

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Heikki Mansikkamäki

**ELINTARVIKETEOLLISUUDEN SILEÄRUNKOISEN SÄHKÖMOOTTORIN  
JÄÄHDYTYKSEN VAPAALLA KONVEKTIOLLA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Vaasassa  
03.05.2016

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaaja

Dosentti Jere Kolehmainen

## ALKULAUSE

Tämä Diplomityö on tehty Vaasan ABB Oy:n Motors and generators- yksikköön. Työ on liittynyt elintarviketeollisuuden tarkoitetun sileärunkoisen moottorin tuotekehitykseen. Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat jollain tapaa auttaneet työni eri vaiheissa. Erityiskiitokset ABB:n henkilökunnasta ansaitsevat työni ohjaaja Dosentti Jere Kolehmainen ja DI Tero Käsäkangas. He molemmat ovat neuvoneet ja opastaneet minua työhöni liittyvissä kysymyksissä ja auttaneet käytännön asioissa. Lisäksi haluan kiittää koekentän henkilökuntaa prototyypimoottorin mittauksista.

Vaasan yliopiston henkilökunnasta kiitokset ansaitsee työni valvoja Timo Vekara. Hän on antanut työn sisältöön ja ulkoasuun liittyen asiantuntevia kommentteja, jotka ovat vaikuttaneet työni laatuun ja luottavuuteen.

Haluan myös kiittää vaimoani ja ystäviäni, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet työn teon aikana.

Vaasassa 03.05.2016

Heikki Mansikkamäki

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	6
ABSTRACT	7
1 JOHDANTO	8
2 SÄHKÖMOOTTORI ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA	10
2.1 Elintarviketeollisuuden vaatimukset	10
2.2 Sileärunkoisen moottorin rakenne	11
2.3 Sähkömoottorin häviöt	13
3 MOOTTORIN JÄÄHTYMINEN JA LÄMMÖNSIIRTO	15
3.1 Lämmön siirtyminen johtumalla	15
3.2 Lämmön siirtyminen konvektiolla	16
3.3 Lämmön siirtyminen säteilemällä	23
3.4 Moottorin laskennallinen jäähtyminen	24
4 SILEÄRUNKOISEN MOOTTORIN KAKSIULOTTEINEN SIMULOINTI	27
4.1 Simuloitavat kappaleet	28
4.2 Lämmönsiirron määrittäminen simulointimallissa	29
4.3 Simulointitulokset	33
5 SILEÄRUNKOISEN MOOTTORIN KOLMIULOTTEINEN SIMULOINTI	38
5.1 Simuloitavat kappaleet	38
5.2 Lämmönsiirron määrittäminen simulointimallissa	40
5.3 Simulointitulokset	42
5.4 Lämpenemän kannalta optimaalinen runkorakenne	47
6 MOOTTORIN LÄMPENEMÄN MITTAUS JA VERTAILU ERI MENETELMIEN KESKEN	50
6.1 Moottorin lämpenemäajot	50
6.2 Eri laskenta- ja simulointimenetelmillä saatujen tuloksien vertailu mittaustuloksiin	55
6.3 Mittausten jälkeiset lisäsimuloinnit	57
6.4 Ohjeita ja ajatuksia sileärunkoisen moottorin suunnittelua varten	66
7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	69
LÄHDELUETTELO	72

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Kreikkalaiset symbolit*

$\alpha$	terminen diffuusiokerroin
$\beta$	lämpölaajenemiskerroin
$\varepsilon$	emissiivisyys
$\mu$	kappaleen dynaaminen viskositeetti
$\sigma$	Stefan-Boltzmanin vakio

*Muut symbolit*

$A$	pinta-ala
$c_p$	fluidin ominaislämpökapasiteetti
$g$	gravitaatiovoima
$Gr_L$	Grashofin luku
$\bar{h}$	konvektiokerroin
$K$	konvektiiviseen lämmönsiirtoon liittyvä kerroin, joka on riippuvainen kappaleen geometriasta ja asennosta ohivirtaavaan fluidiin nähden
$k$	materiaalin lämmönjohtavuus
$L$	kappaleen karakteristinen pituus eli pituus virtaussuunnassa
$l$	putkimaisen kappaleen pituus
$\overline{Nu}_D$	Nusseltin luku
$P$	paine
$Pr$	Prandtlin luku
$\dot{Q}$	lämpöteho

$\dot{Q}_{\text{rad}}$	säteilemällä siirtyvä lämpöteho
$Ra_D$	Raleighin luku
$T$	lämpötila
$T_{\infty}$	fluidin lämpötila pisteessä jossa jäähdytettävä kappale ei vaikuta siihen
$T_{\text{amb}}$	ympäristön keskimääräinen lämpötila laskettaessa säteilemällä siirtyvää lämpöä
$T_f$	fluidin lämpötila juuri jäähdytettävän kappaleen pinnalla
$T_{\text{fluid}}$	fluidin lämpötila
$T_s$	pinnan lämpötila
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti
$\Delta T$	lämpötilaero
$\Delta T$	kappaleen paksuus
<i>Lyhenteet</i>	
D-pää	Moottorin pääty, jossa on pyörittävä akselin pää. Kirjain D tulee englanninkielisestä termistä drive end.
N-pää	Moottorin pääty, jossa ei ole akselin pyörittävää päätä. Kirjain N tulee englanninkielisestä termistä non-drive end.

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Heikki Mansikkamäki
<b>Diplomityön nimi:</b>	Elintarviketeollisuuden sileärunkoisen sähkömoottorin jäähdytys vapaalla konvektiolla
<b>Valvoja:</b>	Professori Timo Vekara
<b>Ohjaaja:</b>	Dosentti Jere Kolehmainen
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Oppiaine:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2009
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2016

**Sivumäärä: 74**

---

**TIIVISTELMÄ**

Elintarviketeollisuudessa käytettävän laitteiston yksi tärkeä ominaisuus on helppo puhdistettavuus, jotta voidaan varmistaa tuotantolinjojen puhtaus. Perinteinen moottorin runkorakenne, jossa on esimerkiksi jäähdytysripoja ja tuuletinsuoja, on vaikea puhdistaa ja koloihin voi kerääntyä likaa ja bakteereita. ABB on kehittänyt elintarviketeollisuuteen tarkoitettua, helposti puhdistettavan, sileärunkoisen moottorin ilman tuuletinta. Tässä työssä tutkitaan sen jäähtymistä vapaalla konvektiolla eli ilman ulkoista jäähdytyslaitetta.

Moottorin jäähtymistä tutkitaan laskennallisin menetelmin ja simuloimalla sitä Comsol Multiphysics® -ohjelmalla, kaksi- ja kolmiulotteisilla malleilla. Simuloinneilla pyritään määrittämään moottorin jäähtyminen riittävällä tarkkuudella. Moottoria simuloidaan eri ympäristön lämpötiloissa välillä -20–40 °C. Eri simulointimalleilla on tarkoitus löytää laskenta-ajan kannalta mahdollisimman nopea ratkaisu, jolla vielä saadaan luotettavia tuloksia.

Simulointituloksia ja mittaustuloksia verrattaessa huomattiin, että simuloinnit eroavat todellisesta tilanteesta. Todellisessa tilanteessa moottorin metallinen tukirakenne tehostaa jäähtymistä ja konvektiokerroin on pienempi kuin kirjallisuuden perusteella voisi olettaa. Lisäksi mitatut häviöt olivat suuremmat kuin lasketut häviöt. Mittausten jälkeen tehdyissä simuloinneissa moottorin tukirakenne määritettiin vastaamaan koekentällä käytettyä tukirakennetta ja mallin häviöt muutettiin vastaamaan mittaustuloksia ja määritettiin konvektiokerroin niin, että simuloitu lämpenemä vastasi mitattua lämpenemää.

Tutkimusongelman kannalta oli tärkeää selvittää, mitkä asiat vaikuttavat sileärunkoisen moottorin jäähtymiseen. Yksi merkittävä tekijä oli moottorin tukirakenne ja sen vuoksi sileärunkoisen moottorin simuloinnit on suositeltavaa tehdä kolmiulotteisina. Moottorin sileä ja pyöreä runko on konvektiivisen lämmönsiirron kannalta huono ratkaisu, mutta se vastaa elintarviketeollisuuden asettamiin vaatimuksiin hygienian osalta. Työn tuloksena määritetyllä lämmönsiirtokertoimella ja tukirakenteen mahdollisimman tarkalla mallintamisella saadaan moottorin lämpenemä määritettyä riittävällä tarkkuudella.

---

**AVAINSANAT:** Sähkömoottori, elintarviketeollisuus, vapaa konvektio, simulointi

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology****Author:**

Heikki Mansikkamäki

**Topic of the Thesis:**

Cooling of the smooth framed electric motor in the food and beverage industry by free convection

**Supervisor:**

Professor Timo Vekara

**Instructor:**

Dosent Jere Kolehmainen

**Degree:**

Master of Science in Technology

**Major of Subject:**

Electrical Technology

**Year of Entering the University:** 2009**Year of Completing the Thesis:** 2016**Pages:** 74

---

**ABSTRACT**

Food and beverage industry has certain needs for the used equipment. One of the most important aspects for the used machines is easy cleanability to ensure purity in production lines. Traditional motor frames with fan cover and ribbed coolers are difficult to clean and they can gather dirt and bacteria. ABB has developed smooth framed electric motor without fan and with easy cleanability directly to the food and beverage industry. This thesis investigates the cooling of the smooth framed motor by free convection so there are no cooling equipment for the motor.

Cooling of the motor is studied by calculations and simulating the cooling models in 2D and 3D with Comsol Multiphysics<sup>®</sup> program. Main goal of the simulations was to define cooling of the motors with adequate accuracy. Simulations are done for the ambient temperatures between -20–40 °C. Reason for different simulation models is to find optimized solution calculation time-wise with reliable results.

Simulation results were compared to measurements of the prototype motor and they had noticeable difference. Supporting structure, where motor was attached to, enhances the cooling of the motor, but still the convection coefficient for the motor is smaller than estimations based on the literature in this field of research. In addition, measured losses were higher than calculated values. New simulations were carried out with matching conditions to the measurements and in these simulations convection coefficient was defined by matching simulated temperature rise to measured values.

It was important for the research problem to find out different aspects affecting to the cooling of the motor. One significant factor was the supporting structure of the motor and because of that, it's recommended to perform following simulations using 3D-models. Smooth and circular frame is unoptimal solution for the cooling, but it fulfils standards of hygiene in the food and beverage industry. With the defined convection coefficient and accurate modelling of the support structure, it is possible to define temperate rise with adequate accuracy.

---

**KEYWORDS:** Electric motor, food and beverage industry, free convection, simulation

## 1 JOHDANTO

Elintarviketeollisuudessa on monia haasteita perinteiselle sähkömoottorin rungolle, jossa on yleensä jäähdytysripoja, liitäntäkotelot ja tuuletinsuoja. Hygienian kannalta on tärkeää, että laite on helposti puhdistettavissa ja sen rakenteissa ei ole kohtia, jotka keräävät likaa. Lisäksi moottorin tuuletin voi levittää likaa ja bakteereja ja tuuletinsuojan alle voi jäädä likaa. ABB on suunnitellut elintarviketeollisuuteen sileärunkoisen moottorin ilman ulkoista tuuletinta, jotta moottorin runko on mahdollisimman hygieeninen. Rungon materiaalina on käytetty kupariyhdistettä, jolla on todettu olevan antibakteerisia ominaisuuksia. Uuden moottorin lämpenemä on määritettävä, jotta voidaan varmistaa kuinka paljon moottoria voidaan kuormittaa ilman, että moottori lämpenee liiaksi.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia elintarviketeollisuuteen tarkoitettua sileärunkoisen sähkömoottorin jäähtymistä vapaalla konvektiolla eli ilman tuuletinta. Luvussa 2 käsitellään elintarviketeollisuuden asettamia haasteita sähkömoottoreille ja ABB:n sileärunkoisen moottorin rakennetta. Luvussa on myös käsitelty moottorin kotelointiluokkaa ja sille vaadittavaa koestusta.

Moottorin sähköisen suunnittelun kannalta merkittävä tekijä on moottorin lämpenemä. Se määrittää kuinka paljon moottoria voidaan turvallisesti kuormittaa ilman, että moottori lämpenee liiaksi. Sileärunkoinen moottori jäähtyy pääasiassa vapaalla konvektiolla, mutta muut lämmönsiirtymismuodot on hyvä ottaa huomioon. Luvussa 3 tarkastellaankin lämmönsiirtymismuotoja, joista konvektion osuuteen perehdytään tarkemmin. Vapaan konvektion laskenta perustuu kokeellisesti johdettuihin korrelaatiokaavoihin ja kirjallisuudessa on esitetty erilaisia tapoja määrittää lämmönsiirtoa vapaalla konvektiolla. Moottorin jäähtymistä vapaalla konvektiolla lasketaan eri korrelaatiokaavoilla.

