

Joonas Kontio

ILMALÄMPÖPUMPUN LÄMPÖKERROINTUTKIMUS

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Tammikuu 2020**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Tammikuu 2020	Tekijä/tekijät Joonas Kontio
Koulutusohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn nimi ILMALÄMPÖPUMPUN LÄMPÖKERROINTUTKIMUS		
Työn ohjaaja Aki Suokko	Sivumäärä 31 + 4	
Työelämäohjaaja Aki Suokko		
<p>Tämä työ on tehty tutkimusmielessä ilman ulkopuolista toimeksiantajaa. Opinnäytetyön tekijä työskentelee kylmäteknikan ja lämpöpumppujen parissa, joten opinnäytetyön ensisijainen tarkoitus on tukea tekijänsä työelämätaitoja. Työssä oli tarkoituksena mallintaa ilmalämpöpumpun kylmätekninen kierto-prosessi ja tarkastella ilmalämpöpumpun lämpökerrointa, eli anto- ja ottotehon välistä suhdetta realistisissa olosuhteissa.</p> <p>Tutkimustyön tavoitteena oli saada tarkastelussa lämpökertoimet neljälle eri ulkolämpötila-alueelle ja vertailla näitä valmistajan ilmoittamiin. Tutkimuksissa tehtiin jatkuvaa lämpötilamittausta ilmalämpöpumpun kylmäputkistossa ja ulkolämpötilassa. Tämän lisäksi ilmalämpöpumpun sähkönsyötön teho mitattiin.</p> <p>Työn teoriaosuudessa on käsitelty kylmätekniikkaa yleisesti, paine-entalpia tilapiirroksen tulkintaa ja lämpöpumppujen teoriaa. Työssä keskitytään kuitenkin ilmalämpöpumppuun. Työn tulosten kannalta huomattavaan paino-arvoon nousutta sulatusjaksoa käsitellään teoriaosuuden lisäksi useaan kertaan mittaustulosten tarkastelussa. Teoriaosuuden jälkeen kuvataan tutkimusolosuhteet, mittausten menetelmät ja niistä saadut tulokset sekä lopulta vertailun valmistajan ilmoittaman ja tutkimuksessa todetun lämpökertoimen välillä.</p> <p>Kävi ilmi, että sulatusjaksojen vaikutus kaupallisten ilmalämpöpumppujen suorituskykyyn voi olla huomattava ja että tämän vaikutusta ei kerrota selvästi.</p>		
Asiasanat COP, ilmalämpöpumppu, log p,h, lämpökerroin, kylmäteknikka		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date January 2020	Author Joonas Kontio
Degree programme Electrical and Automation Engineering		
Name of thesis RESEARCH OF COEFFICIENT PERFORMANCE AN AIR-TO-AIR HEAT PUMP		
Instructor Aki Suokko	Pages 31 + 4	
Supervisor Aki Suokko		
<p>This work was made for research purpose without an external contractor. The author of this thesis works with refrigeration technology and heat pumps, so the primary purpose of thesis was to develop the working life skills of the author of the thesis. The aim of this work was to model the refrigeration cycle of the air heat pump and to examine the heat coefficient of the air heat pump, i.e. the ratio of the output and the input power.</p> <p>The target of the study was to obtain the thermal coefficients for four different outdoor temperature ranges and to compare them with the ones reported by the manufacturer. The research consisted of continuous temperature measurement of the air-heat pump's cold piping, outdoor temperature and power measurement of the electric heat pump's electrical supply.</p> <p>The theoretical part of this thesis discusses with refrigeration technology in general, pressure enthalpy diagram interpretation and heat pump theory, but with emphasis on air source heat pump. In addition to the theoretical part, the defrost period, which has gained considerable value in the results of the thesis, is discussed several times in the examination of the measurement results. After the theoretical part, the test conditions, the measurement methods and the results obtained, as well as the comparison between the heat factor reported by the manufacturer and that observed during the study are described and discussed.</p>		

<p>Key words air-to-air heat pump, COP, coefficient of performance, log p,h, refrigeration technology</p>
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

ATM	Kansainvälisesti vahvistettu ilmanpaineen normaaliarvo
bar abs	Paineen yksikkö, joka ei sisällä ilmankehän painetta, referenssipiste 0
Coolpack	Kylmälaitosten suunnitteluun ja analysointiin kehitetty ilmaissovellus
COP	Lämpöpumpun hetkellinen tehokerroin lämmityksessä (Coefficient of performance)
EER	Lämpöpumpun hetkellinen tehokerroin jäähdytyksessä (Energy efficiency rating)
E	Sähköenergian yksikkö, tunnus Wh
J/kg	Kilogrammaan ainetta sitoutunut energiamäärä
$\frac{J}{K \cdot kg}$	Ominaislämpökapasiteetti, materiaaliin sitoutuneen lämpöenergian lämpötilaero ja massa
K	Kelvin, lämpötilan yksikkö, jonka nollakohta on absoluuttisessa nollapisteessä
kg/m ³	Tiheyden yksikkö, kuutiolitavuuteen mahtuva massa
Log p,h	Paine-entalpia kaavio, logaritminen
m ³ /min	Tilavuusvirran yksikkö, kuutiota minuutissa
m ³ /s	Tilavuusvirran yksikkö, kuutiota sekunnissa
m	Massavirran tunnus
NTC	Lämpötila-anturina käytetty termistori
SCOP	Lämpöpumpun tehokerroin lämmityskäytöllä kompensoituna koko lämmityskaudelle (Seasonal Coefficient of Performance)
Trendi	Trendi kuvaa sarjan pitkän aikavälin kehitystä
ΔT	Lämpötilanmuutos, yksikkö K
W	Tehon yksikkö
Wh	Wattitunti
Q	Lämpömäärä
q	Tilavuusvirran tunnus
ρ	Ilman tiheyden tunnus

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KYLMÄTEKNIIKAN TEORIAA	2
2.1 Kylmälaitoksen pääkomponentit ja toiminta	2
2.2 Log p,h-tilapiirros	3
2.2.1 Häviötön kiertoprosessi log p,h-tasossa	4
2.2.2 Todellinen kiertoprosessi log p,h-tasossa	5
2.2.3 Indeksointi	6
3 LÄMPÖPUMPUT	7
3.1 Maalämpöpumppu	7
3.2 Vesi-ilmalämpöpumppu	7
3.3 Poistoilmalämpöpumppu	8
3.4 Ilmalämpöpumppu	8
3.4.1 Ilmalämpöpumpun komponentit	8
3.4.2 Lämpökerroin ja käyttölämpötila	10
3.4.3 Ulkoyksikön sulatustoiminto	10
3.4.4 Kylmäaine R410a	11
4 TUTKIMUS	12
4.1 Tutkittavan laitteen tiedot	13
4.1.1 Valmistajan ilmoittama COP	14
4.2 Tutkimuksen olosuhteet ja vakio-arvot	15
4.3 Mittauksista huomioitavaa	16
4.4 Mittaustulokset	16
4.4.1 Trendimittaukset	16
4.4.2 Kämmenlaittein tehdyt mittaukset	19
4.5 Mittaustulosten käsittely	21
4.5.1 Log p,h-tarkastelu	21
4.5.2 Anto- ja ottotehotarkastelu	24
4.5.3 Lopputulosten arviointi	25
4.5.4 Virheiden arviointi	26
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	28
LÄHTEET	29
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. COP-arvon lineaarinen regressio	15
KUVIO 2. COP-arvojen vertailu	26

KUVAT

KUVA 1. Pääkomponentit kiertoprosessikaaviossa	2
KUVA 2. Log p,h tilapiirros olomuotoalueet	4
KUVA 3. Häviötön prosessi	5
KUVA 4. Häviöllinen prosessi liioiteltuna	6
KUVA 5. Indeksointi	6
KUVA 6. Ulkoyksikön putkikaavio	9
KUVA 7. Kompressorin rakenne.....	9
KUVA 8. Mittauspisteet putkikaaviossa.....	12
KUVA 9. Trendi +4°C ulkolämpötilassa	17
KUVA 10. Trendi -5°C ulkolämpötilassa	17
KUVA 11. Trendi -12°C ulkolämpötilassa	18
KUVA 12. Trendi -20°C ulkolämpötilassa	18
KUVA 13. Syklin tietojen syöttö	21
KUVA 14. Isentrooppisen hyötysuhteen kuvaaja	22

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Tekniset tiedot.....	13
TAULUKKO 2. COP-arvot	13
TAULUKKO 3. Trendeistä kerätyt mittaustulokset	19
TAULUKKO 4. Sisäyksikön imu- ja puhalluslämpötilat	20
TAULUKKO 5. Sähkötehot	20
TAULUKKO 6. COP-arvot log p,h-tarkastelun kautta	23
TAULUKKO 7. COP-arvot keskiarvotettu	23

1 JOHDANTO

Ilmalämpöpumput ovat yleistyneet viime vuosina omakotitalojen sekundaarisena lämmöntuotantomuotona tehostamaan lämmitystä esimerkiksi sähkölämmitteisissä kiinteistöissä. Ilmalämpöpumppuja on Suomen Lämpöpumppuyhdistyksen vuodesta 1996 alkaneen tilastoinnin mukaan myyty jo lähes miljoona kappaletta ja vuonna 2018 tilastoitiin n. 75 000 myytyä ilmalämpöpumppua (Sulpu, Suomen lämpöpumppuyhdistys 2018). Ilmalämpöpumppujen myyntiä ovat viime vuosina siivittäneet todennäköisesti myös pitkät ja lämpimät kesät, jolloin ilmalämpöpumppuun investoidaan myös jäähdytysmielessä. Viimeistään vuonna 2019 ilmastonmuutoksesta alettiin käydä laajaa yhteiskunnallista keskustelua ja yhtenä merkittävänä hiilidioksidipäästöjä pienentävänä tekijänä pidetään liikenteen ohella kiinteistöihin käytetyn energian minimointia. Kiinteistöjen osalta avainasemassa ovat päästöttömän sähkön käyttö ja korkean lämpökertoimen omaavien lämpöpumppujen hyödyntäminen lämmityksessä. Lämpöpumput tulevat yhä enemmän myös osaksi liikenteen energiaratkaisuja, kun sähköautot yleistyvät ja niiden lämmitys täytyy hoitaa pohjoisissa olosuhteissa tavalla tai toisella.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään lämpövoimaproessin toimintaan ilmalämpöpumpun muodossa lämmityskaudella ja ennen kaikkea sen lämpökertoimen muutoksiin eri ulkolämpötiloissa. Lämpöpumppuihin ja kylmätekniikan kiertoprosessin teoriaan tutustutaan Opetushallituksen kirjan Kylmätekniikan perusteet (2014) ja AEL kylmäasentajan kurssimateriaalin (2015) avulla. Opinnäytetyön tarkoituksena on mallintaa häviöllinen kiertoprosessi lämpötilamittauksiin perustuen eri ulkolämpötiloissa ja johtaa lämpökertoimet log p,h-tasosta saatavilla tiedoilla. Ilmalämpöpumpun kylmätekniistä kiertoprosessia tarkkaillaan ilmalämpöpumpun eri komponentteihin sijoitetuilla lämpötila-antureilla, jotka rakennusautomaatioon liitettynä mittaavat ja tallentavat lämpötilalukemia taukoamatta trendeiksi. Tämän pohjalta ilmalämpöpumpun toimintaan voidaan mallintaa log p,h-kaaviossa ja verrata tuloksia laitevalmistajan tekniseen datalehteen.

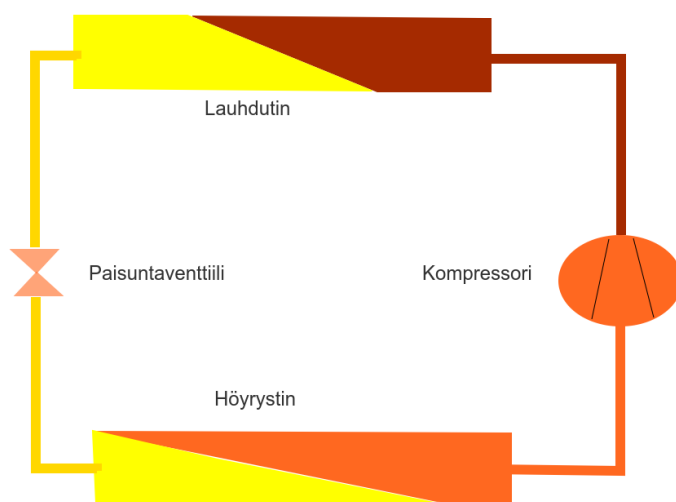
2 KYLMÄTEKNIIKAN TEORIAA

Kylmätekniinen kiertoprosessi on lämpövoimaprozessi, joka perustuu prosessiin siirretyn työn avulla tapahtuvaan lämpöenergian siirtoon matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö siirtyy luontaisesti juuri päinvastoin, korkeammasta matalampaan lämpötilaan (Hänninen, Karppinen, Leskelä & Pohjakallio 2019, 220). Kylmäprosessissa työaineena toimii kylmäaine, jonka olomuotomuutoksiin liittyviin entalpiamuutoksiin koko kiertoprosessi perustuu. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2014, 17.)

Myös ilmalämpöpumput ja lämpöpumput ylipäättään hyödyntävät edellä kuvattua aineen olomuotomuutosta lämmönkehityksessä ja jäähtymisen tuotannossa. Itse asiassa jokainen kompressorivoimainen kylmäprosessi tuottaa aina sekä lämpöä että jäähtymistä. Kylmäprosessin lauhtutin luovuttaa lämpöä ja höyrystin sitoo ympäriltään lämpöä aikaan saaden jäähtymistä. On vain sovelluksesta kiinni, onko tavoitteena tuottaa matala lämpötila (jäähtymys) vai lämpöä. Ilmalämpöpumpuissa voidaan hyödyntää samalla laitteella molempia lämpötila-alueita 4-tieventtiilin avulla, kuten voimme myöhemmin huomata ilmalämpöpumpun kytkentäkaaviosta. (Kaappola ym. 2014, 92-93.)

