



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Juho Ahlgren

HARJOITUSTYÖOHJE
ADSORPTIOJÄÄHDYTTIMEN
KÄYTTÄMISEEN

Tekniikka
2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Juho Ahlgren
Opinnäytetyön nimi	Harjoitustyöohje adsorptiojäähdyttimen käyttämiseen
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	37 + 13 liitettä
Ohjaaja	Jukka Hautala

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua SorTech ACS 08 -adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaatteisiin sekä käyttötarkoituksiin, sekä suunnitella jäähdyttimen käyttöön perehdyttävä harjoitustyöohje. Harjoitustyöohjetta on tarkoitus käyttää tulevilla kursseilla yhtenä mahdollisena oppilaiden suorittamana laboratoriotyönä.

Työssä keskitytään vahvasti adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaatteisiin, sekä avataan keskeisiä käsitteitä, kuten adsorptio sekä desorptio. Suunnitteilla oli suorittaa muutamia testimittauksia jäähdytinlaitteiston, mutta käyttöönottovaiheen teknisten ongelmien vuoksi niitä ei voitu vielä suorittaa.

Toteutuneessa laboratorioharjoitustyössä oppilas tutustuu adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaatteisiin erinäisten mittauksien avulla.

ABSTRACT

Author	Juho Ahlgren
Title	Exercise Instructions for Using the Adsorption Chiller
Year	2021
Language	Finnish
Pages	37 + 13 appendices
Name of Supervisor	Jukka Hautala

The purpose of this thesis is to get acquainted with the operating principles and uses of the SorTech ACS 08 adsorption chiller, and to plan an exercise manual that introduces students in the operation of the cooler. The assignment is intended to be used in future courses as one of the possible laboratory assignments performed by the students.

This thesis focuses strongly on the operating principles of the adsorption chiller and opens up key concepts such as adsorption and desorption. Several test measurements were planned to be performed, but due to technical problems during the deployment phase, they were not feasible.

In the finished laboratory exercise, student gets acquainted with the operating principles of the adsorption chiller with the help of various measurements.

Keywords	Air conditioning, refrigeration, adsorption, desorption, exercise instructions
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	9
2	ADSORPTIO JA SEN KÄYTTÖ ILMASTOINNISSA.....	10
	2.1 Adsorptio.....	10
	2.2 Absorptio.....	10
	2.3 Desorptio.....	11
	2.4 Silikageeli.....	11
3	RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATTEET.....	12
	3.1 Adsorptiojäähdytinjärjestelmän rakenne.....	12
	3.1.1 Jäähdytinsyksikkö.....	13
	3.1.2 Pumppuyksikkö.....	15
	3.1.3 Lämmönlähde.....	16
	3.1.4 Lämmin- ja kylmävesivaraajat.....	17
	3.1.5 Sisäyksikkö.....	19
	3.1.6 Uudelleenjäähdytys.....	19
	3.2 Adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaate.....	20
	3.2.1 Vaihe 1.....	20
	3.2.2 Vaihe 2.....	21
	3.2.3 Vaihe 3.....	22
	3.2.4 Vaihe 4.....	23
	3.3 Jäähdytinjärjestelmän tekniset tiedot.....	24
4	JÄRJESTELMÄÄN LIITETYT MITTAUSLAITTEET.....	26
	4.1 Kampstrup Multical 302.....	26
	4.2 ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus.....	27
	4.3 ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus -käyttöliittymä.....	29
5	LABORATORIOHARJOITUSTYÖ OPISKELIJOILLE.....	32
	5.1 Harjoitustyön suunnittelu.....	32

5.2 Toteutunut laboratorioharjoitustyö (Liite 1).....	32
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	35
6.1 Käyttönotossa ilmenneet tekniset ongelmat.....	35
LÄHTEET.....	37

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Silikageelillä päällystettyä adsorbenttikennostoa. /5/.....	11
Kuva 2. Esimerkki jäähdytinjärjestelmäratkaisusta. /7/.....	13
Kuva 3. SorTech ACS 08 -jäähdytinsyksikkö Technobothnian kellarissa.....	14
Kuva 4. ACS 08 -jäähdytinsyksikön rakenne. /6/.....	14
Kuva 5. ACS 08 -jäähdytinsyksikön komponentit selityksineen. /6/.....	15
Kuva 6. PCS 08-W -pumppuyksikkö. /7/.....	16
Kuva 7. 400 litran Akvaterm-lämminvesivaraaja Technobothnian kellarissa.....	17
Kuva 8. Akvaterm-lämminvesivaraajan tekniset tiedot.....	17
Kuva 9. 750 litran Akvaterm JV-750 E -kylmävesivaraaja Technobothnian kellarissa.....	18
Kuva 10. Akvaterm JV-750 E -kylmävesivaraajan tekniset tiedot.....	18
Kuva 11 - Technobothnialla käytettävän sisäyksikön puhallin.....	19
Kuva 12. RCS 08 -uudelleenjäähdytysyksikkö. /6/.....	20
Kuva 13. Uudelleenjäähdytyspiirin tehontarve. /6/.....	20
Kuva 14. Jäähdytysprosessin vaihe 1. /6/.....	21
Kuva 15. Jäähdytysprosessin vaihe 2. /6/.....	22
Kuva 16. Jäähdytysprosessin vaihe 3. /6/.....	23
Kuva 17. Jäähdytysprosessin vaihe 4. /6/.....	23
Kuva 18. Kampstrup Multical 302 -mittarit kytkettyinä vesipiiriin.....	26
Kuva 19. Multical 302 -mittarin tarkkuus. /8/.....	27
Kuva 20. ABB QA/S3.16.1 M-Bus -energia-analysaattori.....	28
Kuva 21. Mittauslaitteiden kytkentä yksinkertaistettuna.....	28
Kuva 22. ABB i-bus® Tool.....	29
Kuva 23. M-Busiin liitettyjen mittareiden hakeminen. /9/.....	30
Kuva 24. Käyttöliittymän Dashboard-näkymä ennen pienoisohjelmien lisäämistä.	31
Kuva 25. Käyttöliittymän Dashboard-näkymä pienoisohjelmilla.....	31
Kuva 26. Adsorptiojäähdyttimen vesipiirien tehokäyrät. /6/.....	33

Taulukko 1. ACS 08 -jäähdytysyksikön tekniset tiedot nimellisessä toimintapisteessä. /6/.....	24
Taulukko 2. RCS 08 -välijäähdytysyksikön tekniset tiedot nimellisessä toimintapisteessä. /6/.....	25

LIITELUETTELO

LIITE 1. Laboratorioharjoitus adsorptiojäähdyttimen käyttöön

LIITE 2. Laboratorioharjoitus adsorptiojäähdyttimen käyttöön – vastaukset

LIITE 3. Laboratory exercise for the use of adsorption chiller

LIITE 4. Otteita SorTech ACS 08 -adsorptiojäähdyttimen manuaalista laboratoriotyötä varten

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoululle, ja se käsittelee Technobothnialle opetuskäyttöön vuonna 2012 ostettua adsorptiojäähdytintä. Laitteiston käyttöönotto oli jostain syystä jäänyt aikoinaan kesken, eikä sitä ole vielä käytetty opetuskäytössä. Opetuskäyttöä silmällä pitäen laitteistoon on myös myöhemmin asennettu kolme energiamittaria sekä energia-analysaattori, jolla mittareista saatua dataa voidaan käsitellä.

Tämä työ keskittyy vahvasti kyseisen adsorptiojäähdyttimen toimintaan sekä rakenteeseen. Työssä pyritään myös selittämään keskeisiä käsitteitä, kuten adsorptiota, sekä sitä, kuinka kyseistä ilmiötä hyödyntäen on mahdollista tuottaa viileää huoneilmaa lämpöenergiasta.

Työn pääasiallisena tehtävänä oli suunnitella laboratorioharjoitustyö opetuskäyttöön opinnäytetyön käsittelemästä adsorptiojäähdyttimestä.

Lopullinen laboratorioharjoitustyö päättyi pohjautumaan enemmän teoreettiseen dataan ja valmistajan tarjoamiin arvoihin alun perin suunniteltujen itse suoritettujen mittauksien sijaan, laitteiston käyttöönoton yhteydessä ilmenneiden teknisten ongelmien vuoksi. Laboratorioharjoitustyötä voi kuitenkin sellaisenaan käyttää opetustyössä, kunhan jäähdytyslaitteisto on saatu täysin toimintakuntoiseksi.

2 ADSORPTIO JA SEN KÄYTTÖ ILMASTOINNISSA

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävän jäädyttimen toiminta perustuu adsorption ja sen vastailmiön, desorption, hyödyntämiseen. Adsorptiota ei pidä sekoittaa absorptioon, joka on, samankaltaisuuksista huolimatta, eri ilmiö. Ilmiötä hyödyntäen on mahdollista tuottaa viileää huoneilmaa lämpöenergiasta. Toiminta perustuu ilmiöiden vastakohtaisuuteen, erityisesti siihen, että adsorptio on eksoterminen, eli lämpöä vapauttava ilmiö, ja vastailmiö desorptio taas on endoterminen, eli lämpöä sitova ilmiö. Tämä vastakohtaisten ilmiöiden käyttämisen aiheuttama syklistyys on myös osaltaan selittävä tekijä sille, miksi tässä opinnäytetyössä käsiteltävä jäädytín kuluttaa verrattain vain vähän sähköenergiaa.

2.1 Adsorptio

Adsorptio on fysikaalinen ilmiö, jossa jonkin (yleensä kaasumaisen) aineen, adsorbaatin, molekyylit sitoutuvat jonkin kiinteän aineen, adsorbentin, pintaan, muodostaen siihen kalvon. Adsorptioprosessi tapahtuu pintaenergian takia, jolloin adsorbaatin kiinnittymistä helpottaa joko Van der Waalsin voima tai kovalenttiset sidokset, prosessissa mukana olevien aineiden luonteista riippuen. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä jäädyttimessä adsorbenttina toimii silikageeli ja sitoutuvana aineena, adsorbaattina, vesi. Adsorptio on eksoterminen ilmiö. /1/

2.2 Absorptio

Absorptio on fysikaalinen tai kemiallinen ilmiö, jossa aineen, adsorbaatin, atomit, molekyylit tai ionit pidätyvät kaasuun, nesteeseen tai kiinteään aineeseen, adsorbenttiin. Yleisimmin absorptio tapahtuu adsorbentin pinnan läpi, yleensä joko diffuusiona tai osmoosina. Absorption mahdollistaa adsorbentin molekyyliden välissä olevat tyhjät tilat, jotka adsorbaatin molekyylit sitten täyttävät.

Absorptiossa adsorbaatti jakautuu tasaisesti koko adsorbenttiin, vaikuttaen näin koko systeemiin (toisin kuin adsorptio, joka vaikuttaa vain adsorbentin pinnalla.)

Absorptio on endoterminen ilmiö. /1/

2.3 Desorptio

Desorptio on adsorption ja absorption vastailmiö, jossa sitoutuneet aineet irtoavat toisistaan. Desorptio voi tapahtua, jos systeemin tasapainoa muutetaan tarpeeksi. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävissä systeemeissä tämä toteutetaan lämpötilaa nostamalla. Desorptio on endoterminen ilmiö. /2/

2.4 Silikageeli

Silikageeli on osittain dehydratoitua, amorfista piioksidia (SiO_2). Sillä on erittäin huokoinen rakenne, jonka ansiosta silikageeli kykenee adsorboimaan vettä jopa 40% oman painonsa verran. Tämän vuoksi silikageeli onkin hyvin yleisesti käytetty kuivausaine. Yleisimmin silikageeliä näkeekin käytettävän kosteudenpoistajana esimerkiksi laukuissa ja kenkälaatikoissa. /3/

Kyllästyttyään vedellä, silikageelin voi saada uudelleen käyttövalmiiksi, regeneroida, lämmittämällä sitä. Lämpötilan tulee olla yli $100\text{ }^\circ\text{C}$, mutta tehokkaimman tuloksen saa, jos lämpötila on $150\text{ }^\circ\text{C}$ ja $175\text{ }^\circ\text{C}$ välillä.