Tämän työn pääpaino on tutkia moottorin lämpenemää Comsol Multiphysics<sup>®</sup> -ohjelmalla. Luvussa 4 ja 5 moottorista tehdään kaksi- ja kolmiulotteisia malleja ja pyritään löytämään mahdollisimman yksinkertainen tapa, jolla lämpenemän saa määritettyä tarkasti mahdollisimman lyhyellä laskenta-ajalla. Kaksiulotteisten mallien simulointiajan pituus tämän kaltaisissa simuloinneissa on joitain kymmeniä sekunteja ja kolmiulotteisten

mallien laskenta kestää joitakin tunteja. Tämän lisäksi simuloimalla tutkitaan moottorin rungon pituuden kasvattamisen vaikutusta moottorin jäähtymiseen staattorin koon pysyessä ennallaan.

Simulointien lisäksi moottorista tehtiin prototyyppi, jonka lämpenemä mitattiin. Luvussa 6 esitetään moottorin mittaustulokset ja verrataan niitä simuloituihin ja laskennallisiin tuloksiin. Tämän perusteella pyritään löytämään menetelmä, jolla lämpenemä vastaa mitattuja tuloksia, joko laskemalla tai simuloimalla. Lopuksi kappaleessa esitetään suosituksia ja asioita, jotka seuraavan prototyypin suunnittelussa on hyvä ottaa huomioon.

Työn tulokset ja johtopäätökset on esitelty luvussa 7. Siinä on lisäksi esitetty jatkotutkimusaiheita sileärunkoisiin moottoreihin liittyen. Mittaustulosten perusteella tehdyssä simulointimallissa konvektiokerroin oli pienempi kuin kirjallisuudessa annetut arvot vapaalle konvektiolle eli moottori jäähdyi huonommin kuin aluksi arveltiin. Mittausten jälkeisten lisäsimulointien tuloksena saatiin määritettyä konvektiokertoimelle arvo, jolla saadaan simuloitu tulos vastaamaan mittaustuloksia. Sitä voidaan käyttää jatkossa alkuarvona mallinnettaessa sileärunkoisia moottoreita. Mikäli runkokoko muuttuu merkittävästi, on suositeltavaa varmistaa mittauksilla ja simuloinneilla konvektiokertoimen arvo.

## 2 SÄHKÖMOOTTORI ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA

Tässä luvussa käsitellään elintarviketeollisuuden aiheuttamia erityisiä haasteita tuotantolinjoilla käytettäville koneille, joihin myös sähkömoottori kuuluu. Moottorin tulee olla helposti puhdistettavissa ja se ei saa kerätä likaa. Parhaimmassa tapauksessa moottorin voisi pestä painepesurilla, mikä ei onnistu käytännössä perinteisellä runkorakenteella. Tästä syystä moottorin runko on sileä, lieriön muotoinen kappale ilman ulkoista tuuletinta ja moottorin jäähdytysmenetelmänä toimii vapaa konvektio. Tässä luvussa käsitellään myös sähkömoottorin häviöitä, koska niiden ymmärtäminen on oleellista simulointimalia suunniteltaessa. Käytettävä moottori on tyypiltään induktiomoottori.

### 2.1 Elintarviketeollisuuden vaatimukset

Elintarviketeollisuudessa käytettävien laitteiden suunnittelussa on kiinnitettävä erityistä huomiota niiden hygieenisyyteen. Huonon hygienian tunnusmerkkejä ovat rakenteet, jotka keräävät likaa ja jotka on hankala pestä. Mikäli laitteen pesu on hankalaa, se jää monesti puhdistamatta kunnolla. Mikäli pinnat ovat huokoisia, kuluneita tai epätasaisia, ne keräävät likaa ja niiden puhdistaminen on hankalaa ja työlästä. Moottorin kohdalla on myös tärkeää sijoittaa se niin, että siitä ei siirry mikrobeja laitteiden muille pinnoille. (VTT 2002: 36.) Laitteiden pintojen on lisäksi kestävä pesun aikana painetta ja materiaalivalinnoissa on otettava huomioon, että käytettyjen pesuaineiden happamuus, emäksisyys tai klooripitoisuus eivät saa aiheuta koneiden pinnalla kemiallisia reaktioita. Joissain tapauksissa koneet pestään sekä happamalla että emäksisellä pesuaineella. Käytetty pesuliuos ei myöskään saa aiheuttaa korroosiota laitteen pinnoissa. (VTT 2002: 108–109.)

Helpon puhdistettavuuden lisäksi laitesuunnittelussa on hyvä ottaa huomioon moottorin pinnan materiaali. Pinnoittamattomien kupariyhdisteiden on todettu tappavan niiden pinnalla elävät bakteerit tehokkaasti. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto on luettellonut useita kupariyhdisteitä, jotka täyttävät testivaatimuksen, jossa bakteerikannasta 90 % tulee kuolla yhdisteen pinnalla vuorokaudessa (United States environmental protection

agency 2009; International copper association 2015).

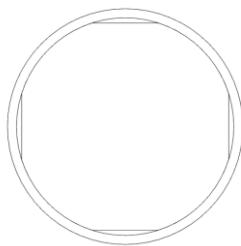
## 2.2 Sileärunkoisen moottorin rakenne

ABB:n uuden elintarviketeollisuuteen tarkoitetun moottorin suunnittelussa on otettu huomioon pinnan pestävyys, pesuaineiden kestoisuus ja pinnan tasaisuus. Moottorin runko on ulkopinnaltaan sileä lieriömäinen kappale ilman minkäänlaisia jäähdytysripoja. Rungon ulkohalkaisija on 182 mm ja reunan paksuus 7 mm. Moottorin rungon pituus on 320 mm ja siihen tulee kumpaankin pätyyn sentin paksuiset päätylevvyt eli moottorin kokonaispituus on 340 mm. Antibakteeristen ominaisuuksien takia rungon materiaalina on käytetty kupariyhdistettä. ABB:n moottorin runko on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Valmis moottorin runko.

Moottorin staattori on rungossa kiinni kuvassa 2 esitetyllä tavalla. Staattorin ulkoreunan muuten pyöreässä muodossa on neljä viistettä, jotka eivät ole suoraan kosketuksissa moottorin runkoon. Rungon ja staattorin välinen etäisyys on viisteiden leveimmässä kohdassa 4 millimetriä. Kuvassa 3 staattori on asennettu moottorin sisälle.



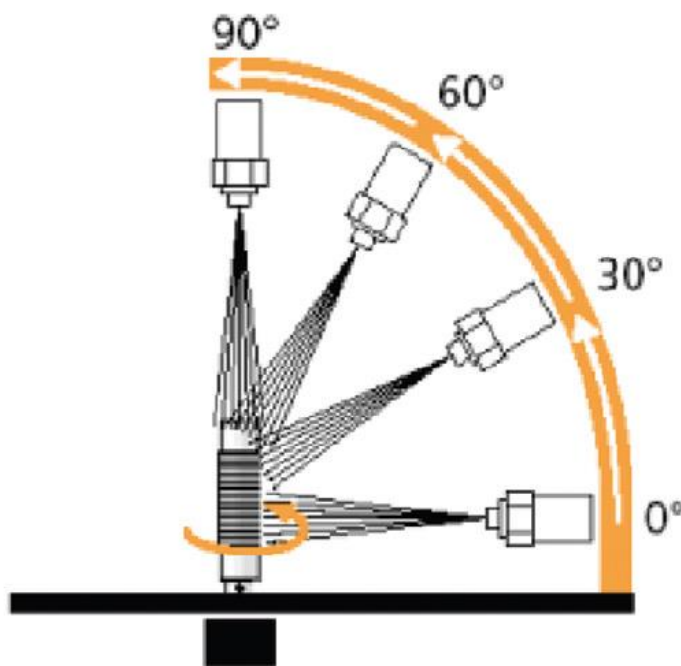
**Kuva 2.** Periaatteellinen moottorin ja staattorin rakenne. Staattorin ja rungon väliin jäävä rako on leveimmillään 4 mm.



**Kuva 3.** Staattori asennettuna moottorin rungon sisälle.

Moottorin koteloitiluokka on IP69K, joka on määritetty DIN40050-9 -standardissa, joka on suunniteltu alun perin ajoneuvo-standardiksi. Luokan tunnuksen ensimmäinen numero 6 tarkoittaa, että moottori on täysin pölyltä suojattu, toinen numero 9 sitä, että laitteen tulee kestää lähietäisyydeltä tuleva korkeapaineinen huuhtelu ja kirjain K tunnuksen lopussa tarkoittaa huuhteluveden korkeaa lämpötilaa. Jotta jokin laite saa IP69K-luokituksen, tulee sen kestää paineeltaan 100 bar oleva vesisuihku, kun veden virtausnopeus on 15 l/min ja veden lämpötila 80 °C. Koestuksen aikana suutin on 10 cm etäisyydellä kappaleesta, johon suihkutetaan eri kulmista vettä 30 sekunnin ajan. Tämän 30 sekunnin jakson aikana suihkutetaan vettä siis ainoastaan yhdestä kulmasta samalla, kun koestettava

laite pyörii nopeudella 5 rpm. Vesisuihku suunnataan laitteeseen kulmista 0°, 30°, 60° ja 90°. (ABB 2011.) Koestusta on havainnollistettu kuvassa 4. Käytännössä koteloituluokka IP69K mahdollistaa koko moottorin pesemisen painepesurilla, minkä on tarkoitus nopeuttaa ja helpottaa puhdistusprosessia.



**Kuva 4.** IP69K-luokituksen vaadittava koetus (ABB 2011).

Jäähdytyslaitteet kuuluvat elintarviketeollisuudessa hygienian kannalta ongelmallisiin laitteisiin. Niiden aiheuttama ilmavirta saattaa levittää likaa ja bakteereita. Tämän takia ABB:n uudessa moottorissa ei ole lainkaan ulkoista jäähdytinlaitetta, joten moottori jäähtyy vapaalla konvektiolla. Moottorin jäähtymistä ja lämmönsiirtotapoja on käsitelty tarkemmin luvussa 3.

### 2.3 Sähkömoottorin häviöt

Sähkömoottorin suunnittelussa ja mitoituksessa on tärkeää ottaa huomioon moottorin riittävä jäähtyminen, koska moottorin lämpenemä on merkittävä tekijä siinä, kuinka suurella

teholla moottoria voi kuormittaa. Lämmönsiirto ja ilman virtaus saattavat olla jopa vaikeammin määritettävissä kuin moottorin sähkömagneettiset ominaisuudet. Sähkömoottorin suunnittelussa ja lämpenemän mitoituksessa suositellaan yleensä käytettäväksi vanhoja mittaustuloksia ja täysin uusien moottorien tapauksessa on suositeltavaa mallintaa moottoria ja vielä varmistettava mallin oikeellisuus prototyypin avulla. (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcová 2009: 457.) Tämän työn kohteena oleva elintarviketeollisuuden tarkoitettu moottori sijoittuu suunnittelun kannalta jonnekin näiden välimaastoon: moottorin sähköinen toteutus on jo ennestään tuttu, mutta runkorakenne on täysin erilainen, joten lämpenemä muuttuu.

Käytetty moottori on tyypiltään induktiomoottori. Sen häviöt voidaan jakaa kupari-, rauta-, mekaanisiin ja lisähäviöihin ja osa näistä häviöistä voidaan edelleen jakaa osiin. Kuparihäviöt aiheutuvat virran muuttuessa staattorin ja roottorin käämityksien resistanssissa lämmöksi. Rautahäviöt voidaan jakaa pyörrevirta- ja hystereesihäviöihin. Mekaaniset häviöt voidaan jakaa laakerien ja ilmanvastuksen aiheuttamiin häviöihin. Myös tuuletin häviöt lasketaan mekaanisiksi häviöiksi. Lisähäviöitä ovat kaikki sähkömagneettiset häviöt, jotka eivät kuulu kupari- tai rautahäviöihin. (Pyrhönen ym. 2008: 457–462.)

Tässä työssä moottorille suunniteltu teho on 1,5 kW ja sitä voidaan pitää moottorin nimellistehona. Moottorin sähköinen rakenne on entuudestaan tuttu ja sen kokonaishäviöt pystytään määrittämään ABB:n laskentatyökalulla Adept -ohjelmalla. Lasketut moottorin häviöt olivat: staattorin kuparihäviöt 64,4 W, roottorin kuparihäviöt 23,9 W, rautahäviöt 49,77 W, mekaaniset häviöt ja lisähäviöt 32,84 W. Moottorin lasketut häviöt olivat siis yhteensä 186,6 W. Yksinkertaistetuissa lämpöteknisissä simulointimalleissa häviöitä ei eritellä rakenteellisesti, vaan ne kaikki sijoitetaan lämpötehoksi staattorin pinnalle, joten yksittäisten häviöiden suuruuksilla ja suhteilla ei ole simuloinnin kannalta merkitystä. Käytetyllä mallilla pitäisi kuitenkin saada riittävä tarkkuus. Lisäksi staattorin häviöt ovat merkittävässä osassa moottorin lämpenemästä, koska pienillä induktiomootoreilla suurin osa häviöistä syntyy todellisuudessa staattorissa. Lassi Aarniovuori mainitsee väitöskirjassaan, että noin 60 % häviöistä syntyy staattorissa, teholtaan alle kilowatin induktiomootoreilla ja moottorikoon kasvaessa tämä osuus pienenee (2010: 43).