2.1 Kylmälaitoksen pääkomponentit ja toiminta

Jokainen kompressorivoimainen kylmäkoneisto sisältää kompressorin lisäksi ainakin lauhtuttimen, höyrystimen ja paisuntaventtiilin. (Kaappola ym. 2014, 50.)



KUVA 1. Pääkomponentit kiertoprosessikaaviossa (mukaiillen Kaappola Esko 2014, 17)

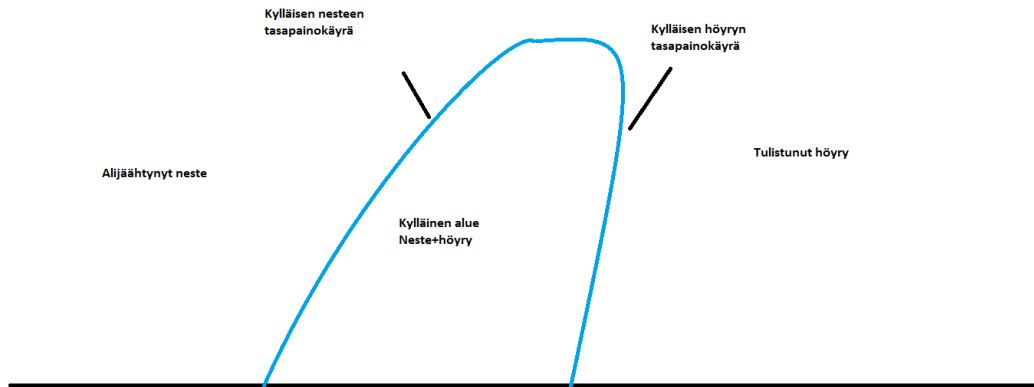
Höyrystimessä matalapaineinen ja lämpötilainen kylmäaine sitoo lämpöä ympäristöstä ja kylmäaine höyrystyy. Höyrystimeltä matalapaineinen höyry siirtyy kompressorille. Laitoksesta riippuen höyry tulistetaan 0-12K höyrystimessä sekä vielä höyrystimeltä kompressorille menevässä putkilinjassa. Näin vältetään nestemäisen kylmäaineen päätyemiseltä kompressorin imupuolelle, mikä saattaisi rikkoa kompressorin. Tulistus on höyrystimen jälkeen mitatun höyryn lämpötilan ja höyrystymislämpötilan välinen lämpötilaero (AEL 2015, 6.14). Kompressorissa kylmäkiertoon lisätään työ, sähkömoottorilla aikaan saatu mekaaninen puristus, joka puristaa kylmäaineen suurempaan paineeseen ja lämpötilaan. Kompressorin jälkeen kylmäaine on korkeapaineista, tulistunutta höyryä ja se siirtyy lauhduttimelle. Kompressorin ja lauhduttimen välillä kylmäaineesta poistuu tulistus kylmäaineen jäähtymisen myötä ja lauhduttimelle siirtyy kylläistä höyryä. Lauhduttimessa kylmäaineen olomuoto muuttuu nesteeksi, lauhduttimen luovuttaessa lämpöä ympäristöön. Lauhduttimen jälkeen neste alijäähdytetään, jottei nesteputkeen ilmaantuisi kaasukuplia, sillä kaasukuplat heikentäisivät paisuntaventtiilin tehoa (AEL 2015, 6.14). Lauhduttimelta kylläinen neste jatkaa kiertoa paisuntaventtiilille, jossa paine romahtaa. Kylmäaineesta osa höyrystyy jo tässä vaiheessa. Höyrystimelle siis siirtyy nesteen ja höyryn seosta ja kierto alkaa alusta. (Kaappola ym. 2014, 17-18.)

Höyrystymisessä, lauhtumisessa ja puristuksessa tapahtuu aina entalpiamuutos. Paisunta sen sijaan tapahtuu häviöttömässä prosessissa vakioentalpiassa. Käytännössäkin paisunta on hyvin lähellä häviötöntä prosessia. Entalpialla tarkoitetaan systeemiin varastoitunutta energiaa, joka voi olla kemiallista, termistä tai esimerkiksi kineettistä. Kylmäaineen faasimuutoksissa hyödynnetään kylmäaineeseen varautunutta lämpösisältöä eli lämpöenergiaa. Kompressorivoimainen kylmälaitos on suljettu systeemi (ammattitermein hermeettinen), jolloin se vastaanottaa ja luovuttaa vain energiaa, eikä avoimen systeemin tavoin myös ainetta, kuten esimerkiksi voimalaitoksen kattila polttoainetta vastaanottaessaan. (Hänninen ym. 2019, 219-220.)

2.2 Log p,h-tilapiirros

Käytännön kylmätekniikassa kylmäaineen kiertoprosessi kuvataan usein log p,h-tasossa. Kaaviosta, jossa vaaka-akselilla on entalpia ja pystyakselilla paineen logaritmi, voidaan nähdä kylmäaineen entalpia, entropia, lämpötila ja paine. Kylläisen kylmäaineen tapauksessa eri olomuotojen suhteelliset osuudet voidaan lukea kaaviosta kulloisessakin kohdassa prosessia. Tätä log p,h-tilapiirrosta tarvitaan, kun

tarkastellaan prosessin toimintaa. Siitä saatavilla arvoilla voidaan muun muassa laskea tässä opinnäytetyössä tutkittavia arvoja, kuten Coefficient of performance (COP) eli hetkellinen lämpökerroin ja Energy efficiency rating (EER) eli hetkellinen kylmäkerroin. (Kaappola ym. 2014, 19-23.)



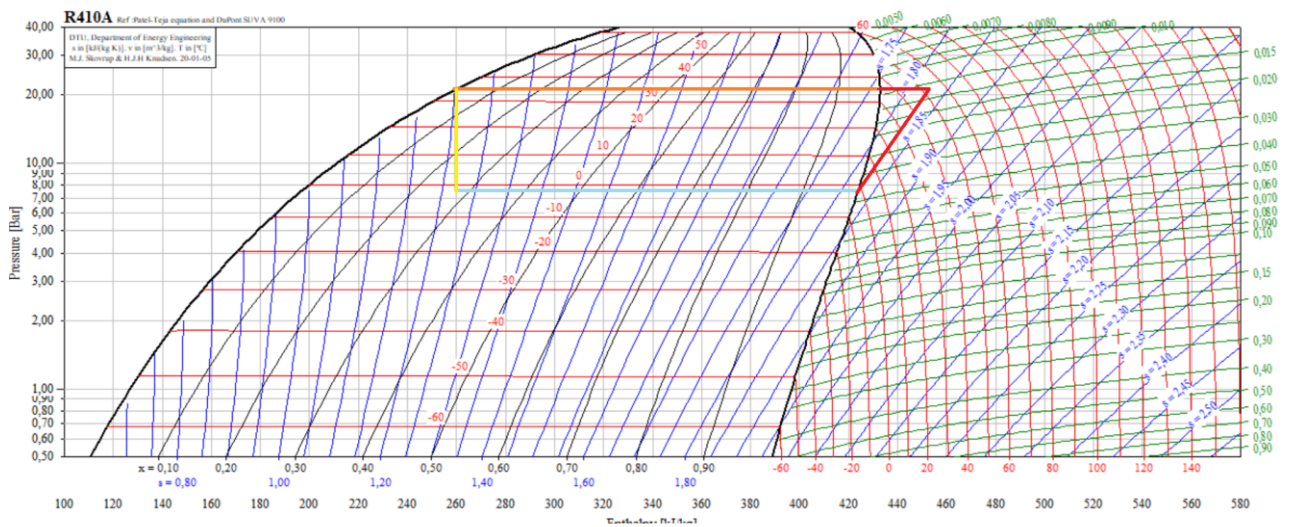
KUVA 2. Log p,h-tilapiirros olomuotoalueet (mukaiillen Kaappola Esko 2014, 19)

Log p,h-tilapiirroksesta nähdään aineen olomuoto ja sen muutos prosessin aikana. Lauhtuminen ja höyrystyminen tapahtuvat kylläiselle kylmäaineelle, puristus tulistuneen höyryn puolella ja lauhtumista seuraava alijäähdytys alijäähtyneen nesteen puolella käyrää. (Kaappola ym. 2014, 19.)

2.2.1 Häviötön kiertoprosessi log p,h-tasossa

Kiertoprosessin teoreettista tarkastelua voidaan tehdä häviöttömänä. Häviöttömässä kiertoprosessissa höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakioaineessa eikä esimerkiksi painehäviöiden vaikutusta huomioida. Kuvassa (KUVA 3) tarkkaillaan esimerkkiprosessia kylmäaineella R410a. Kylmäaine alkaa höyrystyä lauhduttimessa noin -2°C -asteessa (sininen viiva). Huomataan, että kylmäaineen muuttuessa nesteen sekaisesta höyrystä puhtaaksi höyryksi sitoutuu kylmäaineeseen energiaa ja sen entalpia kasvaa noin 200 kJ/kg. Esimerkissä kylmäaine ei tulistu lainkaan, vaan sitä puristetaan kompressorissa kylläisenä höyrynä ja se poistuu kompressorista tulistuneena höyrynä, noin 52°C -asteisena (punainen viistoon ylöspäin suuntaava viiva). Puristuksessa entalpiamuutos on vain joitain kymmeniä kJ/kg. Tulistus poistuu ennen lauhdutusta (punainen vaakasuora viiva) ja kylmäaine muuttuu lauhduttimessa nesteeksi luovuttaen samalla lämpöä (oranssi viiva). Lauhtumisessa kylmäaineen entalpia jälleen pienenee noin 200 kJ/kg, paineen ja lämpötilan pysyessä kuitenkin vakiona, tässä noin 35°C -asteisena ja noin 21,5 bar abs. Keltainen viiva kuvaa paisuntaa, jolloin kylmäaineen paine ja lämpötila romahtavat vakioentalpiassa ja

kylmäaine höyrystyy jo osin tässä vaiheessa. Paisunnan jälkeen kierto alkaa alusta. (Kaappola ym. 2014, 26-28.)



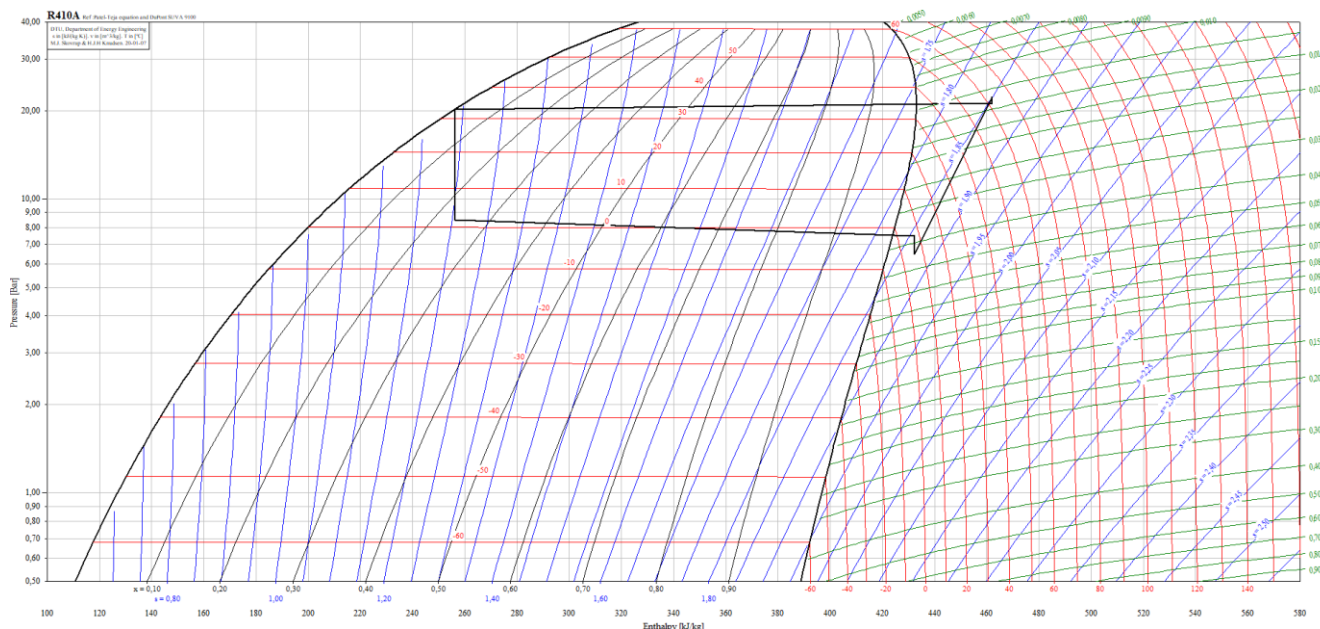
KUVA 3. Häviötön prosessi (Coolpack-sovellus)

2.2.2 Todellinen kierto prosessi log p,h-tasossa

Mikään todellinen kierto prosessi ei kuitenkaan ole häviötön. Kylmäprosessissa syntyy erilaisia häviöitä, jotka aiheuttavat poikkeamia teoreettiseen tarkasteluun verrattuna. Häviöttömät kierto prosessit toimivat eräänlaisina vertailuprosesseina, joiden avulla voidaan tarkastella todellisten prosessien hyötysuhdetta ja arvioida parannuskohteita. Todellisen kierto prosessin häviöt koostuvat puristuksessa syntyvistä kitkan aiheuttamista häviöistä, kompressorin imu- ja painepuolen häviöstä sekä putkistossa, lauhduttimessa ja höyrystimessä tapahtuvista kitka- ja lämpöhäviöistä. Lisäksi tulistuksessa menetetään jonkin verran kompressorista saatavaa tehoa. Sen sijaan kylmäteho kasvaa sitä suuremmaksi, mitä enemmän onnistutaan lauhduttamisen jälkeen alijäähdyttämään kylmäainetta. Todellisen kylmäprosessin esittäminen tarkasti vaatiikin paljon mitattua tietoa prosessista. (Kaappola ym. 2014, 29-30.)

