



Design och driftsanvisningar för värmelager med fasändringsmaterial



Design och driftsanvisningar för värmelager med fasändringsmaterial

Demonstrationsanläggning kylager i
kontorsbyggnad

Chalmers tekniska högskola

Akademiska hus

AFRY



Energimyndighetens projektnummer: 39695-3

E2B2



Förord

E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende är ett program där akademi och näringsliv samverkar för att utveckla ny kunskap, teknik, produkter och tjänster.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggtreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknik konsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nytta av den kunskap som tas fram i programmet.

Design och driftanvisningar för värmelager med fasändringsmaterial är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av Chalmers tekniska högskola och har genomförts i samverkan med Akademiska hus och ÅF.

De dimensioneringsverktyg för kylager med fasomvandlingsmaterial som tagits fram i tidigare forskningsprojekt inom E2B2 har i detta projekt verifierats med hjälp av data från ett kylager i drift. Projektet har tagit fram rutiner för driftoptimering, identifierat den optimala konstruktionen för maximalt effektuttag samt tillgängliggjort verifierade data till VVS-projektörer, tillverkare av kylager med fasomvandlingsmaterial och fastighetsägare.

Stockholm, den 9 februari 2021

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

PCM-lager är mer effektiva för lagring av kylenergi över 0° C än ett traditionellt vattenbaserat energilager. Detta projekt bidrar med ny kunskap om projektering och den verkliga prestandan av PCM-kyllager. Lagringskapacitet, effektuttag och utnyttjandegrad har studerats med hjälp av två PCM-kyllager som båda drivs med ett kommersiellt tillgängligt salt-hydrat (SP11, Rubitherm) med fasomvandlingstemperatur på ca 11 °C. Det mindre PCM-lagret (pilotanläggning) innehåller 168 kg av SP11 och är en laboratorieprototyp av det andra, ett fullskaligt energilager i drift. Genom en cyklisk laddning och urladdning av kyla i pilotanläggningen har man bevisat stora skillnader i energilagringsskapaciteten och beständigheten av SP11 jämfört med de traditionellt förvärvade resultat från T-History metoden. SP11 uppvisar fassparation och ökad underkyllning med kontinuerlig cykling. Båda fenomenen leder till en gradvis minskning av den effektiva lagringskapaciteten. Dessa problem har förebyggts genom en tillsättning av förtjockningsmedel till SP11 i det stora PCM-lagret (demonstrationsanläggning).

Demonstrationslagret är resultatet av ett innovationsprojekt och finns kopplat till kylsystemet i AWL-huset (A Working Lab), vilket är ett flervåningskontorshus på Chalmers campus Johanneberg i Göteborg. Syftet med PCM-kyllagret är att ersätta delar av eller hela kylbehovet i huset med den extra kylenergin som lagras nattetid och därmed avlasta produktionen i den centrala kylanläggningen. Mätningarna har visat att PCM-lagret minskar kyleffektuttag från fjärrkylan vid urladdningen. I och med att PCM-lagret töms på energin ökar kyluttag från fjärrkylan. Testerna som gjordes under 2019 visade också att den dagliga utnyttjbara lagringskapaciteten var endast 36 procent (99kWh) av den deklarerade kapaciteten. Förutom några mindre och åtgärdade driftsproblem har testerna visat att laddningseffekterna är 60-75 procent lägre än vad som tillverkaren uppskattat. Mer arbete behövs för att vidare undersöka orsakerna bakom den lägre lagringskapaciteten.

Ett eget utvecklat numeriskt beräkningsverktyg för planering och driftoptimering av PCM-energilager (projekt 39695-1) har validerats med hjälp av experimentella data. Alternativa designtyper och drifrutiner av demonstrationslagret har simulerats och optimerats tillsammans med en kostnadsanalys. Med befintligt PCM-lager och dagens lokala elpriser kan en total kostnadsreduktion på 4.17 procent uppnås. Den största kostnadsbesparingen kommer från uteblivet högsta effekttillägg och inte så mycket genom att dra nytta av prisskillnaden mellan laddning och urladdning. En utökning av energilagringsskapaciteten kan leda till betydligt högre kostnadsbesparingar. I beräkningarna antas en återbetalningstid på 5 år för att ta fram gränser för investeringskostnader. Dessa har visats vara betydligt lägre än de faktiska investeringskostnaderna för demonstrationslagret.

Nyckelord: PCM, salt-hydrat, PCM-kyllager, cyklisk laddning, dimensioneringsverktyg, pilotanläggning, demonstrationsanläggning



Summary

Thermal energy storage (TES) with phase change materials (PCM) are more efficient for storing cooling energy above 0 °C than traditional water-based TES. This project contributes with new knowledge about design and real performance of PCM-cold storage. Storage capacity, power output and utilization rate have been studied using two PCM-TES cooling, both operated with a commercially available salt-hydrate (SP11, Rubitherm) with a phase transformation temperature of approximately 11 °C. The smaller PCM-TES (the pilot TES) contains 168 kg of SP11 and is a laboratory prototype of the second, a full-scale cold storage in operation. Through a cyclic charge and discharge of cooling energy in the pilot plant, large differences in the energy storage capacity and durability of SP11 have been proven compared with the traditionally acquired results from the T-History method. SP11 shows phase separation and increased subcooling with continuous cycling. Both phenomena lead to a gradual decrease in the effective storage capacity. These problems have been prevented by adding thickener to SP11 in the large PCM-TES (the demonstration TES).

The demonstration TES is the result of an innovation project and is connected to the cooling system in the AWL building (A Working Lab), which is a multi-storey office building on Chalmers campus Johanneberg in Gothenburg. The purpose of the PCM-TES is to replace part or all cooling demands in the building with the extra cooling energy that is stored at night, relieving the cooling energy production in the central cooling system. The measurements have shown that the PCM-TES reduces cooling power outputs from the (local) district cooling system during discharge. As the PCM storage is discharging, the cooling output from the district cooling increases. The tests carried out in 2019 also showed that the daily usable storage capacity was only 36% (99kWh) of the declared capacity. In addition to some minor and mostly resolved operational problems, the tests have shown that the charging power is 60-75% lower than what the manufacturer has estimated. More work is needed to further investigate the reasons behind the lower storage capacity.

An in-house developed numerical simulation tool for planning and operational optimization of PCM-TES (project 39695-1) has been validated using the experimental data. Alternative design types and operating routines of the demonstration TES have been simulated and optimized together with a cost analysis. With the existing PCM-TES and today's local electricity prices, a total cost reduction of 4.17% can be achieved. The largest cost savings come from avoidance of the highest power surcharge and not so much by taking advantage of the price difference between charging and discharging. An increase in energy storage capacity can lead to significantly higher cost savings. For the calculation of investment limits, a payback period of 5 years has been assumed. These have been shown to be significantly lower than the actual investment costs for the demonstration TES.