### 3 MOOTTORIN JÄÄHTYMINEN JA LÄMMÖNSIIRTO

Tässä luvussa tarkastellaan moottorin rungon jäähtymistä ilman ulkoisia tuulettimia sekä lämmönsiirtoa yleisesti. Lämpöä siirtyy moottorissa osien välillä ja moottorista ilmaan kolmella eri tavalla: konvektiolla, johtumalla ja säteilemällä. Kaikki kolme eri lämmönsiirtymismuotoa vaikuttavat moottorin loppulämpenemään. Todellisuudessa vapaata konvektiota tapahtuu moottorin rungon ulkopinnalla, säteilyä tapahtuu moottorin ulkopinnalla ja mahdollisesti moottorin staattorin ja rungon välissä olevissa raoissa. Johtumista tapahtuu moottorin staattorin ja rungon välillä. Kaikille lämmönsiirtymismuodoille on yhteistä se, että ne vaativat lämpötilaeron, jotta lämmönsiirtymistä voi tapahtua. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta alhaisempaan lämpötilaan. (Cengel & Boles 2011: 92.) Moottorin lämpenemä lasketaan esitetyillä yhtälöillä kahdella eri tavalla, jotta voidaan verrata niistä saatuja tuloksia mittaustuloksiin ja saada siten luotettava arvio.

#### 3.1 Lämmön siirtyminen johtumalla

Johtumalla tapahtuvassa lämmönsiirrossa molekyylien energia siirtyy molekyylien välillä niin, että energia siirtyy enemmän energiaa varastoinneilta molekyyleiltä vähemmän energiaa varastoinneille molekyyleille, kun ne liikkuvat satunnaisesti toistensa suhteen. Johtumista tapahtuu kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa. Kiinteissä aineissa molekyyli-rakenteet ovat jäykempiä ja lämpö siirtyy molekyylien värähdellessä toisiinsa nähdän tai vapaiden elektronien välityksellä. Tasaisen levyn läpi johtumalla siirtyvä lämpöteho  $\dot{Q}$  saadaan laskettua yhtälöstä

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (1)$$

missä on siirtynyt lämpöteho,  $k$  on pinnan materiaalin lämmönjohtavuus,  $A$  on levyn pinta-ala,  $\Delta T$  on lämpötilaero levyn kuumemman ja kylmemmän pinnan välillä ja  $\Delta x$  on levyn paksuus. (Cengel & Boles 2011: 92.) Johtumisen tarkka laskennallinen määrittämi-

nen onnistuu vain, mikäli tiedetään pisteiden välinen lämpötilaero. Tässä työssä kappaleen lämpötiloja on etukäteen vaikeaa arvioida. Moottorin tukirakenteen kautta tapahtuva johtuminen tehostaa kuitenkin lämmönsiirtoa. Tukirakenteen materiaali vaikuttaa siihen, kuinka paljon lämpöä siirtyy.

### 3.2 Lämmön siirtyminen konvektiolla

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä kiinteästä pinnasta ohivirtaavaan kaasuun tai nesteeseen, joista käytetään lämpötekniikassa yhteisnimitystä fluidi. Konvektiivisessa lämmönsiirrossa lämpö siirtyy fluidissa ja rajapinnassa vierekkäisten molekyylien välillä johtumalla. Konvektiossa yhdistyvätkin fluidin virtaus ja sen avulla tapahtuva lämmönsiirto sekä johtumalla tapahtuva lämmönsiirto. Konvektio voi olla joko pakotettua tai vapaata. Pakotetussa konvektiossa fluidin virtauksen saa aikaan jokin ulkoinen tekijä, kuten tuuletin tai pumppu. Vapaassa konvektiossa fluidin virtauksen saa aikaan fluidin lämpenemisen aikaansaama tiheyden muutos. Kun vapaalla konvektiolla jäähdytetään jotain kappaletta, sen lähellä oleva fluidi lämpenee ja lämpölaajenemisen seurauksena sen tiheys pienenee, jolloin fluidi nousee ylöspäin ja tilalle tulee uutta viileämpää ilmaa tai nestettä. Yksi virtausnopeuteen ja sitä kautta jäähdytystehoon vaikuttava tekijä on siis fluidin ja jäähdytettävän kappaleen lämpötilaero. Mitä suurempi lämpötilaero on, sitä suurempi virtausnopeus on. (Cengel & Boles 2011: 94.)

Konvektiiviseen lämmönsiirtoon vaikuttaa myös fluidin ja kappaleen välinen kitka. Aina kun aineet liikkuvat toistensa suhteen, syntyy niiden välille liikettä vastustava kitkavoima, joka hidastaa fluidin virtausnopeutta. Toinen merkittävä asia on virtauksen laminaarisuus tai turbulenttisuus. Laminaarinen virtaus tarkoittaa sitä, että fluidi siirtyy virtaviivaista reittiä ilman pyörteitä. Turbulentissa virtauksessa ilma pyörteilee liikkuessaan ja jäähdytysteho paranee. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015b; Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine: 359–360.)

Konvektiivisen lämmönsiirron määrittäminen matemaattisesti on varsin monimutkaista. Tästä johtuen konvektiivisen lämmönsiirron laskemisessa käytetään käytännön kokeista

saatuja korrelaatiokaavoja, joiden välillä on eri tutkijoilla ja tutkimuksissa eroja. Kaavat antavat ainoastaan suuntaa antavia tuloksia ja tuloksissa saattaa olla huomattavia virheitä, jotka saattavat johtua esimerkiksi koevirheistä, pinnan karheudesta tai geometrian poikkeamista, joita kaavat eivät ota huomioon. (Fagerholm 1986: 270.) Vapaan konvektion lämmönsiirtokertoimelle kaasuilla onkin alan kirjallisuudessa määritetty laaja vaihteluväli 2–25 W/m<sup>2</sup>K (Cengel 2002: 26).

Laskennallinen konvektion avulla siirtynyt lämpöteho voidaan määrittää monella tapaa. Seuraavassa esitetään yksinkertaiset korrelaatiokaavat, joilla siirtynyt lämpöteho voidaan laskea. Jotta varsinainen siirtynyt lämpöteho voidaan määrittää, pitää ensin laskea konvektiokerroin  $\bar{h}$ , joka saadaan laskettua yhtälöstä

$$\bar{h} = K \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

missä  $K$  on kerroin, jonka arvo riippuu kappaleen geometriasta ja asennosta fluidin virtaukseen nähden,  $\Delta T$  on lämpötila pinnan ja fluidin välillä ja  $L$  on kappaleen karakteristinen pituus. Konvektiokerrointa merkitään myös symbolilla  $\alpha$ . (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015b.) Karakteristinen pituudella  $L$  tarkoitetaan sylinterimäisessä kappaleessa sen halkaisijaa. Vaakasuoran sylinterin tapauksessa, joka on kohtisuorassa fluidin virtaukseen nähden, käytetään kertoimelle  $K$  arvoa 1,32. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015a; Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2015b.)

Konvektiokertoimen avulla saadaan laskettua varsinainen siirretty lämpöteho yhtälöllä

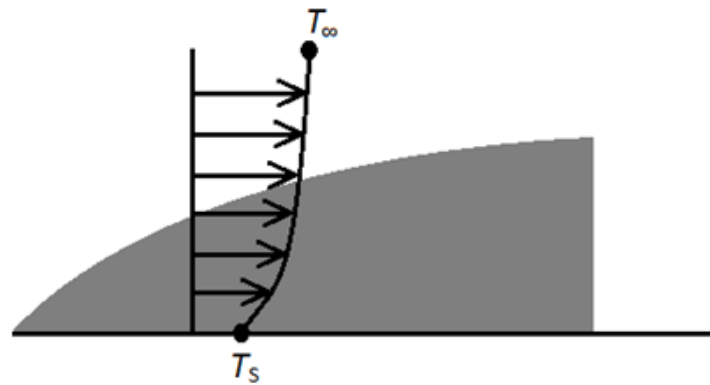
$$\dot{Q} = \bar{h}A(T_s - T_{\text{fluid}}), \quad (3)$$

missä  $\dot{Q}$  on siirtynyt lämpöteho,  $\bar{h}$  on konvektiokerroin,  $A$  on pinta-ala,  $T_s$  on kappaleen pinnan lämpötila ja  $T_{\text{fluid}}$  on fluidin lämpötila.

Konvektiivista lämmönsiirtoa ja sen laskemista varten on johdettu erilaisia korrelaatiokaavoja, jotka pyrkivät ottamaan tarkemmin huomioon konvektiiviseen lämmönsiirtoon vaikuttavat asiat. Korrelaatiokaavoja varten on määritetty erillisiä lukuja, joille on

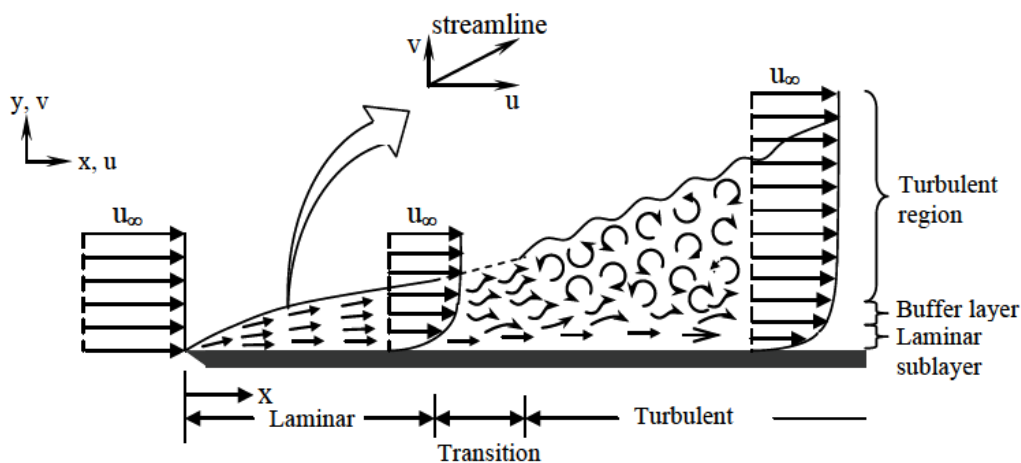
yhteistä se, että ne ovat dimensiottomia eli suure ei kerro onko tarkasteltava tilanne kaksi- tai kolmiulotteinen. Tällä helpotetaan korrelaatiokaavoilla laskentaa. Näitä suureita ovat Nusseltin, Reynoldsin, Rayleighin, Grashofin ja Prandtlin luku. (Fagerholm 1986: 270–274; Incropera ym. 2007: 359–360, 371, 374, 569–572.) Kaavoissa, jotka käyttävät näitä lukuja, otetaan tarkemmin huomioon eri osa-alueet, jotka vaikuttavat konvektiiviseen lämmönsiirtoon. Vapaan konvektion tapauksessa näistä ei käytetä Reynoldsin lukua, koska sen määrittämiseksi tulisi tietää etukäteen fluidin virtausnopeus. Tämän työn kannalta Reynoldsin luvusta tarvitsee vain tietää, että se kuvaa hitausvoiman ja viskoosin voiman suhdetta. Käytännössä se siis kertoo, onko virtaus laminaarista tai turbulentista (Incropera ym. 2007: 359–360). Loppuluvussa määritetään kaavat korrelaatiokaavoissa käytetyille suureille, kun sylinterimäistä kappaletta jäähdytetään vapaalla konvektiolla.

Aloitetaan suureiden määrittely Prandtlin luvusta. Prandtlin lukuun liittyvät oleellisesti käsitteet terminen rajakerros ja nopeusrajakerros. Terminen rajakerros on jäähdytettävän kappaleen pinnalla olevassa fluidissa oleva kerros, jossa lämmön siirto tapahtuu pinnan normaalin suuntaisesti. Kun fluidi virtaa jäähdytettävän kappaleen yli, voidaan ajatella, että se kerros fluidista, joka koskee jäähdytettävän kappaleen pintaa, lämpenee pinnan lämpötilaan. Tästä kerroksesta lämpö siirtyy aina seuraavaan kerrokseen fluidissa. Tällöin jäähdytettävän kappaleen pinnalla virtaavaan ilmaan muodostuu lämpöprofiili, jossa lämpötila vaihtuu pinnan lämpötilasta  $T_s$  ympäristössä olevaan lämpötilaan  $T_\infty$ , johon kappaleen pinnan lämpötila ei enää vaikuta. Termisen rajakerros kasvaa fluidin virtauksen suunnassa (Cengel 2002: 341.) Terminen rajakerros on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Termisen rajakerros suoran kappaleen pinnalla. Nuolilla havainnollistetaan ilman virtaussuuntaa. Perustuu lähteen (Cengel 2002: 341) kuvaan.

