



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Jussi Hyvärinen

Vesikiertoisen lämmönvaihtimen suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

9.11.2020

Tekijä Otsikko	Jussi Hyvärinen Vesikiertoisen lämmönvaihtimen suunnittelu ja valmistus
Sivumäärä Aika	35 sivua + 0 liitettä 9.11.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa Tuotekehityspäällikkö Ari Brusila, Profound Medical Oy
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin ja valmistettiin Profound Medical Oy:lle lämmönvaihtimen prototyyppi, joka toimii osana piirikortteja jäähdyttävää jäähdytysjärjestelmää. Tavoitteena oli saada rakennettua lämmönvaihdin, joka täyttää asetetut vaatimukset kustannusten, tehokkuuden sekä valmistettavuuden kannalta. Myös lämmönvaihtimen tarkka dokumentointi sekä siihen kuuluvien osien sekä komponenttien saatavuuden selvittäminen sekä hankinta kuuluivat työn tavoitteisiin.</p> <p>Työ tehtiin kartoittamalla aluksi erilaisia vaihtoehtoja ja materiaaleja lämmönvaihtimen toteutukselle. Suunnitelluista osista tehtiin piirustukset, joiden perusteella osat tilattiin alihankkijoilta. Lämmönvaihtimen osat dokumentoitiin tarkasti ja lämmönvaihdin koottiin siitä ennalta tehtyjä ohjeita noudattaen, jolloin varmistuttiin ohjeiden täsmällisyydestä ja niitä voitiin tarvittaessa tarkentaa. Lisäksi lämmönvaihtimelle tehtiin testisuunnitelma, jolla sen tehokkuutta oli tarkoitus myöhemmin mitata.</p> <p>Työn tuloksena syntyi ennalta asetetut vaatimukset täyttävä lämmönvaihdin osaksi jäähdytysjärjestelmää.</p>	
Avainsanat	Lämmönvaihdin, jäähdytys

Author Title Number of Pages Date	Jussi Hyvärinen Design and Manufacture of a Water-Circulating Heat Exchanger 35 pages + 0 appendices 9 November 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer Ari Brusila, Research and Development Manager
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by Profound Medical Oy, and it discusses the design and manufacturing of a prototype for a water-circulating heat exchanger. The heat exchanger functions as part of a printed circuit boards' cooling system. The objective was to design and build a heat exchanger, which would meet the requirements in cost-effectiveness, efficiency and manufacturability. Furthermore, the objective was the documentation of the heat exchanger, and all parts and components related to it, as well as finding reliable subcontractors and retailers for them.</p> <p>Firstly, different options and materials for the heat exchanger were examined. Secondly, the parts were designed and drawings were created. Based on the drawings, the parts were ordered. All parts were carefully documented, and the heat exchanger was assembled based on the instructions. The instructions were made before the assembly to ensure that it was possible to verify their functionality and make corrections to instructions if needed. In addition, a test plan was created for efficiency testing.</p> <p>As a result, a heat exchanger was manufactured, which meets the requirements and works as part of a cooling system.</p>	
Keywords	Heat exchanger, cooling

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	MR-kaappi ja jäähdytysjärjestelmä	2
2.1	Suunnitellun MR-kaapin rakenne	2
2.2	Piirikorttien jäähdytysjärjestelmän rakenne	3
2.3	Lämmön siirtyminen ja piirikorttien jäähdytyksen lämmönvaihtimet	3
2.3.1	Vanha ilmajäähdytteinen lämmönvaihdin	4
2.3.2	Uusi nestejäähdytteinen lämmönvaihdin	5
3	Lämmönvaihtimen osat ja komponentit	8
3.1	Tuulettimen valinta	8
3.2	Jäähdytys-elementin valinta	10
3.3	Vesiblokin suunnittelu	13
3.3.1	Erilaiset virtauslajit	13
3.3.2	Vesiblokin kiinnitys ja materiaalivalinnat	13
3.4	Muut lämmönvaihtimen komponentit	16
3.4.1	Tiiviste	16
3.4.2	Kiinnitykseen tarvittavat komponentit	17
3.4.3	Lämmönvaihtimen kotelo	19
4	Dokumentaatio ja prototyypin tilaus	21
4.1	Dokumentaatio	22
4.2	Prototyypin tilaus	26
5	Prototyypin kokoonpano ja testisuunnitelma	26
5.1	Lämmönvaihtimen kokoonpano	26
5.2	Lämmönvaihtimen kiinnitys MR-kaapissa	28
5.3	Testaukseen tarvittava laitteisto	29
5.4	Testisuunnitelma	30
6	Yhteenveto	34

Lyhenteet

MRI	Magnetic Resonance Imaging. Magneettikuvaus.
MR-kaappi	Magnet room -kaappi. Kaappi, joka sijaitsee MR-kuvauslaitteen RF-suojatussa huoneessa magneettikentän vaikutuksessa.
RF	Radio Frequency. Radiotaajuinen säteily.
CFM	Cubic Feet per Minute. CFM-arvolla ilmaistaan esimerkiksi tuulettimen liikkuttaman ilmavirran määrää.
LFM	Linear Feet per Minute. LFM-arvolla ilmaistaan esimerkiksi jäähdytyslementin läpi virtaavan ilman määrää.
POM	Polyasettaali. Yleisesti koneenrakennuksessa käytetty tekninen muovilaatu.
DFA	Design For Assembly. Suunnittelua, jossa tuotteen kokoonpantavuus otetaan huomioon.
BOM	Bill Of Materials. Osaluettelo.
PLM	Product Lifecycle Management. Tuotteen elinkaaren hallinta.

1 Johdanto

Profound Medical Oy on yritys, joka kehittää ja markkinoi räätälöitäviä ja viiltovapaita hoitomuotoja, joissa yhdistyy reaaliaikainen magneettikuvaus eli MRI (Magnetic Resonance Imaging) ja ultraääniterapia. Hoidoilla tähdätään hyvänlaatuisten tai syöpäkasvaimien poistamiseen kuumentamalla, jota kutsutaan ablaatioksi. Yrityksen kehittämät laitteet ovat laajoja kokonaisuuksia, jotka sisältävät mekaniikkaa, elektroniikkaa ja laitteissa käytettäviä ohjelmistoja.

Yrityksellä oli tavoitteena saada aikaan kustannussäästöjä suunnittelemalla ja järjestelemällä järjestelmään liittyviä komponentteja uudelleen. Tämän johdosta osana kesätyötä suunniteltiin uusi magneettikuvaushuoneeseen tuleva prototyyppi kaapista eli MR-kaappi, joka sisältää magneettikuvauslaitteen lähelle magneettihuoneeseen tarvittavat komponentit ja laitteet. MR-kaappi sisältää paljon piirikortteja, joille tarvitaan jatkuva jäähdytys laitteen ollessa toiminnassa. Tätä tarkoitusta varten MR-kaappiin suunniteltiin piirikorteille uusi vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä, joka korvaa vanhan ilmajäähdytyksen jäähdytysjärjestelmän. Osana uutta jäähdytysjärjestelmää suunniteltiin uusi lämmönvaihdin, jota tämä insinööriyö käsittelee.

Tässä insinööriyössä keskitytään lämmönvaihtimen suunnitteluun, toteutukseen sekä testaussuunnitelmaan. Tavoitteena oli suunnitella uudelle nestekiertoiselle jäähdytysjärjestelmälle lämmönvaihdin, joka täyttää sille ennalta asetut vaatimukset ja soveltuu käyttöympäristöönsä. Suunniteltavalle lämmönvaihtimelle oli vaatimuksia niin kustannusten, tehokkuuden kuin valmistettavuudenkin kannalta. Insinööriyössä käydään läpi suunnittelun lähtötiedot, tehtyihin valintoihin ja ratkaisuihin vaikuttaneet asiat sekä esitellään valmistettu lämmönvaihdin. Lisäksi lopussa käsitellään lämmönvaihtimen testaussuunnitelmaa.

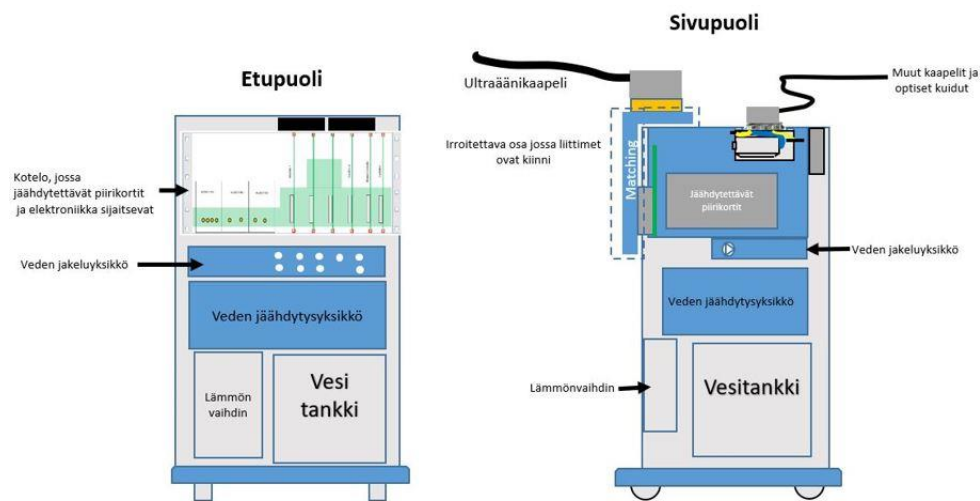
2 MR-kaappi ja jäähdytysjärjestelmä

2.1 Suunnitellun MR-kaapin rakenne

Suunniteltu MR-kaappi sisältää pääpiirteissään seuraavat komponentit ja laitteet:

- kotelo, jonka sisällä sijaitsevat järjestelmään kuuluvat jäähdytettävät piirikortit, virtalähteet ja muu elektroniikka
- piirikorttien jäähdytysjärjestelmä, johon kuuluu useita komponentteja sekä laitteita
- erillinen vesikiertoinen järjestelmä, jolla potilasvuoteeseen liittyvää erillistä toimintoa voidaan jäähdyttää ja ohjata hoitajan tai käyttäjän toimesta
- muut MR-kaappiin ja sen toimintaan liittyvät liittimet, kaapelit ja komponentit.

Suunnittelun alussa MR-kaapista oli olemassa alustava hahmotelma kaapin tulevista ulkomitoista sekä sisälle tulevien komponenttien sijoittelusta. Piirikorttikotelon paikka kaapin katossa tiedettiin jo varmaksi heti suunnittelun alussa, sillä katosta oli tarkoitus tuoda johdot ja liittimet kaappiin. Muiden komponenttien paikkoja ei ollut ennalta tarkasti määritelty vaan niiden sijoittelua hahmoteltiin suunnittelun edetessä. Kuvasta 1 on nähtävissä kaappiin tulevista komponenteista sekä niiden sijoittelusta varhainen hahmotelma, jota käytettiin suunnittelun lähtökohtana.



Kuva 1. Hahmotelma MR-kaapin keskeisistä komponenteista ja niiden sijainneista MR-kaapissa.

MR-kaappi haluttiin suunnitella mahdollisimman kompaktiksi, jotta se vie hoitohuoneessa mahdollisimman vähän tilaa ja on helposti liikuteltavissa. Muita suunnittelussa huomioonotettavia seikkoja olivat kaapin toimintaympäristö MRI-laitteen magneettisessa hajakentässä (30 mT...100 mT), joka täytyi ottaa huomioon komponenttien ja suunnittelujen osien materiaalivalinnoissa. Näiden lisäksi kaikki rakenteet täytyi suunnitella RF-tiiviiksi, koska MRI-laite on hyvin herkkä RF-häiriöille sen kuvauskaistalla (64 MHz +/- 0,5 MHz tai 128 MHz +/- 0,5 MHz). RF tulee englannin kielen sanoista radio frequency, ja sillä tarkoitetaan radiotaajuista säteilyä. Lisäksi jo suunnitteluvaiheessa pyrittiin ottamaan huomioon osien ja komponenttien kustannukset, saatavuus ja valmistettavuus, koska koko projektin tavoitteena oli saada aikaan merkittäviä kustannussäästöjä.

2.2 Piirikorttien jäähdytysjärjestelmän rakenne

Jäähdytysjärjestelmä rakentuu useasta erillisestä laitteesta, jotka kaikki toimivat järjestelmän osana ja jotka ovat toisiinsa yhteydessä joko sähköisesti tai esimerkiksi vesiletken kautta. Jäähdytysjärjestelmä voidaan jakaa karkeasti seuraavanlaisiin osiin:

- piirikortteja vasten olevat vesiblokit
- vedenjakeluyksikkö
- lämmönvaihdin
- vesisäiliö sekä järjestelmän väliset letkut ja liittimet.

2.3 Lämmön siirtyminen ja piirikorttien jäähdytyksen lämmönvaihtimet

Lämpö voi siirtyä paikasta toiseen kolmella tavalla, joita ovat konduktio, konvektio ja säteily. Konduktiolla tarkoitetaan lämmön johtumista kiinteässä aineessa, ja konvektiolla lämmön johtuminen tapahtuu esimerkiksi nesteen tai kaasun eli fluidin avulla. Säteily on lämmön siirtymistä säteilemällä, joka voi tapahtua myös tyhjiössä. (1, s. 116.) Konvektio voidaan lisäksi jakaa vapaaseen konvektioon ja pakotettuun konvektioon. Vapaasta eli luonnollisesta konvektiosta puhuttaessa tarkoitetaan sitä, että lämmön siirtyminen aiheutuu ilman syntyvistä tiheyseroista ja lämmin ilma siirtyy kevyempänä kylmemmän ilman yläpuolelle. (1, s. 125.) Pakotettu konvektio taas tarkoittaa sitä, että lämpö saatetaan

liikkeeseen jonkin ulkoisen tekijän kuten esimerkiksi puhaltimen aiheuttaman ilmavirran avulla (1, s. 126).