Keywords: PCM, salt hydrate, PCM cold storage, cyclic charge, sizing tool, pilot plant, demonstration plant



INNEHÅLL

1	BAKGRUND	7
1.1	OM PROJEKTGRUPPEN OCH SAMARBETSPARTNER	7
2	METOD OCH GENOMFÖRANDE	8
2.1	PCM-LAGER I MINDRE SKALA (PILOTANLÄGGNING)	8
2.1.1	EXPERIMENTUPPSTÄLLNING	9
2.2	FULLSKALIGT PCM-LAGER I AWL HUSET (DEMONSTRATIONSANLÄGGNING)	10
2.2.1	EXPERIMENTUPPSTÄLLNING	11
2.2.2	NUMERISKA BERÄKNINGAR	12
3	RESULTAT OCH DISKUSSION	13
3.1	RESULTAT FRÅN LABBMÄTNINGAR MED PILOTANLÄGGNINGEN	13
3.2	RESULTAT FRÅN FÄLTMÄTNINGAR MED DEMONSTRATIONSANLÄGGNINGEN	14
3.2.1	VALIDERING AV NUMERISKA BERÄKNINGAR	16
3.2.2	EFFEKTER AV ALTERNATIVA DESIGNTYPER AV PCM-LAGRET	16
3.2.3	KOSTNADSANALYS	17
4	PUBLIKATIONSLISTA	19
5	REFERENSER	20
	BILAGA 1 SCHEMA AV PILOTANLÄGGNINGEN	21
	BILAGA 2 SCHEMA AV FULLSKALEANLÄGGNING	22



1 Bakgrund

Detta projekt bidrar med nya kunskaper kring dimensionering, utvärdering och driftoptimering av kylager med fasomvandlingsmaterial som energibärare eller PCM-kylager (PCM står för phase change materials) i verkliga miljöer och är en fortsättning på tidigare projekt (Sasic Kalagasidis, 2018). Det aktuella projektets resultat i korthet:

- Demonstrationsanläggning med kylenergilager i drift där PCM används som energibärare. Målgrupp: energi- och VVS-konsulter, byggtreprenörer, husägare, tekniska förvaltare och forskare.
- Pilotanläggning för noggranna studier av värmeöverföring mellan PCM och värmeöverföringsmedium i PCM-lager. Målgrupp: tillverkare av PCM-lager och forskare.
- Vetenskapliga och populärvetenskapliga publikationer. Målgrupp: forskare, energi- och VVS-konsulter.

Demonstrationsanläggningen ingår också i en unik lokal kylmarknad på Chalmers campus Johanneberg, vilket kan medföra ytterligare innovationer kopplade till PCM-lagret. Själva kylmarknaden är en satsning av EU genom ett projekt inom Horisont 2020: Iris, Transition Track #1: Smart Renewables and closed-loop energy positive districts (IRIS, n.d.).

Tack vare pilotanläggningen, demonstrationslagret samt de forskningsresultat som har publicerats hittills, ligger projektet i framkanten av utvecklingen inom både vetenskaplig excellens liksom i kunskapsöverföringen med branschens aktörer.

1.1 Om projektgruppen och samarbetspartner

Forskare vid avdelningen för byggnadsteknologi, med kompetens inom byggnadsmaterial och byggnadsfysik vid Chalmers tekniska högskola, jobbar proaktivt med utveckling av nya tekniker för hållbar energianvändning i byggnader. Sedan 2012 har en PCM-grupp etablerats i syfte att uppmuntra och driva industrirelevant forskning om fasändringsmaterial. Tidigare projekt omfattar bland annat utveckling av alternativa fasändringsmaterial, numeriska verktyg för dimensionering av byggnadens klimatskal med fasändringsmaterial samt mätmetoder för uppföljning av fasändringen.

Detta projekt har till största delen drivits som ett doktorandprojekt. Pepe Tan, doktorand vid Chalmers tekniska högskola, var mellan juni 2015 – juni 2020 huvudutförare under handledning av Pär Johansson, docent och Angela Sasic Kalagasidis, professor vid avdelningen för byggnadsteknologi.

Akademiska Hus (AH) i Göteborg har genom Per Loveryd, energiingenjör, samt AFRY Göteborg genom Kaia Echer och Patrik Lindberg, visat stort intresse för energifrågor och innovativa systemlösningar. De har investerat i projektering och konstruktion av PCM-lagret för AWL-byggnaden (AWL står för A Working Lab).

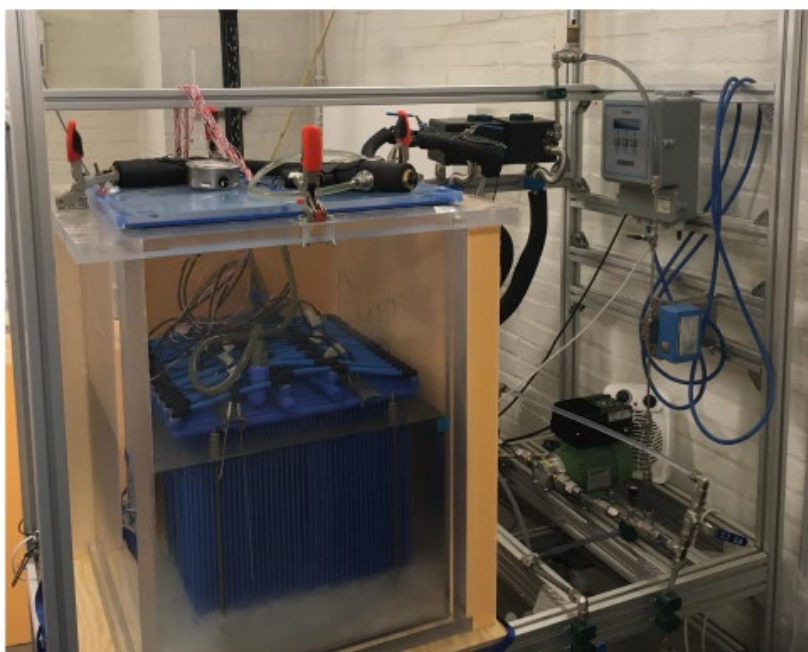
Parallellt har vi etablerat och hållit tät kontakt med tyska Rubitherm, tillverkare av det PCM-material som används i kylenergilagret i AWL-byggnaden.



2 Metod och genomförande

2.1 PCM-lager i mindre skala (pilotanläggning)

De huvudsakliga komponenterna i PCM-lagret är behållaren och värmeväxlaren, samt media för värmelagring och värmeöverföring, d.v.s. PCM respektive vatten. Medan vatten cirkulerar genom värmeväxlaren med hjälp av pumpar, finns PCM:et samlat i behållaren som en vätska. Behållaren är specialtillverkad av 30 mm tjocka och sammansvetsade akrylglaskivor (plexiglas) med innermått på 560 x 560 x 800 mm (LxBxH), och avtagbart lock (figur 1). I locket finns flera hål för ingång av temperatursensorer som också är tätade mot luft med en elastisk massa.



Figur 1 Foto av pilotanläggningen (Tan, 2020)

Tanken är ifylld med 168 kg av salhydraten med produktnamn SP11 (Rubitherm, u.å.) med en fasövergång vid cirka 11°C och en total värmelagringskapacitet på 4,92 kWh (tabell 1). Enligt säkerhetsdatabladet är ammoniumklorid, natriumacetat och natriumformiat de tre viktigaste komponenterna i SP11. De exakta koncentrationerna av varje komponent samt eventuella tillsatser är inte angivna. Energilagringdensiteten för PCM:et är 36,21 kWh/m³, vilket är ca tre gånger större än för vatten av samma volym och vid samma temperaturändring på 10 °C.