Nopeusrajakerros muodostuu jäähdytettävän kappaleen pinnalle sen virtauksen suuntaisesti samalla tapaa kuin termisen rajakerros. Kappaleen pinnalla oleva fluidikerros ei liiku virtauksen suuntaisesti ja lämpö siirtyy siihen johtamalla. Kitka fluidissa hidastaa myös seuraavaa kerrosta ja tämän seurauksena alkaa muodostua pyörteitä eli virtaus muuttuu turbulenteiksi, mikäli fluidi virtaa riittävän pitkään kappaleen pinnalla. Pyörteet tehostavat lämmönsiirtoa fluidissa ja sitä kautta myös lämmönsiirtoa kappaleesta fluidiin. Kuitenkin aivan kappaleen pinnan läheisyydessä virtaus pysyy aina laminaarisena. (Cengel 2002: 339–341; Sayma 2009: 22.)



**Kuva 6.** Nopeusrajakerros jäähdytettävän kappaleen pinnalla. Virtaus on aluksi vasemmalla laminaarista ja muuttuu kappaleen pinnalla virratessa turbulenteiksi.

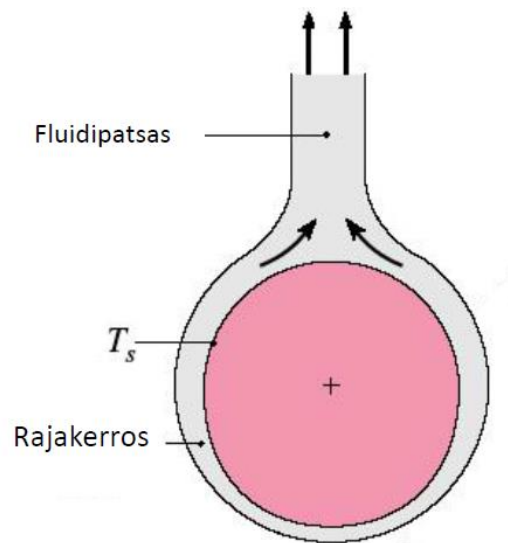
Nopeusrajakerroksen ja termisen rajakerroksen muodostumista voidaan laskennassa kuvata Prandtin luvulla. Se kuvaa fluidin nopeuden ja termisen diffuusiokertoimen suhdetta

ja se voidaan laskea yhtälöllä

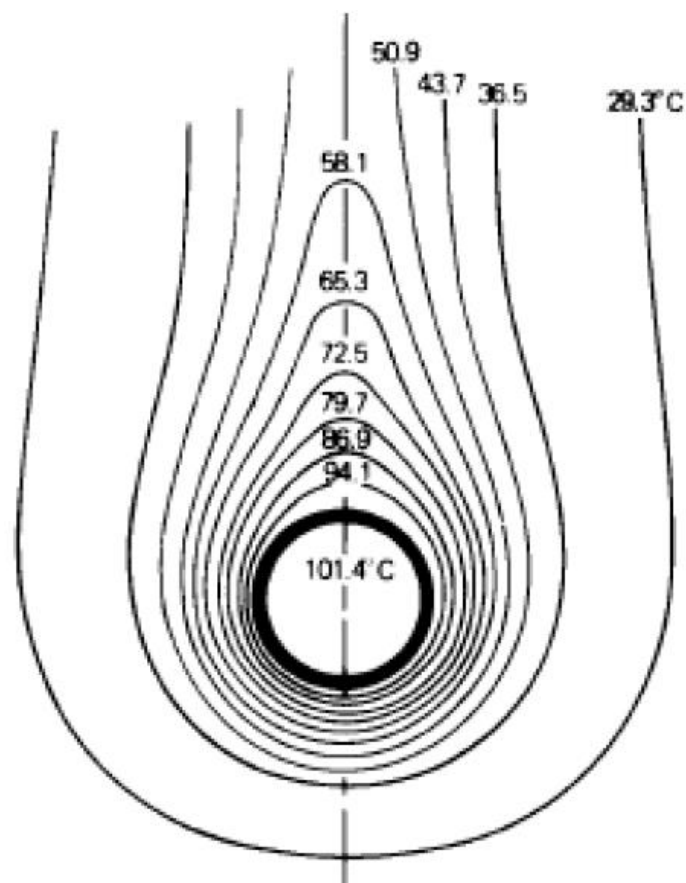
$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}, \quad (4)$$

missä  $v$  on fluidin virtausnopeus,  $\alpha$  on aineen termien diffuusiokerroin,  $c_p$  on fluidin ominaislämpökapasiteetti,  $\mu$  on fluidin dynaaminen viskositeetti ja  $k$  on fluidin lämmönjohtavuus. Nämä kaikki arvot ovat aineen lämpötilasta riippuvia. Kaasuille Prandtin luvut vaihtelevat välillä 0,7–1,0. Prandtin lukuja löytyy taulukoituna lämmönsiirtoa käsittelevästä kirjallisuudesta. (Cengel 2002: 340–341, 874.)

Terminen rajakerros ja nopeusrajakerros liittyvät oleellisesti toisiinsa, kun sylinterin muotoista kappaletta jäähdytetään vapaalla konvektiolla. Kirjallisuudessa puhutaankin vapaan konvektion tapauksessa monesti pelkästä rajakerroksesta, jossa kummankin rajakerroksen voidaan ajatella yhdistyvän. Rajakerros alkaa muodostua, kun kappale lämmitää ilmaa, jonka seurauksena ilma nousee ja tilalle virtaa uutta ilmaa. Pohjalta noustessaan ilma lämpenee ja virtaa sylinterin pintaa pitkin, josta seuraa ilman lämpeneminen ja vauhdin kasvaminen. (Cengel 2002: 469–470; Incropera ym.: 579–560.) Tätä sylinterin pinnalle muodostuvaa rajakerrosta on havainnollistettu kuvassa 7. Kuvassa 8 puolestaan on esitetty sylinterimäisen kappaleen lähellä olevan ilman mitattuja lämpötiloja, mikä havainnollistaa konvektiivisen lämmönsiirron ja rajakerrosten vaikutusta kappaleen lähellä olevaan ilmaan.



**Kuva 7.** Termisen rajakerroksen kehittyminen sylinterin pinnalla vapaassa konvektiossa virtauksen pysyessä laminaarisena (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014).



**Kuva 8.** Erään sylinterin pinnan läheisyydessä olevassa ilmassa mitatut isotermit (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014). Isotermit tarkoittaa rajaa, jossa lämpötila on sama.

Seuraavaksi määritetään Nusseltin luku, joka vastaa konvektiokerrointa, mutta se ottaa huomioon ilman virtauksen ja sen, kuinka suuri osa lämmönsiirrosta perustuu siihen, että kappaleesta johtuu lämpöä suoraan viereiseen ilmaan ja kuinka suuri osa fluidin liikkeestä (Incropera ym. 2007: 371, 376). Sen määrittämiseen käytetään Raleighin- ja Prandtlin lukua ja sylinterin muotoisella kappaleella yhtälö on muotoa

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2, \text{ kun } Ra_D \leq 10^{12}, \quad (5)$$

missä  $Ra_D$  on Raleighin luku ja  $Pr$  on prandtlin luku. Raleighin luvun ala-indeksi  $D$  tarkoittaa sitä, että karakteristisena pituutena on sen määrittämiseen käytetty sylinterin halkaisijaa. Yhtälö pätee vain Raleighin luvun ollessa pienempi kuin  $10^{12}$ . (Incropera ym. 2007: 371, 376.)

Grashofin luku puolestaan kuvaa fluidin lämpeämisen ansiosta syntyvän nostevoiman suhdetta viskositeetin aiheuttamaan voimaan. Grashofin luku voidaan määrittää yhtälöstä

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}, \quad (6)$$

missä  $g$  on gravitaatiovoima,  $\beta$  on lämpölaajenemiskerroin,  $T_\infty$  on fluidin lämpötila pisteessä, jossa jäähdytettävä kappale ei vaikuta siihen ja  $\nu$  on fluidin kinemaattinen viskositeetti. (Incropera ym. 2007: 376, 564–565.) Lämpölaajenemiskerroin  $\beta$  voidaan määrittää yhtälöstä

$$\beta = \frac{1}{T_f}, \quad (7)$$

missä  $T_f$  on fluidin lämpötila aivan jäähdytettävän kappaleen pinnalla. Se määritetään yhtälöllä

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}, \quad (8)$$

eli se vastaa pinnan ja fluidin lämpötilan keskiarvoa (Incropera ym. 2007: 404). Myös fluidin kinemaattinen viskositeetti on määritetty lämpötilassa  $T_f$ .

Raleighin luku kuvaa virtauksen nostevoimien suhdetta viskooseihin voimiin ja se ottaa huomioon myös rajakerrosten kehittymisen. Vapaassa konvektiossa virtaus voi myös muuttua turbulenttiseksi, mikäli jäädytettävän kappaleen koko ja lämpötilaero kappaleen ja fluidin välillä ovat riittävän suuria. Raleighin luku voidaan määrittää Grashofin ja Prandtin luvun tulona tai laskea erillisellä yhtälöllä

$$Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu\alpha}, \quad (9)$$

missä  $\alpha$  on terminen diffuusiokerroin. (Incropera ym. 2007: 569, 581.)

Nusseltin luvun avulla määritetään edelleen konvektiokerroin,

$$\bar{h} = \frac{k}{L} \overline{Nu}_D, \quad (10)$$

missä  $k$  on lämmönjohtavuus,  $L$  on kappaleen karakteristinen pituus ja  $\overline{Nu}_D$  on nusseltin luku. Varsinainen konvektiivisesti siirtynyt lämpömäärä putkimaiselle kappaleelle saadaan määritettyä yhtälöllä:

$$Q = \bar{h}\pi D(T_s - T_f)l, \quad (11)$$

missä  $l$  on putkimaisen kappaleen pituus.

### 3.3 Lämmön siirtyminen säteilemällä

Säteilyssä lämmönsiirtyminen tapahtuu sähkömagneettisena aaltona. Konvektiosta poiketen siinä ei tarvita mitään väliainetta. Esineen tai pinnan lämpösäteily riippuu sen omi-

naisuuksista ja lämpötilasta. Lämpöä siirtyy enemmän pinnasta, jonka lämpötila on korkea. Toinen ominaisuus joka vaikuttaa säteilyyn on pinnan rakenne. Lämpikuultavat pinnat, kuten iho tai kasvien lehdet säteilevät enemmän kuin kovat pinnat, kuten metallit, joissa säteily tapahtuu aivan materiaalin pinnassa. Aineiden säteilyn suuruudelle eli emissiivisyydelle on annettu kertoimia nollan ja yhden välille. Tässä kerroin nolla tarkoittaa sitä, että kappale ei säteile ollenkaan ja kerroin yksi tilannetta, jossa säteily on suurimmillaan. Oikeiden pintojen säteily ei kuitenkaan ikinä saa arvoksi yhtä vaan todellisuudessa saatutavissa oleva emissiivisyys on suuruudeltaan korkeintaan n. 0,98. Kiillotetun kuparin emissiivisyys on lähteestä riippuen 0,025 tai 0,03. Tästä voidaan päätellä, että se jäähdyttää lämpöä huonosti säteilemällä. (Cengel 2002: 27–29; Pyrhönen ym. 2008: 466–469.)

Säteilemällä siirtyvä teho voidaan laskea, mikäli tiedetään pinnan lämpötila, ala ja emissiivisyys, yhtälöllä

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{amb}^4), \quad (12)$$

missä  $\varepsilon$  on emissiivisyys,  $\sigma$  on säteilyyn liittyvä Stefan-Boltzmannin vakio,  $A_s$  säteilevän kappaleen pinta-ala,  $T_s$  kappaleen pinnan lämpötila ja  $T_{amb}$  ympäristön keskimääräinen lämpötila. Stefan-Boltzmannin vakion suuruus on  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  (Cengel 2002: 28, 31). Monissa lähteissä mainitaan, että säteilemällä siirtyvä lämmönsiirto tulee ottaa huomioon, mikäli jäähdystystapana on vapaa konvektio (Cengel 2002: 28; Pyrhönen ym. 2008: 469). Seuraavassa kappaleessa 3.4 laskettujen tulosten perusteella tullaan kuitenkin huomaamaan, että tässä tapauksessa moottorista säteilemällä siirtyvä teho on todella pieni.

### 3.4 Moottorin laskennallinen jäähtyminen

Tässä kappaleessa määritetään moottorin laskennallinen lämpenemä kahdella tavalla. Laskettuja tuloksia verrataan simuloinneista ja testeistä saatuihin tuloksiin myöhemmin luvussa 6. Yksinkertaisin tapa määrittää konvektiivisesti siirtynyt lämpöteho on käyttää

yhtälöitä 2 ja 3. Näillä yhtälöillä laskettu konvektiokerroin ja moottorin rungon pinnan lämpötila on esitetty eri ympäristön lämpötiloissa taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Moottorin pinnan lämpötila eri ympäristön lämpötiloissa moottorin häviöiden ollessa 186,6 W.

