egna uppfattningar om fasomvandlingsmaterials framtidsutsikter.

2.1.2.1 Urval

68 mejl skickades ut till olika byggfirmor (12), byggindustrier (11), brandkonsulter (6), forskare (4), energibolag (4), Boverket (1) samt tillverkare av fasomvandlingsmaterial (1). Totalen (68) är mer än antalet företag vilket beror på att flera mejl skickades inom samma företag fast till olika individer. Energibolagen är företag som har hand om energifrågor och samhällsutveckling från ett energiperspektiv, därför tillfrågades även dessa.

Första mejlet som skickades till samtliga personer (68) inleddes med att mottagaren ombads att skicka mejlet vidare ifall de kände att ämnet inte var relevant för dem själva. På detta sätt kunde förfrågan spridas vidare och nå flera personer. Samtidigt innebar detta att ursprungsidén om att undersöka kunskapsutbredningen om fasomvandlingsmaterial inte längre var genomförbar utan intervjustudien behandlade snarare respondenternas syn på fasomvandlingsmaterial. När väl personer med kunskap om ämnet visade intresse för att delta kunde den första kontakten skapas. Alla respondenter gick med på muntlig intervju genom videosamtal med undantaget att en av intervjuerna skedde över telefon. Totalt ställde 9 respondenter upp för intervjuer, dessa fördelades enligt: byggfirmor (1), byggindustrier (2), brandkonsulter (2), forskare (3) samt tillverkare/konsult av fasomvandlingsmaterial (1). Vissa respondenter arbetar inom flera områden.

2.1.2.2 Presentation av respondenter

Nedan presenteras de respondenter som medverkade i intervjustudien. Respondenterna presenteras i bokstavsordning med kort information om deras befattningar.

Ian Biggin har arbetat i 50 år inom kemiindustrin inklusive 20 år med fasomvandlingsmaterial för Ciba, BASF och sitt eget konsultföretag (Phase Energy Ltd.). Samtidigt har Ian Biggin assisterat ett företag att utveckla och producera sitt eget sortiment av biobaserade fasomvandlingsmaterial.

Kai Ödeen är professor i byggnadsmaterial på Kungliga Tekniska högskolan. Kai Ödeen har även jobbat med brandfrågor under sin karriär. Kai Ödeen är numera pensionär.

Kjell-Åke Henriksson är civilingenjör inom mekanisk värme- och kylteknik. Han har bland annat arbetat som konsult innan han började arbeta för Skanska installation. Nu arbetar han som installationsansvarig på JM där han kravställer byggnader gällande energi- och installationsfrågor.

Lars-Olof Björkstad är brandingenjör/civilingenjör brandteknik och jobbar på Brandkonsulten AB i Stockholm.

Leif Andersson har jobbat inom byggmaterialbranschen i många år. Han har varit i kontakt med fasomvandlingsmaterial i samband med produktutveckling och har undersökt användningen av fasomvandlingsmaterial som en tänkbar komponent att integrera i produkter och även använda det som en barriär inne i konstruktionen ur energisynpunkt. Leif har även jobbat med brandfrågor under större delen av sin karriär.

Martyn Mclaggan är filosofie doktor inom brandtestning av fasomvandlingsmaterial. Han är även forskningsstipendiat vid University of Queensland och är ansvarig för forskning om brännbara beklädnader och brandprestanda i byggnadsfasader. Han har skrivit arbeten inom fasomvandlingsmaterial i beklädnader såsom gipsskivor samt isoleringsmaterial.

Ojas Chaudhari är filosofie doktor i kemiteknik med fokus på interaktionen mellan olika kombinationer av tillsatser i betong samt cementkemi. Hans forskningsintresse inkluderar bland annat cementbaserade produkter med fasomvandlingsmaterial.

Ola Cederfeldt är representant för Sveriges brandkonsultförening. Ola jobbar som brandingenjör och har mycket erfarenhet inom byggbranschen, försäkringsbranschen samt industrin.

Viktoria Martin är professor i energiteknik på Kungliga Tekniska högskolan, KTH. Hon studerade på KTH som civilingenjörsstudent i kemiteknik och har sedan genomfört en forskarutbildning i USA. Hon har forskat om fasomvandlingsmaterial och har projekt som rör allt från materialen själva och egenskaper hos materialen till att bygga prototyper och utvärdera dem för energilagring.

2.1.3 Datainsamling: intervjuernas genomförande

I det första mejlet som sändes ut beskrevs arbetet kortfattat med en kort presentation av intervjuaren inkluderat, se Bilaga B Intervjustudie, första kontakten. Anledningen till att endast en kort presentation av arbete gavs var för att fånga respondentens intresse att vilja ta kontakt. På grund av fasomvandlingsmaterialens ringa utbredning var det komplicerat att finna respondenter som var villiga att medverka. När respondenterna hade svarat och var beredda på att ställa upp på intervju skickades ett informationsbrev där det beskrevs mer i detalj vad arbetet gick ut på och vilket syfte arbetet hade, se Bilaga C Intervjustudie, andra kontakten. I mejlet skickades även tider ut där respondenterna kunde välja en tid som passade deras scheman bäst. Intervjuerna var planerade att hållas en per dag så att transkriberingen kunde ske direkt efter intervjun samt att samtalet skulle få pågå obegränsat ifall respondenten ville fortsätta.

Beroende på respondenternas kunskap om ämnet varierade inledningen av intervjuerna. För att frågorna skulle bli besvarade och intervjun skulle bli intressant för respondenten används en viss form av standardisering[15]. Frågorna ställdes i en ordning som var passande för respondenten.

På grund av Covid 19-pandemin (våren/sommaren 2020) gjordes intervjuerna främst via datorprogrammet Microsoft Teams. Respondenten fick även godkänna eller inte godkänna inspelning av samtalen. Alla respondenter gick med på att samtalet spelades in vilket gjordes med en annan dator genom Quicktime player.

2.1.4 Databearbetning: Analys av intervjuerna

Intervjuerna ägde rum samtidigt som sökandet efter fler respondenter skedde. Detta på grund av att finnandet av personer med åtminstone viss kunskap om fasomvandlingsmaterial var svårt. Efter varje intervju transkriberades inspelningarna. Med hjälp av datorprogrammet Express scribe transcription software[16] kunde den uppspelade samtalshastigheten sänkas och intervjuerna var lättare att transkribera. När intervjuerna var klara och transkriberingarna var färdiga kunde analysen av intervjuerna påbörjas.

Resultatet analyserades genom att göra en empirisk[17] tematisk[18] analys. Därefter analyserades transkriberingarna och svaren infördes i olika rutnät där varje kolumn är ett potentiellt tema, se Bilaga D Intervjustudie, tematisk analys. Sedan kunde olika teman sammanställas som ett resultat av rutnätsindelningen och kategoriseras under gemensamma huvudteman. När huvudtemana var identifierade studerades transkriberingarna ytterligare en gång för att finna mer information och eventuella citat att ha med i resultatet. Varje huvudtema har olika delteman för att det ska vara lättare att presentera de olika delmomenten samt lättare för läsaren att följa med i resultatet.

2.2 Litteraturstudie

Relevanta publikationer söktes inledningsvis med hjälp av Luleå tekniska universitets databas samt Google. De flesta sökningar innehöll ordet ”PCM” (förkortning för det engelska uttrycket phase change material, dvs. fasomvandlingsmaterial på svenska) tillsammans med olika nyckelord beroende på område, exempelvis tillsammans med ”building” och ”fire” för att söka artiklar om brandegenskaper hos fasomvandlingsmaterial i byggnader. Referenslistorna i identifierade artiklar användes också för vidare sökning av relevanta artiklar. En målsättning var att använda originalforskningspublikationer i så stor utsträckning som möjligt[19] men rapporten innehåller även referenser till översiktsartiklar, böcker, standarder och webbsidor. De presenterade diagrammen med brandförsöksdata i avsnitt 3.5 digitaliserades med hjälp av Plot Digitizer[20] från originalpublikationer. Informationssökningen hade ett brett tekniskt anslag men information om kostnader prioriterades inte eftersom dessa ändras snabbt och flertalet publikationer var flera år gamla.

3 Resultat

Resultatavsnittet inleds med intervjustudien i avsnitt 3.1 och fortsätter sedan med resultaten från litteraturstudien i avsnitt 3.2-3.5.

3.1 Branschinformation: intervjustudie

I detta avsnitt är intervjustudien uppdelad i fem olika huvudteman: Tillämpningsområden, Fasomvandlingsmaterial i byggnader, Materialval, Marknaden och Miljö. Varje tema består av olika delteman där respondenterna tar upp olika aspekter angående fasomvandlingsmaterial.

Syftet är att intervjustudien ska ge en inblick i vad fasomvandlingsmaterial har för ställning ute på fältet. Därför är även respondenternas kunskaper om fasomvandlingsmaterial en viktig del av studien och inte minst deras åsikter för att kunna analysera fasomvandlingsmaterialets utbredning och status i samhället.

3.1.1 Tillämpningsområden

I detta avsnitt sammanfattas respondenternas syn på var fasomvandlingsmaterial används i dagsläget. Frågorna som blir besvarade i detta avsnitt är *Hur skulle du vilja beskriva fasomvandlingsmaterial?* och *Vilka användningsområden finns för fasomvandlingsmaterial?*

Avsnittets syfte är att redovisa fasomvandlingsmaterialets olika användningsområden generellt men fokus kommer senare att vara fasomvandlingsmaterial i byggnader.

Flera av respondenterna nämner att det finns många tillämpningar för fasomvandlingsmaterial. Allt från transporter av medicin och matvaror till textilier i kläder och inredning. Även i processorer till datorer har fasomvandlingsmaterial använts som kylningsapplikatorer för att absorbera värme från komponenterna, nämner **Ian Biggin,** som har jobbat med fasomvandlingsmaterial i 20 år. Fasomvandlingsmaterial är material som genomgår en fasomvandling mellan aggregationstillstånden gas, vätska, fast.

Leif Andersson, som har bred erfarenhet av byggnadsmaterial och **Viktoria Martin,** professor i energiteknik, säger att det är viktigt att först ta reda på ändamålet och vid vilken temperatur fasomvandlingsmaterialet ska verka. Är målet att kyla eller värma? Detta kommer att avgöra vilket fasomvandlingsmaterial som behövs för att tillämpningen ska fungera och vara så effektiv som möjligt.

Fasomvandlingsmaterial har använts sedan länge inom den så kallade kylkedjan. Kylkedjan använder sig av fasomvandlingsmaterial med olika inkapslingsmetoder längs en leveranskedja för att transportera temperaturkänsliga material runt om i världen. Troligtvis den största användningen för fasomvandlingsmaterial är inom kylkedjan, säger **Ian Biggin**. Kylkedjan transporterar allt från vaccin, organ för transplantation, mat och annat som ständigt behöver hållas vid en viss temperatur. I dessa kedjor är det väldigt viktigt att temperaturen hålls konstant och inte över- eller understiger börvärdet, vilket skulle kunna leda till att produkten blir dålig. Vaccin till exempel förlorar i effektivitet om det skulle bli för varmt eller för kallt. Vaccinet ska förvaras mellan temperaturerna 2-8 °C så det är viktigt att det trots yttre påverkan behåller den temperaturen. När det kommer till ämnen som befinner sig vid -20 °C så används torris, vilket är koldioxid i fast form (-78 °C) eller elektriska kylaggregat till exempel vid transport av fryst mat. Problemet med substanser som vaccin är att för dessa fungerar det inte att använda sig av fasomvandlingsmaterialetet is eftersom det smälter vid 0 °C. Därför är andra fasomvandlingsmaterial nödvändiga som har en något högre smälttemperatur. Mycket av maten och medicinen blir bortkastat vilket har lett till att detta är det största området för fasomvandlingsmaterial, säger **Ian Biggin**.

Även inom textilindustrin har fasomvandlingsmaterial gjort ett avtryck genom att det används i madrasser eller kläder vilket både **Ojas Chaudhari,** filosofie doktor i kemiteknik och **Ian Biggin** förklarade. **Ian Biggin** beskrev att mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial kan spinnas in i akryl- eller viskosfiber eller användas i textilbeläggningar. Tyger som innehåller fasomvandlingsmaterial kan sedan användas i sängmadrasser eller andra textilier för att reglera temperaturen i tyget.

Fasomvandlingsmaterial har även använts inom militären. Den amerikanska armén applicerade fasomvandlingsmaterial i soldaternas skottsäkra västar vilket ledde till att soldaterna kunde hantera varmt klimat bättre, säger **Ojas Chaudhari**.

Viktoria Martin och Ian Biggin berättar att fasomvandlingsmaterial även kan användas inom bilindustrin. Där skulle fasomvandlingsmaterial kunna fungera som ett slags värme/kylbatteri då de flesta bilar stängs av när de står stilla och därmed även bilens värmesystem. Fasomvandlingsmaterialets ser då till att bilen håller sig varm/kall. **Ian Biggin** berättade att fasomvandlingsmaterial också används för att kyla litiumjonbatterier i bilar då batterierna är effektivare när de hålls vid en lägre temperatur. Temperaturkontroll är viktigt för litiumjonbatterier eftersom batterierna under vissa omständigheter kan överhettas och termisk rusning (thermal runaway) kan uppstå med allvarliga konsekvenser, förklarar **Ian Biggin**.

I detta avsnitt kommer fortsättningsvis bara resultat om fasomvandlingsmaterial som används i byggnader att presenteras.

3.1.2 Fasomvandlingsmaterial i byggnader

I detta avsnitt kommer respondenternas svar angående fasomvandlingsmaterial i byggnader att redovisas. Två frågor som har ställts är *Varför skulle man vilja använda sig av fasomvandlingsmaterial i byggnader?* och *Vilka användningsområden finns för fasomvandlingsmaterial i byggnader?* Avsnittet är uppdelat i energilagring och lätta respektive tunga konstruktioner.

Respondenterna tar upp hur aggregationstillstånden (fast, flytande eller gas) hos ett ämne kan användas som energilagring. Genom att materialen genomgår en fasomvandling kan energin lagras eller frigöras.

I byggnader, berättar respondenterna, har fasomvandlingsmaterial visat sig vara ett effektivt sätt att lagra energi i lätta konstruktioner. Prefabricerade konstruktioner som ska transporteras, byggs i lätta material vilka tenderar att ha låg värmelagringsförmåga. Här kan fasomvandlingsmaterial vara en ersättning för tunga konstruktioners sensibla värmelagringskapacitet.

3.1.2.1 Energilagring

Nästan alla respondenter har kunskap om vad fasomvandlingsmaterial är och hur fasomvandlingen kan bidra till energieffektivisering i byggnader. Några respondenter kunde berätta att energilagringen kan bidra till att förflytta energin i tiden medan andra respondenter aldrig hade hört talas om fasomvandlingsmaterial innan. De respondenter vars kunskap om fasomvandlingsmaterial var begränsad hade dock erfarenhet av andra byggnadsmaterial exempelvis ytskiktsmaterial som gips, samt isolering.

Viktoria Martin berättar att för att lagra termisk värme och kyla så utnyttjas fasomvandlingar mellan fast form och flytande form. Hon tar även upp att fasomvandlingar mellan flytande form och gasform skapar komplikationer på grund av den stora volymökningen som sker vid fasomvandling till gasform. Ett exempel på fasändringar från flytande form till gasform skulle exempelvis kunna vara att skapa ånga i ett kraftvärmeverk för att sedan spara ångan och låta den rusa genom turbiner när elpriset blir högt eller när det är extra behov av el, informerar **Viktoria Martin**.

"*Oftast när man pratar om PCM*[i] *så handlar det om materialet som går från fast till flytande och från flytande till fast för att lagra värme*". - **Viktoria Martin**

De flesta energisystem i byggnader fungerar bra utan energilagring men skulle kunna fungera bättre med hjälp av denna lagring. Det menar både **Viktoria Martin** och **Ojas Chaudhari**. Enligt dem kan användningen av fasomvandlingsmaterial bidra till att energiåtgången reduceras. Ett exempel är golvvärme som gjuts in i betong där betongen har mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial.

Ian Biggin berättar om ett test som gjordes i ett kontorshus där fasomvandlingsmaterial jämfördes med ett HVAC system. HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning system) är ett system för att skapa en termisk komfort i rummen med hjälp av elektricitet. Kontoret där detta installerades fick plötsligt en ökning av personal vilket innebar att klimatet i byggnaden behövde justeras, förklarar **Ian Biggin**. Fler människor skulle vistas i kontorsbyggnaden, och följaktligen genererades mer värme från både personer, utrustning som datorer och andra värmealstrande komponenter. Testet delade upp sexvåningsbyggnaden i två delar. I första delen, bestående av de tre nedersta våningarna, fanns enbart ett så kallat HVAC system. I de tre översta våningarna kombinerades det befintliga HVAC systemet med ett fasomvandlingsmaterialslager i taket. Vid tillfrågan visade det sig att nästan alla personer i byggnaden föredrog HVAC-systemet med fasomvandlingsmaterialkylningen framför HVAC-systemet utan fasomvandlingsmaterial, berättar **Ian Biggin.** En trolig förklaring till detta, menar **Ian Biggin**, är att HVAC-systemet startar när temperaturen blir för hög och kyler då ner luften inne i byggnaden. När väl komfortgränsen på luftens temperatur är nådd så stängs systemet av. Detta leder till att rummet omväxlande kyls ner och värms upp igen vilket i sin tur ger markanta temperatursvängningar i rummet. Personer som vistades i byggnaden upplevde ett jämnare och stabilt behagligt klimat på de våningsplan där HVAC-systemet var kompletterat med fasomvandlingsmaterial i taket, förklarar **Ian Biggin**.

"Almost everyone preferred the PCM kind of cooling because the HVAC system work in the way that if the temperature gets hot it gets turned on and if it gets cool the system shuts down. So you get these curves like a saw tooth of hot and cold temperature which you do not get from the PCM". - **Ian Biggin**

Enligt **Ian Biggin** så är fasomvandlingsmaterial beroende av luftflödet i rummet för att den ska kunna frigöra sin energi. Energin som frigörs efter att materialet har återgått till sin fasta form kommer behöva överföra sin lagrade värme till något. Detta sker genom konvektion, vilket är en av de tre mekanismerna för hur värme kan transporteras mellan medium. Mest effektivt är om luften som passerar över materialytan är i ständig rörelse och att luften även har en lägre temperatur än materialet. Detta gör att värmeenergin som avges från fasomvandlingsprocessen blir absorberad av luften. På så sätt ökar rummets temperatur. Dessutom, förklarar **Ian Biggin**, sker nedkylningen av ytan snabbare ju lägre den omgivande luftens temperatur är.

Ian Biggin påpekade att funktionen hos fasomvandlingsmaterial inte kan kontrolleras manuellt av de personer som bor eller vistas i rum där fasomvandlingsmaterial finns applicerat i exempelvis väggarna. När fasomvandlingsmaterial ska avge eller absorbera värmeenergi styrs i första hand av den valda smälttemperaturen i materialet och i andra hand av materialets förhållande till klimat, exempelvis luftflöde och temperatur i rummet. Detta, menar **Ian Biggin**, kan leda till problem då i vissa fall temperaturtopparna sker under eftermiddagen när solen strålar som mest. När fasomvandlingsmaterial har smält under morgonen på grund av en varm morgon till exempel, så finns

[i] PCM står för phase change material, fasomvandlingsmaterial.

det inget material kvar som kan fasomvandla och fasomvandlingsmaterialet kommer inte kunna utföra sin funktion under de hetaste timmarna på dagen.

De flesta respondenterna pratade om att det vore bättre att ha fasomvandlingsmaterial i någon form av lagringstank eller isolerad låda där den varma luften utifrån istället kan regleras *ifall* den ska passera fasomvandlingsmaterialet i lådan eller inte. Man kan då bestämma om luften ska kylas via lagringstanken eller passera opåverkad. Det innebär i sin tur att funktionen mellan lagringstanken och luften styrs av exempelvis en termostat som är inställd på en vald temperatur. På så sätt kan fasomvandlingprocessen styras vad gäller om rummet ska kylas/värmas eller inte, menade **Ian Biggin**.

3.1.2.2 Lätta och tunga konstruktioner

Den främsta skillnaden mellan lätta och tunga konstruktioner är att lätta konstruktioner väger mindre än tunga vilket gör att de får olika termiska massor. Termisk massa är ett mått på materialets förmåga att lagra värme. Lätta konstruktioner tenderar att ha låg termisk massa vilket leder till att de värms upp och kyls ner snabbt. Detta är något fasomvandlingsmaterial är specifikt inriktat på att förhindra eller dämpa, säger **Martyn Mclaggan,** filosofie doktor inom brandtestning av fasomvandlingsmaterial. Fasomvandlingsmaterial tenderar att vara väldigt effektiva i välisolerade byggnader/lätta konstruktioner då de kan bidra med termisk lagring och följaktligen öka den termiska massan. Som exempel kan nämnas att fasomvandlingsmaterial blir ineffektivt i en byggnad utan isolering eftersom värmen inte har en möjlighet att stanna kvar i byggnaden. En välisolerad byggnad som exempelvis ett så kallat passivhus, zero emission eller net zero emission byggnad, tenderar att innehålla material med lägre termisk lagringskapacitet än byggnader som är gjorda av betong eller murbruk/tegel det vill säga tunga konstruktioner. Dessa byggnader skulle kunna öka sin termiska lagringskapacitet genom att man applicerar fasomvandlingsmaterial i delar av byggnadsmaterialet.

*"More and more buildings are made in the factories and then shipped out. These are almost always **lightweight constructions** which again 'needs' thermal mass". – **Ian Biggin***

Tunga konstruktioner tenderar att ha väldigt hög termisk massa. Det innebär att de kan lagra energi under längre tid, säger **Kai Ödeen,** professor inom byggnadsmaterial.

Viktoria Martin förklarar att fasomvandlingsmaterialens funktion för energilagring även kan uppfyllas med tjockare väggar i betong eller tegel. Detta innebär att någon form av analys behövs göras ifall det är kostnads- eller energieffektivare att använda sig av fasomvandlingsmaterial.

*"Hela tiden måste man jämföra sig med vad som är effektivast". - **Viktoria Martin***

Ian Biggin ger exempel på hur material med eller utan fasomvandlingsmaterial kan jämföras. Genom att använda sig av en gipsskiva med mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial är det estimerat att en 25 mm gipsskiva med fasomvandlingsmaterial skulle kunna jämföras med cirka 70 mm betong vad gäller termisk energilagring. Skillnaden ligger i *hur* dessa material lagrar värmen. En betongvägg som värms upp kommer att öka i temperatur, vilket **Ian Biggin** omnämner som *sensible heat*. Ju mer värmeenergi som stoppas in i väggen desto högre blir temperaturen. Med fasomvandlingsmaterial är det annorlunda, förklarar **Ian Biggin**. De fungerar på så sätt att temperaturen först ökar i fasomvandlingsmaterialet till dess smältpunkt. Efter det så går all energi åt för att bryta ner bindningarna mellan molekylerna (kristallstrukturen) och omvandlar materialet till flytande fas, vilket innebär att den latenta värmen i materialet ökar och inte temperaturen i själva materialet. Detta sker så länge det finns mer material att fasomvandla. När allt fasomvandlingsmaterial är omvandlat ökar även det i temperatur. **Ian Biggin** nämner då att fasomvandlingsmaterialet kommer att bete sig som en *sensible fluid*.

Ian Biggin säger att i ett betongblock är det de första 30-50 mm som blir uppvärmt vid normal dag- och nattemperatur. Skulle det då bli en längre period med varmt klimat så kommer värmen att tränga djupare in i betongen. Detta leder till att den värme som sitter djupt in i väggen kommer att ta lång tid på sig för att avge denna energi. Det i sin tur betyder att värmen i betongen kommer att stanna kvar där väldigt länge och bete sig som en slags radiator, berättar Ian **Biggin**.

Simuleringar har genomförts för att beräkna temperaturpåverkningar i en byggnad, nämner Ian **Biggin**. Modelleringarna utfördes för termiska förhållanden i Mellanöstern för att beräkna rumstemperaturen. Ventilationssystemen i byggnaden visade att lufttemperaturen i rummet var mellan 19-20 °C. Problemet var att temperaturen på byggnadens fönster uppmättes till nästan 40 °C. Även om det fanns skydd mot den varma instrålningen utifrån så skulle skyddet till slut inte kunna hindra värmen från att komma in. En människokropp uppfattar värmen både från lufttemperatur och strålning vilket upplevs som en diskrepans om skillnaden mellan strålningsuppvärmning på ena sidan kroppen och konvektiv värmning/kylning på andra sidan kroppen överstiger 20 °C .

"In very hot climates I think I prefer to have a high isolated lightweight construction with some method of air cooling driven by solar panels. A lightweight building responds very readily to temperature change; heavyweight buildings do not". - ***Ian Biggin***

3.1.3 Materialval

Detta avsnitt behandlar respondenternas tankar kring val av fasomvandlingsmaterial. Intervjufrågor som tagit upp materialval är till exempel *Vilket fasomvandlingsmaterial används mest på marknaden?, Vad är det som avgör vilket fasomvandlingsmaterial som används i byggnader?* samt *Hur påverkar fasomvandlingsmaterial de olika byggnadsmaterialen?.*

Flera respondenter påpekar att det som avgör vilket fasomvandlingsmaterial som ska appliceras styrs av den temperatur där man önskar att stabilisering sker. De vanligaste fasomvandlingsmaterialen delas in i två olika grupper; organiska och oorganiska material. Fasomvandlingsmaterialens olika egenskaper påverkar dess användningsområden och fungerar olika beroende på hur de kombineras med traditionella byggnadsmaterial.

I sista delstycket berättar även respondenterna att kostnaderna för olika fasomvandlingsmaterial påverkar valet av material samt om fasomvandlingsmaterial är motiverat att använda överhuvudtaget.

3.1.3.1 Val av temperaturer

Det är viktigt att analysera var man ska använda sig av fasomvandlingsmaterial, säger **Martyn Mclaggan**. I varma länder där det är höga kostnader för kylning är det viktigt att ta fram ett fasomvandlingsmaterial som kyler (absorberar värme) på sommaren. Detta kommer att leda till att senare på vintern kommer materialet inte vara lika effektivt och detta måste beaktas i kostnadsberäkningarna. Martin **Mclaggan** nämner som exempel om temperaturen på vintern går ner till 18 °C men på sommaren understiger inte temperaturen 26 °C så är det viktigt att beräkna när det används mest energi; för att värma eller kyla byggnader. Kanske är energiåtgången att värma byggnader inte lika hög vintertid som energiåtgången är att kyla på sommaren. I detta exempel är det viktigare att installera ett fasomvandlingsmaterial som är effektivt dagtid på sommaren och kan reducera energikostnaderna på kylsystemen, än att installera fasomvandlingsmaterial som ger ifrån sig värme nattetid på vintern då det inte är möjligt att ha ett fasomvandlingsmaterial som både smälter vid 18 °C och 26 °C. För att förtydliga, om ett fasomvandlingsmaterial installeras som smälter vid 18-20 °C för att värma på vintern kommer detta material att förbli smält när temperaturen inte understiger 26 °C på sommaren.

Fasomvandlingsmaterial är speciellt bra på att bidra med en rad olika smälttemperaturer vilket blir komfortmålet i rummet/byggnaden, säger **Ojas Chaudhari**.

3.1.3.2 Oorganiska och organiska material

Vatten är av det enklaste materialet för att lagra energi och har används sedan länge som ett material att förflytta energi i tiden, säger **Kai Ödeen** och **Viktoria Martin**. Vatten har använts i många applikationer för att lagra energi. Till exempel i vår varmvattenberedare hemma, säger **Viktoria Martin**. Värt att poängtera att vatten i en varmvattenberedare inte genomgår någon fasomvandling utan att vattnet ökar i sensibel värme. Där lagras energi i form av värme i vatten för att sedan kunna användas utan att energibolagen blir överbelastade när alla ska till exempel duscha en morgon.

"Om vi inte hade en varmvattenberedare så skulle vi behöva en jättestor effektmatning till duschen vilket både skapar konsekvenser i elsystemet och är opraktiskt om alla ska duscha en morgon samtidigt." - ***Viktoria Martin***

Is är det kraftfullaste fasomvandlingsmaterial vi har, säger **Ian Biggin och Leif Andersson**. Begränsningen är att is bara fungerar vid 0 °C. Kanske andra material är mer hanterbara men is har högst latent värmekapacitet jämfört med andra fasomvandlingsmaterial.

"If you have a good paraffin it would give you 200 kJ·kg^{-1} and ice would give you around 334 kJ·kg^{-1}. But ice only works at zero degrees Celsius. The advantage with the other PCMs is that you nearly can get any temperature you want." - ***Ian Biggin***

På grundnivå finns det tre olika sorters material, säger **Ojas Chaudhari**. Organiska, oorganiska och eutektiska vilka knappt används i vanliga applikationer. Oorganiska material brukar vara vattenbaserade salter medans organiska fasomvandlingsmaterial är paraffiner och syresatta biomaterial, berättar **Ian Biggin**. Fettsyror är också ett organiskt material som används som fasomvandlingsmaterial, säger **Ojas Chaudhari**. Oorganiska material brukar inte användas i byggnader, säger **Ojas Chaudhari** och **Viktoria Martin**. Detta på grund av att de är instabila och håller inte prestandan i många cykler vilket blir oacceptabelt i byggnadsapplikationer. Ett annat problem som kan uppstå när salter används som fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterialen är att de medför korrosion. Skulle salterna bli exponerade i byggnadsmaterial kan de till exempel få armeringsjärnen i betongen att rosta. Detta kan ge stora konsekvenser på byggnadens konstruktion.

Implementeringen av organiska material i byggnader kan bli problematisk om den inte genomförs korrekt, säger **Martyn Mclaggan**. Att använda sig av fasomvandlingsmaterial i byggnader, till exempel det organiska materialet paraffin som dessutom är brandfarligt, kränglar till det, säger **Kai Ödeen**. I detta sammanhang var alla respondenter eniga om att implementeringen av brännbara material i byggnader är en risk som måste beaktas. Organiskt material påverkar byggnadsmaterialen på ett negativt sätt ur brandhänseende. De är lätta att antända och kan sprida branden vidare, säger **Martyn Mclaggan**. Paraffin som är ett väldigt vanligt fasomvandlingsmaterial, byggt i många applikationer tenderar att ha lägre latent värmelagring än andra fasomvandlingsmaterial, säger **Ojas Chaudhari**. Enligt vissa prover har paraffinet läckt ut genom fogar och blivit som en oljig film, säger Viktoria Martin.

Fasomvandling används också inom brand och brandskydd, säger **Leif Andersson**. Gipsskivor har till exempel kristallbundet vatten i sig vilket fungerar som en fördröjning genom att ta energi vid uppkomst av brand. Först frigörs det kristallbundna vattnet i gipsskivorna och absorberar en del av värmen och därefter fasomvandlas vattnet till gasform. Detta gör att temperaturen i gipskärnan inledningsvis fördröjs. Processen bidrar till att bromsa effektutvecklingen i det brandutsatta rummet varvid brandkraven uppfylls. Detta är anledningen till att gipsskivor fungerar så bra i brand, säger **Leif Andersson.**

Vissa av de biobaserade fasomvandlingsmaterialen har en benägenhet att göra bättre ifrån sig vid brand än paraffiner, säger **Ian Biggin**. Detta på grund av att de biobaserade fasomvandlingsmaterialen är syresatta och vid samma smältpunkt som paraffin har de en större molekylvikt. Molekylvikten bidrar till att de biobaserade fasomvandlingsmaterialen är mindre flyktiga, dvs. materialets tendens att avdunsta minskar. De biobaserade fasomvandlingsmaterialen består även av syreatomer vilket gör att de tenderar att inte brinna lika bra som exempelvis paraffin, då de biobaserade fasomvandlingsmaterialen delvis redan är oxiderade.

Viktigt att poängtera är att inte alla fasomvandlingsmaterial brinner, säger **Ian Biggin**. Det gäller att veta vilket fasomvandlingsmaterial man pratar om och inte förrän man har testat dessa material kan man veta hur de beter sig vid brand.

"One thing I have found out over the years with many small tests and stuff, is that you cannot know which one is better than the other before you put them in a real fire test situation." - ***Ian Biggin***

3.1.3.3 Applikation/appliceringsmetoder

Det vanligaste sättet att använda sig av fasomvandlingsmaterial är att tillsätta det i byggnadsmaterial. Detta sker genom så kallade mikro- eller makroinkapslingar. På grund av att fasomvandlingsmaterialet genomgår en fasomvandling från fast till flytande kan inte dessa produkter appliceras direkt i byggnadsmaterialen, säger **Ian Biggin**, **Ojas Chaudhari och Leif Andersson**. De har testat att applicera fasomvandlingsmaterial direkt i byggnadsmaterialet alltså utan inkapsling och det fungerar inte. Genom inkapslingen kan materialet fasomvandla till flytande form utan att det skadar eller läcker ut från byggnadsmaterialen. Dessa mikroinkapslingar är väldigt stabila i byggnadsmaterialen. **Ojas Chaudhari** menar att mikroinkapslingarna kommer att påverka byggnadsmaterialen genom att densiteten på byggnadsmaterialen minskar. Detta medför exempelvis för betong att fasomvandlingsmaterial kommer att minska tryckhållfastheten vilket i sin tur påverkar bärförmågan för konstruktionen. **Ojas Chaudhari** säger att det gäller att vara försiktig med var man applicerar fasomvandlingsmaterial.

