

Utredning och optimering av Technobotnias adsorptionskylningsystem

Ville Saarinen

Diplomarbete

Handledare: FD Jessica Tuuf

Examinator: Prof. Margareta Björklund-Sänkiaho

Energiteknik, Vasa

Magistersprogram i kemi- och processteknik

Fakulteten för naturvetenskaper och teknik

Åbo Akademi

Juni 2023

ABSTRAKT

Kylning har en väldigt väsentlig roll i dagens samhälle. Kylning behövs inte endast för mänsklig komfort, men även för att kunna säkerställa elektroniska komponenters, industriella processers och byggnaders optimala temperatur, för dess säkerhet, livslängd och underhåll. Kylning är dock en process som kan ha flera utmaningar från ett miljöperspektiv där kylmedlet i en konventionell kylprocess har skadliga egenskaper för naturen, och elektriciteten för att driva processen kan härstamma från fossila bränslen.

Vid Technobotnia i Vasa finns det ett kylsystem som fungerar på adsorption där man i stället använder sig av solenergi för att kyla ner utrymmet, fri från externa drivmedel och skadliga kylmedel. Syftet med detta arbete är att utreda ifall kylsystemet kunde användas som en demomiljö i regionens högskolor.

I arbetet kartläggs adsorptionskylningsprocessen, apparaturen och tillhörande komponenter, för att sedan förbereda kylsystemet för två separata mätkampanjer genom utvecklandet av ett fungerande datainsamlingsprogram med hjälp av M-bus och Raspberry pi. Mellan de två mätkampanjerna kommer data att analyseras för att identifiera möjliga optimeringsmöjligheter, som sedan implementeras före den andra mätkampanjen.

Resultatet visade att datainsamlingen fungerade med hjälp av IoT lösningarna. Samtidigt ser man även hur viktigt det är att ha en välunderhållen kylvanhet, vilket är avgörande ifall den kommer att användas som en demomiljö. Dock identifierades några utmaningar som har en stor inverkan på prestandan som behöver åtgärdas ifall man vill uppnå den fulla potentialen som adsorptionskylning erbjuder.

Nyckelord: Solkylning, Adsorption, IoT

ABSTRACT

Cooling plays a very essential role today. Cooling is needed not only for human comfort but also to ensure the optimal temperature of electronic components, industrial processes, and buildings for their safety, lifespan, and maintenance. However, cooling is a process that presents several environmental challenges, since the refrigerant in conventional cooling processes has harmful properties for the nature, and the electricity used to power the process can be derived from fossil fuels.

At Technobotnia in Vaasa, there is a cooling system that operates on adsorption, using solar energy to cool the space without relying on external fuels or harmful refrigerants. The purpose of this work is to investigate whether the cooling system could be used as a demo environment in the region's universities and colleges.

The work involves mapping the adsorption cooling process, the equipment, and associated components, and then preparing the cooling system for two separate measurement campaigns by developing a functional data collection program using M-bus and Raspberry Pi. Between the two measurement campaigns, the data will be analyzed to identify potential optimization opportunities, which will then be implemented before the second measurement campaign.

The results showed that data collection worked well using IoT solutions. At the same time, it was observed how important it is to have a well-maintained cooling unit, which is crucial if it is to be used as a demo environment. However, some challenges were identified that have a significant impact on performance and need to be addressed to achieve the full potential of adsorption cooling.

Key words: Solar cooling, Adsorption, IoT

Innehållsförteckning

ABSTRAKT	I
ABSTRACT	II
FÖRORD	V
1 INTRODUCTION	1
2 TEORI OCH LITTERATUR.....	3
2.1 Solkylning.....	3
2.2 Adsorption	5
2.3 Adsorptionsvärmepumpar	7
2.3.1 Adsorptionsvärmepumpens struktur.....	9
2.3.2 Kylsystemets prestanda	14
2.4 IoT: Internet of Things.....	17
3 MATERIAL OCH METOD	19
3.1 Kartläggning av pumpsystemet	19
3.2 Utveckling av ANYBUS datainsamling	27
3.3 Mätkampanj 1.....	29
3.4 Ingrepp på systemet.....	29
3.5 Mätkampanj 2.....	30
3.6 Dataanalys (med Anybus datainsamling)	30
3.7 Beräkning av COP	31

4	RESULTAT	34
4.1	Kartläggning av kylprocessen med ursprunglig mätutrustning.....	35
4.2	Första mätkampanjen	35
4.3	Andra mätkampanjen.....	37
4.3.1	Cykler.....	39
4.4	COP-värden	40
5	DISKUSSION.....	42
6	SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER	45
	LITTERATURFÖRTECKNING	48
	BILAGOR.....	51

FÖRORD

Detta diplomarbete är skrivet för Åbo Akademi, målet var att resultatet från detta arbete skulle stöda projektet "Energilagring i vårt framtida koldioxidsnåla samhälle (Energilagring!)" ett samarbete mellan Åbo Akademi, Yrkeshögskolan Novia och Vaasan Ammattikorkeakoulu som har finansierats av ERUF, Högskolestiftelsen i Österbotten, Aktiastiftelsen i Vasa, Yrkeshögskolan Novia, VAMK och Åbo Akademi.

Jag vill tacka professor Margareta Björklund-Sänkiaho för möjligheten att skriva detta intressanta arbete om ett ämne som inte är alltför bekant i Finland. Tack till min handledare, Jessica Tuuf för värdefull feedback och guidning. Slutligen tack till Sören Andersson som har tillfört stor hjälp under den praktiska delen av arbetet i form av handledning, idéer och problemlösning.

Vasa, 1.6.2023

Ville Saarinen

1 INTRODUKTION

Kylning är en grundläggande aspekt av våra dagliga liv som har blivit alltmer viktig inom en mängd olika tillämpningar. Från att upprätthålla bekväma temperaturer i våra hem och kontor till att möjliggöra driften av elektroniska system spelar kylning en stor roll för att säkerställa optimal prestanda, effektivitet och säkerhet. I takt med att världen fortsätter att uppleva den globala uppvärmningen har behovet av effektiva kylsystem ökat betydligt. I dagens läge används kylsystem inom flera sektorer, i bostäder och inom den kommersiella samt industriella sektorn. Det primära målet med kylning är att avlägsna överskottsvärme från en given plats eller ett system och på så sätt förhindra överhettning, och att upprätthålla stabila driftsförhållanden. Denna process förbättrar inte bara bekvämligheten, utan bidrar även till utrustningens livslängd och tillförlitlighet samt förbättrar energieffektiviteten och stöder hållbara metoder.

För tillfället används 30 % av det globala energibehovet för olika applikationer i byggnader, av detta går 70 % till elektricitet, kylning och uppvärmning (Europeiska unionen, 2012). Miljöministeriet har planer på att övergå till koldioxidsnåla energikällor och avstå från oljeuppvärmning i offentliga byggnader före 2024, och övergå helt till grön energi före 2030-talet (Miljöministeriet, 2021). Även den Europeiska unionen har satt som mål att sänka utsläppen på växthusgaser med 80–95 % tills år 2050 jämfört med statistiken från 1990. Detta betyder att två tredjedelar av energibehovet bör vara förnybart, och så gott som all elektricitet skall vara utsläppsfri (Europeiska unionen, 2012).

För att öka energieffektiviteten på olika utrymmen kan man till exempel förbättra isoleringen för att sänka behovet av temperaturregleringen, men man kan även göra energikällorna som används mera klimatvänliga, så som att använda solenergi och spillvärme från industriella processer. Under åren har man utvecklat fram flera möjligheter hur man använda olika utsläppsfria energikällor, och sambandet med att

kunna använda värme för att kyla ner har blivit till en välbeforskad möjlighet, och detta kan kollektivt kallas för solkylning.

I Technobotnia finns det en kylvanhet som grundar sig på solkylningens fundamentala principer. Kylvanheten är en adsorptionsvärmepump som skapar kylan genom en process som kallas för adsorption. Kylvanheten införskaffades i början av 2010-talet och har varit litet i bruk sedan dess. Huvudsyftet med detta arbete är att undersöka ifall man kan utveckla en demomiljö för en energilagringssprincip med adsorptionkylning som kan användas inom utbildningen vid Technobotnia. Eftersom kylvanheten inte har varit i aktivt bruk, kommer en grundläggande kartläggning av systemet att utföras, varefter problemen identifieras, därefter kommer rekommendationerna för vad som ytterligare behöver göras med professionella medel att ges. Under processens gång kommer även mätkampanjer göras för att se ifall möjligt underhållsarbete har en inverkan på systemets prestanda. Data från mätkampanjerna kommer också att analyseras och jämföras med tidigare, motsvarande studier för att ge en bild av i vilket skick den befinner sig jämfört med motsvarande kylvanheter.

2 TEORI OCH LITTERATUR

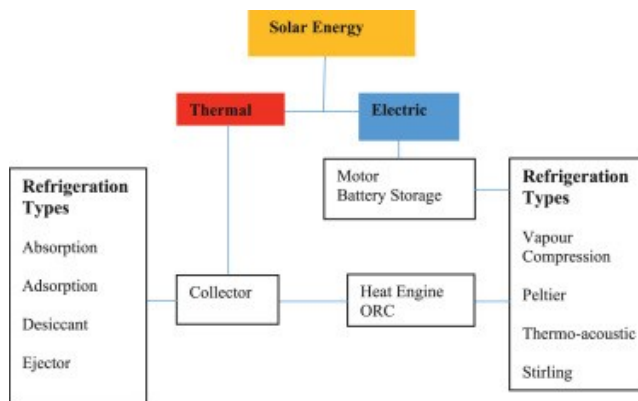
Vanligtvis produceras kyla genom en process som kallas för ångkompression. Det är ett system i vilket man höjer och sänker temperaturen samt trycket på ett kylmedel i ett slutet system (Cleland, 2022). Från ett miljöperspektiv finns det dock två stora utmaningar som fortfarande är problemframkallande; den ökade konsumtionen av begränsad primäre energi och miljöproblemen som kylmedlen medför. För att producera kyla med hjälp av ångkompression behövs elektricitet eller värme, vilket ökar på behovet av fossila bränslen (Fan et al., 2007). Enligt Internationella institutet för kylning (IIR) används 17 % av världens elektricitet för kylning, även utsläppen från ångkompressionen beräknas ligga på ungefär 7,8 % av de globala växthusgasutsläppen (Colombo, 2019).

Ett brett utbud av system har utvecklats för att använda solenergi för att generera värme och kylning för industrin, bostäder och kommersiella sektorn. Soluppvärmning och kylning är vanliga tillämpningar som kan minska CO₂-utsläpp genom att ersätta fossildrivna system för luftkonditionering. Dessutom minskar användningen av solenergisystem elförbrukningen under hög belastning genom att ersätta elektriskt drivna värmesystem och luftkonditionering (Karellas et al., 2019).

2.1 Solkylning

Solkylning är ett kollektivt begrepp för processer som omvandlar värmen som samlas in från solen till användbar kyla genom olika kylcykler. Man kan generellt kategorisera solkylning i två processer, beroende på hur solenergin samlas. Antingen som värme, eller genom att konvertera solenergin till elektricitet. Dessa kylcykler kan antingen vara termiskt drivna såsom adsorption och absorption, eller eldrivna, där elmotorer ger den nödvändiga drivkraften (Figur 1). Till exempel är ångkompressionen en elektriskt driven process, men som kan använda sig av en motor som genererar elektriciteten genom värme (Rankinecykel (ORC)). Till skillnad från processerna som

kräver elektricitet för att fungera, behöver de som är termiskt drivna endast tre komponenter för att fungera, solfångare för att fånga in solenergi, en kylenhet för att konvertera energin till kyla och en kondensor för att avleda överskottsvärmen (Agnew et al., 2021).



Figur 1 - Olika kylcykler inom solkylning (Agnew et al., 2021)

Två av de termiskt drivna processerna, adsorption och absorption, kan kollektivt benämnas som sorption. Grundprincipen är att två ämnen, sorbent, som är ett material som har förmågan att binda ämnen (vanligtvis gaser eller vätskor), till sin yta, och sorbat, vilket är ämnet som binder sig till sorbenten. För att lättare skilja på terminologin brukar man hänvisa till sorbatet som kylmedium (Yu et al., 2013). Skillnaden mellan adsorption och absorption är beroende av om kylmedlet går igenom en kemisk förändring när den reagerar med fukt. Till exempel bordssalt absorberar vatten, vilket betyder att saltet övergår till vätskeform i samband med att det reagerar med fukt. I adsorption däremot har fukten ingen inverkan på kylmedlet, annat än på att dess massa blir tyngre i och med vattenångan som binder sig. Man kan jämföra adsorption med en tvättsvamp som suger åt sig vatten, och således även kan separeras lättare. Inom sorption kallas separationsfasen för desorption (Kalogirou & Florides, 2022).

Även om absorption och adsorption är i namnet väldigt lika är processerna ytterst olika. Till exempel inom absorption använder man sig av en kombination av

absorbent - kylmedel, som till exempel litiumbromid och vatten. Processen går ut på att flytande kylmedel strömmar med ett högt tryck från kondensorn genom en expansionsventil som reducerar trycket till ett tillstånd som möjliggör förångning. Kylmedlet avdunstar i förångaren, koler vattnet och den resulterande lågtrycksången passerar till absorptionskammaren, var den absorberas i en stark lösning. Det är nödvändigt att kontinuerligt koncentrera lösningen för att bibehålla den låga förångningstemperaturen som krävs, detta görs oftast genom att koka lösningen (Agnew et al., 2021).

2.2 Adsorption

Adsorption sker när ett fast ämne och en vätska reagerar antingen genom en fysisk eller kemisk reaktion. Fysisk adsorption sker när molekyler i kylämnet (adsorbat) fästs på ytan av ett poröst, fast ämne (adsorbent) genom Van der Waals-krafter, vilket leder till att ett ämne samlas på ytan av ett annat ämne. Genom att applicera värme kommer molekylerna i adsorbatet frigöras (desorption), vilket resulterar i en reversibel process. Detta leder till en kemisk adsorption från joniska eller kovalenta bindningarna som har formats mellan köldmediet och adsorbenten. Kraften i bindningarna i kemisk adsorption är starkare än i fysisk adsorption, vilket frigör mera värme. Dock är inte processen lika lätt reversibel som i fysisk adsorption, och dessutom ändras den kemiska strukturen i det adsorberade ämnet, vilket betyder att varken adsorbatet eller adsorbentmolekylerna behåller sitt ursprungliga tillstånd efter en adsorptionscykel (Sumathy et al., 2003). Fysisk adsorption är väldigt effektiv, särskilt vid temperaturer kring gasens kritiska punkt. Kemisk adsorption sker vanligtvis vid temperaturer som är mycket högre än den kritiska temperaturen och är till skillnad från fysisk adsorption en specifik process som endast kan äga rum på vissa fasta ytor för en given gas. Under lämpliga förhållanden kan båda processerna ske samtidigt eller i tur och ordning. Fysisk adsorption följs av en minskning av fri energi och entropi i adsorptionssystemet vilket gör processen exoterm (Dabrowski, 2001).