Häviöteho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin lämpenemä (°C)	Konvektiokerroin (W/m <sup>2</sup> K)
186,60	-20	105,2	6,76
186,60	-10	115,2	6,76
186,60	0	125,2	6,76
186,60	10	135,2	6,76
186,60	20	145,2	6,76
186,60	30	155,2	6,76
186,60	40	165,2	6,76

Laskuissa on käytetty seuraavia arvoja: kerroin  $K$  on 1,32 (Lappenrannan teknillinen yliopisto 2015b), karakteristinen pituus  $L$  on moottorin rungon ulkohalkaisija 0,182 m, moottorin rungon pituus on 0,34 m ja rungon ulkopinta-ala on 0,24 m<sup>2</sup>. Tämän jälkeen on Excelillä iteroitu pinnan lämpötila pisteeseen, jossa tehoa siirtyy rungosta ilmaan moottorin laskettujen häviöiden verran. Tällä tavalla laskettuna konvektiokerroin on täysin riippuvainen kappaleen mitoista ja esimerkiksi ympäristön lämpötila ei vaikuta siihen.

Toinen tapa, jossa yksinkertaistuksia ei käytetä yhtä paljoa, on käyttää yhtälöitä 5, 7, 8, 9, 10 ja 11 sekä kirjasta (Cengel 2002: 874–875) löytyviä ilman aineominaisuuksiin liittyviä taulukoituja arvoja. Näillä kaavoilla otetaan tarkemmin huomioon eri osa-alueet, jotka vaikuttavat vapaaseen konvektioon. Täytyy kuitenkin muistaa, että vapaan konvektion kaavoihin liittyy aina likimääräistyksiä. Yhtälöt syötettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan ja sen avulla iteroitiin eri ympäristön lämpötiloissa pinnan lämpötila pisteeseen, jossa moottorin häviöt ovat laskettu 186,6 W. Taulukossa 2 on esitetty lasketut tulokset.

**Taulukko 2.** Moottorin lämpenemä eri ympäristön lämpötiloissa laskettuna.

Häviöteho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin lämpenemä (°C)	Konvektiokerroin (W/m <sup>2</sup> K)
186,6	-20	124,12	6,66
186,6	-10	136,73	6,54
186,6	0	149,35	6,43
186,6	10	161,94	6,32
186,6	20	174,46	6,21
186,6	30	186,96	6,12
186,6	40	199,40	6,02

Yhtälöllä 10 laskettu säteilemällä siirtyvä teho eri pinnan lämpötiloissa on esitetty taulukossa 3. Yhtälössä yksinkertaistetaan ympäristön pintojen lämpötila yksittäiseksi arvoksi ja näissä laskuissa ympäristön pintojen lämpötilana käytetään 20 °C, joka on laskussa muutettava kelvineiksi. Laskuissa käytettiin kiillotetun kuparin emissiivisyyden  $\varepsilon$  arvoa 0,03 ja moottorin koko pinta-alaa. Tuloksista huomataan, että säteilemällä siirtyvä teho jää hyvin pieneksi johtuen kiillotetun kuparin pienestä säteilykertoimesta ja moottorin pienestä pinta-alasta.

**Taulukko 3.** Moottorin säteilemä teho eri pinnan lämpötiloissa ympäristön pintojen lämpötilan ollessa 20 °C.

Moottorin pinnan lämpötila (°C)	Ympäristön pintojen lämpötila (°C)	Moottorin säteilemä teho (W)
50	20	1,32
60	20	1,85
70	20	2,43
80	20	3,06
90	20	3,75
100	20	4,50
110	20	5,31
120	20	6,19
130	20	7,14
140	20	8,16

## 4 SILEÄRUNKOISEN MOOTTORIN KAKSIULOTTEINEN SIMULointI

Tässä luvussa tarkastellaan kaksiulotteista simulointimallia, jossa simulointikohteena on läpileikkaus moottorista. Sähkömoottorin simulointimallit on tehty Comsol Multiphysics<sup>®</sup> -ohjelman versiolla 5.1. Sen simulointi ja laskenta perustuvat elementtimenetelmään ja sillä pystytään mallintamaan fysiikan ja kemian eri osa-alueita (Comsol 2015). Tämän työn kannalta oleelliset osiot ovat virtausdynamiikka ja lämmönsiirto.

Kaikki simulointimallit määritetään Comsolissa ensin määrittämällä simuloitavien kappaleiden muoto ja niiden materiaali. Vasta näiden määritysten jälkeen siirrytään määrittämään varsinaista lämmönsiirtoa. Tässä työssä simulointien lämmönsiirto on määritetty kahdella erillisellä fysiikka-osiolla: *laminar flow* ja *heat transfer in solids*. Simuloinneissa moottorin häviöt on määritelty moottorin sisälle kappaleen pinnalle, jonka voi ajatella vastaavan moottorin staattoria, joka on moottorin runkoon kosketuksissa. Simuloinneissa ei siis oteta huomioon sitä, missä osassa moottoria tai miten häviöt ovat syntyneet simulointimallin yksinkertaistamiseksi. Tämän jälkeen malliin lisätään simulointielementtien verkko ja määritetään mallin ratkaisija.

Simulointien tavoitteena on selvittää moottorin rungon loppulämpötila jatkuvassa käytössä ja tarkastella konvektion aiheuttaman ilmavirran suuruutta ottamatta huomioon kauanko loppulämpötilan saavuttaminen kestää. Tästä syystä kaikki simuloinnit tehdään Comsolin stationary -ratkaisijalla, jolloin simuloinnit vastaavat tilannetta, jossa moottori on saavuttanut loppulämpötilansa. Simuloinnit eivät ole siis ajasta riippuvaisia ja niistä ei saada tietoa siitä, kauanko moottorilla kestää saavuttaa loppulämpötila. Moottorin simulointimallin yksinkertaisuuden takia voidaan ajatella moottorin staattoria kuvaavan kappaleen lämpötilan vastaavan moottorin staattorikäämin lämpenemää.

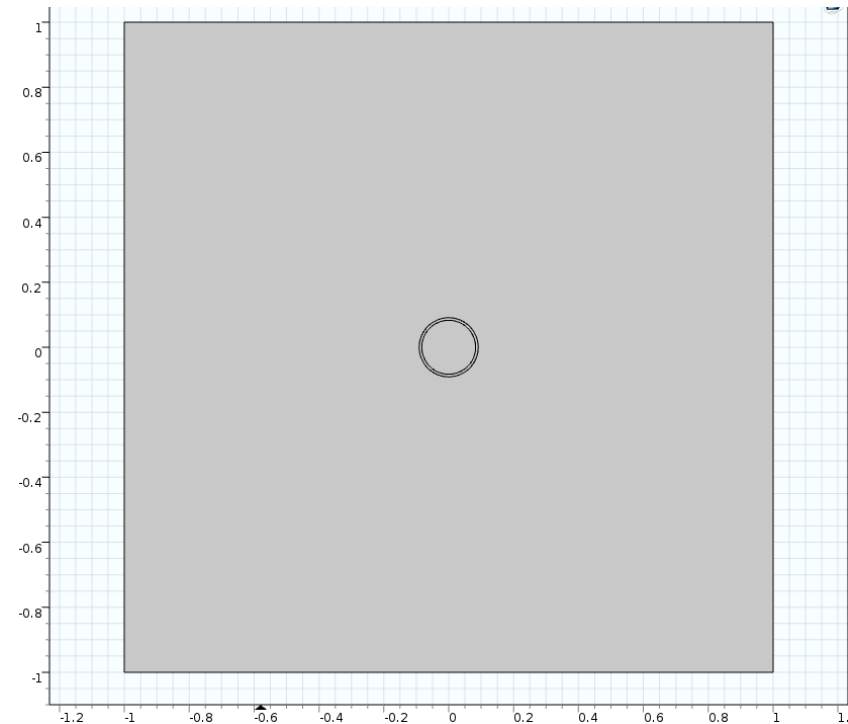
Simulointimalleissa joudutaan hyödyntämään laskennassa erilaisia apukeinoja, joiden avulla malli saadaan suppenemaan kaikissa lämpötiloissa ja siitä saadaan stationääritilan ratkaisu. Tämä johtuu siitä, että vapaan konvektion simuloinnissa saattaa muodostua pie-

niä pyörteitä, jolloin mallista ei ole mahdollista saada stationääritilan ratkaisua ilman laskennallisia apukeinoja. Mallien laskenta kestää kymmenistä sekunneista muutamaan minuuttiin.

#### 4.1 Simuloitavat kappaleet

Simulointimalleissa määritetään aina ensin kappaleiden muoto ja materiaali. Ensimmäisessä kaksiulotteisessa simulointimallissa ensimmäinen simulointi tehdään tilanteessa, jossa moottorin kuvitellaan olevan keskellä tilaa, jonka leveys ja korkeus ovat 2 metriä. Simulointimallissa moottori tulee keskelle tasoa niin, että sen akseli olisi tason normaalin suuntaisesti. Moottorin suoraan staattori on kiinni rungossa ja moottorin häviöt määritetään sen pinnalle. Kaksiulotteisessa simulointimallissa ei oteta huomioon moottorin kiinnityksiä ja niiden kautta johtumalla – tai päätykilvistä konvektiivisesti siirtyvää lämpöä.

Moottorin rungon ulkohalkaisija on 182 mm ja sisähalkaisija 168 mm eli rungon paksuus on siis 7 mm. Rungon materiaali on kupariyhdiste, josta suurin osa on kuparia. Simulointeissa käytetään rungon materiaalina kuparia, koska sen voidaan ajatella vastaavan riittävän tarkasti todellista tilannetta ja tällä vältetään metalliseoksen aineominaisuuksien määrittäminen Comsoliin. Moottorin staattorin ulkopinta on suoraan kiinni moottorin rungossa ja sen materiaaliksi on valittu teräs. Fluidina simulointimallissa on käytetty ilmaa. Kaikkien aineiden aineominaisuudet on määritelty suoraan valitsemalla ne Comsolin materiaalikirjastosta. Malli on esitetty kuvassa 9.



**Kuva 9.** Kaksiulotteisen simulointimalli moottorin läpileikkauksesta vaiheessa, jossa mallin kappaleiden muoto ja materiaali on määritetty. Kaksiulotteisessa mallissa moottori on keskellä tasoa, jonka korkeus ja leveys ovat 2 metriä.

#### 4.2 Lämmönsiirron määrittäminen simulointimallissa

Kun kappaleiden muoto ja materiaali on määritetty, siirrytään määrittämään mallin lämmönsiirtoa. Simuloinnissa lämmönsiirron määrittämiseen käytetään Comsolin kirjastosta kahta erillistä fysiikka-osiota. Nämä osiot ovat *laminar flow* ja *heat transfer in solids*. Näin pienillä häviötehoilla ja rungon lyhyellä pituudella ilman virtaussuunnassa voidaan tehdä oletus, että ilmavirtaus on laminaarinen. Mallissa täytyy ottaa huomioon lämmönsiirtyminen johtumalla staattorin pinnasta rungon pintaan, konvektiivisesti moottorin rungosta ilmaan ja vielä virtaavassa ilmassa johtumalla.

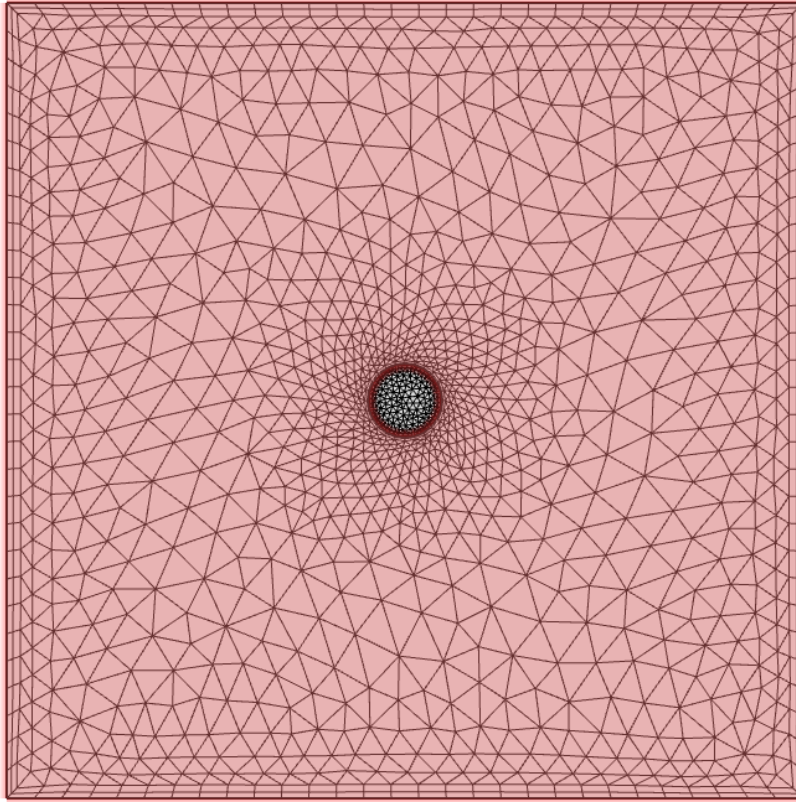
*Laminar flow* -osio määrittelee ilman virtaamista jäädytettävän kappaleen pinnalla. Käytettävässä simulointimallissa on määritetty fluidin aineominaisuudet vastaamaan määritettyä ainetta eli ilmaa. Mallissa on määritetty seiniksi kaikki ilman kanssa kosketuksissa olevat pinnat. Fluidiin kohdistuvat voimat, jotka aiheutuvat painovoiman ja lämpölaaje-

nemisen aiheuttamasta tiheysmuutoksesta, on määritetty kertomalla muuttuja  $spf.rho$  vakiolla  $g.const$ . Muuttuja  $spf.rho$  määrittää ilman tiheyden ja sitoo sen ilman lämpötilasta riippuvaiseksi ja vakio  $g.const$  on Comsoliin määritetty painovoimaa kuvaava vakio ja sen edessä oleva miinusmerkki kohdistaa painovoiman oikeaan suuntaan. Lisäksi malliin täytyy määrittää erikseen paine, koska malli on suljettu ja mallin reunaehdot eivät määritä painetta mihinkään arvoon. Paine määritetään lisäämällä mallin vasempaan alanurkkaan piste, jossa suhteellisen paineen arvoksi annetaan 0. (Marttila 2015a.)