2.3.1 Vanha ilmajäähdytteinen lämmönvaihdin

MR-kaappiin tulevien ultraäänivahvistinpiirikorttien jäähdytykseen oli aiemmissa prototyypeissä käytetty ilmajäähdytystä. Kuumenevat vahvistinkomponentit ovat kiinni erityisessä piirikortissa, jossa piirikortti on erotettu ohuella ja erityisen hyvin lämpöä johtavalla eristeellä paksusta kuparikerroksesta, joka on integroitu piirikorttiin ja jonka toisella puolella on alumiininen jäähdytyslementti (kuva 2). Jäähdytyslementti on hyvin lämpöä johtavasta materiaalista valmistettu passiivinen komponentti, jolla johdetaan lämpöä pois jäähdytettävästä komponentista ympäröivään ilmaan. Jäähdytyslementin ideana on lisätä jäähdytettävän kohteen pinta-alaa, jolloin lämmön johtuminen ympäröivään ilmaan tehostuu. (2, s. 1.) Kuvassa 2 näkyvä piirikortti oli vahvistimen mekaniikkaan asennettuna asemoituna niin, että voimakkaista tuulettimista tuleva jäähdytysilma oli ohjattu kulkemaan jäähdytysripojen suuntaisesti vaakatasossa. Näitä piirikortteja oli useampia päällekkäin, ja sivuilla sijaitsevat tuulettimet puhalsivat kylmää ilmaa sisään ja imivät lämmintä ilmaa ulos vastakkaiselta puolelta.



Kuva 2. Jäähdytettävä kaksiosainen piirikortti, jossa kiinnitettynä ilmajäähdytykseen käytettävät siniset jäähdytyslementit. Oranssi nuoli osoittaa pienempää kuparista piirikorttia, jonka alapuolella kuumenevat vahvistinkomponentit sijaitsevat.

Lämmön siirtymisen näkökulmasta tarkasteltuna vanha jäähdytysjärjestelmä perustuu konduktioon sekä pakotettuun konvektioon, sillä lämmön siirtyessä kuumenevista komponenteista piirilevyyn integroituun kuparikerrokseen ja tästä jäähdytyslementtiin siirtyminen tapahtuu kiinteässä aineessa johtumalla eli konduktiolla. Tuulettimien puhaltamalla ilmavirtaa jäähdytysripojen lävitse lämmön siirtyminen tapahtuu pakotetulla konvektiolla, jossa fluidina toimii ilma.

2.3.2 Uusi nestejäähdytteinen lämmönvaihdin

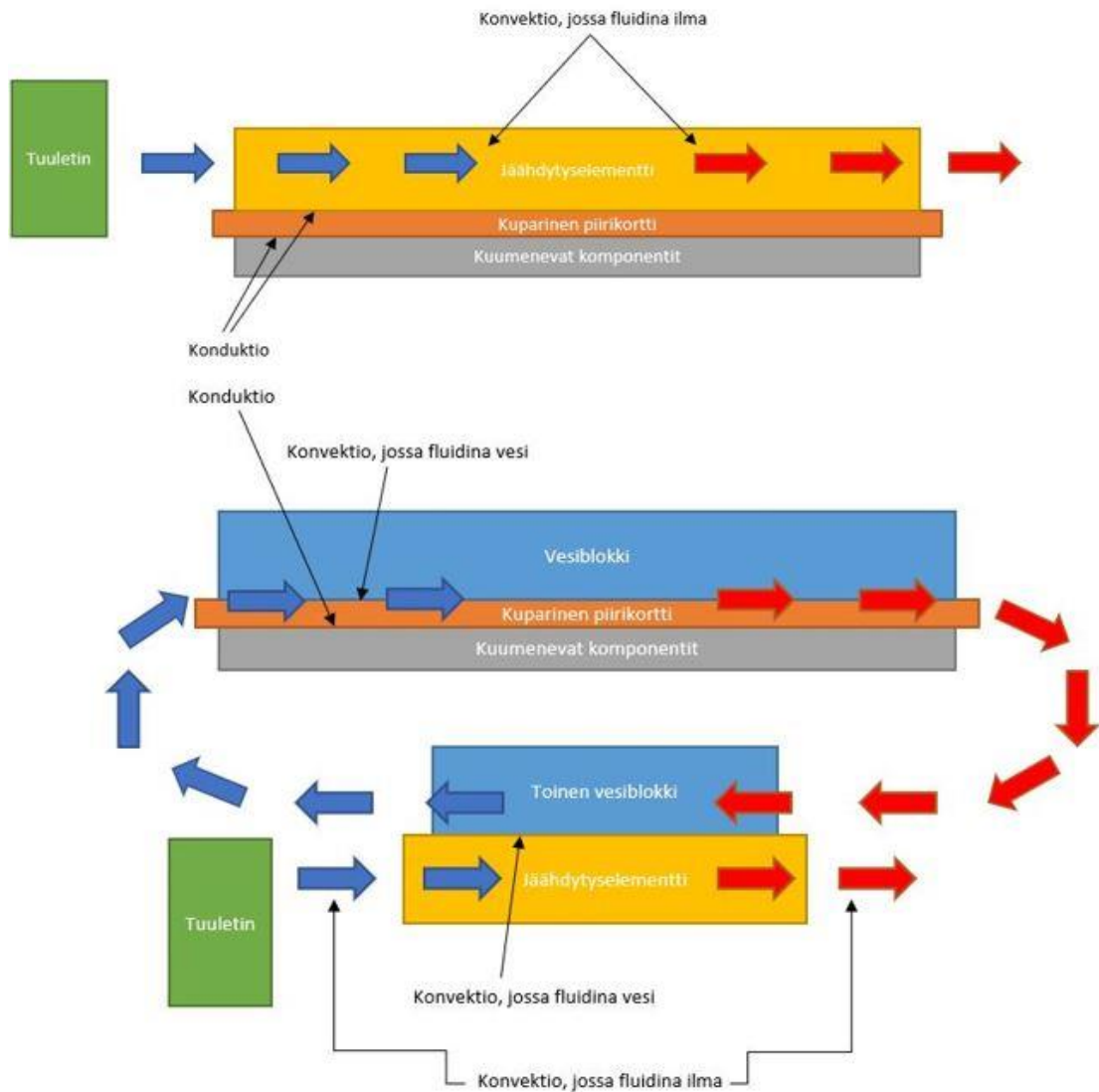
Uudessa prototyypissä komponenttien jäähdytys oli päätetty vaihtaa ilmajäähdytteisestä järjestelmästä vesijäähdytykseen suuremman jäähdytystehon aikaansaamiseksi ja koska aiemmin käytetyt tuulettimet olivat tehokkuudestaan huolimatta äänekkäitä. Lisäksi ilmajäähdytteisen ratkaisun ongelmana oli, että ilma täytyi saada puhallettua ulos kaapista ja tehokkaasti tehtynä kyseinen ratkaisu olisi vaatinut kaapin kattoon paljon reikiä ilmanpoistolle. Tuotteen käyttäjä käsittelee kuitenkin kaapin lähellä myös nesteitä, jolloin olisi ollut riski, että esimerkiksi vettä kaatuu kaapin päälle ja suoraan jäähdytettävään elektroniikkaan.

Aineiden ominaisuuksien taulukkoarvoja vertailemalla voidaan havaita, että veden ominaislämpökapasiteetti ($c = 4,182 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) on maapallolla esiintyvistä yleisistä aineista suurin. Jos veden ominaislämpökapasiteettia verrataan ilman ominaislämpökapasiteettiin ($c_p = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) voidaan havaita, että veden ominaislämpökapasiteetti on yli nelinkertainen ilmaan verrattuna. (3, s. 408–410.) Huomionarvoista kuitenkin on, että kaasumaisten aineiden kuten ilman ominaislämpökapasiteetin arvo riippuu myös paineesta, ja tästä syystä yllä esitetty ilman ominaislämpökapasiteetin arvo on muodossa c_p , joka tarkoittaa ominaislämpökapasiteettia vakioaineessa (n. 101,325 kPa), joka on normaali ilmanpaine maanpinnalla. Ominaislämpökapasiteetti ilmaisee, kuinka paljon yhteen kilogrammaan ainetta on tuotava lämpöenergiaa, jotta sen lämpötila nousee yhdellä asteella. Vesi pystyy siis ottamaan vastaan ja luovuttamaan suuren määrän lämpöenergiaa ilman, että sen oma lämpötila muuttuu paljoa. (4, s. 423.)

Veden hyvän lämmönvarauskyvyn lisäksi veden lämmönjohtavuus on huomattavasti ilmaa parempi. Aineiden lämmönjohtavuudella tarkoitetaan aineen kykyä johtaa lämpöä, ja mitä suurempi arvo on, sitä paremmin aine kykenee lämpöä johtamaan. Tästä syystä

aineita, joilla lämmönjohtavuusarvo on pieni, käytetään usein eristeinä. (4, s. 451 ja s. 455.) Aineiden ja materiaalien lämmönjohtavuutta voidaan kuvata lambdalla λ , jonka yksikkö on SI-järjestelmää käyttäen wattia/kelvin * metri eli W/(K*m). Kun vertailtavien aineiden lämmönjohtavuus on mitattu 20 °C:ssa, on ilman lämmönjohtavuus $\lambda = 0,026$ ja veden $\lambda = 0,598$ (3, s. 384–385).

Jäähdytettävien piirikorttien yhteydestä oli tarkoitus poistaa alumiiniset jäähdytys-elementit ja suunnitella niiden tilalle vesiblokki, jota pitkin vesi kiertää sitoen lämpöä itseensä ja joka kuljettaa lämmön erilliselle lämmönvaihtimelle. Lämmönvaihdin koostuu pääosin toisesta vesiblokista sekä jäähdytys-elementistä, josta lämpö puhalletaan ulos kaapista tuulettimen avulla. Uusi lämmönvaihdin perustuu lämmön siirtymisen näkökulmasta sekä konduktioon että pakotettuun konvektioon, jossa fluidina toimivat vesi sekä ilma. Kuvasta 3 voidaan nähdä sekä ilmajäähdytteisen että nestejäähdytteisen lämmönvaihtimen lämmönsiirtymistavat. Uudessa järjestelmässä vesi kiertää lämmönvaihtimesta erilliseen vesisäiliöön, josta edelleen vedenjakeluyksikköön. Vedenjakeluyksikössä sijaitsee järjestelmässä käytettävä pumppu sekä vedenjakotukki. Jakeluyksiköstä vesi pumpataan piirikorteille, josta se palaa takaisin vedenjakeluyksikön kautta lämmönvaihtimelle.



Kuva 3. Ylempänä ilmajäädytteisen lämmönvaihtimen lämmönsiirtymistavat ja alempana nestejäädytteisen lämmönvaihtimen lämmönsiirtymistavat. Kaikki kuvan konvektiot ovat pakotettuja konvektioita. Kuvaan ei ole merkitty eikä siinä ole otettu huomioon muita jäähditysjärjestelmän laitteita kuten esimerkiksi pumppua sisältävää vedenjakeluysikköä.

3 Lämmönvaihtimen osat ja komponentit

Lämmönvaihtimen suunnittelulle oli alussa sekä vaatimuksia että rajoitteita. Vaatimuksina oli saavuttaa riittävän hyvä jäähdytysteho, joka perustui yrityksessä tehtyihin karkeisiin laskelmiin kaapissa käytettävien kuumenevien komponenttien tuottamasta lämmöstä sekä lisäksi kokemuseräiseen tietoon aikaisemmista laitteista. Rajoitteita lämmönvaihtimelle asettivat sen toimintaympäristö magneettikentässä, joka täytyi erityisesti materiaalivalinnoissa ottaa huomioon. Toiseksi lämmönvaihtimen sijainti kaapin takaseinässä asetti rajoitteita sen muodolle ja asemoinnille. Kolmanneksi kaikkien lämmönvaihtimessa käytettävien materiaalien ja komponenttien tuli olla yleisesti helposti tilattavissa tai valmistettavissa, jotta projektin alkuperäinen tarkoitus eli kustannussäästöt saataisiin osaltaan toteutumaan.

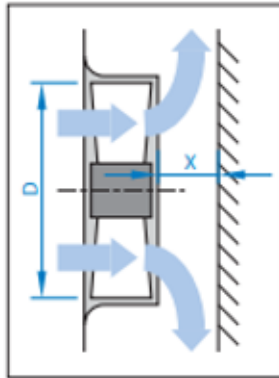
3.1 Tuulettimen valinta

Tuulettimen valintaan vaikuttavia seikkoja olivat sen toimintaperiaate, koko sekä tehokkuus. Osaltaan valintaan vaikutti myös tuulettimen melutaso, sillä käyttökohde sijaitsee hoituhuoneessa, jossa laitteen melutason tulee olla riittävän alhainen, jottei se häiritse laitteen käyttäjää tai potilasta. Tuulettimet voidaan jakaa seuraavaan neljään pääryhmään siipipyörän muodon sekä rakenteen perusteella:

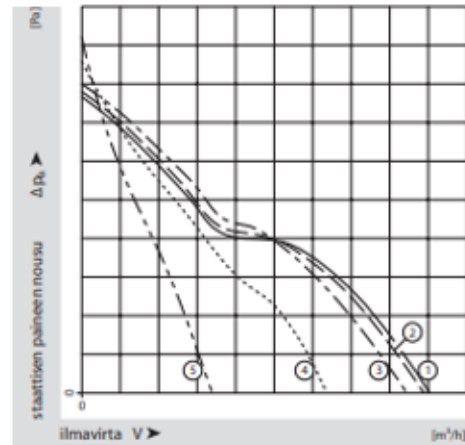
- aksiaalipuhaltimet
- keskipakopuhaltimet taaksepäin kaartuvin siivin
- keskipakopuhaltimet eteenpäin kaartuvin siivin
- diagonaalipuhaltimet.