Huomioitavaa kuitenkin on, että jos silikageeli on päällystetty väri-indikaattorilla (joka muuttaa väriään kosteuspitoisuuden mukaan), lämpötilaksi suositellaan $120\text{ }^\circ\text{C}$, eikä se saa tässä tapauksessa ylittää $140\text{ }^\circ\text{C}$. /4/

Adsorptiojäähdyttimessä näin korkeaa lämpötilaa olisi vaikeaa ja epäkäytännöllistä saavuttaa, minkä takia adsorptiokammiot ovat tyhjiöpaineistettuja. Tämä laskee regeneraatioon vaadittavaa minimilämpötilaa sekä nopeuttaa regeneroimisprosessia. Tästä lämpötilasta saadaankin adsorptiojäähdyttimen toimintaan vaadittava alin lämmönlähteeltä saatavan veden lämpötila, mikä on SorTech ACS 08 -jäähdyttimellä $55\text{ }^\circ\text{C}$.



Kuva 1. Silikageelillä päällystettyä adsorbenttikennostoa. /5/

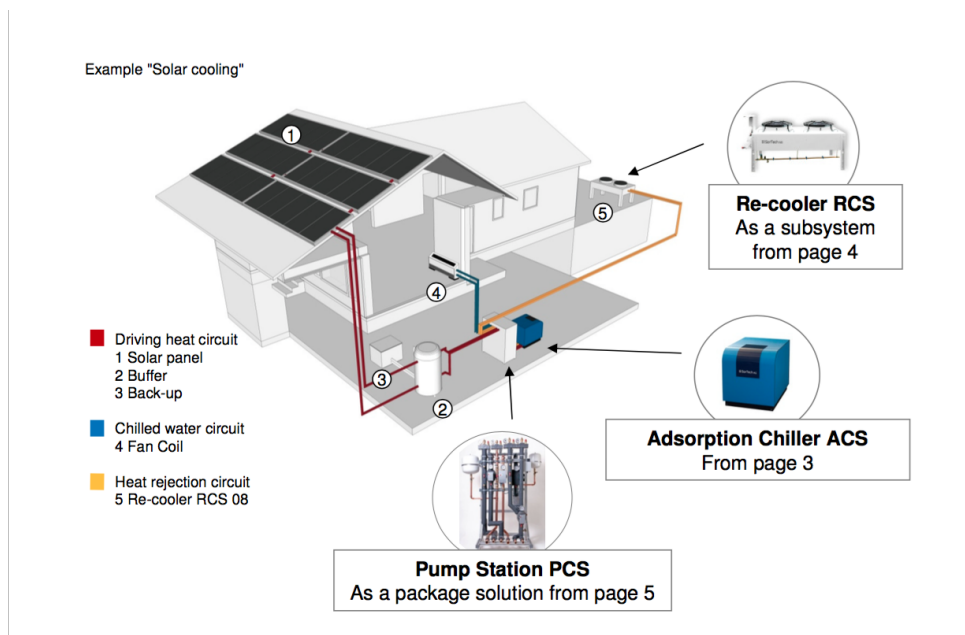
3 RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATTEET

SorTech ACS 08 -adsorptiojäähdytin on suunniteltu siten, että kulumisille alttiit liikkuvat osat on pyritty pitämään minimissä, jolloin huoltoja tarvitsee tehdä vain harvoin – ensimmäisen käyttövuoden jälkeen lähestulkoon ainoa vuosittainen huoltotoimenpide on jäähdytynyksikön tyhjiöiminen. Jäähdytynyksikön ainoat kulumalle alttiit liikkuvat osat ovatkin jäähdytynyksikön kammioita yhdistävät läppäventtiilit. /6/

3.1 Adsorptiojäähdytinjärjestelmän rakenne

Vaikka adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaate on suhteellisen yksinkertainen, koko jäähdytinjärjestelmä kattaa silti melko monta osaa. Nämä osat ovat:

1. Jäähdytynyksikkö, joka on järjestelmän pääkomponentti.
2. Pumppuyksikkö, joka kattaa kolme erillistä vesipiiriä.
3. Lämmönlähde, tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä tapauksessa aurinkokeräin.
4. Lämminvesivaraaja, joka varastoi lämmönlähteestä kerättyä lämpöenergiaa sekä toimii puskurina.
5. Kylmävesivaraaja, joka sekä jäähdyttää että varastoi prosessissa jäähdytettyä kylmää vettä.
6. Sisäyksikkö, jolla puhalletaan prosessissa jäähdytetty ilma viilennettävään huoneeseen.
7. Uudelleenjäähdytyspiiri, jonka tarkoitus on lauhduttaa adsorptiojäähdyttimen haihduttimessa syntynyt vesihöyry takaisin nestemäiseksi vedeksi, sekä viilentää adsorbointivaiheessa olevaa adsorptiokammiota. /6/



Kuva 2. Esimerkki jäähdytinjärjestelmäratkaisusta. /7/

3.1.1 Jäähdytinsikkö

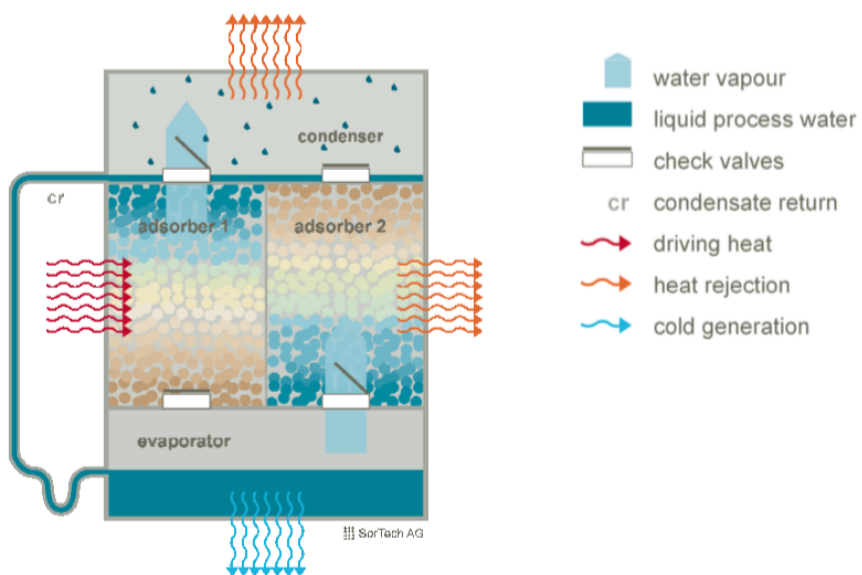
Pääkomponentti, itse jäähdytinsikkö, on jaettu sisältä neljään eri kammioon: haihdutin, adsorptiokammio 1, adsorptiokammio 2 sekä lauhdutin (**Kuva 4**). Kammiot on sijoitettu tyhiötiivistettyyn, lämpöeristettyyn metallikuoreen niin, että haihdutin on pohjimmaisena, adsorptiokammiot vierekkäin haihduttimen yläpuolella, ja lauhdutin ylimmäisenä. Kammio on alipaineistettu, jotta sen sisältämä vesi tarvitsisi pienemmän lämpötilan kiehuakseen. Jäähdyttimen alin toimintalämpötila on 55 °C. Lauhduttimesta johtaa putki haihduttimelle, jota pitkin kondensoitunut lauhdutin neste (vesi) pääsee takaisin kiertoon.

Kammiot ovat yhdistettyinä toisiinsa automaattisten läppäventtiilien kautta. Venttiilit säätelevät prosessissa kiertävän lauhdutin nesteen kulkua.

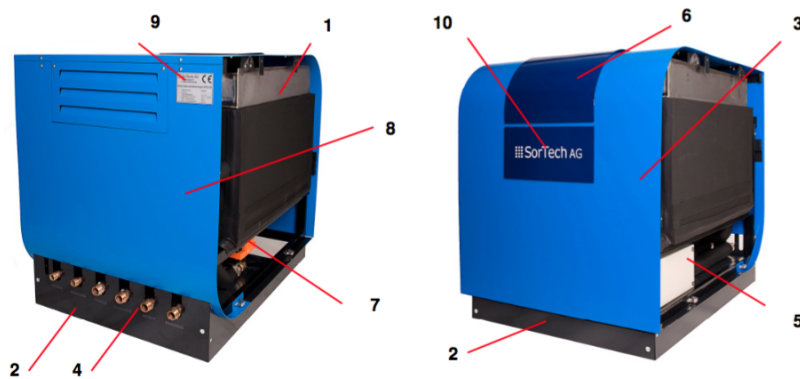
Adsorptiokammioiden sisällä on silikageeliä, joka vuoroin adsorboi ja vuoroin vapauttaa lauhdutin nestettä, prosessin vaiheesta riippuen. /6/



Kuva 3. SorTech ACS 08 -jäähdytysyksikkö Technobothnian kellarissa.



Kuva 4. ACS 08 -jäähdytysyksikön rakenne. /6/



Kuva 5. ACS 08 -jäähdytysyksikön komponentit selityksineen. /6/

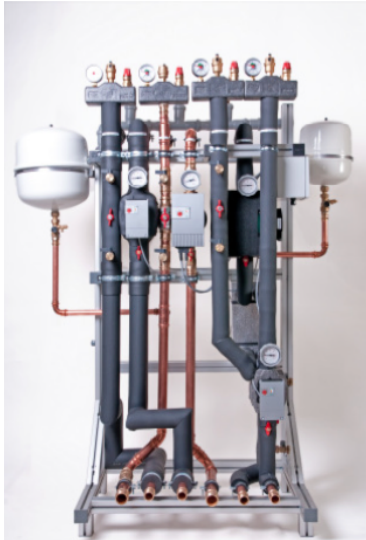
1 ACS-moduuli(t)	6 Käyttöpaneeli
2 Irrotettava aluslaatta	7 Kytkeyksikkö
3 Etupaneeli	8 Takakannen paneeli
4 Hydrauliset liittimet	9 Tyyppikilpi
5 Liitäntäkotelo	10 Ohjaimen luukku

3.1.2 Pumppuyksikkö

ACS 08 -jäähdytinsjärjestelmään kuuluu oma pumppuyksikkö, PCS 08, joka kattaa kolme vesipiiriä:

- Kuuma ajovesipiiri (**HT**), jolla saadaan lämpöenergiaa systeemiin desorptiota varten. Tämä lämpöenergia voidaan saada esimerkiksi aurinkokeräimistä, kaukolämmöllä tai teollisuuden hukkalämpönä.
- Uudelleenjäähdytyspiiri (**MT**), jonka tarkoitus on lauhduttaa haihduttimessa oleva vesihöyry takaisin nestemäiseksi vedeksi. Näin saatu nestemäinen vesi voidaan ohjata takaisin haihduttimeen. Piiri viilentää samanaikaisesti myös sitä adsorptiokammiota, mikä on kulloinkin adsorbointivaiheessa.
- Kylmävesipiiri (**LT**), jolla kuljetetaan prosessissa tuotettu kylmä vesi kylmävesivaraajalle, josta se ohjataan edelleen puhaltimille, joita käytetään hyväksi huoneilman jäähdyttämisessä. /6/

PCS 08 -pumppuyksiköstä on kolmea eri mallia, jotka on suunniteltu eri lauhdutinnestevaihtoehdoille. Technobothnialla sijaitsevassa laitteistossa käytetään mallia PCS 08-W, joka on suunniteltu käytettäväksi veden kanssa.