Seuraavaksi määritetään Comsolin *Heat transfer in solids* -osiossa kiinteiden aineiden välinen lämmönsiirto moottorin staattorin ja rungon välille. Alkulämpötilaksi kaikille mallissa oleville materiaaleille on määritetty 20 °C. Moottorin häviöt määritetään staattorin ulkopinnalle, joka on suoraan kosketuksessa moottorin runkoon. Häviöiden suuruus on Adept-ohjelmalla laskettu 186,6 W. Tässä osiossa määritetään myös lämmönsiirtyminen fluidissa niin, että sen aineominaisuudet määräytyvät suoraan Comsolin materiaali-kirjastosta ja fluidin lämpötila ja nopeus määritetään *Non-Isothermal Flow* -osion avulla, jolloin niiden laskennassa otetaan mallin kumpikin fysiikka-osio huomioon. Viimeisenä määritetään varsinainen konvektio valitsemalla *Heat Flux* -kohdasta *convective heat flux* simuloitavan geometrian ulkopinnoille, jolloin konvektio toimii oikein.

Kun mallissa on käytetty useampaa kuin yhtä fysiikka-osiota pitää lopuksi vielä yhdistää käytettyjen fysiikkamallien toiminta valitsemalla *Multiphysics* -lehdeltä löytyvään *Non-isothermal Flow* -osioon määrittäykset seuraavasti: tiheys ja virtaus määritetään virtausta käsittelevästä fysiikasta ja lämmönsiirto sitä käsittelevästä fysiikasta.

Lämmönsiirron määrittämisen jälkeen Comsolissa tulee määrittää laskemista varten verkko (*mesh*), joka jakaa simulointimallin osiin eli elementteihin. Verkon tiheys parantaa simulointitulosta ja vastaavasti pidentää laskenta-aikaa (Kaunismäki 2015: 31). Verkko on mahdollista tehdä automaattisesti, jolloin käyttäjän on mahdollista valita yhdeksän eritiheyksistä verkkoa. Kun verkko valitaan automaattisesti, se tihenee automaattisesti kappaleiden reunoilla, jolloin simulointi ottaa tarkemmin kappaleiden pinnan muodot. Kaksiulotteisessa mallissa on simuloinneissa käytetty verkon tiheytenä oletuksena olevaa *normal* asetusta. Malli, johon on määritetty verkko, on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Comsolin automaattisesti muodostama verkko, joka tihenee lähestyttäessä moottorin pintaa.

Kaksiulotteisissa simulointimalleissa joudutaan käyttämään joitain laskennallisia apukeinoja, jotta saadaan malli suppenemaan. Kaikissa simuloinneissa teho kasvatettiin parametrisesti, kohti moottorin nimellistehoa 1,5 kW. Parametrinen tehon kasvattaminen tehtiin lisäämällä malliin muuttuja *para*, jolle annettiin aluksi arvo 1000 ja jakamalla moottorin häviöteho 186,6 W tällä muuttujalla. Sen jälkeen Comsolin *Study*-osion alta, joka määrittää mallin laskentaa, valittiin *step 1: stationary*-välilehti, josta edelleen kohta *study extension*, jonne valittiin *auxiliary sweep* ja muuttujaksi luotu parametri *para*. Tällä tapaa pystytään määrittämään malliin peräkkäisiä simulointiaskeleita, jotka jatkuvat siitä kohdasta missä edellisellä askeleella on löydetty stationääritilan ratkaisu. Muuttujalle *para* annettiin seuraavat arvot: 1000; 500; 100; 50; 20; 10; 5; 2,5 ja 1 ja valittiin simuloinnin asetukset jatkamaan aina edellisestä askeleesta. (Marttila 2015b.) Tällöin siis häviöiden suuruus on aluksi tuhannesosa häviöistä nimellisteholla, seuraavalla askeleella viidessadasosa ja viimeisellä askeleella, jossa häviöitä jaetaan luvulla 1 mukana on mallin lasken-

nalliset häviöt kokonaan. Viimeisellä askeleella malli vastaa siis täysin tilannetta moottorin nimellisteholla.

Joissain malleissa parametrinen tehon kasvattaminen ei riittänyt siihen, että mallista saadaan stationääritilan ratkaisu ja mallissa oli käytettävä muita laskennallisia apukeinoja. Malliin lisättiin numeerista vaimennusta *Laminar flow* ja *Heat transfer in solids* -fysiikoihin valitsemalla *isotropic diffusion* ja määrittämällä sen kerroin saman muuttujan *para* avulla. Diffuusio-kertoimeksi määritettiin  $0,5(\textit{para}/1000)$ , jolloin diffuusiokerroin oli aluksi 0,5 muuttujan *para* arvolla 1000. (Marttila 2015b). Numeerinen vaimennus pienenee askeleittain kohti lopullista arvoaan ja muuttujan *para* arvolla yksi numeerisen vaimennuksen kerroin on enää 0,0005. Käytännössä numeerinen vaimennus yhtenäistää virtauksen suuntaa ja estää pieniä paikallisia pyörteitä syntymästä ilman lämpötilan tasoittuessa ja virtauksen yhtenäistyessä. Numeerista vaimennusta jouduttiin käyttämään ympäristön lämpötiloissa -20, 0, 30 ja 40 °C.

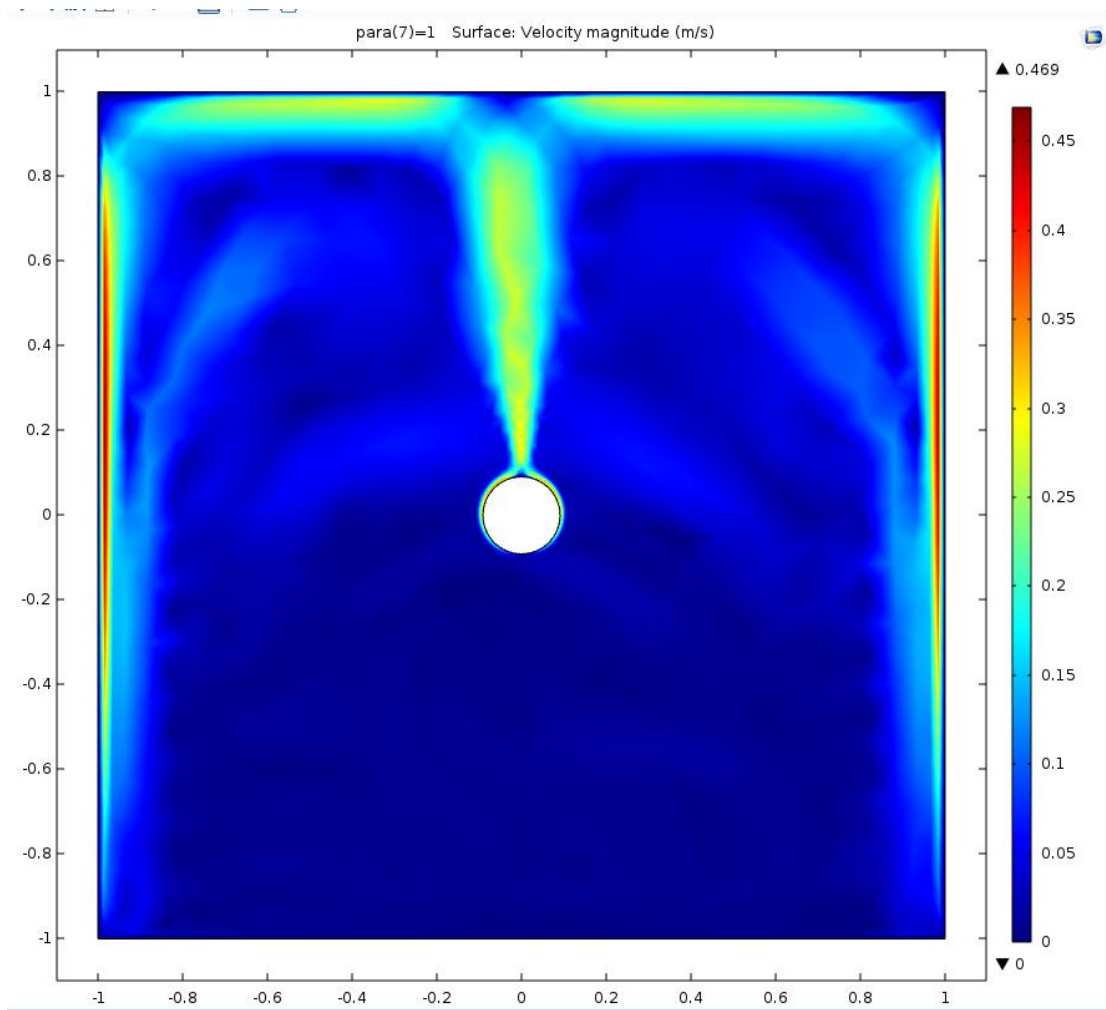
Timo Karvinen (2015) mainitsi lämmönsiirtoa ja virtaamista käsittelevällä luennolla ja koulutuksessa, että numeerista vaimennusta on käytettävä varoen, koska se vaikuttaa malliin epäfysikaalisesti. Jotta saadaan varmuus, että numeerinen vaimennus ei vaikuta merkittävästi lopputulokseen, oli mallista tehtävä lisäsimulointi. Lisäsimulointi tehtiin lisäämällä numeerinen vaimennus simulointimalliin ympäristön lämpötilassa 20 °C, jossa malli suppenee ilman numeerista vaimennustakin. Numeerisen vaimennuksen vaikutus simuloinnin lopputulokseen oli pieni. Ilman virtausnopeus moottorin pinnalla pysyi ennallaan. Moottorin lämpenemä myös laski hieman alkuperäisestä 62,7 kelvinitä 62,1 kelviniin, joten lämpenemästä voidaan turvallisesti olettaa, että numeerinen vaimennus ei vaikuta malliin liikaa.

Toisessa simulointitilanteessa otetaan huomioon myös staattorin viisteet. Simulointimalliin täytyy tämän takia määrittää moottorin sisälle tuleviin viisteisiin materiaaliksi ilma ja koska ne ovat suljettuja tiloja, määritetään niihin samanlainen painemääritys kuin alkuperäisessä mallissa oli vasemmassa alakulmassa. Staattorin viisteessä staattorin ja moottorin rungon suurin etäisyys on 4 mm. Staattorin rakennetta on käsitelty tarkemmin jo kappaleessa 2.1. Tällä tarkemmalla mallilla tehdään myös simulointiajo, jossa ympäristön