Adsorbent och adsorbat kallas kollektivt för arbetspar. Det finns flera olika arbetspar för kylsystem som fungerar på adsorption. Alla arbetspar har unika egenskaper, prestanda, fördelar och nackdelar. Arbetsparen som förekommer vanligast är: zeolit – vatten, kiseloxid (silicagel) – vatten, aktivt kol – metanol och aktivt kol – ammoniak. I system där man använder solenergi är kiseloxid-vatten ett idealiskt arbetspar på grund av dess låga regenereringstemperatur, vilken behöver relativt låga värmekällor, vanligtvis under 85 °C. Arbetsparet lämpar sig för höga kylvattenflöden, där höga förångningstemperaturer används. Dock har detta arbetspar en låg adsorptionskapacitet samt lågt ångtryck, vilket kan sänka på massöverföringen. Dessutom kräver arbetsparet vakuumbeförhållanden i systemet, varvid alla icke-kondenserbara medier kommer att orsaka en betydande minskning av systemets prestanda (Wang et al., 2009).

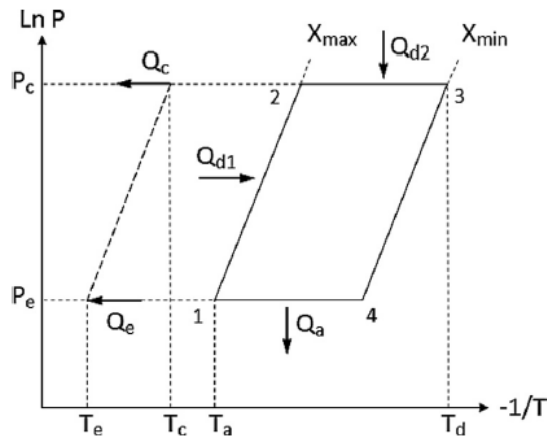
Även aktivt kol-metanol är ett vanligt arbetspar i adsorptionskylsystem. På samma sätt som kiseloxid-vatten fungerar detta par även vid lägre regenereringstemperaturer. Arbetsparet har en mycket hög adsorptionskapacitet och låg adsorptionsvärme. Det aktiva kolet har även en låg värmeledningsförmåga, vilket fungerar som en värmeisolator och leder till minskad verkningsgrad i systemet. Liknande kiseloxid-vatten fungerar även aktivt kol-metanol under vakuumbeförhållanden. För detta arbetspar finns det också aspekter som måste beaktas för en säker och effektiv process. En aspekt är att metanol bryts ner vid temperaturer över 120 °C. Dessutom måste metanol hanteras med försiktighet på grund av dess höga toxicitet och brandfarlighet. Genom att ersätta metanolen med ammoniak kan regenereringstemperaturer över 150 °C uppnås. Adsorptionsvärmerna för aktivt kol-ammoniak liknar aktivt kol-metanol, men det kräver högre driftstryck, vilket förbättrar värme- och massöverföringsförmågan samt minskar cykeltiden och förhindrar att luft kommer in i systemet. Alla dessa faktorer bidrar till att öka systemets specifika kylkapacitet. Dessutom gör detta par lämplighet för högttemperaturenergikällor och ammoniaks höga kylkapacitet det ännu mer attraktivt för vidare forskning. Det aktiva kolet har dock lägre adsorptionsförmåga

med ammoniak än med metanol. Och även i detta fall måste försiktighet iakttas på grund av ammoniakens toxicitet, irriterande lukt även vid låga koncentrationer och dess frätande natur (Wang et al., 2010). För arbetsparet zeolit-vatten kan regenereringstemperaturerna överstiga 200 °C och förångningen under adsorption höjer temperaturen med upp till 70 °C eller mer. Detta arbetspar förblir stabilt vid höga temperaturer och den latent värmen i vattnet är mycket högre än den för metanol eller andra traditionella kylmedel. Ett system som arbetar med zeolit-vatten är dock mer anpassat för luftkonditioneringstillämpningar på grund av vattnets fryspunkt, vilket begränsar kylprocessen. Det har också en betydande adsorptionsvärme, större än för kiseloxid - vatten. Dessutom främjar lågtrycksavdunstning av vatten ett långsamt adsorptionssteg och de höga temperaturerna under desorptionen ökar adsorbatorns kännbara värme. Den specifika kylkapaciteten för dessa system är således inte särskilt hög. Dessutom kan de låga arbetstrycken hindra massöverföringen (Ullah et al., 2013).

2.3 Adsorptionsvärmepumpar

Grundprincipen med en adsorptionsvärmepump är att ta värme från en lägre temperatur och producera det till en högre temperatur genom att använda en yttre energikälla. För en adsorptionpump kan värmekällan utvinnas från bland annat bergvärme eller solenergi, men även elektricitet eller spillvärme. Processen för en adsorptionsvärmepump innehåller en adsorptionsbädd, förångare, kondensator, samt ett värmeöverföringsmedium (Dias & Costa, 2018).

Den enklaste adsorptionscykeln innehåller fyra steg, två isobariska och två isoteriska kedjor vilket kan visualiseras i ett Clapeyron-diagram (Figur 2).



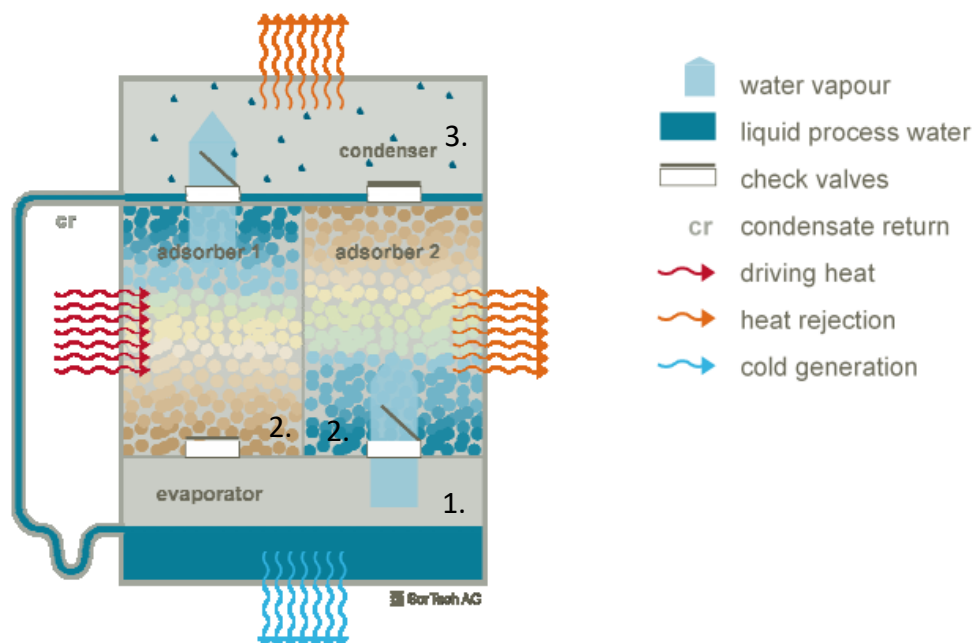
Figur 2 - Clapeyron-diagram (Fernandes et al., 2014)

Cykeln börjar vid punkt 1 där adsorbenten har en temperatur färdig för adsorption och ett relativt lågt tryck kring vätskans avdunstningspunkt, P_e . X_{max} och X_{min} är den maximala och den minimala mängden som kan adsorberas. Då värmen införs i systemet vid Q_{d1} ökar temperaturen men framför allt trycket som man kan se på linjen mellan punkterna 1 och 2. Under denna fas har massan av kylmedlet varit konstant vid maxvärdet. När trycket har uppnått kondensationstryck, P_c , vid punkt 2, startar desorptionen. När uppvärmningen av adsorbenten, Q_{d2} , mellan punkterna 2–3 gör att adsorbenten släpper ut köldmediet som ånga vilket blir flytande i kondensorn. Kondensvärmens ses i diagrammet som Q_c vid kondensationstemperaturen T_c . Mediet samlas sedan upp antingen i en behållare eller förs direkt in tillbaka i förångaren beroende från pump till pump. Steget 2–3 slutar när adsorbenten har nått sin maximala regenereringstemperatur, T_d och adsorbathalten har minskat till sitt minimivärde, X_{min} . Till sist kylls adsorbenten ner längs linjen 3–4, under tiden hålls mängden adsorberat kylmedium konstant vid minimivärdet. Under denna fas öppnas ventilen som avskiljer kondensorn från förångaren, vilket gör att köldmediet kan strömma in i förångaren, och trycket sjunker tills den har nått avdunstningstrycket P_e . Sista fasen i cykeln är adsorptions –

förångningsfasen mellan punkterna 4 och 1 som ger kyleffekten Q_e i förångaren vid förångningstemperaturen T_e . I denna fas strömmar det förångade kylmedlet i förångaren till adsorptionskammaren där kylmedlet adsorberas tills maximala mängden som kan adsorberas, X_{max} , har uppnåtts vid punkt 1. Under denna fas kyls adsorbenten ner tills den når adsorptionstemperaturen T_a , genom att förkasta den sensibla värmen och adsorptionsvärmens, Q_a . I slutet av denna fas stängs ventilen (för att förhindra kondensen senare i förångaren) och cykeln börjar på nytt (Fernandes et al., 2014).

2.3.1 Adsorptionsvärmepumpens struktur

Adsorptionsvärmepumpen som används under arbetet är en SorTech ACS08. Värmepumpen är indelad i fyra olika delar, en kondensor, en förångare, och två adsorptionskammare för att kunna kyla kontinuerligt. Alla dessa komponenter är ihopkopplade med hjälp av ångventiler (Figur 3).



Figur 3 - Arbetsprincipen av en SorTech ACS08 (SorTech AG, 2010)

1. Förångare

- Förångarens uppgift är att förvandla kylvätskan från en flytande form till en gasform genom att avge värmeenergi. Detta skapar en kylcykel i systemet genom att göra det möjligt för kylvätskan att adsorbera fukt igen i adsorptionskammaren (Agnew et al., 2021).

2. Adsorptionskammare

- Kylenheten har två adsorptionskammaren för att säkerställa en kontinuerlig process. En adsorptionskammare i systemet är en behållare förseglad i vakuum som innehåller ett adsorbent (som kiseloxid) som adsorberar fukt från ångan som strömmar igenom den (Anyanwu, 2004).

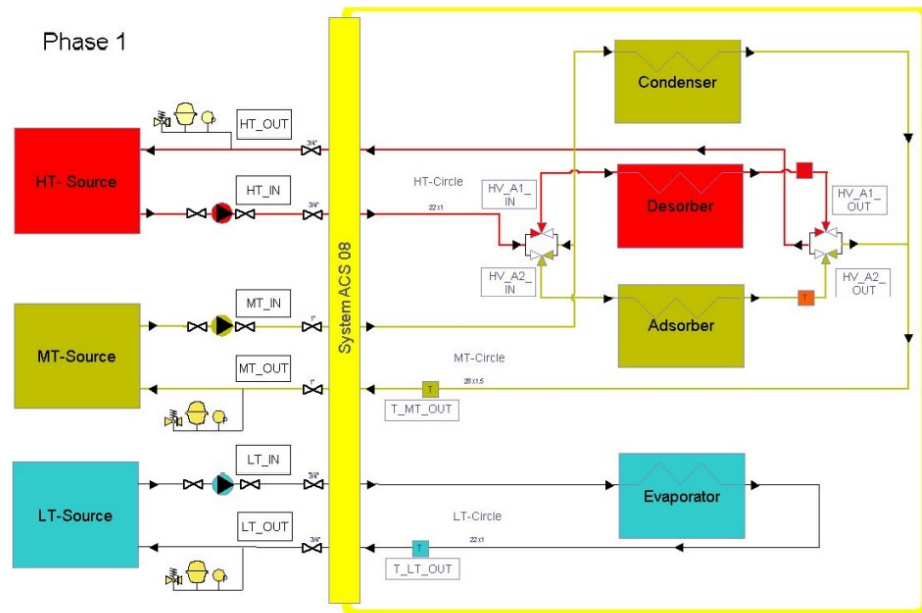
3. Kondensor

- I adsorptionskylning är kondensorn viktig för att extrahera värmeenergin från kylvätskan som har absorberat fukt i adsorptionskammaren. Efter att kylvätskan har adsorberat fukten från luften i adsorptionskammaren har kylvätskan en högre temperatur och är mättad med fukt. Därefter överförs kylvätskan till kondensorn där den avger värmeenergi och kondenserar tillbaka till en flytande form. Kondensorn fungerar som en värmexväxlare där den avger värmen som tas upp från den adsorberade fukten och kylvätskan kyls ner igen till en lägre temperatur, redo att cirkulera genom adsorptionsenheten igen för att adsorbera mera fukt i kammaren (Agnew et al., 2021).

Processen är vanligtvis två faser, adsorptionsfasen och desorptionsfasen. Dock för att säkerställa en kontinuerlig process har kyleheten två adsorptionskammare, vilket betyder att när den ena kammaren adsorberas, desorberas den andra kammaren. Detta betyder att kyleheten har totalt fyra olika faser (SorTech AG, 2010).

1. Fas 1

- I första fasen är adsorptionskammare 1 fylld med värme genom varmvattenkretsen (HT), vilket gör det till en desorberare. Samtidigt adsorberas det i kammare 2. Värmen producerad från både adsorptionen samt kondenseringen släpps ut i omgivningen genom återkylningskretsen (MT). Kallvattenkretsen (LT) passerar kontinuerligt alla kammare och leder värmen tillbaka till förångaren (Figur 4) (SorTech AG, 2010).