Yleistäen voidaan sanoa, että kohteeseen, jossa on tavoitteena saada suuri ilmanvirtaus pienellä vastapaineella, sopii parhaiten aksiaalipuhallin. (5, s. 1.) Tästä syystä lämmönvaihtimessa päätettiin käyttää aksiaalipuhallinta, sillä vaikka kohteessa on painepuolella esteenä jäähdytyslementti, on sen pinta-ala tuulettimen siipipyörän muodostaman ympyrän pinta-alaan verrattuna melko pieni ja toisaalta tuulettimen tarkoitus on saada ilma virtaamaan esteen eli elementin ripojen väleistä. Kuvassa 4 on esitettyä tuulettimen painepuolen esteiden heikentävä vaikutus aksiaalipuhaltimen ilmavirtaukseen.

Painepuolen esteet:



- ① $x/D = \infty$
- ② $x/D = 35\%$
- ③ $x/D = 18\%$
- ④ $x/D = 9\%$
- ⑤ $x/D = 5\%$

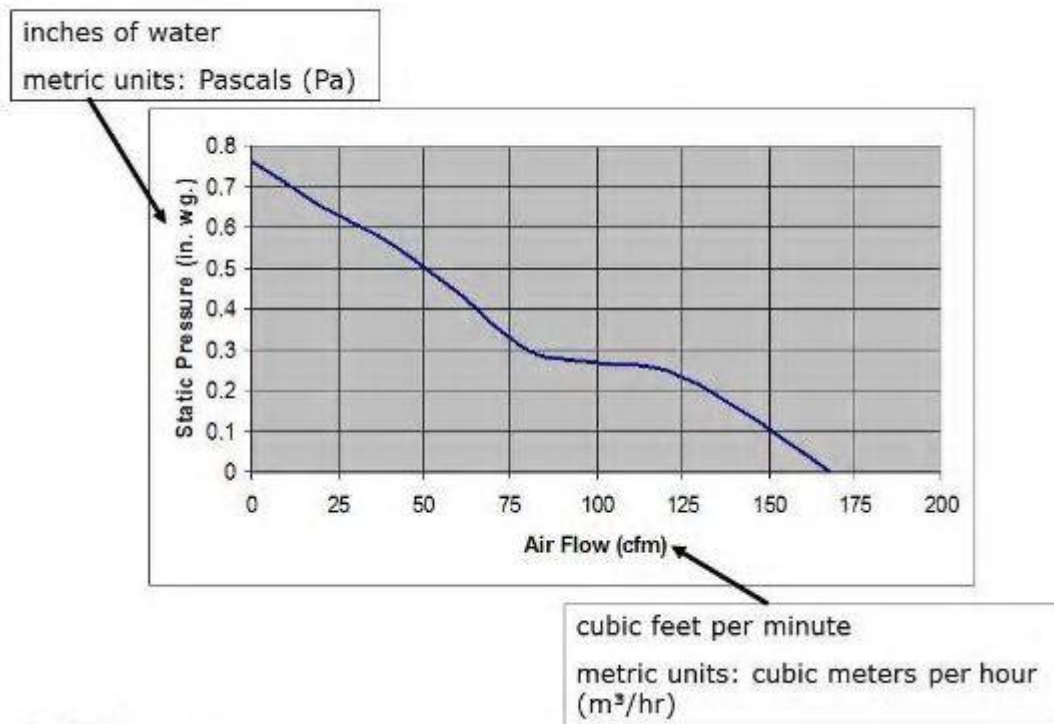


Kuva 4. Aksiaalipuhaltimen painepuolen esteen vaikutus ilmanvirtaukseen. Kuvassa D tarkoittaa puhaltimen siipipyörien muodostaman ympyrän halkaisijaa ja x puhaltimen ja esteen välistä etäisyyttä. (5, s. 4.)

Aksiaalipuhallin on myös yleisesti käytetty ja luotettava rakenne tuulettimelle, ja tästä syystä sitä käytetään monissa suunniteltua lämmönvaihdinta vastaavissa arkipäiväisissä sovelluksissa kuten esimerkiksi tietokoneiden jäähdytyksessä.

Tuulettimen valinnassa otettiin huomioon lisäksi tuulettimen ilmoitettu CFM-arvo. CFM-arvolla kuvataan tuulettimen puhaltaman ilmavirran määrää, ja termi tulee englannin kielen sanoista Cubic Feet per Minute. Yksinkertaisesti sanottuna mitä suurempi CFM-arvo on, sitä tehokkaammin tuulettimella voidaan jäähdyttää haluttua kohdetta. Tuulettimia vertailtaessa voidaan tarkastella myös niiden ominaiskäyriä, joilla kuvataan tuulettimen puhaltaman ilman määrää staattista painetta vasten. Kuvassa 5 on esitetty erään tuulettimen ominaiskäyrä, jossa pystyakselilla on kuvattu staattisen paineen nousua ja vaakakselilla liikutetun ilman määrää. Huomionarvoista on, että taulukon suureita ei ole ensisijaisesti ilmoitettu SI-yksiköissä.

Air Performance Curve



Kuva 5. Tuulettimen ominaiskäyrä (6, s. 2).

Prototyyppejä varten tilattiin neljä erilaista tuuletinta, joista kaksi oli ulkomitoiltaan 92 x 92 x 38 mm ja kaksi 119 x 119 x 38 mm. CFM-arvot olivat valituissa tuulettimissa huomattavista kokoeroista huolimatta lähellä toisiaan ollen välillä 139,5–141,3 CFM, ja lisäksi tuulettimissa oli pieniä eroja esimerkiksi materiaaleissa ja rakenteessa. Koska tuulettimen tulee toimia rikkoutumatta magneettikentässä, testattiin niitä kytkemällä ne paristoon ja viemällä testihuoneeseen, jossa vaikuttaa voimakas magneettikenttä. Testeissä kaksi tuulettimista hajosi, ja kahden toimintaan magneettikenttä ei vaikuttanut mitenkään vaan ne toimivat täysin normaalisti. Näistä päädyttiin malliin, jonka CFM-arvo oli suurempi.

3.2 Jäähdytyslementin valinta

Jäähdytyslementin valinta oli suunnittelun seuraava askel, sillä sen muoto ja jäähdytys-teho vaikuttivat oleellisesti lämmönvaihtimen muiden komponenttien suunnitteluun ja va-

lintaan. Johtuen muista MR-kaapissa olevista komponenteista oli lämmönvaihdin suunniteltu sijoitettavaksi MR-kaapin takaseinään pystyyn, jolloin sen täytyi olla muodoiltaan tarpeeksi litteä mutta pinta-alaltaan tarpeeksi laaja, jotta vaadittu jäähdytysteho täyttyy. Jäähdytyslementtien materiaalina käytetään yleensä alumiinia, koska se on materiaalina kevyttä ja sen lämmönjohtavuus on korkea ($220 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$) (3, s. 384).

Jäähdytyslementtien jäähdytystehoa ilmaistaan yleensä ilmoittamalla lämpöresistanssin eli lämpövastuksen arvo, jolla kuvataan jäähdytyslementin kykyä siirtää lämpöä pois jäähdytettävästä kohteesta. SI-järjestelmän mukaisesti lämpöresistanssin yksikkö on kelviniä per watti (K/W), mutta jäähdytyslementtejä vertailtaessa arvo ilmoitetaan yleensä muodossa celsiusta per watti eli $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, joka on käytännössä sama asia, koska Kelvin-asteikon ja Celsius-asteikon asteväli on sama. Tämän johdosta tilanteessa, jossa ilmaistaan lämpötilaeroja, vastaa yksi kelvin yhtä celsiusta. Kyseinen suure ilmoitetaan yleensä sekä luonnollisena arvona että pakotettuna arvona, jolloin elementtiin kohdistuu pakotettu ilmavirta. Koska ilmavirran voimakkuus vaikuttaa jäähdytystehoon, ilmoitetaan pakotetun ilmavirran arvossa lisäksi LFM-arvo, joka tulee englannin kielen sanoista Linear Feet per Minute ja joka kuvaa elementin läpi kulkevaa ilman määrää. Kuvassa 6 on esitetty ote erään jäähdytyslementin datalehddestä, josta nähdään ilmoitettuja lämpöresistanssin arvoja.

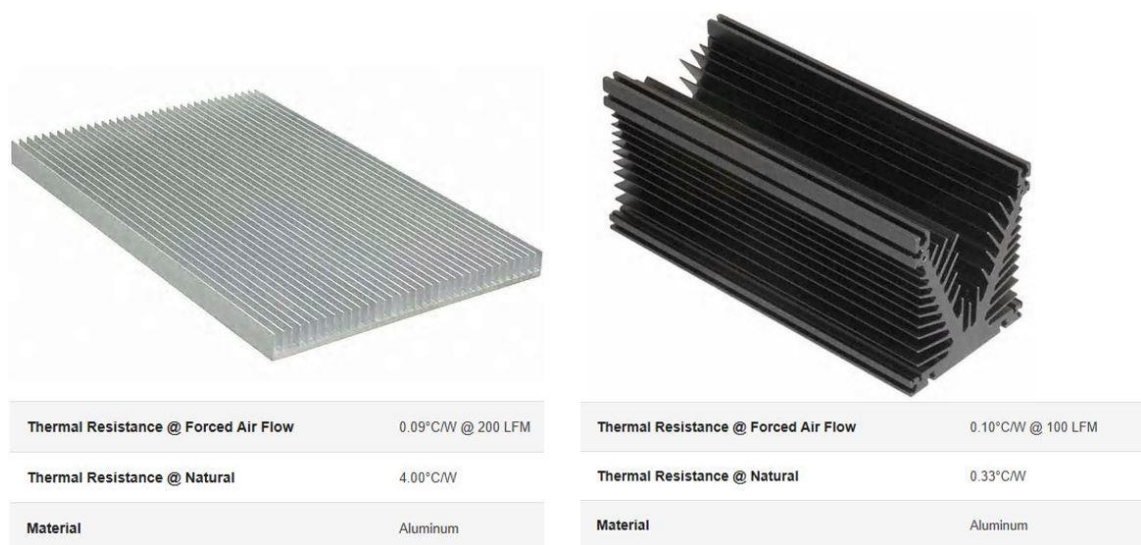
Thermal Resistance @ Forced Air Flow	0.09 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ @ 200 LFM
Thermal Resistance @ Natural	4.00 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
Material	Aluminum

Kuva 6. Jäähdytyslementin lämpöresistanssiarvoja, joista näkee pakotetun ilmavirran vaikutuksen jäähdytystehokkuuteen (7, s. 1).

Näiden parametrien vertailun tuloksena jäähdytyslementiksi valikoitui Advanced Thermal Solutions Inc:n valmistama elementti, jonka lämpöresistanssiarvo pakotetussa ilmankierrossa on 0,10 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ LFM-arvon ollessa 100. Jäähdytyslementti oli myös muodoiltaan sellainen, että siihen oli helppo suunnitella jäähdytyslementtiä vasten tuleva

litteä vesiblokki. Näiden asemointi MR-kaapin takaseinässä osoittautui kuitenkin haasteelliseksi, koska jäähdytyslementti oli muodoiltaan litteä ja tuuletin taas neliömäinen, jolloin ympärille olisi täytynyt suunnitella kuoret ja eräänlainen ilmanohjauspelti, joka olisi kuristanut ilmavirtaa voimakkaasti litteälle jäähdytyslementille. Lisäksi lämmin ilma täytyi saada ohjattua tehokkaasti ulos kaapin seinästä, jolloin pystyasennossa olevan elementin ja sitä ympäröivän ohjauspellin yläpäähän olisi täytynyt tehdä ylimääräinen mutka.

Näiden haasteiden takia päädyttiin järjestelemään kaapissa olevia komponentteja uudelleen, jotta saataisiin tilaa sopivamman muotoiselle jäähdytyslementille niin, että lämmönvaihdin voisi olla kokonaan vaaka-asennossa ja tuuletin voisi puhaltaa lämpimän ilman suoraan ulos kaapista ilman ylimääräisiä ilmanohjauspeltoja ja mutkia. LFM-arvoja ja elementtien muotoja vertailtaessa päädyttiin tilaamaan toinen, Wakefield-Vetten valmistama jäähdytyslementti, jonka muodot sopivat paremmin yhteen tuulettimen kanssa. Kuvasta 7 nähdään molempien tilattujen jäähdytyslementtien muoto sekä ilmoitettu lämpöresistanssin arvo.



Kuva 7. Oikealla lämmönvaihtimeen valittu jäähdytyslementti. Vasemmanpuoleinen jäähdytyslementti oli arvoiltaan sopiva mutta muodoiltaan haasteellinen MR-kaappiin sijoitettavaksi. (7, s. 1; 8, s. 1.)

3.3 Vesiblokin suunnittelu

Vesiblokin muodolle ja pinta-alalle oli selkeät rajoitteet, sillä sen koko ja muoto oli pitkälti määritelty jäähdytyslementin valinnassa johtuen siitä, että vesiblokki oli suunniteltu kiinnitettäväksi tiiviisti jäähdytyslementin takapintaan. Lämmönvaihtimen toimintaan ja tehokkuuteen voidaan kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi vesikanavien muodoilla ja blokin materiaalilla. Tämän lisäksi toimintaan vaikuttavat järjestelmän muut komponentit, kuten esimerkiksi vesipumppu, joka vaikuttaa järjestelmässä kiertävän veden virtausnopeuteen.