Kuvasta 4 voidaan nähdä, että todellisuudessa höyrystyminen ja lauhtuminen eivät ideaaliprosessista poiketen tapahdu vakioaineessa. Putkistokokonaisuuden eri komponenteissa tapahtuva painehäviö ilmenee esimerkiksi niin, että molemmissa lämmönsiirtotapahtumissa paine ja lämpötila laskevat prosessin edetessä. Tämä ilmenee piirroksessa kylläisellä alueella ideaaliprosessissa vaakasuorien viivojen kallistumisena. Koska kompressorin puristus ei ole häviötön, kylmäaine tulistuu puristuksessa enemmän

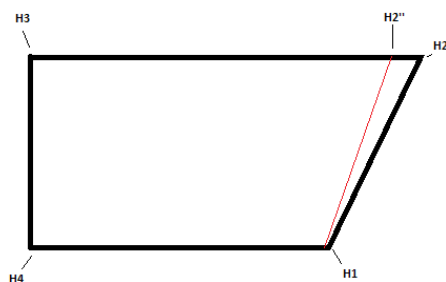
kuin ideaaliprosessissa. Tämä epäideaalisuus puristuksessa saa puristusta kuvaavan janan kaartumaan hieman oikealle. Kompressorin imupuolella tapahtuvat painehäviöt laskevat puristuksen alkulämpötilaa ja näin ollen puristus alkaa höyrystymisen jälkeistä tulistusta matalammassa lämpötilassa. Häviöt ovat esimerkkikuvassa liioiteltuja havainnollistamista helpottamaan. (Kaappola ym. 2014, 29-30.)



KUVA 4. Häviöllinen prosessi liioiteltuna (Coolpack-sovellus, mukailen Kaappola Esko 2014, 29)

2.2.3 Indeksointi

Jotta log p,h-kaaviosta osataan tulkita prosessin kulku, on tunnettava vielä kaaviossa käytössä oleva indeksointi. Eri kirjallisuudessa ja eri maissa on käytössä erilaista indeksointitapaa ja näin ollen myös laskukaavoissa muuttujien nimet ovat erilaisia. Tässä työssä indeksointina käytetään kirjan Kylmäteknikan perusteet indeksointia. (Kaappola ym. 2014, 26.)



KUVA 5. Indeksointipisteet (mukailen Kaappola Esko 2014, 26)

3 LÄMPÖPUMPUT

Lämpöpumpuilla lämmitystä voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Yleisimmät Suomessa käytössä olevat ratkaisut ovat maalämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu, ilmalämpöpumppu ja vesi-ilmalämpöpumppu. Näissä ratkaisussa on keskenään paljonkin eroavaisuuksia, mutta yhteistä niille kaikille on kuitenkin luvussa 2 mainitut peruskomponentit ja kiertoprosessin toimintaperiaate.

3.1 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppu on tyypillisesti kiinteistön primäärilämmitin. Se eroaa ilmalämpöpumpusta siten, että höyrystin ja lauhdutin ovat molemmat levylämmönvaihtimia. Näiden toisiopiireissä väliaineena on höyrystimessä keruupiirin maalämpöneste ja lauhduttimessa tyypillisesti lämmitysjärjestelmässä kiertävä vesi. Ensiöpiirit kytkeytyvät kylmäpiiriin samalla periaatteella kuin kuvassa (KUVA 1) on esitetty. Merkittävin ero ilmalämpöpumppuihin on siis se, että maaperästä tai vesistöistä kerättävä lämpö siirretään kylmäkiertoon lämmönvaihtimen kautta ja edelleen luovutetaan rakennuksen primäärilämmityspiiriin (lattialämmitys, patteriverkosto) toisella lämmönvaihtimella. (AEL 2015, 15.1.4.)

3.2 Vesi-ilmalämpöpumppu

Toimintaperiaate on muuten sama kuin maalämpöpumpussa, mutta levylämmönvaihtimen sijaan höyrystyminen tapahtuu kuten ilmalämpöpumpussa, puhaltimella varustetussa lamellilämmönvaihtimessa, jossa toisena väliaineena on siis läpipuhallettava ilma. Ammattienedistämislaitossäätiö (AEL) kertoo vuoden 2015 kylmäasentajan kurssimateriaalissaan, että ilmavesilämpöpumpun lämpökerroin laskee $-10 - 15^{\circ}\text{C}$ -asteen jälkeen niin pieneksi, ettei ulkoilmasta ole järkevää ottaa lämpöä, vaan joudutaan turvautumaan esimerkiksi sähkövastuksiin. (AEL 2015, 15.1.4.)

Lämpöpumpputekniikka on ottanut kuitenkin huimia harppauksia viime vuosina ja esimerkiksi Scanoffice ilmoittaa Mitsubishin Zubadan-ilmavesilämpöpumpun kykenevän kompressorikäytöllä tuottamaan lämpöä vielä -28°C -asteen ulkolämpötilassa. Seasonal Coefficient of Performance -arvoksi (SCOP) ilmoitetaan mallista riippuen noin 4,5 (Scanoffice 2019.)

3.3 Poistoilmalämpöpumppu

Poistoilmalämpöpumpun toiminta on samankaltainen kuin vesi-ilmalämpöpumpun, mutta sen lämmönkeruu tapahtuu ulkona sijaitsevan höyrystinpatterin sijaan kiinteistön poistoilmakanavassa ja se vaatiiikin toimiakseen jatkuvan poistoilmavirran rakennuksesta. (AEL 2015, 15.1.4.)

3.4 Ilmalämpöpumppu

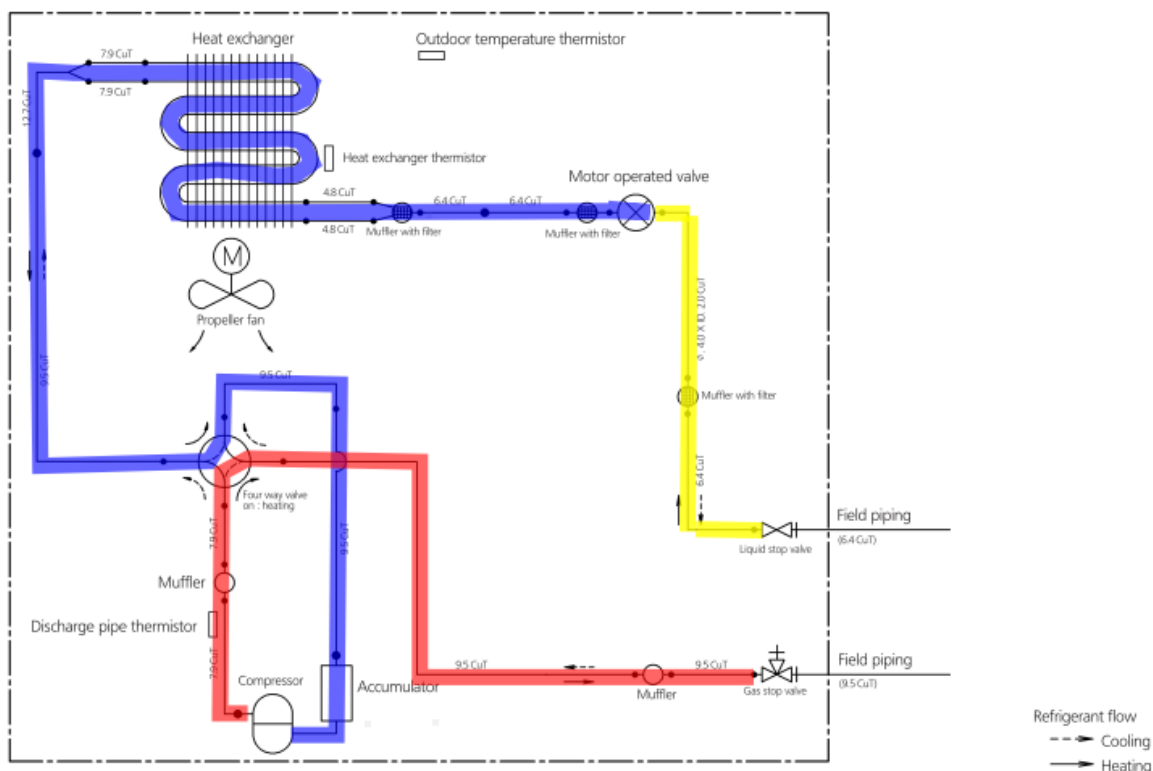
Toisin kuin edellä esitellyt pumput, on ilmalämpöpumppu yleensä jonkin toisen lämmitysjärjestelmän tukena, esimerkiksi suoran sähkölämmityksen rinnalla. Uusimpien laitteiden hyötysuhteilla ja pohjoihin oloihin varta vasten suunnitelluilla laitteilla on ilmalämpöpumppua mahdollista käyttää myös päälämmitysjärjestelmänä, mutta silloinkin on järjestelmä hyvä varustaa jonkinlaisella apulämmitysjärjestelmällä kovimpien pakkasjaksojen ja toisaalta vikaantumisten varalta. (Motiva 2019.)

Ilmalämpöpumpun höyrystin ja lauhdutin ovat molemmat puhaltimella varustettuja lamellilämmönvaihtimia, joten ilmalämpöpumppua ei ole muiden lämpöpumppujen tavoin mahdollista liittää kiinteistön vesipiireihin esimerkiksi käyttövettä lämmittämään. (AEL 2015, 15.3-15.4.)

3.4.1 Ilmalämpöpumpun komponentit

Ilmalämpöpumppu koostuu tavallisimmin ulkoyksiköstä, joka sisältää kompressorin, ulkolämmönvaihtimen, paisuntaventtiilin, ohjauselektroniikan, 4-tieventtiilin sekä muita kylmätekniisiä komponentteja sekä sisäyksiköstä, joka sisältää sisälämmönvaihtimen lisäksi puhaltimen ja ohjauselektroniikkaa. Koko laitosta ohjataan kaukosäätimellä tai ohjauspaneelilla. Kotikäytössä kaukosäädin on varsin yleinen. Kaukosäätimessä saattaa joskus olla sisäilman lämpötilaa mittaava anturi, jolla saadaan huonelämpötilasta mittaustietoa puhalluksen säätöön, jos kaukosäädin on vain oikein sijoitettu. (Daikin 2015, 38.)

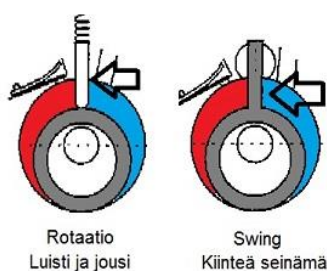
RXS42L



KUVA 6. Ulkoyksikön putkikaavio (mukaillen Daikin 2015, 38)

Kuvaan 6 on merkitty kylmäkierto lämmityskäytössä. Kierrosta yliviivatut värit vastaavat (KUVA 3) tilapiirroksen koordinaatteja. Kyseinen malli RXS42L on myös tässä työssä tutkittavaksi valittu laite.

Useimmat lämpöpumppuvalmistajat ovat alkaneet varustaa laitteet tarkan säädettävyyden vuoksi invertterisäädetyillä puhaltimilla ja kompressorilla. Tällä on tämän työn kannalta merkitystä, kun tarkastellaan lauhtumis- ja puristustehoja. Daikin on kehittänyt kompressoriteknikan, joka muistuttaa tavallista rotaatiokompressorista, mutta sen luistilevy on korvattu heilurin tyypisellä männällä. Se pidentää käyttöikää ja vähentää painehäviötä. Myös kompressorin äänenpainetaso on verrattain hiljainen. (Lämpötilamestarit 2018.)



KUVA 7. Kompressorin rakenne (mukaillen Lämpötilamestarit 2018)

3.4.2 Lämpökerroin ja käyttölämpötila

Ilmalämpöpumppuja markkinoidaan usein lämpökertoimen COP avulla. Jos COP on esimerkiksi 3, saadaan yhden kilowatin sähköteholla tuotettua 3 kW lämpötehoa. Eurooppalainen ilmastointi- ja kylmälaitteiden valmistajien järjestö Eurovent on tehnyt COP:sta oman standardin jäähdytyslaitteita varten. Tämän vuoksi se soveltuu huonosti pohjoismaisissa olosuhteissa tehtävään lämpöpumppuverailuun. Toisaalta mitään muuta vakiintunutta standardia ei ole. Nykyään rinnalle on kuitenkin tullut myös SCOP, jossa hetkellisen tarkastelun sijaan normitetaan saatua hyötyä kaikkien vuoden aikojen mukaan. Euroventin COP-arvo ilmoitetaan +7°C-asteen ulkolämpötilassa ja +20°C-asteen huonelämpötilapyynnillä. (Sulpu, Suomen lämpöpumppuyhdistys ry 2012).

Suomen Standardoimisliiton julkaisema SFS-EN 14511-2 nojaa samoihin lämpötila-arvoihin COP:n määrittämisessä (Eskola, Jokisalo & Siren 2012, 6).

Lämpökerroin on lauhtumista saadun lämpötehon ja kompressorin puristustehon osamäärä

$$\Phi = \frac{Q}{W} = \frac{m \cdot (H_2 - H_3)}{m \cdot (H_2 - H_1)} = \frac{H_2 - H_3}{H_2 - H_1} \quad (1)$$

missä Q on lauhtumisen luovuttama lämpöteho ja W kompressorin puristukseen käyttämä sähköteho. Suureet Q ja W voidaan johtaa komponentin läpi menevän massavirran ja entalpien tulona, jolloin m on kylmäaineen massavirta, H₂ on entalpia indeksointipisteessä (puristuksen jälkeen), H₁ on entalpia indeksointipisteessä (ennen puristusta) ja H₃ on entalpia indeksointipisteessä (lauhtumisen jälkeen). Lämpökertoimen yksikkö on dimensioton ja todetaan että $\Phi = \text{COP}$. Indeksointipisteiden sijainti log p,h-tasossa on esitelty luvussa 2.2.3.