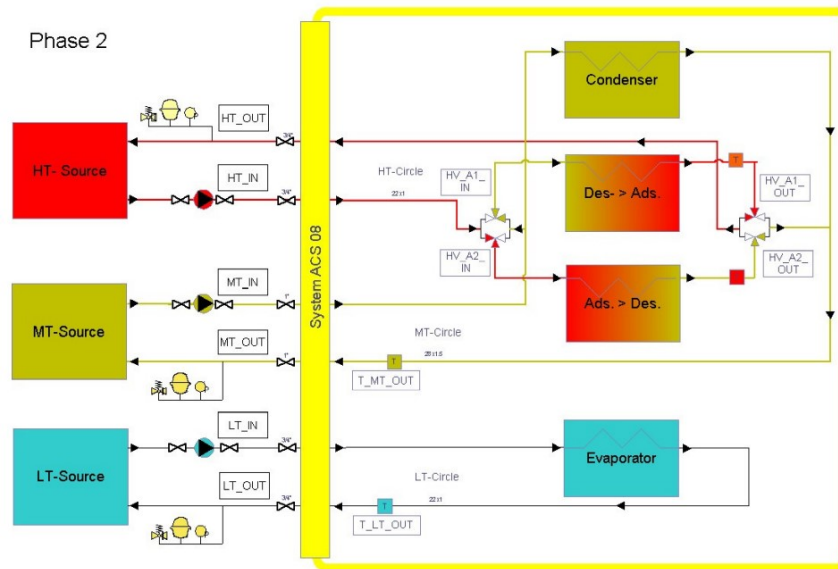


Figur 4 - Adsorptionskylningens första fas (SorTech AG, 2010)

2. Fas 2

- Den andra fasen är en övergångsfas som alltid kommer efter den första fasen. 3-vägsventilerna ändras så att vattnet i både varmvattenkretsen och återkylningskretsen förs till adsorptionskammare 1 som tidigare fungerade som en desorberare. Energin i den varma adsorptionskammaren skickas inte direkt ut i MT-kretsen, utan gradvis blir den till en HT-krets tack vare ventilerna. Samtidigt kommer det kalla vattnet från MT-kretsen i adsorptionskammare 2,

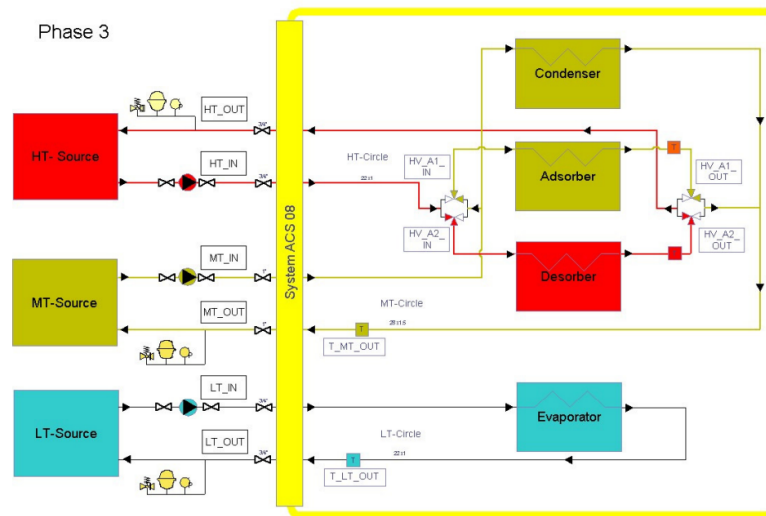
som i nästa fas kommer att fungera som desorberare, värmas upp stegvis. Efter att en specifik temperaturskillnad är uppnådd, avslutas fas 2 (Figur 5) (SorTech AG, 2010).



Figur 5 - Adsorptionskylningens andra fas (SorTech AG, 2010)

3. Fas 3

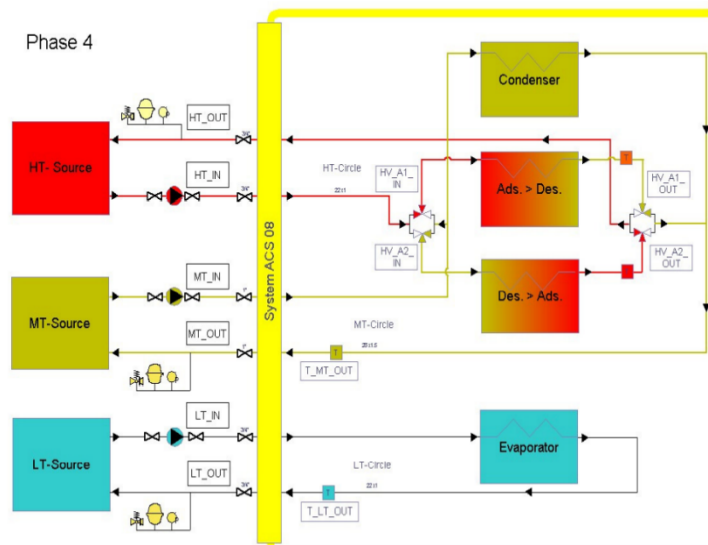
- I den tredje fasen (Figur 6) är rollerna ombytta för adsorptionskammare 1 och 2. Adsorptionskammare 2 har gått över från adsorption till desorption och adsorptionskammare 1 från desorption till adsorption. Värmen som förekommer från adsorptionen och kondenseringen släpps ut i omloppet genom återkylningskretsen (SorTech AG, 2010).



Figur 6 - Adsorptionskylnings tredje fas (SorTech AG, 2010)

4. Fas 4

- Fas 2 och 4 motsvarar varandra på samma vis som fas 1 och 3. I den fjärde fasen (Figur 7) sker värmeåtervinningen. Varmvatten passerar adsorptionskammare 1 och sedan går vidare till återkyllningen. Vattnet i återkyllningskretsen in passerar adsorptionskammare 2 som avlägsnas som varmvatten (SorTech AG, 2010).



Figur 7 - Adsorptionskylnings sista fas (SorTech AG, 2010)

2.3.2 Kylsystemets prestanda

För att definiera ett kylsystems prestanda är den vanligaste indikatorn COP, som är förkortningen av "Coefficient of Performance". COP definieras genom förhållandet mellan kylsystemets förmåga att avlägsna värme från en kall källa och energin som tillförs för systemets drift, det vill säga omvandlingen av energi som tillförs systemet till den utgående kylkapaciteten. Användningen av COP är väldigt relevant, speciellt när man jämför liknande system som fungerar med samma grundcykel och teknik (Fernandes et al., 2014).

För att beräkna COP värdet för en adsorptionsvärmepump bör man dividera de olika kretsarna med varandra för att få ut COP för värme och för kylning enligt följande formler (Núñez et al., 2007):

$$COP_{Uppvärmning} = \frac{P_{LT}}{P_{HT}} \quad (1)$$

$$COP_{Kylning} = \frac{P_{MT}}{P_{HT}} \quad (2)$$

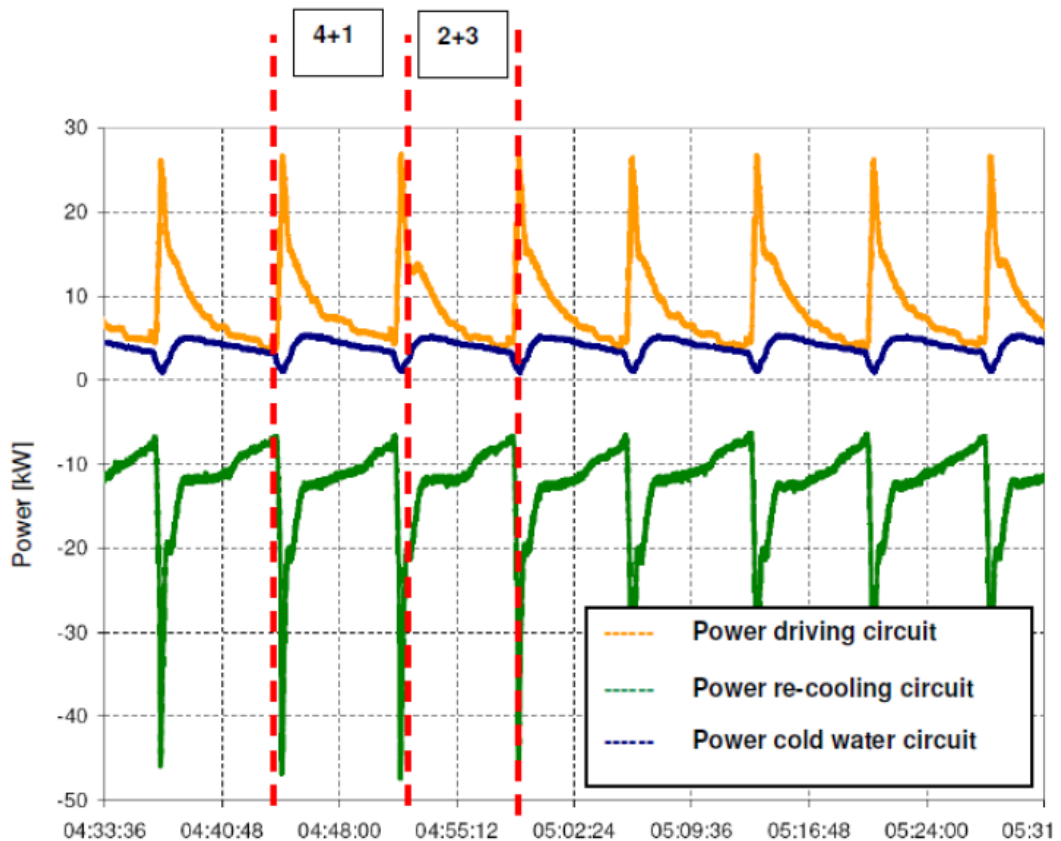
Där P är effekten i kilowatt för de enskilda kretsarna. För att beräkna effekten använder man följande formel:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (3)$$

Där Q är värmeöverföringen i Joule, och t är tiden i sekunder över en hel cykel, det vill säga faserna 1–4 (Núñez et al., 2007).

Bland alla metoder inom solkylning kan man grovt kategorisera det till sådana som drivs av termisk energi, och de som drivs av en extern energikälla, till exempel en elektrisk motor. Processerna som konverterar den termiska energin till kyleffekt brukar ha ett COP värde under 1. Processen som kräver en extern kraftkälla har ett betydligt högre COP värde som ligger kring 3. Dock i det senare fallet måste man

också beakta andra faktorer så som förluster i elmotorn (Agnew et al., 2021).

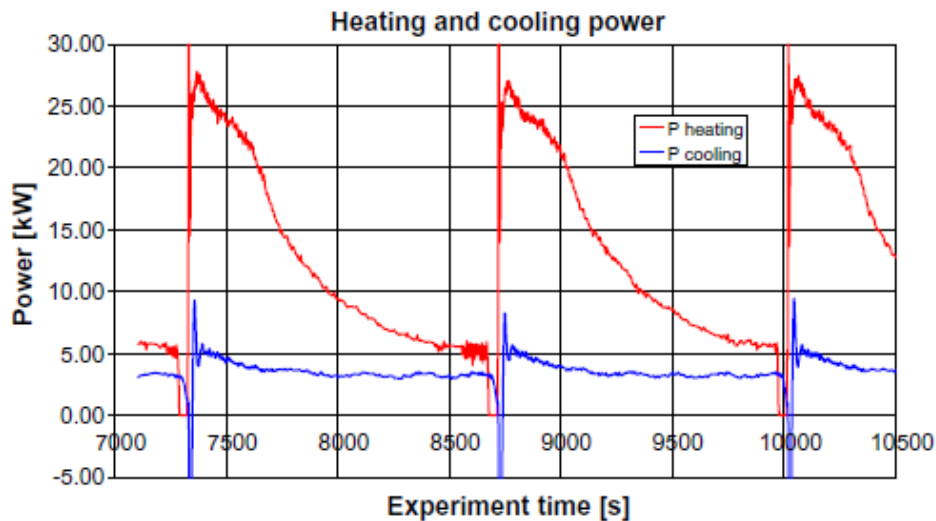


Figur 8 - Kretsarnas effektfördelning och faser under en kylcykel (SorTech AG, 2010)

Fördelningskurvorna i Figur 8 är typiska för adsorptionskylning. En cykel är indelad i två faser, 4+1 och 2+3. Under en fas är den ena adsorptionskammaren i adsorberande läge, och den andra är i desorberande läge (4&2) varefter följer övergången, där adsorptionskammrarna byter uppgift sinsemellan (1&3) (SorTech AG, 2010) .

För att uppnå maximal kyleffekt behöver cyklerna vara så korta som möjligt samt temperaturspridningen så hög som möjligt, långa cykler ger lägre temperaturspridningar. Detta kan regleras genom att ställa in vilken temperatur man vill ha ut från kylväten, desto lägre måltemperatur, desto högre kyleffekt (SorTech AG, 2010). Längre cykler betyder att mera kylmedium kommer att adsorberas i adsorptionskammaren, vilket i sin tur gör att adsorbenten närmar sig belastningens

jämvikt. Detta betyder att COP kommer att öka, men samtidigt kommer cykelns medeleffekt sjunka under slutet av båda adsorptionsfaserna, vilket gör att effektiviteten över cykeln sjunker, och effekten som kan utvinnas är liten (Núñez et al., 2007).



Figur 9 - Värme- och kyleffekt under en kylcykel för adsorption (Núñez et al., 2007)

I Figur 9 kan man se en optimal kylcykel för adsorption, där den blåa grafen för kyleffekten hålls relativt konstant, medan den för värmeeffekten har större variation. Orsaken varför skillnaden mellan effekterna är höga är på grund av hur man kör kylvanheten, i detta fall finns det en konstant efterfrågan för kylning (Núñez et al., 2007).

Då man jämför med traditionell kylteknik är adsorptionskylsystem inte ekonomiskt konkurrenskraftiga, och har vissa tekniska nackdelar, bland annat låga COP värden, kyleffekter samt dålig värme- och massöverföring vilket gör systemen mera klumpiga och dyrare. Dessa system gynnas dock betydande inom besparingar av energikostnader i jämförelse med vanliga mekaniska kylsystem med ångkompression, och har inga vibrationer, buller, har lägre drift- och underhållskostnader samt lägre miljöpåverkan tack vare dess icke förorenade köldmedier. Adsorptionssystem kan också drivas över ett stort område av olika

värmekällor, är mer robusta och mindre känsliga för fysisk påverkan, ger inga korrosionsproblem på grund av de arbetspar som normalt används och är mindre komplexa eftersom de innehåller färre rörliga delar (Wang et al., 2009).

2.4 IoT: Internet of Things

IoT, förkortat från engelskans Internet of Things, är begreppet för ett stort antal nätverksanslutna enheter som kan kommunicera och utbyta data och tjänster med internet. Formellt beskrivs IoT som ett nätverk av sammanlänkade enheter som kan överföra data utan mänsklig inblandning (Javanmardi et al., 2023). Valet vilken IoT enhet som används beror på vad den skall användas till, men Raspberry Pi är en av de mest använda inom IoT teknologin (Mudaliar & Sivakumar, 2020). Tack vare utvecklingen av 5G nätverk har det blivit allt vanligare att enheterna kan övervaka styra och samarbeta i realtid genom att ha IP-nätverksfunktionerna integrerade i IoT-enheten (Behnke et al., 2023).

Raspberry Pi är kraftfulla och kostnadseffektiva enkorts datorer med alla nödvändiga komponenter, som ursprungligen utvecklades för undervisningsändamål. De kan användas både som datorer för att köra maskininlärningsmodeller och som små mikrokontrollers för att samla in och överföra sensordata. De är mycket populära inom IoT-industrin på grund av sin storlek och pålitlighet (Gupta et al., 2022).

M-Bus, förkortat från Meter-Bus är en europeisk standard för att kunna läsa bland annat förbruknings-, värmemätare samt olika sensorer på distans. Tack vare standardiseringen har M-Busen blivit väldigt allmän inom energibranschen, och har resulterat i även ytterligare möjligheter. Sensorer, mätare och andra enheter av olika tillverkare kan nu användas på samma bus, vilket gör de möjligt att lösa mera avancerade problem tack vare de olika konfigurationsalternativen (M-Bus, 2020).

IoT teknologin kan användas inom många tillämpningsområden. Exempelvis smarta luftkonditioneringsystem har bland de största potentialerna för att sänka på

energianvändningen i byggnader, och Carli et al., 2020 lyckades med hjälp av IoT sänka energikonsumtionen med 15–20 % vid Universitetscampuset i Bari, Italien. Genom att använda sensorer, mätare och aktuatorer som aktivt diskuterade med varandra genom en gateway för att beräkna energibehovet och måltemperaturen i universitetets utrymmen, för att genom IoT reglera luftkonditioneringen (Carli et al., 2020).

