



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Teemu Majaharju

# KONSEPTI KONDENSSI-ILMIÖN ESTÄMISEEN SÄHKÖMOOTTOREISSA

Tekniikka  
2023

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Teemu Majaharju
Opinnäytetyön nimi	Konsepti kondenssi-ilmiön estämiseen sähkömoottoreissa
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	51
Ohjaaja	Petri Saari

---

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, onko mahdollista parantaa tällä hetkellä käytössä olevaa menetelmää kondensaation estoon sähkömoottorin sisällä. Sähkömoottoreita pidetään kuivina lämmittämällä staattorikäimejä, silloin kun moottori ei ole käytössä. Tutkimuksen päätarkoituksena oli selvittää, onko lämmitysvastukset mahdollista siirtää staattorikäimistä laakerikilpeen.

Tutkimuksessa perehdytään erilaisiin sähkömoottoreihin ja tarkemmin oikosulkumoottoriin, joka on yksi suosituimmista vaihtosähkömoottoreista teollisuudessa. Lisäksi kondensaatiota ja sen estämistä käsitellään tutkimuksessa, koska se on olennainen osa tutkimuksen päätavoitteen saavuttamiseksi.

Alkutestien positiivisten tulosten perusteella mallinnettiin konseptin mukainen laakerikilpi. Laakerikilpeä simuloitiin ja paranneltiin, jonka jälkeen siitä tilattiin prototyyppi alihankkijalta. Laakerikilven simuloinnilla sekä testauksilla saatiin haluttuja lopputuloksia. Tutkimuksessa käytettävien menetelmien luotettavuutta arvioitiin tutkimuksen ajan.

---

Avainsanat	Sähkömoottori, oikosulkumoottori, staattorikäimi, kondensaatio, lämmittäminen, lämmön johtuminen, lämpötilan mittaaminen & laakerikilpi.
------------	--

## ABSTRACT

Author	Teemu Majaharju
Title	Concept for Preventing Condensation in Electric Motors
Year	2023
Language	Finnish
Pages	51
Name of Supervisor	Petri Saari

---

The aim of the study was to find out if it is possible to improve the currently used method for preventing condensation inside the electric motor. Electric motors are kept dry by heating the stator windings when the motor is not in use. The main purpose of the research was to find out if it is possible to move the heating elements from the stator winding to the end shield.

The study concentrated on different electric motors and more specifically on the induction motor, which is the most used alternating current motor in industry. In addition, condensation and its prevention are discussed in the study as it is an integral part to achieve of the study.

Based on the positive results of the initial tests, an end shield according to the concept was modeled. The end shield was simulated and improved, after which a prototype was ordered from a subcontractor. By simulating and testing the end shield, the desired results were obtained. The reliability of the methods used in the study was evaluated during the study.

---

Keywords	Electric motor, induction motor, stator winding, condensation, heating, heat conduction, temperature measurement & end shield.
----------	--

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Opinnäytetyön tavoitteet ja rajoitukset .....	8
2	SÄHKÖMOOTTORI JA SEN OSAT .....	9
2.1	Sähkömoottori .....	9
2.2	Oikosulkumoottori .....	12
2.3	Staattorikäämi.....	13
2.4	Roottori .....	14
2.5	Laakerikilpi .....	14
3	KONDENSAATIOON LIITTYVÄT TEKIJÄT SÄHKÖMOOTTORISSA .....	16
3.1	Kondensaatio sähkömoottorissa .....	16
3.2	Kondensaation estäminen .....	17
3.3	Lämmönjohtavuus .....	18
4	UUDEN LAAKERIKILVEN SUUNNITTELU .....	20
4.1	Tuotekehitysprosessi .....	20
4.2	Tuotannossa oleva laakerikilpi.....	22
4.3	Mallintaminen.....	23
4.3.1	Suunnittelu .....	24
4.3.2	Simulointi .....	25
4.4	Uuden laakerikilven valaminen.....	26
4.4.1	Valurauta .....	26
4.4.2	Laakerikilven valun tilaamien.....	28
5	UUDEN LAAKERIKILVEN TESTAAMINEN .....	30
5.1	Lämmitysvastusten asentaminen .....	31
5.2	Lämpötilojen mittaaminen .....	31
5.3	Lämpötilamittaus .....	32

5.4	6.5 tunnin koe .....	33
6	TULOKSET .....	34
6.1	Tuotannossa oleva laakerikilpi.....	34
6.1.1	200 runkokoon laakerikilpi.....	35
6.1.2	280 runkokoon laakerikilpi.....	36
6.2	Paranneltu laakerikilpi .....	39
6.3	Hyväksymis- ja kuormitustestaus .....	40
6.3.1	2 x 35 W lämmitys.....	41
6.3.2	2 x 70 W lämmitys.....	42
6.3.3	2 x 75 W 6.5 tunnin lämmitys .....	46
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYS EHDOTUKSET .....	47
7.1	Suosituksia jatkotutkimuksiin .....	48
	LÄHTEET .....	50

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

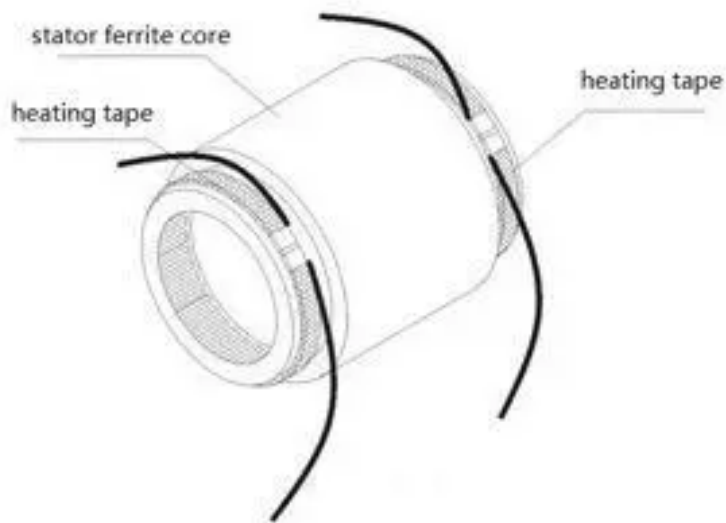
<b>Kuva 1.</b> Lämmitysvastusten asennustapa (Sinomas 2023).....	8
<b>Kuva 2.</b> Oikosulkumoottoreita (ABB 2023).....	9
<b>Kuva 3.</b> 1/5 kokoluokan 3D-tuloste 280 runkokoon laakerikilvestä.....	24
<b>Kuva 4.</b> Parannellun laakerikilven ulkopuoli.....	29
<b>Kuva 5.</b> Parannellun laakerikilven sisäpuoli.....	29
<b>Kuva 6.</b> Paranneltu laakerikilpi asennettuna LP-moottoriin.....	30
<b>Kuva 7.</b> Paranneltu laakerikilpi, jossa lämmitysvastukset. ....	31
<b>Kuva 8.</b> 280 runkokoon vakiolaakerikilpi. ....	34
<b>Kuva 9.</b> 200 runkokoon laakerikilpi yhdellä lämmitysvastuksella. ....	35
<b>Kuva 10.</b> Lämpökamera kuvia 200 runkokoon laakerikilvestä. ....	36
<b>Kuva 11.</b> Lämpökamera kuva 280 runkokoon laakerikilvestä. ....	37
<b>Kuva 12.</b> Lämpökamerakuvia 280 runkokoon laakerikilvestä. ....	38
<b>Kuva 13.</b> Simulointikuvia parannelluista 200–280 runkokoon laakerikilvistä. ....	40
<b>Kuva 14.</b> Tiedonkeruulaitteen tuloksia (2 x 35 W). ....	42
<b>Kuva 15.</b> Tiedonkeruulaitteen tulokset (2 x 70 W).....	43
<b>Kuva 16.</b> Lämpökameran kuvia lopputestien ajalta. ....	45
<b>Taulukko 1.</b> Tuotekehitys projektin valmistelu (Kangasluoma 1979, 109). ....	21
<b>Taulukko 2.</b> Lämpökamera kuvien tuloksia 280 runkokoon laakerikilvestä.....	39
<b>Taulukko 3.</b> Antureiden paikat lopputesteissä.....	41
<b>Taulukko 4.</b> Tiedonkeruulaitteen tulokset 5 minuutin välein. ....	42
<b>Taulukko 5.</b> Tiedonkeruulaitteen tulokset 5 minuutin välein, myös 155 min ja 160 min ajalta.....	44
<b>Taulukko 6.</b> Lämpökamerakuvien keskiarvoja.....	46
<b>Taulukko 7.</b> 6.5 tunnin lämmityksen lopputulos tiedonkeruulaitteesta. ....	46

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tilaajana toimia ABB OY Motors and Generators, joka valmistaa erilaisia ja erikokoisia sähkömoottoreita ja generaattoreita. Yhtymä valmistaa vakio sähkömoottoreiden lisäksi tilaustyönä sähkömoottoreita asiakkaan tarpeiden mukaan. ABB yhtymä on globaali teknologia yritys, jonka alle lukeutuu myös ABB OY Motors and Generators. Työntekijöitä ABB:lla on yhteensä noin 105 000 henkilöä, jotka työskentelevät yli 100 eri maassa. Heistä Suomessa työskentelee noin 5 000 henkilöä, 20 eri paikkakunnalla. Tässä työssä tutkimuksella tarkoitetaan tehtyä työtä kokonaisuudessaan ja projektilla tarkoitetaan tutkimuksessa tuotettua prototyyppiä sekä sen valmistamiseen liittyviä vaiheita.

Tutkimuksen aiheena on suunnitella konsepti, jolla voisi mahdollisesti tulevaisuudessa korvata nyt käytössä olevan menetelmän. Sähkömoottorin staattorikämejä pidetään tavallisesti kosteissa olosuhteissa lämpimämpänä kuin mitä ympäröivä ilma on. Staattorikämiä lämpimänä pitämällä pyritään estämään kondenssi veden muodostuminen sähkömoottorin sisään, silloin kun sähkömoottoria ei käytetä.

Nykyisellä menetelmällä lämmitys toteutetaan staattorikämiin asennettavalla lämmitysvastuksella, joka asennetaan staattorikämiin käämintävaiheessa. Tämä menetelmä on toimiva, mutta lämmitysvastuksen asentaminen jälkikäteen on lähestulkoon mahdotonta tai ainakin erittäin vaikeaa. Kuvassa 1 on kuvattuna, miten nykyisellä menetelmällä lämmitysvastukset ovat kiinni staattorissa.



**Kuva 1.** Lämmitysvastusten asennustapa (Sinomas 2023).

### 1.1 Opinnäytetyön tavoitteet ja rajoitukset

Tutkimuksen tarkoituksena on tutkia käämien lämmittämiselle uudenlaista konseptia, jossa lämmitysvastus lisättäisiin moottorin laakerikilpeen. Tämä menetelmä mahdollistaisi lämmitysvastuksen jälkiasentamisen. Valuraudasta valmistettu laakerikilpi pitäisi säteilylämmön kautta myös käämin lämpimänä.

Asentamalla lämmitysvastuksen valuraudasta valmistettuun laakerikilpeen, valuraudan kuljettaman säteilylämmön pitäisi riittää siirtämään lämpöä käämiin. Lähtökohtana on paikantaa miten ja minne lämmitysvastukset asennettaisiin, että konsepti olisi mahdollisimman kustannustehokas. Lämmitysvastuksen asennuspaikka pitäisi löytää sellaisesta kohdasta, missä se ei vaikuta muiden tärkeiden komponenttien toimintaan, mutta silti jakaisi lämpöä mahdollisimman laajalle alueelle.

Laakerikilven muoto on lähestulkoon pyöreä, jolloin keskipiste olisi paras mahdollinen asennuspaikka lämmitysvastukselle. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä laakerikilven keskeltä tilan vie laakerointi ja akseli.



## 2 SÄHKÖMOOTTORI JA SEN OSAT

Sähkömoottorin tehtävänä on olla koneiden ja laitteiden mekaanisena voimanlähteenä, sen toiminta perustuu sähköenergian muuttamisesta mekaaniseksi energiaksi (Mäkinen & Kallio 2004, 149). Moottorit jaetaan tasasähkö- ja vaihtosähkömoottoreihin (Ahoranta 2015, 246). Kuvassa 2 on neljä eri runkokoon oikosulkumoottoria.



**Kuva 2.** Oikosulkumoottoreita (ABB 2023).

### 2.1 Sähkömoottori

Ahorannan (2015, 246) sähkötekniikasta kertovan kirjan mukaan, sähkömoottorit koostuvat pyörivistä ja paikallaan pysyvistä osista. Sähkömoottorin pyörivää osaa kutsutaan roottoriksi ja paikallaan pysyvää osaa staattoriksi (Mäkinen & Kallio 2004, 149).

Tasasähkökoneissa sähkömagneeteilla tai kestmagneeteilla tuotetaan roottorin ja staattorin magneettikentät. Staattorit ja roottorit valmistetaan raudasta, että

ne johtaisivat mahdollisimman hyvin magneettikenttää. (Ahoranta 2015, 246.) Tasasähkömoottorin pyörimisnopeutta säädetään ankkurijännitteellä, sillä ankkuri-piirinjännite on suoraan verrannollinen tasasähkömoottorin pyörimisnopeuteen. Jännitettä ohjataan tyristorisillalla, säätämällä sen tyristorien sytytyskulmaa. (Hietalahti 2012, 23)

Askelmoottori on synkronimoottori, jonka toiminta perustuu kestopagneetin ja sähkömagneetin väliseen voimavaikutukseen. Sen pyörintänopeus on sama kuin magneettikentän staattorissa. (Ahoranta 2015, 246, 247.)

Rakenteeltaan askelmoottoria muistuttava reluktanssimoottori, jonka toiminta perustuu roottorin rautaosien ja staattorin magneettinapojen väliseen vetovoimaan. Roottorissa on dynamolevyistä tehdyt avonavat ja staattorissa on sähkövirralla magnetoituvat magneettinavat. (Ahoranta 2015, 248.)