3.4.3 Ulkoyksikön sulatustoiminto

Jotta COP voidaan riittävällä tarkkuudella määrittää, tulee ulkoyksikön sulatusjaksot ottaa huomioon. Höyrystimiä on sulatettava, jos höyrystimen pintalämpötila on < 0°C ja höyrystyminen läpi virtaavan ilman kastepistelämpötila on suurempi kuin höyrystimen pintalämpötila, sillä höyrystimen pintaan kertynyt kuura tai jää heikentää höyrystymisen tehoa. (AEL 2015, 7.1.)

Ilmalämpöpumpuissa tämä voidaan toteuttaa helposti kuumakaasusulatuksella. Laitevalmistajasta riippuen sulatustapoja voi olla myös muita, mutta tyypillisin on kuumakaasusulatus. Automaatiikan

huomatessa lämmöntuoton vähentyvän käynnistää se sulatuksen. Koska ilmalämpöpumppu on yleensä aina varustettu 4-tieventtiilillä, voidaan prosessin kierto kääntää ja ohjata kuumakaasu kompressorilta ulkoyksikköön (KUVA 6). Tällöin sisäyksikön ilmapuhallin pysähtyy, jottei kääntynyt kierto ala jäädyttää sisäilmaa pyynnin ollessa lämmityksellä. Sulatusprosessi kestää ulkolämpötilasta riippuen 5-15 minuuttia. Koska kompressorin ottamaa sähkötehoa ei saada sulatuksen aikana hyödynnettyä sisäilman lämmittämiseen, on tällä sulatusjaksolla luonnollisesti negatiivinen vaikutus lämpökertoimeen. (AEL 2015, 15.4.)

3.4.4 Kylmäaine R410a

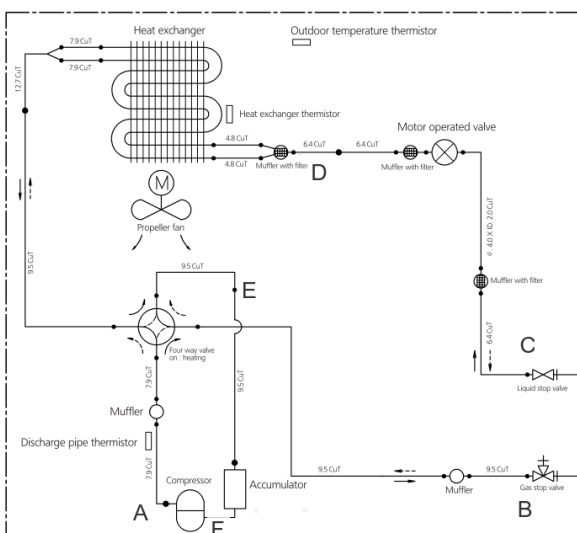
Ilmalämpöpumpuissa kauan käytössä ollut kylmäaine R410A koostuu kahdesta eri kylmäaineesta R32 (50%) ja R125 (50%), joiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat lähes vakioämpötilassa, joten kyseessä on atseotrooppinen kylmäaine. Valmistajat ovat alkaneet pikkuhiljaa siirtyä yksikomponenttiin R32-aineeseen (Darment 2019). Tässä työssä tutkitaan vielä 2010-luvulla hyvin yleisenä käytössä ja markkinoinnissa ollutta R410a-laitosta.

4 TUTKIMUS

Tähän työhön tutkittavaksi laitteeksi valikoitui Daikin RXS42L-ulkoyksikkö ja sen sisäyksikkö FTXS42K. Tutkimus toteutettiin rakennusautomaation liitetyillä NTC-pintalämpötila-antureilla Ouman TMS NTC 10 ja kWh-mittarilla Carlo Gavazzi EM110. Muita käytettäviä tutkimusvälineitä olivat Fluke 52 II -lämpötilamittari sekä Testo 435 -monitoimimittari. Kylmäkierron tarkastelu log p,h-tasossa suoritettiin Coolpack-sovelluksella. Tutkimuksen ajaksi rakennusautomaatio asetettiin tallentamaan lämpötilatietoa seuraavista pisteistä:

- Kompressorin purkuputki PISTE A Punainen käyrä
- Sisäyksikön menoputki PISTE B Keltainen käyrä
- Sisäyksikön paluuputki PISTE C Viininpunainen käyrä
- Ulkopatterin menoputki PISTE D Vihreä käyrä
- Ulkopatterin paluuputki PISTE E Vaaleansininen käyrä
- Kompressorin imuputki PISTE F Tummansininen käyrä
- Ulkolämpötila Oranssi käyrä
- Ilmalämpöpumpun tehonkulutus kWh-pulssitiedolla

Ulkopatterin paluuputken lämpötila-anturia ei saatu haluttuun pisteeseen rikkomatta ilmalämpöpumpun rakenteita, joten lämpötila-anturin E sijainnista jouduttiin hieman tinkimään. Tämän kompromissin vaikutusta käsitellään tarkemmin luvussa 4.3.



KUVA 8. Mittauspisteet putkikaaviossa (mukaillen Daikin 2015, 38)

Jatkuvista mittauspisteistä kerättävän datan lisäksi tehtiin satunnaisia mittauksia sisäyksikön imu- ja puhalluslämpötilasta lauhtumislämpötilan varmistamiseksi.

4.1 Tutkittavan laitteen tiedot

Tutkittavasta laitteesta kerättiin kaikki oleelliset tarkastelua ja laskemista varten tarvittavat tiedot (TAULUKKO 1). (Daikin 2015, 3 & 13.)

TAULUKKO 1. Tekniset tiedot

Lämmitysteho	Min. 1,7 kW	Nimellinen 5.4 kW	Max. 6 kW
Ottoteho L	Min. 0,4 kW	Nimellinen 1.3 kW	Max. 1.98 kW
Sisäpuh. tilavuusvirta	Min 7.8 m ³ /min	Nimellinen 10 m ³ /min	Max. 12.4 m ³ /min
COP		4.12	luvun 3.4.2 mukaan
Käyttölämpötila-alue L		-15°C - +18°C	

Valmistaja on ilmoittanut teknisessä datalehdessä otto- ja antotehoja eri ulkolämpötiloissa. Sisälämpötilan ollessa 24°C, sisäyksikön puhallusilmamäärän ollessa 12,4 m³/min ja ulkolämpötilan ollessa 10°C saadaan 1,38 kW sähköteholla aikaan 5,74 kW lämpöteho ja kaavalla (1) saadaan

$$\text{COP} = \frac{Q}{W} = \frac{5,74 \text{ kW}}{1,38 \text{ kW}} = 4,15. \text{ (Daikin 2015, 19.)}$$

Lukuarvosijoitus lopuille valmistajan ilmoittamille arvoille tuottaa taulukoidut (TAULUKKO 2) COP-arvot:

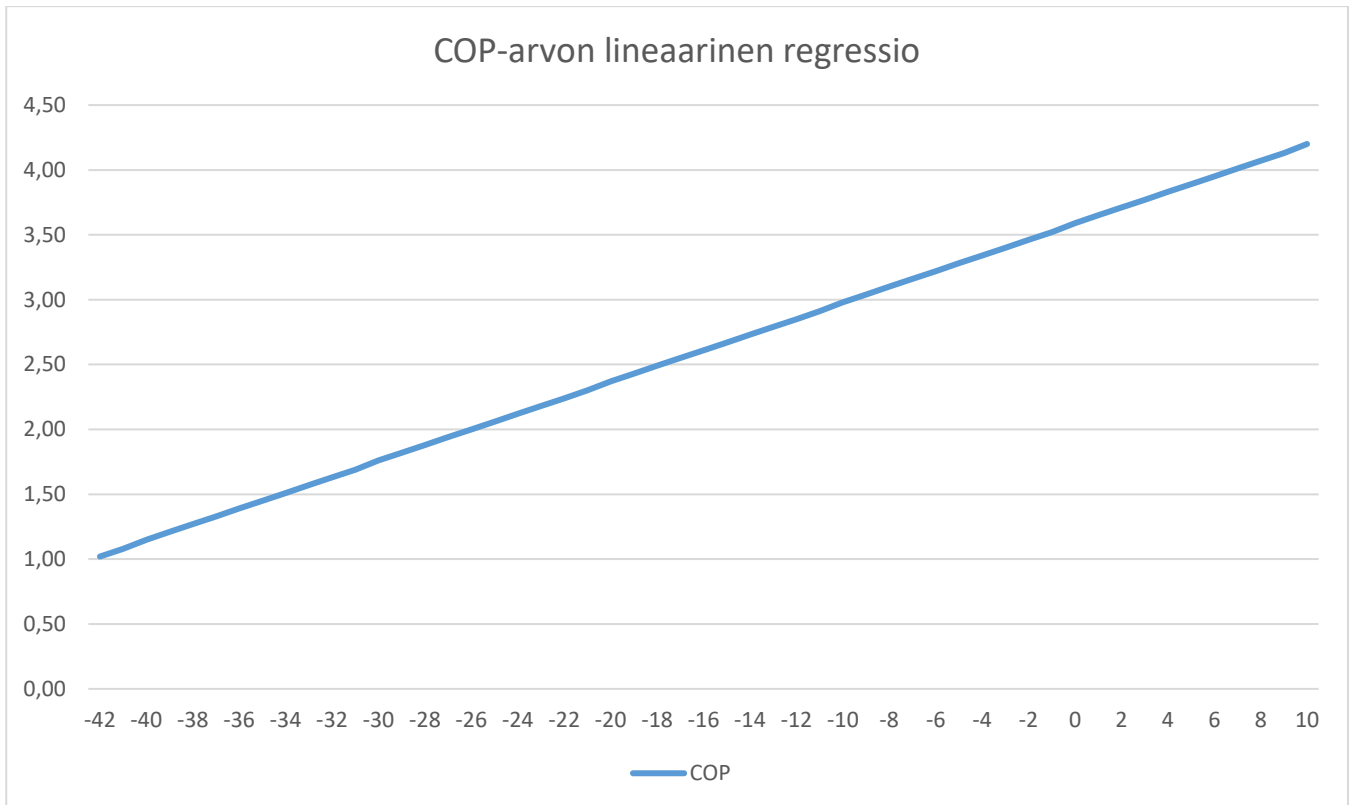
TAULUKKO 2. COP-arvot

Ulkolämpötila 'C	Ottoteho P (kW)	Lämpöteho P (kW)	COP
6	1,33	5,25	3,95
0	1,27	4,52	3,56
-5	0,97	3,32	3,42
-12	0,93	2,8	3,01
-15	0,89	2,29	2,57

4.1.1 Valmistajan ilmoittama COP

Valmistaja ilmoittaa COP-arvoksi 4,12 (TAULUKKO 1) luvun 3.4.2 olosuhteissa. Koska valmistaja ei ilmoita COP-arvoja eri lämpötiloissa, mutta otto- ja antotehoja kylläkin, voidaan yrittää esittää COP matalimpaan lämpötilaan lineaarisen sovituksen kautta. Lineaarinen regressioanalyysi on tilastollinen analyysimenetelmä, jossa aineiston perusteella voidaan estimoida tarkasteltavan vastemuuttujan lineaarista riippuvuutta selittävistä muuttujista (Mellin 2006).

Sovitus voidaan tehdä TI-nspire CX -laskimen LinRegMx -toiminnolla. Kun on syötetty x-akselille tunnetut lämpötila-arvot ja y-akselille tunnetut COP-arvot, saadaan laskimesta ulos funktio, joka on muotoa $Y = m \cdot x + b$. Taulukon (TAULUKKO 2) arvoilla funktioksi tulee $Y = 0,061007 \cdot x + 3,58$. ja sovitetun mallin selitysasteen voimakkuutta kuvaavaksi korrelaatiokertoimeksi saadaan 0,990226, joten sovitusta voidaan pitää melko luotettavana. On kuitenkin muistettava, että tämä tarkastelu on tilastollinen ja lämpöpumppu saattaa kytkeytyä automatiikan kytkemänä pois päältä jo kauan ennen kuin alin mahdollinen COP-arvo tavoitetaan. On myös odotettavissa, että COP voi romahtaa valmistajan ilmoittaman toimintalämpötilan ulkopuolella. Lisäksi tulosten käsittelyssä tulee muistaa, että kuviosta (KUVIO 1) saatu COP-arvo on saatu suurimmilla mahdollisilla lämmönluovutustehoilla ja tutkimustilanteessa ei välttämättä saavuteta suurinta lämpötehoa tilan koon ja sisäilman muiden lämpökuormien (kiinteistön muu lämmitys) takia.



KUVIO 1. COP-arvon lineaarinen regressio.

4.2 Tutkimuksen olosuhteet ja vakio-arvot

Tutkittava lämpöpumppu sijaitsee Ylivieskassa säävyöhykkeellä III (Ympäristöministeriö 2007, 56). Tutkimuksessa sisäyksikkö on sijoitettu katon rajaan n. 6 m² tilaan, jonka korkeus on 2,4 m. Tilasta johtaa edelleen johtaa kulkuovi pitkälle käytävälle. Tutkimuksen ajaksi tilan ovi jätetään auki, jotta lämpötilapyynti ei kerkeäisi täyttyä ja laite pysähtyä. Tarkoituksena on saada tietoa prosessin toiminnasta katkeamattomana. Lämpötilapyynniksi sisäyksikköön asetetaan +23°C, puhallinopeudeksi automaattinen ja laitteen siivekkeet lukittiin puhaltamaan 40-asteen kulmassa lattian rajaan. Nämä asetukset pysyivät muuttumattomina koko tutkimustyön ajan. Sisäyksikön ja ulkoyksikön välinen putkimatka on n. 6 metriä, ulkoyksikön ollessa sisäyksikköä n. 3 metriä korkeammalla, rakennuksen vesikatolla.

4.3 Mittauksista huomioitavaa

Mittauspisteet B ja C sijaitsevat ulkona sisäyksikön putkilähdöissä. Näin ollen putkihäviöiden mahdollisuus täytyy tarkistaa käsimittauksin putkien loppupäästä. Lauhtumislämpötilan mittausta ei ole voitu järkevästi toteuttaa rakennusteknisistä haasteista johtuen, eli sisäyksikön puhallusilman osalta on tyydytty satunnaismittauksiin Testo- ja Fluke -lämpötilamittarilla. Kuten aiemmin on mainittu, mittauspistettä E ei saatu ulkopatterin jälkeen asennettua, vaan se täytyi viedä patterilta kohti kompressoria. Tästä johtuen mittauspisteessä E saattaa näkyä imuputkessa kehittyneitä tulistusta ja se täytyy huomioida tarkastelussa.