3 MATERIAL OCH METOD

Efter flera års vila återupptogs intresset för adsorptionsvärmepumpens processer och dess effektivitet i Technobotnia i samband med projektet Energilagring (Novia, 2022). Detta utmynnade i en kandidatavhandling där pumpens processer kartlades och en preliminär undersökning av kylprocessen gjordes med målet att skapa instruktioner för en laboration som studeranden kunde göra under deras kurser (Ahlgren, 2021). I detta arbete upptäcktes dock flera utmaningar. Bland annat kunde inte datainsamlingen samarbeta med det visualiserande verktyget. Detta resulterade i att man inte kunde uppnå ett resultat där data kunde valideras. Det arbetet utgör utgångspunkten för denna studie.

Adsorptionspumpen finns i energilabbet i Technobotnia i Vasa. Technobotnia är grundat 1996 och är i dagens läge en grundpelare inom den tekniska forskningen samt utbildningen i Vasa. För tillfället delar Vasa universitet, Vasa yrkeshögskola och Yrkeshögskolan Novia på 8000 kvadratmeter och 25 olika tekniska laboratorier (Technobotnia, 2022). Systemet kan hittas i den nedre våningen av Technobotnia, men för att använda kylsystemet effektivt krävs det ett flertal andra komponenter som är spridda över hela Technobotnia.

3.1 Kartläggning av pumphuset

För att få en klar bild av systemet beskrivs kylprocessens komponenter i detalj. Detta görs för att lättare kunna tolka ritningarna och komponenternas uppgift. I bilaga 1 kan man se en övergripande ritning över komponenterna i pumphuset och hur de är kopplade.

1. Solfångare

På taket av Technobotnia finns det solfångare med en effekt på 13kW som används för att värma upp vattnet i varmvattensbehållaren (SorTech AG, 2010). I

vanliga fall används solfångare som den primära energikällan för uppvärmningen eftersom behovet av kylning oftast är störst under tider då solen är som starkast.

2. Vattenbehållare

Till förfogande finns det två olika vattenbehållare av märket Akvaterm i Technobotnias källare. Den ljusa behållaren är en 400 liters behållare som är ämnat för varmvattnet som används i systemet (vänster i Figur 10). Vattnet värms upp och förvaras på en temperatur kring 90 °C. Varmvattensbehållaren har också ett termostat som kan ställas in, och ifall solfångarna inte kan uppnå den givna temperaturen har behållaren ett integrerat värmemotstånd som värmer upp vattnet elektriskt.

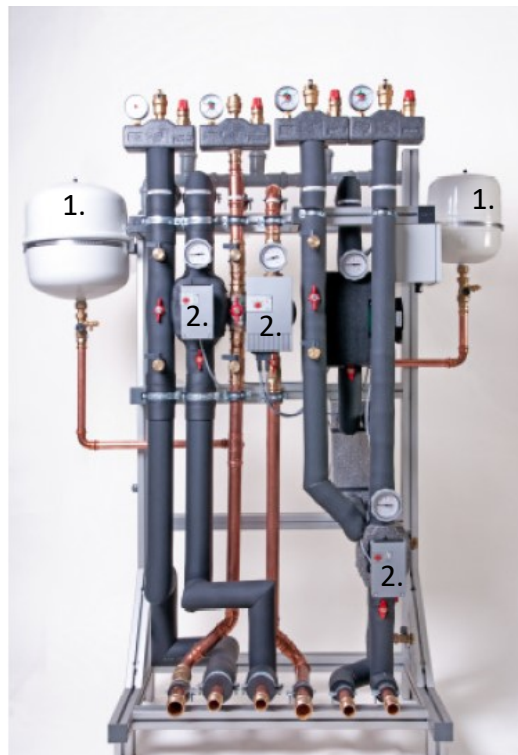


Figur 10 (a) Akvaterms varmvattensbehållare och (b) kallvattensbehållare

Den andra vattenbehållaren är även en Akvaterm, med en större volym på 750 liter (höger i Figur 10). Vattnet som finns i denna behållare är avsett att överföras till fläktarna på övervåningen för att kyla ner temperaturen i huvudutrymmena i Technobotnia. Vattnet återförs även tillbaka till kylvattenheten i källaren för att stödja nedkylningen under olika faser av kylningsprocessen.

3. Pumpstation

Pumpstationen är en SorTech PCS 08-GHT vilket är ett system anpassat för dess kylvanhet med samma kyleffekt (8 kW). Pumpsystemet är kopplat mellan alla komponenter i systemet, det vill säga mellan solfångarna, kylvanheten samt vattenbehållarna (Figur 11). Det finns tre olika konfigurationer för denna pump, anpassat ifall man använder sig av vatten med eller utan ett kyltorn, eller en blandning som innehåller vatten och glykol. Vid Technobotnia används modellen som är anpassad för vatten – glykol blandning, eftersom återkylningskretsen kommer att exponeras för minusgrader eftersom återkylningsfläkten finns på taket av Technobotnia. PCS 08 är ett komplext system som innehåller bland annat expansionstankar (1), pumpar, automatiska ventiler (2), spolventiler samt dräneringssystem.



Figur 11 - SorTech PCS 08 pumpstation

4. Hydrauliska kretsar

Inne i pumpen finns det tre olika hydrauliska kretsar vars uppgift är att transportera vattnet samt vatten-glykolblandningen mellan kylvanorna och vattenbehållarna. MT-kretsen däremot cirkulerar utomhus till taket, där mediet återkyls med hjälp av fläkten som är installerad. I MT-kretsen används en blandning av vatten och glykol, för att inte frysa vintertid. Alla kretsar har varsitt inlopp och utlopp.

Kretsarna har givna temperaturer som kylvanorna kräver för effektiv funktion, i HT-kretsen ligger den rekommenderade temperaturen mellan 55–95°C, om temperaturen sjunker under 55°C så stänger inte kylvanorna av, men processen blir ineffektiv att den inte kan skapa någon kyleffekt. I MT-kretsen behöver temperaturen ligga mellan 22–34 °C och behöver alltid vara minst 2°C varmare än LT-kretsens vars rekommenderade temperaturintervall är 6–20°C (SorTech AG, 2010).

Värmekrets, HT

Värmekretsen innehåller vatten av hög temperatur, därav benämningen HT (High Temperature). HT-kretsen cirkulerar mellan kylvanorna och solfångarna. Mellan dessa två punkter finns även en varmvattensbehållare med installerade värmemotstånd som säkerställer att temperaturen i HT-kretsen uppfyller minimikravet på temperaturen för att kunna fungera kontinuerligt. Väl inne i kylvanorna har HT-kretsen som uppgift att tillföra den värme som krävs för att driva adsorptionsprocessen. HT-kretsen överför värmen från värmekällan till adsorptionskammaren, där adsorbenten värms upp och släpper ut fukten som den har adsorberat. Detta frigör kallluft, och adsorbenten är sedan redo att adsorbera mer fukt i nästa cykel.

Återkylningskrets, MT

Återkylningskretsen (Medium Temperature) är placerad mellan kylvanheten och fläkten som finns på taket i Technobotnia. Återkylningskretsen är ansvarig för att evakuera och kyla ner den desorberade ångan som släpps ut från adsorptionskammaren. Återkylningskretsen består av ett externt kylsystem som använder vatten eller luft för att avlägsna värmen från den desorberade ångan. Efter att adsorbenten i adsorptionskammaren har släppt ut fukten som den har adsorberat, är den desorberade ångan varm och måste kylas ner innan den kan återanvändas i adsorptionscykeln. Återkylningskretsen koler därför ner den desorberade ångan genom att överföra värmen till köldmediet, som sedan släpper värmen till miljön. Eftersom köldmediet färdas utomhus, även vintertid, måste det vara en blandning mellan 66 % vatten och 34 % glykol för att inte frysa (SorTech AG, 2010).

Kallvattenkrets, LT

Kallvattenkretsen (Low Temperature) är kopplad mellan kylvanheten och fläktarna inne i Technobotnia, mellan dessa två punkter finns en vattenbehållare som förvarar den kalla luften. Inne i kylvanheten är LT-kretsen ansvarig för att kyla ner förångaren. Från kallvattenbehållaren förs vattnet med hjälp av en pump upp till fläktarna var de blåser luft över de kylda rören för att kyla omgivningen.

5. Kylvanhet

Kylaren eller adsorptionsvärmepumpen är en SorTech ACS 08 (Figur 12). Namnet är förkortat från "Adsorption Chiller silica gel" och den har en nerkylningseffekt på 8 kW (SorTech AG, 2010). Adsorptionsvärmepumpen använder sig av vatten som kylmedel och silicagel som adsorbat. Kylaren är kopplad till de tre tidigare beskrivna kretsarna genom PCS 08 pumpsystemet, HT som är varmvattenkretsen, MT som är återkylningskretsen samt LT som är

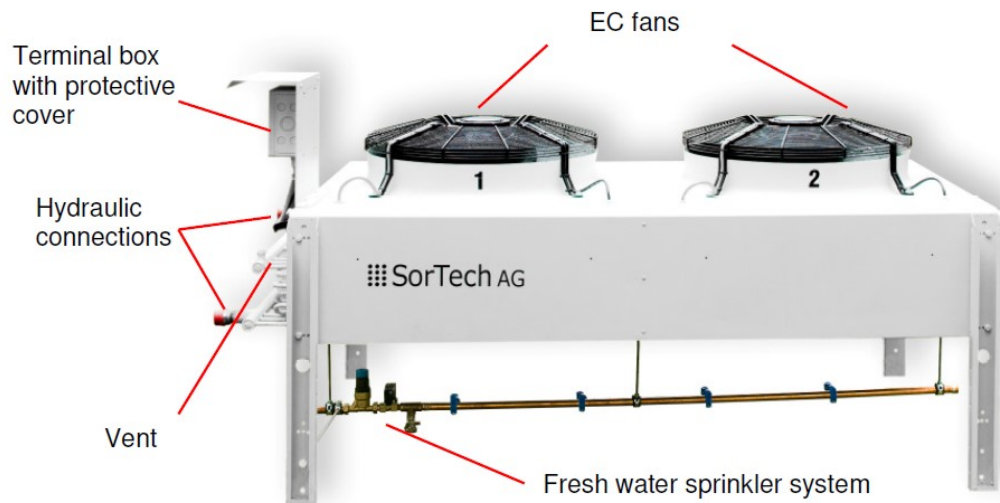
kylkretsen.



Figur 12 - SorTech ACS 08 kylvhet

6. Återkylningsfläkt

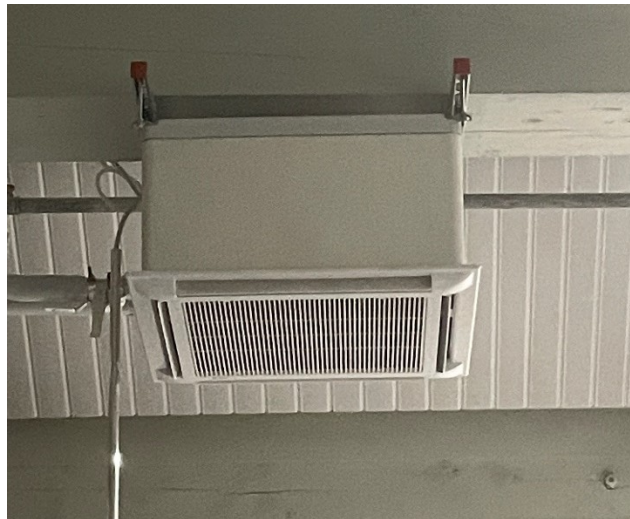
MT-kretsens funktion är att driva ut den varma fukten ur adsorptionskammrarna inne i kylvheten (SorTech AG, 2010). För att kunna göra det, finns SorTechs RCS 08 system på Technobotnias tak. Systemet är en fläkt som är kopplad genom MT-kretsen till kylvheten. Kylfläkten är placerad utomhus för att effektivera processen nämnvärt genom att kondensera den varma ångan och föra bort värmeenergin som finns i adsorptionskammrarna samt det som finns kvar i LT-kretsen. För att effektivera denna process ännu vidare, finns vattenspridare monterade under fläktarna för att kunna kyla ner mediet genom rören ännu bättre. Eftersom återkylningsfläkten exponeras för minusgrader vintertid, behöver vätskan vara en blandning av vatten och glykol för att inte frysa (Figur 13).



Figur 13 - SorTech RCS 08 (SorTech AG, 2010)

7. Kylfläkt

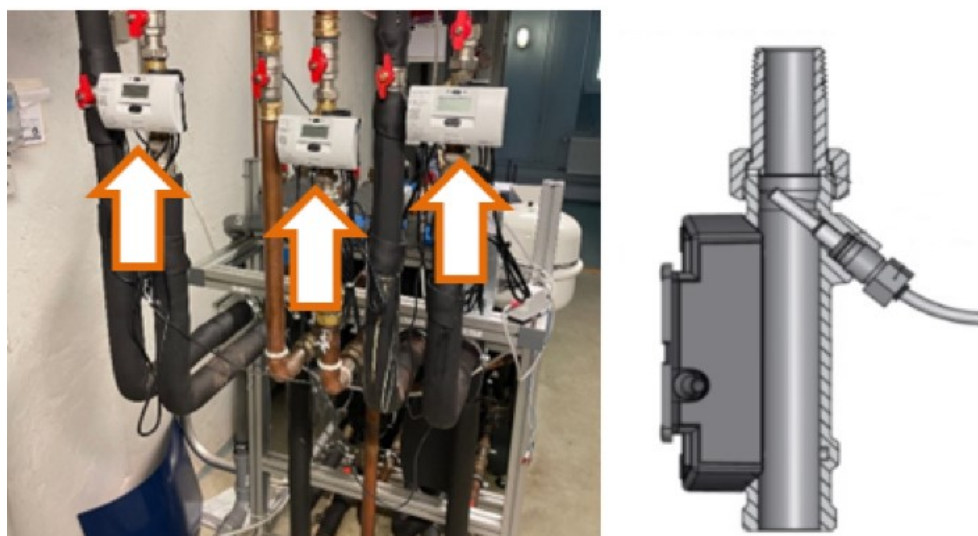
Inne i Technobotnias huvudlabb finns det fyra fläktar som kyler ner utrymmet på marknivå (Figur 14). Dessa fläktar är kopplade till kallvattenbehållaren som finns bredvid kylvanheten i källaren. Det nerkylda mediet pumpas upp med en extern pump, för att sedan nå fläktarna som släpper ut den kylda luften.



Figur 14 Fläktarna uppe i huvudlabbet

8. Mätinstrument

Mätinstrumenten som finns integrerade med systemet är Kamstrups Multical 302 (Pilarna i Figur 15 - (a) Kamstrups Multical 302 15). Mätarna är installerade i PCS-08 pumpsystemet med en mätare i varje krets. Mätarna är kopplade till sensorer som är inne i rören enligt högra illustrationen i (Figur 15). Dessa sensorer finns både i röret som går in och ut ur kylvanheten, det vill säga, två sensorer för varje mätare. Sensorerna mäter med hjälp av en dubbelriktad ultraljudsteknik baserad på transittid. Detta betyder att två ultraljudsgivare används för att skicka ljudsignaler, en som skickar med flödet, samt en mot flödet. Signalen som färdas med flödet når den motsatta givaren först. Tidsskillnaden mellan de två signalerna kan omvandlas till flödes hastighet och därmed även volymflöde (Kamstrup, 2021).