Kuva 6. PCS 08-W -pumppuyksikkö. /7/

3.1.3 Lämmönlähde

Adsorptiojäähdytin tarvitsee 55–95 °C vettä toimiakseen. Se, kuinka vesi lämmitetään, ei ole järjestelmän toiminnan kannalta relevanttia, mikä osaltaan lisää jäähdytinjärjestelmän joustavuutta. Tavallisesti lämmönlähteenä käytetään kaukolämpöä, teollisuuden hukkalämpöä tai auringon lämpöenergiaa. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä tapauksessa pääasiallisena lämmönlähteenä toimii Technobothnian katolla sijaitsevat, 120 tyhjiöputkesta koostuvat aurinkokeräimet.

Suomen maantieteellisestä sijainnista johtuen aurinkokeräimet eivät ole kuitenkaan optimi vaihtoehto opetuskäyttöön, sillä aurinkokeräimiltä saatu hyöty on korkeimmillaan kesäkuukausina, jolloin opetusta ei tavallisesti ole. Tämän vuoksi järjestelmän lämminvesivaraajaan on liitetty aurinkokeräinten rinnalle sähkövastus ympärivuotisen käytön mahdollistamiseksi.

3.1.4 Lämmin- ja kylmävesivaraajat

Lämminvesivaraaja toimii puskurina ja varastoi lämmönlähteestä saattua lämpöenergiaa. Lämminvesivaraajan sisältämä kuuma vesi ajetaan pumppuyksikön kautta jäähdytinsyksikölle.



Kuva 7. 400 litran Akvaterm-lämminvesivaraaja Technobothnian kellarissa.




Kuva 8. Akvaterm-lämminvesivaraajan tekniset tiedot.

Jäähdytynyksikössä tuotettu kylmä vesi ajetaan kylmävesivaraajalle, joka sekä varastoi että jäähdyttää sinne tuotua vettä. Kylmävesivaraajan sisältämää kylmää vettä voidaan käyttää huoneilman jäähdyttämiseen, sekä tarvittaessa jäähdytinjärjestelmän prosessien jäähdyttämiseen. Kylmävesivaraajan käyttö ei ole pakollista, mutta se takaa jatkuvan jäähdytysilman saamisen myös prosessien välivaiheiden aikana.



Kuva 9. 750 litran Akvaterm JV-750 E -kylmävesivaraaja Technobothnian kellarissa.

JV-750 E			
Valm.nro Tiliv.nr Manufacturing no.	53297	Vuosi Ar Year	2012
Säilio Tank Vessel		Kierukka Batteriberedare Coil	
Max. lämpötila Max. temp. C	65		
Min. lämpötila Min. temp. C	- 10		
Max. käyttöpaine Max. tryck Mpa Max. pressure	0,3		
Tilavuus Volym Volume	750		
 AKVATERM OY Janismaantie 12 67800 Kokkola FINLAND Tel. +358-6-824 4200 Fax. +358-6-824 4224 info@akvaterm.fi www.akvaterm.fi			

Kuva 10. Akvaterm JV-750 E -kylmävesivaraajan tekniset tiedot.

3.1.5 Sisäyksikkö

Sisäyksikkö on puhallin, jonka lauhduttimeen syötetään jäähdyttimellä tuotettua kylmää vettä kylmävesivaraajasta, jonka läpi ilma sitten puhalletaan. Kulkeutuessaan syötetyn veden läpi, puhallettu ilma luovuttaa lämpöä lauhduttimelle, luoden näin viilennettyä huoneilmaa. Puhallin voi sijaita esimerkiksi jäähdytettävän huoneen katossa.



Kuva 11 - Technobothnialla käytettävän sisäyksikön puhallin.

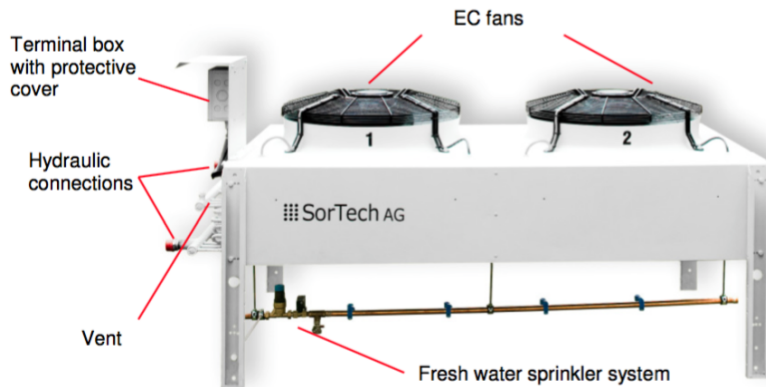
3.1.6 Uudelleenjäähdytys

Adsorptiojäähdytinjärjestelmä tarvitsee toimiakseen tehokkaan uudelleenjäähdytyksen, jolla saadaan siirrettyä systeemistä pois sekä kuumavesivaraajalta pumpatun kuuman veden sisältämä lämpöenergia, että jäähdytetystä vedestä sitoutunut lämpöenergia. SorTech ACS 08 - adsorptiojäähdytin käyttää uudelleenjäähdytysyksikkönä varta vasten jäähdytinlaitteistoa varten suunniteltua RCS 08 -uudelleenjäähdytysyksikköä.

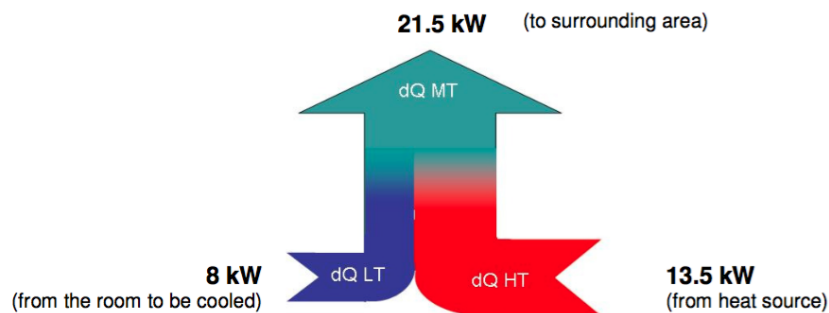
Uudelleenjäähdytyspiirin tarkoituksena on lauhduttaa adsorptiojäähdyttimen haihduttimessa syntynyt vesihöyry takaisin nestemäiseksi vedeksi, sekä viilentää sitä adsorbenttikammiota mikä kulloinkin on adsorbenttivaiheessa.

Pumppuyksikön uudelleenjäähdytyspiiri (MT) siirtää veteen sitoutuneen lämpöenergian uudelleenjäähdyttimen ulkoyksikölle, joka vapauttaa lämpöenergian ulkoilmaan. Ulkoyksikköön on myös liitetty sprinkleri, joka

suihkuttaa vettä jäähdytysäleikköön. Veden haihtuessa ulkoilmaan se sitoo lämpöenergiaa jäähdytysäleiköstä, jolloin jäähdytysäleikkö jäähtyy tehokkaasti. Ulkoyksikkö sijaitsee Technobothnian tapauksessa rakennuksen katolla. /6/



Kuva 12. RCS 08 -uudelleenjäähdytysyksikkö. /6/



Kuva 13. Uudelleenjäähdytyspiirin tehontarve. /6/

3.2 Adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaate

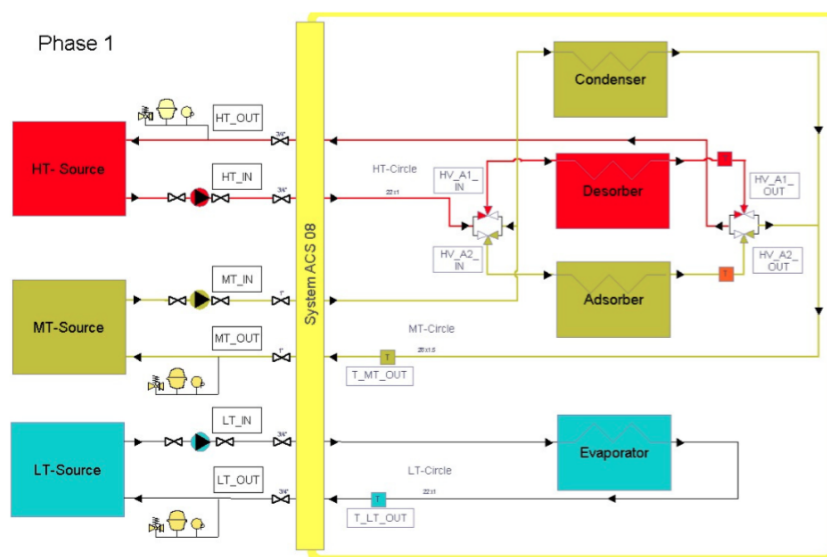
Jäähdytysprosessi kattaa neljä eri vaihetta, kaksi päävaihetta ja kaksi välivaihetta. Välivaiheet toimivat eräänlaisena siirtymävaiheena kahden päävaiheen välillä.

3.2.1 Vaihe 1

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa adsorptiokammion 1 läpi ajetaan kuumaa vettä lämminvesivaraajalta, mikä lämmittää kammiota. Kammion sisältämään silikageelin pintaan adsorboitunut vesi höyrystyy, nostaen kammion painetta. Paineen nousun ansiosta kammion 1 ja lauhduttimen välinen läppäventtiili aukeaa,

vapauttaen vesihöyryyn lauhduttimelle, jolloin se kondensoituu viilennetyssä lauhduttimessa takaisin nestemäiseen muotoon. Kondensaatiossa vapautunut lämpöenergia poistetaan uudelleenjäähdytyspiiriin (**MT**) kautta. Tämän vaiheen aikana haihduttimen ja adsorptiokammio 1:n välinen venttiili on suljettuna ja adsorptiokammio 1:n ja lauhduttimen välinen venttiili on avoinna. Nesteydyttään lauhduttimella lauhdutinvesi ohjataan takaisin haihduttimelle uudelleenhöyrystämistä varten. Höyrystyessään vesi sitoo itseensä lämpöä haihduttimessa olevasta kylmävesipiiriin lämmönvaihtimesta, jäähdyttäen näin kylmävesipiiriin vettä.

Samanaikaisesti uudelleenjäähdytyspiiri jäähdyttää adsorptiokammiota 2, jotta sen sisältämä silikageeli pystyisi adsorboimaan mahdollisimman haihduttimesta vapautuvaa, höyrystynyttä lauhdutinnestettä. Haihduttimen ja adsorptiokammio 2:n välinen venttiili on avoinna, ja adsorptiokammio 2:n ja lauhduttimen välinen venttiili on suljettuna. /6/

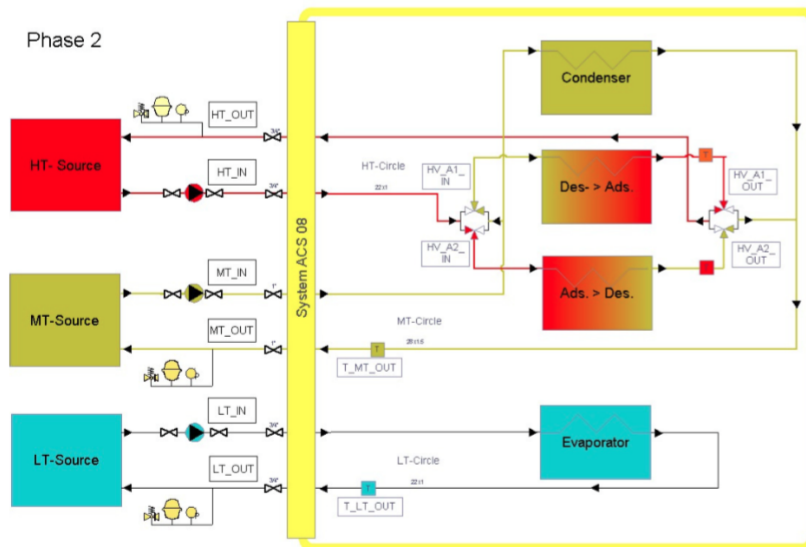


Kuva 14. Jäähdytysprosessin vaihe 1. /6/

3.2.2 Vaihe 2

Vaiheessa 2 molempien adsorptiokammioiden vedenkierto yhdistetään, tasaten näin tehokkaasti kammioiden keskinäiset lämmöt lähelle toisiaan ilman erillistä energiansyöttöä. Tämän vaiheen aikana kaikki läppäventtiilit ovat suljettuina.