4.4 Mittaustulokset

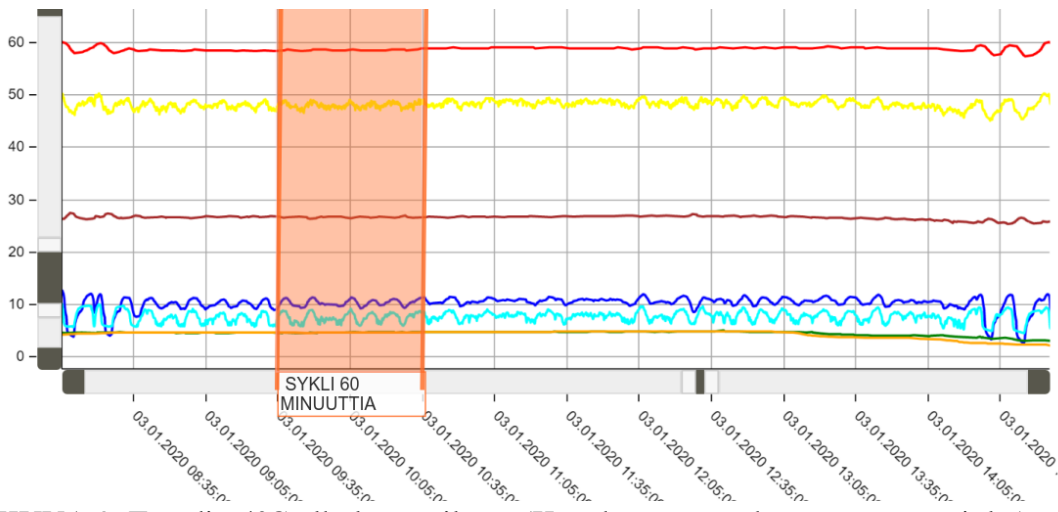
Mittaustulokset kerättiin rakennusautomaation trendistä. Tarkastelulämpötiloiksi valittiin sellaiset lämpötilat, joissa lämpöpumppu oli kierrättänyt kylmäprosessia kauemmin kuin kaksi tuntia, jotta voitiin luotettavasti todeta laitteen käyvän samassa lämpötilassa samalla tavalla. Tällaisiksi lämpötiloiksi valikoituivat:

- +4°C
- -5°C
- -12°C
- -20°C

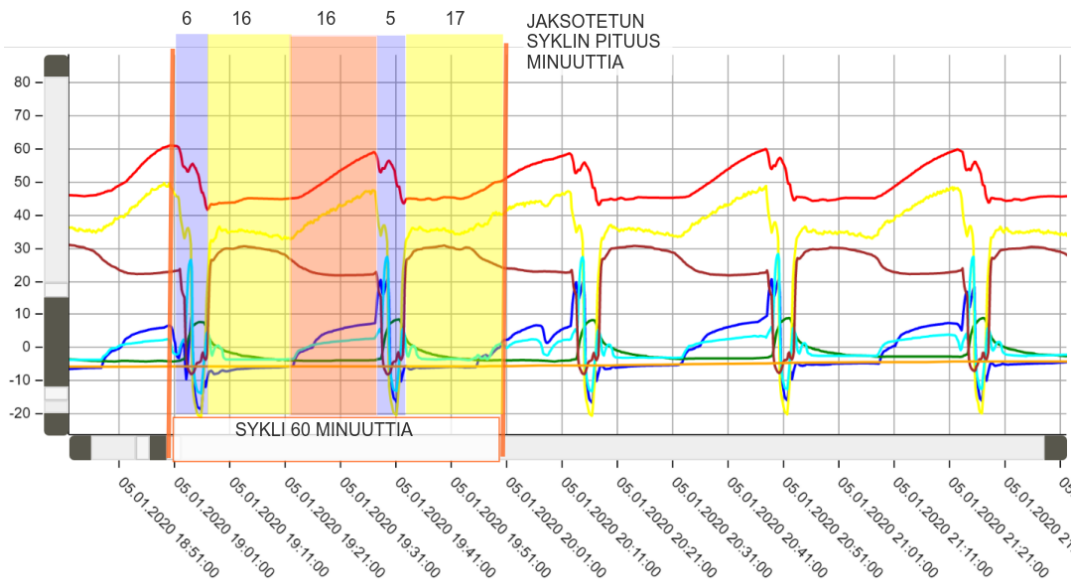
Jo mittaustulosten ensimmäisen tarkastelun yhteydessä kävi selväksi, että lämpötilan laskiessa nollan tuntumaan, alkaa laitteessa luvussa 3.4.3 mainittu sulatustoiminto vaikeuttaa tarkastelua, koska lämpötilat eivät pysy vakiona. Tässä kohtaa päädyttiin tekemään tarkastelu tunnin syklille ja jaksottamaan eri lämpötiloissa tapahtuva prosessi osiin.

4.4.1 Trendimittaukset

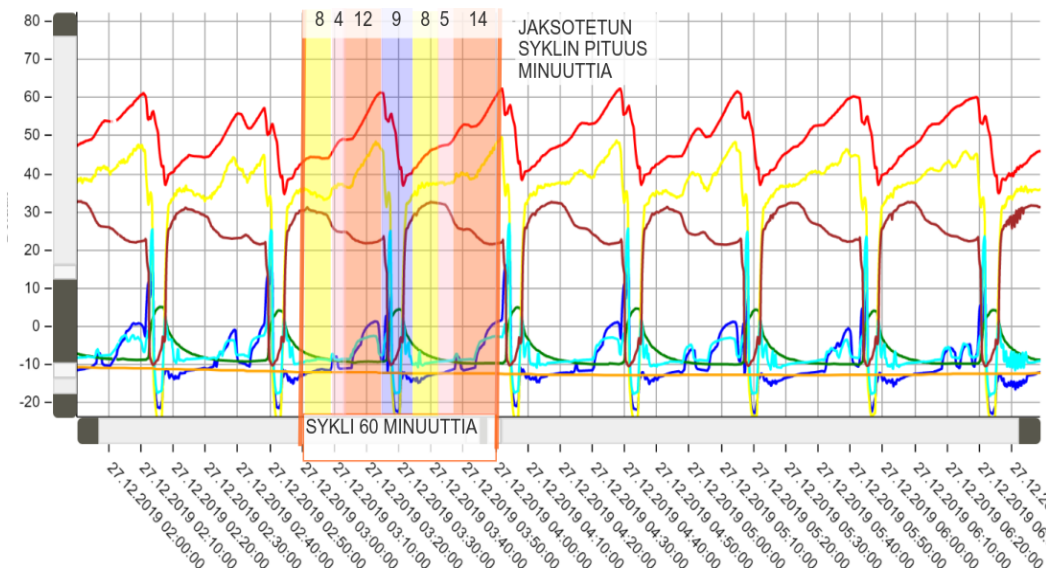
Rakennusautomaatiolta saatiin kuvien 9-12 trendit, jotka jaksotettiin. Trendit eivät ole keskenään samassa mittakaavassa trendin kohdentamisen haasteellisuudesta johtuen. Jaksotuksista koottiin lämpötilataulukko (TAULUKKO 3).



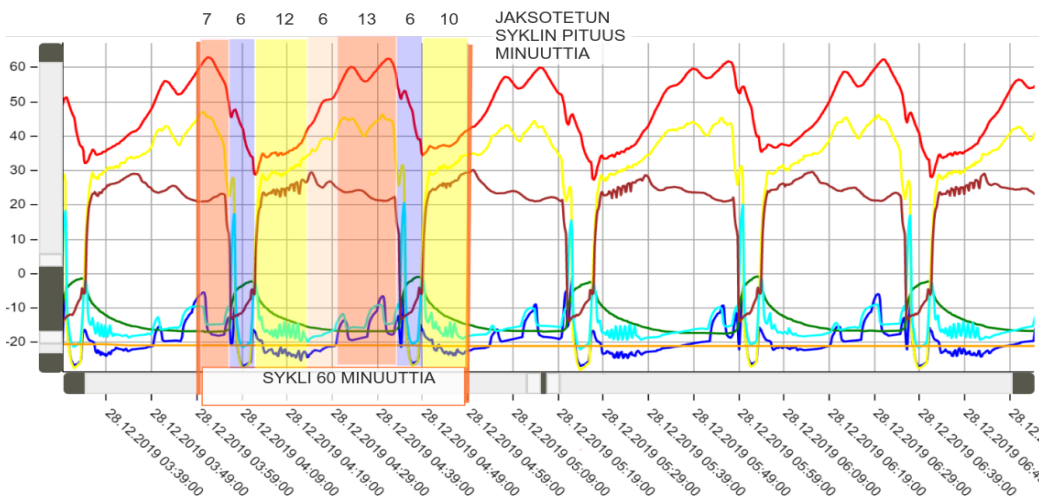
KUVA 9. Trendi +4°C ulkolämpötilassa (Kuvakaappaus rakennusautomaatiolta)



KUVA 10. Trendi -5°C ulkolämpötilassa (Kuvakaappaus rakennusautomaatiolta)



KUVA 11. Trendi -12°C ulkolämpötilassa (Kuvakaappaus rakennusautomaatiolta)



KUVA 12. Trendi -20°C ulkolämpötilassa (Kuvakaappaus rakennusautomaatiolta)

Trendeissä esitettyihin jaksotettuihin sykleihin viitataan jatkossa niiden värillä. Tässä kohtaa voidaan todeta, että sininen jakso on selkeästi sulatusjakso. Tämä voidaan päätellä siitä, että sisäyksikön keltainen ja viininpunainen käyrä painuvat pakkaselle. 4-tieventtiilin on täytynyt kääntää kierron suunta ja sisäyksikköön virtaa kylmää kylmäainetta, ja siitä on siis tullut hetkellisesti höyrystin. Oranssi jakso on kaikissa trendeissä tehokkain, sillä siinä sisäyksikölle virtaa lämpimintä kylmäainetta. Kuvien 11 ja 12 trendeissä on ruusunpunainen jakso, jossa kuumakaasu on jo keltaista lämpimämpää, muttei kuitenkaan vielä saavuttanut täyttä tehoa. Keltainen jakso on siis tehottomin, sulatusjakson jälkeinen jakso, jossa kuumakaasu on vielä kaukana maksimistaan. Kuvassa 10 ei ole ruusunpunaista jaksoa lainkaan ja keltainen jakso on tässä ”toipunut” sulatusjaksosta melko tehokkaasti. Kuvassa 9 prosessi käy jatkuvasti tasaisesti, joten se on ideaalinen COP-tarkastelulle.

TAULUKKO 3. Trendeistä kerätyt mittaustulokset

Mittauspäivä	Ulko- lämpötila (C°)	Jakso ja sen pituus x/60 min (min)	Mittaus- piste					
			A (C°)	B (C°)	C (C°)	D (C°)	E (C°)	F (C°)
3.1.2020	4	60	58,5	47	26	4,5	9	11
5.1.2020	-5	16	59	47	22	-3,7	2,8	7,3
		33	45	34	30	-3	-3	-5,8
27.12.2019	-12	26	60	48	22	-9	-2,4	1,4
		9	49	37	24	-8	-8,3	-9
		16	42	35	30	-5	-8	-14
28.12.2019	-20	20	62	46	23	-16	-9	-5,4
		6	45	37	28	-15	-15	-23,5
		22	38	33	26	-13	-14	-22

4.4.2 Kämmenlaittein tehdyt mittaukset

Sisäyksikön luovuttaman tehon havainnollistamiseksi imu- ja puhalluslämpötilaa mitattiin käsin. Näihin mittauksiin ei ulkolämpötila vaikuta, joten todettiin riittäväksi tarkkailla yhtä kokonaista sykliä. Tällaisia mittauksia toteutettiin useita pistokoeluoontoisesti eri päivinä ja niistä koostettiin taulukko (TAULUKKO 4), johon laskettiin myös imuilman ja puhallusilman erotus ΔT . ΔT on keskimäärin 11 K.

Taulukossa (TAULUKKO 4) esitetyt lämpötilat ovat lukittuja yhteen hetkeen, sillä imuilman lämpötila vaihteli paljon mittauskohdasta ja hetkestä riippuen. Puhallusilman lämpötila oli sen sijaan paljon tasaisempaa, mutta mittauskertojen välillä oli kuitenkin eroja. Todettiin myös, että n. +45°C-astetta oli puhallusilman hetkellinen maksimiarvo, kun kylmäaineen lämpötila lähenteli +50°C. Pääsääntöisesti puhalluslämpötilat pysyttelivät välillä +36-40°C Koeluoontoisesti myös puhallusnopeus nostettiin käsikäytöllä täysille ja tällöin keskimääräinen puhalluslämpötila putosi n. 3 kelviniä, mittaushetkellä 39°C – 36°C. Tämä on tietysti luonnollista, kun asiaa tarkastellaan myöhemmin kaavalla (4).

Sisäyksikön todettiin jatkavan lämmitystä sulatusjakson jälkeen n. 30-33-asteen kohdalla, jolloin sen puhallin käynnistyi. Ensimmäisen lauhtumislämpötilan mittaamisen yhteydessä havaittiin, ettei sisäyksikön automatiikka tuntunut välittävän huonelämpötilasta mitään, sillä puhallus pysähtyi vain sulatusjakson ajaksi. Lämpötilapyynti oli luvun 4.2 mukaan esitetty +23°C ja imuilma oli jatkuvasti yli tämän (TAULUKKO 4). Tämän tutkimustyön kannalta ei ollut oleellista selvittää, mistä tämä johtuu. Tutkimuksen kannaltahan nimenomaan oli toivottavaa laitteen katkeamaton käynti.