Figur 15 - (a) Kamstrups Multical 302 och (b) sensors placering (Kamstrup, 2021)

För att samla ihop mätdata finns det även en ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus (Figur 16) som är ett effektivt sätt av att ta emot data från mätarna, och skickar sedan data trådlöst i väg till ABB i-bus Tool. Operativsystemet är ett kompletterande program var man kan analysera data

som mottas från M-Bus (ABB, 2023).



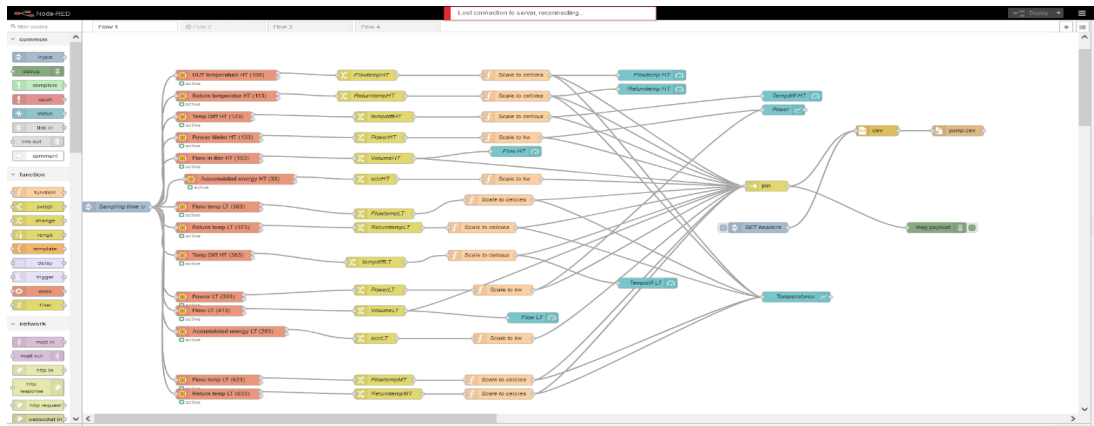
Figur 16 - ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus

3.2 Utveckling av ANYBUS datainsamling

Pumpsystemet har sensorer som mäter värden i realtid genom Kamstrups mätare, vilka redan är kopplade till ABB:s M-Bus som sänder data till en server, varifrån man kan plocka data från ABB:s i-bus verktyg. Redan under pumpsystemets kartläggning kunde man märka att kommunikationen mellan ABB:s M-Bus och i-bus verktyg inte fungerade som det skulle.

Flera försök gjordes för att erhålla mätdata från den befintliga ABB mätutrustningen, men det lyckades inte. Eftersom det var svårt att hitta det underliggande problemet kopplades ABB:s M-Bus bort, och i stället användes en Anybus M-Bus som fungerar enligt samma princip. Tidigare var ABB:s M-Bus kopplad till en dator med en Ethernet kabel, men eftersom vi var intresserade att göra datainsamlingen mera skräddarsydd, kopplades Anybusen till en Raspberry-pi med hjälp av Ethernet kabeln. Tack vare

uppkopplingen mellan Anybusen och Raspberry-pi:n kunde man logga in på dess angivna server, för att gå in i Anybus egna kommandoprogram var man kunde konfigurera datainsamlingen enligt Figur 17 som även hittas som Bilaga 2.



Figur 17 - Flödesdiagram för datainsamlingen

I datakonfigurationen arbetar man med ett flertal celler, även kallade noder, som man anger till ett visst kommando, för att sedan koppla ihop dem i ett logiskt flöde (Figur 17). Från vänster börjar man med att definiera mättiden, vilket i denna studie var 10 sekunders intervall mellan mätpunkterna. Följande stapel är en andel av mätpunkterna som Kamstrups mätare samlar, mätpunkter såsom temperaturer, flöden och effekter konfigurerades i varsin nod. Därefter har man döpt om noderna till mera passande namn (Figur 18 - Inställningarna inne i *noden*), och omvandlat enheterna. Ytterligare behövde man endast koppla ihop alla noder till ett kommando för att sedan exportera data till en Excel fil.

The screenshot shows a software interface for editing a Modbus-Getter node. The window title is "Edit Modbus-Getter node". At the top, there are three buttons: "Delete", "Cancel", and "Done". Below this is a "Properties" section with a gear icon and a search icon. There are two tabs: "Settings" and "Optionals". The "Settings" tab is active and contains the following fields:

Field	Value
Name	OUT temperature HT (100)
Unit-Id	
FC	FC 3: Read Holding Registers
Address	103
Quantity	1
Server	Anybus

Figur 18 - Inställningarna inne i noden

3.3 Mätkampanj 1

Den första mätkampanjen gjordes i början av oktober 2021. Målet med denna mätkampanj var att skapa en uppfattning av hur pumpsystemet och datainsamlingen fungerar. Dessutom var tanken att få ett grundresultat som sedan kunde jämföras med den andra mätkampanjen efter att vi har gjort olika ingrepp på pumpen, till exempel genom att suga ett nytt vakuum i adsorptionskammrarna. Kylenheten kan ställas in enligt önskad temperatur vid LT_OUT, vilket blev inställt på 15 °C. Efter 71 timmar stängdes kylenheten manuellt, varefter mätdata exporterades från Raspberry-pi:n till en Excel för analys.

3.4 Ingrepp på systemet

Under mätkampanj 1 noterades det problem i mätningarna, vilka behövde åtgärdas. Ett av problemen som vi misstänkte att har en inverkan på mätdata var adsorptionskammrarnas vakuum. Detta antagande gjordes eftersom evakueringen av adsorptionskammrarna är ett regelbundet ingrepp som bör göras på årlig basis.

Evakueringen åtgärdades enligt följande:

Pumpen kördes i gång redan under förmiddagen för att värma adsorptionskammrarna till en temperatur över 55 °C. Efter några timmar kunde man inleda ingreppen på kylsystemet. Först kontrollerade man att temperaturen var tillräckligt hög, samt att temperaturskillnaden mellan de två adsorptionskammrarna inte var för stor. Därefter ställer man in kylvanheten i serviceläge. Under pumpen finns ventiler som distribuerar vattnet från de olika kedjorna. När serviceläget aktiveras hör man hur ventilerna flyttar sig till korrekt läge. För att evakuera adsorptionskammrarna i kylvanheten använder man sig av en extern kompressor med en adapter till kylsystemet. Inledningsvis börjar man med att koppla slangen i pumpen, men man öppnar inte serviceventilen till kylsystemet, för att först uppnå ett vakuum i slangen. Efter att trycket nådde 1 mbar öppnades ventilen till kylsystemet, varefter trycket steg till 30 mbar, och efter ca 15 minuter av sug hade trycket sjunkit till 1 mbar. Serviceventilen stängs och kompressorn frångöps.

3.5 Mätkampanj 2

Andra mätkampanjen ägde rum direkt efter vakuumevakueringen av kylvanheten. Detta betyder också att adsorptionskammrarna hade en temperatur på 80°C när vattnet från HT-kretsen hade värmt upp adsorptionskammrarna när mätkampanjen påbörjades. Den andra mätkampanjen ägde rum mellan 19-20.5.2022 klockan 19-13:00, och efter 13:00 användes endast solenergi som värmekälla.

3.6 Dataanalys (med Anybus datainsamling)

Tack vare samarbetet mellan anybusen samt Raspberry Pi:n var det möjligt att exportera datafilerna i en komma separerad Excel fil (.csv). Eftersom filen är .csv betyder det att data inte är separerat i kolumner, utan alla värden under en mätpunkt är i en cell, och följande mätpunkt på följande rad. För att kunna arbeta med mätdata från båda mätkampanjerna behövde man reda upp data i Exceln, så att varje cell

innehöll ett värde enligt mätpunkten som var angiven av raden, och att storheten i kolumnen var rätt.

3.7 Beräkning av COP

Data som samlades genom mätinstrumenten kunde användas i mycket stor utsträckning. Till exempel kunde effekten på LT och HT kretsen avläsas direkt. Dock för MT-kretsen, vars mätare inte var anpassad för vatten / glykolblandning måste effekten räknas ut manuellt. Först och främst behövs värmeöverföringen beräknas. Eftersom massflödet är en essentiell del av beräkningen, och mätaren inte kunde avläsa det måste vi gå enligt ritningarna och ta dess volymflöde. Till detta behövs beräkningarna ännu anpassas till en blandning av 66 % vatten och 34 % glykol. För att räkna ut COP värden har följande parametrar använts (Tabell 1 - Parametrar för beräkning av COP).

Tabell 1 - Parametrar för beräkning av COP

PARAMETER	VÄRDE	ENHET
SPECIFIKA VÄRMEKOEFFICIENTEN FÖR VATTEN, CP	4,18	J /kgK
SPECIFIKA VÄRMEKOEFFICIENTEN FÖR GLYKOL, CP	2,42	J /kgK
DENSITET VATTEN	1000	Kg/m ³
DENSITET GLYKOL	1113	Kg/m ³
ΔT (MT)	13,01	°C
Flödet i MT kretsen	3700 (1,027)	l/h (l/s)

Där ΔT är temperaturskillnaden i MT-kretsen, som har avlästs från Kamstrups mätare. ΔT kommer att variera för varje mätpunkt och 13,01 °C är endast det första värdet när den första cykeln börjar i den andra mätkampanjen. Under kylsystemets kartläggning märktes det dock att mätaren som användes vid MT-kretsen inte var anpassad för en vatten-glykol blandning, vilket resulterade i att volymflödet behövdes ta från ritningarna.

Följande beräkning är för den första cykeln. Resterande cykler har samma formler och tillvägagångssätt.

$$c_p = \left(0,66 * 4,18 \frac{J}{kgK}\right) + \left(0,34 * 2,42 \frac{J}{kgK}\right) = 3,5816 \frac{J}{kgK}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} = \dot{V} * \rho &= 1,0277 \frac{l}{s} * \left(\left(0,66 * 1000 \frac{kg}{m^3}\right) + \left(0,34 * 1113 \frac{kg}{m^3}\right) \right) = \\ &1,067 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

För att beräkna värmeöverföringen, Q, använder man sig av följande formel:

$$Q = \dot{m}c_p * \Delta T * 10s \quad (4)$$

Där m är massans substans i kilogram, c är massans specifika värmekoefficient i J/kg*K och ΔT är temperaturskillnaden i Celsius som mäts mellan inlopps- och utloppspunkterna i kretsarna. Eftersom en mätpunkt är 10 sekunder behöver även det tas i beaktande, så att den totala mängden värmeöverföring stämmer överens med tiden.

$$Q_{Mät\text{punkt}1} = 1,067 \frac{kg}{s} * 3,5816 \frac{J}{kg^\circ C} * 13,01^\circ C * 10s = 478,91 J$$

$$Q_{Mät\text{punkt}2} = 1,067 \frac{kg}{s} * 3,5816 \frac{J}{kg^\circ C} * 13,01^\circ C * 10s = 478,91 J$$

$$Q_{Mät\text{punkt}3} = 1,067 \frac{kg}{s} * 3,5816 \frac{J}{kg^\circ C} * 16,62^\circ C * 10s = 611,80 J$$

Beräkningen av värmeöverföringen har gjorts för varje mätpunkt, det vill säga 78 gånger för att sedan dividera det med antalet sekunder i cykeln. Det kumulativa värdet för Q i MT-kretsen blir då 21580,11 J.

$$P_{MT} = \frac{Q_{MT}}{t} = \frac{Q_{Mät punkt 1} + Q_{Mät punkt 2} + Q_{Mät punkt 3 \dots}}{t} = \frac{21580,11 \text{ J}}{750 \text{ s}} = 28,77 \text{ kW}$$

Eftersom mätinstrumenten kan läsa av effekten (P) i både HT- och LT-kretsen kan vi räkna ut COP värdet för både värmen och kylan. För att få en mera stabil beräkning har medeltalet av effekten under en cykel använts.

$$COP_{kylning} = \frac{P_{LT}}{P_{HT}} = \frac{8,79 \text{ kW}}{16,13 \text{ kW}} = 0,54$$

$$COP_{uppvärmning} = \frac{P_{MT}}{P_{HT}} = \frac{28,77 \text{ kW}}{16,13 \text{ kW}} = 1,78$$

4 RESULTAT

Det praktiska arbetet utfördes i två separata mätkampanjer, mellan dessa gjordes ett ingrepp på systemet för att kunna se hur stor inverkan det har i den andra mätkampanjen. Resultaten har koncentrerat sig på systemets prestanda, samt utvecklingsarbetets inverkan. För att kunna tolka mätvärden i figurerna, hänvisa till förkortningarna i Tabell 2.

Tabell 2 - Benämningar och förklaringar som används i resultatet

	FLOWTEMP	RETURNTEMP
HT	Temperaturen på vattnet i varmvattenkretsen som kommer från varmvattensbehållare in till kylanheten.	Temperaturen på vattnet i varmvattenkretsen som från kylanheten returneras till varmvattensbehållaren.
MT	Temperaturen på vatten/glykol blandningen i återkylningskretsen som kommer ut ur återkylningsfläkten och går in i kylanheten.	Temperaturen på vatten/glykol blandningen i återkylningskretsen som kommer ut ur kylanheten och går vidare till återkylningsfläkten.
LT	Temperaturen på vattnet i kallvattenkretsen som kommer från kallvattensbehållaren och går in i kylanheten.	Temperaturen på vattnet i kallvattenkretsen som kommer från kylanheten och returneras i kallvattensbehållaren.
tempdiffHT	Temperaturskillnaden mellan flowtempHT och returtempHT för att analysera hur mycket energi kylanheten drar åt sig under processen.	
	HT	LT
POWER	Effekten som kylsystemet använder för sin process. Mäts vid HT-kretsens inlopp- samt utloppspunkt.	Kyleffekten som systemet skapar. Mäts vid LT-kretsens inlopp- samt utloppspunkt.