Fasomvandlingsmaterial kan även appliceras i isoleringen eller nära ett ventilationssystem. **Ojas Chaudhari** kallar detta *indirekt form* alltså att fasomvandlingsmaterialet är fristående och inte inbakat i byggnadsmaterialet. *Direkt form* är mikroinkapslad fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterialet och *indirekt form* är små påsar eller rör med fasomvandlingsmaterial som sitter i konstruktionen vilket kallas för makroinkapslingar.

Martyn Mclaggan har tittat mycket på väggbeklädnader såsom gipsskivor och säger att koncentrationen brukar ligga runt 10-25 % fasomvandlingsmaterial i gipsskivor. Vid högre koncentrationer är gipsskivorna inte stabila och faller isär. För att motverka detta behövs tillsatser för att hålla ihop gipsskivorna vilket kan leda till höga kostnader. Till höga koncentrationer av fasomvandlingsmaterial används koncentrationen 60 % fasomvandlingsmaterial och 40 % polyeten. Dessa material är normalt antingen i en solid ark av plast, eller påsar av fasomvandlingsmaterial som befinner sig i ett tunt plastfilmmaterial, exempelvis BioPCM som är ett sådant märke. Funktionen är densamma men de sitter djupare in i väggarna vilket leder till att värmen tar längre tid att nå fasomvandlingsmaterialet. I de fall då dessa makroinkapslingar består av 60 % paraffin och 40 % polyeten, båda organiska material, blir koncentrationen 100 % kolvätebränsle det vill säga extremt brandfarligt material, påpekar **Martyn Mclaggan**.

Mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial har gjort anspråk på att det är ett A-klassmaterial, vilket innebär att mikroinkapslingarna kan bli termiskt cyklade, alltså kan utsättas för volymexpansion som uppstår vid fasomvandlingen, 10 000 gånger utan att förlora sin prestanda. Det är ekvivalent med cirka 30 år, förklarar **Ian Biggin**. Dessa kapslar är så små, exempelvis 5 µm, att det krävs ett mikroskop för

att se dem. När fasomvandlingsmaterialet i kapslarna är i fast fas ser de ut som frysta ärtor. När materialet sedan fasomvandlas fylls dessa urgröpningar ut och kapslarna expanderar och blir klotformade.

Ojas Chaudhari nämner att för byggnadsmaterial så används inte oorganiska material vilket även **Viktoria Martin** påpekade. Dessa salter är instabila i byggnadsmaterialen på grund av att de inte håller prestandan i många cykler. Detta gäller mest de vattenbaserade fasomvandlingsmaterialen, säger **Ian Biggin**. Vatten är en liten molekyl som nästan kan ta sig igenom vad som helst. Kapslarna är semipermeabla membran vilket innebär att osmos uppstår då vattnet i saltlösningen kan diffundera genom kapselns skal. Det är viktigt att tänka på att dessa mikroinkapslingarna inte beter sig som en plåttermos eller konservburk utan de är väldigt flexibla, förklarar **Ian Biggin**. Detta behöver de också vara för att kunna cykla kontinuerligt. När mikroinkapslingarna expanderar så uppstår det små luckor i skalet på grund av expansionen och volymökningen från fast till flytande fas. Vatten har en väldigt bra förmåga att tränga sig igenom material vilket den kan göra genom dessa luckor som uppstår. Användningen av till exempel natriumacetattrihydrat ($NaC_2H_4O_2 \cdot 3H_2O$) som består av natriumacetat och tre vattenmolekyler vilket är ett vattenbaserat salt, kan då vara problematiskt. Natriumacetattrihydrat smälter vid 58 °C vilket innebär att dessa vattenmolekyler diffunderar genom luckorna som uppstår i mikrokapslingarna. Kvar blir då natriumacetat vilket är ett salt som smälter vid 100 °C. Det är inte längre en salthydrat utan ett salt, påpekar **Ian Biggin**. Paraffin däremot tenderar att stanna kvar i kapslarna.

Det finns även ett annat fenomen som kan uppstå vilket kallas för underkylning, berättar **Ian Biggin**. Underkylning sker när materialets temperatur understiger dess kritiska temperatur från till flytande till fast form. För att ett ämne ska stelna, alltså övergå i fast form behöver den kärnkristalliseras. Kärnkristallisering sker när ett antal av molekylerna i vätskan formar grundstrukturen av en kristall. Föreställ dig en hink med fasomvandlingsmaterial, förklarar **Ian Biggin**. För att fasomvandlingsmaterial ska gå från flytande till fast så behöver det bara kärnkristalliseras i en punkt för att resten av fasomvandlingsmaterial ska stelna/frysa. När detta sker kan resten av vätskan kristalliseras genom att binda sig till den första punkten vilket leder till att innehållet i hinken blir fast form. När dessa fasomvandlingsmaterial blir inkapslade i dessa tusendels millimeter breda kapslar innebär det att det behöver ske en kärnkristallisering i varenda kapsel samtidigt för att produkten ska fungera. Problemet är att de tenderar att inte göra det om det inte tillsätts tillsatser, säger **Ian Biggin**. När fasomvandlingsmaterial underkyls innebär det att det kyls under fasomvandlingstemperaturen utan att det för den skull övergår till fast form.

"If we have a PCM (micro) at 23 degrees Celsius but the crystals will not nucleate until we get down to 11-12 degrees Celsius, then you have a problem because your cold night air which you use to cool down the material is 14-15 degrees Celsius then the PCM will not be frozen and work the next day." - ***Ian Biggin***

3.1.3.4 Kostnader

Kostnaderna för fasomvandlingsmaterial är ett problem som det flesta respondenterna tar upp. **Ojas Chaudhari** menar att den främsta orsaken till oro att använda sig av fasomvandlingsmaterial är kostnaden. Paraffin brukar dock användas oftare på grund av att det är ett billigare material och mer stabilt än andra fasomvandlingsmaterial.

Varje konstruktion behöver sin egen tillämpning för ett termiskt lager. Ska det vara mikro- eller makroinkapslingar och var ska dessa appliceras? Lagret behöver även sina egna specifika fasomvandlingsmaterial, säger **Viktoria Martin**. Ska det vara vattenbaserade salter, paraffin eller biobaserade fasomvandlingsmaterial? Varje tillämpning måste också ha sitt ändamål fastställt och ett fasomvandlingsmaterial framtaget för den specifika smälttemperatur som ska uppnås, så att

tillämpningens ändamål kan uppfyllas. Det har inte kommit till den nivån att det finns nya produkter färdiga att köpa utan allt måste designas från grunden, säger **Viktoria Martin**. Då blir det ganska kostsamma lösningar vilket har påverkat intresset för att gå vidare med lösningarna.

Leif Andersson har gjort en undersökning där man integrerat fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterial och kom fram till att det krävdes en stor mängd fasomvandlingsmaterial för att överhuvudtaget få någon effekt. Denna mängd tar då upp plats istället för isoleringen och den vanliga transmissionen av värme blir högre genom att konstruktionen förlorar sin förmåga att behålla värmen och kylan i byggnaden. **Ojas Chaudhari** menar också att det krävs en stor mängd fasomvandlingsmaterial (15-20%) för att få någon önskvärd effekt vilket kommer att påverka densiteten på materialet. Detta betyder i sin tur att konstruktionen eventuella behöver byggas på ett annorlunda sätt.

Ian Biggin säger att det finns kommersiella produkter på USA:s marknad. De brukar ligga runt 15-20 Euro per kilogram vilket innebär att för en gipsskiva som behöver 2-3 kg fasomvandlingsmaterial per m^2 för att vara effektiv kommer att kosta en del. Det är ett stort marknadsproblem, säger **Ian Biggin**.

"People are unlikely to pay 150 euro extra for a wall inside a room but they might be more interested in a system with a switch on the wall. People are used to pay money for air conditioning systems." - Ian Biggin

3.1.4 Marknaden

Här presenteras respondenternas vetskap om nuläget vad gäller marknaden för fasomvandlingsmaterial, regelverk samt brandskyddsåtgärder. De frågor som hanteras är *kunskap om fasomvandlingsmaterial på marknaden?, vilka regelverk finns angående fasomvandlingsmaterial?* samt *vilka brandskyddsåtgärder finns för fasomvandlingsmaterial?.*

Flertalet respondenter menar att forskning kring fasomvandlingsmaterial ännu är i sin linda. Långsiktiga pragmatiska forskningsstudier angående fasomvandlingsmaterialens livslängd och effektivitet är något respondenterna anser fortfarande saknas. I vissa branscher visar det sig att fasomvandlingsmaterial ännu är ett relativt obekant begrepp.

3.1.4.1 Utspridning/omfattning

I början av 2011 fanns det knappt någon kunskap om fasomvandlingsmaterial i Storbritannien, säger **Martyn Mclaggan**. Efter 3-4 år, det vill säga 2014-2015, började byggarbetare känna till begreppen och börja få erfarenhet att använda materialen. Så på dessa 3-4 år ändrades situationen från ett helt okänt material till ett utbrett material.

*"I was stunned how fast it was." - **Martyn Mclaggan***

Den vanligaste formen är mikroinkapslingar med antingen paraffin eller biovax, säger **Ojas Chaudhari**. Paraffin och biovax är billiga material och mikroinkapslingar är väldigt stabila i betongen. Företag och personer inom byggbranschen brukar dock inte vilja använda sig av fasomvandlingsmaterial. Detta är på grund av att det fortfarande är ett väldigt dyrt material jämfört med konventionellt byggnadsmaterial. **Ojas Chaudhari** menar att det ännu inte är så vanligt att använda sig av fasomvandlingsmaterial men forskare har börjat titta närmare på dessa material de senaste 5-6 åren. Jämfört med andra byggnadsmaterial som finns på marknaden idag såsom betong, trä, tegel och gips som har funnits länge, så är fasomvandlingsmaterial fortfarande i ett tidigt stadie och ett relativt nytt material. **Ojas Chaudhari** påpekar att:

*"It is better to use materials that is long lasting and reduces the load on your heating and cooling system and PCM is THAT material." - **Ojas Chaudhari**.*

Leif Andersson har stött på kommersiella produkter på USA:s marknad men funktionen hos dessa är fortfarande ifrågasatta och priserna är höga. Sett som byggapplikationer är fasomvandlingsmaterial väldigt begränsat och det har inte slagit igenom riktigt ännu, menar Leif Andersson.

"Det finns inte så mycket på marknaden. Kanske ett nytt fasomvandlingsmaterial i framtiden men det är mycket kvar att göra." - ***Leif Andersson***

Inom konsultvärlden är valet av fasomvandlingsmaterial ganska begränsat, säger **Viktoria Martin**. Produkter med fasomvandlingsmaterial har inte kommit till det stadiet där de finns färdiga att köpa utan allt måste göras från grunden. Kunnandet om fasomvandlingsmaterialsprodukter är begränsat men det finns en stor nyfikenhet på vad detta material kan bidra med, säger **Viktoria Martin**. Inte minst vad fasomvandlingsmaterial kan göra extra jämfört vatten. Inom kyltillämpningar såsom fjärrkyla så jobbar fjärrkylsystem med små temperaturintervaller, vilket blir svårt att hantera med ett kallvattenlager. Där skulle fasomvandlingsmaterial kunna vara intressant att använda för att kunna lagra mer värme per volymenhet. All krympning av lager är ett incitament att beakta speciellt i storstäder.

"Tillämpningsområdena där fasomvandlingsmaterial kan konkurrera där då vatten INTE är praktiskt att använda." - ***Viktoria Martin***

Det är viktigt att materialen håller i det långa loppet. Detta kallas för beständighetsfrågan vilket är en viktig fråga enligt **Kai Ödeen**, när man studerar livslängden för byggnader och byggnadsmaterial. Då det inte finns så mycket produkter på marknaden blir det svårt att avgöra vad livslängden är på dessa material. Som **Kai Ödeen** nämnde så är det en viktig fråga att ta upp när nytt material introduceras i byggnader.

Ett problem som **Kjell-Åke Henriksson,** civilingenjör inom mekanisk värme- och kylteknik, tar upp är just livslängden. Det finns alltid dåligt med referenser när det kommer nya produkter till marknaden, speciellt långtidsreferenser. Helst skulle produkten redan varit testad ett par år innan den används, anser **Kjell-Åke Henriksson**. Problemet enligt honom är att när nya byggnader byggs från grunden kan processen ta upp mot 5-7 år innan de är färdigbyggda. Mycket kan hända under dessa år när det gäller byggregler eller samhällskrav på energianvändning. Därför är samarbetet med Boverket kritiskt så att byggföretagen i förväg kan få ta del av nya ändringar i byggnadsreglerna, säger **Kjell-Åke Henriksson**.

"Man lever liksom i en föränderlig värld. Detta kan ses som väldigt stökigt." ***Kjell-Åke Henriksson****.*

Ian Biggin, undervisar företag om fasomvandlingsmaterial. Problemen **Ian Biggin** stöter på är bristande intresse för fasomvandlingsmaterial på grund av dess kostnader. Byggföretag vill hålla sina kostnader nere och detta skapar problem för nya material som introduceras på marknaden.

Båda brandkonsulterna hade inte hört talas om materialet innan intervjun vilket kan tolkas som att kunskapen om fasomvandlingsmaterial inom konsultbranschen är begränsad.

3.1.4.2 Regelverk

Kraven som ställs på materialegenskaper i BBR, Boverkets Byggregler, vid brand tar i första hand hänsyn till personskador, hindrad branduppkomst, säkerställd utrymning och släckningsarbete. I grunden är det samma provningsmetoder och brandregler som gäller oberoende av vilket material som används. Kraven utgår ifrån att uppfylla ett funktionskrav, nämligen att det inte ska sprida branden vidare. Detta har varit grundstrukturen sedan 60-talet, säger **Kai Ödeen**.

Alla material ska även testas och ha en REACH klassning, säger **Leif Andersson** och **Ian Biggin**. REACH är en europastandard för kemikalier där de utvärderas med avseende på vilka verkningar de har på hälsa och miljö. REACH står för Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals[21].

Det finns ingen tvekan om att fasomvandlingen även av den enklaste sort exempelvis vatten som förångas medför stora förändringar på temperaturförloppet inom en konstruktion. Det har man vetat länge, säger **Kai Ödeen**. De material såsom paraffiner som dessutom är brännbara, leder till ytterligare utmaningar. I grunden är det samma provningsmetoder som används när man tittar på flamspridning och brandmotstånd. Det får göras med försiktighet då alla provningsmetoder är framtagna med något känt material i åtanke, säger **Kai Ödeen**. Det kan även komma komponenter med helt nya material. Till exempel fasomvandlingsmaterial. Då är det inte säkert att de gamla provningsmetoderna är direkt tillämpbara, säger **Kai Ödeen**.

Många av dessa fasomvandlingsmaterial är brännbara och att det finns en brandteknisk aspekt i det hela, säger **Kai Ödeen**. När det kommer nya material till marknaden, till och med sådana med radikalt andra egenskaper, så är det samma grundläggande krav vad gäller det brandtekniska, säger **Kai Ödeen**.

Viktoria Martin påpekar att på utvecklingssidan har de arbetat internationellt med samarbetsprojekt som bara handlar om själva fasomvandlingsmaterialen och försökt att få fram en europeisk standard för hur dessa material ska redovisas för sina funktioner och prestanda. Men inte ens det finns, säger **Viktoria Martin**. Det skapar problem för det finns inget sätt att jämföra de olika fasomvandlingsmaterialen med och ingen standard på hur fasomvandlingsmaterialen ska testas, säger **Viktoria Martin**.

Organiska material är det som används mest som fasomvandlingsmaterial i byggnader, säger både **Martyn Mclaggan** och **Ojas Chaudhari**. De organiska materialen genomgår samma process vid testning som alla andra material. Ska de användas i byggnader så behöver de uppfylla brandföreskrifter, säger **Martyn Mclaggan**. När det kommer till brandföreskrifterna så betraktas organiska material som vanliga byggnadsmaterial men det borde inte riktigt vara fallet eftersom de skiljer sig så mycket från de traditionella byggnadsmaterial, menar **Martyn Mclaggan**. Det representerar en brandrisk som inte kännetecknas korrekt med befintliga byggförordningar. Helst bör det finnas en prestandalösning för att korrekt kvantifiera brandrisken och säkerställa att det finns tillräcklig begränsning så att materialen kan användas på ett säkert sätt. Många av de brandregler som finns i dagsläget i kombination med hur byggnader designas, räknar inte med att ha brandfarliga ytskiktsmaterial. Det kan ses på samma sätt som att använda sig av trä som beklädnader. Användningen av trä som beklädnader ändrar hur byggnader beter sig och om brandfarliga material ska användas så behöver det göras med försiktighet. Genom att tillsätta brandfarligt material i befintliga byggnadsmaterial stämmer inte den information som söks i brandföreskrifterna. Problemet är att byggkoderna tillkom för 50 år sedan och de förutsåg inte att fasomvandlingsmaterial, speciellt paraffinvax, skulle finnas i väggbeklädnaden, förklara **Martyn Mclaggan**.

"So you have these very interesting materials but these materials are so different from traditional materials that you require a different approach." - ***Martyn Mclaggan.***

Byggreglerna är utformade att vara materialneutrala, säger **Lars-Olof Björkstad,** civilingenjör i brandteknik. Kraven utgår ifrån att uppfylla ett funktionskrav, att det inte ska bidra till brand. Kraven ställs på ytskikt alltså det som är exponerat utåt medans det som finns inuti väggarna är mindre reglerat. Det är även viktigt att skydda det exponerade materialet vid håltagningar eller liknande, menar **Lars-Olof Björkstad**. Brännbara material används idag också och så länge de skyddas så är det ingen skillnad på vad som är i väggarna, påpekar han. Alla material som är under brandklassningen *D-s2,d0* måste skyddas. Cellplast, med brandklassificering *E* eller *F,* måste exempelvis alltid skyddas. Cellplast får exempelvis inte finnas exponerat någonstans, säger **Lars-Olof Björkstad**. Detta kan då skyddas med hjälp av en tändskyddande beklädnad, exempelvis en impregnerad plywoodskiva. Detta gäller på allt: rör, väggar, tak och golv, förklarar **Lars-Olof Björkstad**. Sen beror även kraven på andra

faktorer, exempelvis verksamhetsklass och byggnadsklass. Villor har inte lika höga krav som till exempel nattklubbar där det förväntas befinna sig ett stort antal personer samtidigt. Desto komplexare byggnad desto högre brandkrav, konstaterar **Lars-Olof Björkstad**. Det är ganska litet reglerat hur större mängder brännbara material hanteras på en byggarbetsplats annat än att lagen mot skydd och olyckor följs för att minska risken att brand uppstår. Problemet är att det inte finns någon klar definition på hur mycket brännbart material som får förvaras på byggarbetsplatsen utan det gäller mer att ha ett sunt förnuft att till exempel inte hantera heta arbeten bredvid brännbara material, säger **Lars-Olof Björkstad**. Ansvaret ligger hos byggherren och entreprenaden att bedriva en bra arbetsmiljö och ha en säker arbetsplats, förklarar **Lars-Olof Björkstad.**

Sett till byggnadslagstiftningen så finns Boverkets Byggregler (BBR) som framförallt reglerar materialegenskaper vid brand. De reglerar vad som får stoppas in i byggnader och hur det isåfall ska skyddas, säger **Ola Cederfeldt,** representant för Sveriges brandkonsultförening. Ytskikt är ett primärt arbetsområde för brandkonsulter. Brännbara material får inte vara exponerade och måste skyddas , menar **Ola Cederfeldt**.

"Det är vid ytskiktet vi ofta rör oss om som brandkonsulter. Det är det som styr mig mest i mitt vardagliga arbete och skulle styra detta för min del." - ***Ola Cederfeldt****.*

Ola Cederfeldt menar att produkterna som kommer till marknaden behöver vara lätta att applicera och ha tydliga monteringsinstuktioner. Ur säkerhetssynpunkt ska det vara enkelt för exempelvis byggarbetare att montera gipsskivor med fasomvandlingsmaterial på ett säkert och korrekt sätt. Problemet är att instruktionerna inte följs, säger **Leif Andersson**.

"Bäst är om man kan ha en produkt som går att använda av sig självt. Att man inte behöver skydda den extra liksom. Finns det en risk för att något kan byggas fel så kommer det ske någon gång." - ***Ola Cederfeldt***

Som brandkonsult menar **Ola Cederfeldt** att en gipsskiva med fasomvandlingsmaterial skulle kunna skyddas med en traditionell gipsskiva men då är det viktigt att sätta skivorna i rätt ordning. Det är bekymmer nog med de olika gipsskivorna som redan finns på marknaden. Det har förekommit att man har satt gipsskivorna fel, alltså att man har satt en brandgipsskiva innerst och sen en vanlig utanpå när det egentligen ska vara tvärtom, berättar **Ola Cederfeldt**.

3.1.5 Miljö

Detta avsnitt kommer ta upp diskussioner där fasomvandlingsmaterial kan vara ett sätt att få Sverige att gå mot ett fossilfritt land. Avsnittet tar upp kort om fasomvandlingsmaterialens potential för ett miljövänlig energianvändning. Vid intervjuerna ställdes inga frågor som direkt rörde miljön utan det kom upp som en följd av samtalen med respondenterna.

Sverige ska till 2050 vara fossilfritt. Det innebär att det redan nu letas efter olika lösningar för att kunna uppfylla detta, säger **Kjell-Åke Henriksson**.

Det har diskuterats väldigt mycket om batteriteknik, säger **Viktoria Martin**. Idag lagras el/energi i batterier för att lösa den dynamik som finns i ett elsystem. Men då Sverige går mot ett fossilfritt samhälle kommer inte sol och vind att räcka för att tillfredsställa våra energibehov. En stor del av el/energibehovet går åt att värma och kyla byggnader. Då blir det ett ökat intresse att kunna jämna ut lastkurvorna som uppstår i elsystemet och där har fasomvandlingsmaterial en god potential genom dess förmåga att lagra värme, säger **Viktoria Martin**.

Miljöaspekten är en viktig fråga angående material. Hur påverkar materialet den omgivande miljön och likaså inomhusmiljön? Detta behöver ses över både på kort och lång sikt, säger **Kai Ödeen**. **Kai Ödeen** pratar om analys av ett materials livscykel, livscykelanalys, och tar upp tanken angående

miljöpåverkan från framställning eller utvinning till återvinning eller destruktion. Det kan vara svårt att veta vad som är början och vad som är slutet. Detta blir väldigt filosofiska frågor och där kan det diskuteras mycket vilket som är rätt eller fel, menar **Kai Ödeen**.

"Om man själv får välja vaggan eller graven så kan man nästan visa att vilket material som helst är bättre än de andra. Det blir man inte klokare av. " - ***Kai Ödeen***

3.2 Grundläggande funktion och egenskaper för fasomvandlingsmaterial

I detta avsnitt, som inleder presentationen av resultat från litteraturstudien, presenteras information om fasomvandlingsmaterialens inneboende egenskaper. Information om fasomvandlingsmaterial som en del av system, t.ex. byggnader, redogörs för i de efterföljande avsnitten.

3.2.1 Latent och sensibel värme

Fasomvandlingsmaterial är benämningen på material som kan användas för att jämna ut och förskjuta temperaturvariationer genom att materialet undergår en fasomvandling. Ett klassiskt exempel på fasomvandling är smältning av is. Så länge vattnet är i fast form, is, stiger temperaturen med 1 ˚C för varje 2,0 kJ värme per kg is som absorberas av isen[1]. När isen värmts upp till smältpunkten 0 ˚C krävs 334 kJ för att omvandla 1 kg is med temperatur 0 ˚C till 1 kg vatten med temperatur 0 ˚C, detta är fasomvandlingen. Därefter krävs 4,2 kJ värme för att öka temperaturen på 1 kg vatten med 1 ˚C. Den *latenta värmen*, i detta fall smältvärmen, är den energi som krävs för att materialet ska ändra *fasen* från en fas till en annan, i detta fall 334 $kJ \cdot kg^{-1}$ för att vattnet ska övergå från fast till flytande form. Den *sensibla värmen*, i detta fall 2,0 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ för is och 4,2 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ för flytande vatten, är den energi som krävs för att ändra *temperaturen* hos materialet.

Den höga latenta värmen hos is stabiliserar temperaturen vid smälttemperaturen, dvs. det krävs relativt mycket energi för att smälta isen och passera nollpunkten, och används t.ex. för temperaturkontroll av livsmedel[22, 23]. Det relativt stora energiutbytet vid fasomvandling gäller även för många andra material än vatten och är orsaken till varför fasomvandlingsmaterial får mer och mer uppmärksamhet i energibesparingssammanhang. Vattnets frys-/smälttemperatur är sällan attraktiv för byggnader, förutom vid exempelvis kyllagring. Det finns dock andra material, t.ex. paraffiner, som kan ha en smältpunkt vid rumstemperatur vilket är mer användbart som stabiliseringstemperatur för t.ex. bostäder.

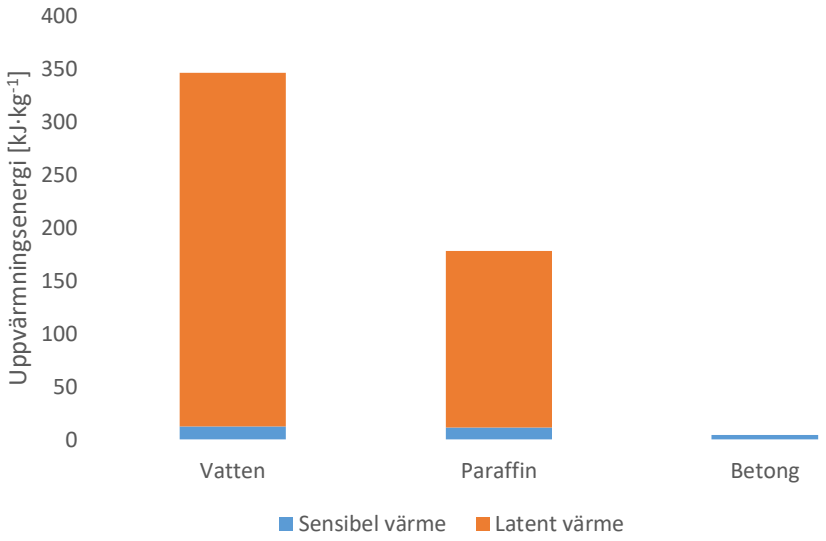
Exempelvis paraffinet n-heptadekan har en smälttemperatur på 22 °C[24] och 1 kg av denna substans tar upp 11 kJ sensibel energi för att värmas från 20 °C till 24 °C, samtidigt som upptaget av smältenergi, dvs. latent värme, är 167 kJ, se Tabell 1. Den totala uppvärmningsenergin är alltså 178 kJ, varav 94 % beror på smältningen, dvs. fasomvandlingen. Detta innebär att vid exempelvis stark solinstrålning fördröjs uppvärmningen pga. att en relativt stor mängd energi krävs för att passera paraffinets smälttemperatur. Det omvända gäller på kvällen när temperaturen sjunker. När temperaturen på paraffinet sjunker från 24 ˚C till 20 ˚C frigörs 11 $kJ \cdot kg^{-1}$ sensibel värme, men så mycket som 167 $kJ \cdot kg^{-1}$ i stelningsvärme (vilken har samma värde som smältvärmen). Nedkylningen av rummet fördröjs alltså vilket leder till minskat energibehov för uppvärmning, på samma sätt som energibehovet för eventuell kylning minskar på morgonen/förmiddagen. Som jämförelse har betong[1] ingen smälttemperatur i det relevanta temperaturområdet och upptaget av energi blir 4 $kJ \cdot kg^{-1}$, sensibel energi, för att värma betongen från 20 ˚C till 24 ˚C.

Den upptagna termiska energin för uppvärmning med 4 ˚C presenteras i Tabell 1 och illustreras i Figur 1.

Tabell 1 Beräkning av värme som upptas för att värma 1 kg vatten, paraffin och betong med 4 °C. För vatten gäller beräkningen mellan -2 °C och 2 °C, medan det beräknade värmeupptaget för paraffin och betong är mellan 20 °C och 24 °C. Det paraffin som använts i exemplet har en smälttemperatur på 22 °C. Det finns dock flera olika paraffiner med olika smälttemperaturer. För betong anges ingen smältvärme, ΔH, eller specifik värme c för flytande fas eftersom betongens smälttemperatur är långt högre än komfortzonen för byggnader.

	c_{fast} [kJ·kg^{-1}K^{-1}]	c_{flyt} [kJ·kg^{-1}K^{-1}]	ΔH [kgkg^{-1}]	$Q_{sensibel}$ [kJ·kg^{-1}]	Q_{latent} [kJ·kg^{-1}]	Q_{tot} [kJ·kg^{-1}]
Vatten[1, 25]	2,0	4,2	334	$2 \cdot 2{,}0 + 2 \cdot 4{,}2 = 12$	334	$12 + 334 = 346$
Paraffin[a]	3,3	2,2	167	$2 \cdot 3{,}3 + 2 \cdot 2{,}2 = 11$	167	$11 + 167 = 178$
Betong[1]	1	-	-	$4 \cdot 1 = 4$	0	$4 + 0 = 4$

[a] n-heptadekan, $C_{17}H_{36}$[24]

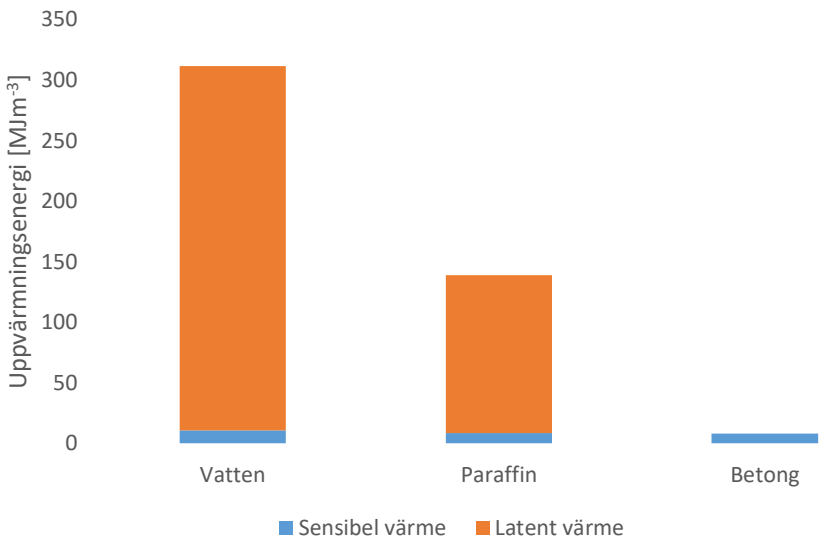


Figur 1 Energiupptag per kg för uppvärmning av vatten från -2 ˚C till 2 ˚C samt för paraffin och betong från 20 ˚C till 24 ˚C.

Betong har högre densitet än vatten och paraffin och i många fall kan det vara mer relevant att jämföra energi per volymenhet istället för per viktenhet. Den upptagna termiska energin per volymenhet presenteras i Tabell 2 och illustreras i Figur 2. Skillnaderna jämfört med Figur 1 blir inte särskilt stora i just detta fall.

Tabell 2 Beräkning av termisk energi per volymenhet som upptas för att värma vatten, paraffin och betong med 4 °C. För vatten gäller beräkningen mellan -2 °C och 2 °C, medan det beräknade värmeupptaget för paraffin och betong är mellan 20 °C och 24 °C. Beräkningarna bygger på resultaten i Tabell 1.

	ρ_{fast} [kg·m^{-3}]	Q_{tot} [kJ·kg^{-1}]	$Q_{tot,\ volym}$ [kJ·m^{-3}]
Vatten[1]	900	346	$900 \cdot 346 = 311 \cdot 10^3$
Paraffin[24, 26]	780	178	$780 \cdot 178 = 139 \cdot 10^3$
Betong[1]	2000	4	$2000 \cdot 4 = 8 \cdot 10^3$



Figur 2 Energiupptag per volymenhet för uppvärmning av vatten från -2 ˚C till 2 ˚C samt för paraffin och betong från 22 ˚C till 26 ˚C.