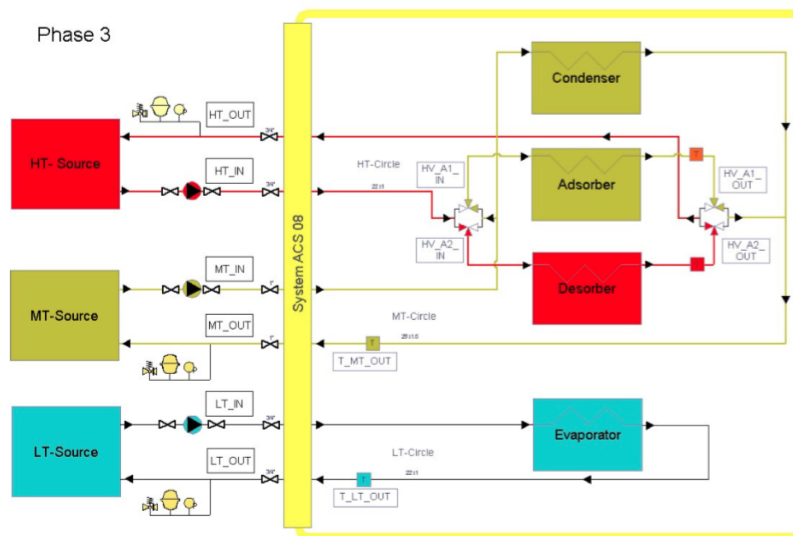
Vasta kun kammioiden keskinäiset lämpötilat ovat tasaantuneet, voidaan siirtyä vaiheeseen 3. /6/



Kuva 15. Jäähdytysprosessin vaihe 2. /6/

3.2.3 Vaihe 3

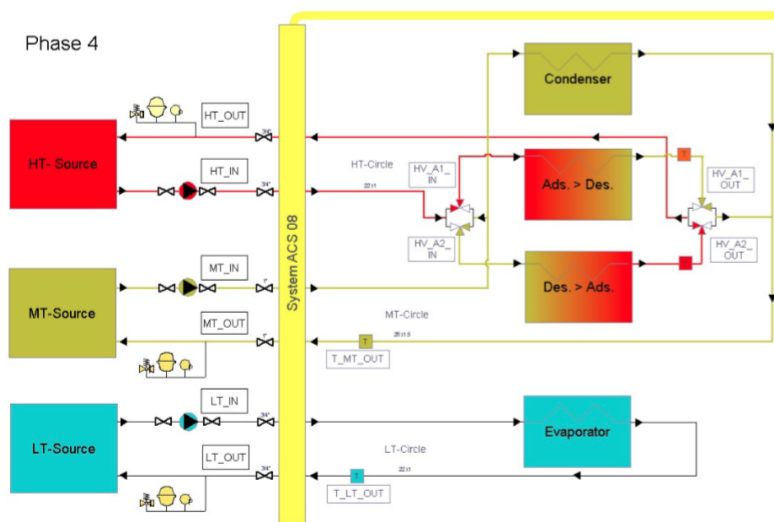
Vaiheessa 3 adsorptiokammiota 1 jäähdytetään uudelleenjäähdytyspiirin avulla, ja kammion sisältämä silikageeli adsorboi haihduttimesta vapautuvaa vesihöyryä, ja adsorptiokammiota 2 kuumennetaan kuumavesipiirin avulla, jotta kammion sisältämä silikageeli vapauttaisi vaiheessa 1 adsorboimansa veden lauhduttimelle. Vaihe 3 on siis ”peilikuva” vaiheesta 1 – toiminta on identtinen mutta tapahtuu päinvastaisissa kammioissa vaiheeseen 1 verrattuna. /6/



Kuva 16. Jäähdytysprosessin vaihe 3. /6/

3.2.4 Vaihe 4

Samoin kuin vaihe 1 ja vaihe 3 ovat keskenään samanlaisia, myös vaihe 4 on samanlainen vaiheen 2 kanssa. Vaihe 4 on viimeinen vaihe jäähdytysprosessin kierrossa, joka kestää noin 15 minuuttia. Tämän jälkeen jäähdytysprosessi alkaa alusta. /6/



Kuva 17. Jäähdytysprosessin vaihe 4. /6/

3.3 Jäähdytinsijärjestelmän tekniset tiedot

ACS 08	
Nimellinen jäähdytysteho	8,0 kW
Nimellinen COP-arvo	0,6
Maksimi jäähdytysteho	11,0 kW
Kylmävesipiiri (LT)	
Lämpötila-alue (ulos):	6–20 °C
Lämpötila sisään/ulos	18/15 °C
Tilavuusvirta	2 m ³ /h
Painehäviö	300 mbar
Maksimi käyttöpain	4 bar
Uudelleenjäähdytyspiiri (MT)	
Lämpötila-alue (ulos):	22–37 °C
Lämpötila sisään/ulos	27/32 °C
Tilavuusvirta	3,7 m ³ /h
Painehäviö	350 mbar
Maksimi käyttöpain	4 bar
Kuuma ajovesipiiri (HT)	
Lämpötila-alue (ulos):	55–95 °C
Lämpötila sisään/ulos	72/65 °C
Tilavuusvirta	1,6 m ³ /h
Painehäviö	230 mbar
Maksimi käyttöpain	4 bar
Sähkönsyöttö	
Jännite	230 ~ V
Taajuus	50 Hz
Tehon kulutus	7 W
Mitat	
Pituus x Leveys x Korkeus	790 x 1060 x 940 mm
Massa (tyhjänä)	265 kg
Massa (käytössä)	295 kg

Taulukko 1. ACS 08 -jäähdytinsijärjestelmän tekniset tiedot nimellisessä toimintapisteessä. /6/

RCS 08	
Uudelleenjäähdytysteho	21 kW
Tuulettimet	2 x EC fans 650
Ilmanottolämpötila	24,5 °C
Standardi signaalin kierron ohjaus	0–10 V
Äänenpaine 10 m jälkeen	43 dB(A)
Uudelleenjäähdytyspiiri (MT)	
Uudelleenjäähdytyskeino	Vesi (R718)
Nimellinen tilavuusvirta	3,7 m ³ /h
Nimellisen tilavuusvirran painehäviö	150 mbar
Maksimi käyttöpaine	4 bar
Hydrauliliitäntä, sisään- / ulosvirtaus	22,0 * 1,0 mm
Veden ruiskutus	
Veden käyttö, maksimi	4 m ³ /a
Maksimi käyttöpaine	min. 3–6 bar
Hydrauliliitäntä	22,0 * 1,0 mm
Syöttöteho, mitat & paino	
Vaadittu virtalähde	230~ V
Taajuus	50 Hz
Maksimi tehon kulutus	0,65 kW
Leveys x pituus x korkeus	2000 x 1145 x 950 mm
Paino (tyhjänä)	188 kg
Paino (käytössä)	219 kg

Taulukko 2. RCS 08 -välijäähdytysyksikön tekniset tiedot nimellisessä toimintapisteessä. /6/

4 JÄRJESTELMÄÄN LIITETYT MITTAUSLAITTEET

Koska tässä opinnäytetyössä käsiteltävä adsorptiojäähdytinjärjestelmä on hankittu pääasiassa koulutustarkoituksessa, on tärkeää, että järjestelmässä kulkevaa energiaa ja muuta dataa voidaan tallentaa ja analysoida mahdollisimman vaivattomasti. Tätä tarkoitusta varten jäähdytinjärjestelmään on asennettu kolme Kampstrup Multical 302 -energiamittaria, yksi jokaiseen vesipiiriin (HT, MT, LT) putkeen. Nämä ovat vuorostaan kytketty ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus -energia-analysointoriin, joka helpottaa energiamittareista kerätyn datan analysoimista.

4.1 Kampstrup Multical 302

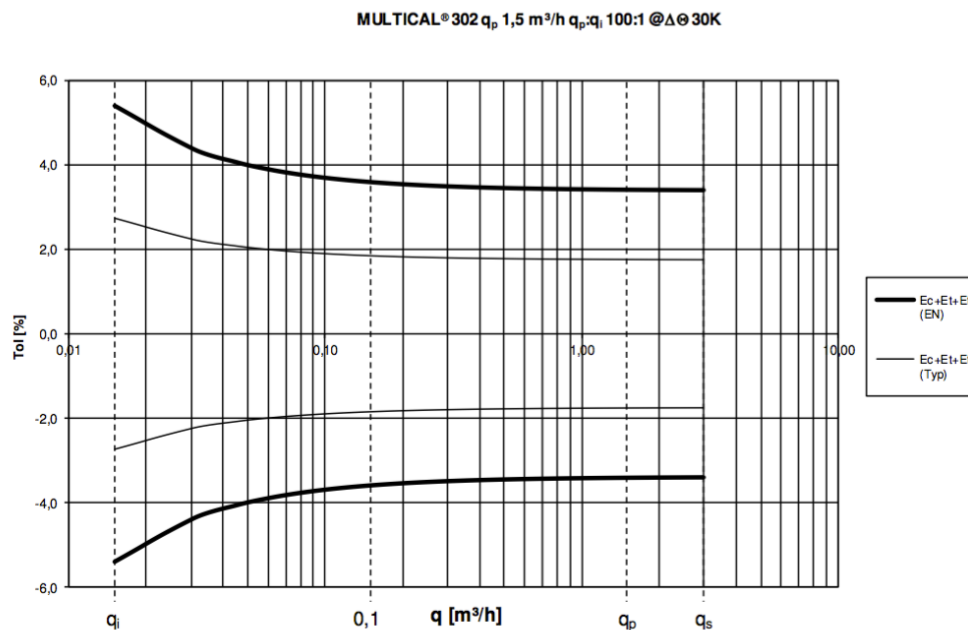
Kampstrupin valmistama Multical 302 -mittari on ultraääniperiaatteella toimiva lämpö-/jäähdytysmittari, joka on tarkoitettu käytettäväksi energian mittaamiseen lähes kaiken tyyppisissä lämpölaitteistoissa, joissa vettä käytetään energiansiirtovälineenä. /8/



Kuva 18. Kampstrup Multical 302 -mittarit kytkettyinä vesipiiriin.