Hiiliharjallisessa tasasähkömoottorissa hiiliharjojen ja kommutaattorien lamellien kautta syötetään tasavirtaa ankkurikäämiin. Raudasta valmistetaan tasasähkömoottorin runko ja magneettinavat, kun taas ankkuri muodostuu sähkölevypaketista. Ankkurin urissa on ankkurikäämitys, joka muodostuu vyyhdeistä. Vyyhdenpääät kytketään kommutaattoriliuskoihin, joihin kytketään ensimmäiseen loppupää ja toisen alkupää. (Ahoranta 2015, 250.)

Hiiliharjaton tasasähkömoottori, jossa staattori on sähkömagnetoitu ja roottorissa on kestopagneetit. Niissä kommutointi tehdään elektronisesti, jolloin se ei tarvitse kommutaattoria tai hiiliharjoja. Hiiliharjattomien tasasähkömoottorien etuna verrattuna perinteisiin sähkömoottoreihin, on niiden hyvä hyötysuhde koko pyörimisnopeusalueellaan. (Ahoranta 2015, 251.)

Vaihtosähkömoottorit on jaettu kolmeen tyyppiin, jotka ovat kestopagneetti-, reluktanssi ja oikosulkumoottori. Näitä kolmea vaihtosähkömoottoria erotellaan toisistaan roottorin rakenteen mukaisesti. Staattori käämitys on silti samanlainen näissä tyypeissä, joka synnyttää pyörivän magneettikentän staattoriin. Standardi

hyötysuhdevaatimus nopeuttaa vaihtosähkömoottorien energiatehokkuuden kehittämistä eri kuormitustilanteissa. (Ahoranta 2015, 255.)

Korkea hyötysuhteen ja vääntömomenttitiheyden ansiosta kestopagneettimoottorin tutkimustyötä ja kehitystyötä on korostettu niin teollisuuden, ajoneuvojen sekä hajautetun energian sähkömoottoriksi. Suurtehoisten kestopagneettimoottoreiden valmistamisen on mahdollistanut kestopagneettimateriaalien kehittäminen. (Hietalahti 2013, 61.) Kestopagneettimoottorissa roottorin kestopagneetit seuraavat magneettinapoja staattorikentässä, jolloin roottori pyörii syöttöjännitteen taajuutta vastaavalla nopeudella. Suoraan sähköverkkoon kytkettynä kestopagneettikonetta ei käytetä, vaan se vaatii syöttönsä ja pyörimisnopeutensa säätämiseen taajuusmuuntajan. Roottoriin asennettavat kestopagneetit suojataan mekaanisilta vaurioilta asentamalla ne pintaan tai upottamalla ne roottorin sisälle. Magneettivuon voimistamiseen voidaan vaikuttaa pienennetyllä ilmavälillä, tämän pystyy toteuttamaan roottoriin upotetuilla kestopagneeteilla. (Ahoranta 2015, 256.)

Reluktanssimoottorin toiminta perustuu staattorin keskitetyn magneettivuon kulkuun roottorissa. Roottori on valmistettu levyistä, joissa on ilma-aukot, jotka ohjaavat magneettivuota. (Ahoranta 2015, 257.) Synkroninen käynti on reluktanssimoottorin merkittävin ominaisuus, jolloin sitä voidaan käyttää ilman pyörimisnopeus antureita teollisuuden linjakäytöissä. Suorituskyky voidaan saada paremmaksi kuin epätahtikoneen. Ongelmaksi tulee tärisevissä ja raskaissa kohteissa pienen ilmavälin tarve, jolloin ilmaväliä joudutaan turvallisuus syistä nostamaan. Ilmavälin nostaminen aiheuttaa reluktanssimoottorin ominaisuuksien heikentymistä. (Hietalahti 2013, 61.)

Teollisen ajan yksi suurimmista keksinnöistä oli oikosulkumoottori, jonka kehitti Nikola Tesla 1880-luvun lopussa. Se on edelleen ylivoimaisesti myydyin ja käytetyin sähkömoottorityyppi. Oikosulkumoottorin hyviä puolia ovat yksinkertaisuus, edullisuus, luotettavuus ja hyvin vähäinen huollon tarve. Heikkoutena kilpailijoihin verrattuna on matalampi hyötysuhde erityisesti vajaalla kuormalla. Heikompi

hyötysuhde johtuu siitä, että roottorin magnetointi kuluttaa osan oikosulkumoottorin ottamasta sähköverkon tehosta. (Hämäläinen 2020.)

Oikosulkumoottorin toimintaperiaate on samanlainen kuin muissa vaihtosähkömoottoreissa, mutta sen roottorissa on urat. Roottorin urissa on kupari- tai alumiinisauvat, jotka ovat oikosuljettu roottorin molemmista päistä yhdistämällä. (Ahoranta 2015, 257.) Tässä työssä keskitytään tähän sähkömoottorityyppiin.

## **2.2 Oikosulkumoottori**

Tämä vaihtosähkömoottori on suosituin moottorityypeistä teollisuudessa, joka muuttaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi (Hietalahti 2012, 1, 55). Teollisuudessa moottoreita käytetään erilaisten koneiden sekä laitteiden mekaanisena voimanlähteenä (Mäkinen & Kallio 2004, 149).

Näiden oikosulkumoottoreiden suosio pohjautuu niiden yksinkertaiseen rakenteeseen ja kestävyYTEEN, myös suuret valmistuserät mahdollistavat moottoreiden edullisuuden. (Hietalahti 2013, 34.) Oikosulkumoottoreita on saatavilla useilta jälleenmyyjiltä. Moottoreilla on useita teholuokkia, jotka vaikuttavat suoraan myös moottorin ulkomittoihin. (Hietalahti 2013, 34.)

3-vaiheisille sähköverkoille valmistettavien moottoreiden ollessa yleisimpiä, niitä valmistetaan myös 1-vaiheisille sähköverkoille. Sähköverkosta riippumatta, näiden moottorien toimivuudelta tärkeimmät osat ovat paikallaan pysyvä staattori ja pyörivä roottori. (Mäkinen & Kallio 2004, 149.)

Pyörivän staattorikentän vuoviivat leikkaavat käämityksessä olevia roottorisauvoja. Tämä indusoi roottorisauvoihin lähdejännitteen. Roottorisauvojen oikosuljettua, muodostuu roottorivirta. Voimavaikutus syntyy staattorikentän ja roottorivirran välille, voimavaikutus pyrkii saamaan roottorin liikkeelle. Roottori alkaa

pyöriä, jos kuormitusmomentti on pienempi kuin syntyvä vääntömomentti. (Hietalahti 2013, 34.)

Asennusasennon perusteella voidaan lajitella sähkömoottorit jalka- ja laippamoottoreihin. Jalkamoottorin staattorirungossa on yleensä jalat tai paikat, minne jalat voidaan asentaa. Näillä jaloilla pystytään kiinnittämään moottori tukevasti asennuspetiin tai muuhun rakenteeseen. Laippamoottoreissa on yleensä asennuslaippa laakerikilvessä, jonka avulla moottori voidaan asentaa suoraan työkoneeseen. (Mäkinen & Kallio 2004, 153, 154.) Moottoreita valmistetaan myös jalkalaippamoottoreina, joissa on jalat staattorirungossa ja laippa laakerikilvessä. Moottoreille on kansainvälinen IEC 34-7 normin mukainen asennuskoodimerkintä IM, jolla asennusasennot ilmaistaan. (Hietalahti 2013, 18.)

### **2.3 Staattorikäämi**

Staattoripaketti koostuu useista yhteen hitsatuista staattorilevyistä. Staattorilevyissä on käämeille tarkoitettut käämitysurat. (Mäkinen & Kallio 2004, 150.) Käämitysuriin asennetaan uraeristeet, jonka jälkeen dynamolangasta tehdyt vyyhdet. Vyyhtien päälle asennetaan urakiilat. Vyyhtien paikoittamisen jälkeen liitäntäjohtimet asennetaan vyyhtien päihin. Tämän jälkeen johdot sidotaan siististi käämiin niin, etteivät ne ole pyöriä osien edessä. (Kajander 1987, 30–40).

Liitäntäjohtimet kiinnitetään rengasliittimillä liitäntäkoteloon kuudella liitinruuvilla. Liitäntäruuvein ja kytkentäliuskojen avulla voidaan staattorikäämitys kytkeä. Kytkentä tapoja on kaksi erilaista, tähtikytkentä ja kolmio kytkentä. Tähtikytkentä, eli Y-kytkentää, käytetään, kun kahden käämin välillä vaikuttaa pääjännite. Kolmiokytkentää, eli D-kytkentää, käytetään, kun vain yhteen käämiin vaikuttaa pääjännite. (Mäkinen & Kallio 2004, 151.)

Hyvällä ja ammattitaitoisella suunnittelulla kääminnällä saadaan sähkömoottorin hyötysuhde nousemaan useita prosentteja. Hyötysuhde on merkittävä asia suurissa käyttökohteissa kuten laivoissa. (Mainio 2022.)

## 2.4 Roottori

Roottori on oikosulkumoottorin pyörivä osa, jossa on häkkiä muistuttava häkkikäänitys. Häkkikäänityksessä on akselin suuntaiset alumiinista tai kuparista valmistetut käänityssauvat, jotka ovat oikosuljettu toisiinsa roottorin molemmista päistä. Roottorin rakenteen mukaisesti tätä sähkömoottorityyppiä kutsutaan oikosulkumoottoriksi. Oikosulkumoottoriin asennettaessa se laakeroidaan ja siihen tulee akseli, jonka tehtävänä on pyörittää työkonetta ja jäähdytystuuletinta. (Mäkinen & Kallio 2004, 150.)

Roottoriin indusoituu roottorivirta, kun oikosuljettuun roottorikäänitykseen yhdistetään ulkoinen kuormitus. Roottorivirta muodostaa roottorin ympärille oman magneettikentän. Staattorikenttä alkaa pyörittämään magneettikenttää tahdissa, joka alkaa muodostamaan roottoriinkin pyörivää liikettä. Induktion säilyttämiseksi, täytyy staattorin luoman magneettikentän olla suurempi kuin roottori mekaanisen pyörimisnopeuden. (Hietalahti 2012, 56.)

Roottoriurituksien ja sauvarakenteiden muodoilla pystytään vaikuttamaan moottorin momenttiin ja hyötysuhteeseen. Roottorien häkkikäänityksiä on kahdenlaisia rakenteita, yhden häkin rakenne ja kaksoishäkkirakenne. Moottorin käynnistysmomenttiominaisuuksia suorassa verkkokytkennässä voidaan parantaa kaksoishäkkirakenteella. (Hietalahti 2012, 58.)

## 2.5 Laakerikilpi

Laakerikilven pääsääntöisenä tehtävänä on pitää laakeria paikalla ja keskittää roottori staattorin sisälle pitäen toimivuudelta tärkeän ilmaraon roottorin ja staattorin välillä. Roottorin ollessa keskityksessä se ei tuota ylimääräisiä tärinöitä ja lisäksi laakerikilpi suojaa oikosulkumoottoria myös ulkoisia voimia vastaan. Laakerikilven täytyy olla riittävän jäykkä aksiaaliselle taajuudelle, joka on oikosulkumoottoreissa 300 hertsiä. Laakerikilven ominaisuuksia pystytään muuttamaan sen

materiaalilla ja massalla. Laakerikilpiä valmistetaan erilaisista valuraudoista, joiden arvot määräytyvät turvallisuusluokan mukaisesti.

Sähkömoottorin kuluvien osien vähyden ansiosta, laakerivika on yleisin mekaaninen vika (Tervola 2022). Koneiden rikkoutumiselle yleisin syy on vioittunut laakeri, joka on yleisin komponentti erilaisissa koneissa. Laakereille on nykyään erilaisia kunnan valvomiseen tarkoitettuja menetelmiä, kuten lämpötila-, öljypartikkeli- ja värähtelymittauksia. (Setälä 2019.) Ruotsalainen Sven Wingquist kehitti nykyaikaisen kuulalaakerin vuonna 1907. Winguistin kehittämä ratkaisu paransi laakerin toimintaa merkittävästi, vaikka saman tyyppistä ratkaisua olikin käytetty jo keskiajan mekaanisissa laitteissa. Tämän tyyppisiä laakereita SKF alkoi valmistamaan, jonka markkina-asema on merkittävä tänä päivänäkin. (Kortelainen 2021.)

### 3 KONDENSAATIOON LIITTYVÄT TEKIJÄT SÄHKÖMOOTORISSA

STEK ry (2023) mukaan ulkotiloissa sähkölaitteisiin kohdistuu kosteutta, lämpötilavaihteluita pölyä ja mekaanista kuormitusta. Ulkoilmassa käytetään vain ulko käyttöön suunniteltuja sähkölaitteita, sillä ne on suojattu veden ja pölyn esiintymiseltä. Näihin laitteisiin merkitään kotelointi luokka eli IP-luokka, jonka jälkeen ilmaistaan kahdella numerolla mille laite on suojattu. Ensimmäinen numero kertoo suojauksen vierailta esineiltä esimerkiksi pölyltä vastaan ja toinen numero kertoo kosteus suoja luokan.

#### 3.1 Kondensaatio sähkömoottorissa

Kondensaatio on prosessi, jossa lämpötilan laskeminen aiheuttaa höyryn muuttumisen nesteeksi. Luonnossa kondensaatiolla on merkittävä rooli, sillä se on tärkeä osa veden kiertokulkua. Kondensaatioprosesseja on erilaisia ja niitä tapahtuu useissa eri tilanteissa. (Mostafa Ghiaasiaan 2007, 436.)

