



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mikael Tapanainen

ADSORPTIOJÄÄHDYTTIMEN TUTKI-
MINEN JA KÄYTTÖÖNOTTO
OPETUKSEEN

Tekniikka
2016

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Mikael Tapanainen
Opinnäytetyön nimi	Adsorptiojäähdyttimen tutkiminen ja käyttöönotto opetukseen
Vuosi	2016
Kieli	suomi
Sivumäärä	37+12 liitettä
Ohjaaja	Jukka Hautala

Vaasan ammattikorkeakoulun Technobothnian laboratorioon oli ostettu vuonna 2012 adsorptiojäähdytin, joka jostain syystä asennettiin paikoilleen vasta kesällä 2015, mutta ei ollut vielä otettu käyttöön. Opinnäytetyön tarkoitus oli laitteiston käyttöönotto tulevia opiskelijoita varten.

Opinnäytetyössä on perehdytty adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaatteeseen ja laadittu tulevia energiatekniikan oppilaita varten laboratoriotyö harjoitus, jonka oppilaat suorittavat jäähdytintä hyväksi käyttäen.

Jo opinnäytetyön alkuvaiheessa havaittiin laitteiston sopimattomuus sellaisenaan opetuskäyttöön ja järjestelmään täytyi tehdä muutoksia, jotta se soveltuisi opetuskäyttöön. Osasta suunnitelluista muutoksista jouduttiin kuitenkin luopumaan kiireellisen aikataulun takia, joten tässä työssä annetaan myös muutosehdotuksia, mitkä voitaisiin toteuttaa tulevaisuudessa.

ABSTRACT

Author	Mikael Tapanainen
Title	Examination and Commissioning of the Adsorption Chiller for Educational Use
Year	2016
Language	Finnish
Pages	37+12 Appendices
Name of Supervisor	Jukka Hautala

VAMK, Vaasa University of Applied Sciences purchased an adsorption chiller to their Technobothnia laboratory in 2012, but it was not installed until summer 2015 and was not taken into use yet. The purpose of the thesis was to do the commissioning of the chiller for upcoming students.

This thesis includes a study of the operating principle of the adsorption chiller and designed laboratory exercise for future energy technology students that the students will complete by using the chiller.

Already at the early stages of the thesis work it was found out that the equipment was unsuitable for educational use and some changes had to be made to make the chiller usable for educational use. However, some parts of the planned changes had to be abandoned due to the tight schedule so this thesis contains also amendments which hopefully could be implemented in the future.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	LÄMPÖENERGIALLA TOIMIVA ILMASTOINTI.....	9
	2.1 Absorptio.....	9
	2.2 Adsorptio.....	9
	2.3 Desorptio.....	9
	2.4 Silikageeli-vesi pari	10
3	LÄMPÖENERGIANLÄHTEET.....	11
	3.1 Kaukolämpö.....	11
	3.2 Hukkalämpö.....	11
	3.3 Aurinkolämpö	12
4	ADSORPTIOJÄÄHDYTIN	13
	4.1 Adsorptiojäähdytinjärjestelmän osat.....	13
	4.1.1 Jäähdytinsyksikkö.....	14
	4.1.2 Pumppuyksikkö.....	15
	4.1.3 Lämmönlähde.....	16
	4.1.4 Lämminvesivaraaja	16
	4.1.5 Kylmävesivaraaja	17
	4.1.6 Sisäyksikkö (puhallin).....	18
	4.1.7 Välijäähdytys.....	18
	4.2 Toimintaperiaate	19
	4.3 Lämpökerroin (COP)	22
5	TECHNOBOTNIAN ADSORPTIOJÄÄHDYTIN.....	24
	5.1 Pohdittuja muutosehdotuksia	24
	5.1.1 Sähkövastuksen lisääminen lämminvesivaraajaan.....	25
	5.1.2 Lämminvesivaraajan pienentäminen ja vastuksen lisääminen....	25
	5.1.3 Lämminvesivaraajan kytkeminen kaukolämpöverkkoon	26
	5.1.4 Varsinainen muutosehdotus	26

5.2	Toteutetut muutokset	27
5.3	Jäähdyttimen huolto	28
6	LABORATORIOTYÖ OPISKELIJOILLE	29
6.1	Alkuperäinen suunnitelma	29
6.1.1	Esitehtävä	30
6.1.2	Laboratoriotyö.....	30
6.2	Toteutunut laboratoriotehtävä opiskelijoille	33
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	34
7.1	Ongelmat.....	34
7.2	Lopputulokset	35
	LÄHTEET.....	36

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Silikageelillä pinnoitettua kennostoa.	10
Kuvio 2. Adsorptiojäähdytinjärjestelmän osat.	13
Kuvio 3. Veden faasidiagrammi.	14
Kuvio 4. Sortech ACS08 asennettuna.	15
Kuvio 5. Sortech-pumppuyksikkö.	15
Kuvio 5. Tyhjiöputkikeräimet Technobothnian katolla.	16
Kuvio 7. 400L Akvaterm-lämminvesivaraaja Technobothnialla.	17
Kuvio 8. 750L Akvaterm-vesivaraaja Technobothnialla.	17
Kuvio 9. Jäähdytyskasetti.	18
Kuvio 10. Sortech RCS recoolier.	19
Kuvio 11. Välijäähdytyspiirin jäähdytystehon tarve.	19
Kuvio 12. Kaikki neljä vaihetta yksinkertaistettuna.	20
Kuvio 13. Kierron vaihe 1.	21
Kuvio 14. Kierron vaihe 3.	22
Kuvio 15. Jäähdyttimen eri vesipiirien tehokäyrät ajan funktiona.	30
Kuvio 16. Automaattisuntin toiminta ja kytkemisaikka.	31
Taulukko 1. Kuvitteelliset mitatut ja lasketut arvot.	32

LIITELUETTELO

LIITE 1. Laboratoriotyöohje suomeksi

LIITE 2. Vastaukset tehtäviin

LIITE 3. Laboratoriotyöohje englanniksi

LIITE 4. Jäähdyttimen manuaalista sivuja laboratoriotyötä varten

LIITE 5. Laitteiston PI-kaavio

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoululle ja työssä oli tarkoituksena ottaa opetuskäyttöön koulun Technobothnian laboratorio tiloihin vuonna 2012 ostettu ja vuoden 2015 kesänä asennettu adsorptiojäähdytin. Laitteisto on täysin asennettu, mutta sen varsinainen käyttöönotto on jostain syystä jäänyt tekemättä.

Työssä tutustutaan adsorptioon fysikaalisena ilmiönä ja kuinka sitä hyödyntäen voidaan auringon lämpöenergiaa muuttaa tilojen jäähdyttämiseen. Järjestelmän käyttöenergiaksi on Technobothnian katolle asennettu aurinkokeräinjärjestelmä, joka on toteutettu käyttämällä 120 tyhjiöputkea. Aurinkokeräinten ongelmaksi muodostuu opetuskäytössä vuodenaikat ja Suomen sijainti maapallolla. Suomessa aurinkokeräimille riittää aurinkoa riittävästi vain maaliskuun ja lokakuun välisellä ajalla, jolloin koulussa ei paljoa opetusta ole. Myös pilvinen sää haittaisi opetuskäyttöä vaikka aurinkoa muuten riittävästi olisikin. Opetuskäyttöön adsorptiojäähdyttimen ottaminen vaati jonkinlaisia muutoksia järjestelmään esimerkiksi sähkövastusten lisäämistä lämminvesivaraajaan, jotta laitetta voidaan käyttää opetuksessa hyödyksi talviaikaan.

Opinnäytetyön päätehtävä oli kehittää tuleville energiatekniikan opiskelijoille laboratorioharjoitustyö adsorptiojäähdytintä hyväksikäyttäen. Laboratorio työharjoitus sisältää itse laboratoriossa tehtävän työn ja lisätehtäviä raporttia varten.

2 LÄMPÖENERGIALLA TOIMIVA ILMASTOINTI

Lämmöllä toimiva ilmastointi saattaa maallikolle kuulostaa oudolta ja järjenvastaiselta, mutta sellainen on mahdollista toteuttaa joko absorptiota tai adsorptiota ja niiden vastakohtaista ilmiötä, desorptiota, apuna käyttäen. Molemmat absorptio ja adsorptio ovat lämpöä vapauttavia eli eksoterminen ilmiötä ja vastaavasti desorptio on lämpöä sitova eli endoterminen ilmiö. Tässä opinnäytetyössä keskitytään adsorptiolla toimivaan jäähdyttimeen ja kuinka adsorptiota voidaan käyttää hyödyksi veden jäähdyttämiseen, mutta esitellään myös absorptio ilmiönä.

2.1 Absorptio

Absorptiolla tarkoitetaan fysikaalista tai kemiallista ilmiötä, jossa molekyylit tai atomit pidättäytyvät nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen eli adsorbenttiin. Molekyylin tai atomin pidättäytyessä adsorbenttiin se luovuttaa energiaa adsorbenttiin lämmittäen sitä ja vastaavasti sitoo lämpöä adsorbentista desorptoituaan. /1/

2.2 Adsorptio

Adsorptio on fysikaalinen ilmiö jossa, kaasumainen aine sitoutuu jonkin kiinteänä olevan aineen, adsorbentin, pintaan muodostaen siihen kalvon. Esimerkiksi vesihöyrystä vesimolekyylit sitoutuvat silikageelin pintaan sen mikroskooppisiin huokosiin samalla hidastaen niiden liikettä, jolloin niiden liike-energia muuttuu lämpöenergiaksi lämmittäen silikageeliä. Adsorbenttina jäähdytyslaitteistoissa toimii joko zeoliitti tai silikageeli johon adsorbaatti, vesi, sitoutuu. /1/

2.3 Desorptio

Desorptio on vastakohta absorptiolle ja adsorptiolle. Desorptio vaatii ulkopuolista lämpöenergiaa adsorbenttina olevaan aineeseen, jotta se siihen sitoutunut molekyyli voi irrota. Esimerkiksi silikageeliin adsorptoituneet vesimolekyylit desorptoituvat aineen pinnalta sitoen se samalla itseensä energiaa, kun silikageeliä lämmitetään tarpeeksi korkeaan lämpötilaan. /1/

2.4 Silikageeli-vesi pari

Silikageeli (kuvio 1) on piidioksidia (SiO_2), joka on geeli-nimestään huolimatta kiinteää ja kovaa ainetta. Yleisesti silikageeliä käytetään kosteuden poistajana esimerkiksi kenkälaatikoissa, joissa silikageelirakeita on pakattu pieniin paperipusseihin. Silikageelillä on suuri ominaispinta-ala jopa $800 \text{ m}^2/\text{g}$, joka mahdollistaa suhteellisesti suuren määrän vettä sitoutua sen pintaan. Silikageeli pystyy sitomaan noin 40 % vettä sen omasta painostaan.

Kun silikageelin pinta on kyllästynyt vedellä, niin se voidaan uudelleen aktivoida eli regeneroida lämmittämällä sitä $120 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa noin 2 tuntia, jolloin siihen sitoutunut vesi höyrystyy pois ja silikageeli pystyy taas adsorboimaan itseensä vesimolekyylejä. Adsorptiojähdyttimissä regenerointi voidaan tehdä huomattavasti alemmassa lämpötilassa ja nopeammin johtuen lähes tyhjiöön alipaineistetuista kammioista, missä silikageeli sijaitsee. Tästä lämpötilasta muodostuukin alin adsorptiojähdyttimeen vaatima lämmönlähteen tuottama lämpötila, jonka jäähdytin vaatii toimiakseen. /2/



Kuvio 1. Silikageelillä pinnoitettua kennostoa. /3/

3 LÄMPÖENERGIANLÄHTEET

Adsorptiojäähdyttimen lämmönlähteenä voidaan käyttää periaatteessa mitä vain lämmönlähdettä, millä pystytään tuottamaan yli 55 °C:sta vettä. Taloudellisesti ei ole kuitenkaan kannattavaa esimerkiksi sähköllä lämmittää ensin vettä ja käyttää sitä adsorptiojäähdyttimen lämmönlähteenä. Suoraan sähköllä saadaan huomattavasti parempi hyötysuhde käyttämällä perinteisiä kompressioon perustuvia ilmastointilaitteita.