Mittari käyttää tilavuuden mittaamiseen ultraäänitekniikkaa, joka perustuu läpimenoaikamenetelmään. Tässä menetelmässä kaksi ultraäänianturia lähettävät äänisignaalia, toinen virtauksen mukaisesti ja toinen virtausta vastaan. Virtauksen

mukaisesti kulkeva signaali saavuttaa vastakkaisen anturin ensin, jolloin signaalien välille muodostuu aikaero. Tämä kahden signaalin välinen aikaero voidaan muuntaa virtausnopeudeksi ja siten myös tilavuudeksi. Lämpötilan mittaamiseen mittari käyttää Pt500-anturiparia, joista toinen on asennettu virtausanturiin suoraan tehtaalla, ja toinen voidaan asentaa esimerkiksi palloventtiiliin. /8/



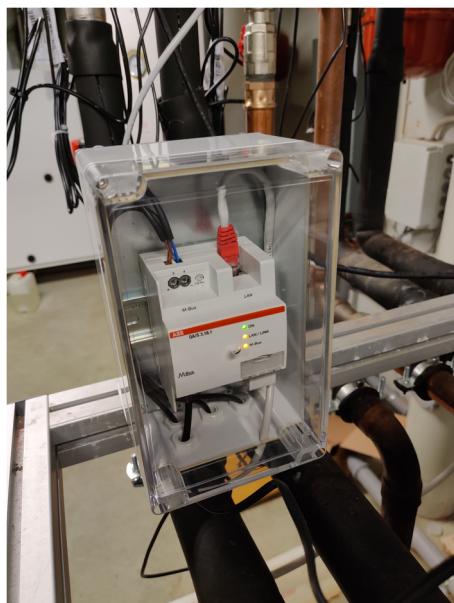
Heat meter components	MPE according to EN 1434-1	MULTICAL® 302, typical accuracy
Flow sensor	$E_f = \pm (2 + 0.02 q_p/q) \%$	$E_f = \pm (1 + 0.01 q_p/q) \%$
Calculator	$E_c = \pm (0.5 + \Delta\theta_{\min}/\Delta\theta) \%$	$E_c = \pm (0.15 + 2/\Delta\theta) \%$
Sensor pair	$E_t = \pm (0.5 + 3 \Delta\theta_{\min}/\Delta\theta) \%$	$E_t = \pm (0.4 + 4/\Delta\theta) \%$

Kuva 19. Multical 302 -mittarin tarkkuus. /8/

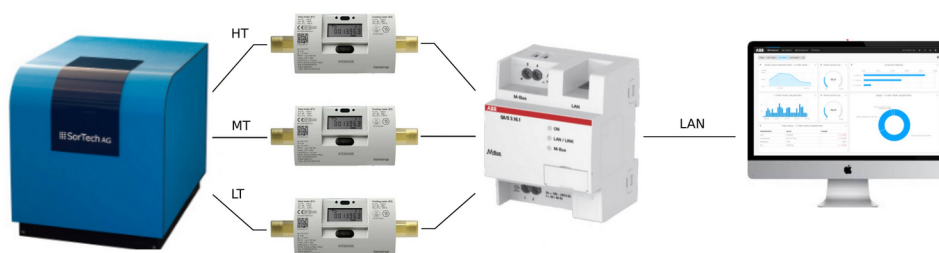
4.2 ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus

ABB EQmatic -energia-analysaattorit on suunniteltu seuraamaan ja näyttämään kulutusta ja mitattuja arvoja. Käytännössä ne kirjaavat ja tallentavat kulutustietoja sähkö-, kaasu-, vesi tai lämpömittareista. Ne helpottavat tekemään rakennusten energiakulutuksesta ja -kustannuksia läpinäkyviä ja helposti seurattavia. /9/

Analysaattoria käytetään verkkoselaimen (integroidun verkkopalvelimen) kautta. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä tapauksessa kytkentä on toteutettu seuraavasti: adsorptiojäähdytyslaitteistoon on liitetty kolme erillistä Multical 302 -energiamittaria, jotka ovat yhdistettynä ABB EQmatic -energia-analysaattoriin, joka on yhdistettynä ethernet-kaapelilla tietokoneeseen, jonka kautta analysaattoria ohjataan (Kuva 21).



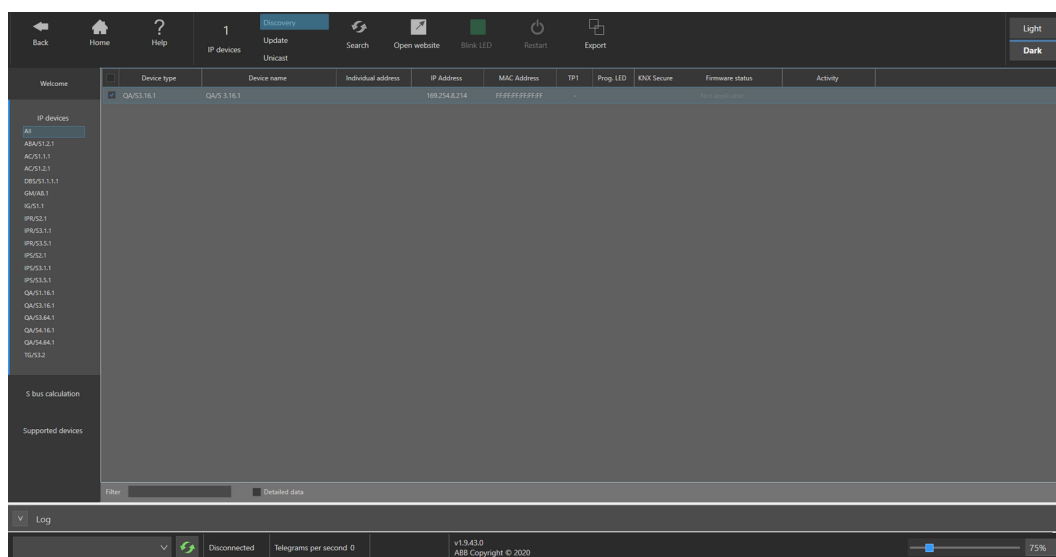
Kuva 20. ABB QA/S3.16.1 M-Bus -energia-analysaattori.



Kuva 21. Mittauslaitteiden kytkentä yksinkertaistettuna.

4.3 ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S3.16.1 M-Bus -käyttöliittymä

Laitteistossa käytettävää energia-analysaattoria kontrolloidaan selaimessa toimivalla käyttöliittymällä, jota varten tietokoneen ja energia-analysaattorin välillä täytyy olla toimiva IP-yhteys. Helpoiten tämä yhteys muodostetaan ethernet-kaapelilla, miten Technobothniankin tapauksessa on toimittu. Yhteys käyttöliittymään muodostetaan ABB i-bus® Tool -ohjelman avulla, jonka voi ladata ilmaiseksi. Ohjelma etsii automaattisesti IP-laitteita lähiverkosta. Löydettyään halutun laitteen, käyttäjä valitsee sen ja klikkaa ”Open Website” -painiketta, jolloin selainsivu aukeaa ja käyttöliittymään pääsee käsiksi (Kuva 22). /9/



Kuva 22. ABB i-bus® Tool.

Tämän jälkeen, ensimmäisen käyttökerran yhteydessä käyttöliittymään, konfiguroidaan uudet kirjautumistiedot (oletuskäyttäjänimi sekä oletussalasana ovat molemmat ”admin”), internetasetukset (jos se on tarpeen), aika- ja päivämääräasetukset sekä halutut tiedot mitatun kulutuksen laskemiseksi (valuutta, kulutuksen hinta sekä kulutuksen yhteydessä tuotettu hiilidioksidimäärä). Näitä kulutustietoja voi myöhemminkin muuttaa, eikä niiden asettaminen alkukonfiguraatiossa ole pakollista.

Näiden tietojen asettamisen jälkeen voi etsiä energia-analysaattoriin liitettyjä mittareita. Hakuparametreja voi rajata esimerkiksi baudinopeuden (1 200–115 200 baudia) ja osoitealueen (1–247) mukaan (kuva 23). Haun nopeuttamiseksi on hyvä selvittää mittareiden baudinopeus esimerkiksi mittarin manuaalista. /9/ Esimerkiksi Technobothnialla käytettävissä Kampstrup Multical 302 -mittareissa käytetään baudinopeuksia 300 sekä 1 200, jolloin haun voi rajata tälle baudinopeusalueelle /8/.

The image contains two screenshots of a web-based scanning interface. Both screenshots show a progress indicator 'Completed: 71%' in the top right corner.

The top screenshot is titled 'Scanning' and shows configuration options for a scan. It has two tabs: 'Primary' (selected) and 'Secondary'. Under 'Primary', there are two rows of input fields:

- 'Speed range (baude rate)': The first dropdown is set to '300' and the second to '9600'.
- 'Address range': The first input field contains '1' and the second contains '250'.

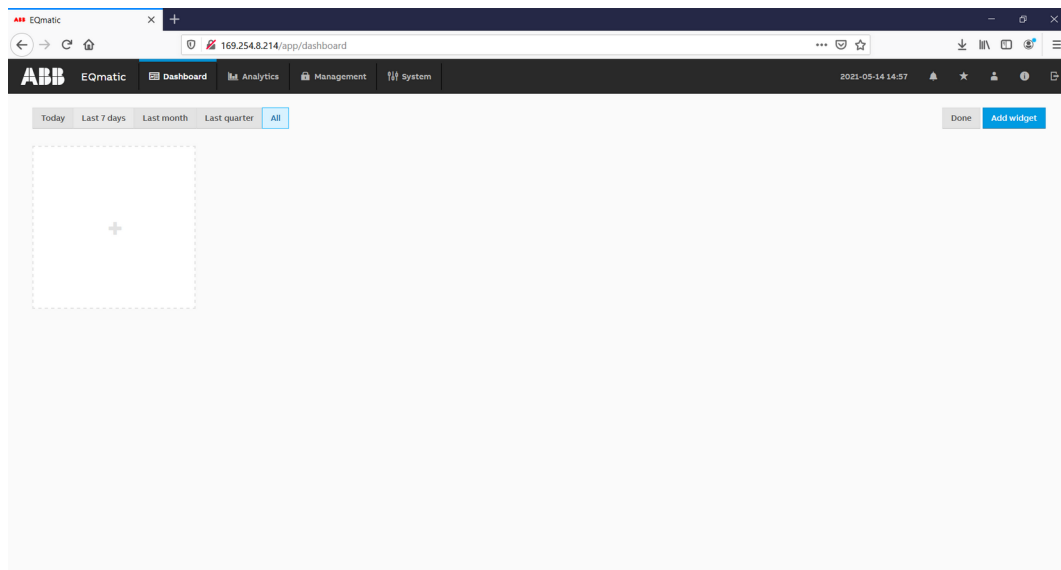
 At the bottom right, there are two buttons: 'Skip' (disabled) and 'Scan' (active), with a red arrow pointing to the 'Scan' button.

The bottom screenshot is also titled 'Scanning' and shows the results of the scan. It has the same 'Completed: 71%' indicator. At the bottom right, there are two buttons: 'Skip' (disabled) and 'Next step' (active), with a red arrow pointing to the 'Next step' button. Below the buttons is a tree view showing a 'root' folder containing two items:

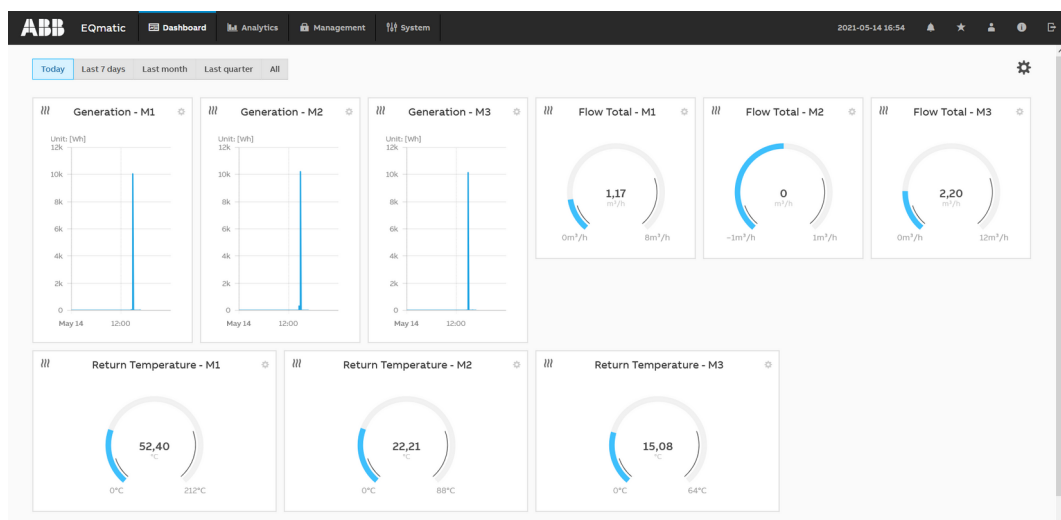
- ABB B21 313-100 (#00406880)
- ABB B21 113-100 (#00398010)

Kuva 23. M-Busiin liitettyjen mittareiden hakeminen. /9/

Kun halutut mittarit ovat löytyneet, konfiguraatio on valmis ja käyttöliittymä on käyttövalmis. Tällöin käyttäjällä on pääsy käyttöliittymän dashboard-välilehdelle (kuva 24), johon käyttäjä voi lisätä erilaisia pienoishelmia (Add widget -painikkeella), joilla voi seurata ja analysoida mittareiden keräämää dataa halutussa muodossa.