Homogeeninen kondensaatio muodostuu, kun höyryn lämpötila laskee riittävän alas. Kyllästymislämpötila aiheuttaa pisaroiden ytimien muodostumisen, kun taas kyllästymislämpötila aiheutuu höyryjen säteilyjäähdytyksestä.

Säteilyjäähdytys aiheutuu kahden eri lämpötilan höyryvirran sekoittumisesta. (Mostafa Ghiaasiaan 2007, 436.)

Suurin osa kondensaatioprosesseista ovat heterogeenisiä, niissä kiinteille pinnoille muodostuu ja kasvaa pisaroita. Pinnan ollessa sileä ja kuiva, tarvitaan höyrylle merkittävää alijäähdytystä kondensaation alkamiseksi. (Mostafa Ghiaasiaan 2007, 437.)

Pisarakondensaatio on stabiili pisaramainen kondensaatio. Sitä muodostuu, kun kondenssivesi ei kastele pintaa eikä muodosta kalvoa. Tämä kondensaatio muodostaa pintaan tarttuvia pisaroita. Lämmönsiirtomuotona pisarakondensaatio on



erittäin tehokas. Se tarjoaa kondensaationopeuden, joka on suurempi kuin kalvo-  
maisella kondensaatiolla. (Mostafa Ghiaasiaan 2007, 437, 438.)

Kalvokondensaatio on merkittävin kondensaatioilmiö. Tämä kondensaatio muo-  
dostuu aluksi pisaroista, jonka jälkeen se kostuttaa pinnan ja yhdistää pisarat toi-  
siinsa muodostaen yhtenäisen nestekalvon. (Mostafa Ghiaasiaan 2007, 438.)

Ilmaparametrien mukaan kuutio 20 °C ilmaa sisältää noin 17.3 grammaa vettä. Ve-  
sihöyry tiivistyy, kun ilman lämpötila saavuttaa kastepistelämpötilan. Tämän läm-  
pötila riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta sekä ilman lämpötilasta. Esimer-  
kiksi ilman lämpötilan ollessa 20 °C kastepistelämpötila 40 prosentin suhteellisessa  
ilmankosteudessa on 6 °C, kun taas suhteellinen kosteus yli 18 °C on 90 prosenttia.  
Täten mitä korkeampi huoneen suhteellinen kosteus on tietyssä lämpötilassa, sitä  
alhaisempi lämpötila aiheuttaa kondensaatiota. (Ksit, Szymczak-Graczyk & Pilch  
2022.)

### **3.2 Kondensaation estäminen**

Sähkö johtuu eri tavoin eri aineissa, sillä aineissa vaihtelee vapaiden elektronien  
määrä ja niiden mahdollisuus liikkua. Veden kulkua eri aineiden läpi voi verrata  
elektronien liikkumiseen. Esimerkiksi vesi läpäisee hitaasti saven mutta nopeasti  
hiekan, kun taas sähkövirta kulkee huonosti sähkölangan läpi ja hyvin kuparilangan  
läpi. (Ahoranta 2015, 32.)

Ominaisuutta, jolla aine vastustaa sähkövirran kulkua kutsutaan resistanssiksi. Ai-  
neissa olevien vapaiden varauksenkuljettajien määrä ja kuinka hyvin ne voivat liik-  
kua, sitä vähemmän se vastustaa virran kulkua eli silloin resistanssi on pieni. (Aho-  
ranta 2015, 32.)

Määritys resistanssin yksikölle: Jos sähkölaitteen ja johtimen läpi kulkee yhden  
ampeerin sähkövirta yhden voltin jännitteellä, silloin resistanssi on yksi ohmi (Aho-  
ranta 2015, 32). Fluken (2023) mukaan Ohmia merkataan omegalla ( $\Omega$ ), joka on  
kreikkalainen aakkonen.

Lämpövastuksia käytetään erilaisten laitteiden lämmittiminä, niiden tehot vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaisesti kymmenistä wateista satoihin kilowatteihin. Lämmitysvastuksen nimellisjännite on mitoitettu niin, ettei se kuumene liikaa. Korkeampi jännite nostaa lämpötilaa, mutta myös pienentää lämmitysvastuksen käyttöikä. (Ahoranta 2015, 70.)

Lämpötilaa, valoisuutta tai magneettikenttää mitataan vastuksilla, joiden resistanssiarvo riippuu voimakkaasti ympäristön olosuhteista. Näitä vastuksia käytetään elektroniikka- ja ohjausvirtapiireissä. (Ahoranta 2015, 76.)

PTC-vastusten (Positive Temperature Coefficient) avulla seurataan staattorikäämin lämpötilaa. Ettei staattorikäämin eristeaineet lämpenisi liikaa, PTC-vastus ohjaa termistorireleen avulla sähkömoottorin irti sähköverkosta. Toimintalämpötila lämpökerroin on erittäin suuri staattorikäämiin sijoitetussa PTC-vastuksessa, jolloin aikaan saadaan suuri resistanssimuutos pienelläkin lämpötilamuutoksella. (Ahoranta 2015, 77.)

### **3.3 Lämmönjohtavuus**

Lämpöenergia siirtyy kuumasta alueesta kylmempään säteilemällä tai johtamalla. Lämmön johtuminen tarkoittaa aineen rakenneosasten värähtelyjen tai elektronien liikkeen avulla lämmön siirtymistä. Esimerkiksi hyvä lämmönjohtaja on timantti, koska sen rakenneosat, hiiliatomit, ovat tiiviisti kiinni toisissaan lujilla sidoksilla ja lämpö välittyy helposti atomilta toiselle värähtelemällä. (Hänninen, Karppinen, Leskelä & Pohjakallio 2018, 30.)

Nesteet johtavat huonommin lämpöä kuin kiinteät aineet, koska nesteiden rakenneosat ovat sitoutuneet heikommin toisiinsa, jolloin värähtelyliikkeen on vaikeampi välittyä vierekkäiseltä osalta toiselle. (Hänninen ym. 2018, 30.)

Kaasumaisissa aineissa, kuten ilma, lämpö siirtyy säteilemällä, jolloin lämmönjohtavuus on hyvin alhainen. Elektroninen liike on lämpöenergian siirtämiselle tehokkaampi tapa kuin atomien, molekyylien ja ionien lämpövärähtely. Metalleilla on rakenteissaan hyvin liikkumiskykyisiä elektroneja sisältävä elektronipilvi, jonka avulla ne johtavat lämpöä hyvin. (Hänninen ym. 2018, 30.)

## 4 UUDEN LAAKERIKILVEN SUUNNITTELU

Laakerikilpi suunniteltiin uudelleen. Paranneltua laakerikilpeä suunniteltiin alkutestien perusteella. Staattorirungon kiinnityspinnat ja laakeripinnat pysyivät samanlaisina kuin tuotannossa olevilla laakerikilvillä.

### 4.1 Tuotekehitysprosessi

Tutkimus- ja tuotekehitystoiminnalla tarkoitetaan laajassa merkityksessä tavoitteellista toimintaa, joka tarkoituksena on synnyttää uutta tietoa ja siten johtaa tuotteen, toiminnan tai palvelun kehittämistä. Tutkimus- ja kehitystoiminnan suunnittelu on yrityksen tai organisaation muun toiminnan kanssa molemmin puolisessa vuorovaikutuksessa. Tuote- ja markkinasuunnitelmaa tarvitaan tutkimus- ja tuotekehityssuunnitelmaa varten. (Kangasluoma 1979,7.)

Tuotekehityksen tarkoituksena on uuden käyttökelpoisen tuotteen suunnittelu ja kehittäminen tutkien teknisiä, taloudellisia ja markkinointiin liittyviä tekijöitä. Tämä merkitsee kaupallisesti markkinointikelpoista tuotetta. Tuotekehitys tähtää innovaatioketjun idea-asteelta valmiiksi kehitettyyn ja kokeiltuun tuotteen konkreettiseen tulokseen. Tuotekehitys on valmis, kun tulos on säännöllisessä käytössä tai sitä markkinoidaan normaalisti. (Kangasluoma 1979, 8, 9.)

Laajuus selventää tutkimus- ja kehitystoiminnan ja tuotekehityksen eroa, tutkimus- ja kehitystoiminnassa voi olla useita tuotekehitysprojekteja. Tämän lisäksi siihen kuuluu tuotekehityksen koordinaatio ja ympäristöyhteyksien hoitaminen. Tuotekehitys tarkoittaa taas idea-asteelta valmiiksi kehitettyyn ja kokeiltuun konkreettiseen tulokseen asti. (Kangasluoma 1979, 9.)

Tuotekehitys tarkoittaa parannetun tuotteen kehittämiseksi tehtyä teknisten, taloudellisten ja markkinointiin liittyvien tekijöiden tutkimus- ja suunnittelutyötä. Tämä käsittää koko tapahtumaketjun idea-asteelta lähtien valmiiseen tuotteeseen, jota on kehitelty, kokeiltu ja se on siirretty tuotantoon tai markkinointiin. (Kangasluoma 1979, 20.)

Tuotepolitiikan, tuoteohjelman ja tuotekehityssuunnitelman kanssa tuotekehitystoiminta täytyy olla sopusoinnussa. Suunnitelmista ja politiikasta voidaan joskus poiketa erityisen lupaavissa tilanteissa. (Kangasluoma 1979, 20.) Taulukossa 1 on kuvattu Kangasluoman (1979, 109.) teoksen pohjalta luettelo tuotekehityksen projektin valmistelusta.

**Taulukko 1.** Tuotekehitys projektin valmistelu (Kangasluoma 1979, 109).

Projektin ehdotus	Kuka tahansa voi tehdä projektiehdotuksen.
Esitutkinta	Esitutkimus projektin laajuudesta sekä muista edellytyksistä
Kannattavuuslaskelma	Projektin kannattavuusparametrien laskeminen
Projektin laajuuden selvittäminen	Projektin pituus, kustannukset sekä taloudelliset vaikutukset
Projekti ehdotuksen esittely	Esitellään projektiehdotus niille henkilöille, joita se koskee sekä muille mahdollisille sidosryhmille
Projektisuunnitelma	Projektisuunnitelmassa estetään aikataulu, resurssi käyttösuunnitelma ja ehdotetaan projektiryhmän jäsenet

Uusien tuotteiden tarkastelu ja niiden valinta on innovaatioprosessissa kriittinen vaihe. Vaikka näkökohta on varmasti olemassa, eksakteja kriteerejä on vähän, joka tekee tästä vaiheesta epäilemättä vaikean. (Kangasluoma 1979, 109.)

Yrityksen tai organisaation toiminta-ajatuksen, toimintasuunnitelman, tuoteohjelman, tuotekehityspolitiikan ja mahdollisuuksien kannalta tulee tarkastella projektiehdotuksen tai idean hyödyllisyyttä arvioitaessa. Seuraavat osaongelmat voidaan erotella projektiehdotusten ja ideoiden arvioinnissa ja valinnassa: Millaisia ideoita otetaan vastaan, miten työnalle otettavat ideat valitaan, minkälaisen menetelmän mukaan valintoja tehdään, millaisia kriteerejä valinnassa otetaan huomioon sekä kenen toimesta valinnat tehdään. (Kangasluoma 1979, 110.)

## 4.2 Tuotannossa oleva laakerikilpi

Opinnäytetyö alkoi kahta valuraudasta valmistettujen oikosulkumoottorien tuotannossa olevaa laakerikilpeä tutkimalla, kuinka hyvin ne johtaisivat lämpöä. Uutta lämmitysvaihtoehtoa kokeiltiin pienillä 6 x20 mm 70 W lämmitysvastuksella yksittäin sekä pareittain. Lämmitysvastukset asennettiin laakerikilpeen niin, että materiaalia oli riittävästi porata 6.5 mm reikä ja upottaa reikään lämmitysvastukset. Lämmitysvastuksien asentamisessa käytettiin lämpöä johtavaa rasvaa, jonka tarkoituksena oli tukkia ilmaraot lämmitysvastuksen ja asennusreiän välillä. Näiden lämmitys kokeilujen tarkoituksena oli saada lähtötieto, kuinka hyvin lämpö johtuu valurautaiseen laakerikilpeen.

Tutkimuksissa mitattiin lämpötiloja käyttäen Fluken valmistamaa Ti400-lämpökameraa, jolla pystyi ottamaan eri tiedostomuotoisia kuvia. Lämpökameralla ottamamme kuvat olivat JPEG- ja IS2-tiedostomuodossa. JPEG-kuvat saadaan auki tietokoneella, joka näyttää lämpimimmän, kylmimmän ja kuvan keskellä olevan lämmön. Näiden kuvatiedostojen koko ja tarkkuus on minimoitu, että ne vievät mahdollisimman vähän tallennus tilaa. IS2-muotoisia kuvia pystyy tarkastelemaan Fluke SmartView -ohjelmistolla tai Fluke Connect -sovelluksella, joilla pystyy lisäämään tarkistettaviin kohtiin lämpöarvopisteitä. Tämä tiedostotyyppi on tarkempi ja suurempi kuin JPEG-tiedostotyyppi.

Tutkimukset aloitettiin käyttäen yhtä lämmitysvastusta laakerikilpeä kohden. Lämmitysvastus asennettiin mahdollisimman lähelle laakerikilven keskipistettä. 200 runkokoon laakerikilpi lämpeni hyvin yhdelläkin lämmitysvastuksella, mutta lämmön jakautuminen keskittyi lämmitysvastuksen lähialueelle. Suurempi 280 runkokoon laakerikilven laajan pinta-alan lämmittämiseen ei yksi lämmitysvastus riittänyt.

Toinen lämmitysvastus lisättiin niin, että lämmitysvastukset ovat vastakkain. 200 runkokoon laakerikilpi lämpeni nyt paljon tasaisemmin ja kaksi lämmitys suuntaa

auttoivat siirtämään lämpöä laajalle alueelle. 280 laakerikilpeen toisen lämmitysvastuksen asentaminen auttoi huomattavasti lämmittämään laajaa pinta-alaa taiseisesti.