Exemplen ovan är belysande, men inte särskilt realistiska! Orsaken till detta är flera, men exempelvis är det förstås inte realistiskt att bygga ett hus med paraffin istället för betong. När fasomvandlingsmaterial används i byggnader kapslas det in och blir en delmängd i exempelvis betongkonstruktioner. Fasomvandlingsmaterialen kan försämra byggnadstekniska egenskaper såsom isoleringsförmåga, vilket måste beaktas vid en helhetsanalys av energibudgeten. Samtidigt är en god ledningsförmåga hos fasomvandlingsmaterialen viktig för att allt material ska fasomvandlas vid temperaturvariationer. Flera aspekter behöver alltså beaktas vad gäller användning av fasomvandlingsmaterial. Många fasomvandlingsmaterial, såsom exempelvis paraffiner, är brandfarliga. Brandrisker med fasomvandlingsmaterial är huvudtemat för denna rapport och behandlas delvis i avsnitt 3.2.2 men huvudsakligen i avsnitt 3.5, 4 och 5. Fasomvandlingsmaterial är dock inte enbart en risk i brandsammanhang utan kan dessutom erbjuda möjligheter pga. den stora termiska massa som sådana material erbjuder. Sådana möjligheter diskuteras i avsnitt 4.3.

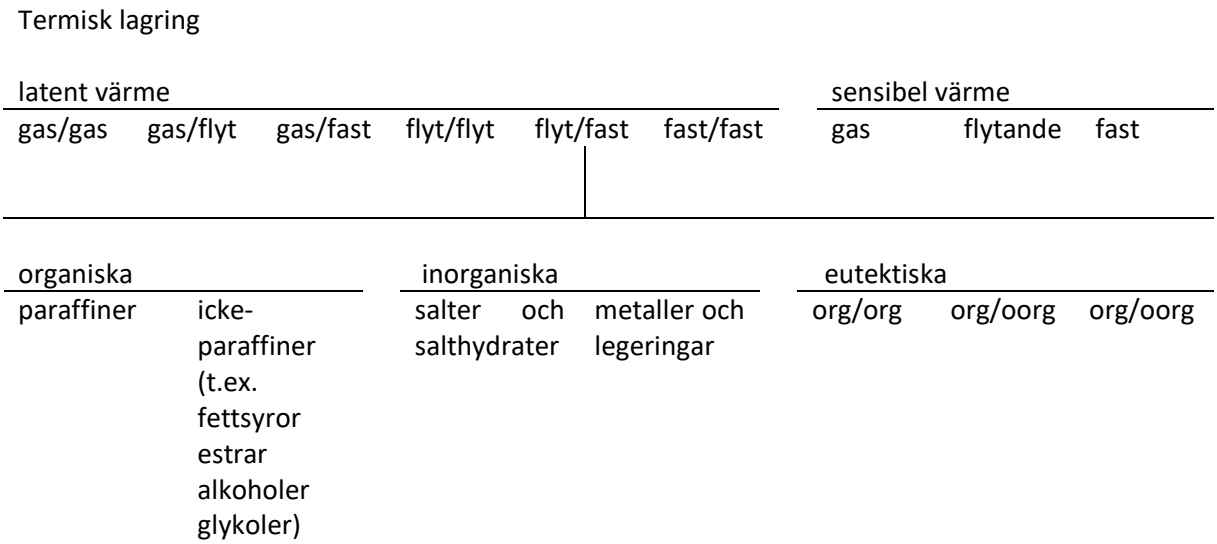
3.2.2 Systematisering av fasomvandlingsmaterial

Fasomvandlingsmaterial används för termisk lagring. Den termiska massan hos materialet har bidrag från den sensibla värmen, värmeåtgången för temperaturökning, men framförallt från den energi som krävs för fasomvandlingen hos materialet, den latenta värmen. Flera olika fasövergångar är tänkbara och vissa är mer användbara för termisk lagring än andra:

gas ↔ gas	Dessa fasomvandlingar är mycket exotiska, involverar låg latent värme och är helt irrelevanta för termisk lagring. Fasomvandlingar gas-gas är associerade med inverkan av Van der Waals-krafter[27].
gas ↔ flytande	Fasomvandlingar gas→flytande benämns kondensation medan omvandlingen flytande→gas benämns förångning (kokning eller avdunstning). Den latenta värmen, ångbildningsvärmen, kan vara betydande. Exempelvis är ångbildningsvärmen för vatten 2260 kJ·kg^{-1}, vilket kan jämföras med smältvärmen 334 kJ·kg^{-1}. Fasövergångar gas↔ flytande involverar dock mycket stora volymförändringar vilket gör dem mindre lämpliga för värmelagring[4].

gas ↔ fast	Dessa fasomvandlingar benämns deposition för gas→fast och sublimering för fast→gas. Sublimeringsvärmen är summan av smält- och förångningsvärmen och därmed relativt hög. Fasövergångar gas↔fast involverar dock mycket stora volymförändringar vilket gör dem mindre lämpliga för värmelagring[4]. Dessutom sker inte deposition/sublimering vid någon väldefinierad temperatur.
flytande ↔ flytande	Fasomvandlingar flytande↔flytande är liksom fasomvandlingar gas↔gas av mer exotisk natur och är irrelevanta för termisk lagring.
flytande ↔ fast	Fasomvandlingar flytande→fast benämns stelning medan omvandlingar fast→flytande benämns smältning. Dessa fasövergångar innebär viss volymförändring men är ändå mycket användbara för värmelagring. Detta är den fasomvandling som är aktuell för de material som behandlas i denna rapport.
fast ↔ fast	Dessa fasomvandlingar är associerade med relativt låg övergångsvärme. De innebär mycket små volymförändringar vilket är fördelaktigt vid applikationer med termisk lagring. Fasomvandlingsmaterial fast↔fast används i viss utsträckning för termisk lagring[28-35], ofta i samband med solenergi, men behandlas inte i denna rapport.

En översikt över material för termisk lagring ges i Figur 3. Den typ av fasomvandlingsmaterial vars brandegenskaper behandlas i denna rapport har smältvärme som latent värme, dvs. fasomvandlingen sker mellan flytande↔fast. Sådana fasomvandlingsmaterial delas traditionellt upp i organiska, oorganiska, och eutektiska.



Figur 3 Olika metoder och material för termisk lagring. Figuren visar enbart passiv, icke-reaktiv, termisk lagring och innefattar inte exempelvis kemisk lagring.

3.2.2.1 Organiska fasomvandlingsmaterial

Organiska material är material som har sitt ursprung från växter eller djur, eller syntetiskt framställda sådana material. Organiska fasomvandlingsmaterial brukar delas in i paraffiner och icke-paraffiner.

3.2.2.1.1 Paraffiner

Ett vanligt förekommande organiskt fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterial är paraffiner vilka är en blandning av alkaner, dvs mättade kolväten, med cirka 20-40 kolatomer[36]. Den generiska kemiska beteckningen är C_nH_{2n+2}, ju högre n desto högre smälttemperatur och smältvärme. Paraffiner är förhållandevis miljövänliga (dock fossila), icke toxiska, och icke korrosiva. De kan dock vara icke-kompatibla med vissa plastmaterial[37] vilken kan orsaka problem vid inkapsling av fasomvandlingsmaterial i polymerbehållare vilket diskuteras mer i avsnitt 3.2.3, se även Figur 5 och Figur 7. De är kemiskt och termiskt stabila[38]. Med termisk stabilitet menas att de kan smälta och stelna utan att dess egenskaper förändras. Nackdelar med paraffiner är att de har en relativt låg värmeledningsförmåga vilket gör att det kan ta lång tid innan fasomvandling sker i hela materialet[39], dessutom sker smältningen inte vid en väldefinierad temperatur eftersom de oftast är en blandning av olika alkaner. De expanderar också relativt mycket vid smältning[40]. Paraffiner framställs från råolja[4] och är brandfarliga[41].

3.2.2.1.2 Icke-paraffiner

Till icke-paraffiner hör organiska fasomvandlingsmaterial som inte består av alkaner. Några förekommande icke-paraffiner är fettsyror, estrar, glykoler och alkoholer.

3.2.2.1.2.1 Fettsyror

Mättade fettsyror har den generiska kemiska beteckningen $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ och består av ett mättat kolväte (eller mer korrekt av en alkylgrupp, vilket är en ett mättat kolväte, alkan, där en väteatom saknas) avslutad med en karboxylgrupp –COOH. Smälttemperatur och smältvärme ökar med ökande n. Exempel på fettsyror som används som fasomvandlingsmaterial är palmitinsyra $CH_3(CH2)_{14}COOH$ och stearinsyra $CH_3(CH2)_{16}COOH$[42]. Fettsyror har flera fördelar som fasomvandlingsmaterial eftersom de har en förhållandevis väldefinierad smälttemperatur, är icke toxiska, icke korrosiva mot metallbehållare (se avsnitt 3.2.3)[42], och ger en relativt låg volymförändring vid fasomvandling[43]. Fettsyror kan framställas från icke-fossila råvaror[7]. Nackdelar med fettsyror är att de kan ge upphov till dålig lukt[44] samt att de tyngre fettsyrorna har relativt hög smälttemperatur[42]. De är även brandfarliga[45].

3.2.2.1.2.2 Estrar

Estrar framställs av syror och har minst en OH-grupp ersatt av en –O–alkylgrupp. Till exempel: estern metylpalmitat $CH_3(CH2)_{14}COOCH_3$, framställs av palmitinsyra och metanol[46] och har en smälttemperatur på 26 °C [47], jämfört med ren palmitinsyra som har en smälttemperatur på cirka 60 °C[42], samt en smältvärme på 215 $kJ \cdot kg^{-1}$ jämfört med 196 $kJ \cdot kg^{-1}$ för palmitinsyra[4, 48]. Estrar är mer stabila[7] och mindre korrosiva än motsvarande fettsyror[47] samt kan framställas från icke-fossila råvaror[7]. Nackdelar med estrar är att de kan ge upphov till dålig lukt, samt att de är brandfarliga. De är dock mindre antändliga än paraffiner[7].

3.2.2.2 Oorganiska fasomvandlingsmaterial

Oorganiska fasomvandlingsmaterial kan delas in i två kategorier: salter och salthydrater, samt metaller och dess legeringar[49].

3.2.2.2.1 Salter och salthydrater

Salter och salthydrater tillhör samma kategori och skillnaden dem emellan är att salthydrater även innehåller vatten.

3.2.2.2.1.1 Salter

Rena salter har generellt alltför hög smältpunkt för att vara ett alternativ som fasomvandlingsmaterial i byggnader.

3.2.2.2.1.2 Salthydrater

Salthydrater kan beskrivas med den generiska formeln AB·n(H_2O) där A är saltets positiva jon och B den negativa jonen. Exempelvis består vanligt bordsalt, NaCl, av en positiv natriumjon och en negativ kloridjon. n är antalet vattenmolekyler. Vattnet är löst bundet till saltet, oftast till den positiva jonen. Vid förhöjd temperatur smälter salthydraten genom att en del eller alla bindningarna mellan saltet och vattenmolekylerna bryts och fritt vatten bildas. Detta är en endoterm process, dvs värme upptas från omgivningen. Det fria vattnet kan då lösa upp de saltmolekyler som förlorat sina löst bundna vattenmolekyler, vilket alltså resulterar i en saltlösning med lösta och separerade positiva och negativa joner. Då temperaturen sjunker sker den omvända processen och energi frigörs när vattenmolekylerna binds till saltmolekylerna, och de lösta jonerna kristalliserar till saltmolekyler.

En nackdel med salthydrater är att saltet och vattnet kan separeras vid upprepad smältning och stelning[50]. Separationen beror på densitetsskillnader mellan det bildade fria vattnet och övrig substans, vilket kan vara det kvarvarande salthydratet som nu har färre än n löst bundna vattenmolekyler, eller rena saltkristaller som inte lösts upp av det fria vattnet[37]. Det kvarvarande salthydratet, eller saltkristallerna, faller till botten av behållaren och separeras från saltlösningen (fritt vatten med joner). När temperaturen sjunker så kan på grund av separationen inte vattnet fullt ut bindas till saltet eller de kvarvarande salthydraten. Mängden ursprungligt salthydrat kan alltså minska vid upprepad smältning och frysning vilket leder till minskad effektivitet[51]. Fenomenet kallas inkongruent smältning.

Salthydrater är också behäftade med underkylning i större grad än många andra fasomvandlingsmaterial. Underkylning innebär att stelning inte sker vid smälttemperaturen utan vid en lägre temperatur[37]. Problemet med underkylning är att stelningen, och därmed frigörandet av den latenta energin, inträffar vid temperaturer lägre än smälttemperaturen, och vid en mindre väldefinierad temperatur, vilket leder till oönskad prestanda hos fasomvandlingsmaterialet.

Salthydrater kan vara mer eller mindre korrosiva mot metall, beroende på kombinationen salthydrat/metall[52]. De har rapporterats vara relativt kompatibla med plast[37, 53].

Fördelar med salthydrater är att de har en hög smältvärme per volymenhet, högre värmeledningsförmåga än organiska fasomvandlingsmaterial samt att volymförändringen vid fasomvandling är liten[37].

Oorganiska salter, t.ex. NaCl, är i allmänhet obrännbara[54, 55]. Vissa salter är starkt oxiderande och kan därigenom orsaka eller accelerera bränder[56, 57]. Jonvätskor, dvs salt som smälter under 100 °C, kan vara antändliga[58, 59] men det är oklart om sådana salter används till salthydrater som fasomvandlingsmaterial. Ingen förstahandsinformation har hittats om brännbarhet hos salthydrater men det är rimligt att anta att hydraterna är mindre brännbara än motsvarande salter.

3.2.2.2.2 Metaller och legeringar

Metaller har generellt alltför hög smältpunkt för att vara ett alternativ som fasomvandlingsmaterial i byggnader[51].

3.2.2.3 Eutektiska fasomvandlingsmaterial

En eutektisk blandning består av två eller flera beståndsdelar och smälter vid en väldefinierad temperatur som dessutom är lägre än smälttemperaturen för någon av de ingående beståndsdelarna. Fördelar med eutektiska fasomvandlingsmaterial är de har en väldefinierad smälttemperatur samt att deras egenskaper kan skräddarsys genom blandning av olika beståndsdelar[60]. Exempelvis har det föreslagits att eutektiska blandningar av fettsyror med tetradekanol kan neutralisera luktproblem, se avsnitt 3.2.2.1.2.1, och samtidigt ge goda energilagringsegenskaper[61]. Brandegenskaperna beror på de ingående beståndsdelarna.

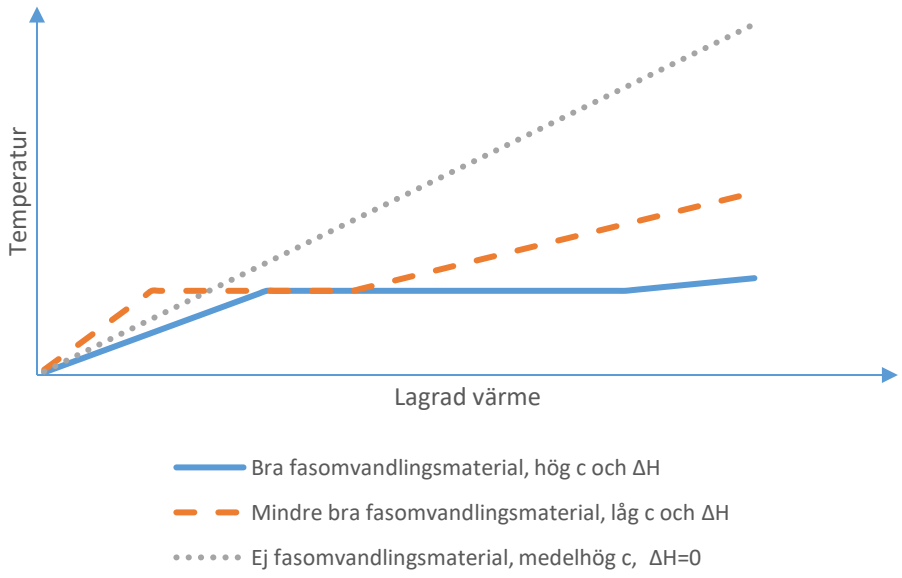
Fasomvandlingsmaterial kan också vara icke-eutektiska blandningar. Sådana blandningar har en mindre väldefinierad smälttemperatur vilket oftast är ofördelaktigt.

3.2.2.4 Jämförelse mellan olika typer av fasomvandlingsmaterial

De viktigaste termiska egenskaperna hos fasomvandlingsmaterial är[49]

- Smälttemperatur $T_{smält}$ som ligger i den komfortzon där temperaturen ska stabiliseras, t.ex. 25 °C.
- Hög latent värme, eller smältvärme, ΔH, så att så mycket energi som möjligt kan lagras. Ofta, t.ex. i byggnader, är smältvärme per volymenhet av större intresse än smältvärme per massenhet.
- Hög termisk konduktivitet k så att värmen snabbt sprids i hela fasomvandlingsmaterialet. Om konduktiviteten är för låg kan det inträffa att allt fasomvandlingsmaterial inte hinner fasomvandlas innan den yttre temperaturpåverkan har vänt. Exempelvis kanske allt material inte hinner smälta på dagen innan temperaturen sjunker igen på kvällen/natten. Detta försämrar fasomvandlingsmaterialets effektivitet.
- Hög specifik värme c. Den specifika värmen bestämmer lagring av sensibel värme före och efter att fasomvandling, t.ex. smältning, har skett. Även om fasomvandlingsmaterialens huvudsakliga funktion är att lagra och avge latent värme så kan även den termiska lagringsförmågan med sensibel värme vara signifikant för energibesparing.

Figur 4 visar schematiskt hur smältvärmen ΔH och specifika värmen c påverkar temperaturförändringen vid lagring av olika mängder energi. Figuren visar också en jämförelse med ett icke-fasomvandlingsmaterial som enbart lagrar sensibel värme. Figuren är fiktiv och motsvarar inga verkliga material.



Figur 4 Skiss för förhållandet mellan lagrad värme och temperatur för olika material. De lutande delarna av graferna motsvarar sensibel värme och de horisontella delarna motsvarar latent värme, ju större bredd på den horisontella delen desto större smältvärme. Samma smälttemperatur har antagits för det bra och det mindre bra fasomvandlingsmaterialet.

Tabell 3 visar termiska egenskaper för ett exempelmaterial för varje typ av fasomvandlingsmaterial som diskuterats ovan. För användning i praktiska tillämpningar behöver dock andra aspekter än enbart termiska beaktas, bland annat brandegenskaper för användning i byggnader. Den sista kolumnen i

Tabell 3 visar kvoten mellan densiteterna i fast och flytande fas. Detta är ett mått på volymförändringen vid fasövergången. Tabell 4 sammanfattar för- och nackdelar med olika typer av fasomvandlingsmaterial. Det är viktigt att poängtera att en sådan tabell är mycket översiktlig och att det finns variationer mellan olika underkategorier (t.ex. paraffiner och icke-paraffiner) samt även variationer mellan olika substanser inom underkategorier.

Tabell 3 Termiska egenskaper hos några exempel på fasomvandlingsmaterial. ”iu” betyder ingen uppgift.

Typ		Exempel	$T_{smält}$	ΔH_{massa}	ΔH_{volym}	k_{fast}	k_{flyt}	c_{fast}	c_{flyt}	ρ_{fast}/ρ_{flyt}
			[°C]	[kgkg^{-1}]	[kgm^{-3}]	[Wm^{-1}K^{-1}]	[Wm^{-1}K^{-1}]	[kJ·kg^{-1}K^{-1}]	[kJ·kg^{-1}K^{-1}]	[ ]
Organiska	Paraffiner	Paraffin C_{13}–C_{24}	23[48]	189[48]	144[48]	0,21[48]	iu	iu	2,04[48]	1,18[48]
	Icke-paraffiner									
	Fettsyror	Palmitinsyra	63[48]	187[48]	159[48]	0,16[62]	0,17[48]	2,2[63]	iu	1,01[48, 64]
	Estrar	Metylpalmitat	29[4]	215[4]	183[4, 65]	iu	iu	iu	iu	iu
Oorg.	Salter	NaCl	800[41]	492[41]	1068[4167]	5[41, 66]	iu	0,853[66]	iu	1,4[67]
	Salthydrater	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	35[48]	281[48]	405[48]	0,514[48]	0,476[48]	1,7[48]	1,95[48]	1,05[48]
	Metaller	Bly	327[67]	23[67]	263[67]	35,3[67]	iu	0,13[67]	iu	1,06[67]
	Legeringar	iu								
Eutektiska	Org-org	Palmitic±stearic	51[39]	160[39]	iu	0,16[51]	iu	iu	iu	iu
	Org-oorg	iu								
	Oorg-oorg	iu								

Tabell 4 För- och nackdelar med olika typer av fasomvandlingsmaterial[49, 51].

	Organiska	Oorganiska	Eutektiska
Fördelar	Stort urval av smälttemperaturer Kompatibelt med många byggmaterial Stabilt Återvinningsbart	Hög volymetrisk latent värme Hög termisk ledningsförmåga Mindre brandfarligt	Väldefinierad smälttemperatur Skräddarsydda termiska egenskaper
Nackdelar	Låg termisk ledningsförmåga Låg volymetrisk latent värme Brandfarligt	Korrosivt mot metaller Fasseparation (inkongruent smältning) Underkylning	Brist på data

3.2.3 Inkapsling

Fasomvandlingsmaterialet behöver i de allra flesta fall inneslutas i behållare. Eftersom fasomvandlingsmaterial ibland befinner sig i flytande fas behövs behållarna för att materialet inte ska läcka ut i omgivningen, men även för att omgivningen inte ska kontaminera fasomvandlingsmaterialet[4]. En annan orsak till att materialet behöver inneslutas är för att det inte ska skada det omgivande materialet. Exempelvis kan salthydrater vara korrosiva mot metall men även andra exempel på inkompatibilitet mellan fasomvandlingsmaterialet och dess omgivning finns. Figur 5

visar hur cellplast brutits ner efter 10 minuters exponering av en ester som används som fasomvandlingsmaterial[68].

Figur 5 Nedbrytning av cellplast efter 10 minuters exponering av 1 dl av en ester som används som fasomvandlingsmaterial[68].

Materialet som behållarna är tillverkade av, dvs. skalet, måste också vara kompatibelt med fasomvandlingsmaterialet. Behållarna behöver möjliggöra den volymförändring som sker när fasen hos fasomvandlingsmaterialet skiftar mellan fast och flytande. Slutligen behöver dessa aspekter beaktas för användning under lång tid, med många fasomvandlingar. Om ett fasomvandlingsmaterial förväntas smälta och stelna en gång per dygn så innebär detta ungefär 10 000 fasomvandlingscykler under en livstid på 30 år.

Inneslutning av fasomvandlingsmaterial kan delas in i tre kategorier: mikroinkapsling, makroinkapsling, och övriga metoder.

3.2.3.1 Mikroinkapsling

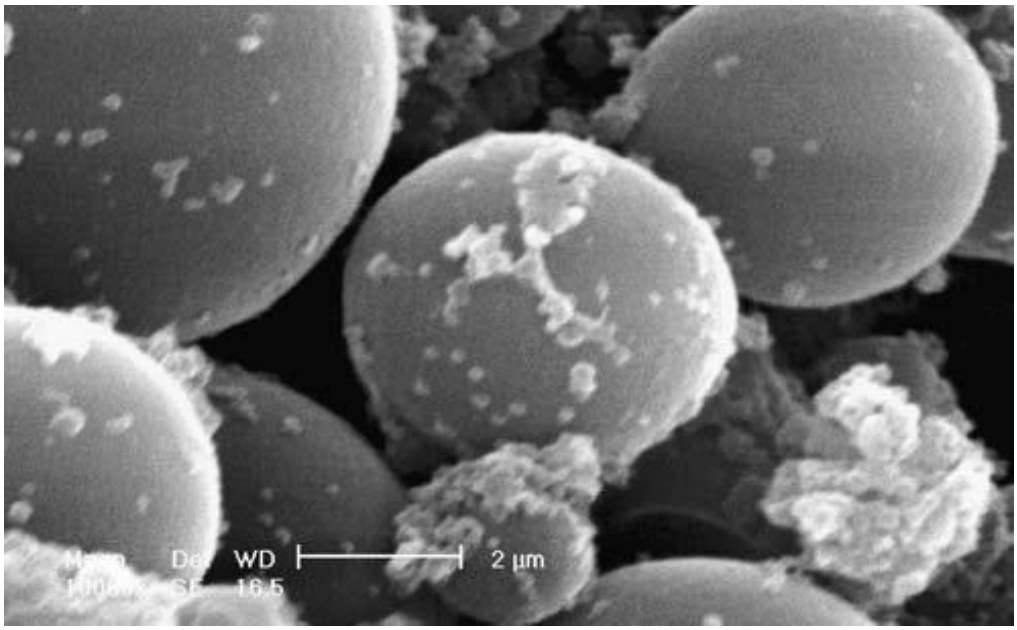
Mikroinkapsling innebär att fasomvandlingsmaterialet, i form av partiklar eller droppar, kapslas in i små behållare med diameter i storleksordningsintervallet mikrometer till millimeter.

Genom att kapsla in fasomvandlingsmaterialet i små kapslar ökar yt/volym-förhållandet och därför förbättras värmeöverföringen[69, 70] vilket innebär att en större del, eller allt, fasomvandlingsmaterial i exempelvis en uppvärmd vägg kan hinna smälta, jämfört med om ett fasomvandlingsmaterial med låg termisk ledningsförmåga hade lagrats i större behållare, då kanske bara delar hade hunnit värmas upp och smält innan temperaturen återigen sjunker.

En nackdel med att kapsla in fasomvandlingsmaterialet i mycket små volymer är att problem med underkylning kan förstärkas[71]. Stelning påbörjas vid små kristaller eller kärnor i substansen. Om sådana saknas eller inte hinner bildas fördröjs stelningen vilket är detsamma som underkylning. Ju mindre kapslar desto större är sannolikheten att sådana kristaller eller kärnor saknas, vilket innebär att sannolikheten för underkylning ökar.

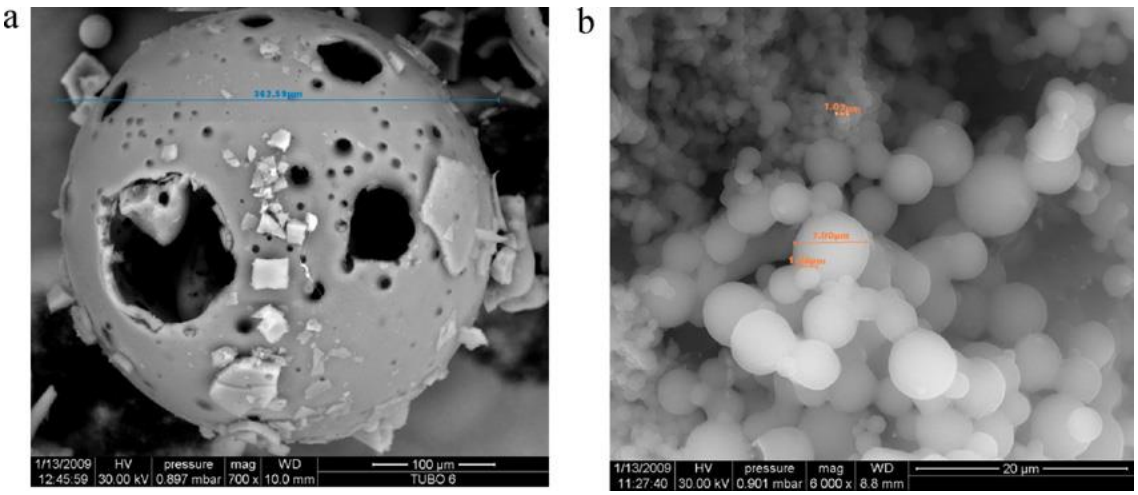
En annan nackdel med mikroinkapsling är att det leder till lägre total smältvärme pga. den relativt stora tillsatsen av skalmaterial, som inte bidrar med smältvärme[51].

Materialet som behållarna är tillverkade av, dvs. skalet, måste också vara kompatibelt med fasomvandlingsmaterialet. Vanliga behållarmaterial är polymerer och SiO_2[51, 71]. Ett exempel på mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial visas i Figur 6[72].



Figur 6 *Mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial, huvudsakligen bestående av alkoholen dodekanol $C_{12}H_{26}O$ (smälttemperatur 24 °C) omslutet av ett skalmaterial av melamin-formaldehydharts[72].*

Figur 7 visar hur ett organiskt fasomvandlingsmaterial är kompatibelt med ett skal av polyeten-EVA (bild b, EVA står för etenvinylacetat) men inte kompatibelt med ett skal av polystyren (bild a)[73].

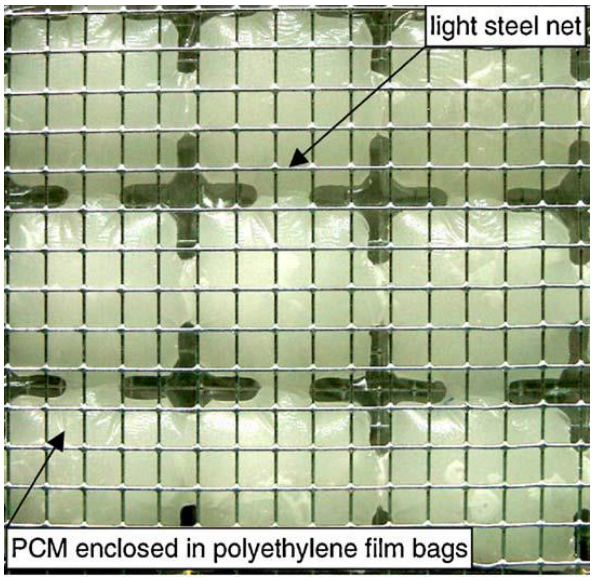


Figur 7 Inkapsling av fasomvandlingsmaterialet Rubitherm®RT27 (paraffin[74]) *inkapslat i: a) polystyren och b) blandning av polyeten och EVA (etenvinylacetat). Bilderna visar mikrokapslarna efter 3000 cykler av smältning/stelning och tydliggör vikten av att fasomvandlingsmaterialet och skalmaterialet är kompatibla. I bild a) har skalet förstörts och fasomvandlingsmaterialet läcker ut. Observera att det är olika förstoring på bilderna[73].*

3.2.3.2 Makroinkapsling

Makroinkapsling innebär att fasomvandlingsmaterialet kapslas in i större behållare, typiskt 1 cm eller större[51]. En nackdel med makroinkapsling är att kapslarna blir känsliga för skador. Om en behållare skadas kan fasomvandlingsmaterialet i dess flytande form läcka ut och orsaka skada på omgivningen,

samt reducera temperaturstabiliseringen. Ett annat problem som kan uppstå som följd av makroinkapsling är relaterat till den relativt låga termiska konduktiviteten hos många fasomvandlingsmaterial. Detta yttrar sig i att smältning och stelning endast hinner ske vid behållarnas kanter, utan att allt material fasomvandlas, vilket reducerar effekten hos fasomvandlingsmaterialet[51]. Figur 8 visar ett exempel på makroinkapslat fasomvandlingsmaterial: paraffin inkapslat i polyetenpåsar[75].



Figur 8 Makroinkapslat fasomvandlingsmaterial, i detta fall paraffin inkapslat i påsar av polyeten[75]. Påsarna har storleken 4 cm × 4 cm och är 1,5 cm i tjocklek.

3.2.3.3 Övriga metoder för applicering av fasomvandlingsmaterial

I detta avsnitt presenteras ytterligare tre metoder för inkapsling varav den ena, nanoinkapsling, är mycket lik mikroinkapsling men sorterar i forskningslitteraturen under en egen kategori.

3.2.3.3.1 Nanoinkapsling

Nanoinkapsling innebär som namnet antyder mycket små kapslar, ännu mindre än för mikroinkapsling. Fördelen med att ytterligare minska kapselstorleken är framförallt att värmeöverföringen till fasomvandlingsmaterialet blir ännu mer effektiv. Storlekarna på kapslarna är oftast under 1 µm och skalmaterial som förekommer är SiO_2 och PMMA (polymetylakrylat, dvs. akryl, eller plexiglas)[76, 77]. Nanoinkapsling förefaller vara i forskningsstadiet med få eller inga produkter på marknaden[51].

3.2.3.3.2 Formstabilisering

En relativt ny teknik är formstabila fasomvandlingsmaterial. I dessa material blandas fasomvandlingsmaterialet med en polymer, t.ex. paraffin med polyeten, och det resulterande skelettet bestående av polymeren kapslar in fasomvandlingsmaterialet även i dess flytande fas. Fasomvandlingsmaterialet kan dock diffundera till ytan på de fasstabiliserade blocken, och sedan förloras från ytan[78]. Ett foto på formstabiliserat fasomvandlingsmaterial visas till höger i Figur 16.

3.2.3.3.3 Impregnering

Det enklaste sättet att använda fasomvandlingsmaterial är att impregnera det i porösa material såsom gips eller betong, utan någon föregående inkapsling[60, 79]. I en översikt över ett stort antal kommersiella byggprodukter med inslag av fasomvandlingsmaterial visade det sig att inga produkter tillverkats med impregnering. Detta tros bero på problem med läckage av smält fasomvandlingsmaterial om materialet inte kapslas in[51].