3.3.1 Erilaiset virtauslajit

Vesiblokin nestekanavien muotoilulla on vaikutusta siihen, millaista virtausta kanaviin muodostuu. Vesiblokki oli tarkoitus tehdä työstökeskuksella jyrsimällä ja asettaa jäähdytyslementin suoraa takapintaa vasten, jolloin nestekanavat ovat muodoiltaan suorakulmaisia. Kanavat ovat kuitenkin vaihtelevan kokoisia, koska kanavien päihin suunniteltiin kuristuksia niille kanaville, jotka sijaitsevat lähimpänä veden sisääntuloaukkoa. Vastaa vasti kauimpina sijaitsevia kanavia kuristettiin vähemmän. Neste virtaukselle on kaksi virtauslajia, jotka ovat laminaarinen ja turbulenttinen. Laminaarisella virtauksella tarkoitetaan sitä, kun neste virtaa tasaisesti ilman, että eri kerrokset sekoittuvat toisiinsa. Turbulenttisella virtauksella taas tarkoitetaan tilannetta, jossa neste pyörteilee ja voi hetkellisesti kulkea jopa virtaussuunnan vastaisesti. Virtauslajiin vaikuttavat myös pinnankarheus ja esimerkiksi virtausnopeus, joka kasvaessaan tarpeeksi suureksi muuttaa laminaarisen virtauksen turbulenttiseksi. (9, s. 175.)

3.3.2 Vesiblokin kiinnitys ja materiaalivalinnat

Vesiblokki suunniteltiin ulkomitoiltaan vastaamaan jäähdytyslementin mittoja, mutta koska jäähdytyslementti oli tarkoitettu puristesovitteiseksi, oli sen pohjassa kaksi uraa. Puristesovitteisellä jäähdytyslementillä tarkoitetaan kiinnitystapaa, jossa jäähdytyslementin pinnassa kulkee ura tai uria. Uraan puristetaan putki, jossa neste virtaa ja joka puristuessaan muodostaa tiiviin kontaktin putken ja jäähdytyslementin välille, jolloin lämpö siirtyy tehokkaasti virtaavasta nesteestä jäähdytyslementtiin. (10, s. 1.)

Urien takia vesiblokin vesialue ei olisi voinut olla jäähdytyslementin ulkomittojen mukainen, vaan merkittävästi pienempi. Lisäksi vesiblokki oli suunniteltu kiinnitettäväksi vesialueen ulkokehältä ruuveilla, jotka myös osaltaan olisivat vieneet pinta-alaa itse vesialueelta. Koska vastaavan kokoista ja muotoista jäähdytyslementtiä ilman kiinnitysuria ei ollut saatavilla, päätettiin prototyypissä käyttää valittua jäähdytyslementtiä urista huolimatta. Tämän takia päädyttiin ratkaisuun, että vesiblokin ja jäähdytyslementin väliin suunnitellaan yhtenäinen ja hyvin lämpöä johtava välilevy, jonka avulla voitiin maksimoida vesiblokin vesialueen pinta-ala ja johon vesiblokki voitiin kiinnittää. Välilevy päätettiin tehdä kuparista, jonka lämmönjohtavuus on erinomainen (399 W/(m*K)) ja jolloin lämpö siirtyy vedestä kuparin kautta jäähdytyslementtiin (3, s. 348). Kuvasta 8 nähdään jäähdytyslementti, välilevy sekä vesiblokki.



Kuva 8. Suunnitellun lämmönvaihtimen osia. Jäähdytyslementin pohjassa näkyvät puristussoviteen urat.

Vesiblokkiin haluttiin saada aikaiseksi laminaarista virtausta, jonka takia vesikanavat suunniteltiin pitkiksi ja suoriksi pyrkien siihen, että vesi virtaa tasaisesti kattaen mahdollisimman suuren pinta-alan sitä vasten olevan kuparisen välilevyn pinta-alasta. Kuten mainittua, sijoitettiin veden sisään- ja ulostuloreiät elementin keskilinjalle joten keskimäisiä kanavia kuristettiin asteittain niin, että keskimäisen kanavan aukko on leveydeltään puolet laitemmaisten kanavien aukkojen leveydestä (kuva 9).

Koska lämpö haluttiin siirtää suoraan kupariseen välilevyyn mahdollisimman tehokkaasti, päätettiin vesiblokki tehdä materiaalista, joka sitoo itseensä lämpöä huonosti. Rakenteen tuli olla myös mahdollisimman kevyt ja helposti koneistettavissa, joten materiaaliksi päätettiin valita polyasetaaali eli POM. POM on yleisesti koneenrakennuksessa käytettävä tekninen muovilaatu, joka soveltuu hyvin kosteisiin ympäristöihin ja jolla on hyvä kulutuskestävyys sekä kitkakerroin. Materiaali on lisäksi sopiva alhaisen lämmönjohtavuutensa ($0,39 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) sekä riittävän käyttölämpötila-alueensa vuoksi (11, s. 1). Vesiblokkia suunniteltaessa päätettiin käytännössä myös lämmönvaihtimessa käytettävien vesiliittimien koko, sillä liittimille täytyi määrittellä oikeanlaiset kierteet kiinnitystä varten. Myös käytettävän tiivisteiden koko määriteltiin vesiblokin suunnittelun ohessa.

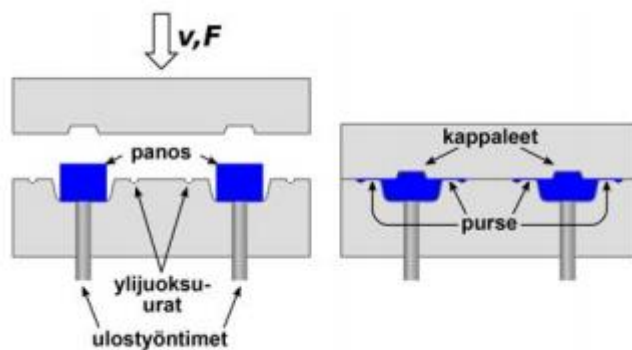


Kuva 9. Kuparilevyä vasten asennettava vesiblokki, jossa kehällä uloimpana kiinnitysruuvien paikat. Reikäkehän sisäpuolella näkyvä tiivisteura sekä keskellä vesikanavat.

3.4 Muut lämmönvaihtimen komponentit

3.4.1 Tiiviste

Tiiviste on koneenelin, jonka tarkoituksena on erottaa kahden pinnan leikkauskohdat toisistaan (12, s. 1). Lämmönvaihtimelle pyrittiin valitsemaan tiiviste, joka kestää vaadittavia lämpötiloja ja on mekaanisilta ominaisuuksiltaan sellainen, että se on puristettavissa kokoon melko pienellä kiristysvoimalla. Yhtenä vaihtoehtona tiivisteelle pohdittiin sen teettämistä Shore 50A -luonnonkumista ahtopuristusmenetelmällä. Ahtopuristusmenetelmällä tarkoitetaan valmistustapaa, jossa haluttu raakamateriaali asetetaan käytettävän muotin sisälle. Tämän jälkeen muotti suljetaan ja puristetaan yhteen yleensä hydraulitoimisella puristimella, jolloin materiaali täyttää muotin muodot ja ylimääräinen materiaali pursuaa sille tarkoitettuja kanavia pitkin ulos. Lisäksi ahtopuristimen puristinlevyt ovat yleensä kuumennettavia, jolloin raakamateriaali sulaa ja muotoutuu muotin muotoihin ennen jähmettymistään. (13, s. 30.) Kuvasta 10 nähdään ahtopuristusmenetelmän toimintaperiaate. Tiivisteessä muotti olisi ollut hyvin yksinkertainen ja helposti valmistettava. Alihankkijalla olisi teetetty muotti eli tässä tapauksessa yksinkertainen alumiininen osa, johon olisi koneistettu ura halutun tiivisteeseen muodolle ja muotin toisena puolikkaana olisi toiminut pelkkä suora levy.



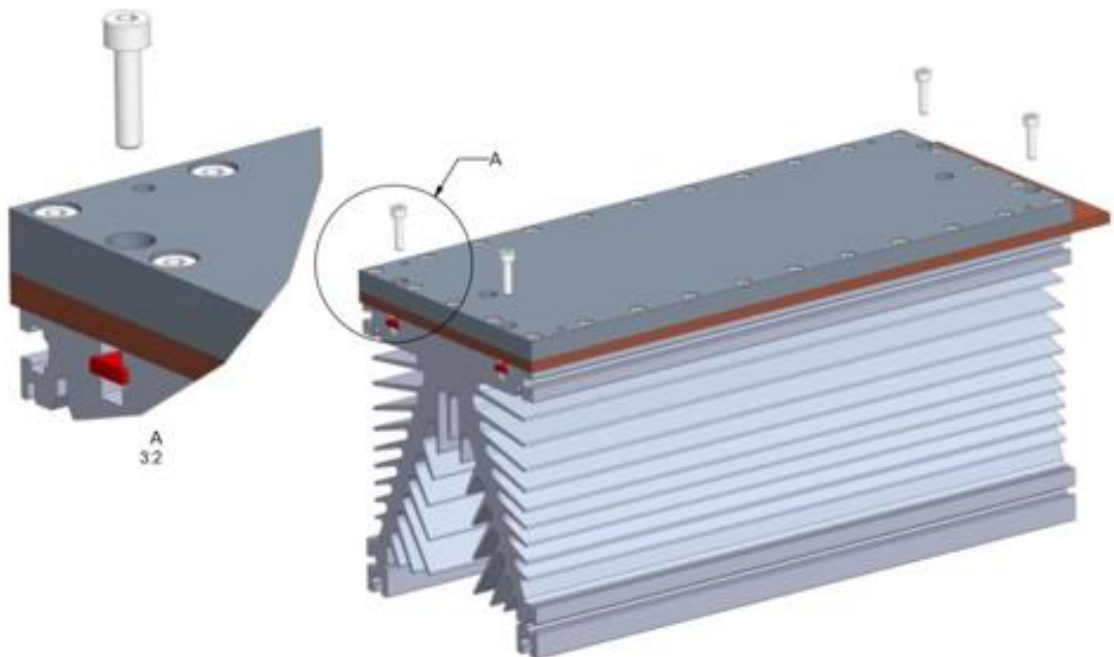
Kuva 10. Ahtopuristusmenetelmä. Valmis kappale työnnetään ulostyöntimien avulla irti muotista. (13, s. 30.)

Toisena vaihtoehtona oli käyttää tiivisteeseen materiaalina aiemmin yrityksessä muissa kohteissa käytettyä silikonitiivistettä, jota yrityksen tiloista löytyi valmiina rullatavarana. Kyseisen tiivistelaadun (J-Flex Silicone Sponge) käyttölämpötila-alue oli myös kohteeseen hyvin soveltuva, sillä sitä voidaan käyttää kohteissa, joissa nesteen lämpötila on välillä

-60 °C – 230 °C (14, s. 1). Kustannus- ja saatavuussyiden takia tiivisteiden osalta päädyttiin jälkimmäiseen vaihtoehtoon, jolloin voitiin teettää alihankkijalla pelkästään vesileikattu tiiviste ilman, että ensin tarvitsee valmistuttaa muottia tiivistettä varten.

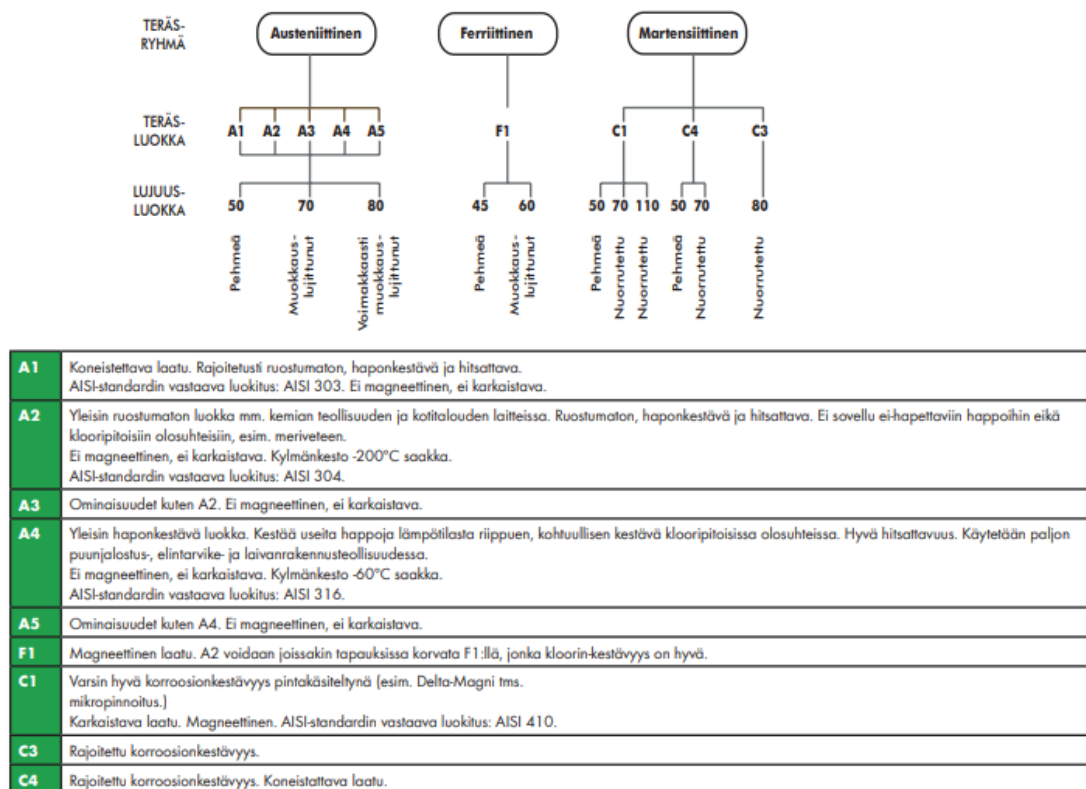
3.4.2 Kiinnitykseen tarvittavat komponentit

Jäähdytyslementin kiinnittämiseksi kupariseen välilevyyn sekä vesiblokkiin suunniteltiin erilliset kiinnitysosat, jotka sijoitettiin jäähdytyslementin puristussoviteuriin. Tällöin voitiin välttää kiinnitysruuvien kierteiden koneistus jäähdytyslementin pohjaan, jolloin myös vesialue olisi pienentynyt kiinnitysreikien kehän vaatiman tilan verran. Koska yrityksellä ei ole omaa konekantaan tämän tekemiseksi, olisi kierteet jouduttu myös teettämään alihankkijalla, josta olisi koitunut ylimääräisiä kustannuksia. Jäähdytyslementin uria hyväksikäyttämällä ei jäähdytyslementtiin tarvinnut tehdä muutoksia ja kiinnitysosien ollessa yksinkertaiset valmistaa ei niistä tullut suuria kustannuksia. Kuvasta 11 voidaan nähdä jäähdytyslementin kiinnitys. Kuparisen välilevyn ja jäähdytyslementin väliin laitettiin lisäksi lämpötahnaa hyvän lämmönjohtavuuden varmistamiseksi.