Mittaustuloksien perusteella valittiin paikat, jonne tulevissa laakerikilvissä tulisi lämmitysvastuksien paikat sijoittaa ja minkä muotoisina laakerikilvet olisivat kustannustehokkaimmat. Laakerikilven ulkomuodosta on tarkoitus tehdä mahdollisimman yksinkertainen. Laakerikilven sisäpuolelle suunniteltaisiin tukirakenteet ja lämmittämisen kannalta tarpeelliset urat.

### **4.3 Mallintaminen**

Paranneltu laakerikilpi mallinnettiin Siemensin valmistaman NX-12 3D-mallinnusohjelman avulla. Mallinnettujen laakerikilpien lämmön jakautumisen ominaisuuksia simuloitiin Comsol-nimisen yrityksen valmistamalla simulointiohjelmalla. Kuvassa 3 on 3D-tulostettu 1/5 mittakaavan pienoismalli 280 runkokoon laakerikilvestä.



**Kuva 3.** 1/5 kokoluokan 3D-tuloste 280 runkokoon laakerikilvestä.

#### 4.3.1 Suunnittelu

Konseptin testaamisen jälkeen tuotannossa olevilla laakerikilvillä, alkoi paranneltujen laakerikilpien suunnittelu. Aluksi suunniteltiin 200 runkokoon laakerikilven pohjalle mallinnettava laakerikilpi.

Laakerikilpeä alettiin muotoilemaan niin, että sen ulkokuori olisi mahdollisimman pyöreä ja sileä. Ulkopintaan mallinnettiin vain pakolliset muodot, jotka ovat laakeroinnin ulkopuoli, kiinnitys korvat sekä rasvanpoistoon tarvittavat väistöt.

Laakerikilven sisäpinta mallinnettiin niin, että sen kehän ympäri kulkisi neljä uraa. Näiden urien tarkoituksena on jakaa lämpöä laakerikilven kehää pitkin, kuin myös säteilemällä lämpöä urien päistä staattorikäämiin pintaan. Lämmitysvastuksien asennuspaikoiksi suunniteltiin laakerikilven sisäpintaan koroke, joka yhdistää urat toisiinsa. Korokkeiden kohdalle lämmitysvastuksille tehtäisiin kiinnitysreiät laakerikilven ulkopinnan puolelta. Laakerikilpeä jäykistäviä tukirakenteita ei vielä tässä



vaiheessa mallinnettu, sillä tarkoituksena oli simuloida vain urien lämmönjohtavuutta.

Ensimmäisessä simuloinnista saatiin selville, ettei koko kehän ympäri kulkevat lämmitysurat olleet tarpeellisia. Laakerikilven suunnittelua jatkettiin ja urien pituutta muutettiin. Urien paikoitusalueita vähennettiin 360 asteesta kahteen vastakkaiseen 100 asteen alueeseen. Urat olivat avonaiset laakerikilven ylä- ja alareunaan, jolloin niihin ei mallinnettu muuta kuin tukijäkisteet ja nippojen paikat. Laakerikilven kehän ympärille suunniteltiin ulkokehästä sisäkehään kulkevat tasapak- sut jäykisteet, jotka paikoitettiin tasaisesti laakerikilven ympärille.

200 runkokoon laakerikilven muotojen pohjalle suunniteltiin ja mallinnettiin 280 runkokoolle saman tyyppinen laakerikilpi. Laakerikilpi mallinnettiin niin, että sen ulkopinnasta tulisi mahdollisimman yksinkertainen eikä siinä olisi muita muotoja, kuin toimivuudelta tärkeimmät. Sisäpuolelle mallinnettiin molemmille sivuille neljä uraa kehän mukaisesti, jotka yhdistettiin toisiinsa niiden välissä olevilla korroilla, sekä ulkoreunasta keskelle kulkevat tukiurat. Isompaa laakerikilpeä simuloitiin, jonka jälkeen siitä tulostettiin 3D-tulostimella 1/5 mittakaavan pienoismalli muovista.

Isomman laakerikilven mallintamisen jälkeen viimeisteltiin vielä 200 runkokoon laakerikilpeä prototyyppiä varten. Prototyyppiä varten tarvittiin koneistuskuva, johon apua käytettiin tuotannossa olevan laakerikilven koneistuskuva.

#### **4.3.2 Simulointi**

Tuotannossa olevaa laakerikilpeä simuloitiin, jotta saatiin luotettavampi kuva simuloinnin toimivuudesta. Tällä haluttiin selvittää antaako simulointi samantapaisia tuloksia kuin lämpökameralla mitatut testaukset. Simuloinnilla haluttiin varmistaa mallinnettavan laakerikilven toimivuus ennen prototyypin tilaamista. Lämmönjakautuminen oli hyvin samanlainen molemmilla menetelmillä, jolloin pystyimme paremmin luottamaan simulaatio-ohjelman antamiin tietoihin.

Simulointi auttoi ymmärtämään, kuinka lämpö jakaantui uria pitkin ja mikä on lämmönjohtavuuden kannalta tehokkain urien pituus 200 runkokoon laakerikilvestä. Uutta versiota laakerikilvestä simuloitiin ja todettiin, että sitä saataisiin vielä paranneltua. 200 runkokoon laakerikilvestä ja simuloinnin opittujen asioiden pohjalle mallinnettiin vielä 280 runkokoon laakerikilpi, joka myös simuloitiin. Molempien laakerikilpien ollessa lähestulkoon samanmuotoiset, päämittojen ollessa erilaiset, lämpö jakautui molemmista lähestulkoon samalla tavalla.

#### **4.4 Uuden laakerikilven valaminen**

Mallintamisen ja simulointien perusteella parannellusta laakerikilvestä tilattiin prototyyppi. Prototyyppi valmistettaisiin pikavaluna valuraudasta. Prototyypin valmistajana toimii Hetitec Oy.

##### **4.4.1 Valurauta**

Valuraudan rakenne pohjautuu rauta-hiiliseokseen, joka sisältää muitakin tärkeitä raaka-aineita, kuten piitä, mangaania, rikkiä ja fosforia. Nämä alkuaineet muuttavat merkittävästi syntyvän seoksen rakennetta ja ominaisuuksia. (Angus 1976, 1.)

Puhtaan raudan sulamispiste on  $1\ 535^{\circ}\text{C}$  ja eutektinen sulamispiste, eli aineen sulamispiste minimilämpötilassa (Hänninen ym. 2018, 411)., rauta-hiiliseokselle on  $1\ 153^{\circ}\text{C}$ , kun seoksen hiilipitoisuus on 2–4 prosenttia. Eutektisen sulamispiste valuraudalla vaihtelee  $1\ 135^{\circ}\text{C}$  ja  $1\ 150^{\circ}\text{C}$  välillä riippuen piipitoisuudesta seoksessa. Piin lisääminen alentaa eutektiikassa olevan hiilen prosenttiosuutta noin 0–33 prosenttia, jolloin 3–97 prosenttissa hiiltä esiintyy eutektiikassa 1 prosentti piitä. Fosforin lisääminen vaikuttaa suunnilleen yhtä paljon kuin pii hiilen eutektiseen arvoon. Rauta, joka sisältää 1 prosentti piitä ja 1 prosentti fosforia eutektiikka tapahtuisi 3–6 prosentilla hiiltä. Hiilen eutektiseen arvoon vaikuttaa paljon vähemmän muut läsnä olevat aineet, mutta niiden vaikutus on muuten merkittävä. (Angus 1976, 1.)

Austeniitti on aineen olomuoto Hypoeutektisissa raudoissa, joka kerrostuu ensimmäisessä sulatuksessa. Austeniitti on kiinteä hiilen liuos raudassa, joka kiteytyy dendriiteinä, joiden lämpötilagradienteista pituus ja kuvio riippuvat. Kunnes eutektinen lämpötila ja pitoisuus saavutetaan, austeniittidendriitit jatkavat kasvua ja hiilipitoisuus kasvaa jäljellä olevassa nesteessä. Keskuksista alkaa kiinteä pallomainen kiteytysrintama. Grafiitin ja austeniitin kerrostuminen tapahtuu samanaikaisesti. Eutektisetsolut kohtaavat lopuksi ja kuluttavat jäljellä olevan nesteen. (Angus 1976, 2.)

Teräksistä valuraudat eroavatkin metallurgisesti siinä, että tietyssä korotetussa lämpötilassa voidaan teräkset saada kokonaan austeniittisiksi, mutta valuraudan kiinteässä tilassa on aina läsnä metastabiileja karbideja tai stabiilia grafiittia lämpötilan korottamisesta huolimatta. Perustyyppit grafiittisille valuraudoille ovat: suomugrafiittivalurauta (GJL), Pallografiittivalurauta (GJS) ja tylppägrafiittivalurauta (GJV), joista ylivoimaisesti hyödynnetyimpiä ovat somu- ja pallografiittivaluraudat. Grafiittisissa valuraudoissa on grafiittipartikkeleita, jotka muodostuvat ja jakautuvat grafiitin kiteytymistavasta ja valun jähmettymistavasta riippuen. Grafiitin koko, jakautumistavat ja muodon mukaan sekä matriisin mikrorakenteen perusteella määräytyy grafiittisten valurautojen ominaisuudet. Valkoisiksi valuraudoiksi (GJN) nimitetään niitä valurautoja, joiden grafiittina ei ole vapaata hiiltä, ja jotka ovat valun yhteydessä jähmettyneitä valtarakenteeltaan karbidisina eli ledeburiittisina. Grafiitin kiteytymistä ei ole päässyt tapahtumaan jähmettymisen yhteydessä. Valkoisen valuraudan nimitys tulee kovan ja hauraan valuraudan murtopisteestä, joka näyttää vaalealta. Harmaa raudan nimitys tulee alun perin suomugrafiittivaluraudasta, jonka tumman himmeä murtopinta tulee grafiittirakennetta pitkin kulkevasta murtumapolusta. Adusoitua eli temperrautaa (GJM) saadaan valmistettua lämpökäsittelmällä valkoista valurautaa. Tämä valurauta on muovattavaa ja hitsattavaa, mutta kuitenkin sen käyttö on vähenemässä. Austemeroituja valurautoja (AGI ja ADI) valmistetaan somu- ja pallografiittivalurautaa lämpökäsittelmällä. Näistä käytetympi on austemeroitu pallografiittivalurauta (ADI). (Meskanen & Niini 2023.)

#### 4.4.2 Laakerikilven valun tilaamien

Simulointien jälkeen päätettiin tilata prototyyppi 200 runkokoon laakerikilvestä. Laakerikilven materiaalina käytetään suomugrafiittivalurautaa (GJL 250), jota käytetään myös tuotannossa olevissa laakerikilvissä. Laakerikilven mallista lähetettiin tarjouspyyntö alihankkijalle Hetitec Oy:lle, joka valmistaa erilaisia valukappaleita nopealla toimitusajalla.

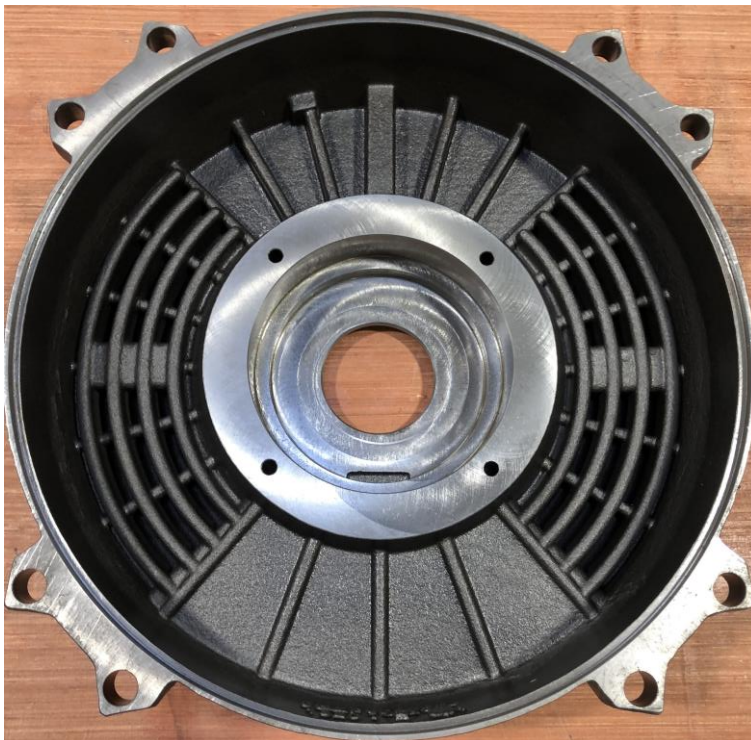
Tarjouksen hyväksymisen jälkeen mallinsimme laakerikilven pohjalle valumallin, jonka mallintamisen yhteydessä tuli vielä pieniä korjauksia laakerikilven muotoihin. Korjaukset koskivat laakeripinnoissa olevaa 0.2 mm mittavirhettä, joka oli muodostunut ensimmäisessä laakerikilven muokkauksen yhteydessä. Valumalli mallinnettiin niin, että koneistettavalle pinnoille tuli koneistusvara, jonka mallintamisessa käytettiin hyväksi tuotannossa olevan laakerikilven valumallia, sillä laakerointi ja kiinnitys pintojen mitat pysyivät samoina kuin tuotannossa olevassa laakerikilvessä. Laakerikilven valumalli lähetettiin alihankkijalle, jossa he mallinsivat valumallin ympärille valumuotin. Valumuotti 3D tulostettiin hiekkaliima seoksesta, joka oli nopea tapa tehdä kertakäyttöinen valumuotti.

Valumallille piirrettiin koneistuskuva laakerikilvestä, johon mallia otettiin tuotannossa olevasta laakerikilven koneistukuvasta. Asennuksen kannalta tärkeimpien mittojen lisäksi tuotannossa olevasta laakerikilvestä otettiin mittojen ja geometrian toleranssit sekä pinnanlaadut.