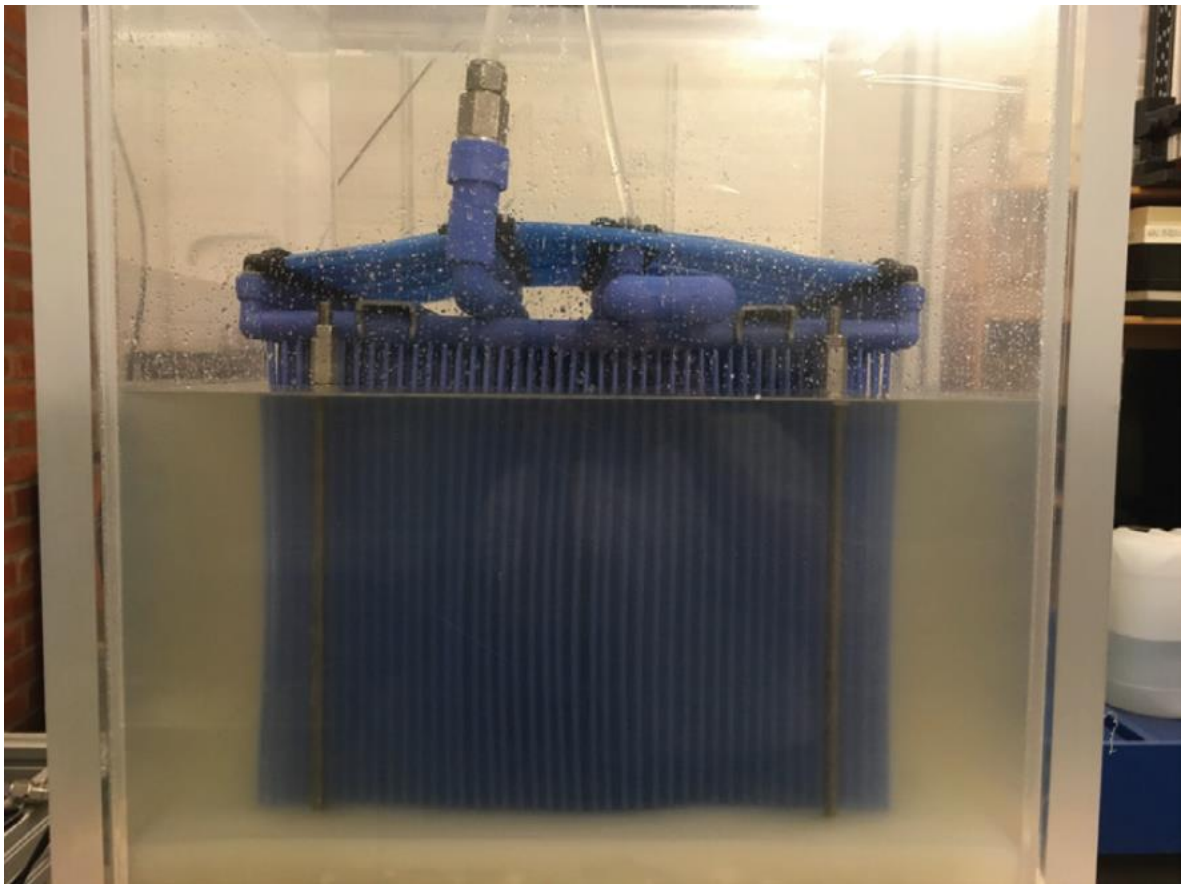
3.3 Översikt av användningsområden för fasomvandlingsmaterial

3.3.1 I byggnader

Fasomvandlingsmaterial för värmelagring i byggnader kan appliceras direkt i byggmaterialet eller i separata tankar. Fasomvandlingsmaterial i byggmaterial behandlas mer utförligt i avsnitt 3.4 och de utmaningar sådan användning medför för brandsäkerheten behandlas i avsnitt 3.5.

Ett exempel på separat tank med fasomvandlingsmaterial visas i Figur 9 där makroinkapslat paraffin lagras i en behållare som utgör en del av byggnadens ventilationssystem[80]. Figur 10 visar en plexiglastank fylld med salthydrat. Bilden kommer från en studie vid Chalmers tekniska högskola där fasseparation och underkylning hos termisk lagring med salthydrat studerades. Studien visade att betydande fasseparation uppstår efter upprepad smältning/stelning vilket ledde till försämring av systemets prestanda, se även avsnitt 3.2.2.2.1.2. Studien utgör en del av ett pilotprojekt för användning av fasomvandlingsmaterial för att avlasta kylsystemet i en byggnad vid Chalmers[9].

Figur 9 Cylindrisk behållare fylld med paraffin makroinkapslad i sfärer med 50 mm diameter. Cylindern integreras i ventilationssystemet så att luften flödar genom behållaren[80].

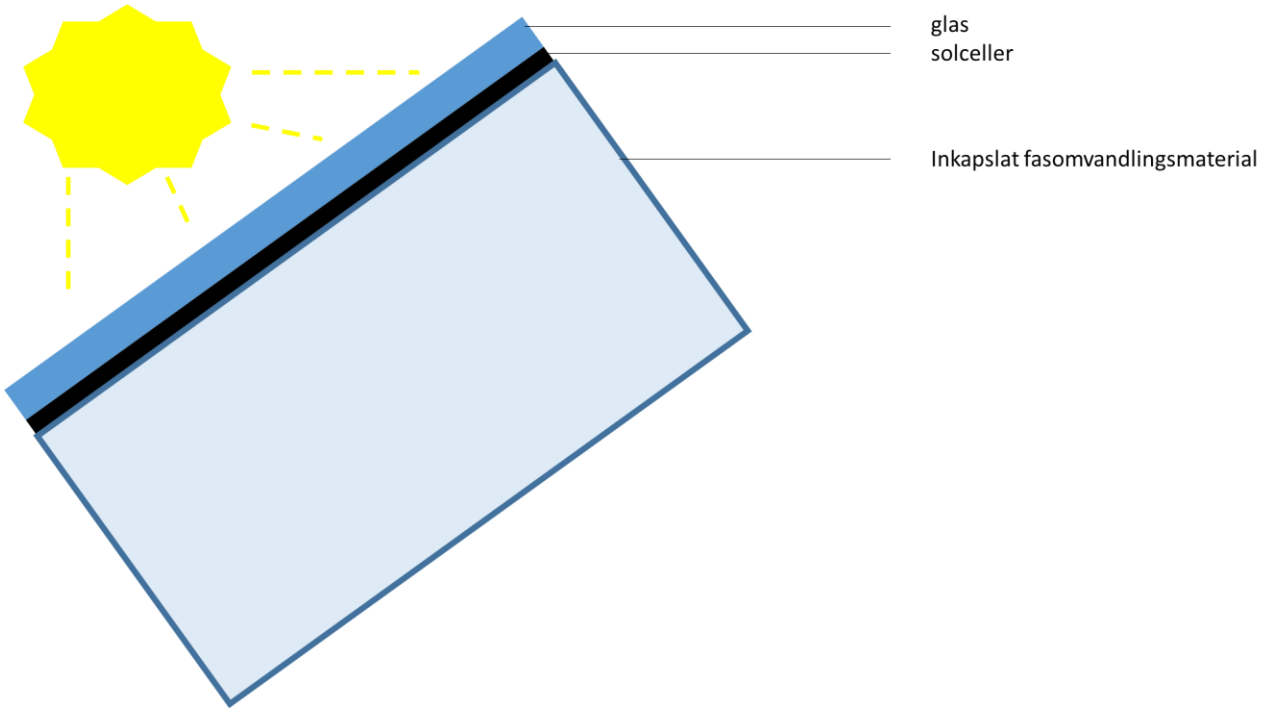


Figur 10 Plexiglastank fylld med 168 kg salthydrat som fasomvandlingsmaterial. Genom den blå värmeväxlaren flödar vatten[81].

3.3.2 Solpaneler

Solpaneler för elproduktion absorberar upp till 80 % av den inkommande solstrålningen[82]. Endast en mindre del av denna energi omvandlas till elektricitet och resten sprids som värme i solpanelerna. Förhöjda paneltemperaturer leder till minskad effektivitet i omvandling från solstrålning till elektricitet och förkortar dessutom panelernas livslängd. Fasomvandlingsmaterial är en av flera metoder för stabilisering av solpanelernas temperatur[4, 82]. I studier av kombinerade paneler med solceller (elproduktion) och termiska solfångare (produktion av varmvatten) har användning av paraffin visat sig kunna förbättra det elektriska utbytet med 9 %[83]. Principen för temperaturkontroll med fasomvandlingsmaterial visas i Figur 11. Värt att notera ur ett brandskyddstekniskt perspektiv är att tidigare studier om solpaneler och brandsäkerhet har konstaterat att mängden brännbart material är relativt litet i solpaneler[84, 85]. Om stora mängder paraffin adderas till panelerna på tak eller fasader så ökar dock brandlasten väsentligt. I dagsläget finns dock få eller inga solceller med fasomvandlingsmaterial på marknaden utan sådana lösningar återfinns snarare inom forskningsprojekt. Vad gäller termiska solfångare med fasomvandlingsmaterial har några enstaka kommersiella produkter nått marknaden sedan 80-talet[ii].

[ii] Kovács, Peter, personlig kommunikation, 2020-08-28



Figur 11 Skiss över solpanel utrustad med fasomvandlingsmaterial för att kontrollera temperaturen.

3.3.3 Exempel på övriga användningsområden

Fasomvandlingsmaterial används i en uppsjö av tillämpningar där stabilisering av temperatur är önskvärt eller nödvändigt. Några ytterligare exempel är:

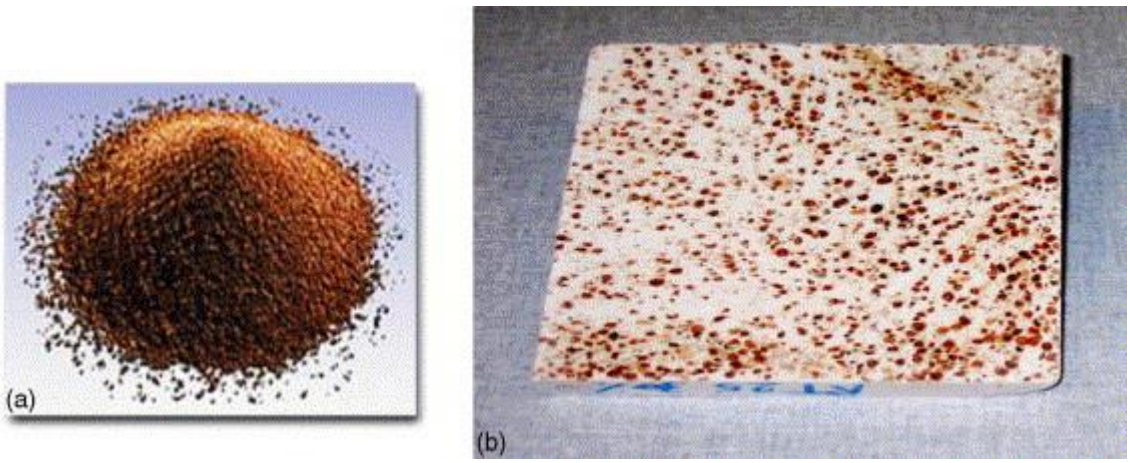
- Solvärmeanläggningar (uppvärmning av vatten)[86, 87]
- Kyltransporter och lagring av livsmedel[22, 23]
- Kyltransporter och lagring av organ eller medicin[88]
- Kylning av elektronik[89-91]
- Kläder för skydd mot kyla[92, 93]
- Kläder för skydd mot värme (räddningsställ)[59, 94]

3.4 Fasomvandlingsmaterial i byggmaterial

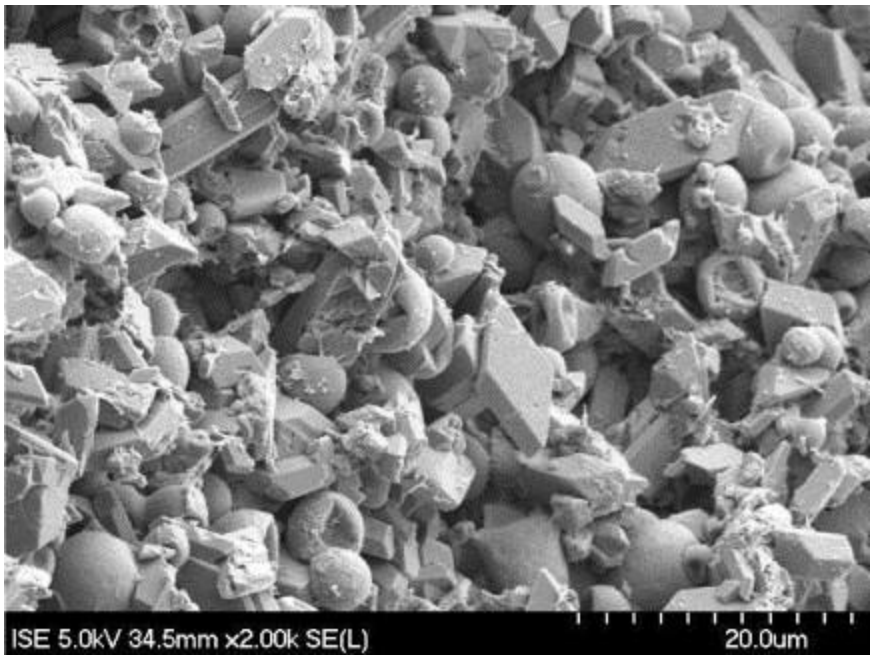
Fasomvandlingsmaterial har sedan mycket länge använts i byggnader som byggmaterial, nämligen is i igloor[7]. I en mer närliggande tid så utfördes ett av de första dokumenterade försöken med fasomvandlingsmaterial i en byggnad utanför Boston 1948, inom ramen för ett projekt vid MIT, då en salthydrat användes för bättre utnyttjande av solenergin[4, 95]. Salthydraten visade sig dock korrosiv vilket gjorde att behållaren gick sönder och korrosiv salthydrat läckte ut. Intresset för fasomvandlingsmaterial var sedan relativt lågt men vid 70- och 80-talet ökade forskning och utveckling bland annat pga. energikrisen[4, 96, 97]. I en omfattande översikt från 2015 listades 18 leverantörer från Europa och USA som producerar kommersiella byggmaterial med tillsats av fasomvandlingsmaterial[51]. I samma studie listades 11 producenter av kommersiellt fasomvandlingsmaterial som införlivas i byggmaterialet. För byggprodukterna var det i översikten ungefär lika vanligt med organiska som oorganiska fasomvandlingsmaterial medan en marknadsöversikt från 2013[98] visar att organiska fasomvandlingsmaterial då hade den största marknadsandelen baserat på kostnader, medans oorganiska fasomvandlingsmaterial hade den största marknadsandelen baserat på volym. Detta berodde på lägre pris hos oorganiska fasomvandlingsmaterial. Den totala världsmarknaden för fasomvandlingsmaterial uppskattas vara cirka 40 miljarder kronor 2024[99].

Det typiska användningsområdet för fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterial är att det ska smälta under dagen och stelna under natten, i syfte att minska energiförbrukning, jämna ut temperaturvariationer och förskjuta den maximala energiförbrukningen till tider då energikostnaden är relativt låg. När byggmaterialet med fasomvandlingsmaterial används som passiv lagring i huset kan det exempelvis hända att inte hela fasomvandlingsmaterialet stelnar[51]. Detta reducerar väsentligt effektiviteten och aktiv kylning eller värmning av byggmaterialet med forcerad konvektion kan då användas för att fasomvandlingen skall fullbordas[100].

Fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterial kan införlivas i väggar, tak, eller golv och appliceras i isolering, absorberas i porer i betong, impregneras i gipsskivor eller blandas in i puts eller bruk[101]. Förutom i byggnadsmaterial används det även i värme- och kyllagringstankar såsom i Figur 9 och Figur 10 men även i inredning såsom exempelvis persienner[4, 102] och för den delen även fönster, även om användningen i fönster ännu är relativt begränsad pga. praktiska problem med exempelvis transparens[103]. Användningen i själva byggmaterialet har visat sig vara det mest intressanta användningsområdet för fasomvandlingsmaterial i byggnader och materialet implementeras ofta på byggnadens insida. Många experimentella studier har gjorts som visar att detta förbättrar inomhusklimat såväl som energieffektivitet[102]. Spån- och gipsskivor lämpar sig väl för inkapsling av fasomvandlingsmaterial eftersom de är relativt billiga och används i stor utsträckning i innerväggar. Ett exempel på gipsskiva med inblandning av fasomvandlingsmaterial visas i Figur 12 medan Figur 13 visar mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial inbäddat bland gipskristaller. Termiska utvärderingar har gjorts av gipsskivor med inkapslat fasomvandlingsmaterial. I ett försök med 20 % inkapslat paraffin i gipsskivor blev maxtemperaturen 5 ˚C lägre och mintemperaturen 1 ˚C högre jämfört med referensbyggnaden, med tidsförskjutningar på 2 respektive 3 timmar för max- och mintemperatur[104].



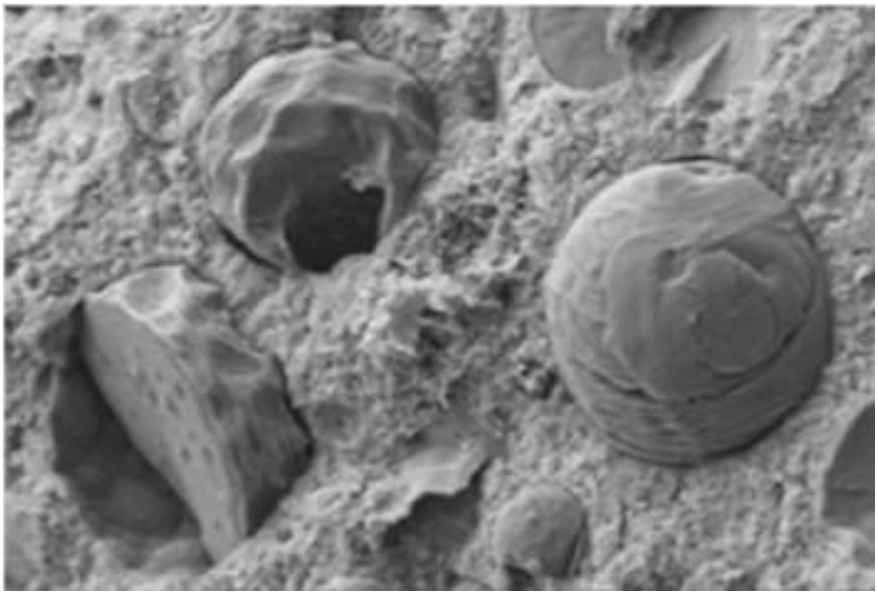
Figur 12 Vänster: Mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial till vänster. Fasomvandlingsmaterialet är levererat från företaget Rubitherm och består av 35 % paraffin. Höger: Gipsskiva med inblandning av kapslarna till vänster.



Figur 13 Elektronmikroskopisk avbildning av 8 µm sfäriskt mikroinkapslat fasomvandlingsmaterial spridda bland gipskristaller[105].

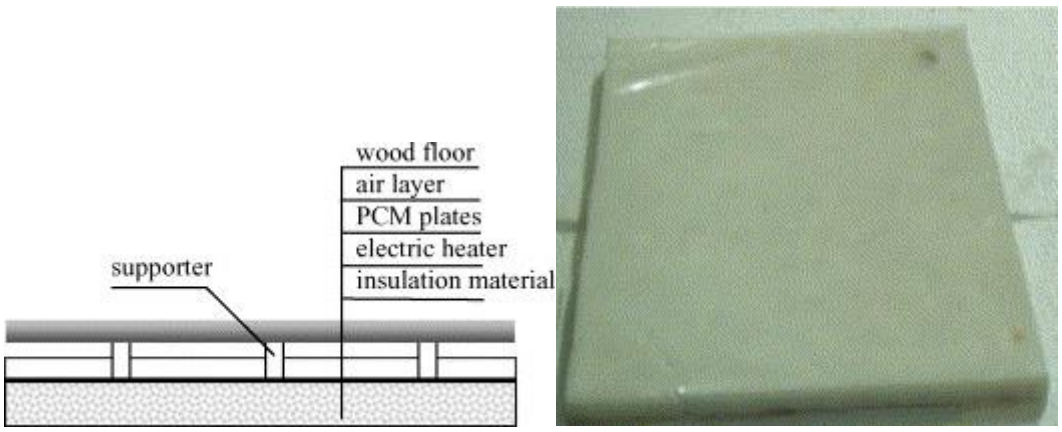
I en jämförelse mellan två betongbyggnader där den ena byggnaden hade en tillsats av 5 % fasomvandlingsmaterial i betongen blev maxtemperaturen 1 ˚C lägre och mintemperaturen 2 ˚C högre jämfört med referensbyggnaden, och en tidsförskjutning på 2 timmar åstadkoms mellan respektive max- och mintemperaturer[106]. Exempel på testbyggnader för studier av fasomvandlingsmaterial visas i Figur 14[107] och en förstoring av paraffinmikrokapslar i betong visas i Figur 15[108].

Figur 14 Testbyggnader för studier av fasomvandlingsmaterial [107].

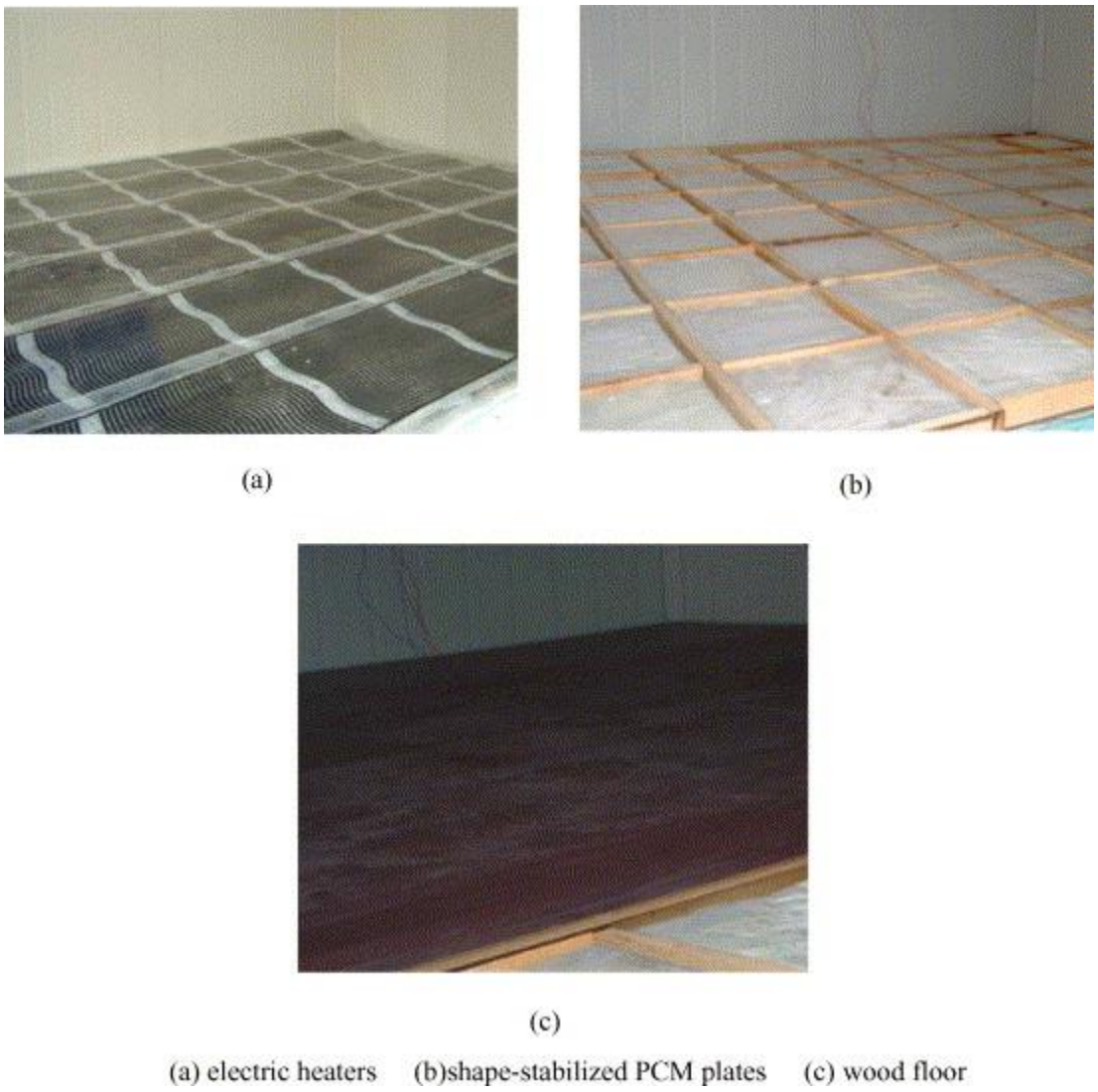


Figur 15 Betong med mikroinkapslat paraffin, med delvis trasiga mikrokapslar. Kapslarnas diameter är cirka 5 µm[108].

Även innertak och golv används i stor utsträckning tillsammans med fasomvandlingsmaterial eftersom de har stora exponerade ytor. I takapplikationer används ofta ett innertak där forcerad konvektion används för att aktivera luftflödet på båda sidor av takplattorna med fasomvandlingsmaterial[4, 109]. För golvapplikationer kan den termiska lagringen vara passiv som exemplet i Figur 16 och Figur 17 nedan[110]. I exemplet så används formstabilisering som inkapslingsteknik, se avsnitt 3.2.3.3.2. Även för golv kan aktiva system med forcerad ventilation användas. Exempelvis är det makroinkapslade paraffinet i Figur 8 avsett att monteras i ventilationskanaler under golvet[75]

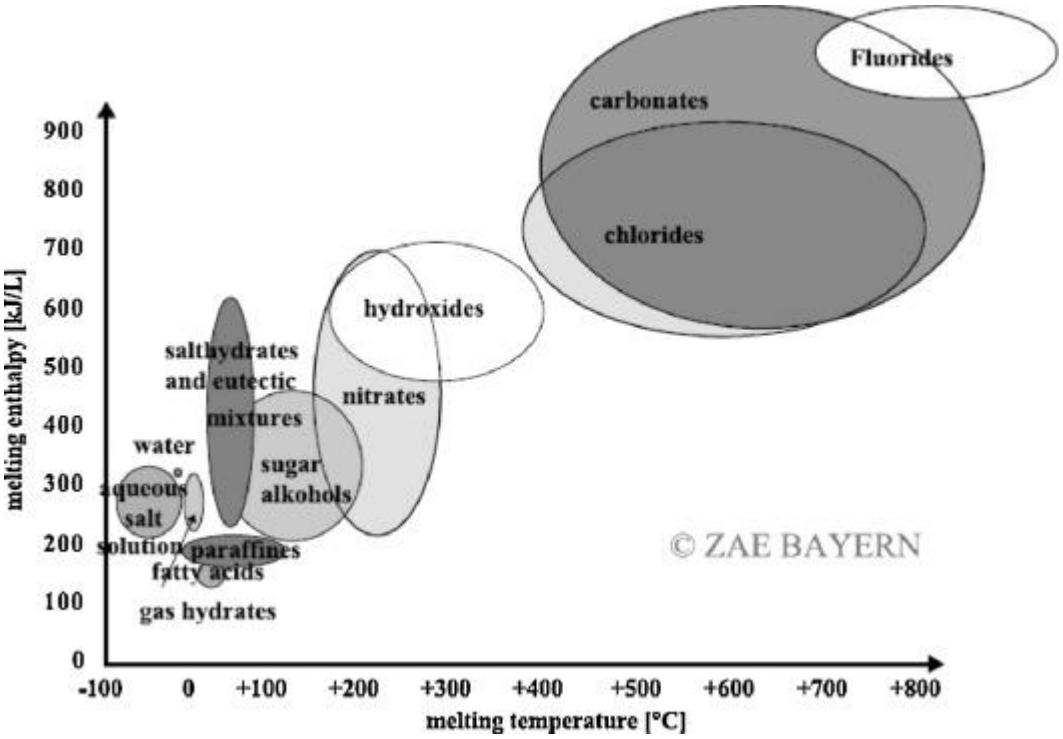


Figur 16 Vänster: Uppbyggnad av ett golv med fasomvandlingsmaterial. Höger: Bild på formstabiliserat fasomvandlingsmaterial bestående av 75 % paraffin och 25 % polyeten[110].



Figur 17 Uppbyggnad av ett golv med fasomvandlingsmaterial[110].

Det finns faktiskt ett mycket vanligt förekommande byggmaterial där fasomvandling kan ske, nämligen gips. En eventuell fasomvandling sker dock vid temperaturer långt över normal rumstemperatur. Gips i sig är en form av salthydrat med beteckningen $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. När gipset värms till cirka 150 °C frigörs en del av de kemiskt bundna vattenmolekylerna och värme upptas[111]. Detta är orsaken till att gips värms upp relativt långsamt vid brand. Figur 18 visar smältvärme som funktion av smälttemperatur för olika typer av fasomvandlingsmaterial[112]. Som framgår finns det material med mycket hög smältvärme såsom klorider, karbonater och fluorider. Smälttemperaturen för dessa är dock så hög att de inte kan bli aktuella när syftet är att stabilisera temperaturen vid komforttemperaturer runt 21-29 °C.



Figur 18 Smältvärme som funktion av smälttemperatur för olika typer av fasomvandlingsmaterial. De material som nämnts i denna rapport och som finns i figuren är "salthydrates and eutectic mixtures", "paraffines" och "fatty acids" eftersom dessa har en smälttemperatur i området drygt 20 °C som är en lämplig stabiliseringstemperatur i byggnader[112].

3.5 Brandegenskaper

För att förstå brandegenskaper hos fasomvandlingsmaterial och möjliga flamskyddmöjligheter för dessa material har en litteraturstudie med fokus på experimentella försök genomförts. Resultaten från bland annat termogravimetrisk analys (TGA), differentiell skanningskalorimetri (DSC), svepelektronmikroskopi (SEM), konkalorimeterförsök samt vertikala och horisontella brandtester har identifieras i litteraturen[11, 45, 113-122]. Följande avsnitt fokuserar mest på publikationer innehållande konkalorimeterdata. Värmeavgivningshastighet, i synnerhet maximal värmeavgivningshastighet (PHRR), har visat sig vara den mest rapporterade parametern i alla publikationer och betraktas i flera publikationer som den viktigaste parametern i utvärderingen av brandegenskaper[114, 115, 117, 123]. De presenterade diagrammen digitaliserades med hjälp av Plot Digitizer[20] från originalpublikationer. Mer detaljerad information om brandförsöken presenteras i Bilaga E Brandprovningsresultat.

3.5.1 Paraffinbaserade fasomvandlingsmaterial

Det huvudsakliga problemet med att använda paraffiner i konstruktioner är deras brandfarlighet. Paraffiner är lättantändliga om de inte skyddas effektivt. Ett problem med användning av fasomvandlingsmaterial i byggnadsmaterial är läckage i den porösa strukturen, vilket kan leda till snabbare spridning av brand[124]. I vertikal brandtest förekommer brinnande droppar från fasomvandlingsmaterial baserad på paraffin (60 viktprocent) och komposit av högdensitetspolyeten (HDPE, 40 viktprocent)[115]. Det har också visats att paraffinbaserade material inte är självsläckande om man inte förbättrar deras brandegenskaper[115]. Tillsats av flamskyddsmedel kan emellertid vara en framgångsrik strategi för att övervinna de största nackdelarna med organiska fasomvandlingsmaterial[45].

Flera metoder för att förbättra brandegenskaperna hos paraffinbaserade material har studerats:

- Kapsla in fasomvandlingsmaterialet i cementbaserade ihåliga byggnadsblock[125].
- Kombinera gips och fasomvandlingsmaterial[11, 113]

- Använda flamskyddsmedel för fasomvandlingsmaterial och/eller som extra skikt på ytan.

3.5.1.1 Inkapslat fasomvandlingsmaterial i gips

En viktig funktion hos gipsskivor som del av konstruktioner är att ge brandmotstånd genom att försena temperaturökningar i konstruktionen. När gips utsätts för brand drivs gradvis det fria vattnet och kemiskt bundet vatten ur gipsskivorna vid temperaturer över 100 °C. Detta absorberar värme och reducerar temperaturökningen i väggen. Denna mycket endotermiska process förbättrar väggkonstruktionens brandmotstånd.