Värmewäxlaren är nedsänkt i PCM-vätskan och består av smala rör av polypropen ordnade i 18 rörbuntar. Varje rörbunt består av 44 rör samt av två ledarrör på ovansidan och i botten. Tack vare ledarrören kopplas 2 rör i en U-formad flödeskanal, vilket resulterar i 22 U-formade och parallellkopplade flödeskanaler. Alla rörbuntar är i sin tur anslutna till samma till- och returledare.



Centrumavståndet (cc-avstånd) mellan rören i en rörbunt är 10 mm för att säkerställa ett tunt lager av PCM-et runt varje rör och därmed en effektiv användning av PCM-et. En tidigare undersökning visade att ett tjockare lager av PCM-et inte nödvändigtvis ger en snabbare värmelagring (Tan, 2018). Det beror på PCM:ets låga värmeledningsförmåga som förhindrar en effektiv fasomvandling. Värmeväxlarens koncept är kommersiellt tillgängligt under produktnamn SP.ICE (BEKA, u.å.).

Tabell 1 Pilotanläggning - PCM-lagrets geometri och materialegenskaper av PCM:et

Parameter	Värden	Kommentar
	168 kg	Massa av PCM:et i tanken
	125,37 L	Volym av PCM:et i tanken
	1340 kg/m ³	Densitet av PCM:et vid 20 °C, enligt tillverkaren
	11 °C	Temperatur för fasomvandling, enligt tillverkaren
	0,0293 kWh/kg	PCM:ets entalpi vid fasomvandling och ca 10 °C temperaturskillnad, enligt tillverkaren
	25 mm	cc-avstånd mellan rörbuntar
	10 mm	cc-avstånd mellan rör i en rörbunt
	792	Totalt antal rör varav 396 är U-kopplade
	18	Totalt antal rörbuntar
	10.5 L	Yttre volymen av värmeväxlaren i kontakt med PCM:et
V_{TES}	135,87 L	Inre volymen av tanken
Q_{max}	4,92 kWh	Maximal energikapacitet i lagret, beräknat
	36,21 kWh/m ³	Energilagringdensitet = $\frac{Q_{max}}{V_{TES}}$

2.1.1 Experimentuppställning

PCM-lagret är kopplat till ett vattenbad av modell Julabo FP51-SL genom en plattvärmeväxlare, enligt figur 1 och figur 10 (bilaga 1). Vattenbadet fungerar som värmekälla respektive värmesänka vid laddning och urladdning av PCM-lagret. Värmeväxlaren delar vattenkretsen i den primära och sekundära kretsen och skyddar därmed vattenbadet från saltläckage som kan uppstå i den primära delen. Vattnets inloppstemperatur till PCM-lagret anges som börvärde och styrs via vattenbadet. Vattnets massflöde ställs in manuellt med hjälp av en doseringsventil och en pump med olika hastighetsinställningar. En flödesmätare av modell Rheonik RHM03 Coriolis används för strömningshastighets mätningar. Kalibreringsuppgifter finns i (Tan et al., 2020a).

Effekten vid laddning och urladdning beräknas enligt

$$P(t) = \dot{m}_{HTF}(t) \cdot c_p \cdot (T_{in}(t) - T_{out}(t)) \quad E.1$$

där $\dot{m}_{HTF}(t)$ är vattnets massflöde, c_p är specifikt värmelagringskapacitet, $T_{in}(t)$ och $T_{out}(t)$ är inlöps- och returvattenstemperatur.

Energien som laddas eller urladdas från tanken är:



$$Q(t) = \sum_t P(t) \cdot \Delta t \quad \text{E. 2}$$

En värmelagringseffektivitet kan sedan definieras som en kvot mellan den uppmätta Q_{eff} och den angivna maximala lagringskapaciteten från tillverkaren Q_{max}

$$\eta_Q = \frac{Q_{eff}}{Q_{max}} \quad \text{E. 3}$$

Totalt har sex serier av experiment med högt, medium och lågt vattenflöde (HF, MF, LF) utförts under loppet av 15 veckor. De experimentella parametrarna har valts enligt avsedd tillämpning av PCM-lagret, det vill säga som ett dagligt värmelager med 12 timmar långa laddning- och urladdningscykler. Vid laddningen hölls inloppstemperaturen från vattenbadet (T_{bath}) i intervallet 7–8 °C respektive 16–17 °C vid urladdningen. Vattnets massflöde i varje experiment har justerats för hand så att en rimlig andel av PCM-lagrets kapacitet kan nyttjas innan en så kallad cutoff (avbrytande) temperatur på 14 °C nås vid urladdning (tabell 2). För högre utloppstemperaturer fungerar PCM-lagret som ett sensibelt värmelager vilket innebär att PCM:et genomgår ej en fasomvandling utan lagrar energi endast genom en temperaturändring.

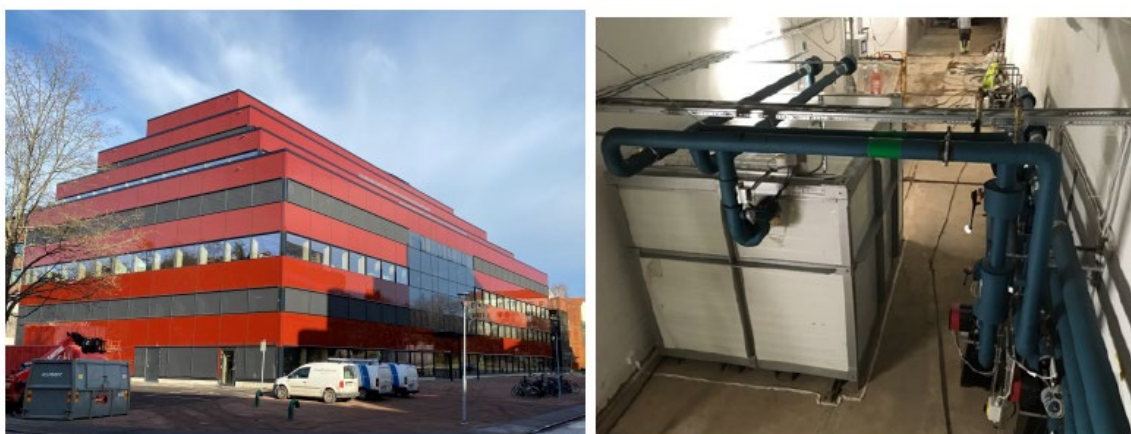
Tabell 2 Översikt av experiment i pilotanläggningen.

Test	$\dot{m}_{HTF}(t)$ kg/m ³	T_{bath} °C	Antal cykler (smältning / stelning)
HF 1	1,375 ± 0.13	7 - 17	5 / 4
HF 2	1,375 ± 0.13	7 - 17	8 / 7
HF 3	1,375 ± 0.13	7 - 17	17 / 16
MF	1,0 ± 0.15	7 - 17	17 / 16
LF 1	0,8 ± 0.10	5 - 16	4 / 3
LF 2	0,65 ± 0.03	7 - 17	10 / 9

2.2 Fullskaligt PCM-lager i AWL-huset (demonstrationsanläggning)

Konstruktion av PCM-lagret i AWL-huset är en uppskalad variant av pilotanläggningen. Värmeväxlaren är konstruerad på samma sätt och av samma företag. Vatten som cirkulerar genom värmeväxlaren drivs av pumpar. PCM:et är av samma typ, d.v.s. SP11, och ligger på bulk i tanken. Själva tanken är utformad som ett kärl av ogenomskinlig plast och är isolerad på utsidan. På locket av tanken finns ett par inspektionsöppningar. Utseende och dimensioner av det fullskaliga PCM-lagret finns i figur 2 samt i tabell 3.