Laakerikilven koneistuksesta huomattiin, ettei laakerikilven ulkopuolella olevalle pinnalle tullut mallinnettua tarpeeksi koneistusvaraa. Pinnassa, jolle ei jäänyt tarpeeksi koneistusvaraa tuotannossa olevan laakerikilven pinnanlaatua ei voinut toteuttaa. Tämä mitta ei kuitenkaan ollut tärkeä mittatestausten kannalta. Kuvissa 4 ja 5 on valettu ja koneistettu paranneltu laakerikilpi kuvattuna ulko- ja sisäpuolelta.



**Kuva 4.** Parannellun laakerikilven ulkopuoli.

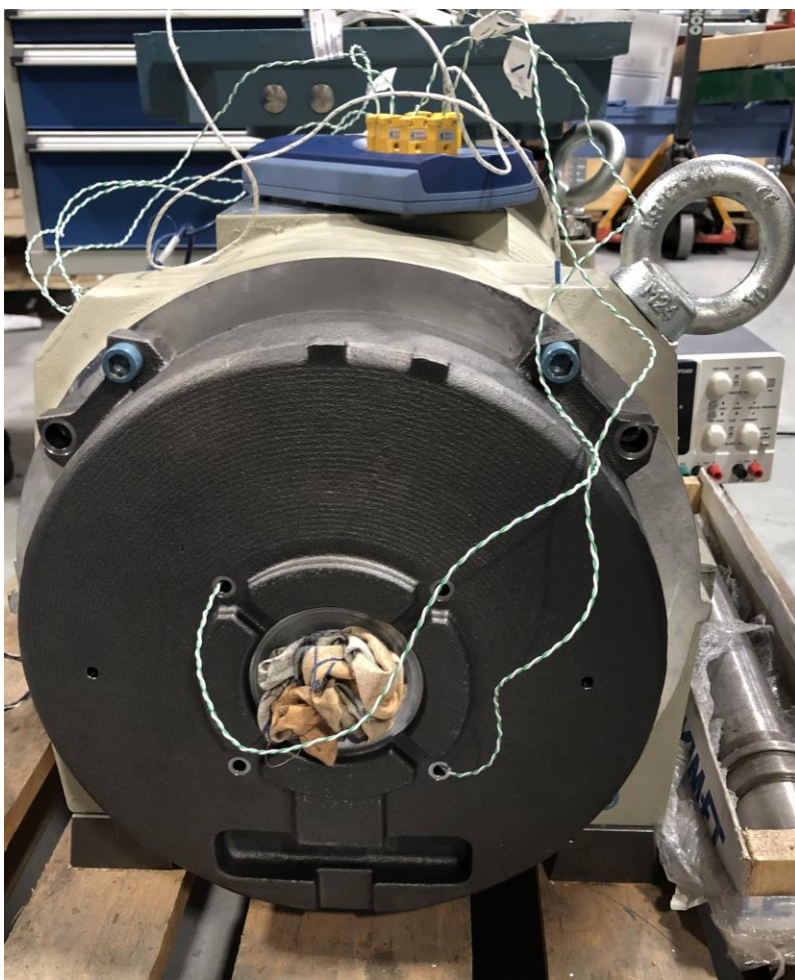


**Kuva 5.** Parannellun laakerikilven sisäpuoli.

## 5 UUDEN LAAKERIKILVEN TESTAAMINEN

Paranneltu laakerikilpi asennettiin LP-moottoriin, joka on vesijäähdytteinen oikosulkumoottori. Laakerikilpi asennettiin oikosulkumoottorin n-päähän (N-end nondrive end), jolloin laakerikilven ja staattorin väliin jäi 100 mm ilmarako, joka on huomattavasti suurempi kuin D-päädssä (D-end drive end).

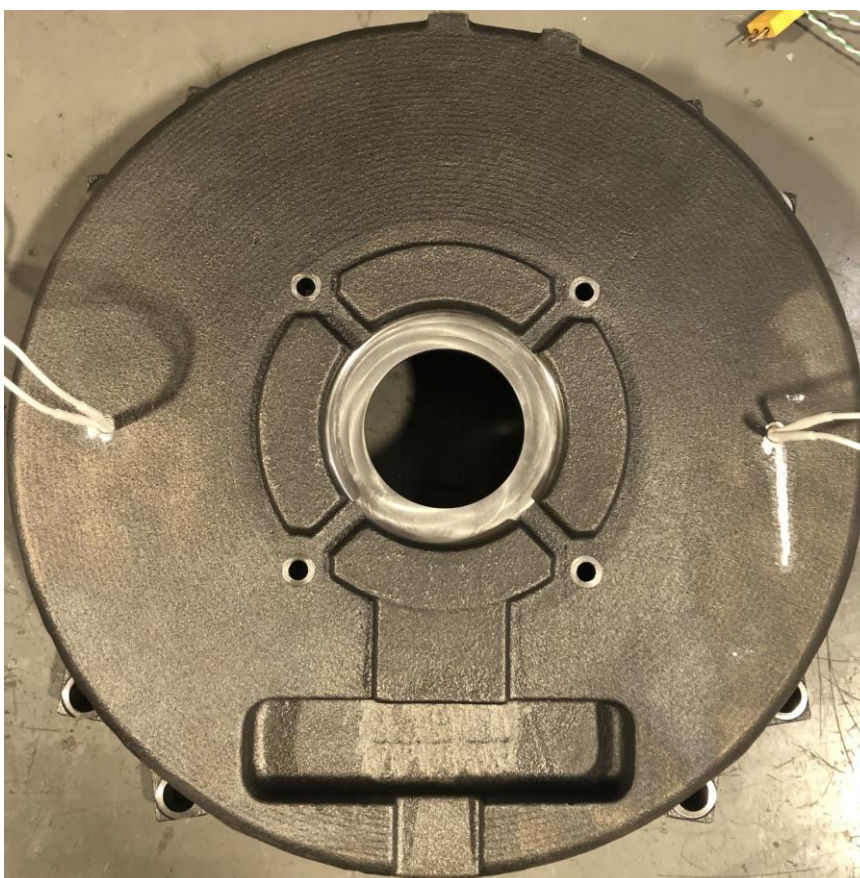
Kuvasta 6 näkee, kuinka paranneltu laakerikilpi asettuu oikosulkumoottoriin. Kuvassa näkyvät johdot ovat lämpötila antureiden johdot. Lämmitysvastuksia ei ollut kuvassa vielä asennettu.



**Kuva 6.** Paranneltu laakerikilpi asennettuna LP-moottoriin.

### 5.1 Lämmitysvastusten asentaminen

Lämmitysvastukset asennettiin laakerikilpeen niille suunnitelluille paikoille. Lämmittämiseen käytettiin kahta samanlaista 6 x 20 mm 70 W lämmitysvastusta kuin alkutestauksissa ja niiden asentamisessa käytettiin samaa lämpöä johtavaa rasvaa. Kuvassa 7 näkyy paranneltu laakerikilpi, johon asennettiin lämmitysvastukset.



**Kuva 7.** Paranneltu laakerikilpi, jossa lämmitysvastukset.

### 5.2 Lämpötilojen mittaaminen

Oikosulkumoottorin lämpötiloja mitattiin Pico TC-08 -tiedonkeruulaitteella, jonka signaali väli on viisi sekuntia. Tiedonkeruulaitteeseen asennettiin PT100-lämpötila-antureita, joista yksi on vapaana ja viisi asennettiin kuumaliimaa käyttäen. Läm-

mitysanturit paikoitettiin niin, että viisi oli staattorirungon sisällä ja yksi ulkopuolella. Staattorikehän ulkopintaa lämpötila-anturit liimattiin kello yhdeksän ja kello kuuden kohdalle N-päästä katsottaessa. Staattorirungon sisälle asennettu lämmitysanturi oli vapaana n-pään laakerin kohdalla mittaamassa sisälämpötilaa. Staattorirunkoon liimattu lämpötila-anturi asennettiin lähimpään arvokilven asennusreikään, joka oli 30 mm laakerikilvestä. Tiedonkeruulaitteen lisäksi lämpötilaa mitattiin Fluke Ti400 -lämpökameralla, samalla tavalla kuin alkutesteissäkin.

### 5.3 Lämpötilamittaus

Testaukset aloitettiin ensin lämmittämällä vastuksia puolella teholla, jolloin yhden lämmitysvastuksen teho oli 35 W. Tiedonkeräyslaitteessa ilmeni virhe 41 minuutin ja 25 sekunnin kohdalla (2 475 sekuntia), jolloin tiedonkeruulaite lopetti mittaamisen. Lämmitystä jatkettiin, kunnes lämpötila alkoi tasaantua, eikä lämpötila enää noussut.

Seuraavaksi lämmitystä jatkettiin täydellä teholla eli 2 x 70 W. Lämpötila annettiin nousta 41 minuutin (2 460 sekunnin) ajan kunnes tiedonkeruulaite kytkettiin pois päältä väliaikaisesti, sillä tiedonkeruulaite täytyisi olla kytkettynä tietokoneeseen mittauksen suorittamiseksi.

Tiedonkeruulaite kytkettiin takaisin päälle 155 minuutin (9 300 sekunnin) kohdalla. Tiedonkeruulaitteen antamista tiedoista huomattiin, että laakerikilvessä kiinniollleiden lämpötila-antureiden lämpötila oli tippunut muutamalla asteella. Tämä viittasi siihen, että kuumaliima oli sulanut, jolloin lämpötila-anturit olivat lähteneet irti ja näyttivät siten pienempää lämpötilaa. Laakerikilven lämmittämistä jatkettiin ilma tiedonkeruulaitetta vielä tunnin ajan, lämpötilakameralla mitaten.

Laakerikilven jäähtymisen jälkeen, se irrotettiin oikosulkumoottorista, jolloin näki, mitä staattorirungon sisällä oli tapahtunut. Kaikki oli ennallaan, paitsi laakerikilvessä olleet lämmitysvastukset olivat irronneet, joka jo huomattiin testituloksista.



#### 5.4 6.5 tunnin koe

Tämän testin tarkoituksena oli tehdä pitkäaikaistesti. Turvallisuussyistä ei voitu lämmitysvastuksia jättää yön yli päälle. Antureita ei tällä kertaa asennettu kuin neljä, kaksi staattorikäämiin, yksi mittaamaan sisäilmaa ja yksi seuraamaan staattorirungon lämpenemistä 135 mm päähän laakerikilvestä. Lämmittäminen aloitettiin kahdella 70 W lämmitysvastuksella ja niiden annettiin lämmittää laakerikilpeä noin kuusi ja puoli tuntia ilman väli mittaamisia.

## 6 TULOKSET

Konseptia testattiin eri vaiheissa ja yritettiin päätellä, onko konsepti hyödyllinen ja kustannustehokas ratkaisu. Konseptia testattiin käytännössä ja simuloimalla, käyttäen lämmitysvastuksia, lämpökameraa, lämpötila-antureita ja simulaatio ohjelmaa.

### 6.1 Tuotannossa oleva laakerikilpi

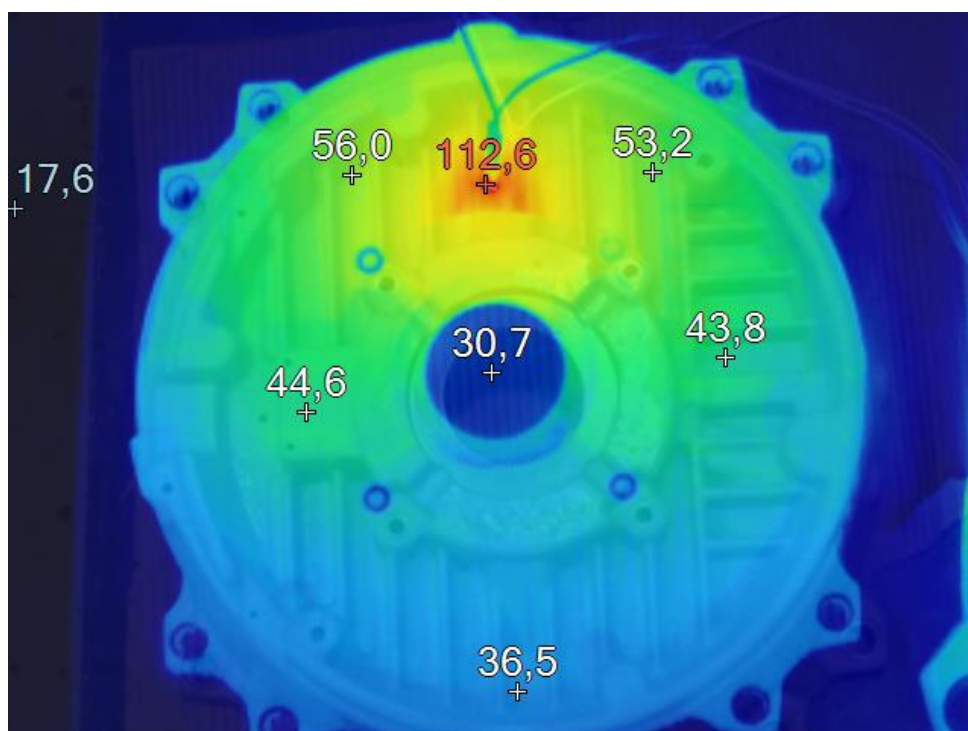
Valuraudasta valmistettua tuotannossa olevaa laakerikilpeä lämmitettiin lämmitysvastuksilla kahden tunnin ajan, jolloin lämpökameralla otettiin kuvia 30 minuutin välein. Lämpö jakautui halutulla tavalla laakerikilven säteen mukaisesti. Kuvassa 8 on 280 runkokoon vakiolaakerikilpi.