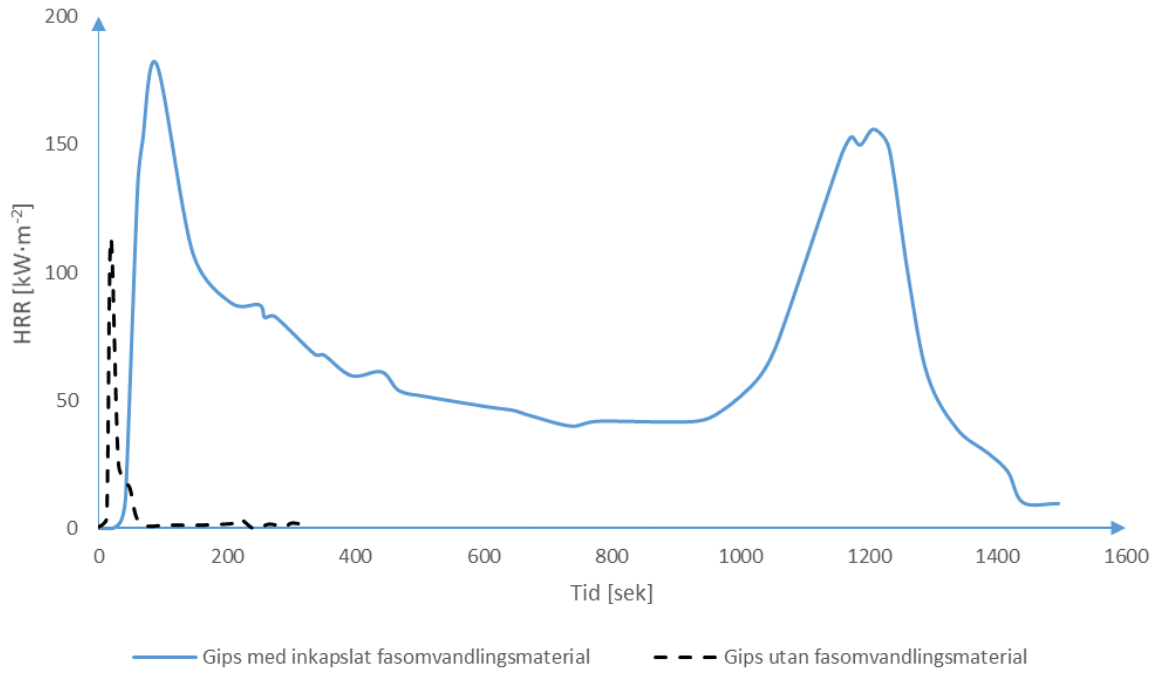
Om man inkapslar fasomvandlingsmaterial, som exempelvis paraffinbaserat fasomvandlingsmaterial, i gips så förbättras gipsets förmåga att jämna ut och förskjuta temperaturvariationer genom att materialet undergår en fasomvandling. Vid bränder finns det dock risk att inkapslingen går sönder på grund av höga temperaturer. Läckage av inkapslat fasomvandlingsmaterial kan bidra till produktion av paraffinångor som kan antändas och på så sätt öka brandbelastningen och därmed negativt påverka byggnadens brandsäkerhetsegenskaper[114].

För att skydda inbyggda väggskivor (som exempelvis gips) med inkapslade fasomvandlingsmaterial har följande metoder undersökts redan på 90-talet i labbmiljö med positiv effekt[126, 127]:

- att tillsätta ett obrännbart/svårantändligt skikt på ytan som exempelvis aluminiumfolie,
- sekventiellt behandla gipsskivor först med fasomvandlingsmaterial och sedan med olösligt flytande flamskyddsmedel såsom fosforbaserade flamskyddsmedel,
- att använda bromerad hexadekan och oktadekan som bas för fasomvandlingsmaterial,
- att använda flamskyddsytbeläggning för att hindra gipsskivans pappersskydd att antändas.

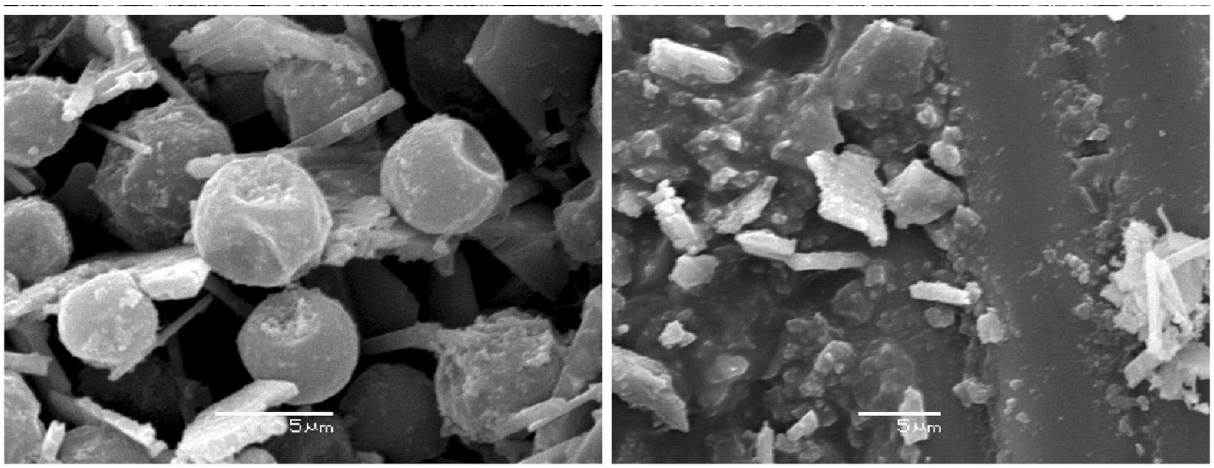
Dessa metoder är inte alltid optimala, eftersom många typer av flamskyddsmedel kan vara toxiska eller kan brytas ned till föreningar som är toxiska[128].

Skillnaderna i brandprestanda hos vanliga gipsskivor och gipsskivor förbättrade med inkapslade fasomvandlingsmaterial har experimentellt undersökts i konkalorimeter och presenteras i Figur 19[113]. Konkalorimetertester har visat försämrade brandegenskaper hos gipsskivan med inkapslade fasomvandlingsmaterial jämfört med en vanlig gipsskiva, vilket tar sig uttryck i en kraftig ökning av HRR (heat release rate) som är associerat med att paraffinånga frigörs och förbränns.



Figur 19. Skillnad i HRR i konkalorimeterförsök hos gipsskiva och gipsskiva med inkapslat paraffinbaserad fasomvandlingsmaterial[113]. Gipsskivan tjocklek var 12.5 mm, infallande strålningen 50 kW·m^{-2} och papper på ytskiktet.

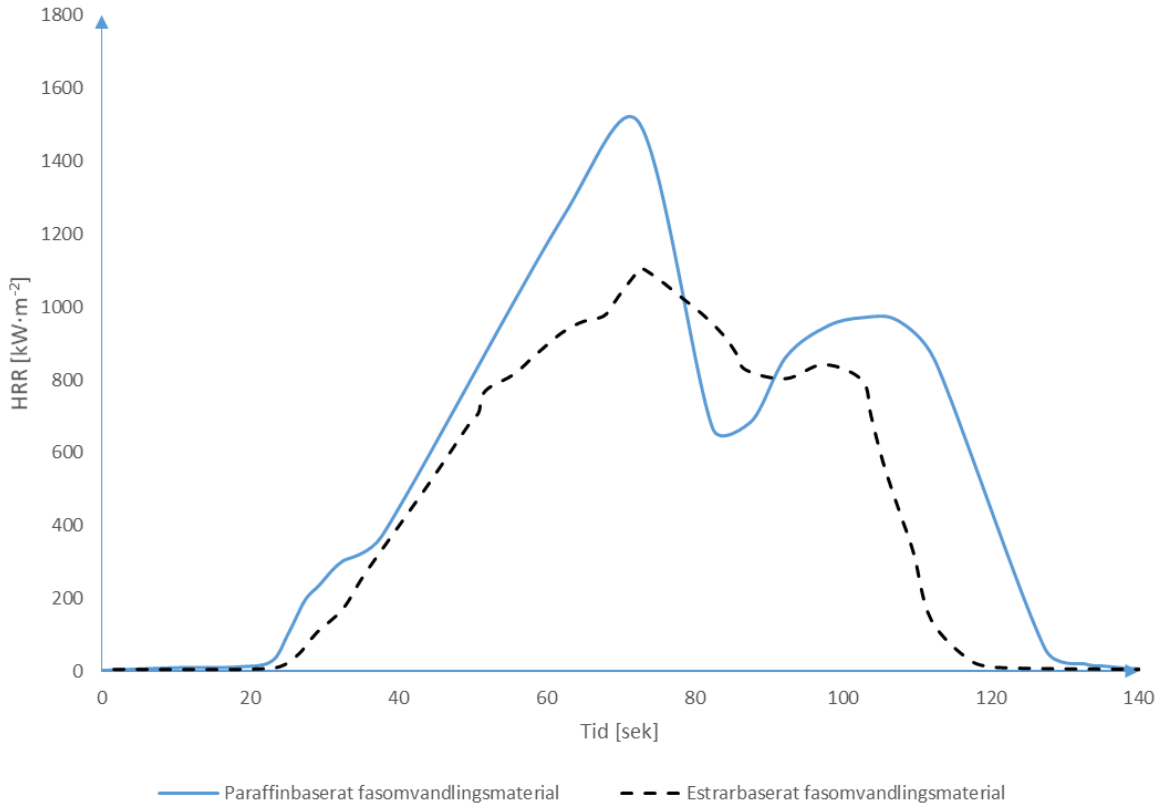
När temperaturen på gipsskivan med det inkapslade fasomvandlingsmaterialet överstiger kokpunkten för fasomvandlingsmaterialet så frigörs brännbara ångor (paraffinångorna) i den porösa gipsstrukturen, se Figur 20[113]. Resultaten blir att gipsskivan som består av obrännbart gips och brännbara inkapslade paraffiner, kan bidra till brandutveckling och brandspridning med värmeutveckling (HRR) upp till över 180 kW·m^{-2}, se Figur 19. Figur 20 visar hur gipsskiva med inkapslat fasomvandlingsmaterial ser ut innan och efter konkalorimeterförsöket. Man ser gipskristallerna på båda bilder men kapslarna med fasomvandlingsmaterialet blev förstörda efter brandpåverkan.



Figur 20 Elektronmikroskopisk avbildning av gipskristaller och inkapslat paraffinbaserat fasomvandlingsmaterial. Till vänster: före brandförsök. Till höger: efter konkalorimeter försök (inkommande strålning var 75 kW·m^2)[113]

3.5.2 Esterbaserade fasomvandlingsmaterial

Estrar är mindre brandfarliga än paraffiner[7, 129]. Figur 21 visar att högsta HRR från talgpropylester/högdensitetspolyeten (HDPE)-komposit (högsta värde på 1107 kW·m^{-2}) är lägre än motsvarande HRR för paraffinbaserade/HDPE fasomvandlingsmaterial (högsta värde på ungefär 1500 kW·m^{-2})[115]. Det förklaras av författarna med att ester har lägre ångtryck jämfört med paraffiner.



Figur 21 Skillnad i HRR hos paraffinbaserat och esterbaserat fasomvandlingsmaterial[115]. Provkroppen var i storleksordningen 60 x 60 x 20 mm^3 och infallande strålningen var 35 kW·m^{-2}.

3.5.3 Flamskyddsmedel

Flamskyddsmedel hämmar eller fördröjer brandspridning genom att undertrycka de kemiska reaktionerna i lågan eller genom att bilda ett skyddande lager på ytan av ett material. De kan blandas med basmaterialet (additiva flamskyddsmedel) eller vara kemiskt bundna till det (reaktiva flamskyddsmedel)[128]. Många flamskyddsmedel, som i sig själva har mätbar eller betydande toxicitet, bryts ned till föreningar som också är toxiska, och i vissa fall kan nedbrytningsprodukterna vara det primära toxiska medlet[128].

Flamskyddsmedel kan delas in i fyra kategorier[115]:

- Flamdämpare
- Värmeabsorberande (endotermiska)
- Intumescerande flamskyddsmedel
- Synergister

3.5.3.1 Flamdämpare

Halogenerade alkaner har förmågan att begränsa eller släcka närliggande flamkälla. Många bromerade och klorerade flamskyddsmedel erkänns nu som globala föroreningar och är förknippade med negativa hälsoeffekter hos djur och människor, inklusive störningar av endokrin och sköldkörtel,

immunotoxicitet, reproduktiv toxicitet, cancer och negativa effekter på fostrets och barns utveckling och neurologiska funktioner[130]. Halogenerade föreningar med aromatiska ringar bryts ned i dioxinderivat, särskilt vid upphettning, såsom under produktion, brand, återvinning eller exponering för sol[128]. Några flamskyddsmedel såsom polybromerade difenyletrar har förbjudits eller frivilligt avvecklats av tillverkare på grund av deras miljöbeständighet och toxicitet, endast för att ersättas av andra organiska halogener av okänd giftighet[130].

3.5.3.2 *Värmeabsorberande (endotermiska) flamskyddsmedel*

Material som *magnesiumhydroxid* $Mg(OH)_2$, *aluminiumhydroxid* $Al(OH)_3$ och *hydromagnesit* $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2{\cdot}4H_2O$ absorberar värme från omgivningen och sönderdelas endotermiskt, förhindrar närliggande material från att värmas upp och minskar därmed förbränningen. Vidare produceras icke-brandfarliga gaser såsom vatten eller CO_2 som har en utspädningseffekt. Metalloxiden som bildas under sönderdelningen av en metallhydroxid bildar en isolerande skyddsbeläggning på ytan[45].

Effekten av endotermiska flamskyddsmedel är ännu inte fullt utforskad. Studier[45] har visat att effekten av ovan nämnda flamskyddsmedel inte gav förbättringar i brandegenskaper på paraffinbaserade fasomvandlingsmaterial i dropptest. Men i motsats till detta har betydliga förbättringar påvisats hos på material med 50 viktprocent fettsyrablandning och 50 viktprocent av endotermiska flamskyddsmedel (hydromagnesit eller magnesiumhydroxid tillsattes som flamskyddsmedel). Däremot visade inte aluminiumhydroxid någon positiv effekt på fettsyrablandning[45].

3.5.3.3 *Intumescerande flamskyddsmedel*

Intumescerande flamskyddsmedel (**IFR** - från engelska Intumescent flame retardant) fungerar genom att skapa ett voluminöst förkolningsskikt som förhindrar att det underliggande materialet exponeras ytterligare för antändningskällan. De mest vanliga är:

- *Pentaerytritol (**PER**)* $C(CH_2OH)_4$ *organisk alkohol*
- *Ammoniumpolyfosfat (**APP**)* $[NH_4PO3]_n(OH)_2$ *inorganisk salt*
- *Melamin (**MA**)* $C_3H_6N_6$ *organisk förening*

Oftast består IFR av två eller tre kemikalier[115]:

- syrakälla som produkt vid uppvärmningen av ammoniumpolyfosfat (APP),
- kolkälla används ämnen såsom pentaerytritol (PER) och
- expansionsmedel melamin (MA).

Under uppvärmningen sönderdelas APP till polyfosforsyra och gasformiga produkter som vattenånga (H_2O) och ammoniak (NH_3). Polyfosforsyra reagerar sedan med PER för att producera ett isolerande förkolningsskikt medan de gasformiga produkterna och melamin under tiden orsakar expansion av förkolningsskiktet[123]. Detta resulterar i en bildning av ett voluminöst isolerande förkolningsskikt som skyddar det underliggande materialet från ytterligare förbränning[119].

Den *expanderande grafiten* (**EG**) fungerar också på liknande sätt som kombinationen av APP, PER och MA. EG består av svavelsyra som syrakälla och grafit som kolkälla[123]. Expanderbar grafit expanderar naturligt vid uppvärmning så expansionsmedel är inte nödvändigt[115]. I tillägg till flamskyddsfunktionen har EG låg densitet, hög porositet, hög termisk konduktivitet och kompatibilitet med organiska fasomvandlingsmaterialer[131, 132]. Med andra ord kan EG fungera som bra bärande grund för att bygga kompositen på och kan förbättra värmeledningsförmågan hos fasomvandlingsmaterial.

3.5.3.4 *Synergister*

Ordet synergi kommer från grekiska syn-ergos, συνεργός vilket betyder "samarbete". Det kan identifieras två olika typer av synergi:

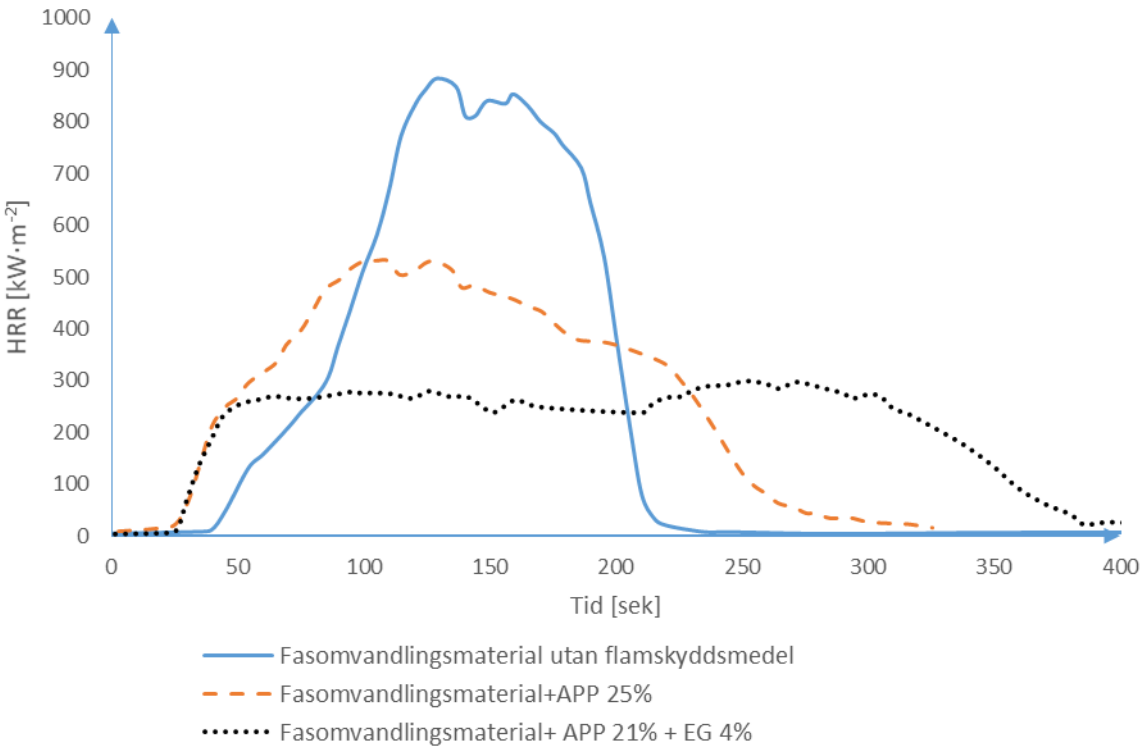
- Den första typen är där ena komponenten inte har brandskyddsförmåga men kan förbättra brandegenskaper med hjälp av den andra komponenten.

Exempel: antimonoxid är känd som en synergist för *halogenerade alkaner*.

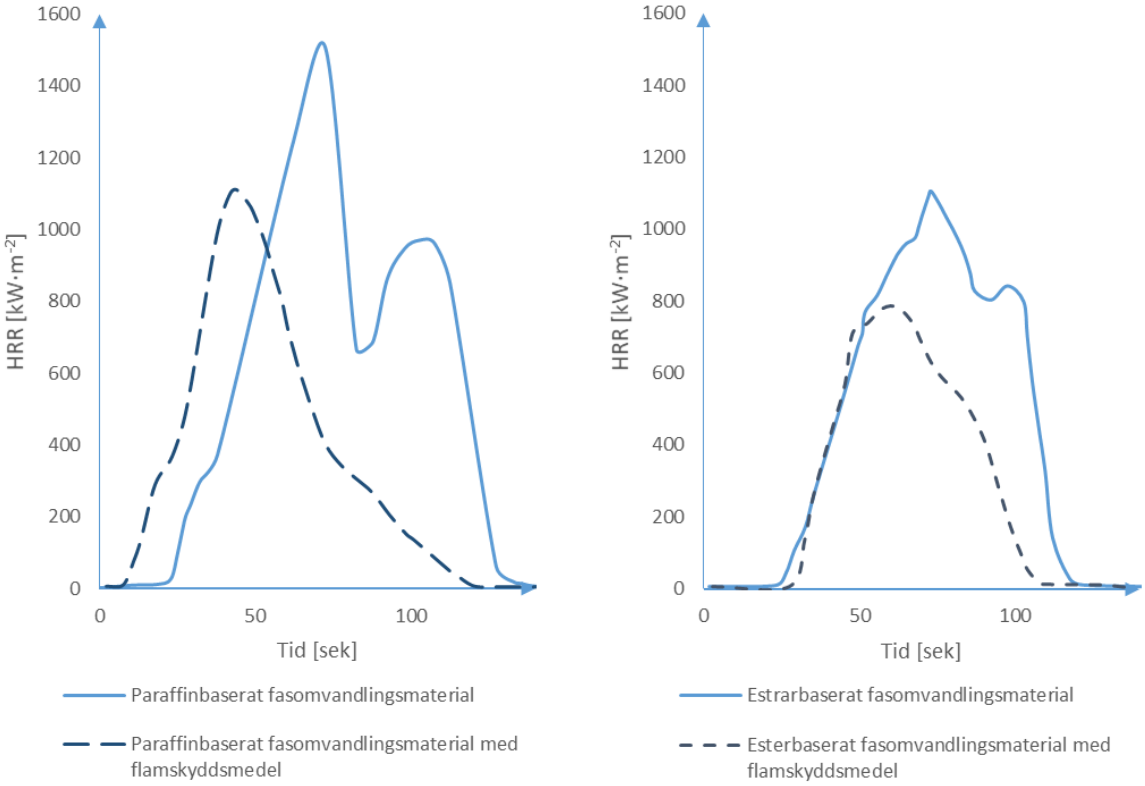
- Den andra typen är där två eller flera flamskyddsämnen fungerar tillsammans för att förbättra de totala brandegenskaperna hos ett material.

Exempel:
Montmorillonite[133] (***MMT***) är en klass av oorganiska nanopartiklar med en skiktstruktur och har en positiv effekt på flamskyddsegenskaperna[134]. MMT-lera har synergistisk effekt tillsammans med värmeabsorberande och intumescerande flamskyddsmedel[123].

Det har också visat sig att APP kan användas tillsammans med EG för att förbättra brandegenskaper i material[119]. I studier[119] med paraffinbaserade fasomvandlingsmaterial (paraffin 60 viktprocent) med olika flamskyddsmedel minskades maximal HRR med 40 % med APP (25 viktprocent) och med 66 % med APP+EG i samma viktprocent (21% + 4 %) jämfört med ett referensfasomvandlingsmaterial som bestod av 60 viktprocent paraffin och 40 viktprocent HDPE, trots att den totala frigjorda energi förblev ungefär samma, se Figur 22. En kombination av APP (10 viktprocent) och EG (10 viktprocent) har visats minska brandeffekten i esterbaserade fasomvandlingsmaterial med 27 procent och lika mycket för paraffinbaserade material[115], se Figur 23.

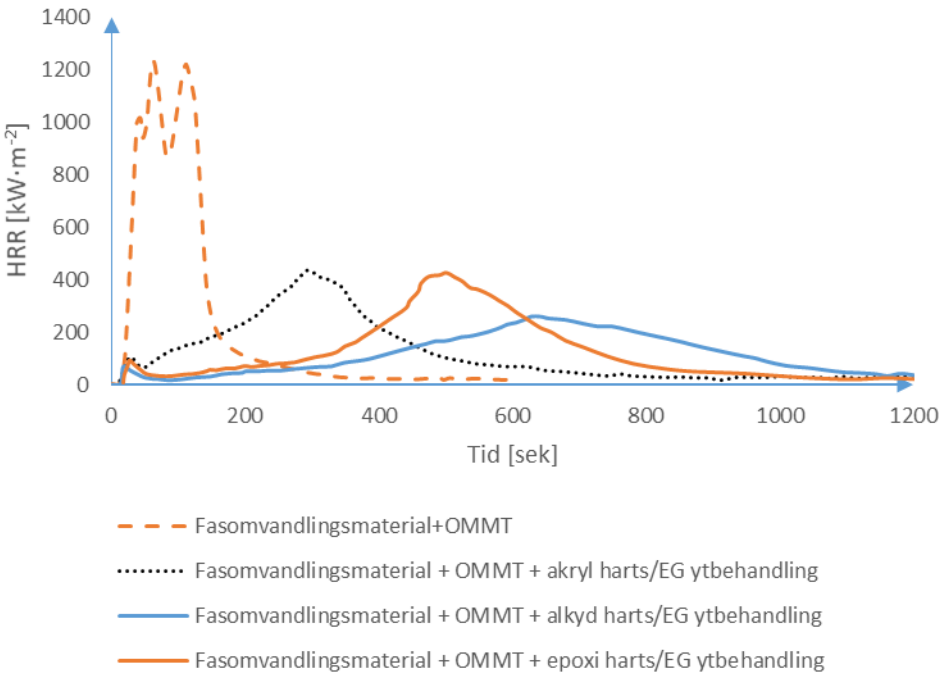


Figur 22. HRR hos paraffinbaserat fasomvandlingsmaterial med 60% paraffininnehåll utan flamskyddsmedel och med flamskyddsmedel med totalt 25% av ammoniumpolyfosfat (APP), respektive APP 21% + Expanderbar grafit (EG) 4%[119]. Provkroppen var i storleksordningen 100 x 100 x 3 mm³ och infallande strålningen på 35 kW·m⁻².

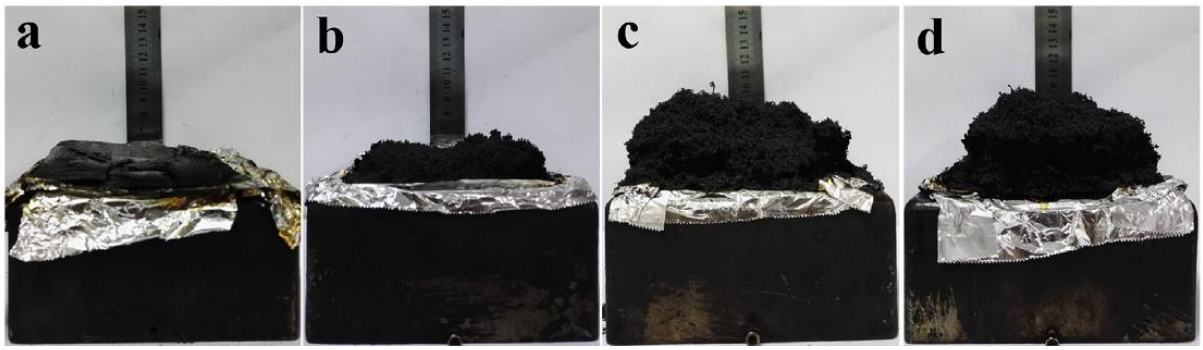


Figur 23. Skillnad i HRR hos paraffinbaserat och esterbaserat fasomvandlingsmaterial. Provkroppen var i storleksordningen 60 x 60 x 20 mm³ och infallande strålningen på 35 kW·m⁻². Samma flamskyddsmedel har använt i dessa blandningar: ammoniumpolyfosfat (APP) (10 %) och expanderbar grafit (EG) (10%)[115].

Ytbehandling av fasomvandlingsmaterial med EG-baserade beläggningar med olika hartser, dvs akryl, alkyd och epoxi harts har undersöks och visade förbättringar i brandegenskaper[122]. PHRR minskade med 62-84 % , se Figur 24, och totala rökproduktionerna (TSP) reducerades från 21 m^2 till 10.2 m^2, se Bilaga E Brandprovningsresultat. Vid höga temperaturer expanderade flamskyddsbehandling snabbt som en "svamp", se Figur 25. Expansionsprocessen var endotermisk och absorberade stora mängder värme[122]. EG i beläggningarna expanderade för att bilda tjock porös skikt och bromsade temperaturökningen inuti fasomvandlingsmaterialet och blockerade tillgång till syre. Detta kan bromsa värmeöverföringshastigheten, och försenar sedan förgasningen av paraffin i matrisen[122]. Den voluminösa förkolningen av ytbeläggningar bromsar utsläpp av paraffinånga. Effekt av tillägg av akryl, alkyd och epoxi harts bidrog till större expansion, större förkolning skikt, se Figur 25 b, c och d.



Figur 24. Skillnad i HRR hos paraffinbaserat fasomvandlingsmaterial med 20 % av organisk montmorillonite (OMMT) utan flamskyddytbehandling och med flamskyddbehandling baserad på expanderbar grafit (EG). Provkroppen var i storleksordningen 100 x 100 x 3 mm^3 och infallande strålningen på 50 $kW·m^{-2}$. Figuren är baserad på publicerade resultat[122].

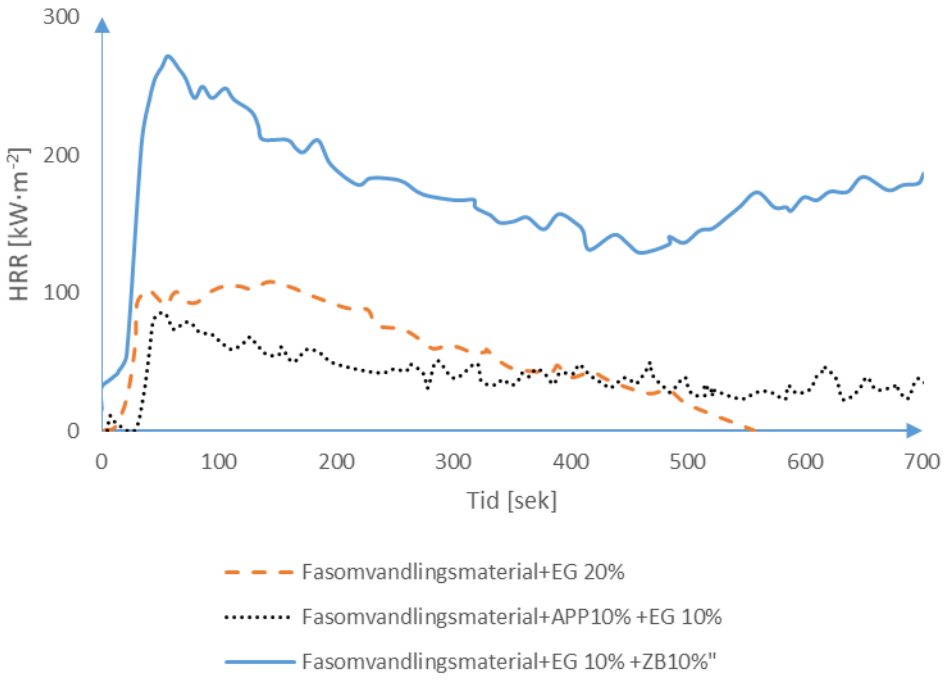


Figur 25. Bild på expanderande förkolningsskikt efter konkalorimeterförsök. (a) ingen ytbehandling, (b) akrylharts+aceton+ expanderbar grafit (EG) (10:10:5), (c) alkydharts +aceton+ expanderbar grafit (EG) (10:10:5), (d) epoxiharts +aceton+ expanderbar grafit (EG) (10:10:5)[122]

Studier har visat att flamskyddseffektiviteten hos IFR förbättras när metall (järn, magnesium, aluminium eller zink) tillsätts i paraffinbaserade fasomvandlingsmaterial[135].

Antimontrioxid (**AO**), Sb_2O_3 , är en oorganisk oxid. Den används i kombination med vissa bromerade flamskyddsmedel och kan också användas tillsammans med *zinkborat*[136] (**ZB**) eller i kombinationen med halogenerade material genom att bilda flamskyddskikt[137].

Även om zinkborat ger en viss flamskyddsfunktion så kan det ge motsatt effekt i kombination med expanderbar grafit (EG)[138]. Det har visat sig att pHRR hos fasomvandlingsmaterial med 10 viktprocent av ZB och lika mycket av EG uppmätts till 272 $kW \cdot m^{-2}$, jämfört med 108 $kW \cdot m^{-2}$ hos fasomvandlingsmaterial med 20 viktprocent av EG, se Figur 26. Med andra ord kan en ***anti-synergisk effekt*** mellan EG och ZB uppstå.