Den installerade energilagringsskapaciteten är 275 kWh enligt PCM-tillverkaren. För att förhindra fassetparation av SP11 som observerades i laboratoriet tillsattes 3 procent av den superabsorberande polymeren (SAP) natriumpolyakrylat (av varumärket FAVOR PAC) som förtjockningsmedel genom PCM leverantören.



Figur 2 AWL-huset på Chalmers campus Johanneberg och PCM-lagret i AWL-huset.

Tabell 3 Fullskalig anläggning, PCM-lagrets geometri och materialegenskaper hos PCM:et.

Parameter	Värden	Kommentar
	9380 kg	Massa av PCM:et i tanken
	7000 L	Volym av PCM:et i tanken
	1340 kg/m ³	Densitet av PCM:et vid 20 °C, enligt tillverkaren
	11 °C	Temperatur för fasomvandling, enligt tillverkaren
	0,0293 kWh/kg	Entalpi av PCM:et vid fasomvandling och ca 10 °C temperaturskillnad, enligt tillverkaren
	25 mm	cc-avstånd mellan rörbuntar
	10 mm	cc-avstånd mellan rör i en rörbunt
	17200	Totalt antal kapillärrör varav 8600 är U-kopplade
	100	Totalt antal rörbuntar
	481 L	Yttre volymen av värmeväxlaren i kontakt med PCM:et
	7862 L	Innre volymen av tanken
	2776 L	Volymen av isoleringsmaterial
	11200 L	Yttre volymen av tanken
Q_{max}	275 kWh	Installerad energilagringsskapacitet enligt tillverkaren

2.2.1 Experimentuppställning

Ett detaljerat schema visas i figur 11 (bilaga 2). På samma sätt som i pilotanläggningen separeras kretsen med PCM-lagret från övriga vattenledningar med två värmeväxlare med säkerhetsfunktion. Vid laddning av PCM-lagret cirkulerar vatten från den centrala kylanläggningen (fjärrkyla) genom värmeväxlaren VVX1. Vattnets framledningstemperatur till PCM-lagret hålls vid ett börvärde på ca 8



°C (temperatursensor GT43). Urladdning sker via värmeväxlaren VVX2 och då är vattnets framledningstemperatur mellan 14 och 16 °C. Det kalla vattnet som går ut från PCM-lagret (GT12, returtemperatur) används för att förkyla huvudreturledningen från AWL-husets kylsystem (KB01-GT12). Urladdningen slutar när returtemperaturen T_{out} når 14 °C. Därefter täcks kylbehovet i AWL-huset med kylan som levereras från fjärrkylsystemet (KB01-VV1).

Jämfört med laboriestudien i tidigare kapitel var returtemperaturen från husets kylsystem 2 °C lägre än planerat, vilket gör att temperaturskillnaden vid energilagring var 8 °C istället för 10 °C.

Tabell 4 Systemtemperaturer enligt schema i figur 11.

Sensor	Beskrivning	Värde
KB01-GT11	Framledningstemperatur AWL-husets kylsystem	12 °C
KB01-GT51 & GT48	Returtemperatur AWL-husets kylsystem	16 °C
GT41	Framledningstemperatur fjärrkyla	6–8 °C
GT42	Returtemperatur fjärrkyla	16–8 °C
GT43	Framledningstemperatur PCM-lager (T_{in})	Laddning: 8 °C Urladdning: 14–16 °C
GT12	Returtemperatur PCM-lagret (T_{out})	Laddning: 16–8 °C Urladdning: 8–16 °C

2.2.2 Numeriska beräkningar

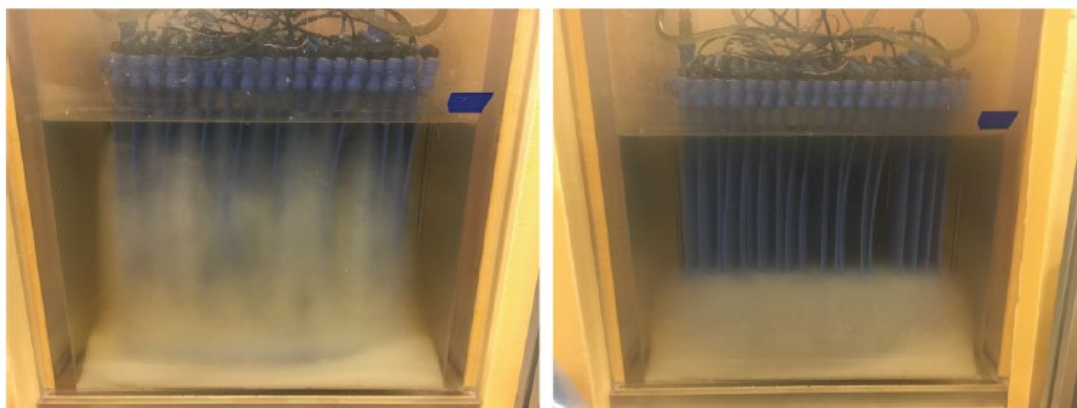
Laddnings- och urladdningstester i PCM-lagret i AWL-huset simulerades med hjälp av beräkningsverktyg som utvecklades i projektets första etapp (Sasic Kalagasidis, 2018), (Tan, 2018). Eftersom en mycket bra överensstämmelse mellan mätningar och beräkningar uppnåddes gjordes ytterligare beräkningar i syfte att undersöka hur en annan design av PCM-lagret påverkar drifttider och kostnader för kyla. Bland annat jämfördes en tätare design av värmeväxlaren inuti PCM-lagret samt dubbling av lagringskapaciteten genom installation av ytterligare PCM-lager av samma kapacitet. Optimeringsrutiner som krävde dessa beräkningar utvecklades inom projektet.



3 Resultat och diskussion

3.1 Resultat från labbmätningar med pilotanläggningen

Redan efter de första urladdnings- och laddningscyklerna observerades en förlust i lagringskapaciteten. I ett fullt laddat PCM-lager syns kristaller längs varje rör. Efter varje cykel blev lagret av kristaller tunnare och till slut låg de helt på botten (figur 3). Förlusten i lagringskapacitet bevisades också med mätningar och vid varje vattenflöde. Varje mätning började med en urladdningscykel, cykel 0, och fortsatte med flera påföljande cykler. Innan varje cykel 0, återställdes PCM:et till det normala genom att alla kristaller smältes och hela vätskan blandades för hand.



Figur 3 Foton av PCM-lagret vid HF 3 mätning: t.v. cykel 0, t.h., efter cykel 16.

Enligt foton i figur 3, hamnar en mängd av PCM:et mellan behållarväggen och värmeväxlaren där den förblir inaktiv. Därför blir den effektiva urladdningskapaciteten under cykel 0 ca 40 - 50 procent av den maximala kapaciteten 4,92 kWh. Avvikelsen kan minskas om det fysiska avståndet mellan behållaren och värmeväxlaren minskar.