TAULUKKO 4. Sisäyksikön imu- ja puhalluslämpötilat

Lauhduttimeen virtaava kylmäaine ulkoyksikön päästä mitattuna (C°)	Puhallusilmanlämpö- tila (C°)	Imuilman lämpötila (C°)	ΔT (K)
35	35	26	9
42	36	28	8
41	37	25	12
40	39	26	13
43	39	24	15
44	42	30	12
38	38	29	9
47	42	28	14
35	32	25	7

Sisäyksikön putkihäviöiden todettiin olevan mittauskerrasta ja mittaustuloksesta riippuen kaasuputkessa (menoputki) n. 0-6 K ja nesteputkessa (paluuputki) 0-2K. Todetaan, että putkihäviöiden määrittäminen käytettävissä olevalla mittauskalustolla eli Testo-mittarilla termoelementtiantureineen oli hankalaa ja tämä tullaan huomioimaan virheiden arvioinnissa jäljempänä.

Sähköteho tutkittiin rakennusautomaation trendin sähkönkulutustiedosta. Kun tunnetaan energiamäärä ja aika, voidaan sähköteho laskea kaavasta

$$P = E/t \quad (2)$$

jossa E on sähköenergia ja sen yksikkö kilowattitunti (kWh), P on sähköteho (W) ja t on sähkölaitteen käymä aika. Koska nimittäjässä on tässä tapauksessa 60 min sykli eli 1 h (TAULUKKO 3), voidaan yhden tunnin keskimääräinen sähköteho laskea suoraan yhden tunnin sähköenergian muutoksena ΔE . Ensimmäisen mittaustuloksen käsittely antoi tulokseksi $281,38 \text{ kWh} - 280,86 \text{ kWh} = 0,52 \text{ kWh}$ ja $\frac{0,52 \text{ kWh}}{1 \text{ h}} = 0,52 \text{ kW}$. Lukuarvosijoitus muille mittaustuloksille koostettiin taulukkoon (TAULUKKO 5).

TAULUKKO 5. Sähkötehot

Päivä- määrä	Lämpötila (C°)	Energia 0-kohdassa (kWh)	Energia 60 min syklin lopussa (kWh)	$\Delta E/1h = \text{kW}$
3.1.2020	4	280,86	281,38	0,52
5.1.2020	-5	244,79	245,41	0,62
27.12.2019	-12	99,93	100,72	0,79
28.12.2019	-20	121,57	122,53	0,96

4.5 Mittaustulosten käsittely

Mittaustulosten käsittelyssä on tehty seuraavat valinnat ja olettamukset

- Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on luettu samankaltaisen kompressorin taulukosta. Käytettävissä olevasta datasta sitä ei ollut mahdollista laskea, eikä kyseisen kompressorin datalehteä saapunut valmistajalta opinnäytetyön laatimisen aikana, vaikka sitä pyydettiin.
- Lauhtumislämpötila on ollut pakko interpoloida mittauspisteen B ja taulukon (TAULUKKO 4) avulla.
- Sähkötehoa tarkastellaan vain koko 60 minuutin syklille.
- Log p,h-tarkastelussa ei huomioida lauhdutin- ja höyrystinhäviöitä. Niitä ei ole mahdollista tarkastella pelkkään lämpötilatietoon perustuen.
- Putkihäviöitä ei eritellä minnekään, vaan ne kulkevat mittauspisteiden lämpötilatietojen mukana.

4.5.1 Log p,h-tarkastelu

Kylmäprosessin simulointiin ja mallinnukseen on olemassa ilmainen Coolpack-sovellus. Sen on kehittänyt Department of Mechanical Engineering (MEK), Section of Thermal Energy (TES) at the Technical University of Denmark (DTU). (Jorrit & Maarten 1995.)

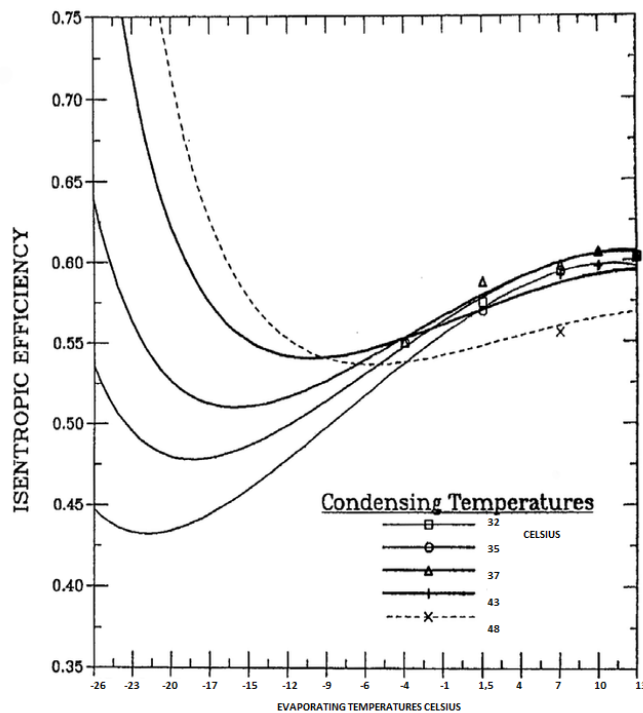
Mittaustuloksia on helppo käsitellä log p,h-tasossa kyseisellä sovelluksella, sillä se huomioi automaattisesti kompressorin imuputkessa ja purkuputkessa esiintyvät häviöt kompressorin tehossa, kunhan tiedot on osattu syöttää oikeisiin arvokenttiin. Tiedot syötetään kuvan syöttöikkunassa (KUVA 13).

The image shows two overlapping windows from the Coolpack software. The 'Cycle input' window on the left has the following settings: 'One stage' cycle type selected, 'Draw cycle' checked, and various temperature and pressure drop values set to 0.00. The 'Heat rejected from compressor' window on the right has 'Include heat rejected from compressor' checked, 'Specify Q' selected, and 'Q [kW]' set to 0. The 'Specify massflow by specifying' dropdown is set to 'Qe [kW]' with a value of 1.

KUVA 13. Syklin tietojen syöttö (mukailen Coolpack-sovellus)

Arvokenttiin tiedot on johdettu seuraavasti

- Evaporating temperature eli höyrystyslämpötila mittauspiste D
- Superheat eli tulistus mittauspisteen E ja F erotus ΔT kun positiivinen
- Condensing temperature eli lauhtumislämpötila mittauspiste B sekä interpolointi (TAULUKKO 4)
- Subcooling eli alijäähtyminen Lauhtumislämpötila ja mittauspiste C erotus ΔT
- Dp suction line eli painehäviö imuputkessa mittauspisteen E ja F erotus ΔT kun negatiivinen
- Dp discharge line eli painehäviö purkuputkessa mittauspisteen A ja B erotus ΔT
- Specify temperature after compressor eli lämpötila heti kompressorin jälkeen mittauspiste A
- Isentropic efficiency kuvaajasta (KUVA 14).



KUVA 14. Isentrooppisen höytysuhteen kuvaaja (mukaiillen Recip)

Log p,h-käyrät on esitelty liitteistä (LIITE 1-4). Saaduista käyristä on johdettu laskelmat taulukkoon (TAULUKKO 6) kaavalla (1).

TAULUKKO 6. COP-arvot log p,h-tarkastelun kautta

Mittauspäivä	Ulkolämpötila (C°)	Jakso ja sen pituus x/60 min (min)	Lauhtumisentapia (kJ/kg)	Puristusentapia (kJ/kg)	COP
3.1.2020	4	60	195,96	59,13	3,31
5.1.2020	-5	16	205,17	81,39	2,52
		33	193,36	78,91	2,45
		26	203,7	94,1	2,16
27.12.2019	-12	9	194,8	91,07	2,14
		16	184,05	140,42	1,31
		20	195,16	115,05	1,70
28.12.2019	-20	6	187,99	183,26	1,03
		22	198,55	168,62	1,18

Lopuksi laskettiin sykleistä keskiarvo, johon myös sulatusjakso huomioitiin mukaan tunnin tarkastelun ajalle kaavalla

$$\frac{COP_{jakso1} \cdot \left(1 + \frac{jakso1 \text{ min}}{60 \text{ min}}\right) + COP_{jakso2} \cdot \left(1 + \frac{jakso2 \text{ min}}{60 \text{ min}}\right) + COP_{jakso3} \cdot \left(1 + \frac{jakso3 \text{ min}}{60 \text{ min}}\right)}{jaksojen \text{ lukumäärä}} = COP_{jaksonumero} \quad (3)$$

jossa COP_{jakso} on yhden jakson COP, $jakso_{min}$ jakson pituus minuuttia ja $COP_{jaksonumero}$ keskiarvoinen COP tunnin tarkastelulle. Jos jaksoja on enemmän tai vähemmän kuin kaavassa, on kaavassa luonnollisesti on myös jaksoja vastaava määrä muuttujia COP_x ja $jakso_x$. Ensimmäisen COP-arvon

$$\text{laskeminen antaa tulokseksi (3) } COP_1 = \frac{2,52 \cdot \left(1 + \frac{16 \text{ min}}{60 \text{ min}}\right) + 2,45 \cdot \left(1 + \frac{33 \text{ min}}{60 \text{ min}}\right) + 0 \cdot \left(1 + \frac{60-16-33 \text{ min}}{60 \text{ min}}\right)}{3} = 2,32 \text{ ja}$$

lukuarvosijoitus muille luvuille tuottaa taulukon (TAULUKKO 7).

TAULUKKO 7. COP-arvot keskiarvotettu

Mittauspäivä	Ulkolämpötila (C°)	COP koko jakso keskiarvotettu
3.1.2020	4	3,31
5.1.2020	-5	2,32
27.12.2019	-12	1,80
28.12.2019	-20	1,25

4.5.2 Anto- ja ottotehotarkastelu

Tuloksien oikeellisuutta (TAULUKKO 7) voimme arvioida vertailevalla laskutoimituksella laskelmalla kaavalla (1) anto- ja ottotehon suhteen. Heti alkuun on kuitenkin todettava, että tämä tarkastelu tulee sisältämään paljon keskiarvottamista luvun 4.4.2 tekijöistä johtuen.

Ottotehot saadaan aiemmin laaditusta taulukosta (TAULUKKO 5), mutta antotehot täytyy laskea taulukon (TAULUKKO 4) lämpötilan muutosarvoista. Tähän voidaan hyödyntää lämpötilaeroa ΔT ja puhallusilman tilavuusvirtaa. Sisäyksikön luovuttama lämpöteho saadaan kaavasta

$$P_H = q \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

jossa P_H on lämpöteho (kW), q on ilman tilavuusvirta (m^3/s), ρ on ilman tiheys (kg/m^3), C_p on ilman ominaislämpökapasiteetti ($\frac{kJ}{K \cdot kg}$) ja ΔT on lämpötilanmuutos (K). Ilman ominaislämpökapasiteetille voidaan ilmoittaa vakio $C_p = 1 \frac{kJ}{K \cdot kg}$. Imuilman tiheydelle ρ on olemassa lämpötilaan sidoksissa oleva vakio.

Koska on kyseessä keskiarvollinen tarkastelu, tulos on johdettu taulukon (TAULUKKO 4) imuilma- virtojen lämpötilan keskiarvosta $+26,7^\circ C$, joten ρ on $1,177 kg/m^3$. Ilmanpaine oletetaan normaaliksi ilma- kehän paineeksi 1 ATM.

Tämän jälkeen tuntematon muuttuja on vielä q , ilman tilavuusvirta, joka mittauskaluston puuttumisen vuoksi täytyy sekin keskiarvottaa ilmoitettujen minimi- ja nimellistilavuusvirtojen (TAULUKKO 1) kanssa. Sisäyksikössä on viisi nopeutta. Automaattiasento vaikuttaa kokeen olosuhteissa aistien varai- sessa tarkastelussa puhaltavan alati samalla nopeudella ja äänenvoimakkuudella kuin käsikäytön asento 2. Puhallusnopeudessa ei tapahdu merkittävää muutosta kuin hetkellisesti lauhtumislämpötilan ääri- päissä. Näin ollen voidaan päätellä, että kaavassa sopivaksi käytettävä tilavuusvirta jää ilmoitetun mini- min ja nimellisen tilavuusvirran väliin. Keskiarvo luvuille $10 m^3/min$ ja $7.8 m^3/min$ on $8,9 m^3/min$. Teh- dään tälle vielä kaavan (4) vaatima yksikkömuutos $8,9 m^3/min / 60 s = 0,148 m^3/s$.

Tämän jälkeen voidaan laskea sisäyksikön keskimääräinen antoteho (4)

$$P_H = 0,148 m^3/s \cdot 1,177 kg/m^3 \cdot 1 \frac{kJ}{K \cdot KG} \cdot 11 K = 1,91 kW$$

Voidaan todeta, että lämmitystekot vaikuttaisivat loogisilta, jos vertaillaan luvussa 4.4.2 ilmoitettuun koeluonteiseen huipputehomittaukseen ja toimittajan tietoihin (TAULUKKO 1) seuraavilla arvoilla

$$P_{Hmax \text{ koeolosuhteissa}} = 0,206 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1.188 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 1 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{KG}} \cdot 15 \text{ K} = 3,67 \text{ kW}.$$

Tarkastelussa on kuitenkin muistettava, että imuilman lämpötila huojui kovasti, joten laskelmaan jää virheiden tarkasteluvaraa. Valmistajan ilmoittama nimellinen lämmitysteho 5,4 kW on mitä todennäköisemmin saavutettavissa toisenlaisissa koeolosuhteissa luvun 3.4.2 mukaan.