Adsorptiojäähdyttimen lämmönlähteenä siis tulisi käyttää jotain semmoista lämmönlähdettä jonka tuotantokustannukset olisivat mahdollisimman pienet, käytännössä tarkoittaen kaukolämpöä, teollisuuden hukkalämpöä tai auringon lämpöenergiaa.

3.1 Kaukolämpö

Kaukolämpöä tuotetaan lämmön ja sähkönyhteistuotantolaitoksissa tai lämpökeskuksissa. Kaukolämpö toimitetaan asiakkaille kaukolämpöverkossa kiertävän kuuman veden avulla. Kaukolämpöä ensisijaisesti käytetään kiinteistöjen lämmitykseen, mutta kaukolämpöveden lämpötila joka Suomessa on talviaikaan vähän yli 100 °C:sta ja kesäaikaan noin 70 °C:sta sopii erinomaisesti lähes suoraan käytettäväksi adsorptiojäähdyttimen lämmönlähteeksi. Kaukolämmön hinta kesäaikaan jolloin jäähdytystä tarvitaan enemmän, on varsin edullinen verrattuna sähkönhintaan. /4/

3.2 Hukkalämpö

Teollisuuden prosesseissa sivutuotteena usein syntyy lämpöenergiaa. Suuri osa tästä hukkalämmöstä on kuitenkin lämpötilaltaan alle 55 °C ja ei suoraan sovellu adsorptiojäähdyttimien energian lähteeksi. Se osa hukkalämmöstä joka ylittää 55 °C:tta sopii mainiosti adsorptiojäähdyttimen energian lähteeksi. Sitä voidaan käyttää veden lämmittämiseksi adsorptiojäähdytintä varten ja se on käytännössä ilmainen energianlähde, joka voidaan ottaa hyötykäyttöön. /5/

3.3 Aurinkolämpö

Aurinkolämmityksessä voidaan käyttää erilaisia aurinkokeräimiä auringonlämpöenergian talteen ottoon. Lämpöenergia voidaan käyttää lämminvesivaraajan veden lämmittämiseen, mistä sitä voidaan käyttää normaalisti lämpimänä käyttövetenä, mutta jäähdytyksen ollessa kyseessä lämmin vesi käytetään kylmän veden tuottamiseen absorptio- tai adsorptiojäähdytintä käyttäen.

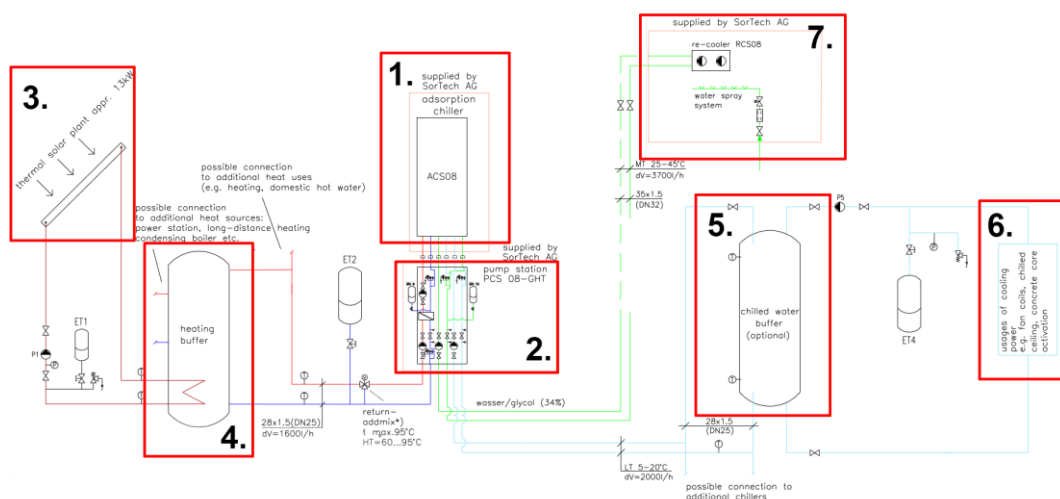
Aurinkokeräinten asennuksen jälkeen niistä saatava lämpöenergia on käytännössä ilmaista ja esimerkiksi tyhjiöputkikeräimet on suunniteltu kestäväksi noin 25 vuotta, eikä niiden hyötysuhdekaan laske vuosien saatossa kuin hieman. /6/

4 ADSORPTIOJÄÄHDYTIMIN

Ensimmäiset kaupalliset adsorptiojäähdyttimet kehitettiin 1970-luvulla, mutta tekniikan kehittyessä vasta viime vuosina ne ovat tulleet voimakkaammin markkinoille. Adsorptiojäähdytymiä löytyy kylmäteholtaan alle 10 kW kokoluokasta aina muutaman sadan kilowatin teho luokkaan. Verrattuna perinteisiin kompressiojäähdyttimiin adsorptiojäähdyttimien etuina on hiljaisuus, huoltovapaus, ympäristöystävällisyys ja niiden sähkönkulutus on vain murto-osan kompressiojäähdyttimiin verrattuna. Haittapuoliksi voidaan katsoa suuri fyysinen koko, heikko lämpökerroin ja laitteiston kallis hinta. /7/

4.1 Adsorptiojäähdytinjärjestelmän osat

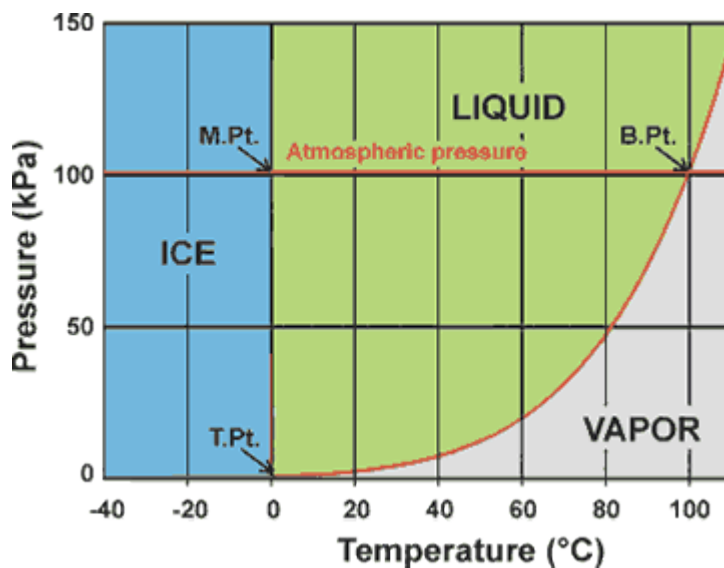
Adsorptiojäähdytysjärjestelmä koostuu monesta osasta jotka ovat kytkettynä toisiinsa. Pääkomponenttina toimii itse jäähdytinsyksikkö ja siihen liitetty pumppu-asema joka hoitaa eri nestepiirien vesien kierrätyksen jäähdytinsyksikön sisään ja ulos. Kuvassa 2 näkyy yksikön eri osat ja kuinka ne on kytketty toisiinsa. Seuraavissa alakappaleissa käydään kuvaan merkityt osat läpi yksitellen. Alakappaleiden numerointi vastaa kuvassa olevaa numerointia.



Kuvio 2. Adsorptiojäähdytinjärjestelmän osat. /8/

4.1.1 Jäähdytysyksikkö

Jäähdytysyksikkö (kuvio 4) on järjestelmän osa missä itse jäähdytys prosessi tapahtuu. Yksikön sisällä on lähes tyhjiöön alipaineistettu neljäosainen säiliö. Säiliössä on neljä toisistaan venttiileillä erotettua kammiota, joista kaksi ovat identtisiä ja sisältävät silikageelillä pinnoitettuja kennostoja (kuvio 1), joissa lauhdutus ja käyttövesi pääsevät kiertämään. Silikageelikammiot on yhdistetty läppäventtiileillä niiden yläpuolella olevaan lauhdutuskammioon. Lauhdutuskammiossa on lauhdutus kierukka jonka sisällä välijäähdytyspiirin lauhdutusvesi kiertää. Lauhdutuskammio on kytketty venttiilillä silikageelikammioiden alapuolella olevaan höyrystinkammioon, jossa alipaineessa oleva vesi pääsee höyrystymään (kuvio 3) ja sitomaan lämpöä itseensä jäähdytys kierukasta. Jäähdytysyksikkö itsessään ei kuluta juurikaan sähköä, vaan toimii muutaman watin ohjaus teholla, jolla ohjataan venttiilien toimintaa. /9/



Kuvio 3. Veden faasidiagrammi. /10/



Kuvio 4. Sortech ACS08 asennettuna. /11/

4.1.2 Pumppuyksikkö

Pumppuyksikkö(kuvio 6) on jäähdytinsyksikön viereen asennettu kolmen pumpun yksikkö. Pumppuyksikkö hoitaa kolmen erillisen vesipiirin veden kierrätyksen. Kuuman ajoveden, kylmän jäähdytettävän veden ja välijäähdytys veden kierrättämisen. Kiertovesipumput kuluttavat noin puolet adsorptiojäähdytysjärjestelmän kuluttamasta sähköenergiasta.



Kuvio 5. Sortech-pumppuyksikkö. /12/

4.1.3 Lämmönlähde

Adsorptiojäähdytin tarvitsee 55 – 95 °C asteista vettä käyttöenergiäkseen. Tapa jolla lämminvesi tuotetaan, ei ole jäähdyttimen toiminnan kannalta merkityksellistä. Jäähdyttimen taloudellisen käytön kannalta lämpöenergian täytyisi olla mahdollisimman halpaa, ellei jopa ilmaista.



Kuvio 6. Tyhjiöputkikeräimet Technobothnian katolla.

4.1.4 Lämminvesivaraaja

Lämminvesivaraaja (kuvio 7) toimii puskurina ja varastoi lämmönlähteestä tulevaa lämpöenergiaa. Kuuma vesi lämminvesivaraajasta ajetaan pumppuyksikön kautta itse jäähdytyslaitteelle. Lämminvesi varaajan koko riippuu siitä, kuinka tehokas jäähdytysyksikkö on kyseessä ja minkä tyyppistä lämpöenergian lähdettä käytetään.



Kuvio 7. 400 L Akvaterm-lämminvesivaraaja Technobothnialla.

4.1.5 Kylmävesivaraaja

Kylmävesivaraajaan (kuvio 8) jäähdytin jäähdyttää ja varastoi jäähdytettyä vettä. Varaaja toimii puskurina, josta kylmää vettä voidaan käyttää ilman tai prosessien jäähdyttämiseen tarvittaessa. Järjestelmän toimimisen kannalta kylmävesivaraaja ei ole pakollinen, mutta jatkuvan jäähdytysilman takaamiseksi kylmävesivaraaja on oltava.



Kuvio 8. 750 L Akvaterm-vesivaraaja Technobothnialla.

4.1.6 Sisäyksikkö (puhallin)

Sisäyksikkö (kuvio 11) on puhallin, jolla kylmävesivaraajassa olevaa kylmää vettä käytetään hyväksi huoneilman jäähdyttämiseen. Sisäyksikön lauhduttimeen syötetään kylmää vettä kylmävesivaraajasta, jonka läpi puhallin puhaltaa ilman ja ilma viilenee sen luovuttaessa lämpöä lauhduttimeen.