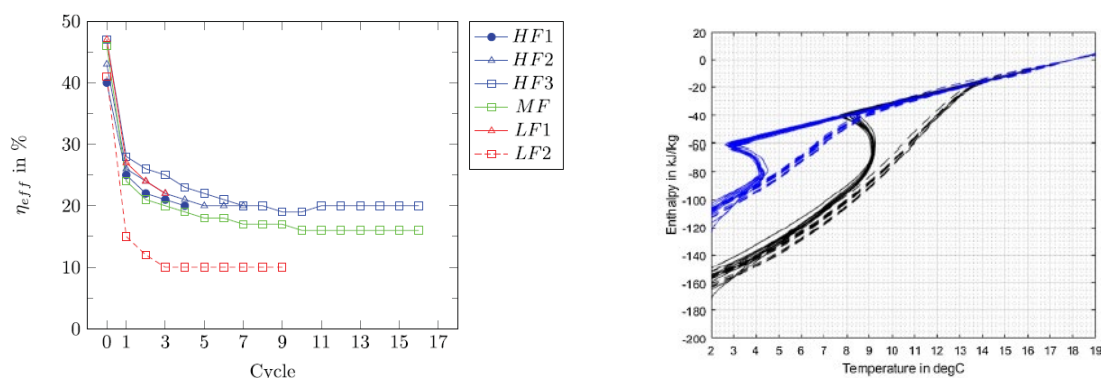
Figur 4 visar att urladdningskapaciteten sjunker snabbt efter cykel 0 och stabiliserar sig på en lägre nivå efter ca cykel 3 oavsett vattenflödes hastigheten. Det är ett tecken på temperaturskiktning av PCM:et, vilket har bekräftats med hjälp av prov som tagits från olika avstånd från vätskans fria nivå. T-History¹ mätningar på proven visar att vätskan som samlas cirka 10 cm från toppen består av komponenter som stelnar vid cirka 4 °C (i praktiken vid 3 °C på grund av underkylning), vilket är en betydligt lägre temperatur än den angivna fasomvandlingstemperaturen för SP11 (figur 4).

Dessutom observeras en större minskning av lagringskapaciteten vid lägre vattenflödes hastigheter. Detta indikerar en möjlig koppling mellan hastigheterna för fasövergången och skiftningen, vilket bör undersökas i framtiden eftersom liknande observationer inte finns i litteraturen. Ett annat viktigt

¹ T-History metoden används för att mäta latent värme av PCM. Mer i (Sasic Kalagasidis, 2018)



resultat är att fassparationen kan repareras genom att PCM värms upp tills alla kristaller smälter samt att hela volymen blandas mekaniskt.



Figur 4 Parametern η_{eff} (t.v.) visar att urladdnings- och laddningseffektivitet sjunker med cyklerna (t.v.). Resultat av T-History mätningar på proven tagna på cirka 10 cm (t.v.) under vätskans nivå innan (svart) och efter (blå) cyklingen (t.h).

Följande slutsatser kan dras från laborativa försök: T-History mätningar är inte representativa för uppskattning av energilagringens densitet av salthyraten SP11 i verkliga applikationer. Skiftningen som uppstår vid en cyklisk laddning och urladdning av ett PCM-lager som drivs med SP11 är sannolikt ett resultat av en långsam värmeöverföring mellan PCM:et och värmeöverföringsmediet (vatten) och bör undersökas i framtiden eftersom liknande observationer inte finns i litteraturen. Liknande fenomen kan finnas kopplade till andra typer av salthyrater. Skiftningen av SP11 kan förebyggas med tillsättning av förtjockningsmedel. De sänker i sin tur ytterligare temperaturen för underkylning, vilket försvårar laddning av PCM-lagret.

3.2 Resultat från fältmätningar med demonstrationsanläggningen

Första testningen utfördes under sommaren 2019 då det fanns kylbehov i huset. Under testperioden användes tre pumphastighetsinställningar för att urladda PCM-lagret: låg (fall C), medium (fall B) och hög (fall A). Å andra sidan utfördes laddningen alltid med den högsta flödes hastigheten (fall A) för att korta laddningstiderna (tabell 5).

Tabell 5 Uppmätta vattenflödes hastigheter genom cirkulationspumpar.

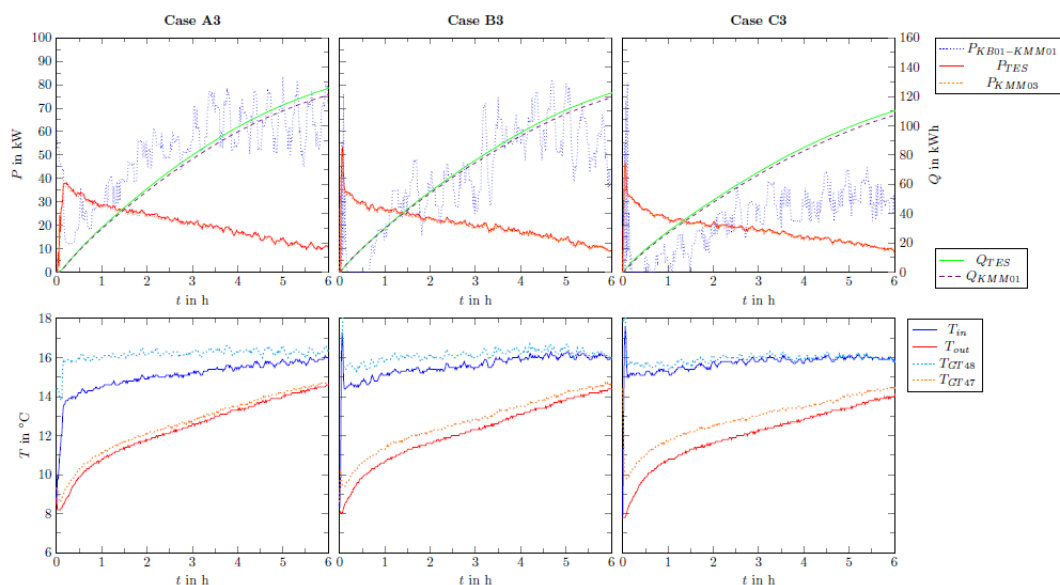
Fall	Pump 1	Pump 2
C: Låg	4300–4400 L/h	-
B: Medium	5300–5400 L/h	-
A: Hög	6800–6900 L/h	4700–4800 L/h

Resultat av mätningarna i figur 5 visar att PCM-lagret minskar kyleffektuttaget från fjärrkylan vid urladdningen. De största effekterna syns när urladdningen startar. I och med att PCM-lagret töms på energi, ökar kyluttag från fjärrkylan. Urladdningen varar i cirka 5 timmar.

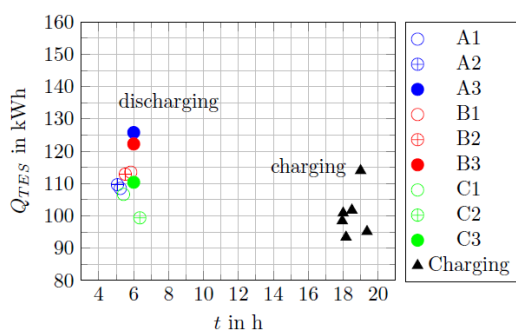


Det visade sig dock att PCM-lagret hade en betydligt lägre laddningseffekt och lagringskapacitet än vad som angavs av tillverkaren (figur 6). För att den ska fungera som ett dagligt energilager får inte laddningstiden överstiga 14–18 timmar. Under den tiden laddades enbart 36 procent av den teoretiska lagringskapaciteten, d.v.s. cirka 100 kWh i stället för 275 kWh. De genomsnittliga laddnings- och urladdningseffekterna blev 7,1 – 5,5 kW respektive 19,8 kW.