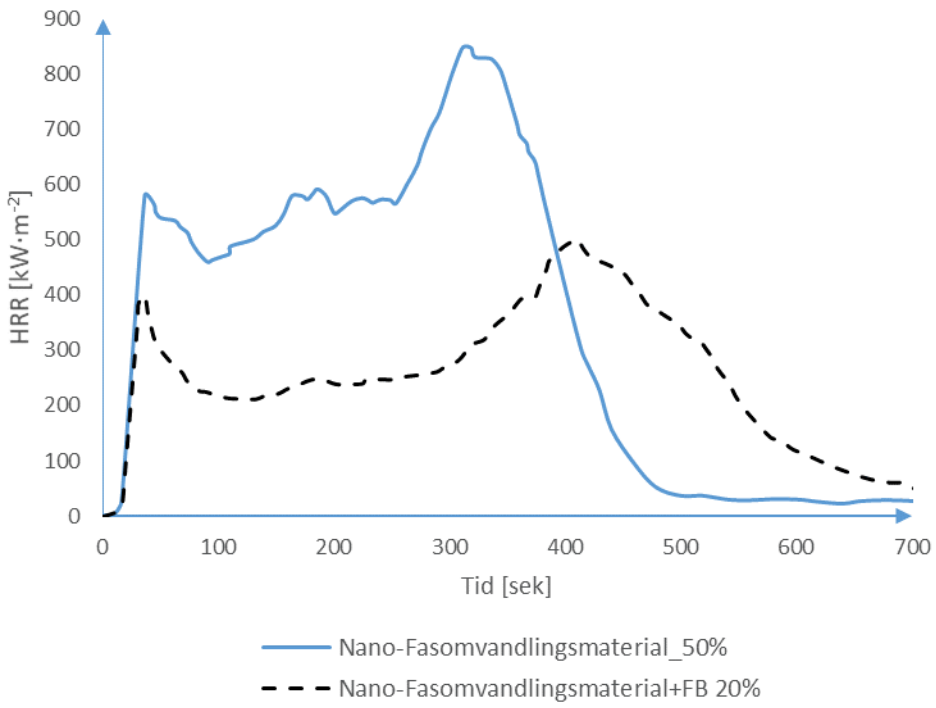
Figur 26. Skillnad i HRR hos paraffinbaserat (60%) fasomvandlingsmaterial. Provkroppen var i storleksordningen 100 x 100 x 3 mm^3 och infallande strålningen på 35 $kW \cdot m^{-2}$. Flamskyddsmedel som används: Ammonium polyfosfat (APP), expanderbar grafit (EG) och zinkborat (ZB) [138]

För att förbättra brandegenskaperna hos fasomvandlingsmaterial har stora mängder av flamskyddstillsatser (upp till 50 viktprocent) provats genom historien[45]. Tyvärr har det visats att dessa ämnen i vissa fall minskar värmelagringen och återhämtningskapaciteten under smältning och stelning i den slutliga produkten. I studier[45] har det visats att paraffinsmälttemperatur och entalpi inte påverkades av en tillsats av 40 viktprocent APP. Å andra sidan visades det i samma studier att fettsyrablandningar ger en tydlig reduktion av smältentalpin med en faktor 3 när 50 viktprocent flamskyddsmedel tillsätts, medan smälttemperaturen förblev nästan oförändrad.

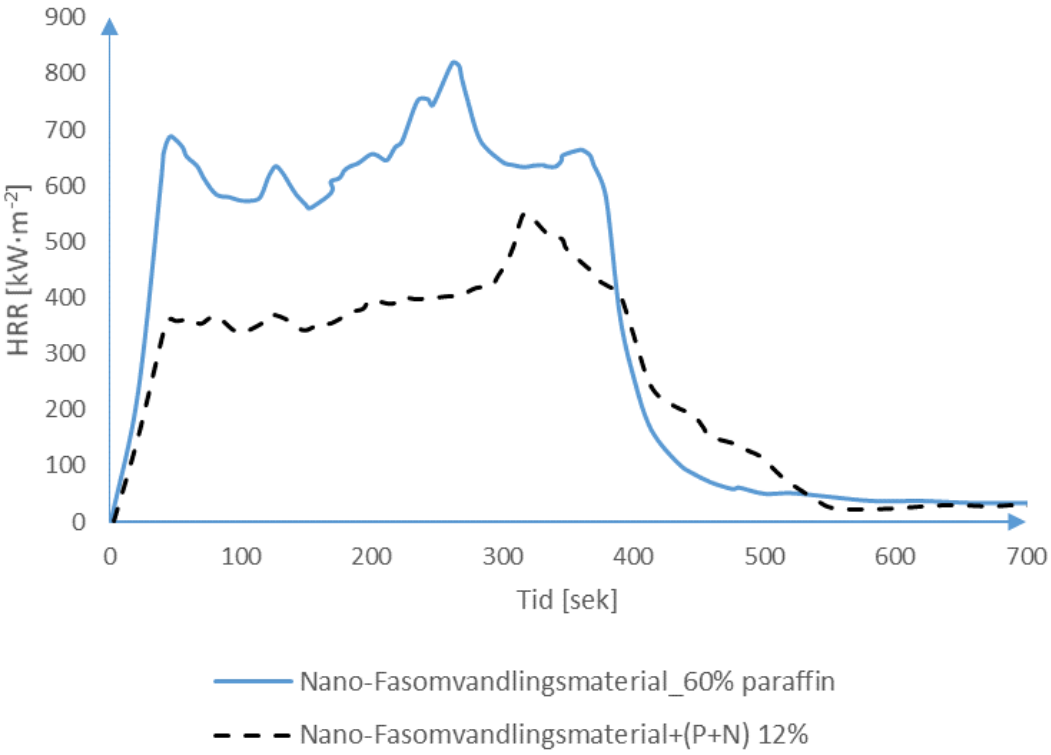
Följande flamskyddstillsatser har identifieras i dessa studier i tillägg till de tidigare nämnda:

- *Melaminfosfat* (***MPP***), ett typiskt halogenfritt fosforflamskyddsmedel, är reaktionsprodukten av melamin och fosforsyra, vilket därmed kombinerar flamskyddet av både melamin och fosforsyra[139] . Sönderdelningstemperaturen av MPP är 360 °C[140].

- *Fosforbaserade (**FB**) flamskyddsmedel*. Införandet av fosforbaserade flamskyddsmedel i nano-fasomvandlingsmaterial kan effektivt förbättra flamskyddsegenskaper. Genom att tillsätta 20 viktprocent fosforbaserade flamskyddsmedel i nano-paraffinbaserat fasomvandlingsmaterial (50 viktprocent består av n-oktadekan paraffin) kan pHRR reduceras med 40 %, 18 % reduktion i total HRR och 12 % reduktion i TSR[121] (TSR – total smoke released), se Figur 27 och Figur 28. Kombinationen av fosfor och kväve (P+N) har dessutom en utmärkt synergistisk effekt och hög flamskyddseffektivitet[141]. Studier[120] har visat att genom att tillsätta 12 viktprocent (P+N) till ett nanoinkapslat fasomvandlingsmaterial som består av 60 viktprocent n-oktadekan paraffin kan en minskning ske med 33 % i pHHR, 30 % minskning i total HHR och 19 % minskning i TSR, se Figur 28
- *Melamincyanurat (**MCA**)* - är ett salt av melamin och cyanursyra. MCA har en högre termisk stabilitet än ren melamin (sönderdelningstemperaturer 250 °C), vilket förblir stabilt upp till cirka 310 °C[142]. MCA används ofta i polymerer med högre bearbetningstemperaturer, som polyamider. När temperaturen överstiger 320 °C genomgår den endotermisk sönderdelning till melamin och cyanursyra. Den förångade melaminen fungerar som en inert gasskälla som minskar syrekoncentrationen och de brännbara gaser som finns närvarande vid förbränningen. MMC löser sig i vatten, och är icke-droppande[140].

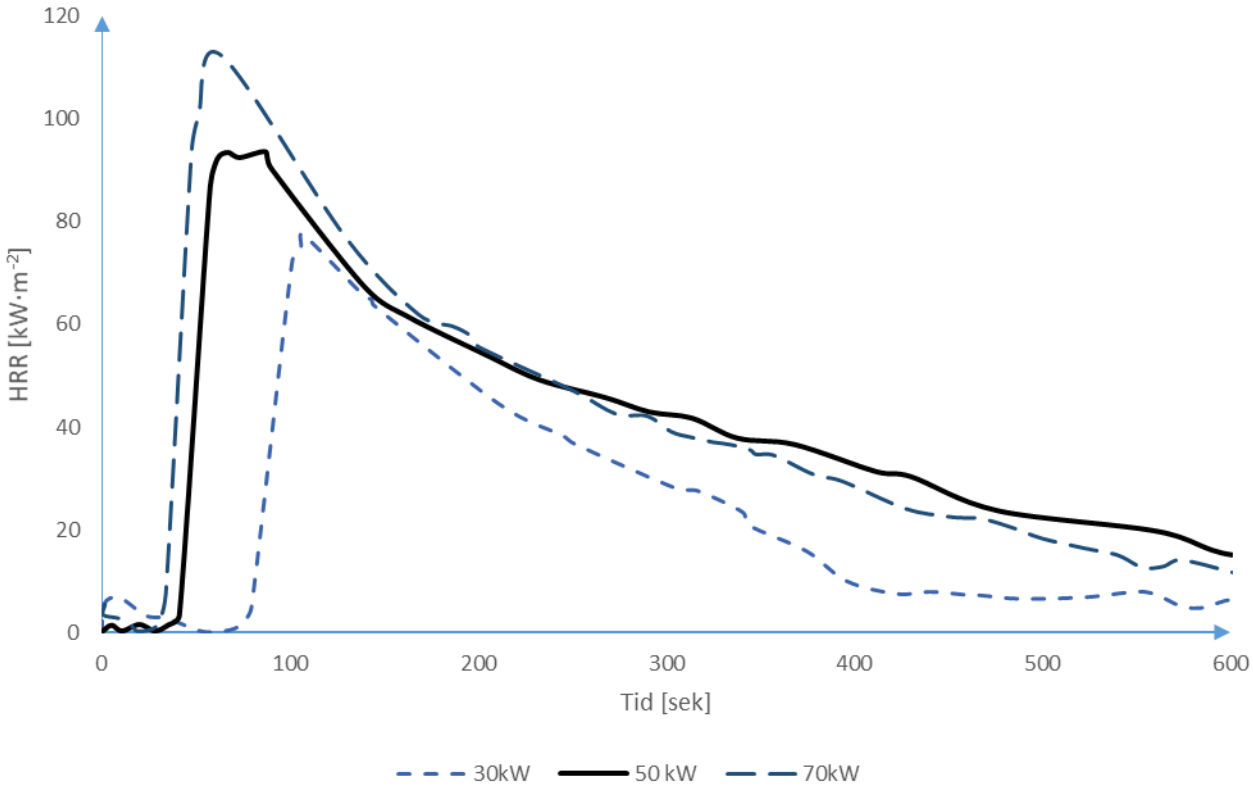


Figur 27. Skillnad i HRR hos nano-fasomvandlingsmaterial. Provkroppen var i storleksordningen 100 x 100 x 5 mm³. Information på infallande strålningen saknades. Flamskyddsämne var fosforbaserade (FB) flamskyddsmedel 20%[121].



Figur 28. Skillnad i HRR hos nano-fasomvandlingsmaterial. Provkroppen var i storleksordningen 100 x 100 x 5 mm³. Information på infallande strålningen saknades. Flamskyddsämne var kombinationen av fosfor och kväve (P+N) 12% [120]

I figurerna ovan har olika strålningsnivåer i konkalorimetern använts. Detta påverkar effektutvecklingen vilket är viktigt att ha i åtanke vid jämförelse av provresultat. Ett exempel på detta visas i Figur 29.



Figur 29 . Skillnad i HRR hos gips paraffinbaserat fasomvandlingsmaterial[11].

4 Diskussion

Fasomvandlingsmaterial som teknik för energibesparing och temperaturstabilisering är intressant men från intervjustudien framgår att tekniken idag verkar ha en mycket begränsad omfattning i Sverige. Kostnader och försämring av andra egenskaper, såsom brandegenskaper, gör att materialen hittills inte vunnit några nämnvärda marknadsandelar och inget har framkommit som tyder på att denna situation kommer att förändras inom den närmaste framtiden. Leif Andersson beskriver detta tydligt i intervjustudien, avsnitt 3.1.4.1:

"Det finns inte så mycket på marknaden. Kanske ett nytt fasomvandlingsmaterial i framtiden men det är mycket kvar att göra." - ***Leif Andersson***

Det är ändå viktigt att brandvetenskapen ligger i framkant vad gäller kunskap om nya material och teknologier. Syftet med denna rapport är att presentera en kunskapsöversikt så att branschen om behov uppstår snabbt kan adressera brandsäkerhetshot, men även se möjligheter med denna teknologi.

4.1 Byggproduktförordningen är materialneutral och täcker fasomvandlingsmaterial

Brännbara material, såsom brännbara fasomvandlingsmaterial, utgör i sig inte någon ny risk inom det byggnadstekniska brandskyddet. Brännbara byggmaterial existerar redan och klassificeras med bas i byggproduktförordningen med en Euroklass enligt klassifikationsstandarden EN 13501-1[143] samt de därtill hörande provningsstandarderna. Om en gipsskiva med brännbart fasomvandlingsmaterial erhåller Euroklass C vid provning och klassificering enligt EN 13501-1 definieras den inte som obrännbar och kan därför heller inte användas inom detta användningsområde i byggnader. Om den istället uppfyller klass A1, t.ex. pga. låg koncentration av fasomvandlingsmaterialet, så får den användas som obrännbart underlag och utgör rimligtvis ingen risk. Risken med nya brännbara material ligger snarare i att fel och brister kan uppstå vid användningen.

4.2 Risker utanför regelverket

Nedan presenteras några fall då brännbart fasomvandlingsmaterial kan bidra till brandutveckling trots att de i princip, liksom alla byggmaterial, täcks in av byggproduktförordningen och BBR.

4.2.1 Byggfel

Om brännbara fasomvandlingsmaterial används i byggnader är det viktigt att konstruktionen är förlåtande mot fel, brister och skador i byggskedet. Att exempelvis designa en innervägg med olika gipsskivor, en utan brännbart fasomvandlingsmaterial närmast ytskiktet, och en underliggande brandfarlig gipsskiva, är inte ett exempel på en förlåtande design eftersom misstag, t.ex. omkastning av skivorna, med stor sannolikhet kommer att ske. När väl skivorna har kastats om och målats eller tapetserats över går det sedan inte längre att se att ytskiktet faktiskt är av väsentligt sämre Euroklass än de gällande kraven. Fel och brister vid byggnation beror främst på tidsbrist och bristande kompetens, såväl i planerings-, projekterings- som byggskedet[144] och det finns ingen anledning att anta att denna problematik skulle bli mindre för brännbara fasomvandlingsmaterial. Även i intervjustudiens del om regelverk, avsnitt 3.1.4.2, påpekas att tillverkarnas instruktioner inte alltid följs och att om fel kan uppstå så kommer de med största sannolikhet någon gång att uppstå. Alla respondenter var överens om att införandet av brännbara fasomvandlingsmaterial i byggnader kommer att tillföra problem i byggprocessen om materialet inte hanteras på rätt sätt.

Även makroinkapslat brännbart fasomvandlingsmaterial, t.ex. ingjutet i en betongvägg, ökar väsentligt konstruktionens sårbarhet med avseende på brandsäkerhet. Vid genomföringar blir brandsäkerhetens beroende av genomföringens kvalitet väsentligt högre än om väggen hade bestått av enbart obrännbart material. Genomföringen måste också tåla sättningar i byggnaden, vilket kan vara mer

aktuellt för fasomvandlingsmaterial i byggnader med trästomme[145]. Det är logiskt, ur termisk synvinkel, att fasomvandlingsmaterial används i byggnader med trästomme eftersom dessa är termiskt lätta vilket innebär stora temperaturvariationer om inga åtgärder vidtas. En sådan åtgärd kan vara att addera termisk massa med hjälp av fasomvandlingsmaterial. Även tegel har använts med tillsats av fasomvandlingsmaterial med goda termiska resultat[104]. En sådan användning kan naturligtvis drastiskt förändra de brandtekniska aspekterna vad gäller fasader bestående av sådant material och kunskapsspridning inom branschen vore i så fall nödvändig, och utmanande.

Om det skapas förutsättningar för brandtekniska fel och brister pga. införande av brännbara fasomvandlingsmaterial så är det inte orimligt att förluster i liv och egendom ökar. Även om regelverket är materialneutralt så utgår det från korrekt utförda arbeten. Behovet av att följa upp efterlevnaden av brandskyddet[146] blir därför ännu mer aktualiserat om brännbara fasomvandlingsmaterial används i byggnader.

Ur brandsäkerhetssynvinkel torde det vara bättre med en tank med fasomvandlingsmaterial, såsom den på Chalmers till exempel[81], jämfört med att materialet är distribuerat i byggmaterialet i hela byggnaden. Den brandtekniska ingenjörsvetenskapen bör inte i onödan sätta käppar i hjulet för teknikutvecklingen, men däremot kan det vara lämpligt med en holistisk analys av byggprojekt innan brännbara fasomvandlingsmaterial anammas. Detta gäller då framförallt risken för fel och brister (eftersom brännbara produkter i sig, som nämnts ovan, tas om hand av BBR, klassifikationsstandarden EN 13501-1[143] samt de därtill hörande provningsstandarderna). Risken för fel och brister kommer att medföra en mer komplicerad byggprocess med mer omfattande och kostnadsdrivande kvalitetsarbete. Även hållbarhetsperspektivet bör beaktas[147] och ställas i relation till de ökade brandriskerna. Återvinning av byggmaterial försvåras ju mer heterogena dessa är, t.ex. om de innehåller fasomvandlingsmaterial. Slutligen bör alternativ beaktas, såsom att använda icke brännbara fasomvandlingsmaterial, t.ex. salthydrater. Dessa kan dock ge andra problem, exempelvis begränsad livstid pga. inkongruent smältning. Ett annat alternativ kan vara att öka den termiska massan genom sensibel värme istället för med latent värme, t.ex. genom att öka mängden betong istället för att bygga in stora mängder paraffin. Livscykelanalys, där brandfallet ingår i analysen[148], kan vara lämpligt för att fatta korrekta beslut vid sådana överväganden. Det är i sammanhanget värt att poängtera att koncentrationen av fasomvandlingsmaterial i byggmaterial behöver vara relativt stor för att en signifikant termisk effekt ska uppnås: i storleksordningen 10-20 % när det mikroinkapslas i byggmaterial[7]. I tillägg till försämring av brandegenskaper kan detta också leda till försämring av andra egenskaper såsom isolerings- och bärförmåga.

En aspekt som bör beaktas, även med tanke på brandsäkerhet, är hur fasomvandlingsmaterial åldras. Detta gäller själva materialen såväl som inkapslingen och flamskyddande tillsatser. Om läckage gör så att brännbart fasomvandlingsmaterial exponeras så utgör detta en brandfara och det är därför viktigt att vid projektering i första hand anvisa material som har använts i byggnader under lång tid, eller i andra hand som bevisats hållbara genom accelererad åldring[149, 150]. Detta påpekas också av Kjell-Åke Henriksson i intervjustudien. Behovet av helhetssyn formulerades kärnfullt av Viktoria Martin:

"Hela tiden måste man jämföra sig med vad som är effektivast". - ***Viktoria Martin***

4.2.2 Solpaneler

Vad gäller solpaneler, som är relativt oreglerat ur ett brandskyddsperspektiv[62] är det viktigt att känna till ifall dessa är utrustade med brännbara fasomvandlingsmaterial. Dessa gör i så fall att brandlasten på tak eller fasader ökar väsentligt vilket kan medföra en allvarlig brandrisk med tanke på de höga spänningarna och de många väderexponerade kopplingspunkterna som är förknippade med sådana anläggningar. Återigen bör nyttan, dvs. förbättrad livslängd och elektriskt utbyte[82, 83], ställas mot de

risker som brännbara fasomvandlingsmaterial medför. Det är oklart i vilken omfattning fasomvandlingsmaterial används i detta syfte, åtminstone i Sverige, men det är alltjämt en frågeställning som är bra att känna till. Det är å andra sidan inte en orimlig tanke att fasomvandlingsmaterial i någon mening kan förbättra brandsäkerheten i solcellsanläggningar, genom att temperaturerna begränsas. Någon forskning om detta har dock inte återfunnits i litteraturen.

4.2.3 Renovering

Diskussionen ovan gäller huvudsakligen bygglovspliktig verksamhet där det finns kontrollmekanismer för vilka byggnadsmaterial, t.ex. ytskikt, som används. Som tidigare nämnts utgör inte brännbara fasomvandlingsmaterial någon ny risk i detta sammanhang, bortsett från risken för fel och brister. Situationen blir annorlunda vid icke bygglovspliktig renovering såsom byte av ytskikt. Om det i framtiden kommer ytskikt på marknaden som marknadsförs för sina energibesparande och temperaturstabiliserande egenskaper så är det möjligt att privatpersoner renoverar med sådana material. Det skulle innebära en stor brandrisk om villor och bostadsrätter renoveras med ytskikt som är väsentligt mer brännbara än de som användes vid nybyggnation.

4.2.4 Lös inredning

Ett annat område som är relativt oreglerat är lös inredning, som ofta är avgörande i brandens begynnelseskede[151], och som inte regleras i BBR[152]. Lös inredning faller istället under Lagen om skydd mot olyckor, LSO[153] och kontroll av offentliga lokaler görs av den lokala räddningstjänsten. Det är ägaren eller den som driver en verksamhet som är ansvarig för att förebygga brand och begränsa skador till följd av brand[154]. För privata hem är tillämpningen av LSO väsentligt annorlunda och sträcker sig i praktiken inte mycket längre än till krav på brandvarnare för att uppnå ett skäligt brandskydd[155]. Det enda regelverk som tillnärmelsevis kan hänvisas till är Produktsäkerhetslagen enligt vilken en näringsidkare endast får sälja säkra varor[156]. Detta innebär som bekant dock inte att brännbara varor inte får säljas och det är inte orimligt att i framtiden lös inredning med fasomvandlingsmaterial kommer att marknadsföras för energihushållning och temperaturstabilisering. Exempelvis har persienner med fasomvandlingsmaterial studerats för att reducera temperaturvariationer[157].

4.3 Möjligheter

Även om organiska fasomvandlingsmaterial ger upphov till betydande brandskyddsutmaningar om de används i byggnader så är det värt att poängtera att själva fenomenet fasomvandling även kan vara till godo för brandsäkerheten. Såsom nämndes i avsnitt 3.4 är gips i själva verket en salthydrat där vatten frigörs vid höga temperaturer när värme tillförs, och temperaturökningen fördröjs därmed vid brand. Även i räddningsställ kan fasomvandlingsmaterial användas för att förbättra brandsäkerheten. Exempelvis visade en studie att ett 0,2 mm tunt magnesiumkloridlager i räddningsställ förlängde tiden till skadliga hudtemperaturer hos brandmän med upp till 19 %[94]. Behovet av denna typ av ytskydd kan eventuellt öka och breddas i samband med det utökade användandet av drönare och robotar inom räddningstjänst, vilka också behöver skyddas mot värme. Slutligen är det intressant att notera att i Figur 18 finns många fasomvandlingsmaterial, fast↔flytande, som har betydligt högre latent värme, dvs. smältvärme, än de material som används för temperaturstabilisering i byggnader. Dessa material, exempelvis nitrater och karbonater har en smältvärme vid flera hundra grader och kan därför inte användas för stabilisering av boendeklimat. Däremot vore det intressant att utreda i vilken mån dessa material kan kapslas in i byggnader och byggnadsmaterial för att fördröja temperaturökningen vid brand.

5 Slutsatser

Fasomvandlingsmaterial för energibesparing och temperaturstabilisering i byggnader är populärt i forskningslitteraturen men verkar ha en mycket begränsat spridning inom byggandet i Sverige. Ur ett brandskyddstekniskt perspektiv är det viktigt att känna till att bland de byggmaterial med fasomvandlingsmaterial som finns på den internationella marknaden är det relativt vanligt att mikroinkapslade brännbara organiska fasomvandlingsmaterial, framförallt olika typer av paraffiner, används. Paraffiner används också makroinkapslat inbyggt i väggar, tak och golv. Som ytskikt betraktat utgör brännbara fasomvandlingsmaterial formellt inte någon förändring eftersom regelverket redan hanterar brännbara material. Däremot innebär införande av ännu fler brännbara material att byggprocessen blir mindre förlåtande mot fel och brister. Exempelvis kan en gipsskiva med brännbart fasomvandlingsmaterial av misstag hamna som ytskikt, trots att den var tänkt att skyddas av en obrännbar gipsskiva. Ett annat exempel är att känsligheten för utförande och för beständighet hos genomföringar blir större om det finns makroinkapslat paraffin inuti en vägg.

Innan brännbara fasomvandlingsmaterial anammas i ett byggprojekt är det viktigt att en helhetsanalys görs. Fördelarna är, förhoppningsvis, energibesparing och temperaturstabilisering. Står dessa fördelar i proportion till nackdelar såsom den ökade sårbarheten för brandskyddstekniska fel och brister, vilken leder till en mer komplicerad byggprocess med mer omfattande kvalitetsarbete? Hur påverkas pris och miljöpåverkan för byggnaden ur ett livstidsperspektiv, med demolering och återvinning inkluderat? Finns alternativa lösningar såsom ökad termisk massa med sensibel värmelagring i exempelvis betong, eller alternativa obrännbara fasomvandlingsmaterial, eller åtminstone mindre brännbara fasomvandlingsmaterial? Livscykelanalys kan vara ett verktyg för att jämföra olika lösningar. Det är då viktigt att brandfallet inkluderas i livscykelanalysen.

5.1 Själv- och källkritik

Syftet med detta projekt, och denna rapport, har varit att ge verksamma inom den brandtekniska ingenjörsvetenskapen ett kunskapsunderlag om fasomvandlingsmaterial för att kunna göra bedömningar om risker och möjligheter förknippade med denna teknologi. Under projektets gång så har det visat sig, framförallt genom intervjustudien, att användandet av fasomvandlingsmaterial inom byggindustrin är mycket begränsat och att den brandtekniska problematiseringen som ges i denna rapport kan sägas ske i ett mycket tidigt skede av utvecklingen. Det är möjligt att rapporten hade varit betydligt mer aktuell och fått större genomslagskraft om den publicerats om, säg, 5 – 10 år. Å andra sidan är fel som byggs in i byggnader, eller feltänk generellt i byggprocessen, mycket svåra att åtgärda och orsakar stora kostnader för byggherrar och fastighetsägare om de åtgärdas efter att byggnaden är klar, eller för försäkringsbolag och felen inte alls åtgärdas. I värsta fall bidrar brandskyddstekniska fel och brister även till fler döda pga. bränder. Därför kan det vara befogat att redan nu sprida kunskap om fasomvandlingsmaterial i byggnader.

Litteraturen formligen översvämmas av översiktsartiklar om olika aspekter av fasomvandlingsmaterial och dess användande i byggnader. Ofta refererar en översiktsartikel till en annan översiktsartikel och detta kan ske i upprepade steg. Detta gör att kvalitén på de förvisso kollegialt granskade publikationerna kan ifrågasättas. Rapportförfattarna har försökt att finna ursprungskällor till data och påståenden i så stor utsträckning som möjligt men vissa översiktsartiklar och böcker har trots allt använts i litteraturstudien. Vad gäller brandtekniska mätdata, såsom exempelvis effektutveckling, har däremot ursprungskällorna använts. De flesta brandprovade materialen var dock producerade i labbmiljö vilket betyder att de inte finns tillgängliga som kommersiella produkter. Många publikationer behandlade förbättring av brandegenskaper hos fasomvandlingsmaterial snarare än jämförelse av byggmaterial utan och med olika typer av fasomvandlingsmaterial. Inom ramen för de studerade

publikationerna är viktiga fundamentala brandegenskaper såsom rökproduktion, toxicitet och tid till antändning endast studerade i mycket begränsad omfattning.

5.2 Förslag på fördjupningslitteratur

Fördjupning om fasomvandlingsmaterial och dess användande i byggnader återfinns exempelvis i böckerna av Jan Kosny från 2015[7] och av Benjamin Duraković från 2020[4]. Tabeller med olika kommersiella byggmaterial med fasomvandlingsmaterial återfinns i artikeln av Simen Edsjø Kalnæs och medarbetare från 2015[51].

5.3 Förslag på fortsatt arbete

Oorganiska fasomvandlingsmaterial såsom salthydrater är generellt mycket säkrare ur ett brandskyddsperspektiv än organiska material såsom paraffiner. Tyvärr har salthydrater vissa egenskaper som ur andra perspektiv gör dem olämpliga att användas i byggnader. De främsta problemen förefaller vara underkylning (stabiliseringstemperaturen blir inte den önskade) samt inkongruent smältning (permanent förlust av vattenmolekyler från salthydratet). Förbättring av salthydrater vore därför önskvärt ur ett brandskyddsperspektiv. På grund av saltydraternas brister är det i stor utsträckning organiska material, såsom paraffiner, som används makroinkapslat i konstruktioner och mikroinkapslat i byggmaterial. För att göra sådana material mer förlåtande mot fel och brister behöver miljövänliga och icke hälsovådliga flamskyddsmedel, eller bättre inkapsling, utvecklas som fungerar väl tillsammans med paraffiner i byggnader.

Fasomvandlingsmaterial har eventuellt potential att förbättra brandegenskaperna hos byggmaterial genom att material med hög smälttemperatur och smältvärme, exempelvis nitrater och karbonater, införlivas i byggnader. Sådana fasomvandlingsmaterial skulle kunna fördröja temperaturökningen vid brand.

Eftersom fasomvandlingsmaterial fungerar som en delmängd i en komplex byggprocess är det nödvändigt att problematiken angrips ur ett helhetsperspektiv där fasomvandlingsmaterialens för- och nackdelar vägs mot varandra. Studier innefattande livscykelanalyser, med brandfallet inkluderat i analyserna, vore lämpliga för att uppnå detta helhetsperspektiv.

Referenser

1. ISO, *ISO 10456:2007 Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*, ISO (the International Organization for Standardization), Editor. 2007, ISO
2. Talaei, M., et al., *A Review on Interaction of Innovative Building Envelope Technologies and Solar Energy Gain.* Energy Procedia, 2017. **141**: p. 24-28.
3. Nordell, B. and K. Skogsberg, *The Sundsvall Snow Storage—Six Years of Operation*, in *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Fundamentals, Case Studies and Design*, H. Paksoy, Editor. 2005.
4. Duraković, B., *PCM-Based Building Envelope Systems, Innovative Energy Solutions for Passive Design*. Green Energy and Technology. 2020: Springer International Publishing.
5. Regeringskansliet, *Kommittédirektiv, Klimatfärdplan 2050 – strategi för hur visionen att Sverige år 2050 inte har några nettoutsläpp av växthusgaser ska uppnås* in *Dir. 2014:53*, Regeringskansliet, Editor. 2014.https://www.regeringen.se/49bb96/contentassets/2c7a8ebcc6d847b9b188201869a401b7/klimatfardplan-2050--strategi-for-hur-visionen-att-sverige-ar-2050-inte-har-nagra-nettoutslapp-av-vaxthusgaser-ska-uppnas-dir-201453
6. European Commission. *Heating and Cooling*. [cited 2019; Available from: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling.
7. Kosny, J., *PCM-Enhanced Building Components, An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures*. Engineering Materials and Processes. 2015: Springer International Publishing.
8. Mofijur, M., et al., *Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview.* 2019. **12**(16): p. 3167.
9. Campanello, S., *Saltlager kan kapa effekttopparna - Unik pilotanläggning i Göteborg.* Ny Teknik, 2019.
10. Chandel, S.S. and T. Agarwal, *Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **67**: p. 581-596.
11. McLaggan, M.S., R.M. Hadden, and M. Gillie, *Fire Performance of Phase Change Material Enhanced Plasterboard.* Fire Technology, 2018. **54**(1): p. 117-134.
12. Stenberg, U., *Byggbranschen måste ta ansvar för byggskandaler*, in *Ny Teknik*. 2016.https://www.nyteknik.se/opinion/byggbranschen-maste-ta-ansvar-for-byggskandaler-6335733
13. Abrahamsson, S. and M. Strömgren, *Boverket informerar om vindsbränder i radhus och flerbostadshus, 2008:4*. 2008, Boverket.https://www.boverket.se/contentassets/149976a7b92d457e917f5ee84d85a0b3/2008_4.pdf
14. Obua, M. *Radhus - frågor och svar*. 2020 2020-03-19 2020-07-29]; Available from: https://www.brandkaren-attunda.se/privatperson/information/radhus/radhus-fragor-och-svar/.
15. Davidson, B. and R. Patel, *Forskningsmetodikens grunder - Att planera, genomföra och rapportera en undersökning*. 2019: Studentlitteratur.
16. Software, N., *Express Scribe Transcription Software*. NCH Software.https://www.nch.com.au/scribe/index.html
17. Nationalencyklopedin, *empiri*.https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/empiri
18. Langemar, P., *Kvalitativ forskningsmetod i psykologi - att låta en värld öppna sig*. 2008: Liber.
19. Forsberg, C. and Y. Wengström, *Att göra systematiska litteraturstudier*. 2016: Natur Kultur Akademisk.
20. *Plot Digitizer*.http://plotdigitizer.sourceforge.net/

21. Agency, E.E.C. *Understanding REACH*. Available from: https://echa.europa.eu/regulations/reach/understanding-reach.
22. Singh, S., K.K. Gaikwad, and Y.S. Lee, *Phase change materials for advanced cooling packaging.* Environmental Chemistry Letters, 2018. **16**(3): p. 845-859.
23. Gin, B. and M.M. Farid, *The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food.* Journal of Food Engineering, 2010. **100**(2): p. 372-376.
24. Messerly, J.F., et al., *Low-temperature thermal data for pentane, n-heptadecane, and n-octadecane. Revised thermodynamic functions for the n-alkanes, C5-C18.* Journal of Chemical & Engineering Data, 1967. **12**(3): p. 338-346.
25. Legates, D.R., *Latent Heat*, in *Encyclopedia of World Climatology*, J.E. Oliver, Editor. 2005, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 450-451.
26. Merck. *n-Heptadecane,*. Available from: https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/mm/820616?lang=en&region=SE.
27. Strigari, L., M. Rovere, and B. D'Aguanno, *Theory of gas–gas phase transition in rare-gas binary mixtures.* The Journal of Chemical Physics, 1996. **105**(5): p. 2020-2027.
28. Peng, K., et al., *Preparation and properties of β-cyclodextrin/4,4'-diphenylmethane diisocyanate/polyethylene glycol (β-CD/MDI/PEG) crosslinking copolymers as polymeric solid–solid phase change materials.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. **145**: p. 238-247.
29. Chen, K., et al., *Preparation and characterization of form-stable paraffin/polyurethane composites as phase change materials for thermal energy storage.* Energy Conversion and Management, 2014. **77**: p. 13-21.
30. Liu, Z., et al., *Solvent-free synthesis and properties of novel solid–solid phase change materials with biodegradable castor oil for thermal energy storage.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. **147**: p. 177-184.
31. Chen, C., et al., *Synthesis and performances of novel solid–solid phase change materials with hexahydroxy compounds for thermal energy storage.* Applied Energy, 2015. **152**: p. 198-206.
32. Sarı, A., C. Alkan, and Ö. Lafçı, *Synthesis and thermal properties of poly(styrene-co-ally alcohol)-graft-stearic acid copolymers as novel solid–solid PCMs for thermal energy storage.* Solar Energy, 2012. **86**(9): p. 2282-2292.
33. Fu, X., et al., *Thermosetting solid–solid phase change materials composed of poly(ethylene glycol)-based two components: Flexible application for thermal energy storage.* Chemical Engineering Journal, 2016. **291**: p. 138-148.
34. Pielichowska, K., et al., *The influence of chain extender on properties of polyurethane-based phase change materials modified with graphene.* Applied Energy, 2016. **162**: p. 1024-1033.
35. Chen, K., et al., *Linear polyurethane ionomers as solid–solid phase change materials for thermal energy storage.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014. **130**: p. 466-473.
36. Freund, M. and G. Mózes, *Paraffin Products: Properties, Technologies, Applications*. 1982: Elsevier Scientific Publishing Company.
37. Sharma, A., et al., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(2): p. 318-345.
38. Sharma, A., S.D. Sharma, and D. Buddhi, *Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications.* Energy Conversion and Management, 2002. **43**(14): p. 1923-1930.
39. Hasnain, S.M., *Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques.* Energy Conversion and Management, 1998. **39**(11): p. 1127-1138.
40. Mann, A., et al., *The challenge of upscaling paraffin wax actuators.* Materials & Design, 2020. **190**: p. 108580.
41. Zalba, B., et al., *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications.* Applied Thermal Engineering, 2003. **23**(3): p. 251-283.