Kun nyt tunnetaan sisäyksikön keskimääräinen lämpöteho, voidaan kaavalla (1) laskea COP-arvot antoja ottotehon perusteella. Tehdään tarkastelussa vielä luvun 4.5.1 mukainen jaksotus COP-arvoon. Laskutoimituksiin tuodaan siis tiedot tässä luvussa lasketuista antotehoista ja taulukosta (TAULUKKO 5).

$$\text{COP}_{+4} = \frac{1,91 \text{ kW}}{0,52 \text{ kW}} = 3,67$$

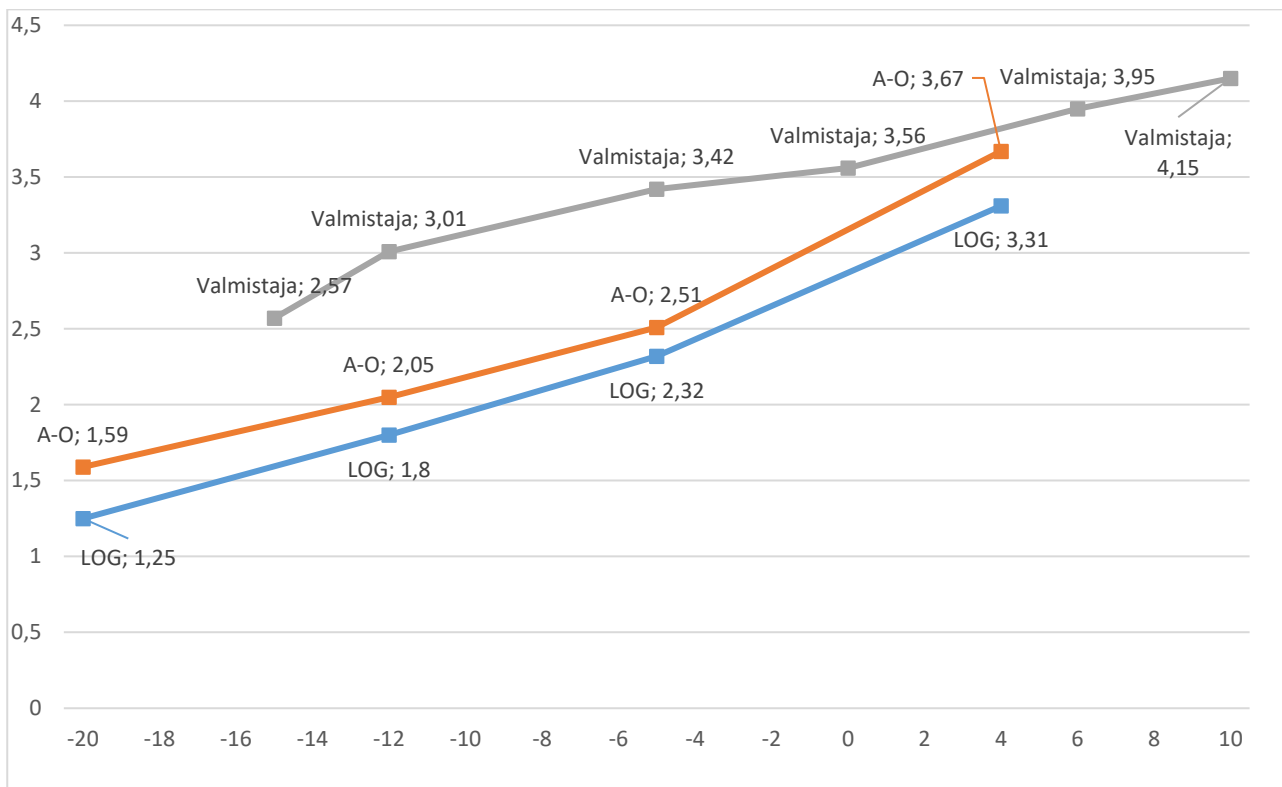
$$\text{COP}_{-5} = \frac{1,91 \text{ kW} \cdot \frac{49 \text{ min}}{60 \text{ min}}}{0,62 \text{ kW}} = 2,51$$

$$\text{COP}_{-12} = \frac{1,91 \text{ kW} \cdot \frac{51 \text{ min}}{60 \text{ min}}}{0,79 \text{ kW}} = 2,05$$

$$\text{COP}_{-20} = \frac{1,91 \text{ kW} \cdot \frac{48 \text{ min}}{60 \text{ min}}}{0,96 \text{ kW}} = 1,59$$

4.5.3 Lopputulosten arviointi

Lopuksi tehtiin vielä kuvaaja (KUVIO 2), jossa on COP-arvot taulukosta (TAULUKKO 2), taulukosta (TAULUKKO 7) ja luvussa 4.5.2 esitellyt COP-arvot. Voidaan todeta, että valmistajan ilmoittama COP on paljon suurempi, kuin testauksien perusteella aikaan saatu COP. Mutta on muistettava, että valmistajan saamat COP-tulokset on saatu erilaisissa testiolosuhteissa. Päälimmäisenä erona ovat valmistajan ilmoittamissa tuloksissa isommat otto- ja antotehot, joten testi ei ole tässä työssä identtinen. Valmistaja oli tehnyt tehotaulukon isommalla sisäyksikön pyörimisnopeudella eli tilavuusvirralla. Tämä huomattiin vasta opinnäytetyön puhtaaksikirjoitusvaiheessa tulosten tarkastelun yhteydessä, eikä uusia trenditarkasteluita tälle pumpulle päästy enää tekemään täydellä puhallusteholla. Testiolosuhteissa ei myöskään millään saavutettu valmistajan ilmoittamaa antotehoa luvun 4.5.2 mukaisesti, vaan jämhähdettiin tehoon 3,67 kW. Toisaalta testiolosuhteissa oli myös sellainen ero, että valmistaja ilmoittaa tehot korkeuserolle 0 ja putkimatkalle 5 m, joten nekin poikkesivat tämän testin vastaavista (LUKU 4.2). Opinnäytetyön kannalta on kuitenkin miellyttävää huomata, että kahdella erilaisella tarkastelutavalla saatiin kaksi hyvin samankaltaista kuvaajaa. Antoteho/ottoteho-tarkastelu antaa hieman paremman COP-arvon, kuin Log p,h-tarkastelu. Kuvaajassa pystyakselilla COP ja vaaka-akselilla ulkolämpötila.



KUVIO 2. COP-arvojen vertailu

Ottotehojen taulukko (TAULUKKO 5) osoittaa hyvin, kuinka invertteriteknikka toimii. Kun lämmitystehon tarve on pieni ja ulkolämpötila selkeästi plussan puolella, on myös tehon tarve pieni. Kun kompressori joutuu tekemään puristukseen enemmän työtä pakkasen puolella, nousee myös ottoteho. Tavanomainen On/Off-kompressori kävisi jatkuvasti samalla ottoteholla ja lämpökerroin olisi ulkolämpötilasteikon yläpäässä ja/tai suuremman lämmitystehon tarpeen kohdalla paljon huonompi.

4.5.4 Virheiden arviointi

Tässä työssä käytettyjä trendimittausmenetelmiä voidaan pitää lämpötilan osalta melko luotettavina ja sähkön kulutuksen osalta täysin luotettavana. Trendimittauksien tarkkuus pitäisi olla anturivalmistajan mukaan $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, kun mittausalue on $0-70^{\circ}\text{C}$. Valmistaja ilmoittaa, ettei anturi sovellettu kylmien lämpötilojen mittaukseen putken pinnalta kondensoitumisilmiön takia, mutta tällä tarkoitettaneen sitä, että pinta-anturin tuominen sisätiloihin kylmään putkeen aiheuttaisi tippavesiongelmia liitoskohdassa. Itse mitaustuloksissa ei ole tämän opinnäytetyön perusteella miinuspuolella ongelmaa. (Ouman.)

Suurimmat mittausvirheet tulevat käsin tehdyissä mittauksissa K-tyyppin termoelementillä. Tälle valmistaja ilmoittaa tarkkuudeksi $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$, kun mittausalue on $-40 - +1200^{\circ}\text{C}$ (Testo). Toleranssin lisäksi on huomioitava mittauksen huojunnasta ja epätasaisuudesta johtuva interpolointi.

Isentrooppista hyötysuhdetta kuvaava kuvaaja (KUVA 14) ei ollut kompressorin oma, mutta luvun 4.5.2 vertailevaan laskentaan perustuen siitä poimitut hyötysuhdearvot eivät voi olla kovin paljon pielessä.

Puhaltimen tilavuusvirta selvitettiin aistinvaraisista mittauksista keskiarvottamalla, joten sille jää auttamatta muutaman prosentin virhevara. Sama tapahtuu lauhtumislämpötilalle. Jos tähän tutkimukseen olisi saatu mittauspisteet sekä imu- että puhallusilman lämpötilalle, puhallusilman tilavuusvirralle sekä sisäyksikön putkilähtöihin lämpötilamittauspisteet, voitaisiin tätä tutkimusta pitää jo todella tarkkana. Nyt useammassa kohdassa tapahtunut interpolointi jättää työn lopputulokseen jonkin verran virheen mahdollisuutta. Painemittauksia lisäämällä työstä saataisiin jo liki pitäen aukoton. Sen sijaan mittauspisteen E hieman virheellinen sijainti ei vaikuttanut juurikaan COP-arvon käsittelyyn.

Lämpökertoimen tarkastelun jakaminen jaksoihin on lienee kelvollisin tapa määrittää COP, mutta myös jaksojen sisällä tapahtui pienimuotoista huojuntaa, joka saattaa tehdä vielä oman mittavirheen COP-arvoon. Virheistä huolimatta (KUVIO 2) vaikuttavaa olevan lähellä todellisuutta ja on syytä olettaa, että saatu arvopistesarja on oikean suuntainen ja toisiinsa nähden oikeassa suhteessa, vaikka se liikkuisi y-akselilla jompaankumpaan suuntaan 5-10%.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä oli tarkoitus mallintaa ilmalämpöpumpun häviöllinen kiertoprosessi eri ulkolämpötiloissa ja laskea näistä mallinuksista mahdollisimman lähellä todellista olevat COP-arvot. Siitä huolimatta, että virheiden arviointi jättää tutkimustyön lopullisille numeerisille arvoille pientä liikkumavaraa, voidaan tässä opinnäytetyössä tehtyä koetta kuitenkin pitää varsin onnistuneena. Koe osoittaa selvästi, kuinka sulatusjaksot nakertavat lämmityskäytössä lämpökerrointa ja laitoksen tuottamaa kokonaislämpötehoa. On perusteltua tehdä johtopäätös, että COP-arvo laskee dramaattisesti valmistajan ilmoittaman toimintalämpötilan jälkeen. Laitteella voidaan kuitenkin lämmittää melko luotettavasti vielä -20°C ulkolämpötilassa ja saatava teho on vielä suoraa sähkölämmitysratkaisua tehokkaampi. Tutkimustyö jättää kuitenkin avoimeksi mielenkiintoisen kysymyksen, siitä miten eri valmistajat mahtavat kompensoida sulatusjaksoja ilmoittamistaan antotehoista tai Euroventin standardin ulkopuolelle ilmoitetuista COP-arvoista. Kuten tämä tutkimustyö osoittaa, ei COP-arvo ole paras mahdollinen tapa vertailla lämpöpumppujen tehokkuutta pohjoisen olosuhteissa ainakaan silloin, kun lämpöpumppu on varustettu kuumakaasusulatuksella. On selvää, että jollakin energiatehokkaalla rinnakkaisella sulatusmenetelmällä ilmalämpöpumpun kokonaishyötysuhdetta voitaisiin parantaa. Jos ilmalämpöpumpun ulkoyksikkö on sijoitettavissa esimerkiksi ilmanvaihtokoneen jäteilmaulostulon välittömään läheisyyteen, voidaan sulatusjaksoja saada varmasti pienemmäksi. Tekniikan maailma on tutkijan muistinvaraisesti tehnyt vastaavia kokeita mm. talon rossipohjassa todella mielenkiintoisin tuloksin.

Tutkimustyössä olisi ollut hienoa tarkastella ilmalämpöpumpun toimintaa myös vielä kylmemmissä ulkolämpötiloissa, mutta Suomen talvi ei sellaisia tarjonnut tutkimuksen aikana. Jo nyt kuitenkin nähtiin, kuinka suuri painehäviö ilmestyy kompressorin imupuolelle, kun höyrystymislämpötila on lähellä -20°C ja kompressori on toipumassa sulatusjaksosta täyteen toimintakuntoon. Valmistajan ilmoittamista arvoista tehty lineaarinen sovitus voidaan todeta epäkelvoksi tavaksi hahmottaa COP.

Koska opinnäytetyöllä ei ollut varsinaista toimeksiantajaa, vaan kyseessä oli omaehtoinen tutkimustyö, jäävät opinnäytetyöstä löydetyt havainnot käyttöön opinnäytetyön tekijälle itselleen, joka työskentelee lämpöpumppujen ja kylmätekniiikan parissa. Opinnäytetyöprosessi avasi tekijälleen kylmäteknikasta useita uusia asioita ja tarjoaa varmaan myös tuleville opinnäytetyöntekijöille kelvolliset vertailutulokset.

Lämpötilamittaukseen perustuvaa prosessin mallinnusta voidaan pitää kelvollisena tapana tutkia kylmälaitoksen käyntiä ja tähän perustuen vikatilanteita. Kokonaan oma työnsä voisi olla kehittää huoltokäyttöön valmistettu mittalaite langattomilla antureilla, joilla huoltoasentaja voisi prosessia tarkastella kenttäolosuhteissa vastaavista pisteistä kuin tässä työssä. Suurten kylmälaitteistojen mallintaminen tämän opinnäytetyön menetelmin rakennusautomaatioissa laajemminkin saattaisi helpottaa vikatilanteiden selvittämistä. Opinnäytetyön tekijä ei ole perehtynyt kaupan kylmäjärjestelmiin kovin hyvin, mutta olettaisi siellä lämpömittausten olevan huoltoasentajia varten käytössä. Jos näin ei ole, olisi alalla syytä pohtia tämän kaltaisten kiinteiden mittausten käyttöönottoa.

LÄHTEET

AEL. 2015. AEL Kylmäasentajan kurssi I-II aineisto.

Daikin. 2015. Air Conditioning Technical Data. EEDEN15-100.

Darment. 2019. Darment kylmäaineiden jaottelu. Saatavissa: <https://www.darment.fi/kylmaaineinfo/kylmaaineiden-jaottelu/>. Viitattu 7.1.2020

Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2019. Tekniikan kemia. Edita Publishing Oy.