Temperaturerna kommer att användas för att kunna analysera värmefallet under mätkampanjerna, och effekten kommer att användas för att kunna särskilja på cyklerna samt är en väsentlig del i beräkningen av COP

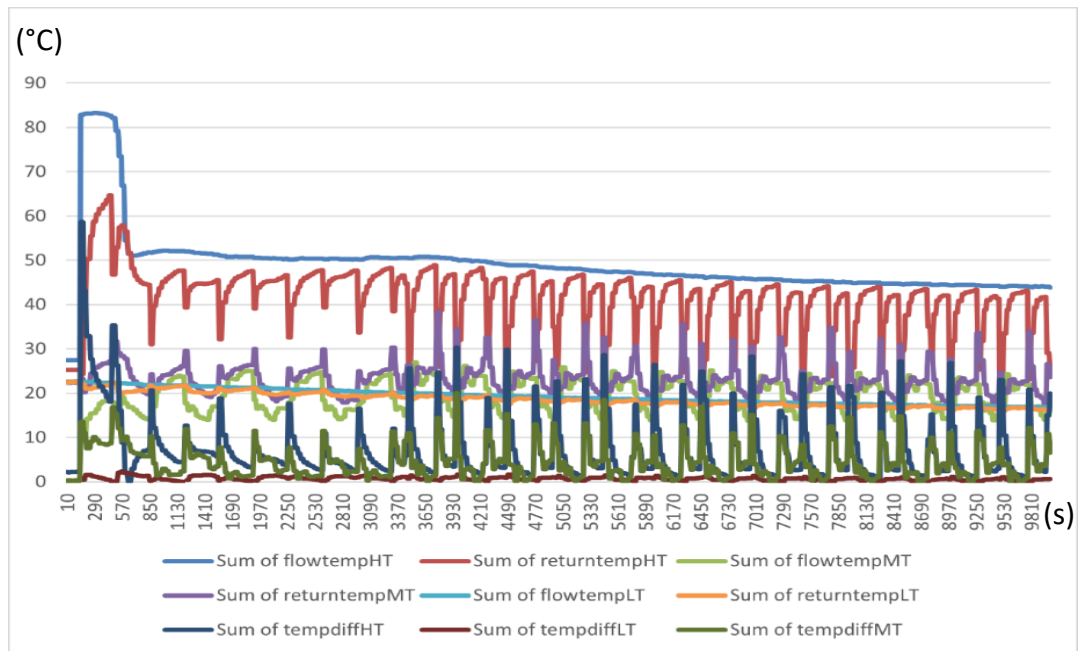
4.1 Kartläggning av kylprocessen med ursprunglig mätutrustning

Redan under pumpsystemets kartläggning och i VAMK:s ingenjörsarbete märktes det att kommunikationen mellan ABB:s M-Bus och ABB:s i-bus program var väldigt instabilt (Ahlgren, 2021). Detta kunde lösas genom att manuellt starta om uppkopplingen. Efter att uppkopplingen blev någorlunda stabil, uppmärksammades det stora problem i ABB:s i-bus program eftersom instrumentbrädan som visualiserade sensorernas data i realtid inte fungerade. Efter att ha försökt hitta en lösning genom att studera datorns och nätverkets sekretess inställningar samt nollställning av programmet flertal gånger bestämde vi oss att förkasta detta system, och i stället utveckla ett eget genom att konfigurera sensorerna i ett skilt Anybus program.

4.2 Första mätkampanjen

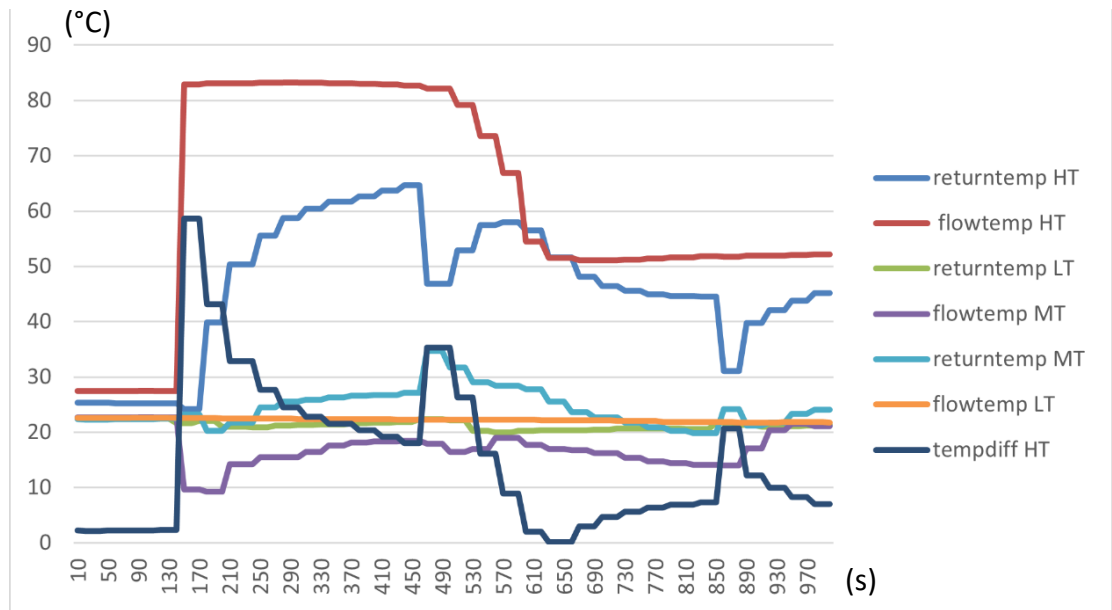
Den första mätkampanjen är en del av kartläggningen, som gjordes för att förstå processerna i kylsystemet. I Figur 19 kan man se de 10000 första sekunderna av den första mätkampanjen, vilket motsvarar ca 2 timmar och 45 minuter. I Bilaga 3 kan man även se figuren i ett större format.

Den första mätkampanjen förblev väldigt kort, och redan efter den första fasen faller temperaturen i HT-kretsen under 55 °C som är under det rekommenderade minimitemperaturen för HT-kretsen.



Figur 19 - Temperaturförändringar i adsorptionspumpens tre kretsar under de första 10000 sekunder under mätkampanj 1

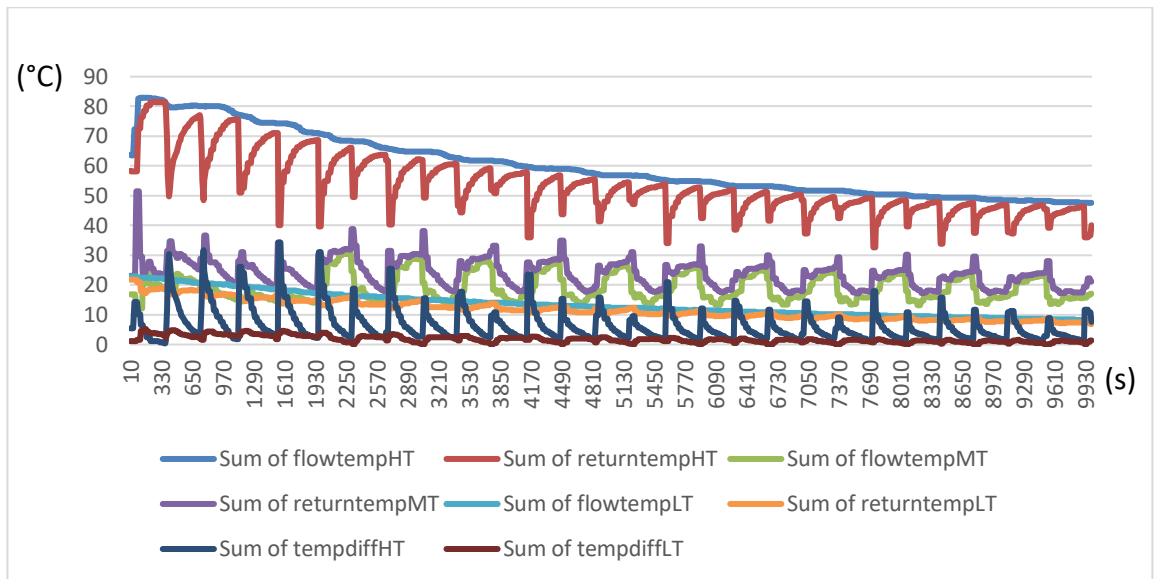
I Figur 20 ser man de första 1000 sekunderna av mätkampanjen. I den första mätkampanjen kan man se att det först tar 130 sekunder för att pumpen i verkligheten går i gång, varefter flowtemp HT stiger till 82 °C vilket indikerar att det stående vattnet i rören är "utbytt" till vattnet från varmvattensbehållaren. Vid ca 490 sekunder kan man se hur trenderna "retruntemp HT" samt "tempdiff HT" faller kraftigt, detta på grund av att all värmeenergi gick åt att värma upp adsorptionskammaren samt att adsorptionskammrarna var inte i vakuum, vilket kommer att kräva mera energi.



Figur 20 - Temperaturförändringar i adsorptionspumpens tre kretsar under de första 1000 sekunder under Mätkampanj 1

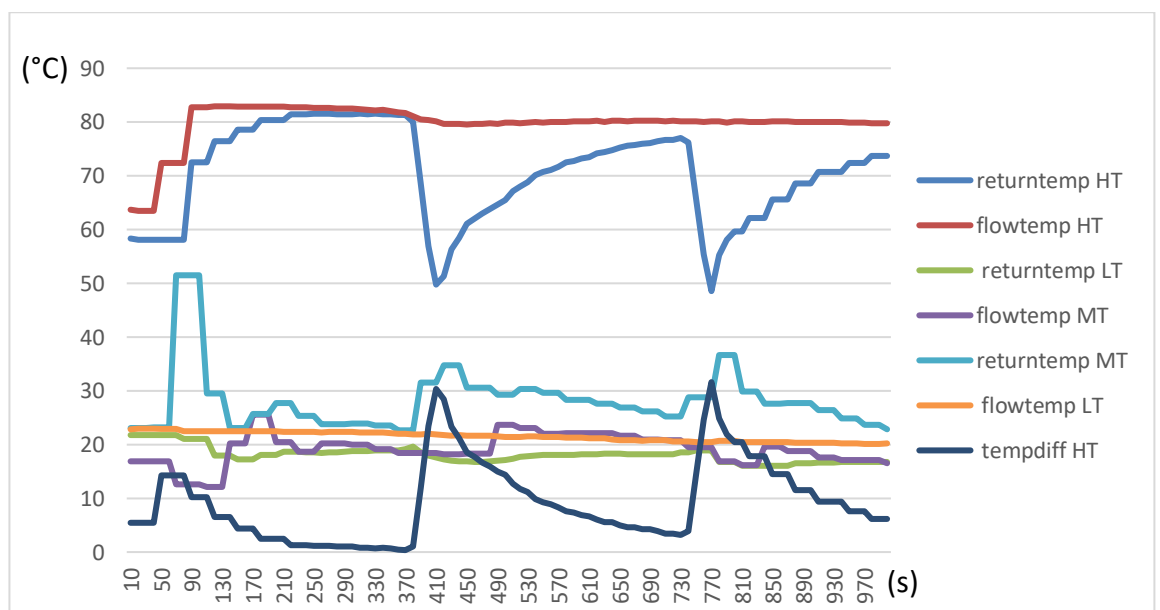
4.3 Andra mätkampanjen

Den andra mätkampanjen (Figur 21) och (Bilaga 4) gjordes direkt efter underhållsarbetet, och man kan se att temperaturen i HT-kretsen hålls mera stabil. I denna mätkampanj är även cyklernas intensitet mycket närmare varandra, och mera konsekvent. Dock bör det anmärkas att även i detta fall kommer temperaturen in flowtemp HT sjunka under det viktiga 55 °C, men i detta fall tar det dryga 5600 sekunder, det vill säga just över en och en halv timme.



Figur 21 - Temperaturförändringar i adsorptionspumpens tre kretsar under de första 10000 sekunder under mätkampanj 2

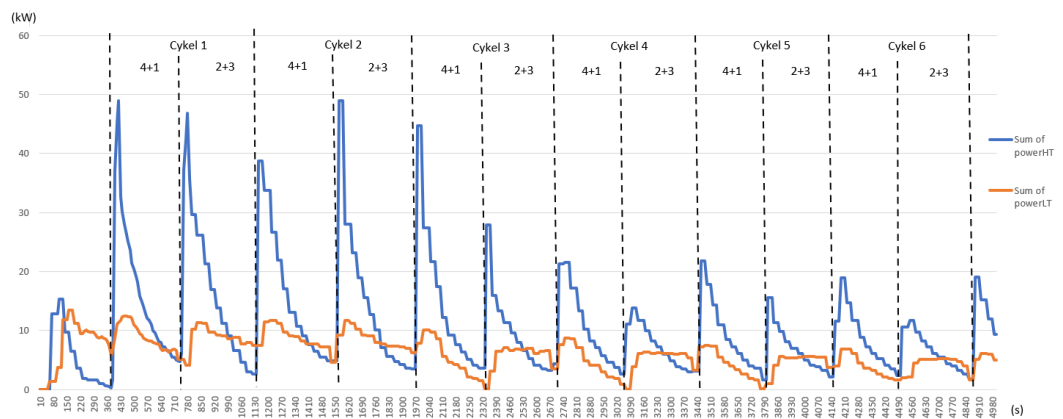
Under de 1000 första sekunderna i Figur 22 kan man se stabiliteten av HT-kedjans temperatur som återhämtar sig snabbt efter att fasen ändras. Redan vid första fasen faller temperaturen i returtempHT med några enstaka grader, men den följer temperaturen i flowtempHT som också faller efter den första övergången.



Figur 22 - Temperaturförändringar i kylvanhetens tre kretsar under de första 1000 sekunder under mätkampanj 2

4.3.1 Cykler

I nedanstående Figur 23 och (Bilaga 5) kan man se effekten för både kylning och uppvärmning. Eftersom Kamstrups mätare som var felinstallerad på MT-kretsen var det inte möjligt att få ut effekten för den kretsen. Från figuren kan man se att värmeeffekten i HT-kretsen har stor variation, medan kyleffekten i LT-kretsen hålls relativt stabilt. När man går över till fas 2+3 i den tredje cykeln faller värmeeffekten från 45 kW till under 30 kW.



Figur 23 - Faserna och cyklerna samt värmeeffekten samt kyleffekten under de första 5000 sekunderna i mätkampanj 2

I Tabell 3 kan man se en mera detaljerad tabell över de kumulativa effekterna i faserna, samt hur länge de varar.

Tabell 3 - Olika cyklernas effekter samt längd

CYKEL	FAS	VÄRMEEFFEKT (KW)	KYLEFFEKT (KW)	TID (SEK)
1	4+1	617	323	360
1	2+3	669	350	390
2	4+1	735	419	500
2	2+3	355	275	330
3	4+1	547	195	360
3	2+3	378	226	380
4	4+1	381	169	350
4	2+3	303	213	390
5	4+1	334	143	350
5	2+3	252	173	350
6	4+1	312	138	350
6	2+3	261	166	380

Fas 4+1 i de tre första cyklerna håller en stabil nivå, men vid den fjärde sjunker den med 166 kW. Värmeeffekten i Cykel 1, Fas 2+3 följer väldigt långt samma som den tidigare fasen, men redan vid den andra cykeln märker man att fasen inte uppnår samma resultat som 4+1 fasen. Fasernas längd förblir långt samma, förutom andra cykelns 4+1 fas, som är längre, samma fas har även högre effekter jämfört med resterande faser.

4.4 COP-värden

Genom beräkningarna som gjordes utgående från ekvationerna 1-4 i metoden kunde Tabell 4 sammanställas för redovisning av kylningens samt uppvärmningens COP. Vanligtvis kan man räkna COP direkt genom att jämföra effekterna från varje krets under en cykel. Men eftersom mätinstrumentet inte stödde en glykolblandning,

kunde inte volymflödet läsas från mätaren i MT-kretsen, utan man behövde räkna ut effekten genom att anta volymflödet från ritningarna. Andra viktiga parametrar såsom temperaturer kunde fortfarande avläsas från MT-kretsens mätare.