Kuvio 9. Jäähdytyskasetti. /15/

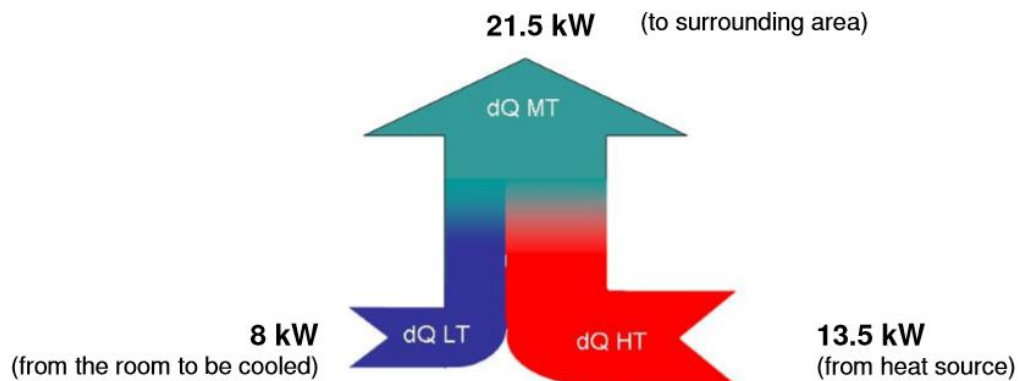
4.1.7 Välijäähdytys

Välijäähdytyspiirin tarkoitus on adsorptiojäähdyttimen höyrystimessä olevan vesihöyryn lauhduttaminen takaisin nestemäiseksi vedeksi, jotta sitä voidaan ohjata kiertoprosessissa takaisin höyrystimeen, sekä viilentää samanaikaisesti toista adsorptiokammiota joka on adsorbointi vaiheessa, jotta kammiossa oleva silikageeli pystyy sitomaan mahdollisimman suuren määrän vettä itseensä.

Adsorptiojäähdytin tarvitsee tehokkaan välijäähdytyksen, sillä se joutuu siirtämään ulos kuumavesivaraajasta jäähdyttimeen tuodun lämpöenergian, sekä jäähdyttimen jäähdytettävästä vedestä itseensä sitoneen lämpöenergian (kuvio 11). Lauhduttimen (kuvio 10) toimintaa voidaan tehostaa lisäämällä ulkoyksikköön sprinkleri, joka suihkuttaa vettä lauhduttimen jäähdytysäleikköön. Veden haihtuessa ulkoilmaan sitoo se lämpöenergiaa jäähdytysäleiköstä jäähdyttäen sitä tehokkaasti. Mitä viileämpänä välijäähdytyspiiri vesi pysyy sitä tehokkaammin jäähdytin voi toimia. Jäähdytin vaatii välijäähdytyspiirin toiminta lämpötilaksi 25 – 40 °C:sta.



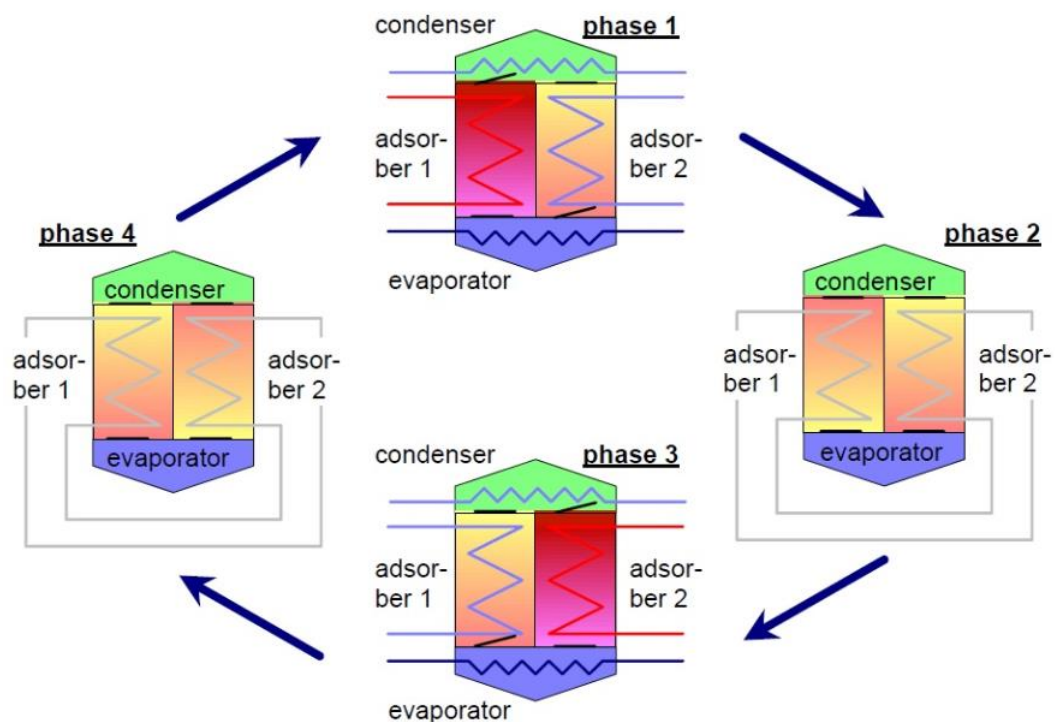
Kuvio 10. Sortech RCS re-cooler. /13/



Kuvio 11. Välijäähdytyspiirin jäähdytystehon tarve. /14/

4.2 Toimintaperiaate

Neljä prosessisäiliötä on yhdistetty toisiinsa sisäisillä automaattisesti toimivilla läp-päventtiileillä. Nämä venttiilit hoitavat virtaussuunnan höyrystyvälle jäähdytysnes-teelle (vesi) adsorbenttikammioon 1 tai 2 (kuvio 13) ja niistä eteenpäin lauhdutti-melle, riippuen prosessin vaiheesta. Kammio on hermeettisesti suljettu ympäris-töstä ja siellä vallitsee lähes tyhjiö tila, joka mahdollistaa veden höyrystymisen al-haisessa lämpötilassa. Koko prosessi toimii neljässä eri vaiheessa. (kuvio 12) /17/

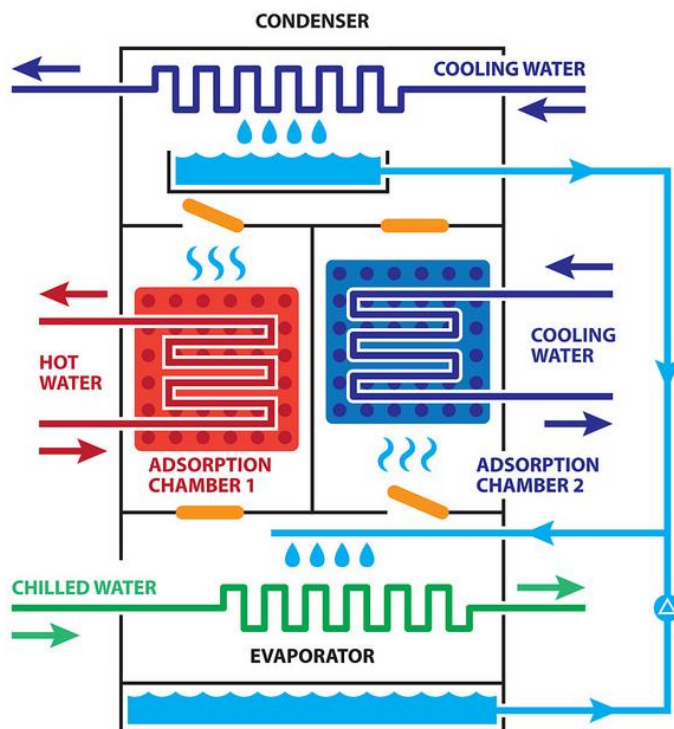


Kuvio 12. Kaikki neljä vaihetta yksinkertaistettuna. /16/

Vaihe 1. (kuvio 13)

- Kuumaa vettä syötetään adsorptiokammioon 1, jossa silikageelin pinnalle keräytynyt jäähdytysneste (vesi) höyrystyy, kammion paine kasvaa ja läp-päventtiili lauhdutuskammioon aukeaa.
- Höyry ohjautuu paine-eron johdosta lauhdutuskammioon, jossa lauhdutus-kierukassa kiertävä välijäähdytyspiirin vesi jäähdyttää höyryn ja muuttaa sen takaisin nesteeksi.
- Nesteytynyt jäähdytysneste ohjataan painovoiman vaikutuksella lauhdutti-mesta takaisin höyrystinkammioon uudelleen höyrystymistä varten.
- Samanaikaisesti kun adsorptiokammiota 1 lämmitetään, niin välijäähdytys-piiri jäähdyttää adsorptiokammiota 2, jotta se kykenee adsorptioimaan mah-dollisimman paljon jäähdytysnestettä.
- Höyrystyskammioon lauhdutuskammiosta ohjattu jäähdytysneste ruiskute-taan lämmönvaihtimeen, jossa se höyrystyy samalla kasvattaen kammion

painetta ja höyrystyessään samalla se sitoo lämpöä höyrystyskammiosta olevasta kylmävesipiiriin lämmönvaihtimesta, jähdyttäen kylmävesipiirin vettä. Höyrystynyt ja paineistunut jähdytysneste ohjautuu adsorbenttikammioon 2 paine-eron johdosta, kun läppäventtiili on auennut.



Kuvio 13. Kierron vaihe 1. /17/

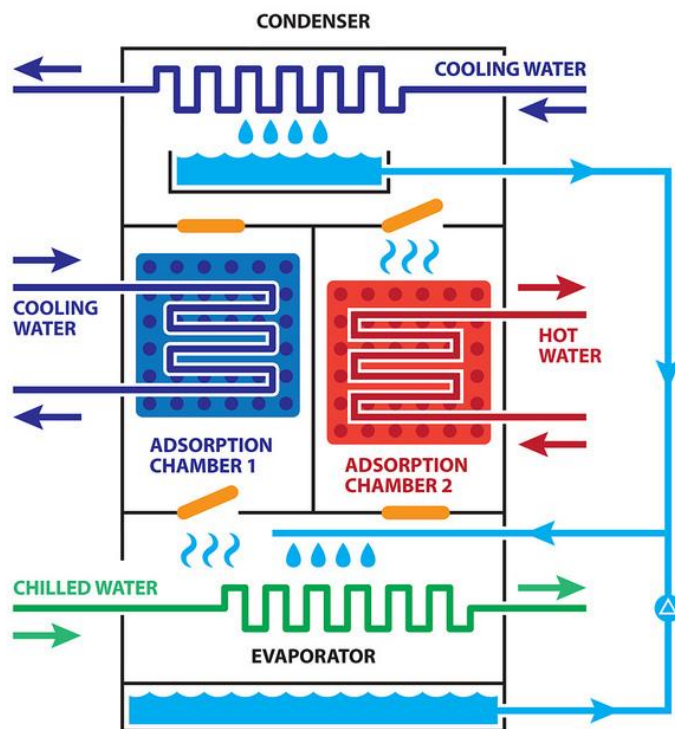
Vaihe 2.

- Hyötysuhteen parantamiseksi vaiheessa 2 kun adsorptiokammio 1 on täysin kuiva, adsorptiokammioiden vedenkierto yhdistetään, jotta kammiot pystyvät tasaamaan lämmöt lähelle toisiansa ilman ulkopuolista energiansyöttöä, koska seuraavassa vaiheessa toistetaan vaihe 1 käänteisenä.

Vaihe 3 (kuvio 14)

- Kun adsorptiokammioiden tietty lämpötila on saavutettu, kuuman veden syöttö käännetään adsorbenttikammioon 2 ja vastaavasti välijäähdytys vesi

käännettään adsorbenttikammioon 1. Lämpäventtiilit aukeavat ja sulkeutuvat päinvastaisesti kuin vaiheessa 1. Vaiheen 3 toiminta on identtinen vaiheen 1 kanssa. Kammion 2 lämmitystä jatketaan niin kauan kunnes kaikki jäähdytysneste on haihtunut sieltä pois.