Kuva 24. Käyttöliittymän Dashboard-näkymä ennen pienoisohjelmien lisäämistä.



Kuva 25. Käyttöliittymän Dashboard-näkymä pienoisohjelmilla.

Adsorptiojähdyttimen opetuskäytön kannalta keskeisiä tietoja ovat tuotettu (ja kulutettu) energia, virtauksen määrä putkissa sekä putkissa virtaavan veden tulo- ja paluulämpötilat. Kuvassa 25 Dashboard-näkymään on lisätty muutamat näistä pienoisohjelmista esimerkin vuoksi.

5 LABORATORIOHARJOITUSTYÖ OPISKELIJOILLE

Alun perin suunnitelmana oli saada jäähdytys- sekä mittauslaitteisto täyteen toimintakuntoon, jonka jälkeen laitteistolla voisi suorittaa erinäisiä testimittauksia, joiden perusteella laboratoriotyöohje olisi tehty. Laitteiston käyttöönoton yhteydessä ilmeni kuitenkin erinäisiä teknisiä ongelmia, joiden takia esimerkiksi testimittausten tekeminen ei tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikaan ollut vielä mahdollista. Tämän vuoksi lopullinen laboratorioharjoitustyö perustuu enemmän teoreettisiin tietoihin ja arvoihin kuin oli alun perin tarkoitus.

5.1 Harjoitustyön suunnittelu

Halusin lähteä suunnittelemaan laboratorioharjoitustyötä sillä ajatuksella, että oppilaan ei tarvitse tietää laitteesta juuri mitään ennen laboratorioharjoituksen tekemistä. Harjoituksen tarkoituksena olisi siis oppilaan tutustuttaminen laitteen toimintaperiaatteisiin sekä käyttöön. Halusin myös, että laboratorioharjoitus olisi mahdollista toteuttaa mittauksineen ja laskuineen yhden oppitunnin aikana.

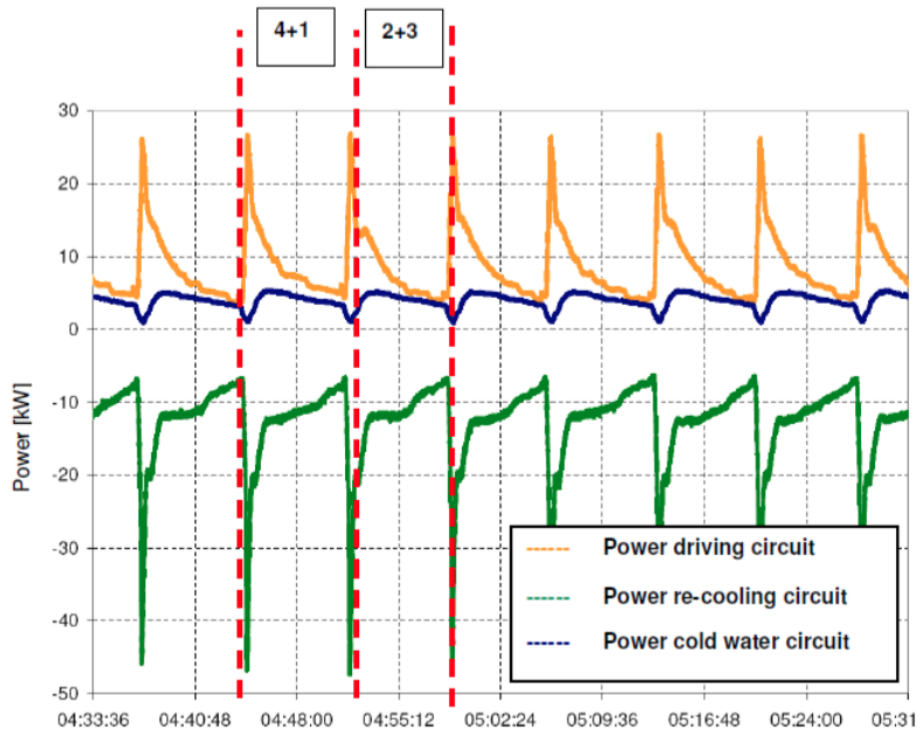
5.2 Toteutunut laboratorioharjoitustyö (Liite 1)

Ensimmäisessä tehtävässä oppilaan tehtävä olisi vesipiirien lämpötiloja seuraamalla päätellä, mikä vesipiirin putkista on mikäkin, sekä näiden vesipiirien käyttötarkoitus jäähdytyslaitteistossa. Erityisesti tässä halusin oppilaan ymmärtävän uudelleenjäähdytyspiirin käyttötarkoituksen ja sen tärkeyden jäähdytyslaitteistossa.

Toisen tehtävän tarkoituksena oli havainnoida oppilaalle jäähdytinjärjestelmän toiminnan syklistyyttä. Käytännössä tehtävässä oppilas seuraisi energia-analysaattorin käyttöliittymän avulla vesipiirien tehoja yhden jäähdytysyklin ajan, kirjaten arvot ylös minuutin välein. Näistä arvoista oppilaan tulisi huomioida, että ajovesi- sekä uudelleenjäähdytyspiireissä ilmenee tehopiikkejä kahdesti syklin aikana, kylmävesipiirin tehokäyrän pysyessä huomattavasti tasaisempina (kuva 26). Tehopiikit sekä niiden laskut ilmentävät jäähdytysyklissä tapahtuvia välivaiheita, jolloin ei adsorptiota eikä desorptiota

tapahdu. Tehtävän luomisessa olisin halunnut käyttää omia mittauksia, jolloin olisin voinut itse todeta tehopiikkien syntymisen, mutta tilanteen pakosta jouduin nyt tyytymään valmistajan tarjoamaan dataan.

Fig. 14: Example of ACS Power Distribution



Kuva 26. Adsorptiojäähdyttimen vesipiirien tehokäyrät. /6/

Kolmannessa tehtävässä halusin tuoda esille jäähdytyslaitteen ajo- ja jäähdytystehoa. Tehtävässä oppilaan tulisi kirjata ylös jollakin ajan hetkellä kuuma- ja kylmävesipiirien tulo- ja paluulämpötilat sekä virtaukset, jonka jälkeen oppilas laskisi saatuja arvoja hyväksi käyttäen ensin vesipiireissä syntyneet energiat, jotka voisi edelleen laskea tehoiksi. Laskettuja tehoarvoja oppilas voisi hyödyntää edelleen seuraavassa tehtävässä. Oppilaille annettaisiin lisäksi etukäteisarvona veden ominaislämpökapasiteetti, joka on tehtävässä pyöristetty arvoon $4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, veden oletettu tiheys, $1\,000 \text{ kg/m}^3$, sekä kaava $E = mc \Delta T$, missä

m = aineen massa

c = ominaislämpökapasiteetti

ΔT = lämpötilan muutos.

Virtauksesta oppilas pystyy laskemaan veden massan veden tiheyttä hyväksi käyttäen. Tähänkin tehtävään oli tarkoitus tehdä omia mittauksia, mutta teknisistä ongelmista johtuen se ei ollut mahdollista.

Neljännessä, ja viimeisessä, tehtävässä halusin kiinnittää oppilaan huomion laitteiston melko poikkeukselliseen COP-arvoon, joka on todella paljon alhaisempi verrattuna esimerkiksi kompressiolla toimivaan ilmalämpöpumppuun. Tässä tehtävässä oppilaan tehtävänä on laskea aiempien mittausten perusteella saatujen arvojen avulla jäähdyttimen hetkellinen hyötysuhde, COP-arvo. Tämän

oppilas laskee esimerkiksi annetulla kaavalla $\eta = \frac{W_c}{W_d}$, missä

W_c = jäähdytysteho

W_d = ajoteho.

Oppilaalle kerrotaan lisäksi, että nykyaikaisten kompressiolla toimivien ilmalämpöpumppujen hyvänä COP-arvona jäähdytyskäytössä pidetään arvoja arvosta 3,5 ylöspäin, ja kerrotaan vertaamaan tätä laskemaansa COP-arvoon, sekä selittämään mistä tämä johtuu. /10/

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Adsorptiojäähdyttimet tulevat tuskin koskaan saavuttamaan Suomessa kovin suurta suosiota jäähdytysratkaisuna. Järjestelmä on melko kallis ja työläs asentaa, kattaen muun muassa oletettavasti kalliita putkiasennuksia. Lisäksi Suomessa sisäilman jäähdytystä tarvitaan vain verrattain pienen osan vuodesta. Laitteen matala COP-arvo myös tarkoittaa sitä, että jäähdyttimen käyttämän lämpöenergian tulee olla käytännössä ilmaista, jotta laitteiston käyttäminen olisi taloudellisesti järkevää. Kuitenkin, jos lämmönlähteenä olisi vaikka teollisuuden hukkalämpö tai oikein mitoitettut aurinkokeräimet, sekä jäähdytettävänä kohteena jatkuvaa viilennystä vaativa tila, voisi adsorptiojäähdyttimen käyttö olla järkevää ja kustannustehokasta.

Ilmiönä adsorption käyttö jäähdyttämisessä on mielenkiintoinen, ja adsorptiojäähdyttimen käyttö opetuskäytössä on perusteltua. On harmittavaa, että laitteiston käytössä ilmenneet ongelmat estivät suunnitellut mittaukset, joilla olisi varmasti saatu kerättyä paljon mielenkiintoista ja hyödyllistä dataa tulevaa opetuskäyttöä ajatellen. Laitteen saattaminen toimintakuntoon ja opetuskäytön mahdollistaminen on kuitenkin täysin tehtävissä, vaikkei sitä olekaan saatu tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikana vielä kokonaan valmiiksi.

6.1 Käyttöönnotossa ilmenneet tekniset ongelmat

Opinnäytetyöprojektin alkaessa jäähdytyslaitteiston käyttöönotto oli pahasti kesken, eikä laitteistoa kyetty kunnolla käyttämään, eikä näin ollen myöskään suorittamaan mittauksia. Selvisi, että jäähdytinsikkö tulisi tyhjiöidä, jotta käytön voisi aloittaa. Selvisi myös, että putkiston paineet olivat huomattavasti vaadittua alhaisemmat. Myöskin mittareiden sekä energia-analysaattorin käyttöönotto oli keskeneräinen; mittarit sekä energia-analysaattori oli kyllä asennettuina, mutta käyttöön vaadittua ohjelmaa ei oltu asennettu eikä näin ollen mittareitakaan oltu konfiguroitu. Kun kaikki tämä oli saatettu toimintakuntoon, ilmeni energia-analysaattorin ja ABB i-bus Tool -ohjelman välillä yhteysongelma; ohjelma ei kyennyt löytämään energia-analysaattorin IP-osoitetta. Tämä ongelma ratkesi energia-analysaattorin manuaalisella uudelleenkäynnistämisellä. Kun tämä

yhteysongelma oli saatu korjattua ja yhteys energia-analysointin käyttöliittymään saatu muodostettua, ilmeni seuraava ongelma käyttöliittymän dashboard-sivulle lisättävissä pienoishjelmissä. Lähestulkoon aina pienoishjelmat eivät saaneet luotua yhteyttä energia-analysointin kautta mittareihin, jolloin dataa ei ollut mahdollista kerätä. Ongelmaa ei ole saatu kokonaan ratkaistua tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikaan, mutta epäilen senkin johtuneen yhteysongelmista mittareiden, energia-analysointin ja tietokoneen välillä. Erikoista ongelmassa oli se, että yhteysongelma ilmeni todella harvoin, jos koskaan, vesipiirien energiantuottoa kuvastavissa pienoishjelmissä (kuvassa 25 ylärivin kolme ensimmäistä pienoishjelmaa), mutta kaikissa muissa mitä näkymään yritettiin lisätä. Lisäksi tässä vaiheessa jäähdytinsyöntein tyhjiöimisen yhteydessä tehdystä putkiston paineistuksesta oli kulunut jo sen verran aikaa, että putkiston paineet olivat jälleen tippuneet vaadittua alhaisemmiksi. Todennäköisin syy tähän on vuoto jossain kohtaa putkistoa. Toinen mahdollinen selitys on lauhdutusnesteen ajoittainen kiehuminen aurinkokeräimissä ja höyrystyneen veden vuoto ulos systeemistä. Näistä syistä johtuen opinnäytetyöhön aiotut mittaukset jäivät puutteellisiksi, kuvan 25 olleen ainoa dokumentoitu tilanne, jossa kaikissa senhetkissä pienoishjelmissä näkyi jonkinlaista dataa. Tosin tämäkään data ei todennäköisesti ole kovin relevanttia, sillä dokumentoimishetkellä adsorptiojäähdytin ei käynyt kunnolla putkistojen liian alhaisten paineiden vuoksi.