COP för kylningen håller en stabil nivå kring 0,5 medan uppvärmningen har en COP på 1,9 i första cykeln vilket gradvis ökar till 4,3 i den sista cykeln. Cykeln för kylnings COP sjunker vid följande cykel förutom mellan cykel 1–2 samt 3–4. Samtidigt stiger COP för uppvärmning vid följande cykel, förutom mellan cykel 1–2.

Tabell 4 - COP under den andra mätkampanjen

CYKEL	<i>COP_{kylning}</i>	<i>COP_{uppvärmning}</i>
1	0,5451	1,7838
2	0,5772	1,7300
3	0,4713	2,4786
4	0,5764	3,3364
5	0,5562	3,8863
6	0,5469	3,9705

5 DISKUSSION

Enligt Ahlgren (2021) var adsorptionssystemet införskaffad för laborationssyften i Technobotnia, men det noterades redan då att det fanns utmaningar kylsystemets processer. Problemen som lyftes upp av Ahlgren var möjliga att åtgärda, till exempel utvecklingen av datainsamlingen med hjälp av Anybus m-bus och Raspberry-Pi fungerade som förväntat. Eftersom Raspberry-Pin var uppkopplat till Technobotnias nätverk genom Ethernet var det inte möjligt att följa med data i realtid på grund av Technobotnias sekretessinställningar. För att få datat behövde man exportera det lokalt från Raspberry-Pin.

I den första mätkampanjen tar det endast 10 minuter innan temperaturen sjunker under 55 °C. Det finns två faktorer om möjligtvis kunde orsaka detta. Den första är underhållsarbetets frekvens, vakuumet i adsorptionskammrarna sjunker med tiden, därför är det också nödvändigt att göra det en gång i året. När ett vakuum appliceras kommer adsorptionskapaciteten och effektiviteten öka, eftersom vakuumet kommer att avlägsna eventuella gaser eller föroreningar som finns i adsorptionskammaren genom att "städa" ytan och öka den tillgängliga ytarean för adsorption. Den andra orsaken kunde möjligtvis vara att kylvanheten kallstartades, och hade inga optimala temperaturer, vilket betyder att värmeenergin gick åt för att värma adsorptionskammrarna och rören.

Den andra mätkampanjen gjordes direkt efter att underhållsarbetet hade gjorts på kylvanheten, vilket betyder att temperaturerna var optimala redan från start. Tack vare ingreppet som gjordes på kylvanheten i form av evakueringen av luft från adsorptionskammrarna möjliggjorde det även att man kan få ett längre tidsintervall, som kan anpassas för denna demomiljö.

Under båda mätkampanjerna uppenbarades att trycket i MT-kretsen inte var optimal, detta kunde avläsas på PCS-08 systemets analoga mätare. När trycket i HT- och LT-kretsarna låg på 1 bar var MT-kretsen på ca 0,6 bar. Under den praktiska delen

behövdes glykol tillsättas i MT-kretsen i flera omgångar för att uppnå ett tryck på 1bar. Ifall kylvanheten inte har varit i gång, och MT-kretsen är exponerad för extrem kyla under vintern på Technobotnias tak var RCS-08 kondensorn befinner sig, tyder det med största sannolikhet att det finns ett läckage i MT-kretsen. Detta innebär också att temperaturerna i MT-kretsen är väldigt låga jämfört med SorTechs rekommenderade tolerans. Under den andra mätkampanjen ligger temperaturen på MT-kretsen på 18,47°C och LT-kretsens utloppstemperatur på 18,01°C, och rekommendationen är att MT-kretsen bör ha åtminstone 2°C varmare temperatur än LT-kretsen.

Vid beräkningarna av COP-värdet har Núñez et al. (2007) använts som källa. Detta gjordes eftersom de har använt samma modells kylvanhet som finns på Technobotnia. Tack vare detta kan vi jämföra skillnaderna på deras uppsättning, och hur välfungerande systemet på Technobotnia är jämfört med källans. COP-värdet kunde endast beräknas från data från den andra mätkampanjen, eftersom den första mätkampanjen inte orkade uppehålla temperaturen under en hel cykel. När man jämför COP-värdet mellan Technobotnias och Núñez kan man se stora skillnader i de senare cyklerna. I den första cykeln är COP för uppvärmning 1,78 och kylnings COP 0,54 till skillnad från Núñez 1,6 respektive 0,5.

Enligt Agnew et al. (2021) ligger medelvärdet för COP kring 1 för motsvarande applikationer som använder sig av solkylning. Vid den sjätte cykeln ligger COP för uppvärmning på 3,9 vilket är inte möjligt när man inte har externa energikällor som drivkraft. Eftersom Technobotnias kylsystem inte har externa drivkrafter ger detta en indikation på att problemen som finns i systemet kan också ha en stor inverkan på effektiviteten i de senare cyklerna. I beräkningen av värmeeffekten använder man sig av temperaturskillnaden mellan inloppets och utloppets temperaturer, samt av massflödet i kretsen. Under den andra mätkampanjen var temperaturskillnaden väldigt hög i MT kretsen. På grund av att mätaren i MT-kretsen var fel, behövde man ta volymflödet från ritningarna. Vilket ger den ett konstant volymflöde, medan volymflödet i HT och LT-kretsen var väldigt varierande beroende på var i fasen den

befann sig i. Detta kommer i sin tur ge konstant höga värden både i värmeöverföringen och effekten, när det jämförs med HT-kretsens effekt blir COP orealistiskt högt för uppvärmningen.

För att kunna göra längre mätkampanjer behöver man säkerställa att temperaturen i HT-kretsen hålls kontinuerligt mellan 55–95 °C. Efter evakueringen var det möjligt att uppehålla en nödvändig temperatur för en och en halv timme.

6 SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER

För tillfället har Technobotnias adsorptionpump stor potential, främst på grund av den stora mängden solenergi som kan utvinnas. Dock finns det flera aspekter som måste åtgärdas vilka redan konstaterades tidigt i arbetet. Eftersom adsorptionspumpen är initialt införskaffad för laborationssyften, kan man förstå orsaken varför man använder elektriska motstånd i varmvattensbehållaren, för att kunna säkerställa en stabil tillgång av varmvatten för laborationer. Men från en ekonomisk synvinkel är det inte lönsamt, speciellt under hösten och vintern 2022 – 2023. De dyra införskaffningskostnaderna för hela systemet med kylvanhet, pumpsystem, fläktsystem, vattenbehållare och allt rörarbete som medkommer. Det främsta argumentet för att använda sig av solenergi eller spillvärme är att driftskostnaderna är väldigt låga, och därför uppkommer det inga primära kostnader för energin, annat än elektriciteten för att driva några externa pumpar.

Problemen med MT-kretsen, kommer att påverka beräkningarna och resultaten. Det låga trycket som MT-kretsen hade har enligt tillverkaren väldigt stor påverkan, eftersom den kretsen är den viktigaste av alla tre kretsar. Om inte MT-kretsen har ett konstant flöde kommer kyleffekten inte vara tillräcklig. Även MT-kretsens MultiCAL302 som inte kunde mäta volymflödet har en inverkan i beräkningarna, eftersom detta värde har blivit antaget enligt ritningarna. Om man jämför volymflödet mellan ritningarna och vad som blev utmätt från HT- och LT-kretsen ser man att ritningarna påstår ungefär 250 liter/timmen mera än uppmätt. I beräkningarna av värmeöverföringen behöver man ta mediets densitet och specifika värmekapacitet i beaktande, i MT-kretsen skulle det enligt ritningarna vara en blandning av 34 % glykol och 66% vatten. Vid kylvanheten i Technobotnia kunde man fylla på med glykol till MT-kretsen, dock fanns det ingen mätare för att säkerställa glykolhalten i kretsen, vilket betyder att blandningen kan vara mycket starkare än vad som utgår från beräkningarna.

Det är i vårt fall tämligen svårt att kunna fastställa den korrekta åtgärden för att möjliggöra en kontinuerlig process där flowtemp HT är över 60 °C hela tiden, det kan antingen vara att det inte finns tillräckligt med kapacitet i solfångarna, MT-kretsens problem eller att värmemotståndet i varmvattensbehållaren är inte tillräckligt. Den trovärdigaste orsaken är MT-kretsens problem med att uppehålla ett korrekt tryck. Eftersom planeringen och installationen har gjorts av professionella leverantörer som har beräknat att utrustningen ska vara rätt skalad med varandra. Att installera ytterligare värmemotstånd kan anses som en tillfällig lösning, och i verkligheten löser inte det underliggande problemet. Ett förslag kunde vara att undersöka ifall det verkligen finns ett läckage med hjälp av en montör, eller orsaken varför trycket inte hålls på 2 bar. När man har lyckats åtgärda detta, kan man sedan analysera data med en till mätkampanj, och sedan kartlägga ifall det skulle finnas behov av mera värmemotstånd eller solfångare.

Även servicen som har gjorts på pumpen är nödvändigtvis inte optimal, detta beror främst på att pumpen är gammal och servicemanualen som vi har fått av tillverkaren inte verkar vara kompatibel till 100 %. Tidpunkterna när mätkampanjerna gjordes kan också ha en inverkan på hur länge vi kunde uppehålla en temperatur på över 60 °C i varmvattensbehållaren. Eftersom den första mätkampanjen gjordes i oktober under en kallare period var solskenet var väldigt sällsynt, medan den andra gjordes följande maj när det var varmt, och hade en period av mycket sol. Dock med tanke på den drastiska fallet efter den första cykeln i den första mätkampanjen kan man anta att det inte har en desto större betydelse. Men vid framtida undersökningar kan det vara lämpat att ta även vädret i beaktande, och för att få det mesta ur mätkampanjerna, göra det under månaderna när solen är som starkast.

Huvudsyftet med detta arbete var att undersöka ifall man kunde utveckla en demomiljö kring adsorptionskylningen, vilket är fullt möjligt, ifall man säkerställer att adsorptionskammrarna är uppvärmda i tid och att de är evakuerade. Ifall man är intresserad av att göra längre körningar bör man reda ut orsaken till MT-kretsens tryckfall. För att underlätta datainsamlingen behövs mätaren i MT-kretsen

uppdateras till en som understöder en blandning av vatten och glykol, och se till att antingen ABB:s M-Bus kommunicerar med ABB:s i-bus program eller alternativt skapar ett eget system med hjälp av M-Bus och Raspberry Pi.

LITTERATURFÖRTECKNING

ABB, 2023. *ABB i-bus Tool*. [Online]

Hämtat från: <https://new.abb.com/low-voltage/products/building-automation/service-and-tools/engineering-tools/i-bus-tool>

[Använd 22 Maj 2023].

Agnew, B., Maidment, G. G. & Zi, Q., 2021. Solar Powered (Thermally-Driven) Cooling Systems. i: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, pp. 1-22.

Ahlgren, J., 2021. *Harjoitustyöohje adsorptiojäähdyttimen käyttämiseen*, Vasa: Vaasan Ammattikorkeakoulu.

Anyanwu, E., 2004. Review of solid adsorption solar refrigeration II:: An overview of the principles and theory. *Energy Conversion and Management*, 45(7-8), pp. 1279-1295.

Behnke, I. o.a., 2023. Towards a real-time IoT: Approaches for incoming packet processing in cyber–physical systems. *Journal of Systems Architecture*, 140(1), pp. 1-17.

Carli, R., Cavone, G., Othman, S. B. & Dotoli, M., 2020. IoT Based Architecture for Model Predictive Control of HVAC Systems in Smart Buildings. *Sensors*, 20(3), pp. 1-18.

Cleland, D., 2022. Refrigeration. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, Issue 3, pp. 381-388.

Colombo, I., 2019. *IEA Energy Efficiency*, Paris: International Institute of Refrigeration.

Dabrowski, A., 2001. Adsorption - from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, Issue 1-3, pp. 135-224.

Dias, J. M. & Costa, V. A., 2018. Adsorption heat pumps for heating applications: A review of current state, literature gaps and development challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 11.

Europeiska unionen, 2012. *Energy roadmap 2050*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Fan, Y., Luo, L. & Souyri, B., 2007. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), pp. 1758-1775.

Fernandes, M. o.a., 2014. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volym 39, pp. 102-123.

Gupta, J., Gutpa, N., Duggal, R. D. & Saxena, A., 2022. An Introduction to IoT Based Sustainable Road Safety and Underlying Sensor Technology. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 1(40), pp. 1-16.

Javanmardi, S. o.a., 2023. An SDN perspective IoT-Fog security: A survey. *Computer Networks*, 1(229), pp. 1-19.

Kalogirou, S. A. & Florides, G. A., 2022. Solar Space Heating and Cooling Systems. *Comprehensive Renewable Energy*, 1(3), pp. 501-531

Kamstrup, 2021. *Multical 302 Installation and User Manual*, u.o.: u.n.

Karellas, S., Roumpedakis, T. C., Tzouganatos, N. & Braimakis, K., 2019. *Solar Cooling Technologies*. 1 red. Boca Raton: CRC Press.

M-Bus, 2020. *The M-Bus: An Overview*. [Online]
Hämtat från: <https://m-bus.com/overview>
[Använd 21 May 2023].

Miljöministeriet, 2021. *Statsrådet*. [Online]
Hämtat från: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/oljylammityksesta-luopumisen-ohjelmaluonnos-lausunnoille-kieltojen-sijaan-edetaan-kannustein?languageId=sv> SE

Mudaliar, M. D. & Sivakumar, N., 2020. IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi. *Internet of Things*, 1(12), pp. 1-20.

Novia, 2022. *Energilagring i vårt koldioxidsnåla samhälle (Energilagring)*. [Online]
Hämtat från: <https://www.novia.fi/fui/vara-projekt/energilagring-energilagring-i-vart-framtida-koldioxidsnala-samhalle>
[Använd 5 Juni 2023].

Núñez, T., Mittelbach, W. & Henning, H.-M., 2007. Development of an adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications. *Applied Thermal Engineering*, Issue 27, pp. 2205-2212.

SorTech AG, 2010. *ACS 08 / ACS15 Design Manual*, u.o.: u.n.

Sumathy, K., Yeung, K. H. & Yong, L., 2003. Technology development in the solar adsorption refrigeration systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volym 29, pp. 302-327.

Technobotnia, 2022. *About Technobotnia*. [Online]
Hämtat från: <https://www.technobotnia.fi/technical-collaboration/about-technobotnia/>
[Använd 15 10 2022].

Ullah, K. o.a., 2013. A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(1), pp. 499-513.