Kuvio 14. Kierron vaihe 3. /17/

Vaihe 4.

- Vaihe neljä on samanlainen kuin vaihe 2 ja täyttää yhden kokonaisen kierron jossa kumpikin adsorbenttikammio on toiminut sekä adsorpoivana, että desorpoivana. Yksi täysi kierto kestää noin 15 minuuttia. /17/

4.3 Lämpökerroin (COP)

Lämpökerroin eli COP (Coefficient of Performance) ilmaisee jäähdyttimen hyötysuhteen, eli kuinka paljon jäähdytystehoa saadaan tuotettua jäähdyttimeen sisään

syötetyn tehon suhteen. Esimerkiksi ilmalämpöpumppu mikä käyttää yhden yksikön sähköä ja tuottaa sillä 3 yksikköä viilennysilmaa, niin COP arvo on tällöin 3. Perinteisissä ilmalämpöpumpuissa COP lämmityskäytössä arvot ovat tyypillisesti 2-5 riippuen pumpun tekniikasta ja toiminta olosuhteista. Jäähdytyskäytössä ne ovat noin yhden yksikön pienemmät.

$$COP_{cooling} = \frac{|Q|}{W} \text{ jossa,} \quad COP_{cooling} = \text{hyötysuhde} \quad (1)$$

Q = ulos saatu kylmäenergia

W = sisään syötetty energia

Adsorptiojäähdyttimissä lämpökertoimet on huomattavasti pienempiä kuin esimerkiksi ilmalämpöpumpuissa. Parhaimmillaan päästään 0,65 lämpökertoimiin, mutta tyypillisesti ne ovat 0,4 – 0,6 tarkoittaen, että jäähdyttimeen sisään on syötettävä noin kaksi kertaa enemmän energiaa, kuin siitä saadaan ulos jäähdytysteho.

Jos tarkastellaan pelkästään laitteistojen sähkönkulutusta, niin suurenkokoluokan adsorptiojäähdytin käyttää vain murto-osan vastaavan jäähdytystehon omaavan kompressorijäähdyttimen käyttämästä sähköenergiasta. Jos adsorptiojäähdyttimen käyttöenergia saadaan ilmaiseksi esimerkiksi teollisuuden hukkalämpönä, niin sen käyttökustannukset laskevat merkittävästi kompressorijäähdyttimiä alemmaksi.

/18/

5 TECHNOBOTHNIAN ADSORPTIOJÄÄHDYTIMIN

Vaasan ammattikorkeakoulun Technobothnian laboratorioon oli kesällä 2015 asennettu adsorptio jäähdytin seuraavanlaisella kokoonpanolla.

- SorTech AG ACS 08 -jäähdytinsyksikkö
 - nimellinen kylmäteho 8 kW (5–11 kW)
 - nimellinen käyttöteho 13,5 kW (5–25 kW) lämpötehoa
- SorTech AG PCS -pumppuasema
- Akvaterm 400 litran lämminvesivaraaja
- Akvaterm 750 litran kylmävesivaraaja
- 120 tyhjiöputken aurinkolämpökeräin järjestelmä (13,5 kW)

Adsorptiojäähdyttimen käyttövoimana toimi aurinkolämpö, joka on toteutettu Technobothnian katolle asennetuilla tyhjiöputkikeräimillä. Tyhjiöputkikeräinjärjestelmä oli kuitenkin alimitoitettu, eikä se riittänyt edes aurinkoisena kevätpäivänä tuottamaan tarpeeksi lämpöenergiaa, jotta lämminvesivaraajan lämpötila olisi saatu nostettua riittävän korkeaksi jäähdyttimen ajoa varten. Keräimet tuottivat parhaimmillaan hetkellisesti vain noin 4 kW.

Tyhjiöputkikeräimet eivät muutenkaan ole opetuskäyttöön sopivia, johtuen Suomen sijainnista maapallolla. Suomessa aurinkolämpöä tyhjiöputkikeräimille riittää vain noin 6 kk periodin aikana huhtikuusta syyskuuhun ja tästä ajasta koulussa ei ole opetusta 4 kk aikana. Myös mahdollisesti pilvinen sää tai aikainen kellonaika tekisi laboratoriotyön suorittamisen mahdottomaksi.

5.1 Pohdittuja muutosehdotuksia

Järjestelmän lämmönlähteeseen täytyi tehdä muutoksia, jotta adsorptiojäähdytintä voitaisiin käyttää opetuskäytössä ympärivuotisesti. Laitteistoon täytyy myös asentaa virtausmittareita ja mahdollisesti lisää lämpömittareita, jotta esimerkiksi jäähdyttimen suorituskerroin (COP) voidaan määrittää.

5.1.1 Sähkövastuksen lisääminen lämminvesivaraajaan

Yksi keino lämmitteä lämminvesivaraajan vettä jäähdyttimen vaatimaan minimi käyttölämpötilaan, 55 °C, on lisätä varaajaan sähkövastus. Vastuksen pitäisi olla teholtaan vähintään samaa luokkaa kuin aurinkokeräimien tuottama lämpöteho joka oli mitoitettu 13,5 kW kokoiseksi.

400 litran vesimassan lämmittäminen 1 Kelvinin asteen verran vaatii 13,5 kW aurinkokeräin systeemiltä täydellä teholla toimiessaan noin 2 minuuttia.

$$E = c \cdot m \cdot \Delta T, \text{ jossa} \quad \begin{array}{l} E = \text{lämpömäärä} \\ c = \text{ominaislämpökapasiteetti} \\ m = \text{massa} \\ \Delta T = \text{lämpötilan muutos} \end{array} \quad (2)$$

$$4,182 \text{ kJ} / (\text{K} \cdot \text{kg}) \cdot 400 \text{ kg} \cdot 1 \text{ K} = 1873 \text{ kJ}$$

Muutetaan kilojoulet kilowatti tunneiksi $1873 \text{ kJ} / 3600 \text{ s} = 0,465 \text{ kWh}$

$$\rightarrow 0,465 \text{ kWh} / 13,5 \text{ kW} = 0,0344 \text{ h} = 124 \text{ s} = 2 \text{ minuuttia } 4 \text{ sekuntia.}$$

Jos järjestelmän alkulämpötila on sama kuin huoneenlämpötila, noin 21 °C:tta, veden lämmittäminen jäähdyttimen minikäyttölämpötilaan 55 °C:een kestäisi noin 2 h 12 min 13,5 kW teholla.

$$4,182 \text{ kJ} / (\text{K} \cdot \text{kg}) \cdot 400 \text{ kg} \cdot (328 \text{ K} - 294 \text{ K}) = 56875 \text{ kJ} = 15,80 \text{ kWh} \rightarrow 15,80 \text{ kWh} / 13,5 \text{ kW} = 1,17 \text{ h} = 1 \text{ tuntia } 10 \text{ minuuttia ja } 13 \text{ sekuntia.}$$

Laskelmista voidaan todeta, että pelkkä sähkövastuksen lisääminen ei riitä jos jäähdyttimen käyttöönotto lepotilasta kestäisi yli tunnin ja lämmön säätäminenkin esimerkiksi 5 asteella laboratorio työtä tehdessä kestäisi liian kauan.

5.1.2 Lämminvesivaraajan pienentäminen ja vastuksen lisääminen

Technobothnialle asennettu 400 litran Akvatermin lämminvesivaraajan vetoisuus on liian suuri, jotta sitä voitaisiin hyödyntää järkevästi opetuskäytössä noin 2 tunnin mittaisen laboratorio harjoituksen aikana. 400 litran vesimassan lämmittäminen kestää liian kauan.

Lämminvesivaraaja pitäisi vaihtaa huomattavasti pienempään, jotta lämmitysaikoja saataisiin järjeistettyä opetuskäyttöön. Akvatermin malliston pienimmän, 280 litran, lämpövesivaraajan johon on mahdollista kytkeä esimerkiksi 10 kW sähkövastus vastaavat lämmitys ajat olisivat yhdelle Kelvin asteelle noin 2 minuuttia ja 55 °C:een käyttölämpötilaan lämmön nostaminen 21 °C:sta noin 1 tunnin ja 6 minuuttia.

$$4,182 \text{ kJ} / (\text{K} * \text{kg}) * 280 \text{ kg} * 1 \text{ K} = 1171 \text{ kJ} = 0,325 \text{ kWh}$$

$$\rightarrow 0,325 \text{ kWh} / 10 \text{ kW} = 0,0325 \text{ h} = 117 \text{ s} = 1 \text{ minuutti } 57 \text{ sekuntia.}$$

$$4,182 \text{ kJ} / (\text{K} * \text{kg}) * 280 \text{ kg} * (328 \text{ K} - 294 \text{ K}) = 39812 \text{ kJ} = 11,06 \text{ kWh}$$

$$\rightarrow 11,06 \text{ kWh} / 10 \text{ kW} = 1,106 \text{ h} = 1 \text{ tunti } 6 \text{ minuuttia ja } 21 \text{ sekuntia}$$

On myös huomattava, että laskuissa ei ole oletettu huomioon varaajan lämpöhäviöitä, eli kaikki lämmitykseen käytetty energia on oletettu jäävän lämmitettävään veteen. Todellisuudessa osa varsinkin pidemmän lämmitysjakson aikana karkaa lämminvesivaraajasta lämpönä sitä ympäröivään ilmaan. /19/

5.1.3 Lämminvesivaraajan kytkeminen kaukolämpöverkkoon

Yksi vaihtoehto on kytkeä lämminvesivaraaja kaukolämpöverkkoon aurinkokeräinten tilalle. Kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan, ja se on kesällä tyypillisesti noin 70 °C:sta ja talvella kovimpien pakkasten aikaan noin 100 °C. Lämpötilat olisivat optimaalisia adsorptiojäähdyttimen käyttöön, koska kyseisillä lämpötiloilla jäähdytintä voidaan käyttää suoraan ilman sähkövastustakin.

5.1.4 Varsinainen muutosehdotus

Kytetään lämminvesivaraajaa 10 kW (vähintään) sähkövastus. Varaajan vettä voidaan ylläpitää 55 °C:ssa sähkövastuksella kohtuullisen pienin kustannuksin, jolloin jäähdytin pysyy jatkuvasti toimintavalmiudessa.

Kyseisellä ratkaisulla veden lämpöä pystyisi nostamaan riittävän nopeasti esimerkiksi 75 °C:een viiden Celsius asteen välein, tehden välillä mittauksia. Viiden asteen lämpötilan nosto kyseisillä laitteilla kestäisi noin 13 minuuttia. Jos mittausta suoritettaisiin viiden minuutin ajan, ehtisi kahden tunnin laboratorio harjoituksen aikana tehdä noin viisi eri mittausta.

COP- arvon määrittämiseen tarvitsee mitata kuumen käyttöveden sisäänmeno lämpötila, tilavuusvirta sekä paluueden lämpötila. Myös jäähdytettävän veden sisään ja ulosmenevän veden lämpötila, sekä tilavuus virta on pystyttävä mittaamaan. Laitteistossa on jo valmiiksi asennettuna analogisia lämpötilamittareita, mutta tilavuusvirtamittarit puuttuvat.

Laitteistoon pitäisi asentaa kaksi energiamittaria. Ensimmäinen mittari lämpövesivaraajan lähtöputkeen minkä kautta vesi ajetaan jäähdyttimen läpi ja toinen mittari täytyy asentaa jäähdytettävän veden sisäänmenoputkeen. Mittareiden avulla voitaisiin mitata laitteen kuluttamaa lämpöenergiaa ja kuinka paljon laite pystyy tuottamaan kylmäenergiaa kyseisellä lämpöenergialla.