I dagsläget är det fortfarande oklart varför det uppstår så stor skillnad mellan den projekterade och den uppmätta energilagringsskapaciteten. Under 2020 gjordes olika drifttester av bland annat cirkulationspumpar och styrsystemet samt ytterligare avluftning av värmeväxlaren inuti PCM-lagret. Mindre fel hittades och åtgärdades. Nya laddnings- och urladdningstester planeras för 2021 i syfte att kontrollera om åtgärderna har haft någon påverkan på lagrets kapacitet.



Figur 5 Urladdning av PCM-lagret vid olika vattenflödes hastigheter (fall A, B och C). Övre raden: effekt- och energiuttag från lagret och fjärrkylan. Samtidigt som effektuttaget från PCM-lagret minskar ökar kyleffekten från fjärrkylan. Nedre raden: framlednings- och returtemperatur från PCM-lagret.

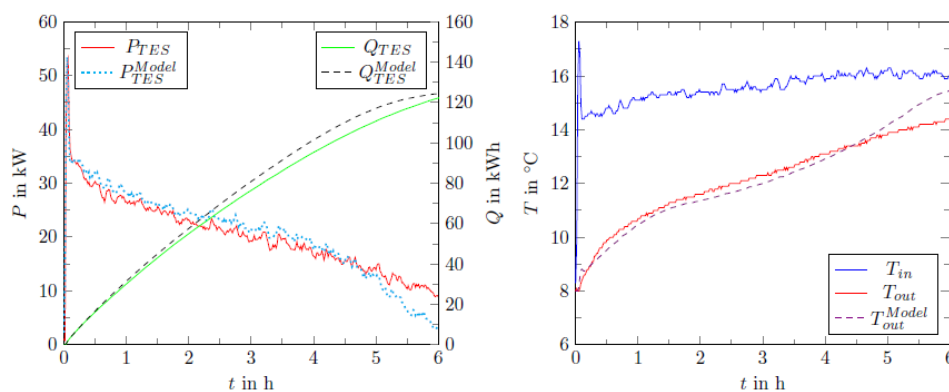




Figur 6 Uppmätta energilagringsskapaciteter vid urladdning och laddning under juni-augusti 2019 (t.v.). SP11 efter tillsättning av förtjockningsmedel. Provet är taget från PCM-tanken (t.h.).

3.2.1 Validering av numeriska beräkningar

Exempel på valideringsresultat i figur 7 visar att beräkningsverktygen beskriver effekt- och energiuttag vid urladdning av PCM-lagret samt vattnets returtemperatur från lagret väl. Laddningen kan inte beskrivas med beräkningsverktyget då den inte tar hänsyn till underkylning av PCM:et. En jämförelse mellan de uppmätta och simulerade resultaten är dock möjlig genom att ställa in latent värme till 0 kJ/kg i modellen (mer i (Tan et al., 2020b)).



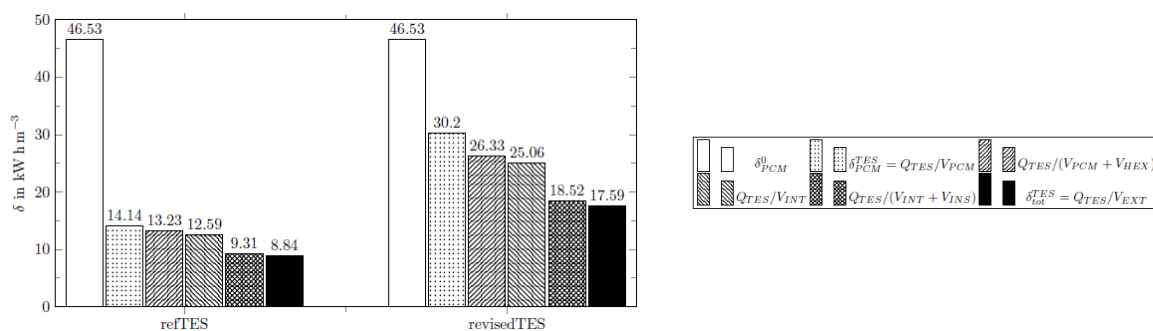
Figur 7 Jämförelse mellan uppmätta och simulerade resultat för fall B3.

3.2.2 Effekter av alternativa designtyper av PCM-lagret

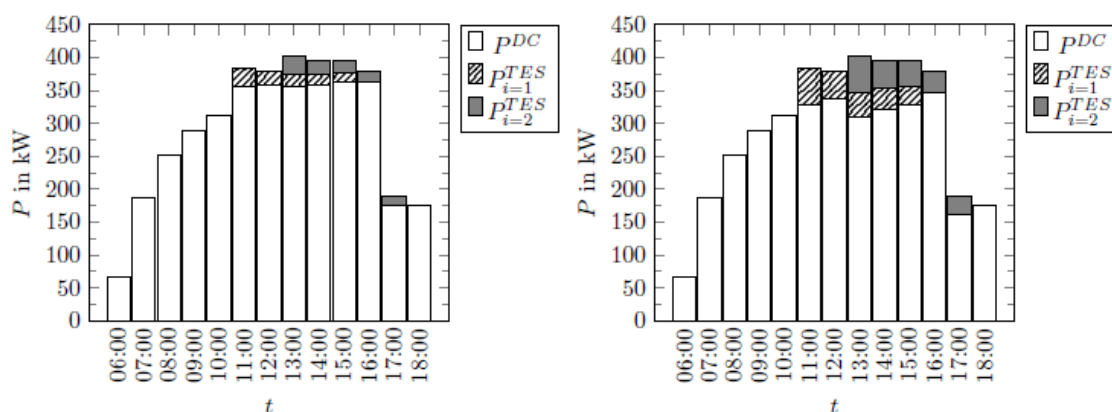
Av mätningarna och simuleringarna kan man dra slutsatsen att originalvärmeväxlaren inte helt nyttjar det PCM som hamnar mellan två rörbuntar. En reviderad design av värmeväxlaren kan göras genom att en extra rörbunt placeras mellan två befintliga rörbuntar. För hela PCM-lagret skulle det leda till ytterligare 99 rörbuntar. Ett krav skulle vara att pumpen P1 genererar en motsvarande högre flödes hastighet, så att flödes hastigheten blir samma genom varje rör.

Figur 8 visar energilagringsskapaciteten för det befintliga och reviderade PCM-lagret. För båda utförandena är energilagringsskapaciteten mindre än vad T-History mätningar visar (δ_{PCM}^0) på grund av den inaktiva PCM-volymen som hamnar mellan bland annat värmeväxlaren och tanken. Dessutom minskar volymen (V_{INT}) av värmeväxlaren och luftskikten ovanpå PCM:et lagringstätheten ytterligare. En betydande minskning på cirka 26 procent kommer från isoleringsmaterialet ($V_{INT} + V_{INS}$). Den totala energilagringsskapaciteten för PCM-lagret i den ursprungliga och reviderade designen blir då 8,84 kWh/m³ respektive 17,59 kWh/m³. Resultaten indikerar att en översyn och vidareutveckling av prestandakriterier (KPI – key performance indicators) för PCM-lager behöver göras (Tan et al., 2020b).