LÄHTEET

- /1/ Sapkota, A. 2020. Absorption vs Adsorption- Definition, 10 Major Differences, Examples. Viitattu 29.04.2021.
<https://microbenotes.com/absorption-vs-adsorption/>
- /2/ Chromatography Today. Verkko-julkaisu. 2014. Adsorption, Absorption and Desorption - What's the Difference? Viitattu 03.05.2021.
<https://www.chromatographytoday.com/news/hplc-uhplc/31/breaking-news/adsorption-absorption-and-desorption-what39s-the-difference/31397>
- /3/ Greenwood, N.N. & Earnshaw, A. 1997. Chemistry of the Elements. Toinen painos. Oxford. Elsevier.
- /4/ GIEBEL FilTec. 2016. Fundamentals for the regeneration of silica gel. Viitattu 13.05.2021.
https://blog.giebel-adsorber.de/wp-content/uploads/2020/02/Silicagel_Fundamentals-Regeneration-Of-Silicagel_EN.pdf
- /5/ SorTech AG Cold from Heat with Adsorption Chillers Brochure 2010. Viitattu 13.05.2021
- /6/ SorTech AG Adsorption Chiller Design Manual ACS 08/ACS15 2010. Viitattu 05.05.2021.
- /7/ SorTech AG Cold from Heat Product Catalogue 2011. Viitattu 11.05.2021.
- /8/ Kampstrup Multical 302 Technical Description Manual 2016. Viitattu 08.05.2021.
- /9/ Reibel, T., Schilder, J., Grosse, S., Wichary, M. & Zivadinovic, I. 2019 Webinar ABB EQmatic Energy Analyzer QA/S, M-Bus and Modbus [webinaari-esitelmä]. 11.07.2019. ABB.
- /10/ RefGroup. Energian säästö ja lämpökertoimet. Viitattu 26.05.2021.
<http://www.ilmalampopumput.fi/fi/mika-ihmeen-lampopumppu/energiansaasto>

LIITE 1.

LABORATORIOHARJOITUS ADSORPTIOJÄÄHDYTTIMEN KÄYTTÖÖN

Johdanto

Tämän laboratorioharjoituksen tarkoituksena on perehdyttää opiskelija SorTech ACS 08 -adsorptiojäähdyttimen toimintaan ja käyttöön. Adsorptiojäähdyttimen pääasiallisena käyttötarkoituksena on tuottaa viileää huoneilmaa lämpöenergiasta, hyödyntäen adsorptiota sekä desorptiota. Laboratorioharjoituksessa käytettävään adsorptiojäähdyttimeen on lisäksi liitetty kolme energiamittaria sekä energia-analysaattori mittauksien helpottamiseksi. Energia-analysaattorin käyttöliittymää käytetään tietokoneen selaimella.

Kaikki mittaukset suoritetaan laitteen ollessa toiminnassa.

Esitehtävä

Tutustu työohjeeseen sekä sen mukana tuleviin liitteisiin huolellisesti. Mittauksiin kannattaa ottaa oma tietokone mukaan mitatun datan analysoinnin helpottamiseksi. Tarvitset lisäksi kellon ajanottoa varten.

1. Adsorptiojäähdytinjärjestelmään kuuluu kolme vesipiiriä: kuuma ajovesipiiri (HT), uudelleenjäähdytyspiiri (MT), sekä kylmävesipiiri (LT).

Tutustumalla adsorptiojäähdyttimen käyttöohjeeseen sekä seuraamalla energiamittareista saatuja lämpötila-arvoja (joko mittareista suoraan tai tietokoneelta energia-analysaattorin käyttöliittymän avulla) päättele, mikä kuvan 1 putkista on minkäkin vesipiirin putki, sekä mitkä ovat vesipiirien käyttötarkoitukset jäähdytinjärjestelmässä.



Kuva 1. Jäähdytinjärjestelmän vesipiirin putket sekä niihin liitetyt energiamittarit.

2. Anna adsorptiojäähdyttimen käydä noin 15 minuuttia (yhden jäähdytyskierron verran). Kirjaa ylös vesipiirien tuottamat tehot mittauksen nollapisteessä sekä tämän jälkeen noin minuutin välein. Mitä havaintoja teet? Millä tämä selittyy? Voit kirjata tulokset myös taulukointiohjelmaan ja luoda niistä graafin, mikä helpottaa tarkastelua.

3. Adsorptiojäähdyttimen käydessä, kirjaa ylös tulo- ja paluulämpötilat sekä kuuma- että kylmävesipiireistä, sekä molemmissa piireissä virtaavan veden määrät. Kuinka paljon energiaa vaaditaan piireissä kulkevan vesimäärän jäähdyttämiseen mittareiden ilmoittaman lämpötilaeron verran, jos veden ominaislämpökapasiteetti on $4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$?

Voit käyttää hyväksi kaavaa $E = mc \Delta T$, missä

m = aineen massa

c = ominaislämpökapasiteetti

ΔT = lämpötilan muutos.

Oletetaan veden tiheydeksi 1000 kg/m^3 .

4. Edellisten mittausten tuloksien perusteella, laske adsorptiojäähdyttimen

hyötysuhde η , eli COP-arvo. Käytä kaavaa $\eta = \frac{W_c}{W_d}$, missä

W_c = jäähdytysteho

W_d = ajoteho.

Nykyaikaisissa kompressiolla toimivilla ilmalämpöpumpuissa hyvänä COP-arvona jäähdytyskäytössä pidetään arvoa 3,5 ja siitä ylöspäin. Kuinka adsorptiojäähdyttimen COP-arvo vertautuu tämän kanssa? Mikä asian selittää?

LIITE 2.

LIITE 3.

LABORATORY EXERCISE FOR THE USE OF ADSORPTION CHILLER

Introduction

The purpose of this laboratory exercise is to acquaint the student with the operation and use of the SorTech ACS 08 adsorption chiller. The main purpose of the adsorption chiller is to produce cool air from thermal energy, utilizing adsorption as well as desorption. In addition, three energy meters and an energy analyzer are connected to the adsorption chiller used in the laboratory exercise to facilitate the measurements. The energy analyzer interface is used with a computer browser.

All measurements are performed while the device is operating.

Preliminary task

Carefully read the work instructions and the accompanying appendices. It is a good idea to include your own computer in the measurements to facilitate the analysis of the measured data. You also need a clock for timing.

1. The adsorption chiller system consists three water circuits: driving circuit (HT), re-cooling circuit (MT), and cold-water circuit (LT).

By reading the adsorption chiller manual and observing the temperature values obtained from the energy meters (either directly from the meters or from a computer using the energy analyzer interface), determine which of the pipes in Figure 1 is the pipe of each water circuit and the purposes of the water circuits in the cooling system.



Figure 1. Water circuit pipes of the adsorption chiller system and the energy meters connected to them.

2. Allow the adsorption cooler to run for about 15 minutes (one cooling cycle). Record the powers produced by the water circuits at the zero point of the measurement and then approximately every minute thereafter. What observations do you make? How is this explained? You can also record the results in Excel and create a graph from them, making it easier to view.

3. With the adsorption cooler running, record the inlet and return temperatures from both the hot and the cold-water circuit and the amount of water flowing in both circuits. How much energy is required to cool the amount of water flowing in the circuits by the temperature difference indicated by the meters, if the specific heat capacity of the water is $4,18 \text{ kJ / kg } ^\circ \text{C}$?

You can use the formula $E = mc \Delta T$, where

m = mass of the substance

c = specific heat capacity

ΔT = temperature change.

Assume the density of water to be 1000 kg/m^3 .

4. Based on the results of the previous measurements, calculate the efficiency η of the adsorption condenser, i.e. the COP value. Use the formula $\eta = \frac{W_c}{W_d}$,

where

W_c = cooling power

W_d = driving power.

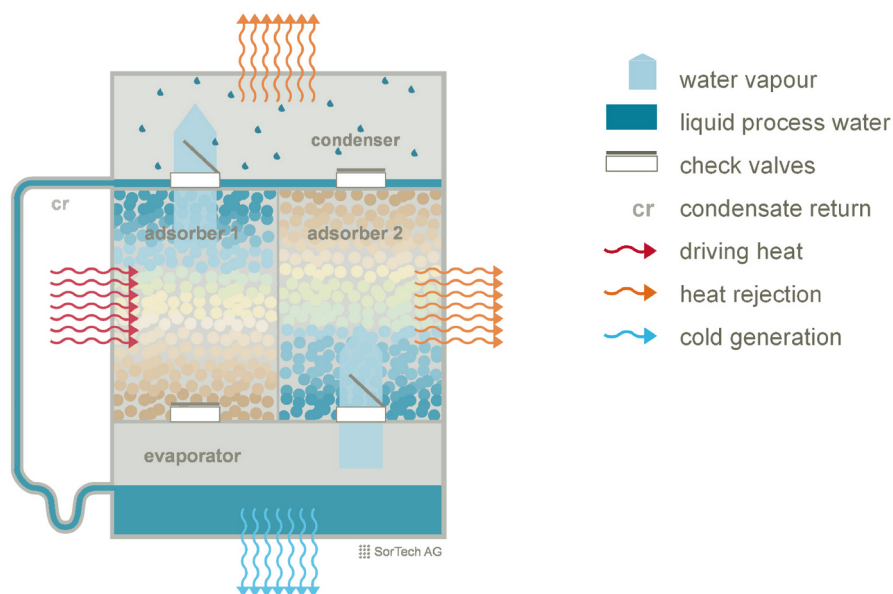
In modern compression air heat pumps, a good COP value in cooling operation is considered to be 3,5 and above. How does the COP value of an adsorption chiller compare to this? What explains this?

LIITE 4.