Kuva 11. Jäähdytyslementin kiinnitys vesiblokkiin. Punaisella näkyvä kiinnitysosa liu'utetaan jäähdytyslementin puristusuraan, ja osa kiristetään ruuvilla jäähdytyslementin läpi, jolloin kuparinen välilevy puristuu jäähdytyslementin pohjaa vasten.

Kiinnitykseen tarvittavien ostokomponenttien valinnassa täytyi myös osaltaan ottaa huomioon lämmönvaihtimen voimakkaasti magneettinen toimintaympäristö. Tästä syystä kaikkien käytettävien ruuvien, aluslevyjen sekä muttereiden materiaaliksi valittiin niin kutsuttu haponkestävä teräs EN1.4404, joka on antimagneettista austeniittista ruostumatonta terästä (15, s. 8). Vaikka teräslaatu luokitellaan antimagneettiseksi, saattaa se kylmämuokkauksen tai hitsauksen jäljiltä olla kuitenkin hieman magneettista (16, s. 1). Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kiinnitystarvikkeiden materiaalin ominaisuudet ilmaistaan yleensä ISO 3506 -standardin mukaisilla merkinnöillä (17, s. 11–15). ISO 3506 on neliosainen standardi, joka kattaa esimerkiksi ruuveja, pultteja sekä mutteita. Yleisimmin myytävät ruostumattomasta teräksestä valmistetut kiinnitystarvikkeet ovat joko teräsluokkaa A2 tai A4. Luokan A2 kiinnitystarvikkeet ovat ruostumatonta terästä, jonka seoksena on kromia ja nikkeliä ja luokka A4 on niin kutsuttua haponkestävää terästä EN 1.4404:ää, jossa on seosaineena lisäksi molybdeeniä (18, s. 17). Kuvasta 12 nähdään ISO 3506 standardin mukaisia kiinnitystarvikkeiden merkintöjä.

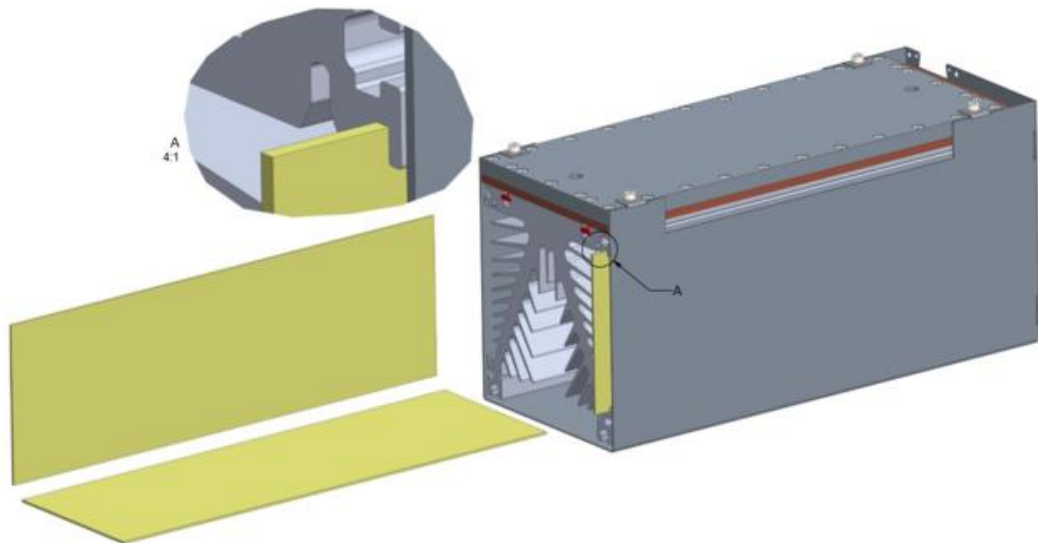


Kuva 12. ISO 3506 -standardissa määriteltyjen A2- sekä A4-teräsluokkien kuvaukset (18, s. 17).

3.4.3 Lämmönvaihtimen kotelo

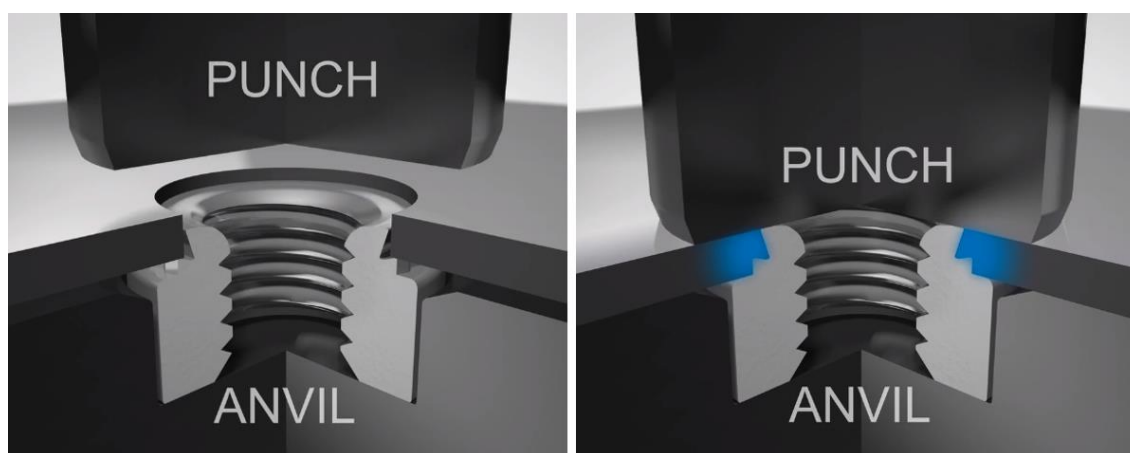
Tuulettimen puhaltama lämmin ilma täytyi saada mahdollisimman tehokkaasti ulos kaapista. Tätä varten lämmönvaihtimelle suunniteltiin ulkokuoret, jotta ilma saatiin kuljetettua mahdollisimman tehokkaasti jäähdytyslementin ripojen lävitse haluttua reittiä kaapin ovelle, jossa oli rei'itys ilman poistumiselle kaapista. Koska jäähdytyslementti oli vaihdettu vastaamaan muodoiltaan tuuletinta, oli sen ympärille mahdollista suunnitella yksinkertainen ja helposti valmistettava kotelo eikä siihen tarvinnut tehdä kuristuksia tai muita muotoja, joita aiemmin kaavailtu jäähdytyslementti olisi vaatinut.

Kotelo suunniteltiin niin, että kokoonpanosta tulee mahdollisimman kompakti ja se voidaan asentaa yhtenä pakettina MR-kaappiin. Myös tuuletin asetoitiin niin, että se puhaltaa mahdollisimman tehokkaasti jäähdytyslementin muodostaman V-muotoisen aukon lävitse. Ilmavirran ohjaamiseksi jäähdytyslementin kolmelle sivulle suunniteltiin lisäksi ilmanohjauspellit, jotka voitiin työntää jäähdytyslementin uriin ja saada aikaan näin tuulettimen halkaisijan kokoinen tunneli ilmanvirtaukselle. Kuvasta 13 nähdään lämmönvaihtimen kotelo, jossa ilmanohjauspellit ovat osin uriin työnnettyinä. Koteloon lisättiin myöhemmin myös D-liitin tuulettimen johtoja varten.



Kuva 13. Lämmönvaihtimen kotelo jäähdytyslementin ympärillä. Keltaiset ilmanohjauspellit voitiin työntää jäähdytyslementin uriin, jolloin saatiin rajattua tuulettimen halkaisijan kokoinen tunneli ilmavirrälle.

Kuten koko MR-kaapin suunnittelussa, käytettiin myös kotelossa tuulettimen kiinnityspisteinä PEM-puristemuttereita. PEM-puristemutterit ovat Penn Engineering -yhtiön valmistamia puristekiinnikkeitä, joita käytetään laajalti ohutlevyjen suunnittelussa ja kokoonpanoissa. Kuvassa 14 nähdään PEM-kiinnikkeen toimintaperiaate. Kiinnikkeelle tehdään ohutlevyyn tarkka reikä, johon kiinnike prässäetään kiinni kiinnitinpuristimella, jolloin sahalaitainen muoto painuu ohutlevyyn kiinni muodostaen lujan liitoksen (19, s. 1). PEM-puristekiinnikkeiden ansiosta kokoonpanoista tulee yksinkertaisempia, koska kiinnityspisteet saadaan suoraan kiinni kiinteisiin rakenteisiin eikä kiinnitykseen tarvita erillisiä aluslevyjä tai muttereita.



Kuva 14. PEM-puristemutterin kiinnitys. Mutteri lepää "alasimen" (anvil) päällä, ja levyn reikä asetetaan kiinnikkeen kohdalle. Tämän jälkeen puristin (punch) prässäää kiinnittimen ohutlevyyn kiinni, jolloin puristemutterin sahalaitainen muoto muodostaa liitoksen ohutlevyn kanssa. (19, s. 1.)

Tätä kiinnitysmenetelmää käyttämällä on helpompi suunnitella DFA-prosessin mukaisia kokoonpanoja, koska komponenttien määrä vähenee ja samalla kokoonpanoon kuluu vähemmän aikaa. DFA tulee englannin kielen sanoista Design For Assembly, ja sillä tarkoitetaan suunnittelua, jossa tuotteen optimaalinen kokoonpantavuus on otettu huomioon (20, s. 1). Lämmönvaihtimessa tuulettimen kiinnitys aluslevyjä ja muttereita käyttäen olisi aiheuttanut sen, että tuuletin olisi täytynyt kiinnittää ennen jäähdytyslementtiä ja siinä kiinni olevia osia, koska näiden kiinnittämisen jälkeen ei koteloa sisälle olisi mahtunut enää työkaluja. PEM-puristemuttereita käyttäen voidaan lämmönvaihtimen kokoonpanossa tuuletin kiinnittää ja irrottaa ilman, että muita osia täytyy purkaa. Kuvasta 15 nähdään kotelossa kiinni olevat PEM-puristemutterit, jotka toimivat tuulettimen kiinnityspisteinä.



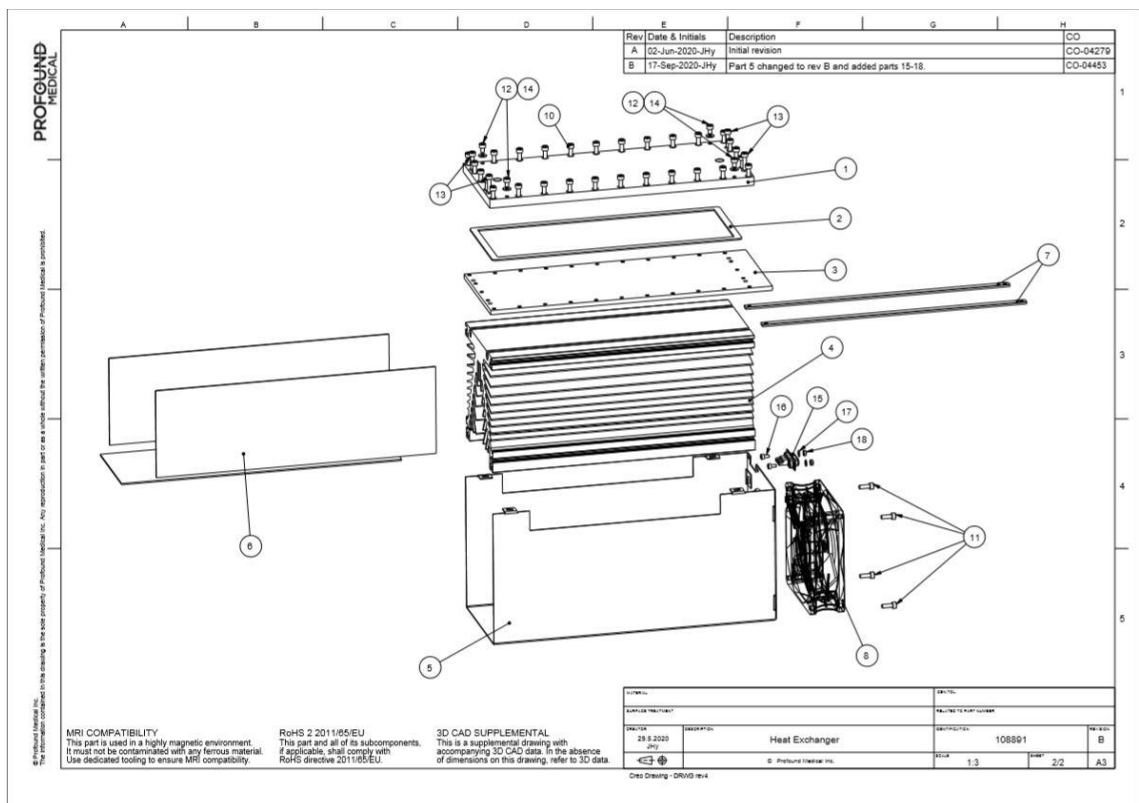
Kuva 15. Lämmönvaihtimen kotelo, jossa käytettiin PEM-puristemuttereita tuulettimen kiinnitystä varten.