Stabiilin käyttöveden lämpötilan saamiseksi järjestelmään pitäisi asentaa automaatti suntti, joka automaattisesti säätäisi jäähdyttimelle menevän veden lämpötilan sekoittamalla lämminvesivaraajasta lähtevää vettä ja jäähdyttimestä takaisin paalaavaa vettä sopivassa suhteessa päästäkseen säädettyyn lämpötilaan.

5.2 Toteutetut muutokset

Lämminvesivaraajan kytkeminen kaukolämpöön hylättiin kalliiden putkiasennusten johdosta, koska olisi jouduttu vetämään kokonaan uudet putket Technobothnian kaukolämmön lämmönvaihtimesta jäähdyttimelle. Myös energiamittareiden ja automaattisuntin lisäys siirrettiin mahdollisesti tulevaisuuteen venyneen aikataulun johdosta.

Projektissa päädyttiin lisäämään vanhaan jo olemassa olevaan 400 litran lämminvesivaraajaan sähkövastus. Akvaterm Oy:lle tehdyn tiedustelun perusteella selvisi, että lämminvesivaraajan sisähalkaisija on 500 mm, joka samalla määrittä sähkövastuksen maksimi pituuden. 10, 12 ja 15 kW vastusten pituudet olivat liian pitkiä,

joten lämminvesivaraajaan asennettiin suurin siihen sopiva 9 kW 470 mm pitkä sähkövastus. Samalla sähkövastuksen asennuksen yhteydessä kylmävesipiirin lisättiin kaksi kappaletta automaattisia ilmauskelloja, koska kyseisestä piiristä puuttui kokonaan ilmauskellot. Myös katolla olevien aurinkokeräinten sekä meno, että lähtö päähän lisättiin manuaalisten ilmauslaitteiden tilalle automaattiset ilmauskellot. Laitteet ja asennukset ostettiin Vaasan Talotekniikka Oy:ltä.

5.3 Jäähdyttimen huolto

Muutostöiden jälkeen jäähdytin oli toimintavalmis, mutta heti testauksen alussa havaittiin, että jäähdytin ei käytännössä jäähdyttänyt kylmäpiirin vettä ollenkaan, vaan kierrätti kuumaa käyttöveden jäähdyttimen läpi ja välijäähdytys piiri siirsi lämmön ulos. Vikaa lähdettiin etsimään ja nopeasti Sortechin kanssa kommunikoidessa kävi ilmi, että laitteen adsorptiokammioiden tyhjiö on todennäköisesti päässyt vuotamaan vuosien saatossa ja kammio muutenkin pitäisi tyhjiöidä vuosittain. Sortechilta ostettiin huolto ja huoltomies kävi tyhjiöimässä jäähdyttimen, jonka jälkeen jäähdytin toimi niin kuin sen kuuluukin toimia.

6 LABORATORIOTYÖ OPISKELIJOILLE

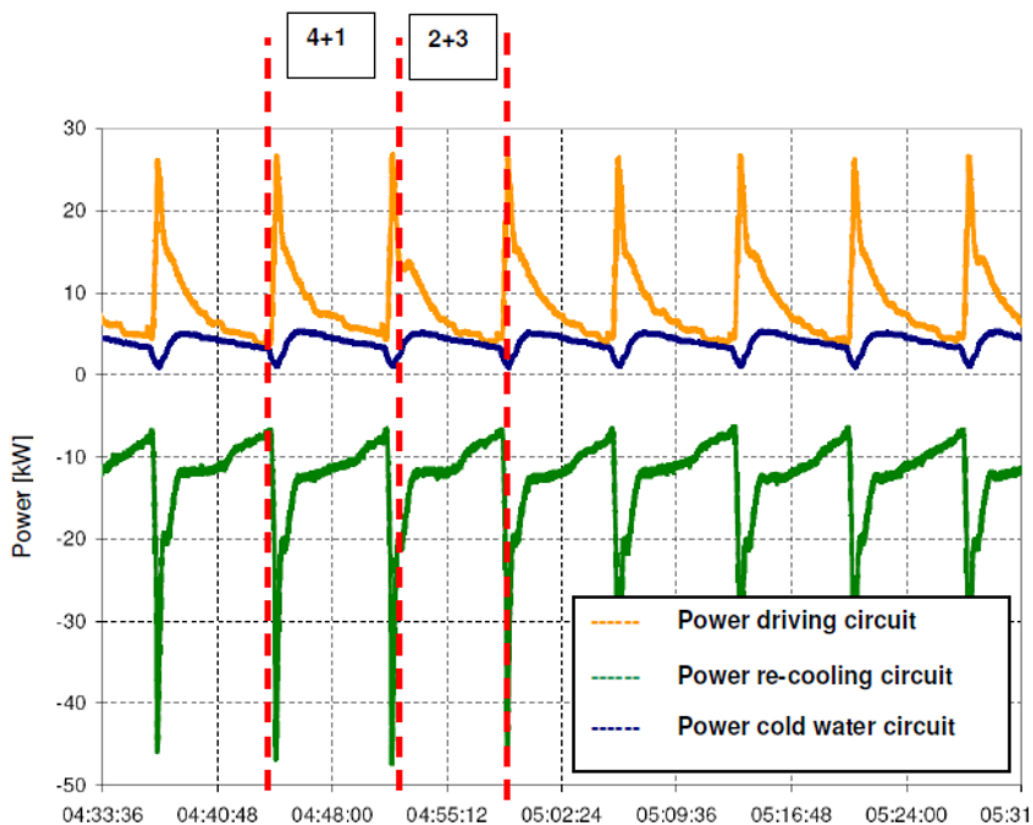
Alun perin suunnitellusta tehtävästä täytyi luopua aikataulusyistä ja laitteistoon ei saatu toistaiseksi asennettua harjoitustyössä tarvittavia lisä energiamittareita ja automaattisunttia. Alun perin suunniteltu harjoitustyö voidaan toteuttaa myöhemmin, jos laitteistoon tulevaisuudessa tullaan asentamaan tarvittavat lisälaitteet.

6.1 Alkuperäinen suunnitelma

Laboratorio työssä on tarkoitus määrittää adsorptiojäähdyttimen COP-arvo eri käyttöveden lämpötiloilla. COP-arvon määrittämiseksi täytyy pystyä mittaamaan jäähdyttimeen sisään menevä energia ja jäähdyttimestä ulos saatu kylmäteho.

Jäähdyttimen ottaman tehon mittaamiseen on tiedettävä jäähdyttimeen menevän käyttöveden lämpötila, palaavan käyttöveden lämpötila ja tilavuusvirta, jolloin voidaan laskea laitteen käyttämä lämpöteho. Ulos saatavan kylmätehon mittaamiseen on samaten tiedettävä jäähdyttimeen kylmäpiiristä syötetyn veden lämpötila, palaavan veden lämpötila sekä tilavuusvirta.

Oman haasteensa COP-arvon määrittämiseen tekee jäähdyttimen toiminnan sykliisyys (kuvio 15). Koska jäähdyttimen ottama teho ei ole stabiilia, täytyy mitata kumulatiivisesti sisään menevä ja ulos saatava lämpömäärä vähintään yhden puolikas syklin ajan. Kuvasta voidaan lukea, että yksi puolikas sykli kestää noin 7 minuuttia.



Kuvio 15. Jäähdyttimen eri vesipiirien tehokäyrät ajan funktiona. /20/

6.1.1 Esitehtävä

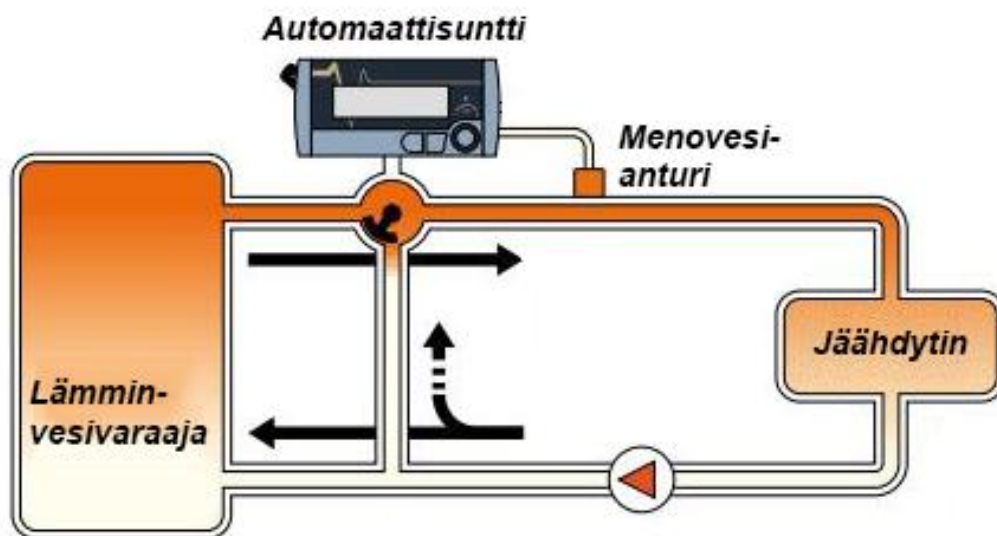
Adsorptiojäähdytyn tarvitsee energianlähteeksi lämmönlähteen jolla pystytään tuottamaan yli 55°C :sta vettä. Yksi käyttökelpoinen lämmönlähde on aurinkoenergia. Opiskelijoiden on tarkoitus laboratorio työn esitehtävässä mitoittaa 13,5 kW adsorptiojäähdyttimelle tyhjiöputkikeräin systeemi, joka pystyy tuottamaan riittävän määrän lämpöenergiaa jäähdyttimen käyttövoimaksi.

6.1.2 Laboratoriotyö

Varsinaisessa laboratoriotyössä opiskelijat mittaavat adsorptiojäähdyttimen COP-arvon kolmella eri käyttöveden lämmöllä. Lämminvesivaraajan vesi on laitettu laboratoriotunteja edeltävänä päivänä lämpiämään termostaatin avulla 90°C :sta. Työssä on tarkoitus mitata jäähdyttimen kuluttama lämpöenergia 85, 75 ja 65

$^{\circ}\text{C}$:een ajovedellä ja samanaikaisesti mitata ulos saadun jäähditysenergian määrä. Myös välijäähdytys piirin lämpötila kirjataan ylös.

Ensimmäisenä haasteena mittauksissa on ylläpitää jäähdyttimeen sisään menevän ajoveden lämpötila jatkuvasti samana. Jäähdyttimen käyttäessä lämpöenergiaa sisään ajattavasta vedestä vesi jäähtyy koko ajan, aiheuttaen lämminvesivaraajan veden lämpötilan laskemisen. Ratkaisuna on lämmittää varaajan vesi korkeammaksi kuin itse mittauksissa käytettävät lämpötilat. Jäähdyttimelle sisään menevän veden lämpötilaa säädetään kolmitieventilillä (suntti), joka pystyy sekoittamaan varaajasta tulevaa vettä ja jäähdyttimen jo läpimennyttä viilentynyttä vettä. Jos lämmön säätäminen on liian haasteellista manuaalisella suntilla, niin se joudutaan vaihtamaan automaattiseen sunttiin (kuvio 16), joka pystyy automaattisesti säätämään sisäänmeno veden lämpötilan halutuksi.



Kuvio 16. Automaattisuntin toiminta ja sijoittaminen järjestelmään.

Toisena haasteena mittauksissa on adsorptiojäähdyttimen toiminnan syklistyys. Jäähdyttimen energian kulutus vaihtelee syklin eri vaiheissa noin 5 kW:sta 26 kW:iin. Tästä johtuen ei voida mitata vain hetkellistä energian kulutusta ja verrata sitä saatuun jäähditysenergian tuottoon, vaan on mitattava vähintään puolikkaan syklin kumulatiivinen energian kulus (molemmat puolisyklit ovat identtiset), jonka

kesto on noin seitsemän minuuttia, jotta jäähdyttimen keskimääräinen lämpöenergian kulutus ja jäähdytysenergian tuotto voidaan laskea.