**Kuva 8.** 280 runkokoon vakiolaakerikilpi.

### 6.1.1 200 runkokoon laakerikilpi

Yhdellä lämmitysvastuksella lämmittäen laakerikilpi lämpeni halutulla tavalla, kun taas lämpö jakautui enimmäkseen lämmitysvastuksen puolelle laakerikilpeä. Kuva 9 on otettu lämpökameralla yhdellä lämmitysvastuksella testaamisesta.

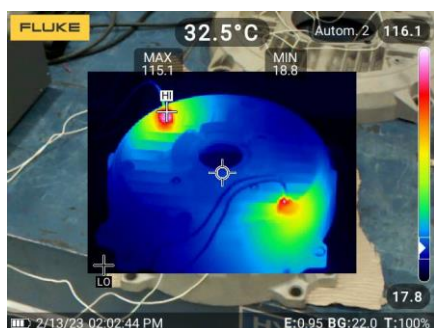


**Kuva 9.** 200 runkokoon laakerikilpi yhdellä lämmitysvastuksella.

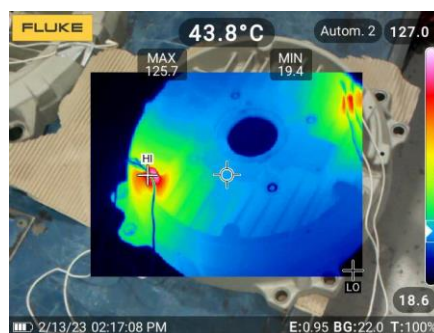
Kuvasta 9 huomataan, että korkein lämpötila on lämmitysvastuksen läheisyydessä 112.6 celsiusastetta. Lämpö laskeutuu 56.0 ja 53.2 celsiusasteeseen lämmitysvastuksen vierestä. Laakerikilpi jäähtyy noin 10 celsiusasteella laakerikilven puoleen väliin tulesa 44.6 ja 43.8 celsiusasteeseen. Laakerikilpi on lämmennyt lämmitysvastuksen vastakkaiselta puolelta 36.5 celsiusasteeseen.

Kuvasta 10 huomataan, että kahdella lämmitysvastuksella laakerikilpi lämpeni huomattavasti paremmin kuin pelkästään yhtä lämmitysvastusta käyttäen. Kah-

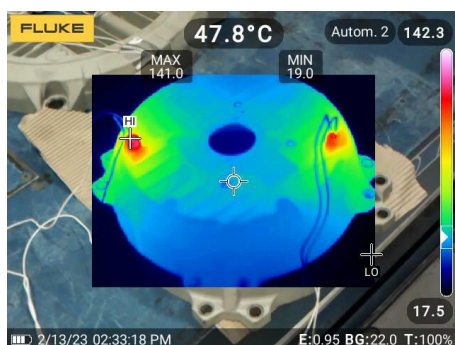
della vastakkain olevalla lämmitysvastuksella lämpö myös jakaantui halutulla tavalla laakerikilven molemmille puolille. Kuvat otettiin 15 minuutin välein. Lyhyiden mittausvälien takia lämmön nousu on melko vähäistä. Korkein kohta lämmitysvastuksen läheisyydestä nousi 115.1 celsiusasteesta 141 celsiusasteeseen ja kuvan keskipisteestä 32.5 celsiusasteesta 47.8 celsiusasteeseen. Kuvien värityksessä punainen on lämpimin kohta, josta lämmön laskiessa se muuttuu keltaisesta vihreäksi ja alhaisinta lämpötilaa kuvaa sininen.



0 min



15 min.



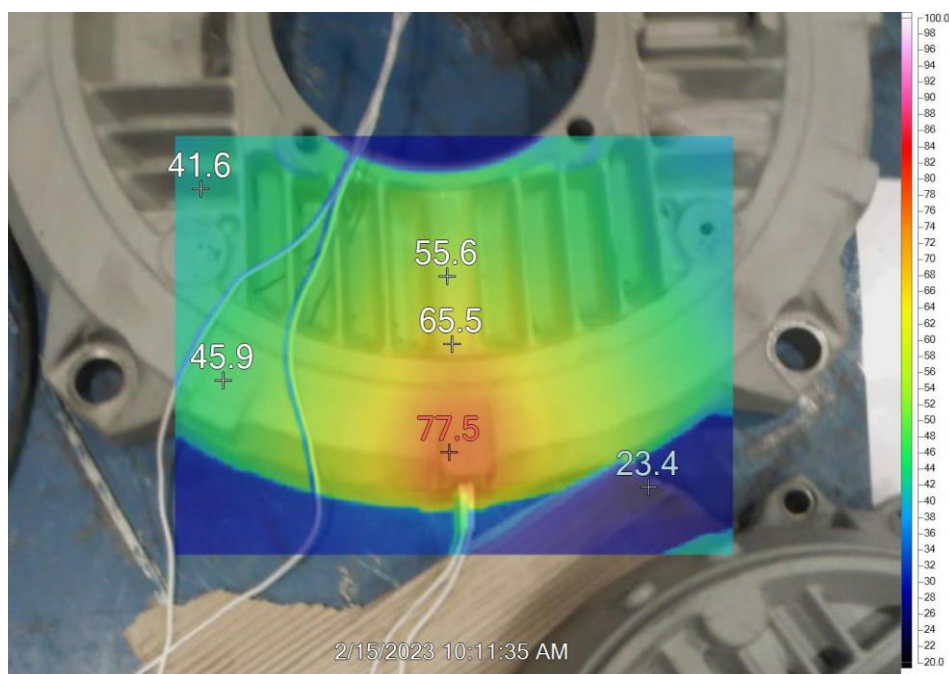
30 min.

**Kuva 10.** Lämpökamera kuvia 200 runkoon laakerikilvestä.

### 6.1.2 280 runkoon laakerikilpi

Lämpökameralla otettu kuva 11 korkein lämpötila on lämmitysvastuksen kohdalla 77.5 celsiusastetta, josta lämpötilat alkavat laskea noin kymmenen celsiusastetta kerrallaan. Laakerikilpi ei lämmennyt halutulla tavalla käyttäen pelkästään yhtä

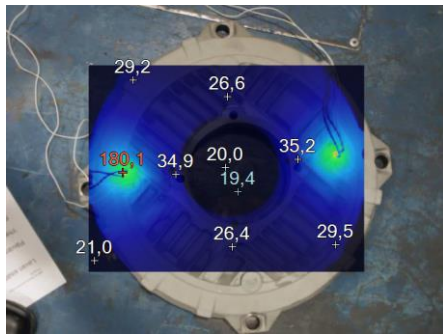
lämmitysvastusta. Lämmitys vastuksen välittömästä läheisyydestä lämpötila on 65.5 celsiusastetta, kun taas sen jälkeen lämpötila laskee 55.6 celsiusasteeseen. Kauempana lämmitysvastuksesta lämpötilat ovat 45.9 ja 41.6 celsiusastetta.



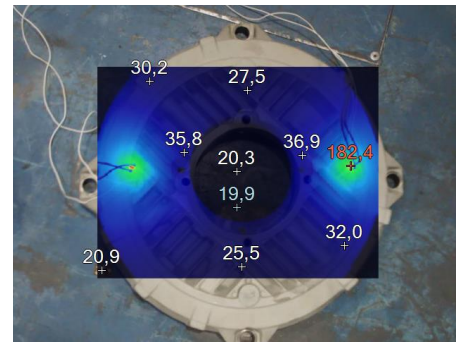
**Kuva 11.** Lämpökamera kuva 280 runkokoon laakerikilvestä.

Kahdella lämmitysvastuksella lämmittäessä laakerikilpi lämpeni halutulla tavalla ja lämpökin jakautui lähestulkoon halutulla tavalla. Kuva 12 otettiin 30, 60, 90, 120 sekä 150 minuutin kohdilla lämmityksen aloituksesta.

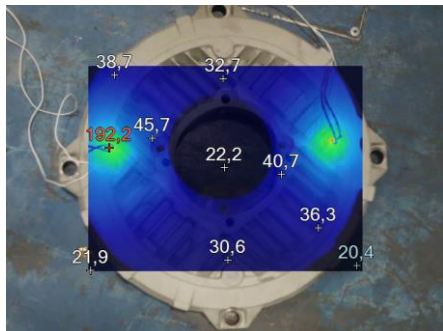
Taulukossa 2 on kuvan 12 lämpötiloja, joista laakerikilven keskellä, 45 celsiusasteessa ja 90 celsiusasteessa olevat lämpötilat ovat keskiarvoja kuvien pisteistä. Keskiarvoilla saadaan aikaan selkeämpi kuva laakerikilven lämpenemisestä.



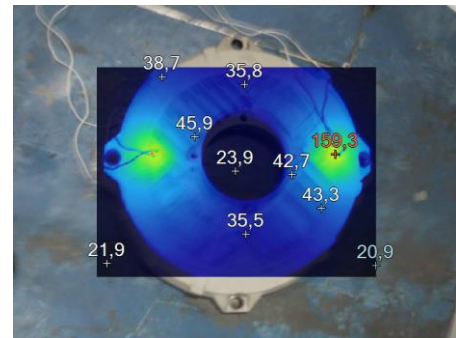
30 min



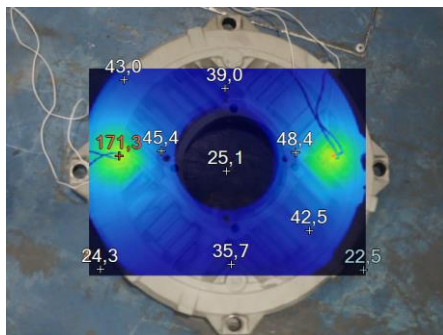
60 min



90 min



120 min



150 min

**Kuva 12.** Lämpökamerakuvia 280 runkoon laakerikilvestä.

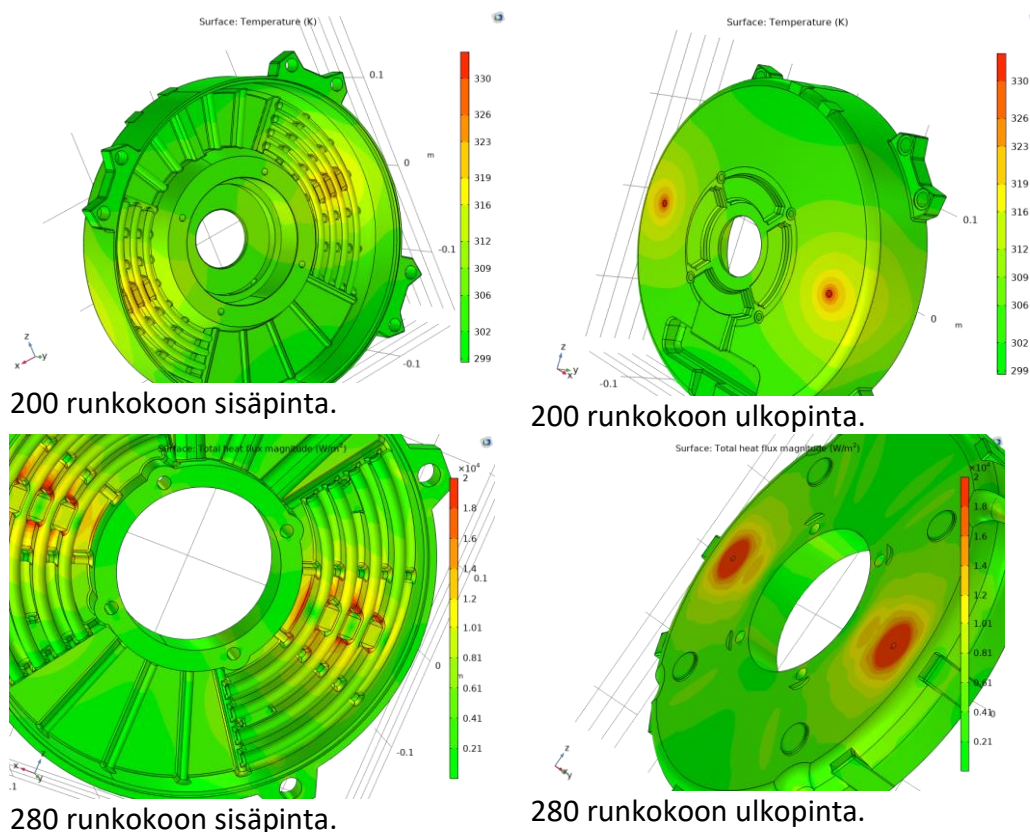
**Taulukko 2.** Lämpökamera kuvien tuloksia 280 runkokoon laakerikilvestä.

Mittausaika [min]	Korkein [°C]	Laakerikilven keskellä [°C]	90° lämmitys- vastuksista [°C]	45° lämmitys- vastuksista [°C]
30	180.1	20	26.5	29.35
60	182.4	20.3	26.5	31.1
90	192.2	22.2	31.65	37.5
120	159.3	23.9	35.65	41
150	171.3	25.1	37.35	42.75

## 6.2 Paranneltu laakerikilpi

Lämpö johtui uria pitkin halutulla tavalla etenkin pienemmässä 200 runkokoon laakerikilvessä. 280 laakerikilvessä olisi hyvä käyttää tehokkaampaa lämmitysvastusta. Simuloinnissa lämmitysvastukset sijoitettiin niille mallinnettuihin paikkoihin, niiden paikat ovat nähtävissä laakerikilven reunoissa punaisella alueella olevassa mustassa ympyrässä.

Kuvassa 13 on simulaatio kuvat 200 ja 280 runkokoon paranneltuista laakerikilvistä. Vasemmalla puolella on kuvattu paranneltujen laakerikilpien sisäpinnat simuloinnissa ja oikealla puolella on kuvattu niiden ulkopinnat. Simuloinneista huomattiin, kuinka lämpö lähtee jakaantumaan paranneltuissa laakerikilvissä. Lämpimin kohta on merkattu punaisella, josta se vaalenee keltaisesta vihreäksi lämpötilan laskiessa.