Jorrit, W. & Maarten, W. 1995. Coolpack IPU. Technical University of Denmark (DTU).

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2014. Kylmätekniiikan perusteet. Juvenus Print - Suomen Yliopistopaino Oy.

Eskola, L., Jokisalo, J. & Siren, K. 2012. Lämpöpumppujen energialaskentaopas.

Lämpötilamestarit Oy - Daikin Stylish. 2018. Saatavissa <https://www.lampotilamestarit.fi/ilmalampopumput/daikin-stylish.php>. Viitattu 15.1.2020.

Mellin, I. 2006. Lineaarinen regressioanalyysi. Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. TKK.

Motiva. 2019. Motiva - Loma-asunto talvikuntoon. Saatavissa https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/ajankohtaista_nyt/energiatehokkuutta_loma-asumiseen/loma-asunto_talvikuntoon. Viitattu 3.1.2020

Ouman. 2019. Ouman - TMS pinta-anturin datalehti. Saatavissa https://ouman.fi/wp-content/uploads/2018/08/TMS__data_brochure__fi.pdf. Viitattu 16.1.2020

Recip. 2019. Saatavissa https://www.researchgate.net/figure/Compressor-Isentropic-Efficiency-As-a-Function-of-Evaporating-and-Condensing-Temperatures_fig1_228392994. Viitattu 10.1.2020

Scanoffice. 2019. Ecodan esite. Saatavissa https://www.scanoffice.fi/wp-content/uploads/sites/11/2019/10/ecodan_netiversio_20191018.pdf. Viitattu 11.1.2020

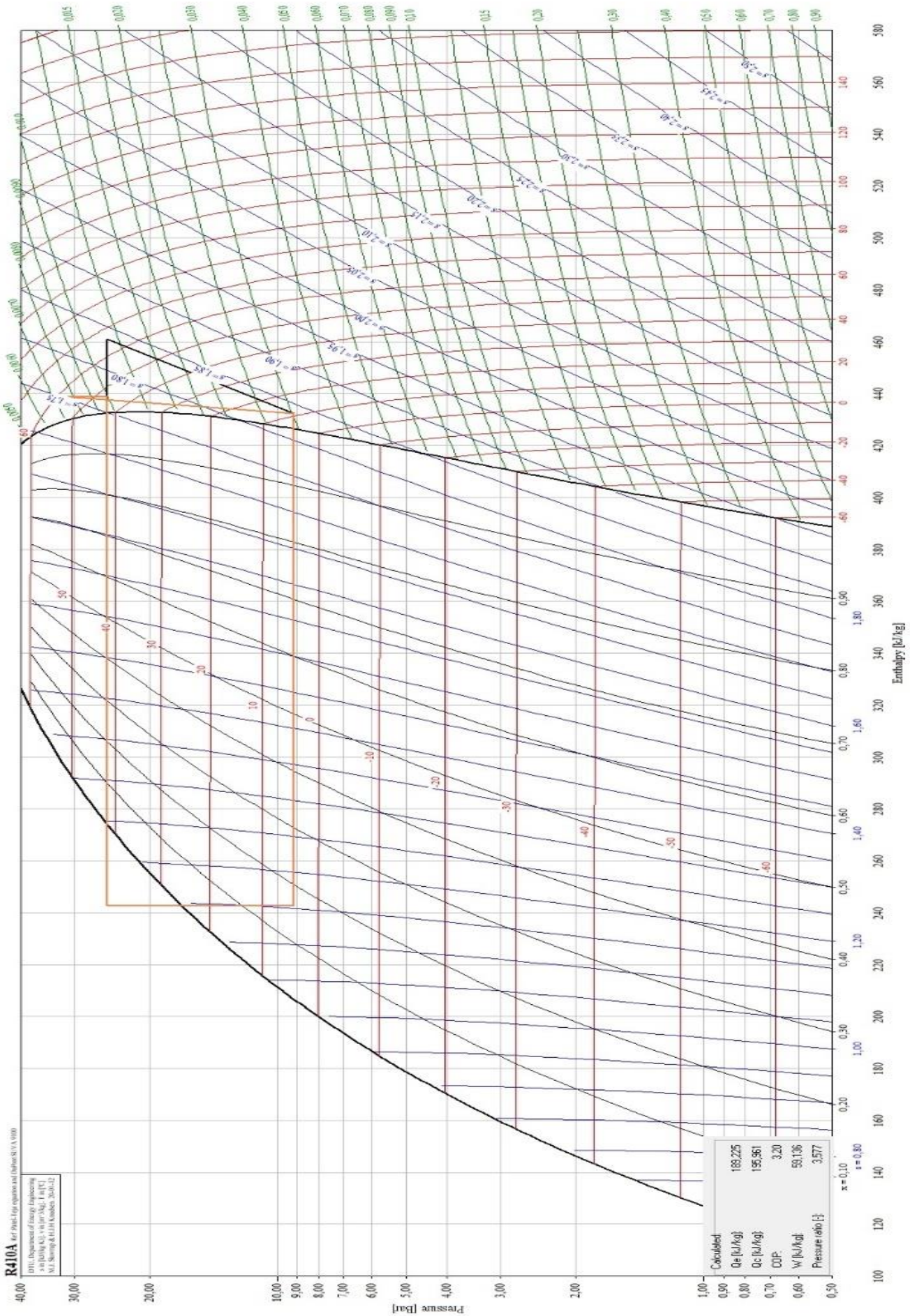
Sulpu. 2018. Suomenlämpöpumppuyhdistys - myydyt lämpöpumput 2018. Saatavissa <https://www.sulpu.fi/documents/184029/208772/Myydyt%201%C3%A4mp%C3%B6pumput%202018.pdf>. Viitattu 8.1.2020

Suomen lämpöpumppuyhdistys ry. 2012. Saatavissa https://www.sulpu.fi/uutiset/-/asset_publisher/WD1ExS3CMra3/content/cop-cop-tosi-o-1. Viitattu 9.1.2020

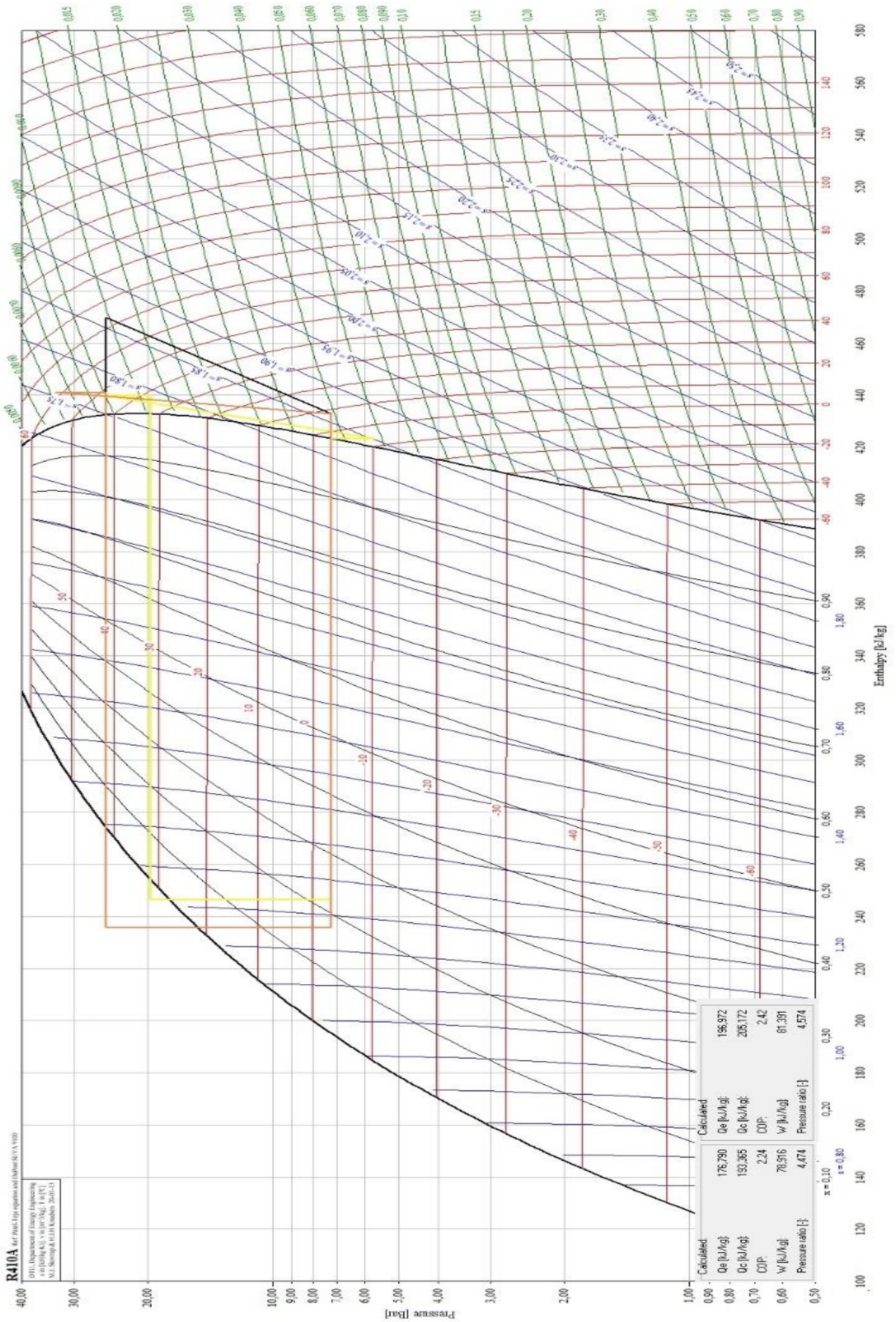
Testo. 2019. Testo 0602 4592 probe datalehti. Saatavissa [https://www.testo.com/en-US/pipe-clamp-probe-for-pipe-diameter-0-2-to-2-5"-with-replac/p/0602-4592](https://www.testo.com/en-US/pipe-clamp-probe-for-pipe-diameter-0-2-to-2-5). Viitattu 16.1.2020

Ympäristöministeriö. 2007. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta ohjeet. YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, Asunto- ja rakennusosasto.

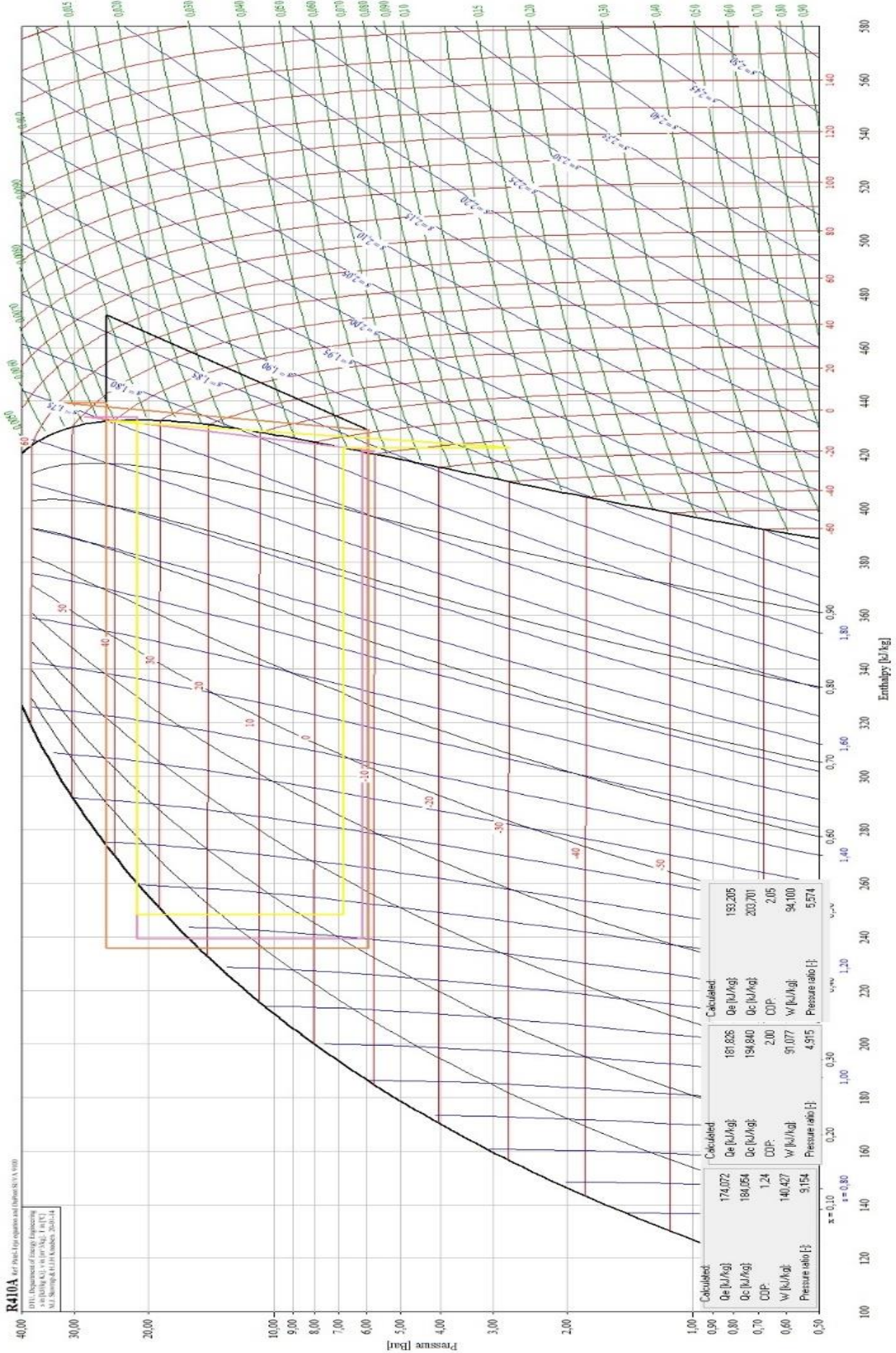
LIITE 1



LIITE 2



LIITE 3



LIITE 4