Ett annat alternativ är att koppla ett likadant PCM-lager och därmed öka den totala energilagringsskapaciteten. I figur 9 visas optimal drift av dubbla PCM-lager med den ursprungliga och reviderade värmeväxlaren för en varm sommardag. Den optimala lösningen skulle vara att införa en fördröjning på 2 eller 3 timmar mellan urladdningen av dess två PCM-lager för att minska toppeffekten. Dessutom kan urladdningen fördelas över en längre period än endast 5 timmar.



Figur 8 Energilagringens densitet för olika effektiva PCM-volymer för det befintliga (t.v.) och reviderade (t.h.) PCM-lagret.



Figur 9 Optimal drift av dubbla PCM-lager ($P_{i=1}^{TES}$, $P_{i=2}^{TES}$) under den varmaste dagen på året (31 juli), med den ursprungliga (t.v.) och reviderade värmeväxlaren (t.h.). Vita staplarna visar effektuttag från fjärrkyla (P^{DC}).

3.2.3 Kostnadsanalys

Den lokala energiproducenten har olika priser på el till absorptionskylare och värmepumpar för egen produktion av fjärrkyla. Dessutom betalar anläggningsägaren månadsvis en effektavgift som baseras på månads högsta effekttoppen som man själv förbrukar. Med hjälp av beräkningar har en optimal drift och kostnadsanalys av PCM-lager tagits fram.

Med befintligt PCM-lager kan en total kostnadsreduktion på cirka 4 procent uppnås (tabell 6). Den största kostnadsbesparingen kommer från uteblivet högsta effekttillägg och i lägre utsträckning genom att dra nytta av prisskillnaden mellan laddning och urladdning. I beräkningarna antas en återbetalningstid på 5 år. Den ökade energilagringens flexibiliteten, tack vare dubbla PCM-lager, leder till betydligt högre kostnadsbesparingar.

Baserat på de ekonomiska resultaten kan en gräns för investeringskostnader definieras som nyckeltal för en förbestämd återbetalningstid. Investeringskostnader för PCM-lagret i AWL-huset var totalt 546 452 SEK, varav 64,5 procent eller 352 462 SEK var kostnad för PCM:et, 13,9 procent för



tanken och värmeväxlaren och resten var för transport och installation. Dessa kostnader är mycket högre än gränsen för investeringskostnader som tagits fram med beräkningarna.

Tabell 6 Minskning av årliga kostnader för kyla jämfört med fall utan PCM-lager.

Fall	Besparing: Effekt (%)	Besparing: Energi (%)	Besparing: Total (%)	Gräns för investeringskostnader (SEK) med återbetalningstid 5 år
Befintligt PCM-lager	-8,19	-0,76	-4,17	9 804
Reviderat PCM-lager	-13,03	-1,08	-6,55	15 421
2 x befintligt PCM-lager	-15,10	-1,42	-7,68	18 075
2 x reviderat PCM-lager	-22,84	-2,06	-11,58	27 235

Det är värt att notera att de ekonomiska resultaten vanligtvis är fallberoende och att andra antaganden kan leda till andra slutsatser. Därför bör arbetet fokuseras på att hitta tillämpningar där ett PCM-lager är lönsamt. Jämfört med sensibla energilager kan det vara nödvändigt att en potentiellt hög energilagringdensitet kan översättas till en ytterligare ekonomisk fördel, till exempel besparing av golvyta. Ett PCM-lager kan också vara mer lönsamt jämfört med inköp av nya kylmaskiner. För en korrekt utvärdering behövs en noggrannare LCC-analys. Mer information om livslängd och underhållskostnader för PCM-lager bör finnas tillgängliga hos tillverkare.

Den relativ enkla ekonomiska analysen som presenteras här eller en liknande kan göras i tidiga skeden för att testa lönsamheten för olika konstruktionslösningar för PCM-lager. För det behövs pålitliga numeriska modeller som kan förutsäga den termiska prestandan av PCM-lager, eller prototypmättnings data som kan skalas upp till fullskaliga PCM-lager. Dessutom krävs tillförlitlig information om PCM-lagrets livstid för att utföra en mer detaljerad livscykelkostnadsanalys.



4 Publikationslista

- [1] P. Tan, P. Johansson, and A. S. Kalagasidis, "Design Evaluation and Improvements of a Latent Heat based Thermal Energy Storage System," in INNOSTORAGE, 2016.
- [2] P. Tan et al., "Correction of the enthalpy–temperature curve of phase change materials obtained from the T-History method based on a transient heat conduction model," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 105, pp. 573–588, 2017.
- [3] P. Tan, *On the Design Considerations for Thermal Energy Storage with Phase Change Materials: Material characterization and Modelling*. Chalmers University of Technology, 2018.
- [4] P. Tan, M. Brütting, S. Vidi, H. P. Ebert, P. Johansson, and A. S. Kalagasidis, "Characterizing phase change materials using the T-history method: On the factors influencing the accuracy and precision of the enthalpy temperature curve," *Termochimica Acta*, 2018.
- [5] P. Tan, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy Design of Thermal Energy Storage with Phase Change Materials Investigations within Material, Device and System Scale, Chalmers University of Technology, 2020.
- [6] P. Tan, P. Lindberg, K. Eichler, P. Löveryd, P. Johansson, and A. S. Kalagasidis, "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," *J. Energy Storage*, vol. 29, p. 101266, Jun. 2020.
- [7] P. Tan, P. Lindberg, K. Eichler, P. Löveryd, P. Johansson, and A. S. Kalagasidis, "Thermal energy storage using phase change materials: Techno-economic evaluation of a cold storage installation in an office building," *Appl. Energy*, vol. 276, p. 115433, Oct. 2020.
- [8] A. Sasic Kalagasidis, "Värmelager med fasändringsmaterial för bättre energihushållning," Gothenburg, 2018.