**Kuva 13.** Simulointikuvia parannelluista 200–280 runkokoon laakerikilvistä.

### 6.3 Hyväksymis- ja kuormitustestaus

Lopputestien tarkoituksena oli tutkia, siirtyykö lämpö uudessa laakerikilvessä yhtä hyvin, kuin simulaatiossa. Testeissä käytettiin kahta 6 x 20 mm 70 W lämmitysvastusta ensin puolella teholla ja sitten täydellä teholla. Lämpöarvoja mitattiin kahdella tavalla oikosulkumoottorin sisäpuolelta PT100-lämpötila-antureilla, jotka olivat kytkettynä Pico TC-08 -tiedonkeräyslaitteeseen. Laakerikilven ulkopintaa mitattiin Fluke Ti400 -lämpökameralla. Taulukossa 3 näkee anturien kiinnityspaikat laakerikilvessä ja staattorirungossa.



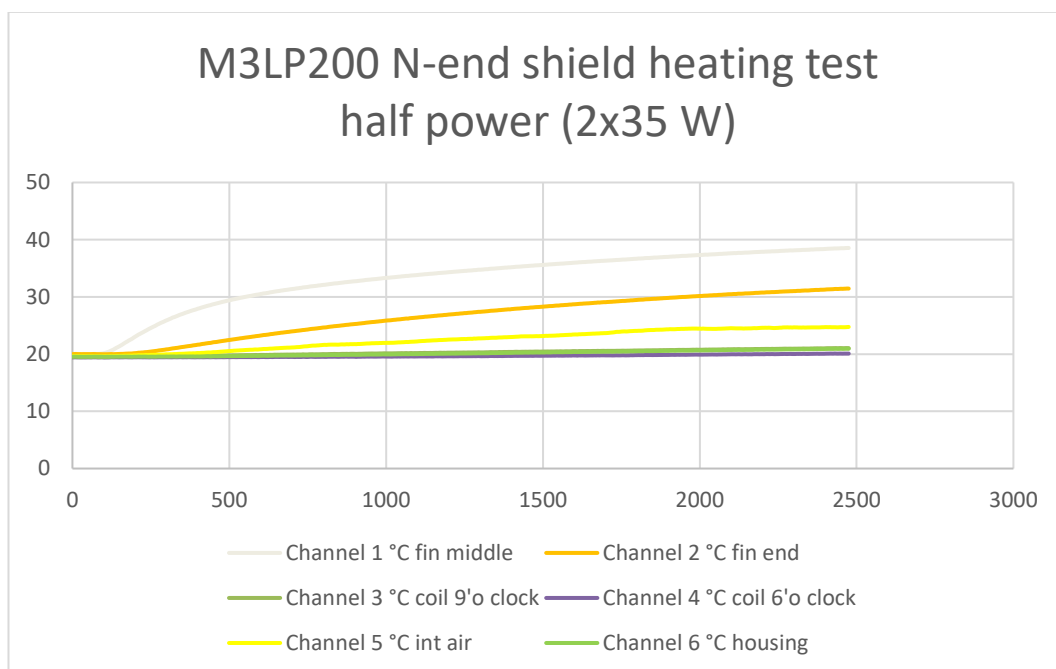
**Taulukko 3.** Antureiden paikat lopputesteissä.

Anturi	Paikka
1	Lämmitysuran keskellä
2	Lämmitysuran päässä
3	Staattorissa kello 9 n-päästä katsottuna
4	Staattorissa kello 6 n-päästä katsottuna
5	Sisälämpötila
6	Staattorirunko

### 6.3.1 2 x 35 W lämmitys

Testit aloitettiin ajassa 0 ensin puolella teholla eli 2 x 35 watin teholla. Lämmitystä jatkettiin puolella teholla lämpötilojen tasoittumiseen asti.

Kuvassa 14 on esitetty lämpötilan nousu 2 500 sekunnin ajalta. Lämpötilojen nousua kuvaavat viivojen värit kertovat niiden asennuspaikat. Harmaa on anturi 1, oranssi on anturi 2, tummanvihreä on anturi 3, liila on anturi 4, keltainen on anturi 5 ja vaaleanvihreä on anturi 6. Näiden anturien paikat ovat kerrottu taulukossa 3. Taulukossa 4 on esitetty tiedonkeruulaitteen mittaamat lämpötilat 5 minuutin välein.



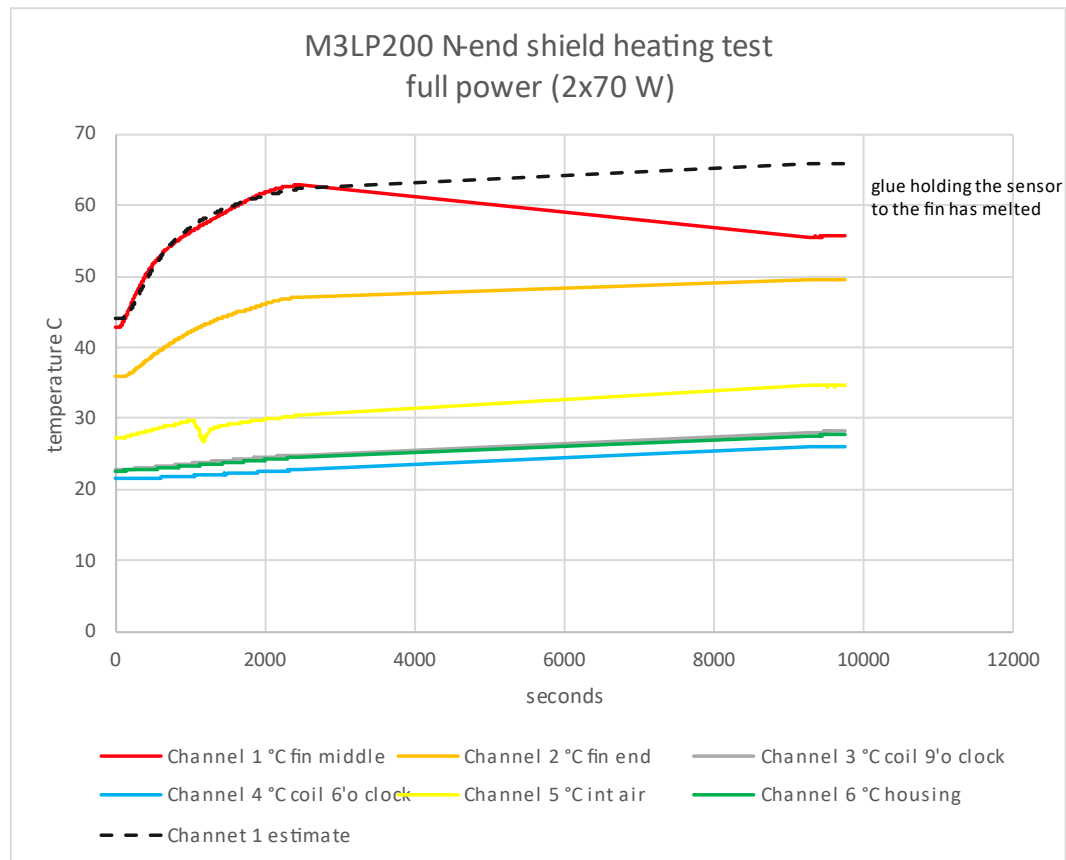
**Kuva 14.** Tiedonkeruulaitteen tuloksia (2 x 35 W).

**Taulukko 4.** Tiedonkeruulaitteen tulokset 5 minuutin välein.

Aika [min]	Anturi 1 [°C]	Anturi 2 [°C]	Anturi 3 [°C]	Anturi 4 [°C]	Anturi 5 [°C]	Anturi 6 [°C]
5	25.9	20.83	19.63	19.46	19.97	19.58
10	30.5	23.25	19.86	19.49	20.85	19.7
15	32.73	25.26	20.05	19.54	21.75	19.88
20	34.32	26.92	20.25	19.62	22.54	20.08
25	35.58	28.29	20.44	19.72	23.16	20.29
30	36.68	29.47	20.63	19.82	24.06	20.5
35	37.63	30.47	20.85	19.97	24.53	20.72
40	38.38	31.28	21.01	20.07	24.72	20.91

### 6.3.2 2 x 70 W lämmitys

Lämpötilan tasoittumisen jälkeen 90 minuutin kohdalla lämmittämisen aloituksesta alettiin lämmittämään täydellä teholla, eli 2 x 70 watin teholla. Kuvassa 15 on kuvattu tiedonkeruulaitteen mittaamat lämpötilat 10 000 sekunnin ajalta.



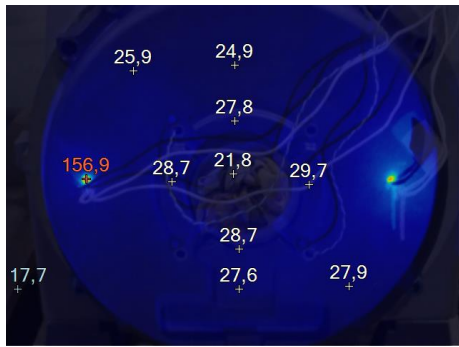
**Kuva 15.** Tiedonkeruulaitteen tulokset (2 x 70 W).

Taulukossa 5 on esitettynä tiedonkeruulaitteen mittaamat lämpötilat 5 minuutin välein. Lämpötila-anturin 1 liimauksen irtoamisen takia anturin antama tieto ei ollut luotettava, joten tiedonkeruulaitteelle laskettiin anturi yhden arvio, jonka uskotaan olevan erittäin lähellä todellisuutta.

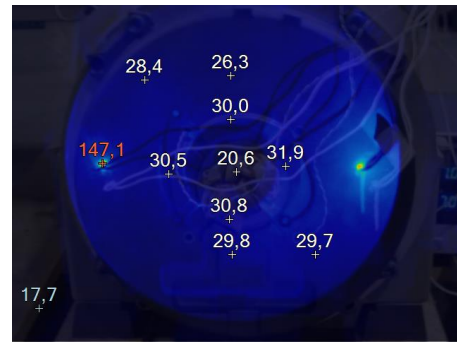
**Taulukko 5.** Tiedonkeruulaitteen tulokset 5 minuutin välein, myös 155 min ja 160 min ajalta.

Aika [min]	Anturi 1 [°C]	Anturi 2 [°C]	Anturi 3 [°C]	Anturi 4 [°C]	Anturi 5 [°C]	Anturi 6 [°C]	Anturi 1 arvio [°C]
5	48.16	37.18	22.98	21.58	27.89	22.78	47.26
10	52.93	39.63	23.26	21.71	28.66	22.98	52.68
15	55.57	41.61	23.57	21.87	29.57	23.27	56.06
20	57.48	43.2	23.85	22.05	27.3	23.51	58.22
25	59.22	44.47	24.11	22.21	29.12	29.12	59.7
30	60.94	45.47	24.4	22.42	29.63	24.03	60.77
35	62.15	46.43	24.64	22.58	29.99	24.28	61.58
40	62.77	47.01	24.86	22.75	30.39	24.51	62.22
155	55.57	49.43	28.08	25.93	34.61	27.61	65.89
160	55.64	49.47	28.17	25.98	34.61	27.68	65.94

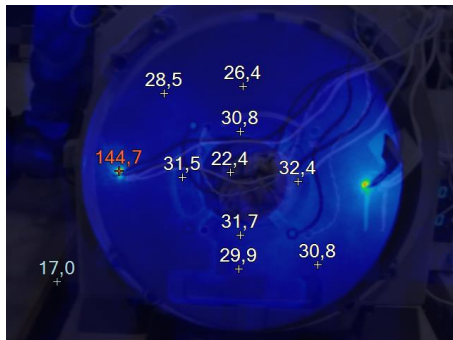
Kuvassa 16 on lämpökameralla otettujen kuvia laakerikilvestä lopputestien aikana ja niistä saatujen lämpötilojen keskiarvoja. Lopputesteistä otettiin lämpökamera-kuvia samassa yhteydessä, kun lämmitystä käytiin turvallisuus syistä tarkistamassa.



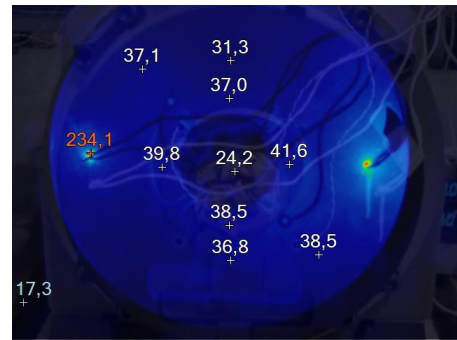
40 min



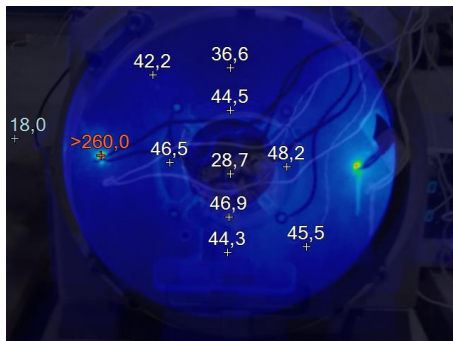
60 min



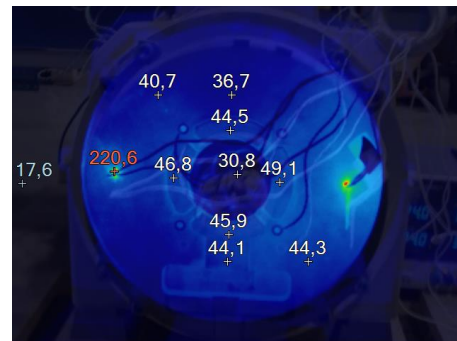
90 min



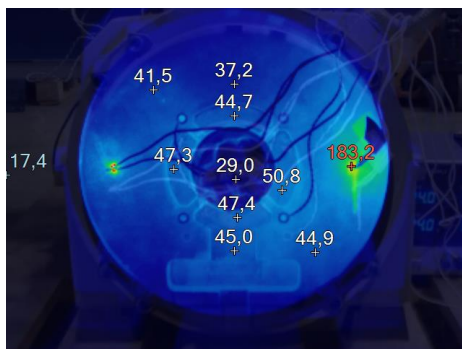
135 min



225 min



285 min



345 min

**Kuva 16.** Lämpökameran kuvia lopputestien ajalta.

Taulukossa 6 on koottu yhteen lämpökameralla mitattujen lämpötilojen keskiarvoja.