Mittaus voidaan tehdä seuraamalla jäähdyttimen käyttämää lämpöenergiaa energiamittarista. Koska kumulatiivisen mittausarvon nollaaminen energiamittarissa ei ole yksinkertainen toimenpide, on mittaus tehtävä seuraavasti. Kun mittarissa havaitaan noin 26 kW piikki (kuvio 15) energian kulutuksessa laitetaan sekunti kello käymään, selataan mittarin valikosta kumulatiivisen energiankulutuksen näyttö ja luetaan, esimerkiksi 10 sekunnin päästä, molempien sekä sisään menevän energian ja ulos saatavan kylmäenergian kumulatiivinen arvo samanaikaisesti ja kirjataan ne ylös. Kun havaitaan seuraava noin 26 kW piikki, tarkistetaan sekuntikellon aika ja jatketaan mittaamista vielä 10 sekuntia piikin jälkeen, luetaan ja kirjataan uudelleen mittarien lukemat. Nämä lukemat vähentämällä toisistaan saadaan selville sisään menevän ja ulos saadun lämpöenergian kumulatiivinen tuotto puolikkaan syklin aikana. Puolikkaan syklin kesto on siis sekuntikellossa oleva aika vähennettynä siitä 10 sekuntia.

Kumulatiivisesta energiankulutuksesta puolikkaan syklin aikana voidaan jo suoraan laskea COP-arvo, mutta jos ja kun halutaan myös tietää keskimääräinen tehonkulutus, täytyy kilowattitunnit muuntaa hetkelliseksi keskiarvo tehoksi. Alla esimerkki mittaus kirjauksista, niistä lasketusta keskimääräisestä tehosta ja jäähdyttimen COP-arvosta. Samanlaiset mittaukset ja laskut tehdään kolmelle eri ajoveden lämpötilalle kymmenen asteen välein.

Taulukko 1. Kuvitteelliset mitatut ja lasketut arvot.

Ajoveden lämpötila	85 °C
Välijäähdytysveden lämpötila	22 °C
Ajoveden kumul.mit.1	1000 kWh
Ajoveden kumul.mit.2	1001,54 kWh

Ajoveden kumulatiivinen kulutus	$1001,54 - 1000 = \mathbf{1,54 \text{ kWh}}$
Kylmänveden kumul.mit.1	500 kWh
Kylmänveden kumul.mit.2	500,85 kWh
Kylmänveden kumulatiivinen tuotto	$500,85 - 500 = \mathbf{0,85 \text{ kWh}}$
½ syklin mitattu aika	$7 \text{ min } 12 \text{ s} = 432 \text{ s} = 0,12 \text{ h}$
Jäähdyttimen keskimääräinen ottoteho	$1,54 \text{ kWh} / 0,12 \text{ h} = \mathbf{12,83 \text{ kW}}$
Jäähdyttimen keskimääräinen antoteho	$0,85 \text{ kWh} / 0,12 \text{ h} = \mathbf{7,08 \text{ kW}}$
Lämpökerroin (COP- arvo)	$7,08 \text{ kW} / 12,83 \text{ kW} = \mathbf{0,55}$

6.2 Toteutunut laboratoriotehtävä opiskelijoille

Varsinaisessa harjoitustyössä (liite 1) opiskelijat tutustuvat laitteistoon ja sen eri komponentteihin, sekä aurinkokeräin järjestelmään. Mitään varsinaisia mittauksia ei pystytä tekemään puutteellisten mittareiden vuoksi, vaan on tyydyttävä kirjamaan ylös joitakin arvoja kiertovesipumpuista ja jo ennestään olemassa olevista lämpömittareista raporttia varten.

Opiskelijoiden tehtävänä on mitoittaa aurinkokeräinjärjestelmä, jolla pystytäisiin tuottamaan tarpeeksi lämpöenergiaa jäähdyttimen käyttämiseen ainoana lämmönlähteenä. Oppilaat määrittävät esiannetuilla mittausrvoilla laitteen välijäähdytyspiirin (MT) veden tilavuusvirran, sekä laskevat hetkellisen COP-arvon annetuilla arvoilla. Lisäksi tehtävänä on verrata adsorptiojäähdyttimen sähköenergian kuluusta tavalliseen kompressorilla toimivan ilmalämpöpumpun sähkönkulutukseen ja laatia raportti jossa tehtävässä annettuihin kysymyksiin vastataan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Adsorptiojäähdyttimet ovat Suomessa harvinaisuus. Niitä ei ole tiedettävästi kovinkaan montaa asennettu ja Googlen hakukaan ei löydä kuin kourallisen osumia Suomen kielellä haettuna. Selvä syy niiden pieneen määrään on ainakin toistaiseksi korkea hankintahinta verrattuna perinteisiin ilmavesilämpöpumppuihin. Adsorptiojäähdyttimet vaativat kalliit putkiasennukset ja itse laitteistojenkin hinta kautta teho suhde on toistaiseksi vielä varsin korkea, ja Suomen ilmastossa kun jäähdytystä tarvitaan vain muutaman kuukauden ajan vuodessa.

Suomessa taloudellisesti kannattavaksi adsorptiojäähdyttimen hankinnan voisi mahdollisesti saada joissakin sellaisissa tilanteissa, missä jäähdyttimen käyttämä lämpöenergia olisi periaatteessa ilmaiseksi saatavilla esimerkiksi teollisuuden hukkalämpönä ja käyttökohde tarvitsisi jatkuvaa ympärivuotista jäähdytystä kuten esimerkiksi serverihuoneet. Tällaisissa tilanteissa itse laitteen käyttökustannukset jäisivät pieniksi verrattuna kompressori jäähdyttimiin.

7.1 Ongelmat

Aurinkokeräin järjestelmä ei tuottanut läheskään niin paljoa lämpöenergiaa kuin niiden laskennallinen tuotto olisi pitänyt olla. Aurinkoisena kevätpäivänä järjestelmästä ulos mitattiin maksimissaan noin 2 kW lämpötehoa, kun järjestelmä oli mitoitettu 13,5 kW suuruiseksi. Tyhjiöputkista osa oli asentamatta ja niitä asennettaessa havaittiin, että muissakaan jo asennetuissa tyhjiöputkissa ei ollut käytetty lämpötahnaa johtamaan lämpöä putkien sisällä olevista heat pipeistä jatkoyhteyteen. Kaikkien heat pipejen päihin lisättiin lämpötahnaa ja maksimi lämpöteho järjestelmässä saatiin nostettua noin 4 kW:iin.

Työn suorittaminen viivästyi muutamien ongelmien ja koulun kiinni olemisen takia kesällä. Ensimmäisen viivästyksen aiheutti byrokratia, jonka takia sähkövastuksen asennusta jouduttiin odottamaan muutaman viikon ajan, jotta päästiin testaamaan laitteistoa.

Toisen pidempi viivästys johtui laitteen toimimattomuudesta. Vikaa selvitellessä kävi ilmi, että laitteen tyhjiökammio oli vuotanut vuosien saatossa ja se täytyi uudelleen tyhjiöidä. Byrokratia ja lomat viivästytti huoltomiehen saamista Saksasta ja se venyi pitkälle syksyyn myös kesälomien takia.

7.2 Lopputulos

Viimein kun jäähdytin oli toimintavalmis, niin siihen olisi vielä tarvinnut asentaa energiamittareita ja automaattisuntti, jotta suunniteltu laboratoriotyö COP-arvojen määrittämiseksi olisi voitu toteuttaa. Siitä kuitenkin luovuttiin aikataulusyistä. Nykyisellä kokoonpanolla ei juurikaan voida mittauksia suorittaa, joten on vain tyydyttävä tarkastelemaan laitteistoa pääasiassa teoriatasolla, ja harjoitustehtävistä muodostui enemmän teoreettisia kuin käytännön töitä. Toivottavasti energiamittarit ja automaattisuntti saataisiin laitteistoon myöhemmin asennettua, jotta laitteistolla voitaisiin tehdä oikeita laboratoriomittauksiakin.

LÄHTEET

- /1/ Chromatography Today 2016. Adsorption, Absorption and Desorption — What's the Difference?
https://www.chromatographytoday.com/news/hplc-uhplc/31/breaking_news/adsorption_absorption_and_desorption_whats_the_difference/31397/
- /2/ SorbentSystems 2006. Desiccant Chart Comparisons.
https://www.sorbentsystems.com/desiccants_charts.html
- /3/ Sortech innovative cooling Poland
<http://sortech.pl/powloka.html>
- /4/ Energiateollisuus ry. Kaukolämmön toimintaperiaate.
<http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys/toimintaperiaate>
- /5/ Motiva Oy tiedote 2013. Lämpöpumput muuttavat teollisuuden hukkalämmön hyödyksi.
http://www.motiva.fi/ajankohtaista/motivan_tiedotteet/2013/lampopumput_muuttavat_teollisuuden_hukkalammon_hyodyksi.6038.news
- /6/ Aurinkopuisto. Tietoa aurinkokeräimistä.
<http://www.aurinkopuisto.com/Tietoa-aurinko-ker%C3%A4imist%C3%A4.php>
- /7/ Monika Gwadera, Krzysztof Kupiec 2011. Adsorption cooling as an effective method of waste heat utilization. https://suw.biblos.pk.edu.pl/resources/i4/i5/i4/i8/r4548/GwaderaM_AdsorptionCooling.pdf
- /8/ [Sortech jäädytysjärjestelmä suunnitelma](#)
- /9/ SorTech AG. Heat creates Cold.
<http://www.sortech.de/en/technology/adsorption/>
- /10/ Explanation of the Phase Anomalies of Water
http://www1.lsbu.ac.uk/water/phase_anomalies.html
- /11/ TAFE SA Accommodation – Umuwa SA <http://kpwsolutions.com.au/kpw-project/tafe-sa-accommodation-umuwa-sa/>
- /12/ TGA FACHPLANER <http://www.tga-fachplaner.de/TGA-2010-6/Pumpengruppen-fuer-thermische-Klimatisierung,QUIEPTI4MTI-wMCZNSUQ9MTAwMjQ4.html>
- /13/ Sortech catalog <http://previous.sortech.de/en/adsorption-chiller-aggregates/products/additional-components/>

- /14/ Sortech ACS08 manual PDF, sivu 10.
- /15/ Recair intutrade group
<http://www.recair.fi/tuotteet/daikin-vrv-iii-jaahdytysjarjestelmat>
- /16/ ResearchGate Schematic drawing of an adsorption chiller. https://www.researchgate.net/figure/274952482_fig1_Figure-1-Schematic-drawing-of-an-adsorption-chiller
- /17/ The Basics of R718: the Adsorption cycle 2012.
<http://www.r718.com/news/viewprintable/3432>
- /18/ Vattenfall 2016. Ilmalämpöpumpun hankinnan ja käytön ABC.
<http://www.vattenfall.fi/fi/ilmalampopumppu-abc.htm>
- /19/ Akvatern tuoteluettelo 2015.
http://www.akvatern.fi/files/2015_katalogi_v10_20151218_web.pdf
- /20/ Sortech ACS08 manual PDF, sivu 19.

LIITE 1.

LABORATORIOTEHTÄVÄ

Esitehtävä

Tutustu laboratoriotyöohjeeseen ja selvitä tehtävän 5. ratkaisemiseen tarvittava kaava.