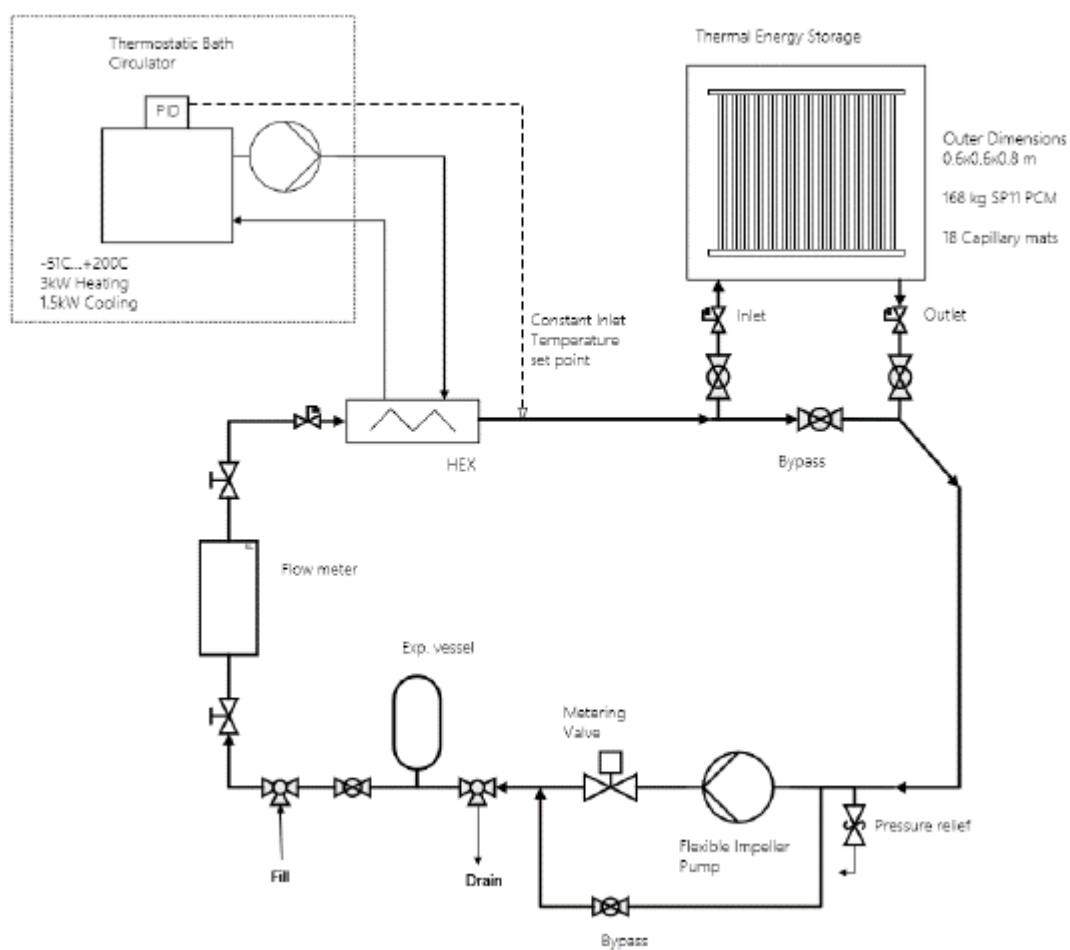


5 Referenser

- BEKA Heiz- und Kuehlmatten GmbH. (n.d.). Retrieved October 15, 2019, from <https://www.bekaklima.de/en/ice-energy-storage/>
- IRIS. (n.d.). IRIS - Smart Cities. Retrieved May 6, 2021, from <https://www.johannebergsciencepark.com/iris>
- Rubitherm GmbH. (n.d.). Retrieved October 15, 2019, from <https://www.rubitherm.eu/>
- Sasic Kalagasidis, A. (2018). *Värmelager med fasändringsmaterial för bättre energihushållning*. Gothenburg.
- Tan, P. (2018). *On the Design Considerations for Thermal Energy Storage with Phase Change Materials: Material characterization and Modelling*. Chalmers University of Technology. Retrieved from https://research.chalmers.se/publication/500367/file/500367_Fulltext.pdf
- Tan, P. (2020). *Thesis for the degree of Doctor of Philosophy Design of Thermal Energy Storage with Phase Change Materials Investigations within Material, Device and System Scale*.
- Tan, P., Lindberg, P., Eichler, K., Löveryd, P., Johansson, P., & Kalagasidis, A. S. (2020a). 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*, 29, 101266. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101266>
- Tan, P., Lindberg, P., Eichler, K., Löveryd, P., Johansson, P., & Kalagasidis, A. S. (2020b). Thermal energy storage using phase change materials: Techno-economic evaluation of a cold storage installation in an office building. *Applied Energy*, 276, 115433. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115433>



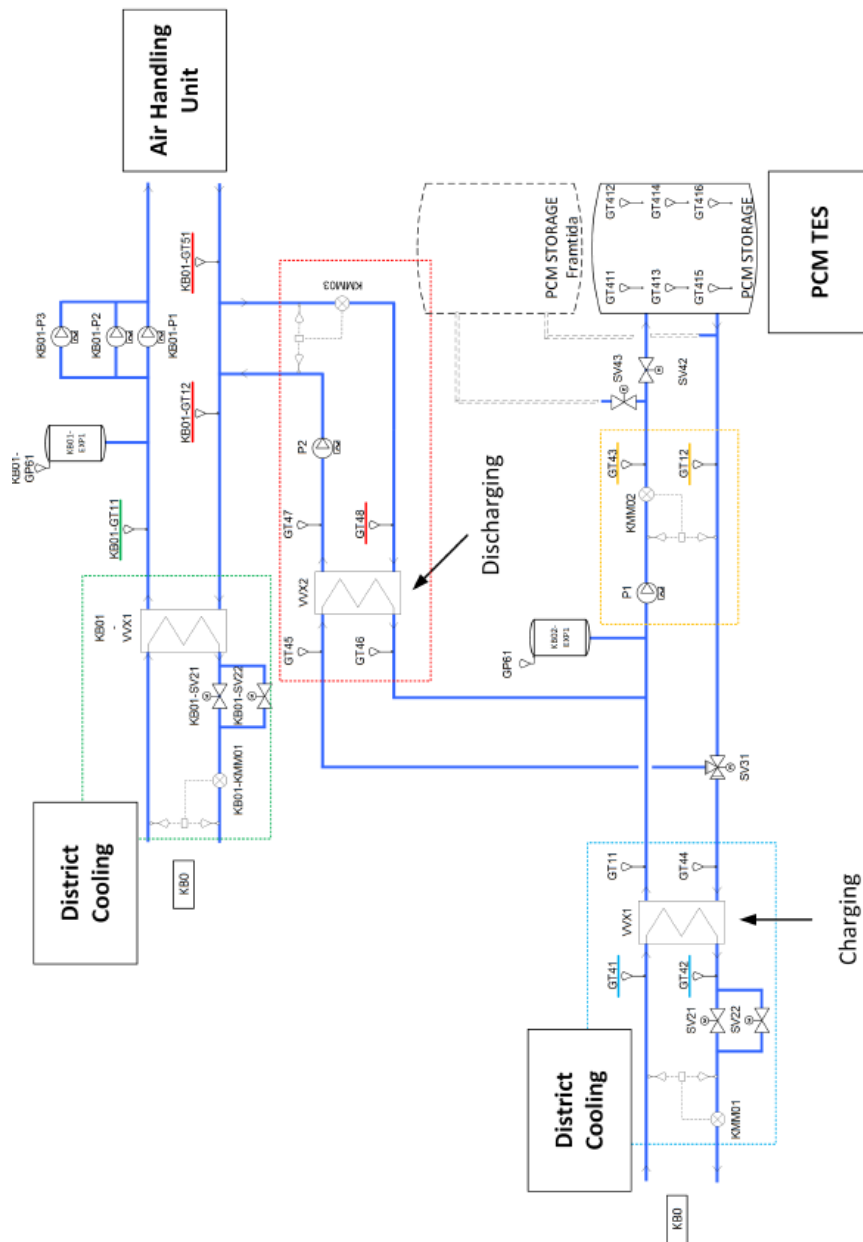
Bilaga 1 Schema av pilotanläggningen



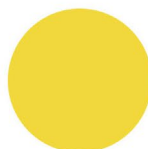
Figur 10 Schema av pilotanläggningen (Tan et al., 2020a)



Bilaga 2 Schema av fullskaleanläggning



Figur 11 Detaljerat kopplingsschema av PCM-lagret i AWL-husets kylsystem vid laddning (blå rektangel) och urladdning dagtid (röd rektangel)



Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013–2017. Läs mer på www.E2B2.se.