42. Yuan, Y., et al., *Fatty acids as phase change materials: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **29**: p. 482-498.
43. Feldman, D., et al., *Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage.* Solar Energy Materials, 1989. **18**(3): p. 201-216.
44. Huang, J., et al., *Form-Stable Phase Change Materials Based on Eutectic Mixture of Tetradecanol and Fatty Acids for Building Energy Storage: Preparation and Performance Analysis.* Materials, 2013. **6**(10): p. 47584775.
45. Palacios, A., et al., *Study of the Thermal Properties and the Fire Performance of Flame Retardant-Organic PCM in Bulk Form.* 2018. **11**(1): p. 117.
46. Subhash Bhatia, A.Q.Y.a., *Esterification of Palmitic Acid with Methanol in the Presence of Macroporous Ion Exchange Resin as Catalyst.* IIUM Engineering Journal, 2012. **5**(2).
47. Ravotti, R., et al., *Analysis of Bio-Based Fatty Esters PCM's Thermal Properties and Investigation of Trends in Relation to Chemical Structures* Applied Sciences, 2019. **9**(2).
48. Abhat, A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials.* Solar Energy, 1983. **30**(4): p. 313-332.
49. Mohamed, S.A., et al., *A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **70**: p. 1072-1089.
50. Bruno, F., et al., *9 - Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems*, in *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, L.F. Cabeza, Editor. 2015, Woodhead Publishing. p. 201-246.
51. Kalnæs, S.E. and B.P. Jelle, *Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities.* Energy and Buildings, 2015. **94**: p. 150-176.
52. Cabeza, L.F., et al., *Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 32 to 36°C temperature range.* Materials and Corrosion, 2001. **52**(2): p. 140-146.
53. Lane, G.A., et al., *Macro-encapsulation of heat storage phase-change materials,* . 1978, The Dow Chemical Company.https://www.osti.gov/servlets/purl/5528301
54. CAMEO Chemicals. *Salts, Basic*. 2020-07-14]; Available from: https://cameochemicals.noaa.gov/react/39.
55. CAMEO Chemicals. *Salts, Acidic*. 2020-07-14]; Available from: https://cameochemicals.noaa.gov/react/38.
56. Donkers, P.A.J., et al., *A review of salt hydrates for seasonal heat storage in domestic applications.* Applied Energy, 2017. **199**: p. 45-68.
57. National Institutes of Health (NIH), N.L.o.M., National Center for Biotechnology Information. *Calcium perchlorate*. Available from: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Calcium-perchlorate.
58. Fox, D.M., et al., *Flammability and Thermal Analysis Characterization of Imidazolium-Based Ionic Liquids.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008. **47**(16): p. 6327-6332.
59. Liaw, H.-J., et al., *Reason for Ionic Liquids to be Combustible.* Procedia Engineering, 2012. **45**: p. 502-506.
60. Kuznik, F., et al., *A review on phase change materials integrated in building walls.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(1): p. 379-391.
61. Huang, J., et al., *Form-Stable Phase Change Materials Based on Eutectic Mixture of Tetradecanol and Fatty Acids for Building Energy Storage: Preparation and Performance Analysis.* Materials (Basel), 2013. **6**(10): p. 4758-4775.
62. Lane, G.A., *Low temperature heat storage with phase change materials.* International Journal of Ambient Energy, 1980. **1**(3): p. 155-168.
63. van Galen, E. and G.J. van den Brink, *Energy storage in phase change materials for solar applications.* International Journal of Ambient Energy, 1986. **7**(1): p. 31-46.

64. National Institutes of Health (NIH), N.L.o.M., National Center for Biotechnology Information. *Palmitic acid*. Available from: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/985.
65. *Methyl palmitate* Available from: https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/309931?lang=en&region=SE.
66. National Institutes of Health (NIH), N.L.o.M., National Center for Biotechnology Information. *Sodium chloride*. Available from: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-chloride.
67. *Lead – Specific Heat, Latent Heat of Fusion, Latent Heat of Vaporization*. Available from: https://www.nuclear-power.net/lead-specific-heat-latent-heat-vaporization-fusion/.
68. Formato, R.M., *The Advantages & Challenges of Phase Change Materials (PCMs) In Thermal Packaging*. Cold Chain Technologies.http://www.coldchaintech.com/assets/Cold-Chain-Technologies-PCM-White-Paper.pdf
69. Hawlader, M.N.A., M.S. Uddin, and M.M. Khin, *Microencapsulated PCM thermal-energy storage system.* Applied Energy, 2003. **74**(1): p. 195-202.
70. Su, W., J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, *Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **48**: p. 373-391.
71. Jamekhorshid, A., S.M. Sadrameli, and M. Farid, *A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **31**: p. 531-542.
72. Su, J., L. Ren, and L. Wang, *Preparation and mechanical properties of thermal energy storage microcapsules.* Colloid and Polymer Science, 2005. **284**(2): p. 224-228.
73. Borreguero, A.M., et al., *Synthesis and characterization of microcapsules containing Rubitherm®RT27 obtained by spray drying.* Chemical Engineering Journal, 2011. **166**(1): p. 384-390.
74. Durakovic, B. and M. Torlak, *Simulation and experimental validation of phase change material and water used as heat storage medium in window applications.* Journal of Materials and Environmental Science, 2017. **8**: p. 1837-1846.
75. Zukowski, M., *Experimental study of short term thermal energy storage unit based on enclosed phase change material in polyethylene film bag.* Energy Conversion and Management, 2007. **48**(1): p. 166-173.
76. Tahan Latibari, S., et al., *Synthesis, characterization and thermal properties of nanoencapsulated phase change materials via sol–gel method.* Energy, 2013. **61**: p. 664-672.
77. Chen, Z.-H., et al., *Preparation, characterization and thermal properties of nanocapsules containing phase change material n-dodecanol by miniemulsion polymerization with polymerizable emulsifier.* Applied Energy, 2012. **91**(1): p. 7-12.
78. Zhang, Y.P., et al., *Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings.* Energy and Buildings, 2006. **38**(10): p. 1262-1269.
79. Khudhair, A.M. and M.M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials.* Energy Conversion and Management, 2004. **45**(2): p. 263-275.
80. Arkar, C., B. Vidrih, and S. Medved, *Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building.* International Journal of Refrigeration, 2007. **30**(1): p. 134-143.
81. Tan, P., et al., *Effect of phase separation and supercooling on the storage capacity in a commercial latent heat thermal energy storage: Experimental cycling of a salt hydrate PCM.* Journal of Energy Storage, 2020. **29**: p. 101266.
82. Makki, A., S. Omer, and H. Sabir, *Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **41**: p. 658-684.
83. Malvi, C.S., D.W. Dixon-Hardy, and R. Crook, *Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material.* Solar Energy, 2011. **85**(7): p. 1440-1446.

84. Kristensen, J.S., B. Merci, and G. Jomaas, *Fire-induced reradiation underneath photovoltaic arrays on flat roods.* Fire and Materials, 2018. **42**(3): p. 316-323.
85. Andersson, P., et al., *Innovativa elsystem i byggnader - konsekvenser för brandsäkerhet*. 2019, RISE: Borås.http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1369107/FULLTEXT01.pdf
86. Prieto, C. and L.F. Cabeza, *Thermal energy storage (TES) with phase change materials (PCM) in solar power plants (CSP). Concept and plant performance.* Applied Energy, 2019. **254**: p. 113646.
87. Elektronik i Norden. *Lagrad solenergi med stirlingmotor*. 2017 2020-07-20]; Available from: http://www.elinor.se/lagrad-solenergi-med-stirlingmotor.html/.
88. Yi, X., et al., *Effect of phase-change material blood containers on the quality of red blood cells during transportation in environmentally-challenging conditions.* PLOS ONE, 2020. **15**: p. e0227862.
89. Tomizawa, Y., et al., *Experimental and numerical study on phase change material (PCM) for thermal management of mobile devices.* Applied Thermal Engineering, 2016. **98**: p. 320-329.
90. Lu, T.J., *Thermal management of high power electronics with phase change cooling.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. **43**(13): p. 2245-2256.
91. Bai, F.-f., et al., *Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials.* Energy Procedia, 2019. **158**: p. 3682-3689.
92. Shim, H., E.A. McCullough, and B.W. Jones, *Using Phase Change Materials in Clothing.* Textile Research Journal, 2001. **71**(6): p. 495-502.
93. Ying, B.-a., et al., *Assessing the performance of textiles incorporating phase change materials.* Polymer Testing, 2004. **23**(5): p. 541-549.
94. Phelps, H.L., et al., *Using Phase Change Materials and Air Gaps in Designing Fire Fighting Suits: A Mathematical Investigation.* Fire Technology, 2019. **55**(1): p. 363-381.
95. Telkes, M. and E. Raymond, *Storing Solar Heat in Chemicals—A Report on the Dover House.* Heat Vent, 1949. **46**(11): p. 80-86.
96. Telkes, M. *Thermal storage for solar heating and cooling*. in *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*. 1975. Charlottesville, VA, USA.
97. Lane, G.A., *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume II: Technology*. 1986: CRC.
98. *Advanced Phase Change Material Market (PCM) By Type (Inorganic, Organic & Bio-Based) & Application (Building & Construction, Cold Storage, HVAC, Textile, Thermal Energy Storage, Electronics) – Global Trends & Forecast To 2018* 2013.https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pcm-market-250.html
99. Kiran, P. and H. Pandey, *Phase Change Materials Market Size By Product (Paraffin, Non-Paraffin, Salt Hydrates, Eutectics), By End-user (Building & Construction, HVAC, Electrical & Electronics, Packaging, Textiles, Chemical, Healthcare, Aerospace & Automotive) Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2017 – 2024*. 2018, Global Media Insights.https://www.gminsights.com/industry-analysis/phase-change-material-market
100. Karlsson, J., *Betydelsen av värmetröga konstruktioner*, in *Bygg & Teknik*. 2010.http://issuu.com/byggteknikforlaget/docs/byggteknik510/5 >
101. Wang, Q., et al., *Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction.* Energy and Buildings, 2018. **172**: p. 328-336.
102. Frigione, M., M. Lettieri, and A. Sarcinella, *Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars.* Materials, 2019. **12**(8): p. 1260.
103. Giovannini, L., et al., *A comparative analysis of the visual comfort performance between a PCM glazing and a conventional selective double glazed unit.* Sustainability (Switzerland), 2018. **10**(10).
104. Russo Ermolli, S., L. Bragança, and H. Koukkari, *Phase Changing Materials in Buildings.* International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, 2012. **2**.

105. Schossig, P., et al., *Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005. **89**(2): p. 297-306.
106. Cabeza, L.F., et al., *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings.* Energy and Buildings, 2007. **39**(2): p. 113-119.
107. Singh Rathore, P.K., S.K. Shukla, and N.K. Gupta, *Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review.* Sustainable Cities and Society, 2020. **53**: p. 101884.
108. Pomianowski, M., et al., *A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM.* Cement and Concrete Research, 2014. **55**: p. 22-34.
109. Kaltenbach, F., *PCM latent thermal storage media heating and cooling without energy consumption.*, in *Detail*. 2005.https://www.detail-online.com/article/pcm-latent-thermal-storage-media-heating-or-cooling-without-energy-consumption-15114/
110. Lin, K., et al., *Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates.* Energy and Buildings, 2005. **37**(3): p. 215-220.
111. Burström, P.G. and K. Nilvér, *Byggmaterial*. 2019: Studentlitteratur.
112. Cabeza, L.F., et al., *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1675-1695.
113. Asimakopoulou, E.K., D.I. Kolaitis, and M.A. Founti, *Fire safety aspects of PCM-enhanced gypsum plasterboards: An experimental and numerical investigation.* Fire Safety Journal, 2015. **72**: p. 50-58.
114. Cai, Y., et al., *Flammability and thermal properties of high density polyethylene/paraffin hybrid as a form-stable phase change material.* Journal of Applied Polymer Science, 2006. **99**(4): p. 1320-1327.
115. Sittisart, P. and M.M. Farid, *Fire retardants for phase change materials.* Applied Energy, 2011. **88**(9): p. 3140-3145.
116. Xu, L., X. Liu, and R. Yang, *Flame Retardant Paraffin-Based Shape-Stabilized Phase Change Material via Expandable Graphite-Based Flame-Retardant Coating.* Molecules, 2020. **25**(10).
117. Cai, Y., et al., *Preparation and flammability of high density polyethylene/paraffin/organophilic montmorillonite hybrids as a form stable phase change material.* Energy Conversion and Management, 2007. **48**(2): p. 462-469.
118. Zhang, P., et al., *Synergistic effect of iron and intumescent flame retardant on shape-stabilized phase change material.* Thermochimica Acta, 2009. **487**(1): p. 74-79.
119. Cai, Y., et al., *Thermal stability, latent heat and flame retardant properties of the thermal energy storage phase change materials based on paraffin/high density polyethylene composites.* Renewable Energy, 2009. **34**(10): p. 2117-2123.
120. Du, X., et al., *Fabrication and Characterization of Flame-Retardant Nanoencapsulated n-Octadecane with Melamine–Formaldehyde Shell for Thermal Energy Storage.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018. **6**(11): p. 15541-15549.
121. Du, X., et al., *Preparation and characterization of flame-retardant nanoencapsulated phase change materials with poly(methylmethacrylate) shells for thermal energy storage.* Journal of Materials Chemistry A, 2018. **6**(36): p. 17519-17529.
122. Xu, L., et al., *EG-based coatings for flame retardance of shape stabilized phase change materials.* Polymer Degradation and Stability, 2019. **161**: p. 114-120.
123. Sittisart, P. and M. Farid, *Fire retardand for phase change material*, in *Flame Retardants: Polymer Blends, Composites and Nanocomposites*, P.M. Visakh and Y. Arao, Editors. 2015, Springer. p. 187-208.
124. Kazanci, B., K. Cellat, and H. Paksoy, *Preparation, characterization, and thermal properties of novel fire-resistant microencapsulated phase change materials based on paraffin and a polystyrene shell.* RSC Advances, 2020. **10**: p. 24134-24144.

125. Salyer, I.O., *Building products incorporating phase change materials and method of making same* U. Patent, Editor. 1998, The University of Dayton (Dayton, OH) https://patents.justia.com/patent/5755216#description
126. Salyer, I.O. and A.K. Sircar. *Phase Change Katerials For Heating And Cooling Of Residential Buildings And Other Applications*. in *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 1990.
127. Auckaili, A. and M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change material.* Energy Conversion and Management - ENERG CONV MANAGE, 2004. **45**: p. 263-275.
128. Speight, J.G., *Chapter 4 - Sources and Types of Organic Pollutants*, in *Environmental Organic Chemistry for Engineers*, J.G. Speight, Editor. 2017, Butterworth-Heinemann. p. 153-201.
129. Kosny, J., et al., *2006/07 Field Testing of Cellulose Fiber Insulation Enhanced with Phase Change Material* 2008, Oak Ridge National Laboratory https://pcmsouth.com/yahoo_site_admin/assets/docs/ORNL_TM_2007_1861.364121838.pdf
130. Shaw, S., et al., *Halogenated flame retardants: Do the fire safety benefits justify the risks?* Reviews on environmental health, 2010. **25**: p. 261-305.
131. Karaipekli, A., et al., *Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes.* Energy Conversion and Management, 2017. **134**: p. 373-381.
132. Zhang, Z. and X. Fang, *Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material.* Energy Conversion and Management, 2006. **47**(3): p. 303-310.
133. Uddin, F., *Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization*. 2018.
134. Uddin, F. *Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization*. 2018; Available from: https://www.intechopen.com/books/current-topics-in-the-utilization-of-clay-in-industrial-and-medical-applications/montmorillonite-an-introduction-to-properties-and-utilization.
135. Zhang, P., et al., *The Thermal Property and Flame Retardant Mechanism of Intumescent Flame Retardant Paraffin System with Metal.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010. **49**(13): p. 6003-6009.
136. (DC), N.R.C.U.S.o.F.-R.C.W. *Antimony Trioxide*. 2000.; Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK225648/.
137. Grund, S.C., et al., *Antimony and Antimony Compounds*, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley
138. Cai, Y., et al., *Preparation and properties studies of halogen-free flame retardant form-stable phase change materials based on paraffin/high density polyethylene composites.* Applied Energy, 2008. **85**(8): p. 765-775.
139. Xu, D., et al., *Flame-retardant effect and mechanism of melamine phosphate on silicone thermoplastic elastomer.* RSC Advances, 2018. **8**(9): p. 5034-5041.
140. Hörold, S., *Chapter 6 - Phosphorus-based and Intumescent Flame Retardants*, in *Polymer Green Flame Retardants*, C.D. Papaspyrides and P. Kiliaris, Editors. 2014, Elsevier: Amsterdam. p. 221-254.
141. Li, Z., et al., *Thermal and combustion behavior of phosphorus–nitrogen and phosphorus–silicon retarded epoxy.* Iranian Polymer Journal, 2017. **26**(1): p. 21-30.
142. *Melamine Cyanurate*. Available from: http://fr.polymerinsights.com/fr-types/nitrogen-based/melamine-cyanurate.
143. CEN, *EN 13501-1:2019 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests*, E.C.f.S. CEN, Editor. 2019.https://www.sis.se/en/produkter/environment-health-protection-safety/protection-against-fire/fireresistance-of-building-materials-and-elements/ss-en-13501-120192/

144. Boverket, *Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn* 2018, Boverket.https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/kartlaggning-av-fel-brister-och-skador-inom-byggsektorn.pdf
145. Hansson, T., *Brandsäkerhet vid genomföringar i massivträbyggnader*, in *Institutionen för samhällsbyggnad och natrurresurser*. 2020, Luleå tekniska universitet
146. Strömgren, M., *Metoder för att följa upp efterlevnad av brandskyddskrav, SP-rapport 2016:92*. 2016, SP.https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1060993/FULLTEXT01.pdf
147. Menoufi, K., et al., *Life Cycle Assessment of experimental cubicles including PCM manufactured from natural resources (esters): A theoretical study.* Renewable Energy, 2013. **51**: p. 398-403.
148. Simonson, M., et al. *Environmental Assessment of Fires in Products Using the Fire-LCA Model*. 2005. London, IAFSS.
149. Jelle, B.P., *Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory.* Journal of Materials Science, 2012. **47**(18): p. 6475-6496.
150. Jelle, B.P., et al., *Robustness classification of materials, assemblies and buildings.* Journal of Building Physics, 2014. **37**(3): p. 213-245.
151. Storesund, K., et al., *Fire safe, sustainable loose furnishing.* Fire and Materials. **n/a**(n/a).
152. Boverket. *Brandklasser för golv, väggar tak, rörisolering och kablar*. [cited 2019; Available from: https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/brandskydd/brandklasserd-for-ytskikt/.
153. Sveriges Riksdag, *Lag (2003:778) om skydd mot olyckor*. 2003.https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2003778-om-skydd-mot-olyckor_sfs-2003-778
154. Räddningsverket, *Brandkrav på lös inredning*, Räddningsverket, Editor.https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/21571.pdf
155. Hedström, K., *SRVFS 2007:1 Statens räddningsverks allmänna råd och kommentarer om brandvarnare i bostäder*, Statens räddningsverk, Editor. 2007, Statens räddningsverk,.https://www.msb.se/siteassets/dokument/regler/rs/48edc0c8-c291-4ff7-aed4-d0c5105b6eeb.pdf
156. Sundström, B., et al., *Brandskydd och lös inredning - en vägledning, SP-rapport 2009:30*. 2009, SP.https://www.brandskyddsforeningen.se/globalassets/brandforsk/rapporter-2000-2015/brandskydd-och-los-inredning---en-vagledning/bf06_302-061_rapport.pdf
157. Li, Y., J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, *Heat transfer analysis of an integrated double skin façade and phase change material blind system.* Building and Environment, 2017. **125**: p. 111-121.

Bilaga A Intervjustudie, intervjuguide

Intervjuguide

Välkomnande

- Introduktion
  - Syfte med intervjustudien
  - Respondenten presentera sig själv

Inspelning av samtal, ok?

Delge information om:
- **Samtyckeskravet** (Deltagare i en undersökning har rätt att själva bestämma över sin medverkan)
- **Konfidentialitetskravet** (Uppgifter om deltagande personer i en undersökning ska ges största möjliga konfidentialitet och personuppgifterna skall förvaras på ett sådant sätt att obehöriga inte kan ta del av dem)
- **Nyttjandekravet** (Uppgifter insamlade om enskilda personer får endast användas för forskningsändamål)

Frågor

- Hur skulle DU vilja beskriva PCM?
- Vilka användningsområden finns för PCM?
- Finns det mycket kunskap om ämnet på marknaden?
- Varför skulle man vilja använda PCM?
- Vilket PCM material används mest på marknaden?
- Vilka regelverk finns det angående PCM?
- Vad är det som avgör vilket PCM material som används i byggnader?
- Hur påverkar PCM de olika byggnadsmaterialen?
  Bärighet - Värmelagring - Lätthanterligt - Brandegenskaper

- Hur går processen till, vem är det som avgör om byggnader ska ha fasomvandlingsmaterial?
- Hur påverkas byggprocessen av att installera PCM?
- Vilka brandskyddsåtgärder finns för PCM?
- Vilka risker tillkommer med PCM?
- Framtida användningsområden för PCM?
- Ser ni en ökad trend i att använda sig av PCM?
- Skulle ni vilja se att PCM används mer?
- Känner ni till några tillbud där PCM har varit inblandat?
- Eventuella tillägg?

Tacka för medverkan!

Bilaga B Intervjustudie, första kontakten

*Vänligen vidarebefordra detta mail till relevant person för ämnet om Du inte är rätt person

Hej,

Mitt namn är Jonathan Wolf och jag studerar till brandingenjör på Luleå tekniska universitet. Jag är i slutfasen av utbildningen vilket betyder att jag ska skriva mitt examensarbete. Examensarbetet ingår i ett större projekt som är beställt av Brandforsk. Ledaren för projektet är Michael Försth, Professor i brandteknik på Luleå tekniska universitet. Mitt arbete kommer att bli en intervjustudie om **fasomvandlingsmaterial** i byggnader.

Därmed kontaktar jag er i hopp om att finna personer med kunskaper om fasomvandlingsmaterial som hade kunnat tänka sig att ställa upp på en intervju. Tidsmässigt räknar jag med att intervjun tar maximalt 80 minuter. Alla uppgifter kommer att behandlas konfidentiellt och utefter era önskemål kan även er organisation att anonymiseras i uppsatsen. Eftersom jag befinner mig i Sölvesborg, Blekinge län kan det vara svårt att träffas för en intervju, därför är samtal över Skype/telefon prioriterat. På grund av rådande omständigheter med covid-19 är detta ännu en anledning till att jag prioriterar samtal över fysisk träff.

Intresset att genomföra min examensarbete tillsammans med er är stor.
Därför hoppas jag att möjligheten och intresset finns från er sida att samarbeta med mig.

Jag ser fram emot att höra mer från er!

Med vänliga hälsningar,
Jonathan Wolf

Kontakt:
Mobil 076-883 83 11
Mail: Jonte_wolf95@hotmail.com

***Kortfattat om fasomvandling:**

Fasomvandlingsmaterial i byggnader används för att lagra termisk energi genom att materialet genomgår en fasomvandling. Med hjälp av detta kan energin lagras i till exempel väggarna för att jämna ut temperaturskillnaden som uppstår mellan dag och natt. Detta leder till att mindre energi går åt för att värma/kyla bostäder vilket är en stor orsak till energiförbrukningen i byggnader.

Bilaga C Intervjustudie, andra kontakten

Hej!

Tack för Ditt deltagande i mitt arbete. Jag vill börja med att berätta lite vad arbetet kommer att gå ut på och mitt syfte med intervjun.

Men först vill jag fråga om tillåtelse att få spela in vårt intervjumöte då detta underlättar för mig att vara mer delaktig i intervjun och fokusera på samtalet. Det underlättar även sen när transkriberingen sker och självklart kommer all data att behandlas med sekretess om så önskas.

Jag vill även berätta om de rättigheter Du har som respondent.

- **Samtyckeskravet**: Deltagare i undersökningen har rätt att själva bestämma över sin medverkan och om de vill avbryta intervjun.

- **Konfidentialitetskravet:** Uppgifter om deltagande personer i undersökningen ska ges största möjliga konfidentialitet ifall det önskas och personuppgifterna skall förvaras på ett sådant sätt att obehöriga inte kan ta del av dem.

- **Nyttjandekravet:** Uppgifter som insamlas får endast användas för forskningsändamål.

Mitt examensarbete går ut på att samla information om fasomvandlingsmaterial som är ett relativt nytt material på den svenska marknaden. Genom att vara i framkant med de tekniska kan brandrisker identifieras innan fasomvandlingsmaterialen eventuellt får alltför stor utsträckning på marknaden. Men även vilka möjligheter och användningsområden denna teknologin medför. Fasomvandlingsmaterial får allt större uppmärksamhet när det kommer energilagring till byggnader och det gäller att samhället har kunskap om de brandrisker som materialet kan medföra. Detta arbete kommer vara avgränsat till fasomvandlingsmaterial i byggnader.

Syftet med intervjun är att få en verklighetsbild om utbredningen och kunskap om fasomvandlingsmaterial på svenska marknaden. Genom att identifiera kunskapsluckor kan förslag på rutiner, åtgärder samt provningsmetoder tas fram i de fall då regelverken för produktgodkännande saknas eller lämnar oklarheter som försvårar bedömningen av brandsäkerheten. Även forskningsläget kommer att identifieras för att ta reda på områden där fasomvandlingsmaterial förväntas ökas eller påbörjas samt vilken påverkan detta kommer att ha på brandsäkerheten i samhället.

Är det något ni undrar över så tveka inte att höra av er!

Med vänliga hälsningar,

Jonathan Wolf

Bilaga D Intervjustudie, tematisk analys

Hur skulle DU vilja beskriva PCM?

Respondenter	Fasomvandling	Energi	Material	Inkapslingar	Problem	Fördelar
K.Ö		Beroende på vilket håll fasomvandlingen går så avger eller absorberar den **energi**.				Men hela dynamiken som ligger i att de tunga materialen lagra respektive värmer under lite längre tid. Om man då blandar in PCM kan man få väldigt stora effekter.
(V.M)	Fast till flytande och Flytande till gas. För att lagra termisk energi som är värme och kyla så använder man mest **fasändringen** mellan fast och flytande.	Det handlar om att ta hand om den **energin** som omsätts när ett material ändrar fas.	Det finns olika typer av PCM material och en klass handlar om **salter** (**oorganiska**) som smälter och stelnar vid en viss temperatur. **Organiska**, de smälter och stelnar vid massor av olika temperaturer beroende på paraffin så de är väldigt användbara på de sättet.		Om du skulle använda **fasändringen** flytande - gas så får man så stor volym ändring. Så det blir praktiskt sätt mer **komplicerat**.	
Oj.C			The phase change material comes in different forms, **organic** and **inorganic**. There is also **eulitic** which is very uncommon in regular applications.	PCM is a phase change material, basically it come in **micro**- **macro capsulated** form.	Paraffin PCM which is very common, build in many applications but it has some **disadvantages** because of the flammability. Also less latent heat compared to the other PCMs.	**Advantages** is that Paraffin is costly compare to other PCM.

L.A	Ett material som ändrar **fas** gas-vätska-fast.	Man kan använda dessa faser för att lagra **energi** och sen avge när det är lämpligt.				
K.H		Lagring av kyla eller värme.				
M.M		PCM are very interesting and new material which have potential to **energy** savings in buildings.	They contend to take some very different forms, in the most basic level you can have is the **organic** vs **inorganic** ones.	Then you can have all the micro and macro encapsulate, plastic sheets so they come in very different form.	Like if you have a building which is uninsulated, PCM won't be efficient. The introduction of organic materials into a building can be problematic if not assess probably.	Lightweight buildings tend to heat up and cool down very rapidly, which is something that PCMs are specifically aimed at preventing or mitigating.
I.B			You have different types of PCM's, Paraffin, the oxygenated Bio materials and you got the water based salt hydrates.		Organic - Paraffin, Obviously they wouldn't do well in a fire perspektiv but if you would use a plasterboard on top of them which is fire resistance, usually it should hold 60 minutes to get the people out of the building.	Using 25 mm plasterboard with microencapsulated PCM inside is estimated to be equivalent to approximately 70 mm thick concrete in terms of thermal storage.
L.B						
Ol.C						
K.A (mailad)						

Vilka användningsområden finns för PCM (i byggnader)?

Respondenter	Konstruktioner	Appliceringsmetoder	Material	Energi	Övriga Tillämpningar
K.Ö	Energi och effekt optimering i byggnader.				
(V.M)	Lagring av värme och kyla. En varm sommardag så har man fasomvandlingsmaterial på fasaden så kommer inte värmen in i byggnaden lika lätt så länge fasomvandlingsmaterialet ligger som en sköld och smälter. Samma sak inifrån.	Svårt att impregnera paraffin i byggnader för att det inte ska bli risk att det börjar brinna.	Salter är ganska instabila så de håller inte prestandan i många cyklar så då blir dem praktiskt inte så användbara i byggnader.	Hjälper till att jämna ut temperatursvängningar. Allt är kopplat till energieffektivisering, att förflytta kyla och värme i tiden med hjälp av lagring med fasomvandlingsmaterial.	Rent av praktiskt eller tekniskt kan det passa i många olika tillämpningar det är ju mest en fråga om vad som är det mest kostnadseffektiva och mest praktiska alternativet för varje tillämpning.
Oj.C		They started to use micro/marco encapsulated and in that case you have the outer polymer shell and you put PCM material inside and the outer shell is very stable in the concrete. Direct form, you use it in concrete or cement. Indirect form like small pouches or small tubes which is added in insulations walls or near the ventilation systems.	For building materials usually they don't use inorganic form. Organic form are two types of PCMs they use mainly, Paraffin oil which is very common and the other fatty acids.	Basically, when you put PCM in the concrete you reduce the load on the heating system.	Clothing and bulletproof jackets, food transport and medicine transport.