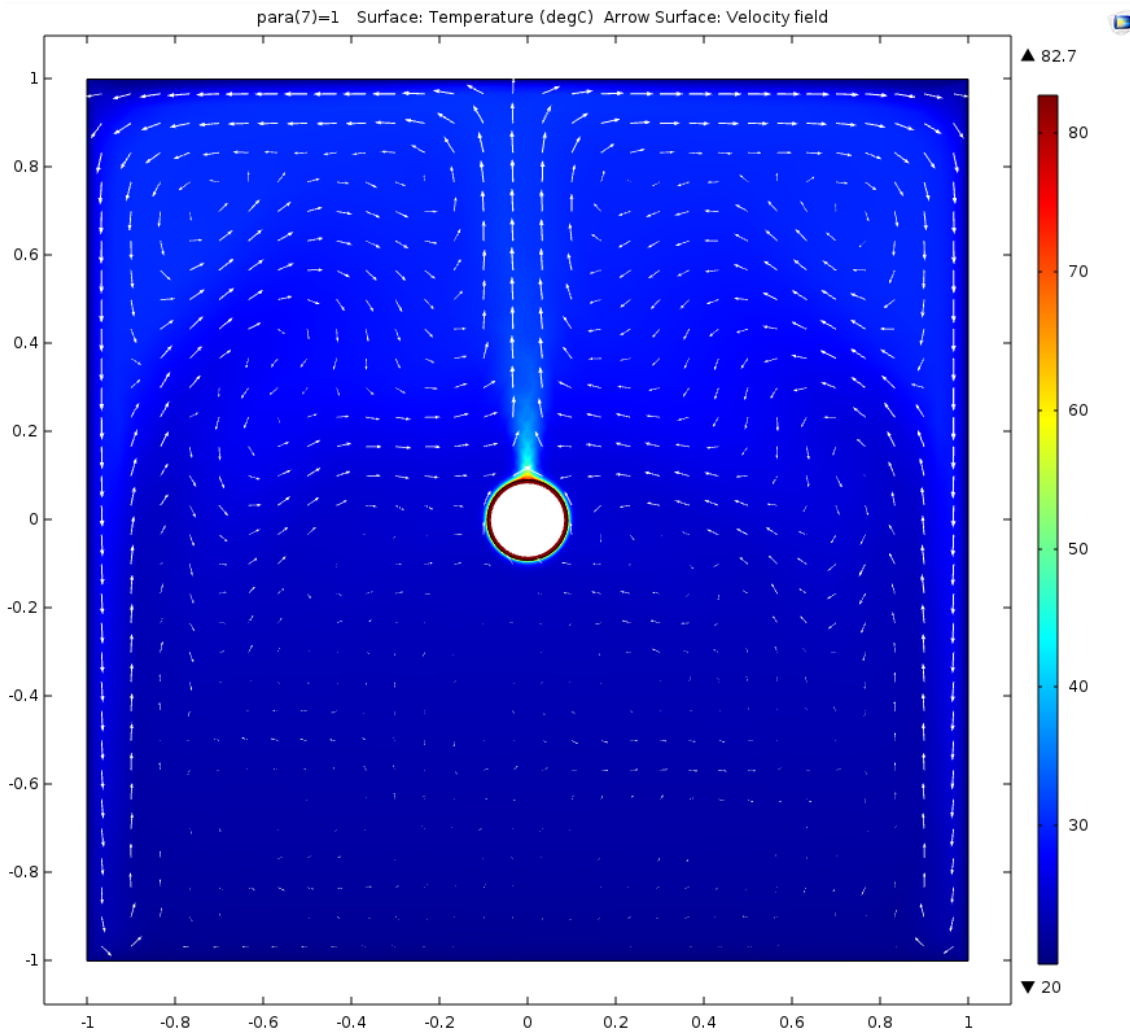
lämpenemälle annetaan arvoja 10 asteen välein alkaen lämpötilasta  $-20\text{ °C}$  päättyen lämpötilaan  $40\text{ °C}$ . Tällä saadaan selville, kuinka suuri merkitys ympäristön lämpötilalla on moottorin lämpenemälle.

#### 4.3 Simulointitulokset

Moottorin simuloinneista saadaan seuraavat tulokset: virtaavan ilman nopeus, lämpötilat pinnoilla ja ilmassa sekä isotermit mallissa. Aluksi simuloinnit tehtiin yksinkertaistetulla mallilla, jossa ei ole otettu huomioon staattorin viisteitä, joiden ansiosta staattorin ja moottorin rungon väliin jää rako. Kuvassa 11 on esitetty ilman virtausnopeus tilassa. Moottorin pinnalla muodostuu virtaus, jonka nopeus on n.  $0,3\text{ m/s}$ . Koska eri simulointimalleissa ilman virtaus saattaa erota hieman tietyssä pisteessä moottorin pinnan läheisyydessä, eri mallien ilmavirtauksien vertaaminen keskenään voidaan tehdä vertaamalla mallissa muodostuvan suurimman ilmavirran suuruutta. Kuvassa 12 on esitetty yksinkertaisen simulointimallin oleellisin asia eli moottorin rungon lämpenemä. Havaitaan, että moottorin rungon loppulämpötila on  $82,7\text{ °C}$ , jolloin ympäristön lämpötilan ollessa  $20\text{ °C}$ , rungon simuloitu lämpenemä on ainoastaan  $62,7\text{ °C}$ . Kuvassa 12 on myös havainnollistettu nuolilla ilman virtaussuuntaa. Taulukossa 4 on esitetty simulointitulokset eri ympäristön lämpötiloissa ja kuvassa 13 kuvaaja moottorin lämpötilasta eri ympäristön lämpötiloissa. Taulukosta ja kuvasta nähdään, että moottorin lämpenemä kasvaa lämpötilan funktiona melko lineaarisesti. Pienet heitot lineaarisuudessa voivat johtua laskennallisten apukeinojen käyttämisestä tai pienistä pyörteistä mallissa, jotka tehostavat jäähtymistä.



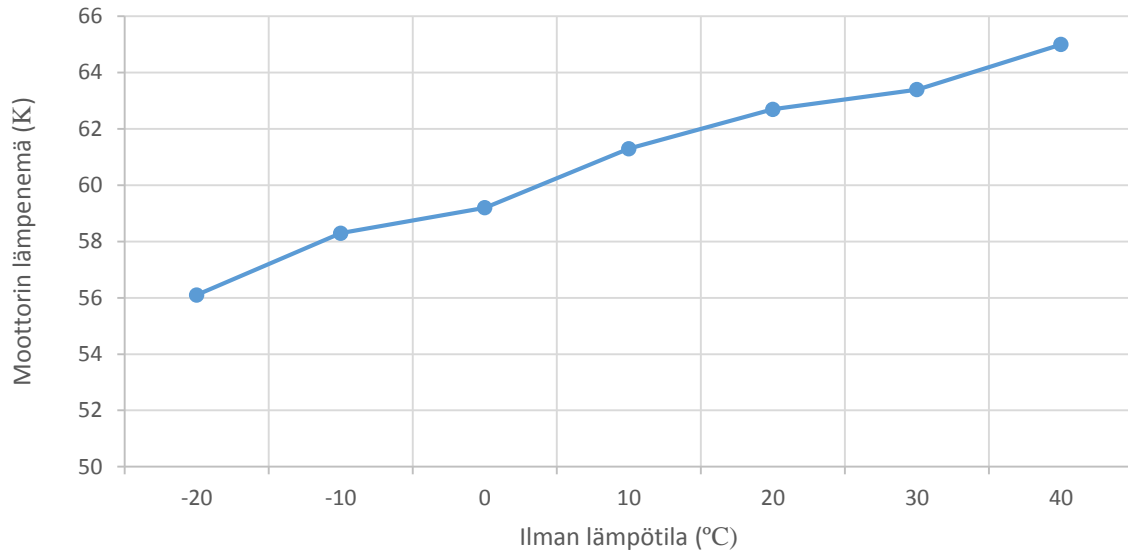
**Kuva 11.** 2D-mallin simuloitu ilman virtausnopeus, kun ilman alkulämpötila on 20 °C ja jäähdyttävä moottori on keskellä tilaa.



**Kuva 12.** 2D- mallin simuloitut lämpötilat, kun ilman alkulämpötila on 20 °C ja jäähdytettävä moottori on keskellä tilaa. Kuvassa on myös nuoliverkko osoittamassa ilman virtaussuuntaa.

**Taulukko 4.** Simuloitu moottorin rungon lämpenemä eri ympäristön lämpötiloissa ilman staattorin viisteitä.

Häviö-teho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin rungon lämpenemä (K)	Moottorin rungon lämpötila (°C)	Ilman virtausnopeus (m/s)
186,6	-20	56,1	36,1	0,451
186,6	-10	58,3	48,3	0,485
186,6	0	59,2	59,2	0,442
186,6	10	61,3	71,3	0,475
186,6	20	62,7	82,7	0,469
186,6	30	63,4	93,4	0,43
186,6	40	65	105	0,425



**Kuva 13.** Moottorin rungon lämpenemä ympäristön lämpötilan funktiona.

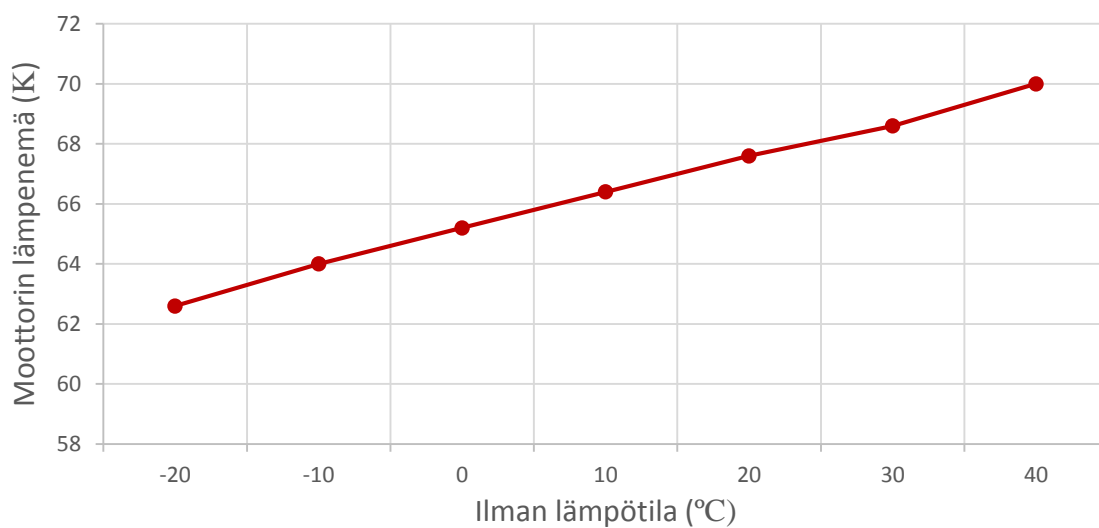
Moottorista tehtiin myös simulointimalli, jossa staattorin viisteet on otettu huomioon. Kaikissa lämpötiloissa hyödynnettiin tehon parametrin kasvattamista ja numeerista vaiennusta. Tästä huolimatta simulointi ei supennut ympäristön lämpötiloissa -20, 10 ja 20 °C kaikilta osin, eli sille ei löytynyt stationääritilan ratkaisua. Malliin jää jokin pieni pyörre tilanteessa lähellä loppulämpötilaa, ja simuloinnissa ilmavirran maksimi-arvon suuruus heiluu kahden arvon välillä. Mallin suppenemiskuvaajasta nähdään, että esimerkiksi ympäristön lämpötilassa 20 °C suhteellinen virhe jää likimäärin arvoon 0,025. Jotta mallista saataisiin stationääritilan ratkaisu, tulisi suhteellisen virheen olla pienempi kuin 0,01. Kun tarkastellaan laskennanaikaista animaatiota ja suppenemiskuvaajaa, huomataan, että ilmavirran pyörteily on todella pientä. Tästä voidaan päätellä, että tämä pieni suhteellinen virhe jää todennäköisesti ilmavirran suuruutta kuvaaviin simulointituloksiin, jossa moottorin ilmavirran suuruus on käytännössä lopullisessa arvossaan. Tätä tukee myös simulointituloksien lineaarisuus.

Moottorin lämpenemä kasvaa n. 5–6 °C-astetta verrattaessa tuloksia malliin, jossa viisteitä ei ole otettu huomioon. Staattorin viisteet heikentävät lämmön johtumista staattorista runkoon, jolloin moottorin lämpötila nousee hieman. Taulukossa 5 on esitetty simulointituloksena saatava moottorin lämpötila muuttuvalla ympäristön lämpötilalla väliltä -20–+40 °C kymmenen asteen porrastuksella. Tuloksista nähdään, että moottorin lämpenemä

kasvaa ympäristön lämpötilan mukana lähes täysin lineaarisesti. Jokaista kymmenen asteen ympäristön lämpötilan nousua kohden moottorin simuloitu lämpenemä kasvaa 1,2–1,4 °C-astetta. Simulointitulokset on esitetty taulukossa 5 ja moottorin lämpenemä eri ympäristön lämpötiloissa kuvassa 14. Kummassakin kaksiulotteisessa mallissa moottorin lämpenemän kasvu johtuu ainoastaan ilman ominaisuuksien muutoksesta lämpötilan kasvassa. Oikealla sähkömoottorilla osa moottorin häviöistä muuttuu hieman moottorin lämpenemän mukana, mutta niitä ei ole otettu tässä työssä huomioon.

**Taulukko 5.** Simuloitu moottorin rungon lämpenemä tilanteessa, jossa staattorin viisteet on otettu huomioon.

Häviö-teho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin rungon lämpenemä (K)	Moottorin rungon lämpötila (°C)	Ilman virtausnopeus (m/s)
186,6	-20	62,6	42,6	0,443
186,6	-10	64	54	0,439
186,6	0	65,2	65,2	0,435
186,6	10	66,4	76,4	0,431
186,6	20	67,6	87,6	0,427
186,6	30	68,6	98,6	0,423
186,6	40	70	110	0,419



**Kuva 14.** Simuloitu moottorin rungon lämpenemä ympäristön lämpötilan funktiona, tilanteessa jossa staattorin viisteet on otettu huomioon.