**Taulukko 6.** Lämpökamerakuvien keskiarvoja.

Aika [min]	Teho [W]	45° [°C]	90° [°C]	Laakerikilven keskusta [°C]
40	2x35	26.9	26.25	28.73
60	2x35	29.05	28.05	30.8
90	2x35	29.65	28.15	31.6
105	2x35 -> 2x70 (*)			
135	2x70	37.8	34.05	39.23
225	2x70	43.85	40.45	46.525
285	2x70	42.5	40.4	46.58
345	2x70	43.2	41.1	47.55

(\*) 105 minuutin kohdalla lämmitysteho nostettiin 70 wattiin.

### 6.3.3 2 x 75 W 6.5 tunnin lämmitys

Viimeisessä testissä testattiin, kuinka paljon laakerikilpi lämpenee pitkällä aikavälillä, testausaika oli 6.5 tuntia. Tästä testistä otettiin vain lopputulos ylös. Taulukosta 7 näkee lämpötilamittausten keskiarvot 115 sekunnin ajalta, jolloin tiedonkeruulaite oli käytössä. Tässä mittauksessa ei mitattu laakerikilven lämpötilaa, koska lämpötila-anturit irtosivat mittauksen aikana. Halli -lämpötilalla tarkoitetaan mittausympäristön lämpötilaa.

**Taulukko 7.** 6.5 tunnin lämmityksen lopputulos tiedonkeruulaitteesta.

Anturi	3	4	5	6	Halli
Lämpötila [°C]	30.63	30.73	29.31	24.48	22.5

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYS EHDOTUKSET

Alkutesteistä huomattiin, kuinka tuotannossa oleva laakerikilpi johtaa lämpöä reunoja pitkin. Tämän tiedon pohjalle laakerikilpeä lähdettiin suunnittelemaan. Simulaatiota kokeiltiin tuotannossa olevaan laakerikilpeen, jonka tuloksena saatiin lähes samanlainen kuin lämpökuvista. Eli simulointiin pystyttiin luottamaan mallinutus vaiheessa.

Alkutesteissä otettiin aluksi pelkästään JPG-muotoisia lämpökamerakuvia, jotka olivat lähtökohtaisesti heikompi laatuja ja niistä ei saanut tarpeeksi tarvittavia tietoja. Alkutestien puolella välissä alettiin käyttämään IS2-muotoisia lämpökamerakuvia, joihin pystyi Fluken ohjelman avulla asettamaan lämpötila pisteitä haluamaansa kohtaan kuvassa rajattomasti. JPG-muotoisille kuville ei tätä voinut tehdä, joten niiden käyttö lopetettiin alkutestien jälkeen.

Alkutestien jälkeen asiakas ehdotti uuden laakerikilven mallintamista, johon ehdotti mallinnettavan uria, joissa lämpö pääsisi paremmin johtumaan. Asiakkaan ajatuksena oli, että urat johtaisivat lämpöä samalla tavalla kuin jäähdytysurat sähkömoottorin rungon ulkopuolella.

Laakerikilven simulointi antoi selkeän kuvan, kuinka pitkälle lämmön johtuminen siirtyi lämmitysuria pitkin. Tällä tiedolla pystyttiin lyhentämään urien pituutta ja täten keventämään kappaletta, tällä vähennettäisiin laakerikilven valmistus kustannuksia.

Valumallia mallinnettiin parannellun laakerikilven pohjalle ja lisättiin tarpeelliset koneistusvarat. Tässä vaiheessa mallinnuksessa tapahtui virhe ja yhdestä koneistettavasta kohdasta jäi koneistusvara mallintamatta. Koneistusvaran puuttuminen huomattiin vasta koneistuksen jälkeen, jolloin oli järkevintä jättää tämä virhe korjaamatta. Tästä virheestä otettiin opiksi, vaikkei kyseinen koneistusvara haitannut-

kaan parannellun laakerikilven toimintaa testimielessä. Vaikka parannetun laakerikilven malleja tutkittiin ja käytiin huolella läpi, olisi se pitänyt esitellä mekaaniselle suunnittelijalle ennen laakerikilven tilaamista.

Tulokset olivat positiiviset. Laakerikilven välityksellä oikosulkumoottori lämpeni tehokkaasti sisäpuolelta. Testaamisia ei ajan puutteen vuoksi viety pitemmälle tällä kertaa, mutta niitä olisi voitu jatkaa olosuhdekaapissa käyttäen lyhennettyä staattorirunkoa.

Ennako oletuksena oli, että parannellulla menetelmällä pystyttäisiin toteuttamaan lämmitys samalla tavoin kuin aikaisemmassakin menetelmässä, joten lämmitysvastuksien siirtäminen laakerikilpeen voisi olla täysin mahdollinen toteuttaa. Vaikka ennako-oletuksia konseptin toimivuudesta oli jo ennen tutkimuksen aloittamista, pystyttiin tutkimuksen etenemiseen suhtautumaan neutraalisti, jolloin ennako-oletukset eivät vaikuttaneet tutkimuksen kulkuun vaan auttoivat kehittämään konseptin toimivuutta.

Tutkimuksen aikana pyrittiin tuomaan esille avoimesti käytettävät tutkimusmenetelmät sekä saadut tulokset. Tutkimuksen tilaajalla sekä tutkimuksen tekijällä oli koko tutkimuksen ajan mahdollisuus vaikuttaa tutkimuksessa käytettäviin menetelmiin sekä tuoda esiin kehitysideoita. Tutkimustulokset raportoitiin mahdollisimman yksityiskohtaisesti ja selkeästi. Lisäksi tutkimuksen kulku pyrittiin avaamaan mahdollisimman yksityiskohtaisesti. Nämä seikat lisäävät paitsi tutkimuksen eettisyyttä myös sen luotettavuutta.

### **7.1 Suosituksia jatkotutkimuksiin**

Tutkimuksessa saatuja tietoja voidaan käyttää hyväksi uudensukupolven laakerikilpeä suunnitellessa, jolloin konseptin laakerikilven muotoilua voitaisiin parantella. Oletettavaa on, että tutkimuksen konseptia voitaisiin käyttää myös muissa sähkömoottoreissa samaan tarkoitukseen, kuin tässä konseptissa on käytetty.



Konseptia voidaan muokata muun muassa sähkömoottorin koon mukaan, joka tekee siitä entistä monipuolisemman.

Paranneltua laakerikilpeä pystyisi vielä kehittelemään lisää. Lämmitys urien pituutta voitaisiin korottaa, niin että ne olisivat vielä lähempänä staattorikämejä. Laakerikilven muotoja pystyttäisiin vielä paljon muokata, jolloin myös painoa ja valmistus kustannuksia voitaisiin tiputtaa. Laakerikilven tukirakenteista tehtiin yksinkertaiset, sillä tarkoituksena ei ollut tutkia muuta kuin lämmön jakautumista.

Työstä sai käytännön oppia koulusta opittuun teoriaan opinnäytetyön sekä tutkimuksen kulusta ja aikataulutuksesta. Taidot erilaisten ohjelmien ja laitteiden käytössä kehittyi, kun testauksissa käytetty lämpökameraa ja siihen tarkoitettu ohjelmaa käytettiin alkutesteissä sekä lopputesteissä.

Suoranaisia aikatauluja ei ollut ennen parannellun laakerikilven prototyypin tilaamista. Ennen laakerikilven tilaamista päätettiin, että työ olisi valmis kolme viikkoa tilaamisesta. Parannellun laakerikilven valmistuksessa menikin aikaa huomattavasti enemmän mitä oli suunniteltu. Tämän takia työn valmistuminen viivästyi, sillä laakerikilven valmistumisen viivästymisen lisäksi tuli muitakin aikataulua haittaavia tekijöitä.

## LÄHTEET

ABB. 2023. ABB Process performance motors. Viitattu 21.05.2023. <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors>

Ahoranta, J. 2015. Sähkötekniikka. Helsinki. Sanoma Pro.

Angus, H.T. 1976. Cast iron: psysical and engineering Properties. Englanti Frome. Lontoo. Butterworth & Co Ltd. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.puv.fi/lib/vamklibrary-ebooks/reader.action?docID=1837921&query=cast-iron>

Fluke. Mitä Ohmin laki tarkoittaa? Viitattu 21.05.2023. <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/sahko/mita-ohmin-laki-tarkoittaa>

Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Vantaa. Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Vantaa. Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.

Hämäläinen, M. 2020. Sähkömoottoreilta vaaditaan koko ajan parempaa hyötysuhdetta – koskee yhä pienempiä moottoreita. Viitattu 15.3.2023. Tekniikka & Talous. Verkko-lehti. Junttila, H. Helsinki. Alma Talent Oy. <https://www.tekniikkatalous-fi.ezproxy.puv.fi/uutiset/sahkomoottoreilta-vaaditaan-koko-ajan-parempaa-hyotysuhdetta-koskee-yha-pienempia-moottoreita/4fed3704-5680-4123-8fb4-cc1a96a44b44>

Hänninen, H, Karppinen, M, Leskelä, M & Pohjakallio, M. 2018. Tekniikan kemia. Keuruu. Helsinki. Edita Publishing Oy.

Kajander, R. 1987. Moottori- ja muuntajakäämitykset. Jyväskylä. Espoo. Sähköurakoitsijaliiton Koulutus ja Kustannus Oy.

Kangasluoma, M. 1979. Tutkimus- ja tuotekehityskäsikirja. Jyväskylä. Helsinki. Kustannus Oy Infopress.

Kortelainen, K. 2021. Alfred Nobel keksi dynamiitin vahingossa - 9 keksintöä, jotka olisivat kelvanneet myös suomalaisille. Viitattu 16.3.2023. Tekniikka & Talous. Verkko-lehti. Junttila, H. Helsinki. Alma Talent Oy. <https://www.tekniikkatalous-fi.ezproxy.puv.fi/uutiset/alfred-nobel-keksi-dynamiitin-vahingossa-9-keksintoa-jotka-olisivat-kelvanneet-myos-suomalaisille/f6b67084-90f6-45ff-ba7a-15dcffc92ae1>

Ksit, B, Szymczak-Graczyk, A & Pilch, R. 2022. Numerical Simulation of the Impact of Water Vapour and Moisture Blockers in Energy Diagnostics of Ventilated Partitions. Sveitsi. MPDI. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9698704/>

Mainio, T. 2022. Suuri sähkömoottori syö jopa 800 kiloa kuparilankaa - Oululainen konepaja erikoistui käämimiseen. Viitattu 15.3.2023. Tekniikka & Talous. Verkko-lehti. Junttila, H. Helsinki. Alma Talent Oy. <https://www-tekniikkatalous-fi.ezproxy.puv.fi/uutiset/suuri-sahkomoottori-syo-jopa-800-kiloa-kuparilankaa-oululainen-konepaja-erikoistui-kaamimiseen/226f34f6-c751-48b2-86ef-Oda35e1ba1ba>

Meskanen, S & Niini, E. 2023 Valuraudat. ValuAtlas. Valumateriaalit. Viitattu 17.04.2023. [https://www.valuatlas.fi/wp-content/uploads/2021/10/vtp\\_mat\\_valuraudat.pdf](https://www.valuatlas.fi/wp-content/uploads/2021/10/vtp_mat_valuraudat.pdf)

Mostafa Ghiaasiaan, S. 2008. Two-Phase Flow, Boiling and Condensation: In Conventional and Miniature Systems. New York. Cambridge University Press. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.puv.fi/lib/vamklibrary-ebooks/detail.action?docID=412816&query=condensation+AND+vapor>

Mäkinen, M.J.J. & Kallio, R. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Keuruu. Helsinki. Otava.

Tervola, J. 2022. Sähkömoottorien pahin vitsaus on laakerivika - Suomessa kehitetty tekoäly löytää viat, eikä se edes tarvitse suoraa anturointia. Viitattu 15.3.2023. Tekniikka & Talous. Verkko-lehti. Junttila, H. Helsinki. Alma Talent Oy. <https://www-tekniikkatalous-fi.ezproxy.puv.fi/uutiset/sahkomoottorien-pahin-vitsaus-on-laakerivika-suomessa-kehitetty-tekoaly-loytaa-viat-eika-se-edes-tarvitse-suoraa-anturointia/df963bec-201a-4dd5-9ff3-038e86ddc76c>

Seppälä, N. 2019. Vioittunut laakeri on yleisin syy koneiden rikkoutumiseen - Jyväskylän yliopiston väitöstutkimuksessa kehitettiin algoritmeja vierintälaakereiden kunnon valvontaan. Viitattu 16.3.2023. Tekniikka & Talous. Verkko-lehti. Junttila, H. Helsinki. Alma Talent Oy. <https://www-tekniikkatalous-fi.ezproxy.puv.fi/uutiset/vioittunut-laakeri-on-yleisin-syy-koneiden-rikkoutumiseen-jyvaskylan-yliopiston-vaitostutkimuksessa-kehitettiin-algoritmeja-vierintalaakereiden-kunnon-valvontaan/213169e4-8695-4612-b481-91936aa5bd6d>

Sinomas. 2023. Motor Space Heater. Viitattu 21.05.2023. <https://www.flexheaters.com/motor-space-heater/>

STEK ry (Sähkötekniikan ja energiatehokkuuden edistyskeskus). Sähkölaitteiden käyttö ulkona. Viitattu 21.05.2023. <https://stek.fi/sahkoturvallisuus/vaaran-paikat/sahkolaitteiden-kaytto-ulkona/>