4 Dokumentaatio ja prototyypin tilaus

Teknisten dokumenttien tarkoitus on kuvata jonkin teknisen kohteen, kuten esimerkiksi laitteen tai järjestelmän toimintaa ja rakennetta (21, s. 1). Koska Profound Medical Inc on kansainvälinen yritys, jolla on toimipisteitä esimerkiksi Saksassa ja Kanadassa, on tarkka tekninen dokumentaatio ensiarvoisen tärkeää. Esimerkiksi Vantaan toimipisteessä suunniteltua tuotetta ei välttämättä koskaan valmisteta Vantaalla, jolloin ajanmukaisiin standardeihin ja määräyksiin nojautuva dokumentaatio mahdollistaa valmistuksen missä tahansa päin maailmaa.

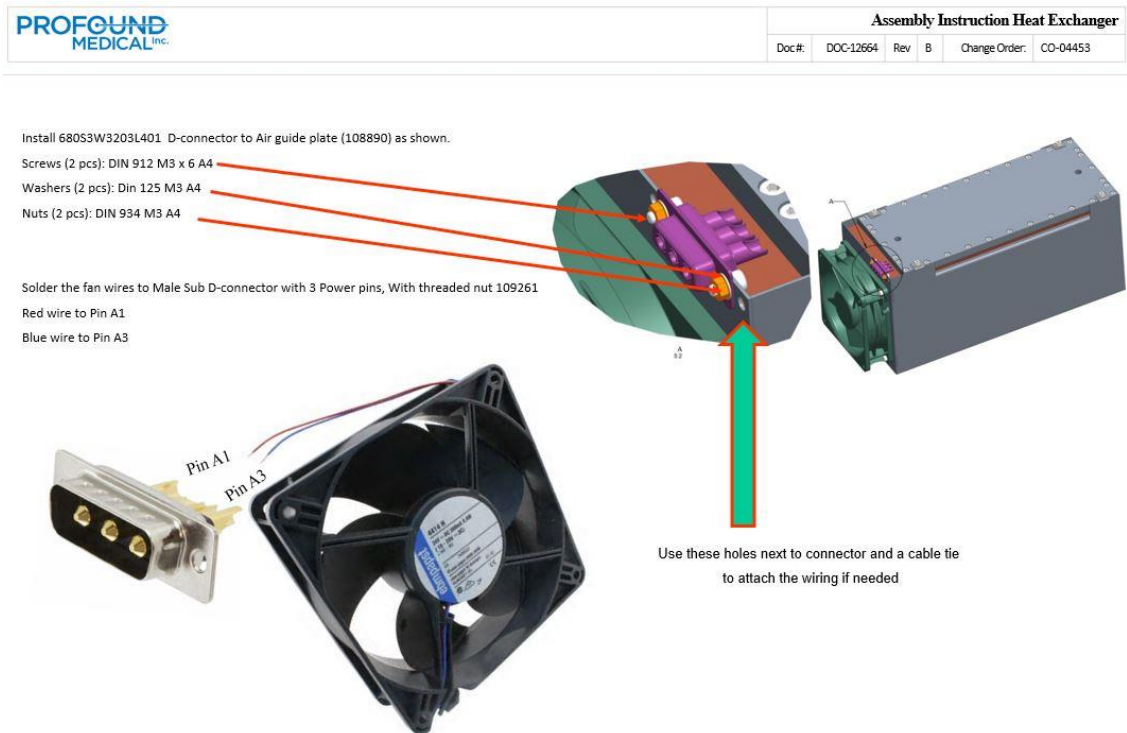
4.1 Dokumentaatio

Yrityksellä on käytäntönä dokumentoida tarkasti kaikki projekteihin liittyvät osat, kokoonpanot ja muut dokumentit jo ensimmäisestä prototyypistä lähtien. Jokaisesta lämmönvaihtimeen suunnitellusta osasta tehtiin piirustukset, jotka tallennettiin yrityksen käyttämiin sisäisiin järjestelmiin muiden dokumenttien ohella. Lisäksi kokoonpanoista tehtiin erilliset kokoonpanopiirustukset (Kuva 16), joihin merkattiin osanumeroinnit kaikille osille ja komponenteille. Osanumeroinneille ei tehty sitä vastaavaa BOMia suoraan kokoonpanopiirustuksiin, sillä yrityksen käytäntönä on tallentaa nämä suoraan sisäisesti käytettävään tuotetiedon hallintajärjestelmäänsä. BOM (Bill Of Materials) tarkoittaa osaluetteloa, josta ilmenee kaikki kokoonpanoon käytettävät komponentit. Lisäksi BOM voi sisältää muita kokoonpanoon liittyviä dokumentteja kuten standardeja, ohjeita ja muita tarvittavia dokumentteja. (22, s. 1.)



Kuva 16. Räjätyskuva lämmönvaihtimen kokoonpanopiirustuksesta. Yrityksen käytännön mukaisesti osaluetteloa ei laiteta osaksi kuvaa, vaan sitä hallinnoidaan erillisen järjestelmän kautta.

Lämmönvaihtimesta tehtiin myös yrityksen sisäiseen käyttöön erillinen Powerpoint-pohjainen kokoonpano-ohje, josta kokoonpanon kokoonpanojärjestys ilmenee ja jonka avulla kuka tahansa yrityksen työntekijä pystyy kasaamaan kokoonpanon suunnitellussa järjestyksessä. Kokoonpanokuvassa noudatetaan koneenpiirustuksen yleisiä merkintätapoja sekä käytäntöjä, ja sen pääasiallisena tarkoituksena on näyttää osien ja komponenttien paikat ja määrät. Erillisen kokoonpano-ohjeen tarkoitus taas on olla vapaamuotoisempi ja havainnollistaa tarkemmin seikkoja, joita kokoonpanossa tulee ottaa huomioon. Tällaisia voivat olla esimerkiksi pienet yksityiskohdat kuten esimerkiksi se, millä työkalulla jokin tietty osuus kokoonpanosta kasataan tai miten vaikkapa letkut reititetään, jotteivat ne ole lopputuotteessa muiden osien ja laitteiden tiellä. Kuvasta 17 nähdään ote lämmönvaihtimen kokoamisohjeesta, joka sisältää informaatiota, jota kokoonpanokuvasta ei ole nähtävissä.



Kuva 17. Ote lämmönvaihtimen kokoonpano-ohjeesta, jossa on ohjeita esimerkiksi tuulettimen johtojen juottamiseksi kiinni liittimeen sekä ylimääräisen johdon kiinnittämiseen osaksi kokoonpanon runkoa.

PLM

PLM-termillä tarkoitetaan tuotteen elinkaaren hallintaa aina sen alusta loppuun saakka (23, s. 1). Termi tulee englannin sanoista Product Life Management, ja se on keskeinen ja tärkeä osa yritysten tuotteiden ja nimikkeiden hallintaa. Profound Medical Inc käyttää PLM-järjestelmänään Oracle Incin Agile -ohjelmistoa, jonne tallennetaan suunniteltujen tuotteiden ja niihin liittyvien dokumenttien lisäksi huomattava osa yrityksen muutakin dokumentaatiota. Esimerkiksi ostettavien komponenttien datalehdet ja hyväksytyjen osatoimittajien tiedot löytyvät kaikki PLM-järjestelmästä ja kuten mainittua, myös BOMit rakennettiin suoraan tähän järjestelmään.

Lämmönvaihtimen osille luotiin jokaiselle oma nimikekoodi, ja kaikki niihin liittyvät dokumentit ladattiin kyseisen nimikkeen alle. Näin niiden hallinta on helppoa ja jokaisella yrityksen työntekijällä on mahdollisuus ladata ja tarkastella osien tietoja ja dokumentteja. Kokoonpanoille rakennettiin lisäksi hierarkioita, joissa ylimpänä on koko MR-kaapin kokoonpano, joka sisältää useita pienempiä kokoonpanoja ja osaryhmiä.

Lämmönvaihdin oli yksi tällaisista MR-kaapin osakokoonpanoista, ja MR-kaappi oli puolestaan osa vielä ylempää hierarkian tasoa ja kokoonpanoa. Kuvasta 18 nähdään lämmönvaihtimen BOMista ote, josta näkyy vastaavuudet kokoonpanopiirustuksen osanumeroinneille. BOMin luominen mahdollistaa sen, että kokoonpanopiirustusta ei tarvitse komponenttien osalta päivittää, mikäli esimerkiksi kiinnitysruuvi vaihdetaan hieman suurempaan. Tällöin riittää pelkästään komponentin vaihtaminen PLM-järjestelmässä, koska kokoonpanopiirustuksessa ei kyseistä ruuvia ole osanumerointipalloa tarkemmin määritelty.






108891
Assembly - Heat Exchanger

Preliminary
Unincorporated

Rev: (B) CO-04453 Navigator Actions

Title Block Changes **BOM** Manufacturers Quality Suppliers Relationships Where Used Attachments History

BOM

Add		Remove		Go To		Expanded Display		More	
		Item Number	Item Description	Item Rev	Qty	UOM	Find	N	
		108892	Cooler block	A CO-04279	1	EA	0001		
		108921	Gasket for Heat Exchanger	A CO-04279	1	EA	0002		
		108893	Copper plate	A CO-04279	1	EA	0003		
		108895	Heat sink L300 mm W125 mm H136 mm	A CO-04279	1	EA	0004		
		108890	Air guide plate	A CO-04279	1	EA	0005		

Kuva 18. Ote lämmönvaihtimen BOMista Agile-järjestelmässä.

Kun lämmönvaihdin oli julkaistu PLM-järjestelmässä, ei siihen liittyviä dokumentteja ollut enää mahdollista muokata. Jokaista muutosta varten tarvitsee tehdä järjestelmään erillinen muutosilmoitus, jossa kerrotaan ilmoituksen syy tai tarve, ja uudet dokumentit liitetään aina uuden muutosilmoituksen alle. Näin dokumentoimalla tuotteen elinkaarta voidaan hallita aina ensimmäisestä revisiosta viimeisimpään ja suunnittelun eri vaiheita ja tehtyjä muutoksia voidaan palata aina tarkastelemaan jälkeenpäin. Myös lämmönvaihtimen osiin tehtiin muutoksia jälkeenpäin, jolloin kaikki niihin liittyvät dokumentit päivitettiin vastaamaan viimeisintä mallia. Tästä syystä kuvassa 16 oikeassa alalaidassa esiintyvä revisiointinumero on kuvalle B, mikä tarkoittaa, että kuvan rakenne ja dokumentit eivät ole lämmönvaihtimen ensimmäisestä versiosta.

4.2 Prototyypin tilaus

Prototyyppiä varten tilatut osat voidaan jakaa karkeasti neljään kategoriaan:

- koneistusosiin
- ohutlevyosiin
- osto-osiin
- palveluihin.

Koneistettavia osia varten tarjouspyynnöt lähetettiin ainoastaan kiinalaiselle alihankkijalle, jolta yritys on aiemminkin tilannut pieniä prototyyppisarjoja. Koneistettavien lämmönvaihtimen osien lisäksi samalla tilattiin muita MR-kaappiin suunniteltuja sekä lämmönvaihtimen testaukseen tarvittavia osia. Ohutlevyosille yrityksellä ei ollut toimittajaa, joka pystyy tukemaan riittävän nopeilla toimitusajoilla tuotekehitysprojektia ja koska sellaista pyrittiin samalla kartoittamaan, päädyttiin tarjouskyselyitä lähettämään usealle kiinalaiselle ohutlevytuotteiden valmistajalle.

Tarjousten joukosta valittiin yritys, jolta tilattiin lämmönvaihtimen osat koesarjana. Niiden osoittauduttua laadukkaiksi ja vaatimukset täyttäväksi jatkettiin samalta toimittajalta tilaamista myös myöhempiä projekteja varten. Osto-osiksi voidaan laskea kaikki sellaiset osat, joita saa valmiista katalogeista ilman, että niitä tarvitsee erikseen valmistuttaa missään. Lämmönvaihtimen osalta näitä olivat tuuletin, D-liitin, letkut ja vesiliittimet sekä kiinnitykseen tarvittavat ruuvit, aluslevyt ja mutterit. Palveluihin voidaan laskea tiivisteiden vesileikkaus, sillä kuten aiemmin mainittua, löytyi silikonitiiviste valmiiksi yrityksen tiloista ja sille tarvittiin ainoastaan alihankkija, joka kykenee vesileikkuun suorittamaan.