- 1 Tutustu laitteistoon PI-kaavion (putkitus ja instrumentointi) (LIITE 5) avulla ja tutki kuinka eri komponentit ovat kytketty järjestelmään.
 - a. Aurinkokeräimet + lämpötilan mittaus keräimillä + energiamittari.
 - b. Varaajat + sähkölämmitin
 - c. Pumppuasema ja kiertovesipumput. Lue nimelliset arvot talteen raporttia varten.
 - d. Adsorptiojäähdytin
- 2 Kirjaa ylös aurinkokeräimille menevän ja palaavan veden lämpötila. Vastaa kysymykseen miksi aurinkokeräinten kiertovesipumppu ei käy?
- 3 Perehdy jäähdyttimen toimintaperiaatteeseen lukemalla manuaalista sivut 3 ja 5-8. Vastaa seuraaviin kysymyksiin raportissa.
 - a) Millaisia eri lämmönlähteitä jäähdyttimen käyttöön voidaan käyttää?
 - b) Miksi jäähdyttimen kammiotilat on alipaineistettu lähes tyhjiöön?
 - c) Miksi jäähdyttimessä on kaksi identtistä adsorptiokammiota?
- 4 Adsorptiojäähdytin tarvitsee täydellä teholla toimiakseen keskimäärin 13,5 kW jatkuvaa lämpötehoa. Laske montako tyhjiöputkikeräintä tarvitaan tuottamaan 13,5 kW olettaen, että tyhjiöputkikeräimet toimivat optimi olosuhteissa. Ilmakehän yläosiin saapuva aurinkosäteily on noin 1368 W/m^2 , jota kutsutaan aurinkovakioksi (E_e). Ilmakehän heijastavasta ja absorboivasta vaikutuksesta johtuen suurin säteily määrä maanpinnalla on kirkkaalla säällä korkeintaan 1000 W/m^2 auringon paistaessa keskitaivaalta. Lisäksi oletetaan, että 21,5 % lämpöenergiasta häviää matkalla siirrossa tyhjiöputkilta lämminvesivaraajaan.

Tyhjiöputken optinen hyötysuhde eli $\eta_0 = 0,849$

Tyhjiöputken absorbaatiopinta-ala = $0,0931 \text{ m}^2/\text{kpl}$

- 5 Adsorptiojäähdyttimen eri vesipiireistä mitattiin ajanhetkellä X seuraavat lämpötila ja kiertovesipumppuihin on asetettu seuraavat virtausnopeudet:

	In (°C)	Out (°C)	Volume flow (m ³ /h)
High Temp. Circuit	76	69	1,6
Med. Temp. Circuit	26	31	?
Low Temp. Circuit	16	13	2,0

Selvitä MT veden virtaus (m³/h) olettamalla, että HT + MT + LT energiavirtausten summa on nolla. Laske myös jäähdyttimen hetkellinen hyötysuhde (COP). Oletetaan veden tiheydeksi 1 kg/dm³ ja ominaislämpökapasiteetiksi 4,187 kJ/kg°C.

- 6 A-energialuokituksen omaava kompressiolla toimivan ilmalämpöpumpun COP-arvo jäähdytyskäytössä on 3,2.
- Vertaa COP arvo edellisessä tehtävässä laskettuun adsorptiojäähdyttimen arvoon. Havainto?
 - Paljonko sähköenergiaa tarvitaan tuottamaan sama määrä jäähdytystehoa kuin edellisen tehtävän jäähdytin tuotti?
 - Laske adsorptiojäähdyttimen sähköhyötysuhde (jäähdytysteho/kulutettu sähkö). Sähkön kulu-
tukseen voi käyttää kiertovesipumppujen tyyppikilvistä löytyviä nimellisiä tietoja + jäähdytti-
men kuluttama sähkö (9 W) + lauhduttimen sähkönkulutus (0,65 kW). Mitenkä nyt laskettu
sähköhyötysuhde vertautuu kompressio ilmalämpöpumpun COP-arvoon?
- 7 Palauta dokumentit oikeille paikoilleen ja siivoa tila. Kirjaa kaikkien esitettyjen kysymysten vas-
taukset raporttimuotoon ja palauta raportti.

LIITE 2

LIITE 3.

LABORATORY ASSIGNMENT

Pre-assignment

Get familiar with laboratory work instructions and figure out a formula to solve Task 5.

- 1 Check out the equipment by using P&I diagram (piping and instrumentation) and study how the different parts are connected to the system.
 - a. Solar thermal collectors + the collector temperature gauges + energy meter
 - b. Hot/cold water storages + electric heater
 - c. Pump station and circulating pumps. Write down the nameplate values (W) for the report.
 - d. Adsorption chiller

- 2 Write down ingoing and returning water temperatures in the solar thermal collector. Answer the question why the circulation pump of the solar collector is not running?

- 3 Read and study the operating principle of the adsorption chiller by reading the manual pages 3 and 5-8. Answer the following questions in the report.
 - a) What kind of different heat sources can be used to drive the chiller?
 - b) Why are chiller chambers underinflated to almost a complete vacuum?
 - c) Why does the chiller have two identical adsorption chambers?

- 4 The adsorption chiller to function at full capacity needs an average of 13.5 kW continuous thermal power. Calculate the number of vacuum tube collectors required to produce 13.5 kW assuming that the vacuum tube collectors are in optimum operating conditions. The incoming solar radiation at the upper part of atmosphere is about 1368 W/m², it is called solar constant (E_e). Due to the reflective and absorbing impact of the atmosphere the highest amount of radiation to the surface of the earth on a clear weather is the maximum of 1000 W/m² when sun is at the midheaven. In addition, it is assumed that 21.5 % of the heat energy is lost on the way from solar collector to the hot water tank.
 - The optical efficiency of the vacuum tube $\eta_0 = 0,849$
 - Vacuum tube absorption surface area $0,0931 \text{ m}^2/\text{tube}$

- 5 The following temperatures from different water circuits were measured at time X and the flow rates of the pumps has been set as follows:

	In (°C)	Out (°C)	Volume flow (m ³ /h)
High Temp. Circuit	76	69	1,6
Med. Temp. Circuit	26	31	?
Low Temp. Circuit	16	13	2,0

Figure out MT water flow rate (m^3/h) assuming that the sum of HT + MT + LT energy flows is zero. Calculate also the instantaneous operating efficiency (COP) of the chiller. Assume the water density to be $1\text{kg}/\text{dm}^3$ and the specific heat capacity of the water $4,187\text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$.

- 6 The COP value for A-energy classified conventional compression chillers is >3.2 .
 - a) Compare COP values what were calculated in the previous task for the adsorption chiller.
 - b) How much electrical energy is needed to produce the same amount of cold energy than the chiller in the previous task produced?
 - c) Calculate the electrical efficiency of the adsorption chiller (cooling power / used electricity).
To estimate the electricity consumption use the circulation pumps nameplate values + the electricity consumption of the re-cooler (650 W) + the electricity consumption of the chiller (9 W).
How does the calculated electrical efficiency compare to the COP value of a conventional compression chiller?
- 7 Return the documents in their proper places and tidy up the space. Write the answers to all the asked questions in the report and submit the report.

1 General Description

1.1 General Information

With the **Adsorption Chiller silica gel** offered by SorTech it is possible to produce cold from thermal driving energy, even at a low power range. Everywhere that solar heat, district heat, process heat, or any kind of waste heat, for example, is available, an alternative that is more environmentally friendly and cheaper to operate than conventional compression chillers is also available. The combination of a cooling system with miniature combined heat and power plants – in this case as power-heat-cold coupling – is also a viable option for generating cold from heat that is inherently produced in the system but insufficiently used by applying as little electrical energy as possible.

SorTech offers adsorption chillers that come in two sizes with an effective cooling power of 8 and 15 kW. By coupling several units, larger power levels can be achieved economically.

An important advantage of SorTech's **adsorption** chillers, compared to **absorption** chillers, is their ability to generate cooling power at low driving temperatures – starting at 55°C. This is of significant importance, particularly when it comes to solar cooling, because cooling can also be guaranteed with inexpensive flat-plate collectors, even with moderate solar radiation.

Moreover, to simplify the design and configuration of the system and ultimately make installation easier, SorTech offers, as basically complete subsystems, a pump station and a re-cooler, both of which are tailored exactly to and optimized for each kind of **ACS**. Utilization of the most current EC ventilation technology for re-coolers and adaptive regulation of the rotation speed guarantee that only so much electrical energy will be used as is absolutely necessary to achieve the required cooling power. In addition to high-efficiency pumps, the pump station includes all system-relevant hydraulic components. Therefore, a comparably high seasonal energy efficiency ratio (the cooling output during a typical cooling season divided by the total electrical energy input for the same period) of more than 10¹ as well as a substantial reduction in the primary energy consumption and CO₂ emissions can be achieved.

By hydraulically switching the cold water strand and the re-cooler strand, the **ACS** can also be used as a heat pump. This makes it possible for the ACS not only to be used as a cooling unit in the summer but also as a low temperature heating unit (e.g. floor heating). This is, of course, as long as an adequate driving temperature is available. Due to the energy detracted from the surrounding area and depending on operating conditions, heat conditions of up to 150% can be achieved.

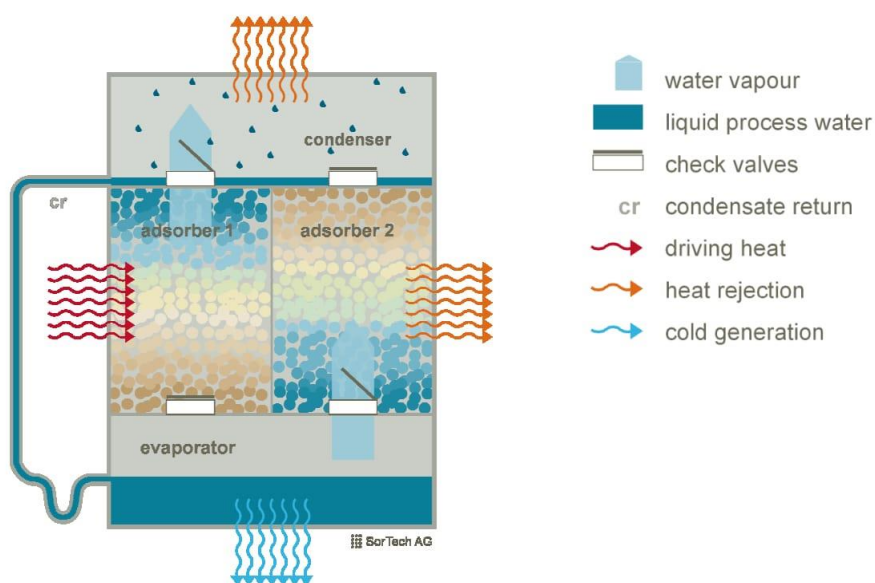
Because the **ACS** contains so few moving parts susceptible to wear and tear, maintenance of the unit is low. Only the vacuum inside the system has to be checked twice during the first year of operation, and, if necessary, restored. In subsequent years, an annual inspection is sufficient, preferably at the beginning of the cooling season. This can be done during maintenance of other building equipment. SorTech provides its distribution partners and end customers with professional support in case of unit malfunction. SorTech is also available at any time for maintenance checks, or if you have general questions regarding the mode of operation, design, integration into the system, and installation.

¹ Depending on the location and other electrical consumption

1.3 Working Principle

The core component, the **ACS** module, is divided into four separate process chambers: evaporator, adsorber 1, adsorber 2, and condenser. These chambers are integrated into a vacuum-sealed, hot & cold insulated metal housing.