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**

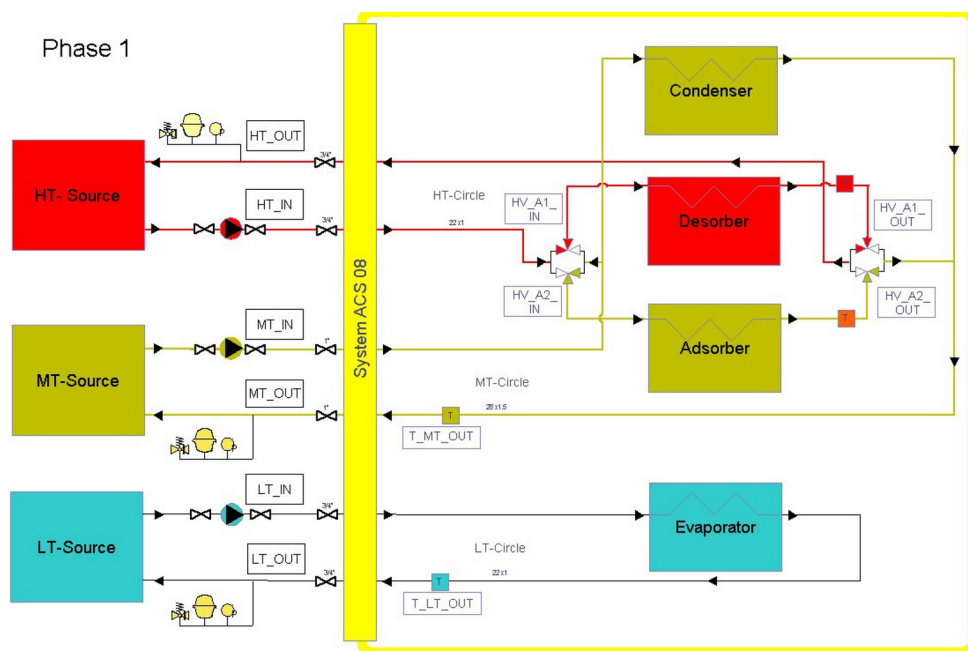


The four process chambers are connected to each other by internal, automatically-functioning steam valves. These valves influence the directional flow of the evaporated coolant into adsorber chamber 1 or 2 and the condenser, depending on the phase of the process. In operating phase 1, hot water passes 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.

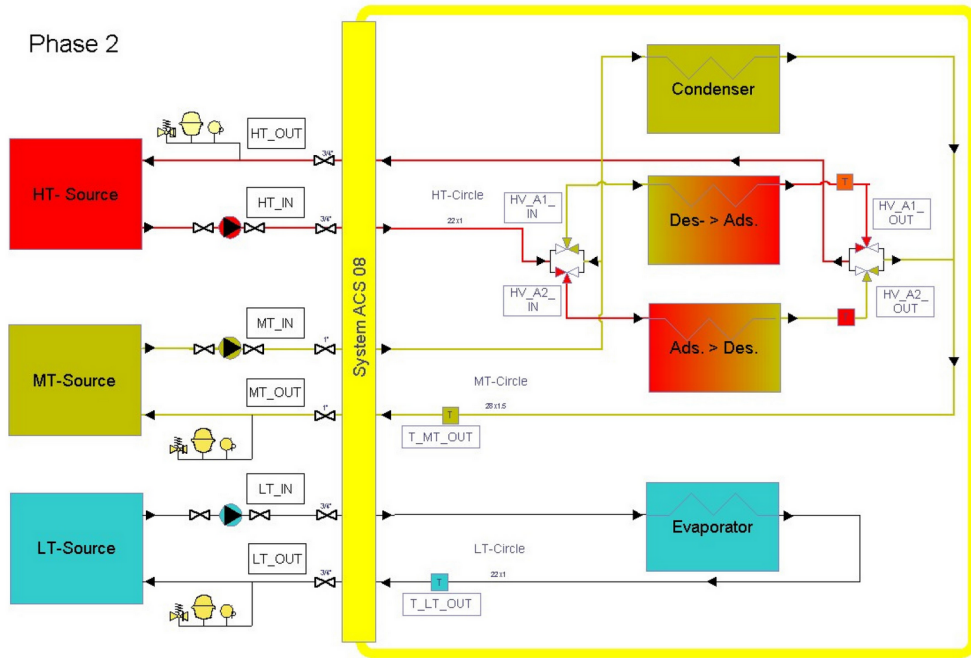
Fig. 4: Hydraulic Schematics / Switch Unit of the ACS



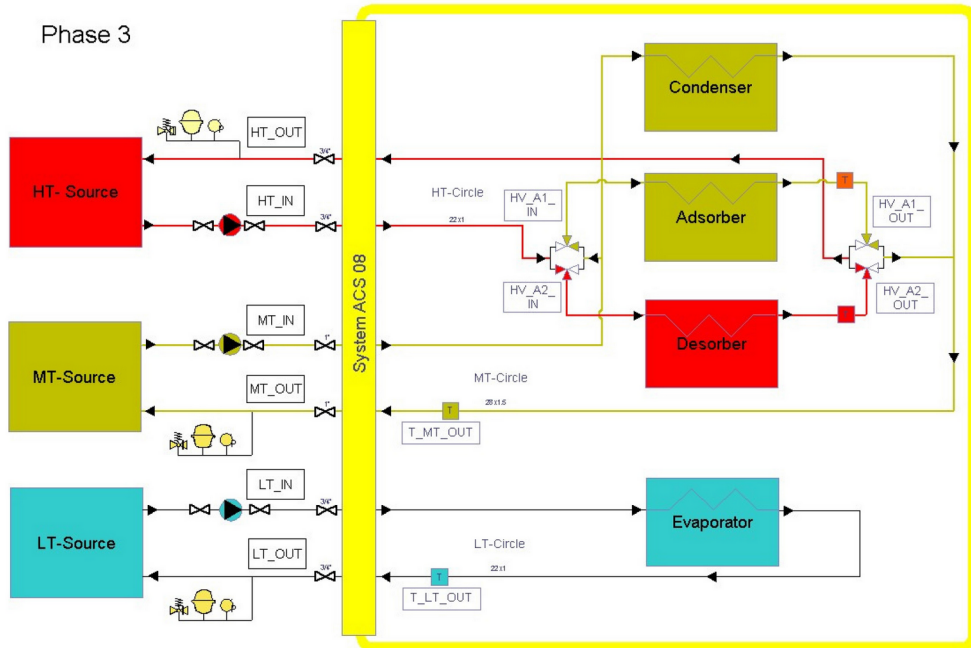
In **phase 1** the adsorber 1 (desorber) is supplied with driving heat and thus desorbed. At the same time, adsorber 2 (adsorber) adsorbs; to remove waste heat, re-cooling water passes through. Both the heat produced during adsorption and the condensation heat from the condenser are released to the surrounding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

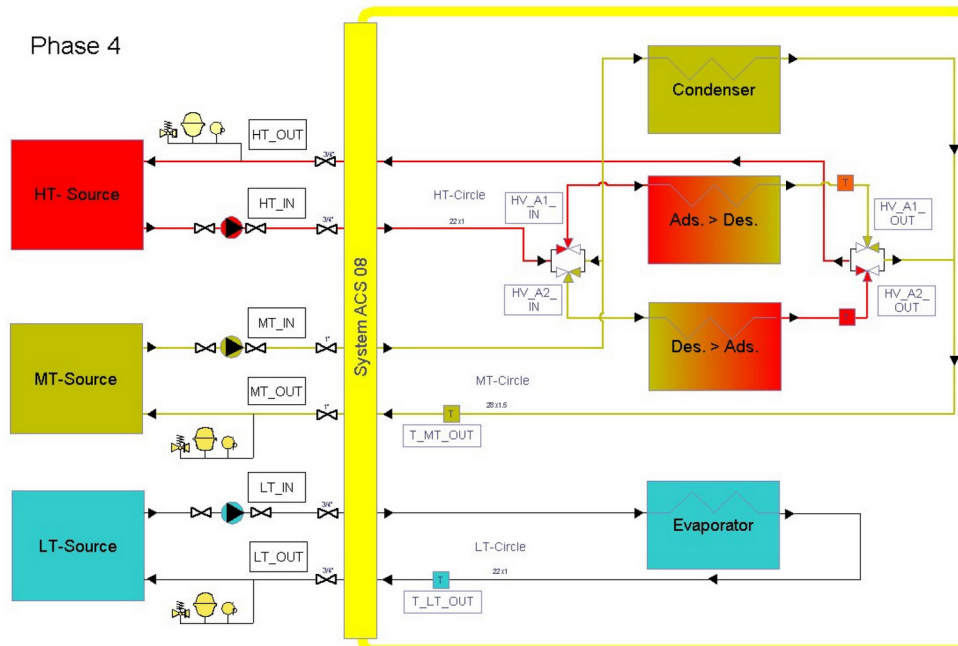
Only after achieving a certain temperature difference between both adsorber return strands can phase 2 be ended by switching the “HV_A1/2_OUT” valves.



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.

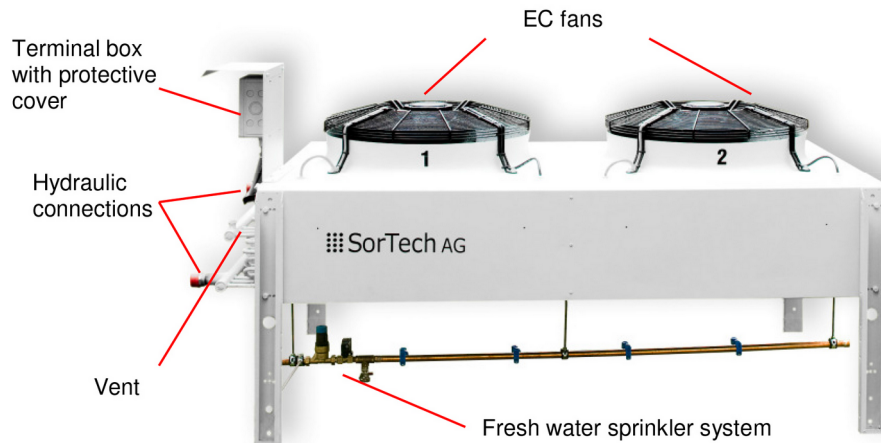
1.5 Re-cooling

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

with advantages regarding design, installation, and operation. Additional re-cooling methods include wet cooling towers, geothermal probes, etc.

Fig. 5: **RCS 08** Re-cooler



The configuration of the **RCS** re-cooler is precisely matched to the special requirements of adsorption chillers. Depending on the operating point, the rotation speed of the latest generation of highly efficient EC fans is continuously regulated by the **ACS** controller, thus ensuring a minimal consumption of electrical energy.

Fresh Water Sprinkler

In order to effectively re-cool even at very high outdoor temperatures the re-cooler is equipped with a fresh water sprinkler system. Due to the evaporation effect a re-cooling temperature that lies below the ambient temperature can be achieved by periodically sprinkling small amounts of water into the air flow. This increases the cooling power of the **ACS** especially at high outdoor temperatures – which is precisely when cooling is required. Since fresh water is sprinkled only periodically, a permanent liquid film cannot develop on the lamellae. The danger of microbial growth is thus effectively prevented. In order to preserve water and to prevent unwanted sediments on the coated lamellae of the re-cooler (which could reduce the power) the sprinkler is used for a restricted amount of time. Time control is performed by the **ACS** controller.

Prevention of Legionellae

Moreover, the water in the feed pipe of the re-cooler's fresh water sprinkler system is emptied once a day in order to prevent the buildup of legionellae. There is no health risk if legionellae do not grow in the rest of the piping. This can be ensured through, for example, periodic draining and temperature surveillance.

Depending on the pipe volume and water pressure, the time constant for this can be adjusted to fit individual needs. If it is possible to guarantee that temperatures over 25°C not be reached in the remaining piping of the fresh water supply and that the quality of water not be hazardous to one's health, there is only a negligible risk that legionellae will grow.

1.6 The Complete Thermal Cooling System

The complete system for **ACS** operation is comprised of three hydraulic circuits:

- **The driving circuit, HT**, which delivers heat at a high level for desorption (e.g. solar heat, heat from a combined heat and power plant, district heat, industrial waste heat)
- **The re-cooling circuit, MT**, which removes heat at a medium or surrounding temperature level (e.g. dry re-cooler with sprinkler option (**RCS**), swimming pool heater, geothermal probe, wet cooling tower, lake heat exchanger)
- **The cold water circuit, LT**, for distribution and usage of the generated cold (e.g. cooling ceilings, wall / floor cooling, fan coils, concrete core activation, etc.)

Fig. 6: General Power Distribution of the **ACS 08** at the Nominal Working Point (Variations of a Complete System)