5 Prototyypin kokoonpano ja testisuunnitelma

5.1 Lämmönvaihtimen kokoonpano

Lämmönvaihdin kokoonpantiin siitä tehtyä ohjetta tarkasti noudattaen, jolloin voitiin varmistua siitä, että myös ulkopuolinen henkilö pystyy suorittamaan kokoonpanon ongelmitta. Tällä metodilla ohjeeseen oli mahdollista tehdä tarkennuksia ja huomioita, joita

ohjetta tehdessä ei osattu ottaa huomioon. Kuvasta 19 nähdään kokoonpantu lämmönvaihdin.



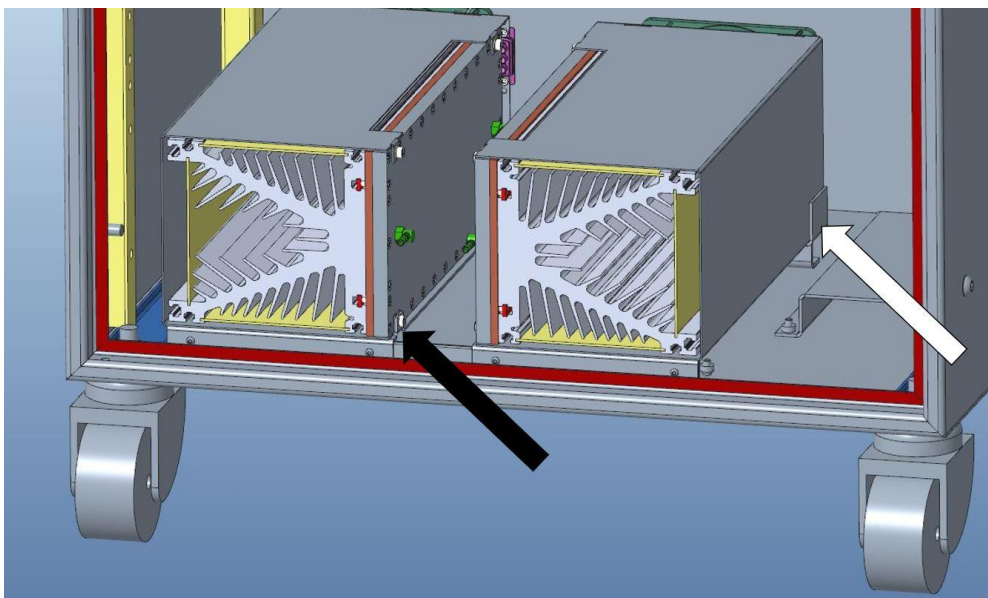
Kuva 19. Kokoonpantu lämmönvaihdin. Osien tilaamisen jälkeen lämmönvaihtimen koteloon li-
sättiin liitin tuulettimen johdoille.

5.2 Lämmönvaihtimen kiinnitys MR-kaapissa

Lämmönvaihtimen kiinnitys MR-kaapin pohjalle vaati erillisten kiinnityspeltien suunnittelua. Yhtenä vaihtoehtona oli kiinnittää lämmönvaihdin kotelon ruuveista kaapin seinään tai siihen kiinnitettävään kiinnitysosaan, mutta koska paikaksi valikoitui kaapin pohja, päätettiin sille tehdä pohjalle kiinnitys, joka samalla hieman korottaa lämmönvaihdinta. Korotus tarvittiin, jotta lämmönvaihtimen asemointi on suoraan kohti oven rei'itystä, josta lämmin ilma virtaa ulos.

MR-kaappi suunniteltiin alusta lähtien niin, että tarvittaessa piirikorttien määrää voidaan kasvattaa ilman, että kaapin rakenteita tarvitsee muuttaa. Jäähdytettäviä piirikortteja oli tulossa kaappiin neljä kappaletta, ja lisäksi suunniteltiin varaus kahdelle lisäkortille. Korttien määrän lisääntyessä myös jäähdytystarve lisääntyy, joten kaappiin suunniteltiin tilavaraus kahdelle lämmönvaihtimelle tai vaihtoehtoisesti yhdelle isommalle, vaikka prototyyppiin niitä tilattiin vain yksi.

Kuten kaikkien MR-kaapissa olevien laitteiden täytyi lämmönvaihtimien kiinnitysten olla sellaisia, että ne voidaan asentaa ja irrottaa paikoltaan ilman, että mitään muuta tarvitsee purkaa pois tieltä. Tästä syystä lämmönvaihtimille suunniteltiin kiinnityspellit, jotka muodostavat taskun, joka estää poikittaisin liikkeen, jos kaappia liikutellaan. Pitkittäisen liikkeen estäminen ja lämmönvaihtimien lukitus tehtiin käyttämällä hyväksi kotelon kiinnitysruuveja. Kuvasta 20 nähdään lämmönvaihtimien kiinnitys MR-kaapin pohjassa.



Kuva 20. Musta nuoli osoittaa kiinnityspistettä, josta lämmönvaihdin kiinnitettiin korotuspelteihin ja valkoinen nuoli kiinnityspellin toista kantattua sivua, joka muodostaa taskun estäen sivusuuntaisen liikkeen.

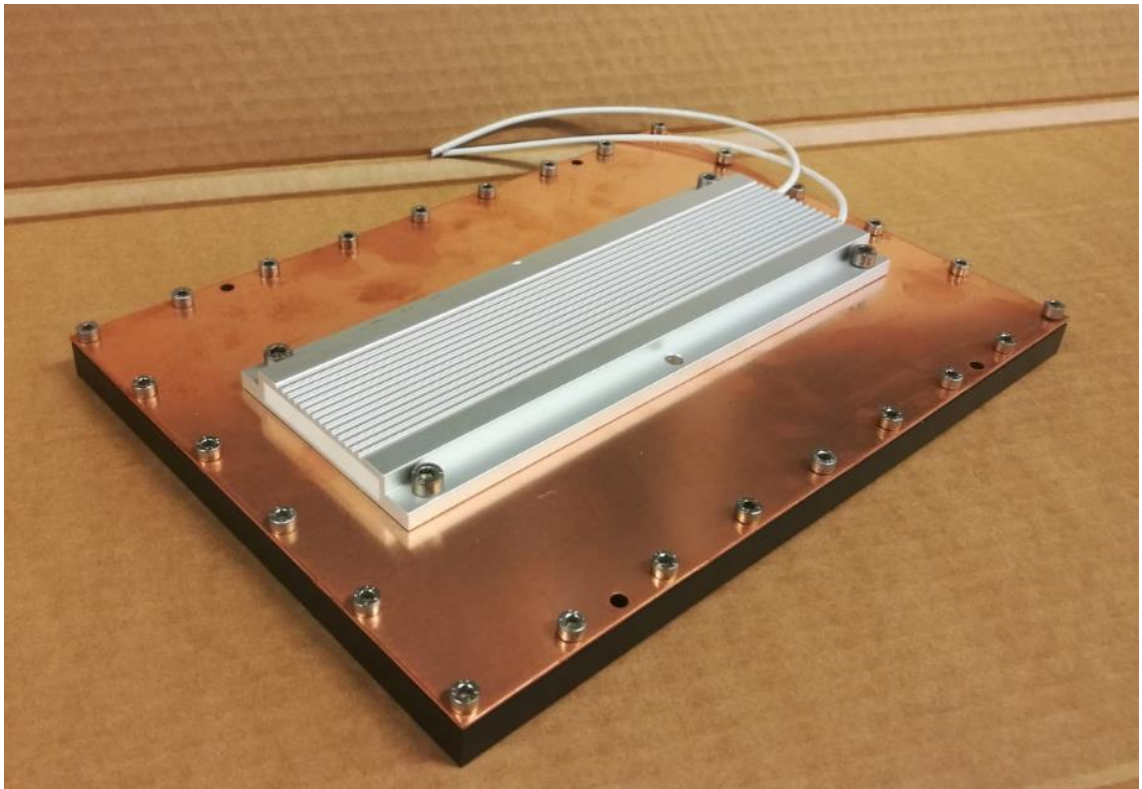
Kiinnitysruuvin irrottamalla lämmönvaihdin voidaan vetää ulos kaapista ja pellin muodostamasta taskusta.

5.3 Testaukseen tarvittava laitteisto

Lämmönvaihtimen testaukseen tarvittava laitteisto koostui pääosin laitteista, jotka löytyvät lopullisesta MR-kaapistakin. Kuitenkin testausta varten laitteistoon oli tarpeen tehdä joitakin muunnoksia. Vedenjakeluyksikköön tarvittiin termoelementti, jotta veden lämpötilaa pystyttäisiin mittaamaan sekä tulo- että lähtökanavista. Termoelementti eli termopari on lämpötilan mittauksiin käytettävä anturi, jossa kahden eri metallin muodostaman jännite-eron avulla saadaan mitattua lämpötiloja halutussa kohteessa (24, s. 1). Koska vedenjakeluyksikkö koostui kaupallisista komponenteista, oli termoelementit mahdollista asentaa kanaviin, jotka jäädytyksen ollessa normaalisti toiminnassa ovat tulpattuina. Lisäksi termoelementti tarvittiin vesitankkiin, jolloin sen lämpötilannousua voidaan seurata pitkällä aikavälillä.

Testausta varten tarvittiin lämmönlähde, joka simuloi piirikorttien tuottamaa lämpöä. Lämpenevää piirikorttia simuloi kuparinen levy, johon kiinnitetään tehovastus ($5 \Omega/300$

W). Kuparilevyn toisella puolella on piirikortteja vasten suunniteltu vesiblokki, jota muokattiin siten, että siihen saadaan kiinni testausta varten suunniteltu kuparilevy ja siinä kiinni oleva vastus. Käytännössä vesiblokkiin tehtävät muutokset olivat hyvin pieniä, sillä siihen lisättiin ainoastaan neljä kiinnitysreikää vastuksen kiinnitysreikäjon mukaisesti. Lisäksi väliin suunniteltiin laitettavan hyvin lämpöä johtavaa tahnaa, joka osaltaan varmistaa lämmön tehokkaan siirtymisen vastuksesta kuparilevyyn. Kuvasta 21 nähdään testausta varten koottu kokoonpano, jossa vastus on kiinni kuparilevyssä ja piirikorttien yhteydessä olevassa vesiblokkissa. Kuvan vastus kytketään erilliseen virtalähteeseen.



Kuva 21. Testausta varten rakennettu kokoonpano, jossa piirikorttien tuottamaa lämpöä tuotetaan vastuksen avulla.

5.4 Testisuunnitelma

Lämmönvaihtimen testisuunnitelmaa varten tehtiin erinäisiä laskelmia ja oletuksia. Järjestelmän hukkatehoksi pahimmassa tapauksessa hoidon aikana oli laskettu n. 500 wattia, joten karkeat laskelmat tehtiin tätä arvoa käyttäen. Yleensä hukkateho on huo-

mattavasti vähemmän, mutta järjestelmää haluttiin testata pahimman tapauksen mukaan. Testissä myös veden maksimilämpötila haluttiin rajata 50 °C:seen, jonka yli lämpötila ei saisi nousta, kun vettä lämmitetään 500 Watin teholla kahden tunnin ajan. MR-kaappiin valitun ja siten myös testissä käytettävän tuulettimen CFM-arvo oli 141, kun tuuletin pääsee pyörimään vapaasti. Tuulettimen painepuolella olevan jäähdytyslementin profiilin pinta-ala kuitenkin vähentää ilmavirtausta, joten tehtiin oletus, että todellinen CFM-arvo jää noin sataan. Tämän oletuksen paikkansapitävyys oli tarkoitus testata esimerkiksi sadan litran jätesäkillä, joka olisi teipattu kiinni jäähdytyslementin päähän ja tästä arvioitu tuulettimen minuutin aikana säkkiin puhaltaman ilman määrää. Lisäksi selvitettiin vesisäiliön vaikutusta veden lämpötilan muutokseen laskemalla, kuinka kauan tietyn vesimäärän lämmittäminen tietyllä teholla vie aikaa, kun lämmönvaihdinta ei oteta huomioon. Lämpöenergian määrä voidaan laskea kaavalla

$$Q = c * m * \Delta T$$

jossa

c = aineen ominaislämpökapasiteetti

m = aineen massa

ΔT = lämpötilanmuutos.