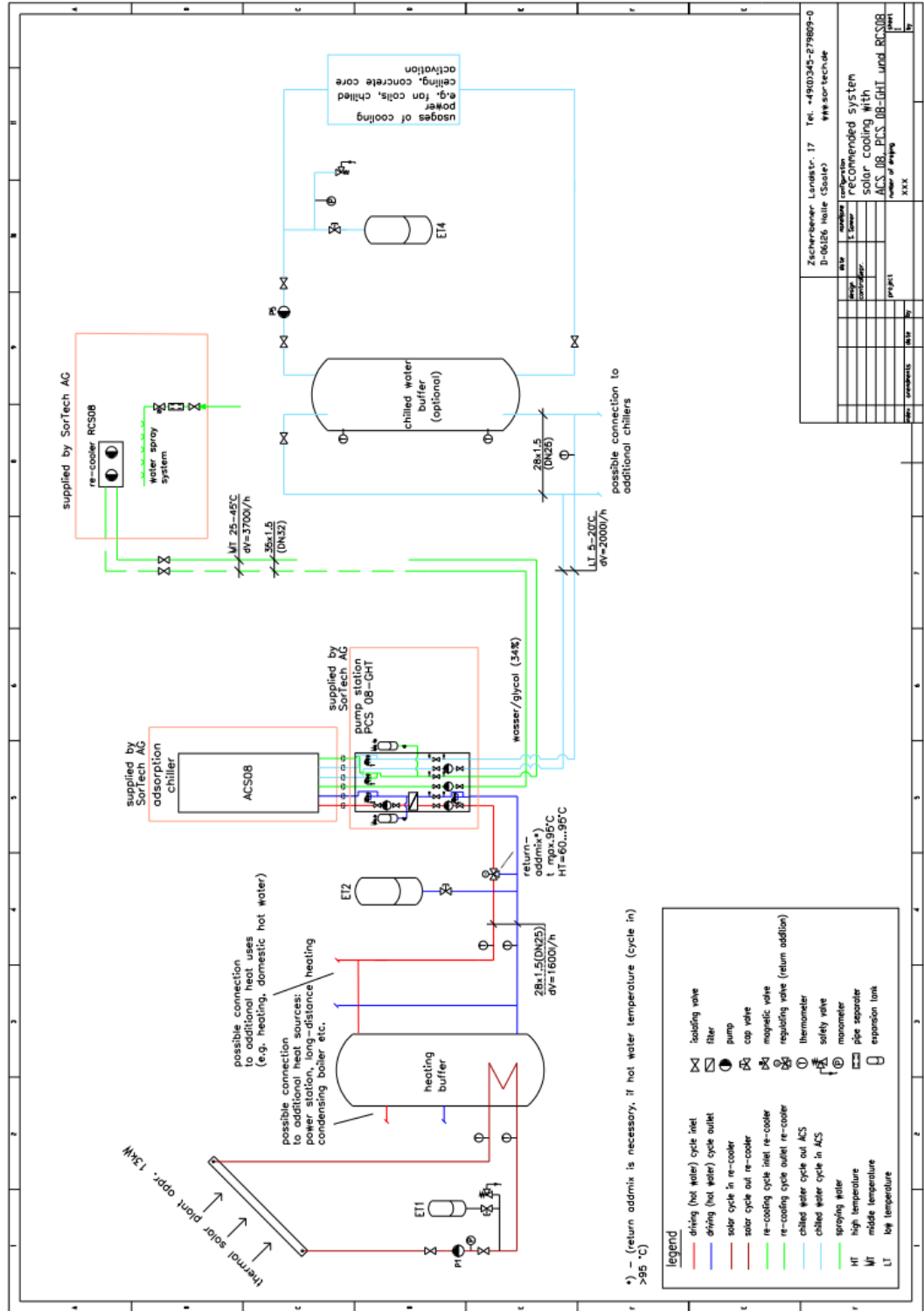
Wang, D. o.a., 2010. A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volym 14, pp. 344-353.

Wang, L., Wang, R. & Oliveira, R., 2009. A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renew Sustain Energy*, 13(3), pp. 518-534.

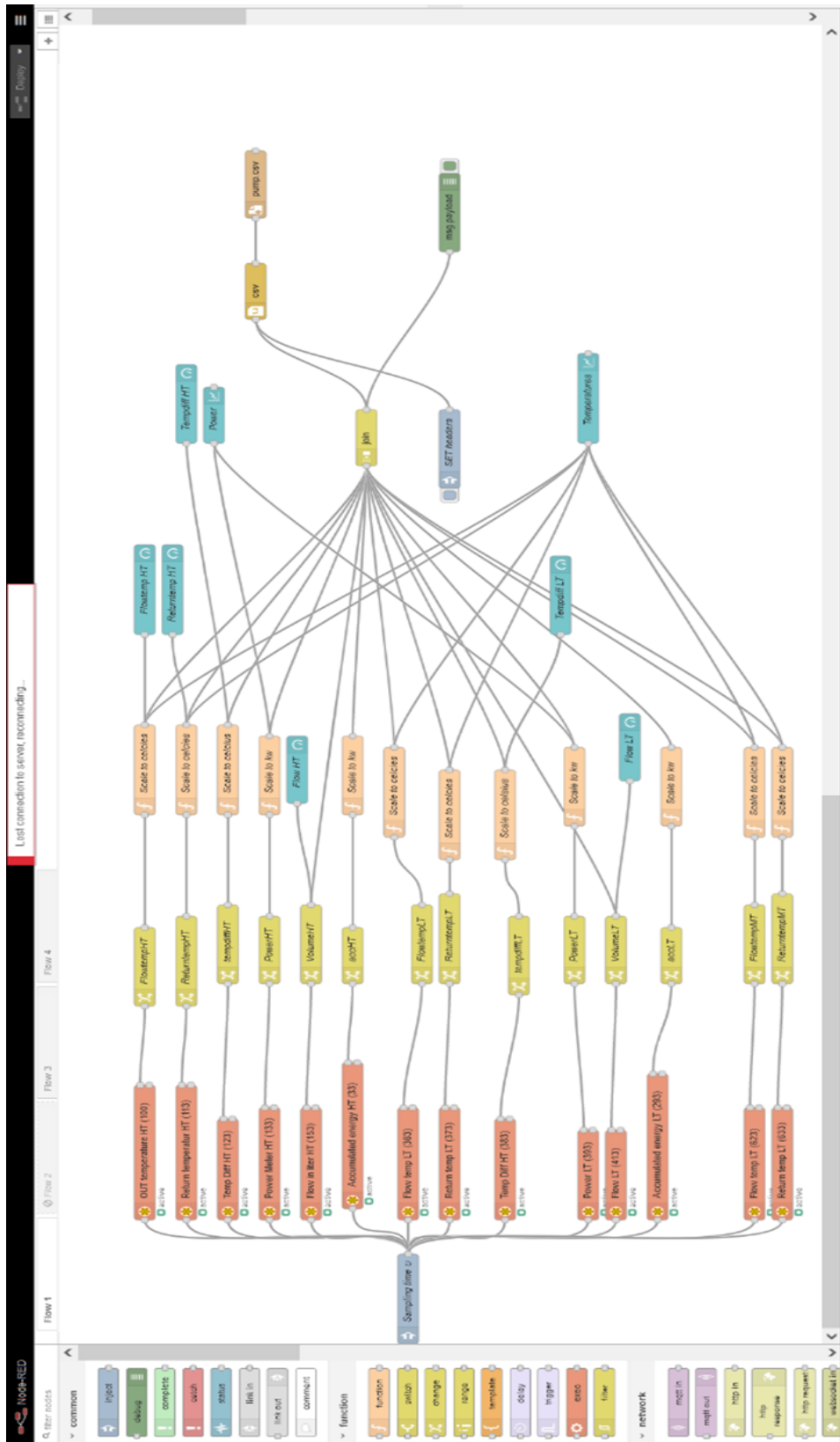
Yu, N., Wang, R. & Wang, L., 2013. Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volym 39, pp. 489-514.

BILAGOR

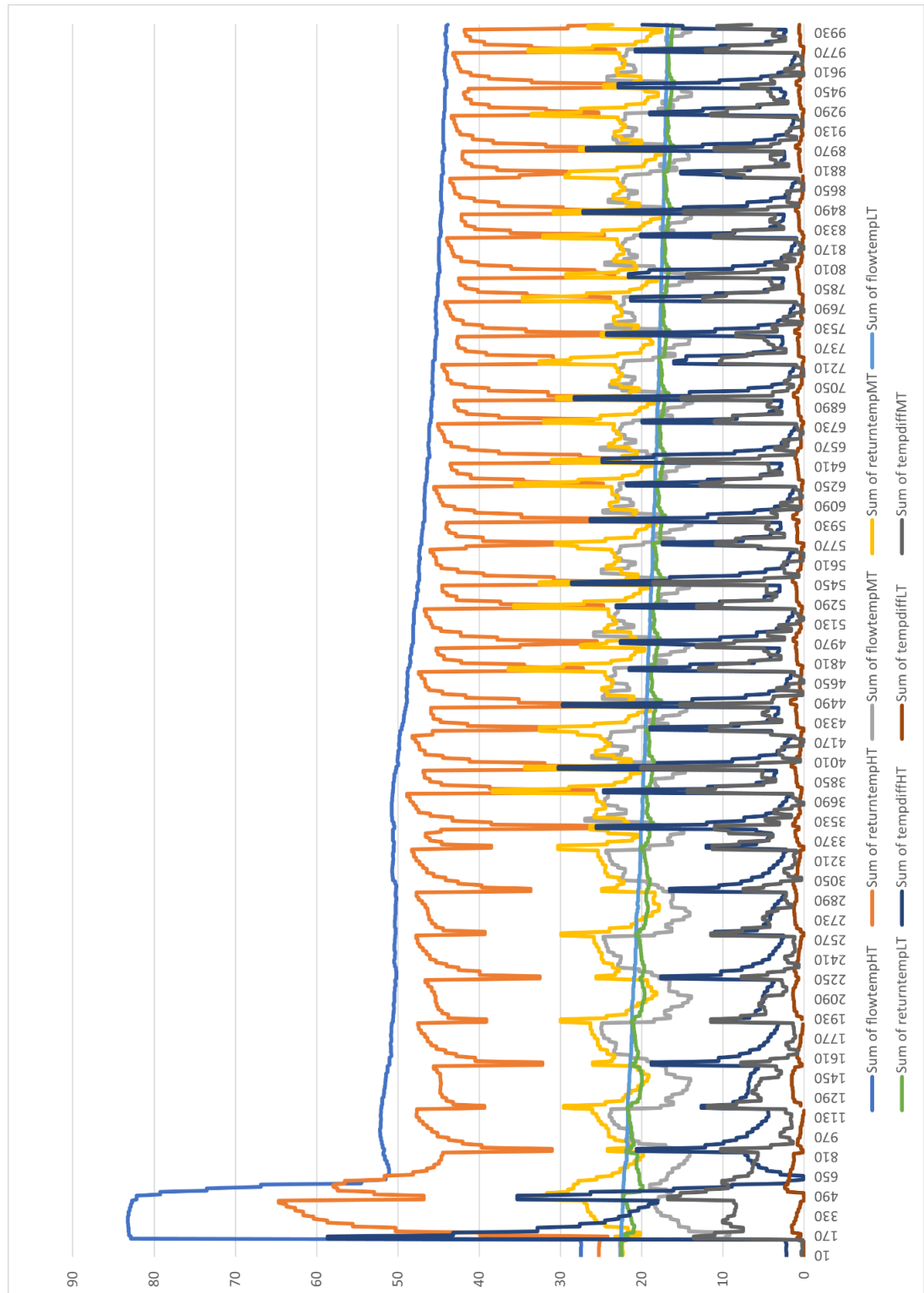
Bilaga 1: Rekommenderat system för ACS08



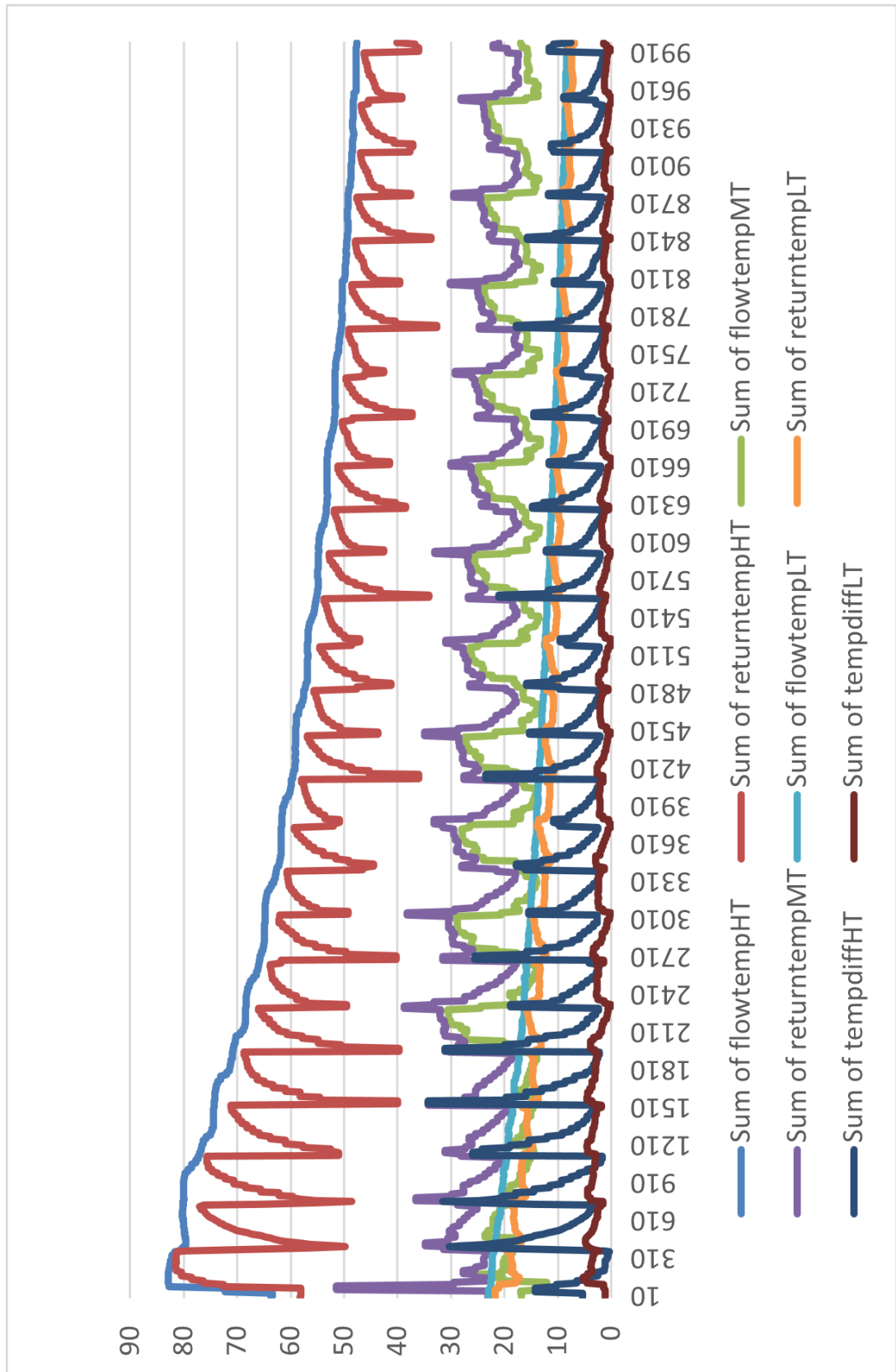
Bilaga 2: Överblick av Anybus flödesdiagram för datainsamlingen



Bilaga 3: Graf över första mätkampanjen



Bilaga 4: Graf över den andra mätkampanjen



Bilaga 5: Faserna och cyklerna samt värmeeffekt och kyleffekt under de första 5000 sekunderna i mätkampanj 2