L.A	Förskjuta energianvändning i tiden.	Fasomvandlingsmaterial används också inom brand och brandskydd		Gipsskivan är ett exempel som har kristall bundet vatten som tar energi vid brand när det först värms upp och sen ska förångas.	
K.H	Energilagring.	Isolering			
M.M	In building it tension is to reduce the temperature fluctuation inside the building. A lot of the fire codes that we have and a lot of ideas that we have about fire engineering and the way that we design they don't consider flammable wall linings. You assume that you have a field of, in a building but u don’t assume that the lining are flammable.	Mainly looked at wall lining like plasterboarding. The concentration in gypsum are around 10-25% contains the PCM after that its not stable, the gypsum kinda falls apart or you need to add more and more expensive additives to kinda keep it together. For super concentration once which are the lair behind can be like 60 % paraffin wax and the other 40 % can be polyethylene which makes 100% hydrocarbon fuel. The function of those still the same but they do kinda different because they are deeper in the walls so it takes time for heat to get in. (such as passive houses, zero emissions, net zero emission buildings, etc.)		Det är viktigt att kolla på vart man ska använda sig av PCM. I varma länder där det har höga kyl kostnader är det viktigt att ta fram ett PCM som kyler (absorbera) på sommaren. Detta kommer leda till att på vintern senare kommer materialet inte vara lika effektivt och måste betraktas i kostnaderna.	

I.B	It's a effective way to provide what we call lightweight thermal mass. More and more buildings are made in the factories and then shipped out. These are almost always lightweight constructions which again "needs" thermal mass.	One of the problems is in a classroom or in a home you have whiteboards, you have fire cabins, you have all sort of thing and for any thermal mass to be effective it has to be in contact with the rooms air. A better idea is to have a probably something simple as a insualtionbox with heat exchangers inside. Then running it with water or air with the heat exchangers inside. This could be seated outside like the north side of the building, taking away any fire risk because its in a insulated box with fire dampers which closed in case of fire. Microcapsules PCM would claim that its has a class A material which means that the micro capsule could be thermally cycled, (fast - flytande och devise versa) 10000 times without lost in performance. 10 000 times in a plasterboard would be equivalent to 30 years performance.			Cold chain is the transport of vaccines, body part, food etc were its critical that the right from the start you contain the right temperature. Vaccines for example lose their potency if it gets to hot or too cool. Clothing, Mattresses, Textiles, Cool lithium batteries, Thermal batteries etc.
L.B					
Ol.C					

Finns det mycket kunskap om ämnet på marknaden?

Respondenter	Konstruktioner	Marknaden	Generellt (Marknaden)	Utanför Sverige
K.Ö			Generellt så är den inte så utbredd men säkert på vissa områden.	
(V.M)		Nja. I konsultvärlden är det ganska begränsat pga av att varje tillämpning behöver sin egen design för ett lager och sin egen specifika PCM som smälter vid en viss temperatur. Man har inte kommit till en nivå i utvecklingen där vi har produkter som är färdiga att köpa utan allt ska designas från scratch.	Kunnandet är ganska begränsat men att det finns en stor nyfikenhet.	
Oj.C	When it come to the contractors and people wanted to construct something usually they don't use PCM because it's an expensive material.		It's not very common but the researchers started to work on it for 5-6 years ago so compare to other materials is relatively new.	

L.A	Inom begränsat till byggapplikationer så är det väldigt begränsat och att det inte har slagit igenom riktigt.			Men stött på de på amerikanska marknaden att det finns kommersiella produkter. Funktionen på dem kan man ifrågasätta och priserna är höga så det har inte fått något genombrott inom byggsektorn än.
K.H			Branschmässigt är den väldigt låg. Nej.	
M.M	So when we design buildings we normally except the lining to be **not** combustible so as soon you have combustible lining it changes things. So you have these very interesting material but these materials are so different from traditional materials that you require a different approach.			In the UK at the start 2011 there was no knowledge. 2015 builders knew about them and had experience about them. So in the space of 3-4 years they went from no one had heard them and explain them every single time and suddenly they were widespread.
I.B	The usage for PCM is not developed at all in the contructional one. It's still in its infancy, it not really developed yet.	If you want to buy some micro encapsulated as these companies in the USA sells, you are looking at between 15-20 euro per kilo. That means on a plasterboard you need to use 2-3 kilos/m2. That's a big marketing problem.	No. Lots of universes have written about PCM and there is some companies producing but not many.	

L.B				
Ol.C				

Varför skulle man vilja använda PCM?

Respondenter	Energi	Kostnader	Konkurrens
K.Ö	Att man kan optimera energi och effekt hantering i både brand sammanhang och annat.		
(V.M)		Att den kan absorbera värme från människor och datorer som finns i byggnader som skapar värme så den hjälper till att jämna ut temperatursvängningar. Detta kan man lika gärna göra istället genom att bygga tjockare väggar i tegel eller något annat. Så återigen blir det en kostnadsfråga, är det billigare att bygga tjocka väggar eller att använda sig av PCM. Hela tiden måste man jämföra sig med vad som är effektivast.	Tillämpningsområdena där PCM kan konkurrera där då vatten INTE är praktisk att använda.
Oj.C	Thermal comfort and reduce the load on heating/cooling system.		
L.A	För att åstadkomma tidsförskjutningen i energianvändningen. För att kapar topparna på energiförbrukningen.		

K.H	Energilagring.		
M.M	Energy saving for super insulation buildings.	Kostbeenificals.	
I.B	Energy storage.		The problem with lightweight construction is that they don't have a thermal mass. Almost everyone preferred the PCM kind of cooling because the HVAC system work in the way that if the temperature gets hot it gets turned on and if it's cool the system shuts down. So you gets these curves like a saw tooth of hot and cold temperature which you didn’t get from the PCM.
L.B			
Ol.C			

Vilket PCM material används mest på marknaden?

Respondenter	Temperatur	Material	Kostnader
K.Ö			
(V.M)		Svårt att säga för det inte används så mycket. Finns inte så mycket på produkt sidan ännu.	
Oj.C	For cooling purposes they use PCM with temperature range 20-22 C.For thermal comfort they use PCM with temperature range 24-28 C and for heating purposes like geothermal energy they use 50-70 C.	They mostly use micro encapsulated form because they are very stable in the concrete mix and they are not exposed directly to the material. For building materials usually they don't use inorganic form.	So microencapsulated form with paraffin wax and biowax. Mostly because it's the cheapest material.
L.A			
K.H			
M.M		Organic.	
I.B	It’s probably tetradecane for the Cold chain 5-8 C. For the constructions, if you want to control room temperature you would been looking at something of PCM 21-25 C.	If you have a good paraffin it would give you 200 KJ/kg and ice would give you around 334 KJ/kg. But ice work only by 0 C. The advantage with the other PCM’s that you nearly can get every temperature you want.	
L.B			
Ol.C			

Vilka regelverk finns det angående PCM?

Respondenter	Health and safety	Europeisk standard	Generellt (brand)	PCM
K.Ö		Det kan komma komponenter med helt nya material. Tex fasomvandlingsmaterial. Då är det inte säkert att dem gamla provningsmetoderna är direkt tillämpbara.	Tittar man på brand sidan så är det dem grundläggande brand reglerna. De är dem samma oberoende av vilka material man använder.	Inga speciella regelverk för fasomvandlingsmaterial.
(V.M)		På utvecklingssidan när de har arbetat internationellt med samarbetsprojekt som bara handlar om själva pcm materialen så försöker de verka att få fram en europeisk standard, kring hur man ska redovisa funktion och presentation hos ett sådant material. Så inte ens det finns. Det skapar problem för det går inte att jämföra olika material.		Nej det finns det inte.
Oj.C				
L.A	Klassiska health and safety dokument som finns på alla material. Alla material ska ju testat och ha en klassning (Reach klassning).	Om det ska sättas i byggnader så ska det som alla andra material genomgår en euro klassystem.		
K.H			Generellt utgörs ju ett test på produkter.	

M.M			They go though the same process as every other material, if you want to use them i building you need to go through the fire regulations.	When it come to regulation they are considered a normal building material.
I.B	On part of how the state have been and toxicity regulations which apply to all chemicals.	I had these conversation with BRE (building research establishment) in the UK and sort of scratch their heads say no we only do end product regulations. That's because they can be used in so many different ways.	When they are incorporated into finished product like a plasterboards it will have to pass fire test and sodern(modern) test. It will have to undergo standard test for that product type.	For PCM themselves, no.
L.B				
Ol.C				

Vad är det som avgör vilket PCM material som används i byggnader?

Respondenter	Kostnader	Tillämpning	Prestanda
K.Ö			Beror på vilken utsträckning så att man kan uppfylla kraven.
(V.M)		Det gäller att man tar reda på vilket ändamål man vill få ut av materialet. Är det kyla eller värme som är i fokus.	Det ska ha sin fasändringstemperatur för det ändamål man är ute efter.
Oj.C		Cooling: 20-22 C Thermal comfort: 24-28 C. Heating: 50-70 C	They mostly use micro encapsulated form because they are very stable in the concrete mix and they are not exposed directly to the material.
L.A		Vid vilken temperatur vill jag använda mig av denna effekt.	
K.H			
M.M	Finding the cheapest once.		
I.B	Cost. Persuade people and getting them to pay for it is difficult.	You could either use concrete (sensible heat) or PCM (latent heat). Sensible heat (concrete): The more energy you put into it the hotter the block gets. With PCM, the graph you will see is that once the PCM is solid, it behaves the same way until it reach the melting point. Then even though you put more and more energy in, the	After cost comes performance and data. It relies on the passage of air acrossing it to exchange heat with the cold air passing it. This is critical so it can do its job the next day. On of the other problem with thermal mass and PCM which is just a clever sort of thermal mass is that if you look at the temperature variation the highest temperature occurs between 2-5 o'clock in the afternoon. So if you had a hot day, and you have your microencapsulation in your plastic boards or

		temperature will stay the same because what you doing is breaking down the crystal structure, the heat is breaking down the crystal structure of the PCM.	whatever if you then have a warm morning and the wax in the microencapsulation melts during the morning then it's nothing left over for the afternoon. So you have used up you daily thermal capacity in the morning and there is nothing left in the afternoon.
L.B			
Ol.C			

Hur påverkar PCM de olika byggnadsmaterialen?

Respondenter	Konstruktioner	Livslängd	Miljö
K.Ö	Bärighet och brand.	Beständighet Frågan. Byggnadsmaterial ska ha en lång livslängd. Viktig del.	Miljöaspekter - Hur påverkar materialet omgivande miljö och inomhusmiljön. Både på kort och lång sikt. Då kan man räkna från vaggan till graven.
(V.M)	Salterna få inte komma i kontakt med luft och medför korrosion om de skulle börja läcka. Enligt vissa prover så har paraffinet läckt ut genom fogar och blivit som en oljig film.	Dessa salter är ganska instabila så de håller inte prestandan i många cyklar så då blir dem praktiskt inte så användbara i byggnader.	
Oj.C	They started to use it in direct form in the concrete. But that's not a good choice because they found out that infects the other concrete properties. So they started to use micro/marco encapsulated and in that case u have they outer polymer shell and you put PCM material inside and the outer shell is very stable in the concrete.		
L.A	Börjar man integrera PCM i ett obrännbart material så kan man få det brännbart. Det gäller ju när man integrera, använder man sig av en duk så påverkas inte de andra material. Snarare konstruktion.		
K.H			
M.M	They affect them in therms of fire properties in a negative way. They are easy to ignite and propagate flames by themself.		

I.B	The raw PCM can't be put in building material because the PCM been water based, Salt hydrates or Waxed based paraffin wax. You have to either micro encapsulate it or have it in a insulated tank.	The problem is that water molecule is very good at wickling though things. It's a very small molecule and if you tried to put inside a microencapsul they can "wiggle" out from the shell. Also salt have a tendency to "super cool".	
L.B			
Ol.C			

Hur går processen till, vem är det som avgör om byggnader ska ha fasomvandlingsmaterial?

Respondenter	Byggaren?		Brandskydd	Arbetsmiljö
K.Ö	De som bygger huset och utforma byggnaden.			
(V.M)		Finns inte så mycket på marknaden		
Oj.C				
L.A	Den som gör energi designen.		Vill man använda PCM som brandskydd så är det den som utvecklar konstruktionen.	
K.H	JM själva. Produktutvecklaren lämnar in ett förbättringsförslag enligt deras rutiner. Sen kommer det till godkännande projektanvisningar och är deras strukturkapital. Där finns det olika byggdelar till exempel det rör stommen. Då får man utreda och gör testprojekt. Om det då verkar bra så gör man ett större testprojekt och jämför olika saker. tex tidsplanen och så räknar man på kostnaderna. Sen går förslaget igenom olika instanser och i slutändan, kvalitet och miljöråd Jms högsta beslut.			En viktig del av utredningen är arbetsmiljö, hur är det att hantera dessa ämnen i byggprocessen. Materialet måste också vara miljövärderat (Svanen). Det är viktigt då att leverantören kan svara på vad som finns i produkten.
M.M	The Builder			

I.B	Usually by the modeling. The design builder use thermal modeling. They are using this Energy plus program. There they can regulate how much concrete or pcm they need.			
L.B				
Ol.C				

Hur påverkas byggprocessen av att installera PCM?

Respondenter	Kostnader	Tid	Hantering
K.Ö			
(V.M)			
Oj.C	The main reason of concern by using PCM is the cost.		
L.A	Är det en komponent i ett byggmaterial så påverkas det inte så mycket.	Men är det att man ska installera stora tankar i byggnaden så är det såklart att man måste ha plast och det blir liksom extra byggen.	
K.H			
M.M			
I.B			With plasterboard is not that affected. It has to be made as simple and straightforward. It a hightech solution so you can't ask the builders to do it. Easy to use.
L.B			

OI.C			

Vilka brandskyddsåtgärder finns för PCM?

Respondenter	Tillsatser	Materialval	Standarder	
K.Ö	Det vet jag inte. Det finns väl mer eller mindre miljöfarliga tillsatser man kan tillföra för att få ner brännbarheten.			
(V.M)		Ingen aning. Känner inte till byggnader med paraffin utan man har använt sig av salter istället.		
Oj.C		Use different PCM.		
L.A			Känner inte till några. Ska man ha det i en del av materialet/konstruktionen så är det dem standarderna som finns. Inget specifikt för materialet.	
K.H				Vet inte. Beror ju på vart det kommer installeras.
M.M			PCM plasterboard used in Europe must go though reaction to fire framework and the fire resistance framework. Plasterboard with PCM needs to have a low concentration of PCM (10%/Mass) B - class. Plasterboards with 20-25% gets C,D,F	

			class and then you need to have a extra protection. You could use a plasterboard in front the PCM plasterboard as protection but that affects the PCM effect.	
I.B		For the water based you don't need any. Waxed based ones you need some sort of protection. But you need to test it before you use it.		
L.B				
Ol.C				

Vilka risker tillkommer med PCM?

Respondenter	Brand	Kostnader	Tid	Effekter	Hantering
K.Ö	Brandrisker				
(V.M)					Riskerna om det skulle bli spill av materialet och någon får i sig det. Vid rivning eller konstruktion. Vissa av salter kan vara giftiga. Det gäller att det kommer ett krav på standarder.
Oj.C				You need to add a large amount of PCM to have an effect. 15-20 % and that affects the density of the material. You should be careful where you add the PCM.	
L.A	Brandrisker.			Det vi gjorde under försöket var att integrera det i material och det vi kom fram till att vi behövde stora mängder för att få en effekt.	
K.H		Kostnader	Förlängning av byggprocessen		Arbetsmiljö
M.M	Fire				Corrosive, Leakage
I.B					If it done correctly there shouldn’t be any.

L.B					
Ol.C					

Framtida användningsområden för PCM?

Respondenter	Övrigt	Konstruktioner
K.Ö	Svårt att säga	
(V.M)		Kyl tillämpningar. Kombinera PCM med värmepumpsteknik. Även att kombinera det med större kylmaskiner och värmepumpar.
Oj.C		If the PCM gets cheaper you can start using as the applications to support the heating systems.
L.A		Kanske ett nytt PCM men det är mycket kvar att göra.
K.H	PCM i fönster, någon form av genomskinlig PCM.	Energilagring i stommen i betonghus.
M.M	Solar Panels	
I.B		I think one is construction. That will become the biggest usage so far. That will become a massive growth in the PCM market. As we moved to construction built in factories and then shipped. Most are going to be lightweight. Then you would need some sort of thermal mass.
L.B		
Ol.C		

Ser ni en ökad trend i att använda sig av PCM?

Respondenter	Yes	No	vet inte
K.Ö			Det vet jag inte. Men kan man börja visa att det fördelar ekonomisk, teknisk och funktionsmässigt på att använda detta borde man få en ökad trend.
(V.M)	Ett ökat intresse. En stor del av elbehovet går att värma och kyla byggnader. Då blir det ett ökat intresse att kunna utjämna last kurvorna på behovs sidan. God potential.		
Oj.C	Yes. Very high.It better to use material that's long lasting and reduce the load on your heating and cooling system and PCM is THAT material.		
L.A	Ett ökat intresse. Tar tid att få fram produkter.		
K.H		Nej, pga dålig marknadsföring.	
M.M	Yes, They went from completely unknown to know very fast.		
I.B	Yes. We still need education, what PCM are and what PCM aren't. You can't stick PCM in a building and they will work. It has to be design.		

L.B			
Ol.C			

Skulle ni vilja se att PCM används mer?

Respondenter	
K.Ö	Ja , jag tycker det är väldigt intressant.
(V.M)	Ja. Det kommer nog inte lösa alla problem så länge det används på rätt ställe.
Oj.C	Yes.
L.A	Ja, kan man använda det för att göra energieffektivare system så är det ett stort genombrott.
K.H	Allt som kan hjälpa oss mot ett fossilfritt Sverige.
M.M	Yes, it is a very interesting material.
I.B	Yes.
L.B	
Ol.C	

Känner ni till några tillbud där PCM har varit inblandat?

Respondenter	
K.Ö	Nej.
(V.M)	Nej.
Oj.C	Nej.
L.A	Nej.
K.H	Nej.
M.M	Nej.
I.B	Nej.
L.B	Nej.
Ol.C	Nej.

Bilaga E Brandprovningsresultat

Beteckningar

Material eller brandkyddsmedel

AO - Antimontrioxid

APP- Ammonium polyfosfat

EG - Expanderbar grafit

FB - Fosforbaserad

HDPE - högdensitetspolyeten

IFR – Intumescerande flamskyddsmedel (IFR - från engelska Intumescent flame retardant)

MA - melamin

MCA - Melamincyanurat

MPP - Melaminfosfat

MMT -montmorillonite lera

PER - Pentaerytritol

phr – Parts per Hundred Rubber

RF – röd fosfor

ZB – zink borat

Parametrar – data från konkalorimeter

Konkalorimetri är en av de mest effektiva brandbeteendetesterna för medelstora provkroppar. Principen för konkalorimeter baseras på mätningen av den minskande syrekoncentrationen i förbränningsgaserna i ett prov utsatt för ett givet värmeflöde (i allmänhet från 10 till 100 $kW \cdot m^{-2}$ och kommer att refereras som *effekt på konen*).

Den metoden är standardiserad i USA (ASTM E 1354) och ekvivalent internationell standard (ISO 5660). Standardiserad storlek på provet är 100 × 100 mm^2. En konisk strålande elektrisk värmare bestrålar provet ovanifrån. Förbränningen utlöses av en elektrisk gnista. De producerade förbränningsgaserna passerar genom värmekonen och fångas upp med ett avgassystem med en centrifugalfläkt och huva. Gasflödet, syrekoncentrationen, CO, CO2-koncentrationer, effekt utveckling i olika form presenteras i följande tabell.

Data som presenterad består

- ***HRR*** – *heat released rate* [$kW \cdot m^{-2}$]- Mätningarna av gasflöde och syrekoncentration används för att beräkna mängden värmeavgivning per tidsenhet och ytenhet
- ***pHRR*** – *peak of heat released rate* [$kW \cdot m^{-2}$] – den maximal värmeavgivningen
- ***Total HRR*** – *total heat released rate* [$MJ \cdot m^{-2}$] - integrationen av HRR kontra tidskurva ger den totala värmeavgivningen
- ***TSR*** - *total smoke released* [$m^2 \cdot m^{-2}$]
- ***TSP*** – *total smoke production* [m^2]

- ***TTI*** – *time to ignition* [s] - tid till antändning
- ***TTF*** – *time to flameout* [s] - Förbränningstid
- ***CO*** [kg/kg]
- ***EHC -*** *effective heat of combustion* [$MJ \cdot kg^{-1}$]

*Tabell 5. Tidsrelaterade brandegenskaper av fasomvandlingsmaterial. * - vertikal orientering av provkroppen*

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**TTI [s]**	**Tid till pHRR [s]**	**TTF [s]**	**Tjocklek på provkoppen [mm]**	**Effekt på konen [kW·m^{-2}]**
Inkapslad i gips[11]	Saknas		150		235	25	20
			31.6		315		50
			18		335		70
			130		207		20*
			29.5		373		50*
			18.5		505		70*
Inkapslad i gips[113]	Saknas	Papper	41	85		12.5	50
			17	50			75
Paraffin (60%)[116]	MMT			145		3	50
		EG		275			
		EG:RF/3:1		265			
		EG:RF/1:1		255			
		RF		140			
		EG:IFR (APP+PER+MA=1+1+1)/3:1		250			
		EG:IFR (APP+PER+MA=1+1+1)/1:1		225			
		IFR (APP+PER+MA=1+1+1)		255			
Paraffin+HDPE/60+40[117]	Saknas		51			3	35
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+15+10[117]	MPP+PER		41				

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**TTI [s]**	**Tid till pHRR [s]**	**TTF [s]**	**Tjocklek på provkoppen [mm]**	**Effekt på konen [kW·m^{-2}]**
Paraffin+HDPE+MPP+PER+MMT/60+15+10+10+5[117]	MPP+PER+MMT		40			3	35
Paraffin+HDPE+MPP+PER+MMT/60+15+10+5+10[117]	MPP+PER+MMT		36			3	35
Paraffin+HDPE+IFR/60+20+20[118]	IFR (PER+APP+MA)		27		241	3	35
	IFR (PER+APP+MA)+ iron (1phr)		28		366		
	IFR (PER+APP+MA)+ iron (3phr)		30		583		
	IFR (PER+APP+MA)+ iron (5phr)		27		496		
	IFR (PER+APP+MA)+ iron (10phr)		30		527		
Paraffin (60%)[122]	MMT			60		3	50
		Akrylharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		295			
		Akrylharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		515			

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**TTI** **[s]**	**Tid till pHRR** **[s]**	**TTF** **[s]**	**Tjocklek på provkoppen** **[mm]**	**Effekt på konen** **[kW·m^{-2}]**
Paraffin (60%)[122]	MMT	Alkydharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		640		3	50
		Alkydharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		755			
		Epoxiharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		500			
		Epoxiharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		650			

*Tabell 6 Förbränningseffektrelaterade brandegenskaper av fasomvandlingsmaterial. * - vertikal orientering av provkroppen*

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**Total HHR, [MJ·m^{-2}]**	**pHRR, [kW/m^{-2}]**	**Mean EHC, [MJ·kg^{-1}]**	**pEHC, [MJ·kg^{-1}]**	**Tjocklek, [mm]**	**Effekt på konen, [kW·m^{-2}]**
Inkapslad i gips[11]	Saknas		6.5	60.2			25	20
			23.7	81.2				50
			28.8	107				70
			7.3	59.4				20*
			25.4	111				50*
			35.3	135				70*
Inkapslad i gips[113]	Saknas	Papper	111.4	181.38			12.5	50
			125.48	245.37				75
Paraffin+HDPE/60+40[114]	Saknas		76.5	884.2			3	35
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+20+10+10[114]	MPP+PER		84.1					
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+15+10[114]	MPP+PER		70.3					
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+10+15[114]	MPP+PER		75.6					
Paraffin+HDPE+ZB+AO/60+15+19+6[114]	ZB+AO		53.2	319.3				
Paraffin+HDPE+MCA/60+15+25[114]	MCA		87.3	480				
Paraffin+HDPE/60+40[115]	Saknas			1507			60x60x20	35*
Paraffin+HDPE+APP+EG/60+20+10+10[115]	APP+EG			1107				
Paraffin (60%)[116]	MMT		109.3	1137	39.6	79.5	3	50
		EG	122	392.5	37.7	79.9		
		EG:RF/3:1	107.1	399.3	31.7	77.4		
		EG:RF/1:1	109.9	417	33.1	75.8		

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**Total HHR, [MJ·m^{-2}]**	**pHRR, [kW/m^{-2}]**	**Mean EHC, [MJ·kg^{-1}]**	**pEHC, [MJ·kg^{-1}]**	**Tjocklek, [mm]**	**Effekt på konen, [kW·m^{-2}]**
		RF	126.4	531.2	34.5	77.5		
Paraffin (60%)[116]	MMT	EG:IFR (APP+PER+MA=1+1+1)/3:1	114.2	448	35.5	77.8	3	50
		EG:IFR (APP+PER+MA=1+1+1)/1:1	118.8	522.3	35	78.5		
		IFR (APP+PER+MA=1+1+1)	126.8	506.5	33.3	74.5		
Paraffin+HDPE/60+40[117]	Saknas		76.5	884.2			3	35
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+15+10[117]	MPP+PER		70.3	392.1				
Paraffin+HDPE+MPP+PER+MMT/60+15+10+10+5[117]	MPP+PER+MMT		81.5	498.9				
Paraffin+HDPE+MPP+PER+MMT/60+15+10+5+10[117]	MPP+PER+MMT		80.6	296.7				
Paraffin+HDPE+IFR/60+20+20[118]	IFR (PER+APP+MA)		90.4	627.35			3	35
Paraffin+HDPE+IFR/60+20+20[118]	IFR (PER+APP+MA) + iron (1phr)		81.9	375.25				
Paraffin+HDPE+IFR/60+20+20[118]	IFR (PER+APP+MA) + iron (3phr)		83.7	274.03				

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**Total HHR, [MJ·m^{-2}]**	**pHRR, [kW/m^{-2}]**	**Mean EHC, [MJ·kg^{-1}]**	**pEHC, [MJ·kg^{-1}]**	**Tjocklek, [mm]**	**Effekt på konen, [kW·m^{-2}]**
Paraffin+HDPE+IFR/60+20+20[118]	IFR (PER+APP+MA) + iron (5phr)		82.2	341.53				
Paraffin+HDPE+IFR/60+20+20[118]	IFR (PER+APP+MA) + iron (10phr)		83.8	370.28			3	35
Paraffin+HDPE/60+40[119]	Saknas			884.2			3	35
Paraffin+HDPE+APP/60+15+25[119]	APP			532.6				
Paraffin+HDPE+APP+EG/60+15+21+4[119]	APP+EG			299.6				
n-oktadekan (Paraffin) (60%)[120]	Saknas		269	817.5			5	ui
	P+N (3%)		241.4	725.8				
	P+N (6%)		218.9	635.8				
	P+N (9%)		198.5	595.2				
	P+N (12%)		187.6	549.7				
n-oktadekan (Paraffin) (50%)[121]			251.2	831.3			5	ui
	FB (5%)		238.7	726.5				
	FB (10%)		231	621.8				
	FB (15%)		213.3	534.9				
	FB (20%)		204.9	501.4				
Paraffin (60%)[122]	MMT			1233.6	49.9	69.2	3	50
		Akrylharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		434.9	42.9	77.5		
		Akrylharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		365.3	41.6	79.4		

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**Total HHR, [MJ·m^{-2}]**	**pHRR, [kW/m^{-2}]**	**Mean EHC, [MJ·kg^{-1}]**	**pEHC, [MJ·kg^{-1}]**	**Tjocklek, [mm]**	**Effekt på konen, [kW·m^{-2}]**
		Alkydharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		260.2	41.3	76.7		
Paraffin (60%)[120]	MMT	Alkydharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		203.2	41.5	79.7	3	50
		Epoxiharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		423.9	40.1	76.8		
		Epoxiharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		473.6	37.6	79.9		

Tabell 7. Rökrelaterade brandegenskaper av fasomvandlingsmaterial.

Beskrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**TSR** $[m^2 \cdot m^{-2}]$	**TSP** $[m^2]$	**TSR/TSP**	**CO** $[kg \cdot kg^{-1}]$
Paraffin+HDPE/60+40[114]	Saknas				1015.02	0.0172
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+20+10+10[114]	MPP+PER				1160.99	0.0182
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+15+10[114]	MPP+PER				1312.02	0.0214
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+10+15[114]	MPP+PER				1224.14	0.0199
Paraffin+HDPE+ZB+AO/60+15+19+6[114]	ZB+AO				2954.46	0.0446
Paraffin+HDPE+MCA/60+15+25[114]	MCA				1176.82	0.0145
Paraffin (60%)[116]	MMT			18.9		
		EG		14.3		
		EG:RF/3:1		25.2		
		EG:RF/1:1		32.2		
		RF		39.6		
		EG:IFR (APP+PER+MA=1+1+1)/3:1		20.9		
		EG:IFR (APP+PER+MA=1+1+1)/1:1		23.5		
		IFR (APP+PER+MA=1+1+1)		25.3		
Paraffin+HDPE/60+40[117]	Saknas				1015.02	
Paraffin+HDPE+MPP+PER/60+15+15+10[117]	MPP+PER				1312.02	
Paraffin+HDPE+MPP+PER+MMT/60+15+10+10+5[117]	MPP+PER+MMT				1179.25	
Paraffin+HDPE+MPP+PER+MMT/60+15+10+5+10[117]	MPP+PER+MMT				1062.02	
n-oktadekan (Paraffin) (60%)[120]	Saknas		8548			
	P+N (3%)		8017.4			
	P+N (6%)		7673.1			

Beschrivning	**Brandskydd**	**Ytskikt**	**TSR** $[m^2 \cdot m^{-2}]$	**TSP** $[m^2]$	**TSR/TSP**	**CO** $[kg \cdot kg^{-1}]$
	P+N (9%)		7302.6			
n-oktadekan (Paraffin) (60%)[120]	P+N (12%)		6956			
n-oktadekan (Paraffin) (50%)[121]			8629			
	FB (5%)		8378.8			
	FB (10%)		8128.5			
	FB (15%)		7765.3			
	FB (20%)		7574			
Paraffin (60%)[122]	MMT			21		
		Akrylharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		24.6		
		Akrylharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		13.7		
		Alkydharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		18.9		
		Alkydharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		10.8		
		Epoxiharts: Aceton: EG= 10: 10: 5		17.5		
		Epoxiharts: Aceton: EG= 10: 10: 10		10.2		

PROJEKTGRUPPEN

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

FINANSIERAD AV

Brandforsk

Brandforsks verksamhet möjliggörs av stöd från olika organisationer i samhället. Läs mer om våra stödorganisationer på www.brandforsk.se

Brandforsk

Stödorganisationer

under 2020 då detta projekt beviljades

• Brandskyddsföreningen Väst • Brandskyddsföreningen Värmland • Brandskyddsföreningen Skåne
Brandkåren Attunda • Brandskyddslaget • Dina Gruppen • Eld och Vatten • Folksam
Försäkringsbranschens restvärderäddning • GellCon • Försäkrings AB Göta Lejon • If Skadeförsäkring
Karlstadsregionens Räddningstjänstförbund • Kiruna Räddningstjänst • Kommunassurans Syd Försäkrings AB
Kristianstads Räddningstjänst • Lantmännen • MSB, myndigheten för samhällsskydd och beredskap
NBSG, Nationella Brandsäkerhetsgruppen • NCC Försäkrings AB • Nerikes Brandkår
RISE Research Instiutes of Sweden AB • Räddningstjänsten Boden • Räddningstjänsten Gällivare
Räddningstjänsten Kalix • Räddningstjänsten Höga Kusten - Ådalen • Räddningstjänsten i F-län, Räddsam F
Räddningstjänsten Luleå • Räddningstjänsten Medelpad • Räddningstjänsten Oskarshamn
Räddningstjänsten Skinnskatteberg • Räddningstjänsten Skåne Nordväst • Räddningstjänsten Storgöteborg
Räddningstjänsten Syd • Räddningsstjänsten Östra Götaland • Räddningstjänstförbundet Mitt Bohuslän
S:t Erik Försäkrings AB • Scania CV • AB • Sirius International Insurance • Sparia Försäkringsbolag
Stockholms Stads Brandförsäkringskontor • Storstockholms Brandförsvar • Sveriges brandkonsultförening
Södertörns brandförsvarsförbund • Södra Dalarnas Räddningstjänstförbund • Södra Älvborgs räddningstjänstförbund
Trafikverket • Swedisol AB • Trygg-Hansa • Uppsala brandförsvar • Värends Räddningstjäst
Västra Sörmlands Räddningstjänstförbund • Örnsköldsviks Räddningstjänst • Östra Skaraborg Räddningstjänst

Insamlingsstiftelsen Brandforsk verkar för ett brandsäkert samhälle byggt på kunskap. Det gör vi genom att initiera och finansiera kunskapsutveckling inom området brandsäkerhet, och vi arbetar för att sprida den kunskapen så att den ska göra nytta.

Vi finansierar detta med insamlade medel från våra stödorganisationer som på så sätt bidrar till vår vision om **"Ett brandsäkert samhälle byggt på kunskap"**

Brandforsk, Box 472 44, S-100 74, Stockholm, 08-588 474 14
www.brandforsk.se - info@brandforsk.se