Fig. 3: The Working Principle of the **Adsorption Process of the ACS 08**

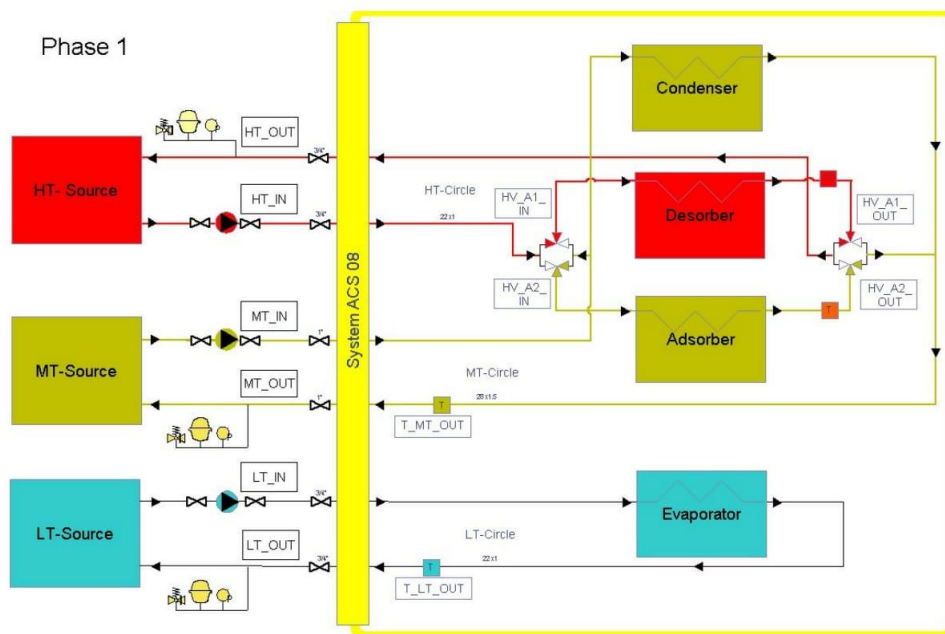


The four process chambers are connected to each other by internal, automatically-functioning steam valves. These valves influence the directional flow of the evaporated coolant into adsorber chamber 1 or 2 and the condenser, depending on the phase of the process. In operating phase 1, hot water passes through adsorber 1. The coolant, which has accumulated on the inner surface of the silica gel, is expelled, thus causing it to condense on the cooled condenser. The condensation heat emitted is removed through the re-cooling circuit. The condenser has a constantly low temperature and pressure level and, therefore, acts as a vapor sink. Simultaneously, adsorber 2 adsorbs (i.e. water vapor from the evaporator is bound in the silica gel). During the conversion of the state of aggregation from a liquid to a gas, energy is extracted from the coolant (enthalpy of evaporation). This lower temperature level is led away through the cold water circuit of the **ACS** as cold. During adsorption of the water vapor in the silica gel, adsorption heat is released. This heat is removed through the re-cooling circuit of the **ACS**. The **ACS** switches over as soon as the average target temperature is reached inside the condenser. In the heat pump mode only the re-cooling circuit and the working circuit are switched; the process itself remains unchanged. The condensed coolant is recirculated into the evaporator through the external condensate return. As a result, it is possible to achieve a continuous operation of the system.

1.4 The Different Phases of the Adsorption Chiller in Detail

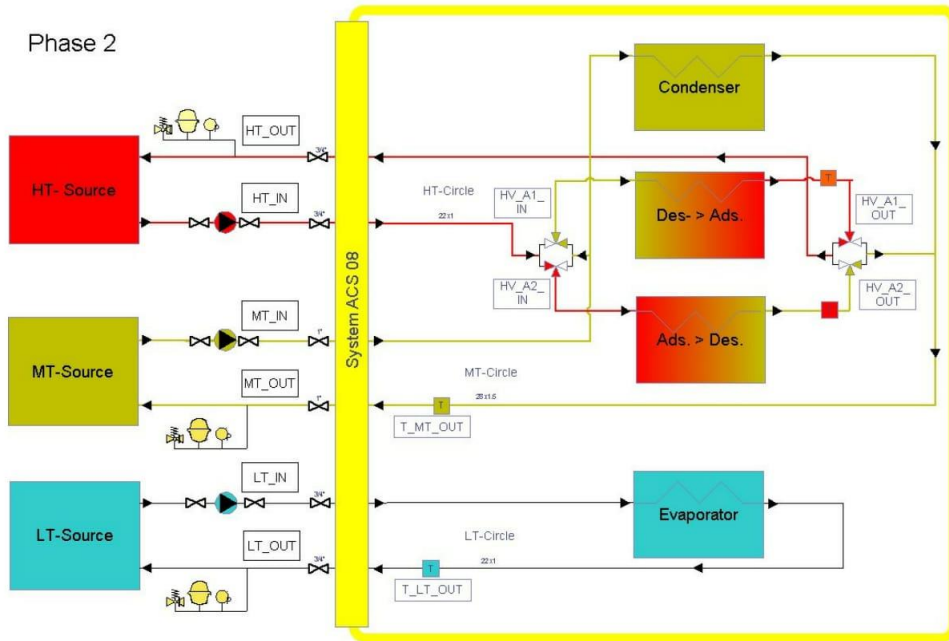
The entire piping system of the adsorption chiller, which connects the heat exchanger with the 3-way switching valves and the external installation, is located on the connection side of the **ACS**. Using said 3-way switching valves, adsorber 1 and adsorber 2 are cyclically supplied with driving heat or re-cooling water (phases 1 and 3). Moreover, these valves are responsible for internal heat recovery to increase energy efficiency without an additional pump (phases 2 and 4). Temperature sensors (T) used to control and monitor the unit are located in each of the individual return lines of the heat exchanger.

Fig. 4: Hydraulic Schematics / Switch Unit of the ACS

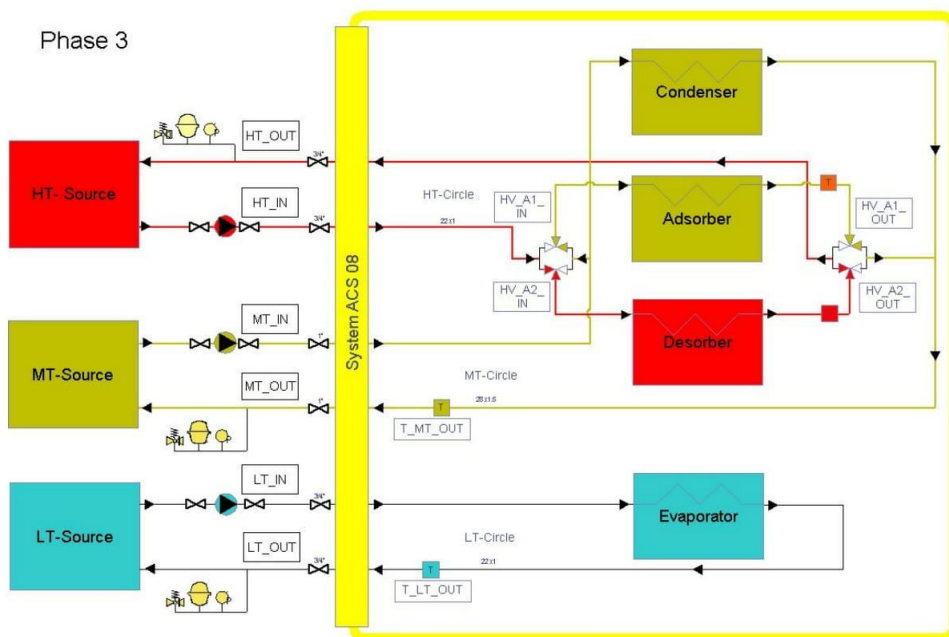


In **phase 1** the adsorber 1 (desorber) is supplied with driving heat and thus desorbed. At the same time, adsorber 2 (adsorber) adsorbs; to remove waste heat, re-cooling water passes through. Both the heat produced during adsorption and the condensation heat from the condenser are released to the surrounding area through re-cooling (MT sink). The cold water circuit (LT) is constantly passed through in all phases and carries the heat drawn from the surrounding area to the evaporator.

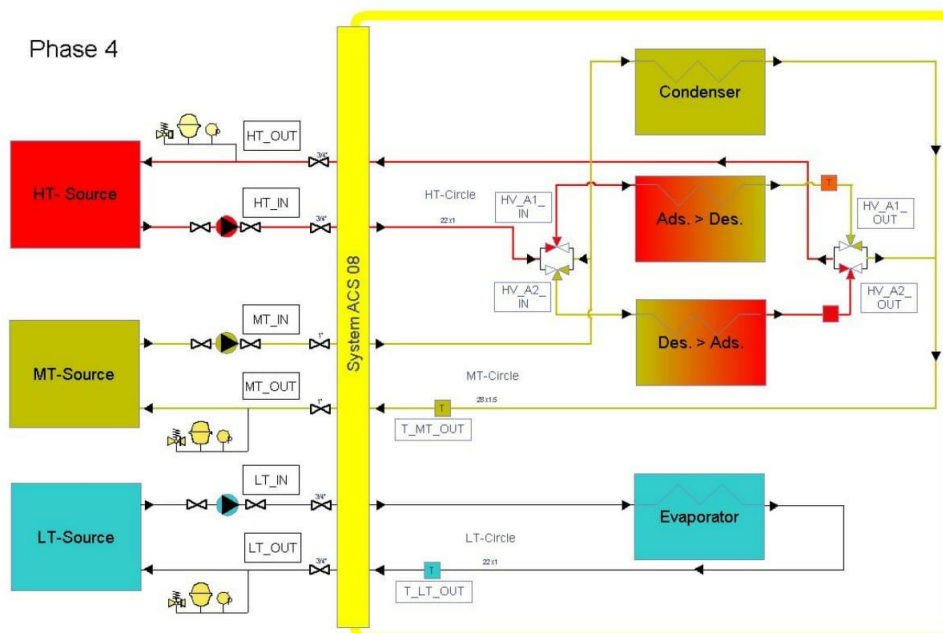
Phase 2 directly follows phase 1. Here, the 3-way-switching valves are set to allow the re-cooling water to pass through the previously desorbed adsorber 1. However, the energy initially stored in the (hot) adsorber is not carried simultaneously to the MT sink, but rather is “shifted” to the driving circuit over a certain period of time. At the same time, the (still) cold return strand of adsorber 2, which is to be desorbed, is fed into the re-cooling circuit for a determined amount of time. Only after achieving a certain temperature difference between both adsorber return strands can phase 2 be ended by switching the “HV_A1/2_OUT” valves.



In **phase 3** the adsorber 2 (ads. > des.) is supplied with driving heat and thus desorbed. At the same time, adsorber 1 (des. > ads.) adsorbs; to remove waste heat, re-cooling water passes through. Both the heat produced during adsorption and the condensation heat from the condenser are released to the surrounding area through re-cooling (MT sink).



In **phase 4**, just as in phase 2, heat recovery is carried out. The 3-way-switching valves are set to allow re-cooling water to pass through the previously desorbed adsorber 2. However, the energy initially stored in the (hot) adsorber is not carried simultaneously to the MT sink, but rather is “shifted” to the driving circuit over a certain period of time. At the same time, the (still) cold return strand of adsorber 1, which is to be desorbed, is fed into the re-cooling circuit for a determined amount of time. Only after achieving a certain temperature difference between both adsorber return strands can phase 4 be ended by switching the “HV_A1/2_OUT” valves.



Hydraulic Connections of the ACS 15:

In contrast to the **ACS 08**, there are two internal modules in the **ACS 15** that have a hydraulically parallel connection. That is to say, the upper module and the lower module are always in the same phase; the resulting individual specifications are added.

Regulation of the unit and the individual phases of the process are identical to those of the **ACS 08** as described above.

1.5 Re-cooling

As is characteristic of all thermally driven chillers, the **ACS** chiller requires powerful and efficient re-cooling of both the driving energy supplied and the cooling energy “generated.” Here, the heat that is generated is released to the surrounding area at the middle temperature level. Basically speaking, re-cooling can occur in different ways. The **ACS** functions most effectively when the lowest re-cooling temperatures possible are reached with the least amount of electrical energy consumption.

Taking this into account and combining it with the advantages of low maintenance requirements, SorTech offers the **RCS 08** and **RCS 15** dry re-coolers, which are designed to meet the special requirements of adsorption chillers. This series of re-coolers features a fresh water sprinkler system and rotation speed-controlled EC fans. The chiller and re-cooler represent an optimized subsystem

LIITE 5.