Koska potilaalle suoritetaan hoitoa ilmastoidun huoneen lämmössä, oletettiin alkulämpötilaksi 20 celsiusastetta, ja koska maksimilämpötila oli rajattu 50 °C:seen, tuli lämpötilanmuutokseksi 30 °C. MR-kaappiin sijoitetun vesisäiliön tilavuus oli viisi litraa, joten veden massaksi laskelmiin tuli 5 kilogrammaa. Kuten aiemmin mainittua, veden ominaislämpökapasiteetti on 4,182 kJ/(kg*K) joten lämpöenergian määräksi saadaan

$$Q = 4,182 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg} * \text{C})} * 5 \text{ kg} * 30 \text{ C}$$

$$Q = 627,3 \text{ kJ}$$

Lämpötilan nousuun kuluva aika saadaan kaavasta

$$P = \frac{Q}{t}$$

jossa

P = teho (kW)

Q = lämpöenergia kJ / kg * C

t = aika (s)

Tästä kaavasta ratkaistiin aika t ja sijoittamalla laskettu lämpöenergian määrä Q ja laskettu teho P saatiin

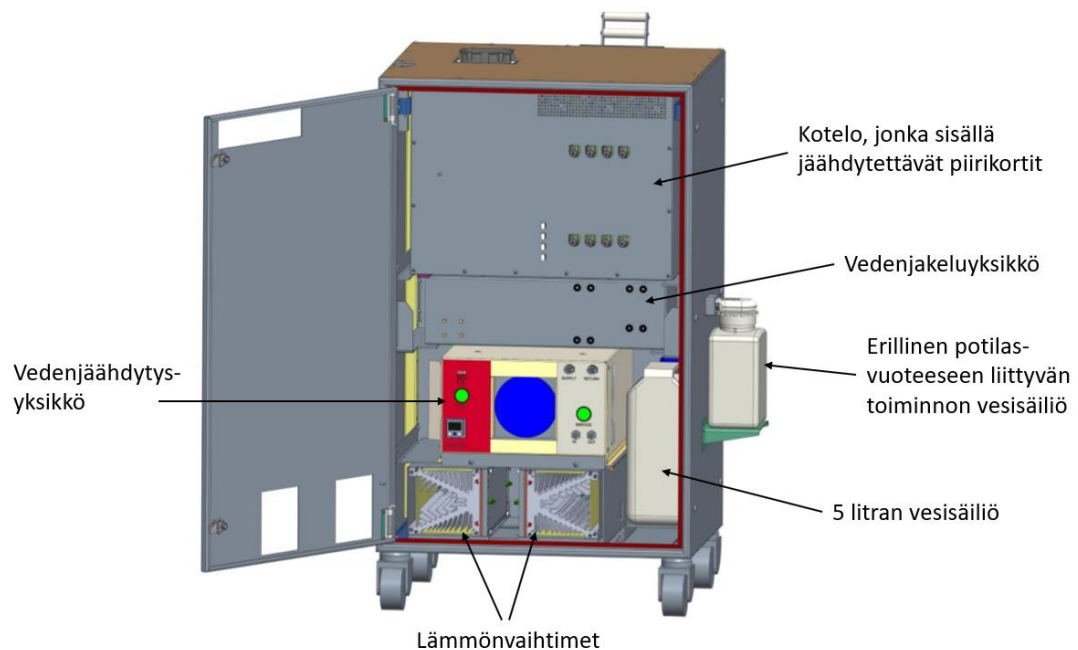
$$t = \frac{627,3kJ}{0,5kW}$$

$$t = 1254,6s \approx 21min$$

Laskelmissa ei ole otettu huomioon häviöitä. Vastaavilla laskelmilla, joista jätettiin vesisäiliö pois ja oletettiin, että järjestelmässä kerrallaan kiertävän veden tilavuus on 0,5 litraa, saatiin tulokseksi noin kaksi minuuttia.

Testaus oli suunniteltu suoritettavan kolmella tavalla. Ensimmäinen testaus tehtäisiin niin, että järjestelmässä ei ole ylimääräistä vesitankkia, vaan vettä kierrätetään ”piirikorttien” eli lämpövuksen kautta vedenjakeluysikköön, josta se virtaa lämmönvaihtimelle ja edelleen takaisin lämpövukselle. Lämpötilaa mitataan vedenjakeluysikön sisään- ja ulostulokanavissa. Testaukset oli määrä suorittaa aloittaen sadan watin tehosta ja kasvattamalla tehoa aina 100 wattia kerrallaan. Tällä tavalla oli tarkoitus määrittää maksimi hukatehon määrä, jolla tällaisessa järjestelmässä kiertävän veden lämpötila asettuu alle 50 °C:n lukemaan.

Toinen testaus suunniteltiin tehtäväksi niin, että kiertoon otetaan mukaan viiden litran vesisäiliö, sillä MR-kaappiin oli suunniteltu paikka viiden litran vesisäiliölle. Tällä menetelmällä järjestelmälle oli tarkoitus määritellä maksimi hukkatehon määrä. Vesisäiliön sijainti MR-kaapissa nähdään kuvassa 22, jossa on merkattuna myös muut laitteet valmiissa MR-kaapissa. Viiden litran vesisäiliöllä testauksia suunniteltiin tehtävän aina 800 Watin tehoon asti, mutta kuitenkin niin, ettei 50 °C:n maksimilämpötila vedenjakeluyksikön tulokanavassa ylity. Kolmas testaus suunniteltiin tehtäväksi samalla tavalla kuin edellisekin, mutta käyttäen 10 litran vesisäiliötä. Testin perusteella oli tarkoitus saada käsitys siitä, riittääkö järjestelmään yksi lämmönvaihdin vai tarvitaanko niitä kaksi vierekkäin. Toisena vaihtoehtona pidettiin vesitankin tilavuuden kasvattamista.



Kuva 22. Valmis MR-kaappi, jossa merkattuna lämmönvaihtimen lisäksi muiden keskeisten komponenttien sekä jäähdytysjärjestelmän osien paikat. Kuvassa ei näy laitteiden välisiä vesiletkuja eikä MR-kaapin ovessa olevaa rei'itystä ilman poistumiselle. Kuvassa näkyvä vedenjäähdytysyksikkö liittyy laitteen potilaskontaktin jäähdyttämiseen, joka on laitteen toinen ja täysin erillinen vesikierto.

6 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa lämmönvaihdin, joka täyttää asetetut vaatimukset niin tehonsa, kustannusten kuin valmistettavuudenkin puolesta. Lisäksi käyttöympäristön erityispiirteet eli voimakas magneettikenttä pyrittiin ottamaan huomioon erityisesti materiaalivalinnoissa. Työ tehtiin suunnittelemalla itse kaikki lämmönvaihtimen valmistettavat osat sekä vertailemalla erilaisten ostettavien komponenttien ominaisuuksia toisiinsa ja tekemällä valinnat näiden vertailujen pohjalta. Työn tavoitteet saavutettiin hyvin, sillä kaikki osat saatiin suunniteltua ja tilattua ajoissa ja osien tekijöiksi valikoitui alihankkijoita, joiden kanssa ei tilauksissa tai osien laadussa ilmennyt ongelmia. Lämmönvaihtimen testausta ei ehditty tekemään tämän insinööriyön tekemisen aikana, vaan se jäi myöhemmin suoritettavaksi, jolloin tulokset eivät ole mukana tässä insinööriyössä.

Insinööriyötä tehdessä jouduttiin selvittämään lukuisia teknisiä asioita ja olemaan tiiviisti yhteydessä moniin eri alan yrityksiin johtuen siitä, että lämmönvaihdin sisältää monella eri tekniikalla valmistettuja osia. Lämmönvaihtimessa on ohutlevyosien lisäksi koneistettuja ja vesileikattuja osia sekä näiden lisäksi myös useita ostokomponentteja. Tarjouskyselyitä sekä lopullisia tilauksia lähetettiin eri puolelle maailmaa eri kokoihin yrityksiin, ja erityisesti ohutlevyosien toimittajan kanssa yhteistyö on jatkunut myöhemmissä projekteissa.

Testaamisen lisäksi seuraavat askeleet lämmönvaihtimen osalta ovat sen toimintaan liittyviä parannuksia. Koska lämmönvaihtimien yläpuolella olevan erillisen vedenjäähdytysyksikön tuuletin imee ilmaa samalta puolelta, jonne lämmönvaihdin tämänhetkisessä konstruktiossa sitä puhaltaa, päätettiin lämmönvaihdinta kääntää 180 astetta, jolloin lämmönvaihtimen tuuletin tulee kaapin oven puolelle. Tällöin kaikkien puhaltimien imu on samalla puolella, ja vältetään tilanteelta, jossa esimerkiksi vedenjäähdytysyksikön tuuletin imisi lämmönvaihtimen kaapin ulkopuolelle puhaltamaa lämmintä ilmaa suoraan sisäänsä. Lämmönvaihdinta kääntämällä myös D-liitin saadaan kätevämpään paikkaan lähelle ovea. Kääntäminen aiheuttaa pieniä muutoksia myös kaapin runkoon, koska toiselle puolelle tarvitaan kaapin takaseinään rei'itys ilman poistumiselle. Muutosten myötä saatetaan joutua myös rakentamaan ilman poistumiselle erillisiä ohjauspeltejä tai muo-

visia putkia, jotta ilma saadaan johdettua tehokkaasti rei'ityksille. Etenkin lämmönvaihtimen kääntäminen aiheuttaa sen, että lämmönvaihtimen ja rei'ityksen välinen etäisyys kasvaa hieman, jolloin ilman ohjaukselle on luultavasti tarvetta.

Lähteet

- 1 Lampinen Markku J.; Kotiaho Voitto W. & Seppälä Ari. 2007. Termodynamiikan perusteet, johdatus lämmönsiirto-oppiin, laskuharjoitustehtäviä ratkaisuihin. Otaniemi.
- 2 Understanding-heat-sinks-functions-types-and-more. 2019. Verkkoaineisto. Arrow Electronics Inc. <<https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/understanding-heat-sinks-functions-types-and-more>>. Päivitetty 31.10.2019. Luettu 16.10.2020.
- 3 Valtanen, Esko. 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21., uudistettu painos. Jyväskylä: Genesis-kirjat Oy.
- 4 Suvanto, Kari. 2012. Tekniikan fysiikka 1. 1.-5. painos. Porvoo: Edita.
- 5 Puhallinvalinta. 2009. Verkkoaineisto. ebm-papst Oy. <https://www.ebmpapst.fi/fi/dat/media_manager/news/6/news-files/puhallinvalinta.pdf>. Päivitetty 5.9.2009. Luettu 16.10.2020.
- 6 Moving air efficiently. 2011. Verkkoaineisto. Digi Key Electronics. <<https://www.digikey.com/en/ptm/e/ebm-papst/moving-air-efficiently/tutorial>>. Julkaistu 27.10.2011. Luettu 16.10.2020.
- 7 Thermal - Heat sinks. Verkkoaineisto. Digi Key Electronics. <<https://www.digikey.com/en/products/detail/advanced-thermal-solutions-inc/ATS-EXL424-288-R0/5848416>>. Luettu 11.11.2020.
- 8 Thermal - Heat sinks . Verkkoaineisto. Digi Key Electronics. <<https://www.digikey.com/en/products/detail/wakefield-vette/392-300AB/4864908>>. Luettu 11.11.2020.
- 9 Keinänen Toimi & Kärkkäinen, Pentti. 2005. Automaatiojärjestelmien hydraulikka ja pneumatiikka. 1., painos. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.
- 10 Press fitting method for heat pipe and heat sink. 2010. Verkkoaineisto. <<https://patents.google.com/patent/US20110192026>>. Julkaistu 11.8.2011. Luettu 17.10.2020.
- 11 Muovimateriaalit, Polyasettaali. 2019. Verkkoaineisto. Aikolon Oy. <<https://www.aikolon.fi/tuotteet/tekniset-muovit/pom-c>>. Luettu 17.10.2020.
- 12 What is a gasket? 2020. Verkkoaineisto. M. Barnwell Services Limited. <<https://www.barnwell.co.uk/what-is-a-gasket/>>. Luettu 17.10.2020.

- 13 Valumenetelmät. 2015. Verkkoaineisto. ValuAtlas. <https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/perusopas_03.pdf>. Muokattu 3.9.2015. Luettu 21.10.2020.
- 14 Material Data Sheet. 2020. Verkkoaineisto. J-Flex. <https://www.j-flex.com/wp-content/uploads/2020/08/J-Flex-Datasheet_Commercial-Quality-Silicone-Sponge-Standard-Density.pdf>. Julkaistu 9.7.2020. Luettu 21.10.2020.
- 15 Outokumpu Supra range data sheet PDF. 2020. Verkkoaineisto. Outokumpu Oyj. <<https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OKGrade=4404&Category=Supra#>>. Luettu 21.10.2020.
- 16 Steel grades/1.4404. Verkkoaineisto. Valbruna Nordic Oy. <<https://www.valbrunanordic.se/en/stainless-steel-bars/steel-grades/1-4404/>>. Luettu 21.10.2020.
- 17 ISO 3506-1:2020. Fasteners. Mechanical properties of corrosion-resistant stainless steel fasteners. Part 1: Bolts, screws and studs with specified grades and property classes. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.
- 18 Standardit ja niiden vertailu. Verkkoaineisto. Ferrometal Oy. <https://www.ferrometal.fi/media/downloads/catalogues/tekn_fin.pdf>. Luettu 21.10.2020.
- 19 How, Why & Where To Use Self-Clinching Fasteners. Verkkoaineisto. Penn Engineering. <<https://www.pemnet.com/fastening-products/about-self-clinching-fasteners/>>. Luettu 21.10.2020.
- 20 Design For Assembly. Verkkoaineisto. Machine Design. <<https://www.machine-design.com/fastening-joining/article/21812784/design-for-assembly>>. Julkaistu 15.11.2002. Luettu 22.10.2020.
- 21 Teknisen dokumentaation kehittäminen hypermedia- ja CD-ROM-tekniikan avulla. Verkkoaineisto. VTT. <<https://cris.vtt.fi/en/publications/teknisen-dokumentation-kehittaminen-hypermedia-ja-cd-rom-tekniik>>. Julkaistu 1993. Luettu 23.10.2020.
- 22 What is a Bill Of Materials (BOM) and how do you create one?. Verkkoaineisto. Arena Solutions Inc. <<https://www.arenasolutions.com/resources/category/bom-management/creating-a-bill-of-materials/>>. Luettu 23.10.2020.
- 23 What is Product Lifecycle Management?. Verkkoaineisto. propelPLM. <<https://www.propelplm.com/articles/what-is-product-lifecycle-management>>. Luettu 23.10.2020.
- 24 Termoelementti- ja vastusanturit. Verkkoaineisto. Pietiko Oy. <<https://www.pietiko.fi/mittaustietoa/termoelementti-ja-vastusanturit/>>. Luettu 25.10.2020.