## 5 SILEÄRUNKOISEN MOOTTORIN KOLMIULOTTEINEN SIMULOINTI

Tässä luvussa tarkastellaan kolmiulotteisia simulointimalleja, joissa on mahdollista ottaa tarkemmin moottorin todellinen rakenne huomioon. Mallien määritykset vastaavat monilta osin kaksiulotteisten simulointimallien määrityksiä. Kolmiulotteisissa simuloinneissa tehtiin kaksi erillistä mallia, joista toinen oli pelkistetty malli ilman tukirakenteita ja toisessa mallissa moottori oli kiinnitettynä palkkiin, jonka voidaan kuvitella vastaavan laippakiinnitystä vaikkapa rullaradan tukirakenteeseen. Kummassakin mallissa hyödynnettiin moottorin symmetrisyyttä akselin suhteen laskenta-ajan säästämiseksi, mutta laskenta kolmiulotteisilla malleilla kestää silti 1-3 tuntia mallista riippuen. Tällä vältetään identtiset laskutoimitukset moottorin eri puolilla. Myös kolmiulotteisessa mallissa joudutaan hyödyntämään laskennassa samoja apukeinoja kuin kaksiulotteisessa mallissa, jotta malli saadaan suppenemaan ja siitä saadaan stationääritilan ratkaisu. Lisäksi kolmiulotteisessa mallissa on käytetty ilman viskositeetin muuttamista parametrisesti kohti oikeaa arvoaan.

Mallista, jossa moottorin tukirakenne on otettu huomioon, tehtiin lisäksi simulointeja, joilla pyrittiin saamaan lisätietoa eri ilmiöistä. Lisäsimuloinneilla tutkittiin moottorin rungon pituuden kasvattamisen vaikutusta lämpenemään. Tarkoituksena oli selvittää, onko rungon pituuden kasvattamiselle merkittävää vaikutusta moottorin lämpenemään.

### 5.1 Simuloitavat kappaleet

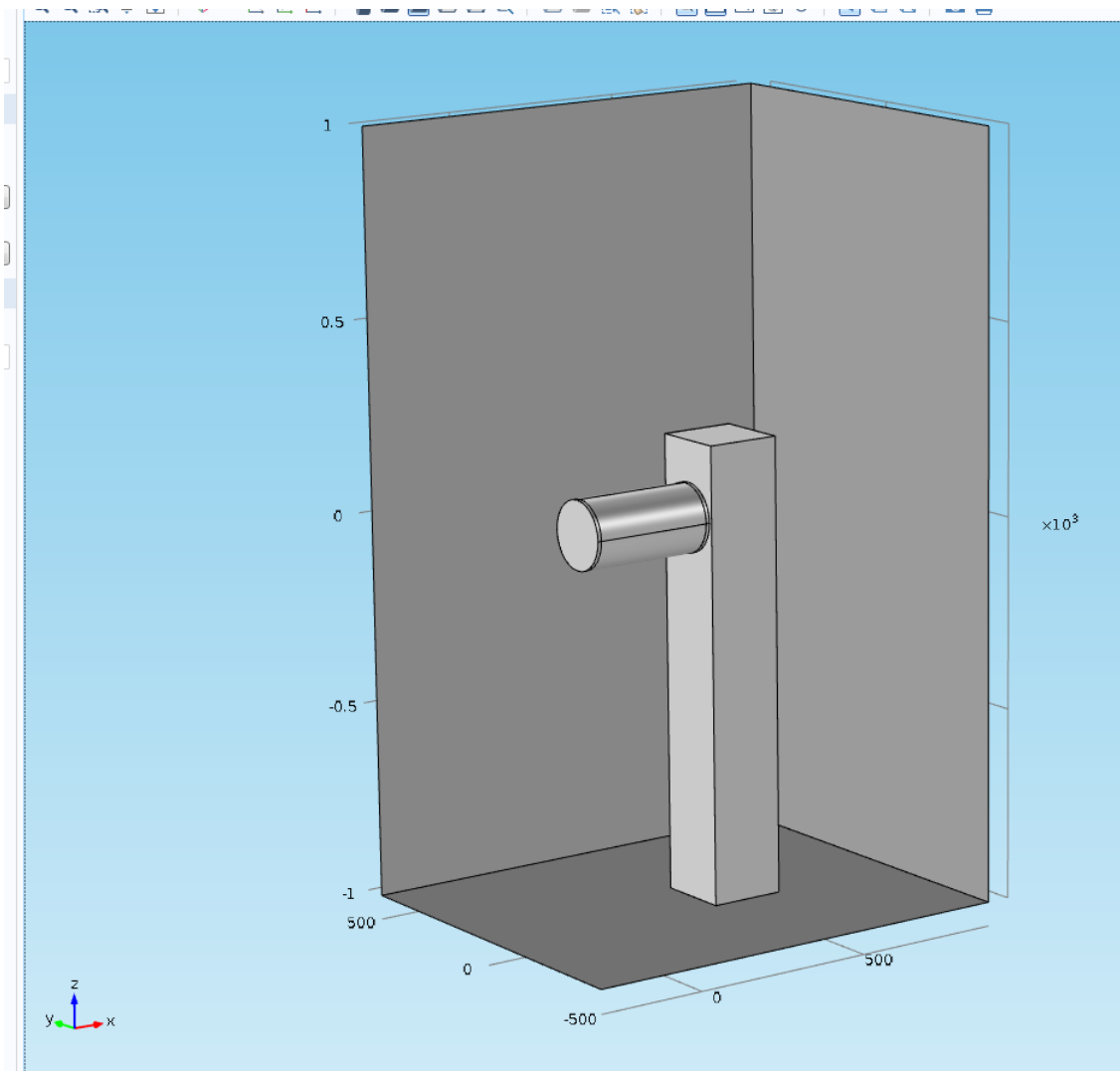
Kolmiulotteisen mallin määrittäminen aloitetaan määrittämällä simuloitavien kappaleiden muoto ja materiaali. Ensimmäinen yksinkertaistettu simulointimalli on periaatteeltaan yhteneväinen kaksiulotteisen yksinkertaistetun mallin kanssa. Tällä mallilla on tarkoitus tarkastella eroja kaksiulotteiseen malliin, jossa simulointitilanteessa moottorin rungon ajatellaan olevan äärettömän pitkä. Tässä mallissa moottorin rungon ulkohalkaisija on sama 182 mm ja sisähalkaisija 175 mm. Staattori on suoraan kiinni rungossa, ja staat-

torin viisteitä ei ole otettu yksinkertaisessa simulointimallissa huomioon. Moottorin staattorin ja rungon pituus ilman päätylevyjä on 320 mm. Malliin on lisätty kumpaankin päähän moottoria päätylevy, jossa ei oteta huomioon toisesta päästä ulostulevaa moottorin akselia. Päätylevyn paksuus on 10 mm ja päätykilven halkaisija on sama 182 mm kuin moottorin rungossa. Tässä simulointimallissa ei oteta huomioon moottorin kiinnitystä ja sitä kautta mahdollisesti johtuvaa lämpöä. Mallin materiaalmääritykset vastaavat kaksiulotteista mallia: rungon materiaali on kupari, staattorin materiaali on teräs ja fluidin materiaali on ilma.

Simulointien laskenta-ajan säästämiseksi on pienennetty tilaa moottorin sivuilla. Tilan korkeus on sama kaksi metriä. Tilan pituus on metri, jolloin moottorin päätylevyjen ja seinän välinen etäisyys on 330 mm. Tilan leveys on 450 mm, jolloin rungon ja seinän väliin jää kummallekin sivulle etäisyyttä 134 mm. Moottorin kuvitteellisen akselin keskikohtaan etäisyys maasta on 1000 mm. Tässä yksinkertaistetussa mallissa moottorin symmetrisyyttä hyödynnettiin sekä akselin suuntaisesti että kohtisuorassa linjassa akseliin nähden keskeltä moottoria, jolloin laskettavasta tilavuudesta jää jäljelle vain neljäsosa. Tämä tehdään lisäämällä geometriaan kuutio (*block*), joka jakaa moottorin edellä mainitulla tavalla. Tämän jälkeen muodostetaan unioni moottorista ja lisätystä kuutiosta, jolloin moottori jaetaan kahteen osaan keskeltä sekä akselin suuntaisesti ja kohtisuorasti akseliin nähden. Tämän jälkeen on myös määritettävä symmetria fysiikka-osioon, kohtiin joista malli on jaettu osiin.

Toisessa kolmiulotteisessa simulointimallissa moottori on kiinnitetty palkkiin, joka kuvaa moottorin kiinnitystä oikeassa käyttötilanteessa. Palkin materiaaliksi valittiin Comsolin materiaalikirjastosta tiili, jonka lämmönjohtokyky on heikko. Tiili valittiin, jotta voidaan minimoida palkin materiaalin vaikutus moottorin jäähtymisessä ja varmistaa, että moottorin jäähtyminen ei ole riippuvainen moottorin kiinnityspalkin materiaalin lämmönjohtavuudesta tai pinta-alasta. Tässä mallissa moottorin mitat ovat täysin identtiset edellisen kolmiulotteiseen mallin kanssa lukuun ottamatta malliin lisättyjä staattorin viisteitä. Kiinnityspalkin mitat ovat 200x200x1200 mm eli palkki on hiukan leveämpi kuin moottori ja moottori kiinnittyy palkkiin niin, että moottorin akselin keskikohta olisi metrin korkeu-

nessa. Mallia on havainnollistettu kuvassa 15. Laskennan säästämiseksi mallissa hyödynnetään symmetriaa moottorin akselin suuntaisesti, jolloin simuloitava tilavuus puolittuu. Mallissa ei voi moottorin tukirakenteen vuoksi hyödyntää symmetriaa kuin akselin suuntaisesti.



**Kuva 15.** Kolmiulotteisen mallin geometria ennen mallin jakamista symmetrisiin puoliskoihin.

## 5.2 Lämmönsiirron määrittäminen simulointimallissa

Kolmiulotteisissa simulointimalleissa fysikaaliset määrittäykset tehtiin aluksi kaksiulotte-

teisten mallien pohjalta. Ainut eroavaisuus oli, että simulointimallien symmetrioiden takia staattorin pinnalla olevan häviötehon suuruutta piti muuttaa vastaamaan sen jäljelle jäänyttä pinta-alaa koko staattorin ulkopinta-alasta. Ensimmäisessä yksinkertaistetussa kolmiulotteisessa mallissa varsinaisessa simuloinnissa oli koko staattorin pinta-alasta ja häviötehosta mukana neljäsosa ja toisessa yksityiskohtaisemmassa mallissa puolet, jotta teho pysyi pinta-alaa kohden samana. Simulointeja tehtiin eri ympäristön lämpötiloissa 10 °C askelin välillä -20–40 °C.

Kummallekaan kolmiulotteiselle mallille ei löydy stationääritilan ratkaisua ilman laskennallisia apukeinoja. Kummassakin mallissa käytettiin apuna kolmea apukeino: mallin häviötehon kasvattaminen parametrisesti, ilman viskositeetin muutos ja numeerinen vaimennus laskennassa (Marttila 2015b). Kaikkia kolmea apukeinoa käytettiin yhdessä, jotta malli saatiin suppenemaan.

Kolmiulotteisten mallien häviötehon kasvattaminen parametrisesti tehtiin myös kasvattamalla häviöt askeleittain kohti täyttä häviötehoa simuloimalla aina askel stationääriseen tilaan ennen seuraavaan simulointiaskeleeseen siirtymistä. Seuraavassa askeleessa simulointia jatkettiin edellisestä tilanteesta uudella teholla. Häviötehoa jaettiin muuttujalla *para*, jonka suuruus muuttui askeleittain: 1000, 100, 50, 10, 5, 2,5 ja 1. Alkutilanteessa häviöistä oli siis mukana vain tuhannesosa ja lopputilanteessa oli mukana koko häviöteho. Lisäksi malleihin lisättiin numeerista vaimennusta kaksiulotteisten mallien tapaan lisäämällä kumpaakin simuloinnin fysiikkaa määrittävään osioon numeerista vaimennusta niin, että aluksi numeerisen vaimennuksen kerroin on 0,5 ja viimeisellä askeleella kerroin on tästä tuhannesosa 0,0005. Nämä määritykset vastaavat siis kaksiulotteista mallia.

Kolmiulotteisiin malleihin hyödynnettiin lisäksi ilman viskositeetin muutosta. Sillä vältettiin simuloinnissa tilanne, jossa ilmavirta jää pyörimään loputtomaan silmukkaan ja mallista ei saada stationääritilan ratkaisua ja helpotetaan selkeän konvektiivisen ilmavirran muutosta. Simulointimallissa tämä on tehty materiaalien määrityksiin kertomalla ilman *dynamic viscosity* -kohdassa oleva yhtälö samalla muuttujalla *para*, jota käytettiin häviötehon askelittaisessa kasvattamisessa. Aluksi ilman viskositeetti on siis tuhatkertai-

nen normaaliin nähden ja se pienenee askeleittain kohti normaalia viskositeettia edellisessä kappaleessa esitettyjen kertoimien mukaan. Lopuksi ilman viskositeetti vastaa siis normaalia ilman viskositeettia kyseisessä lämpötilassa.

### 5.3 Simulointitulokset

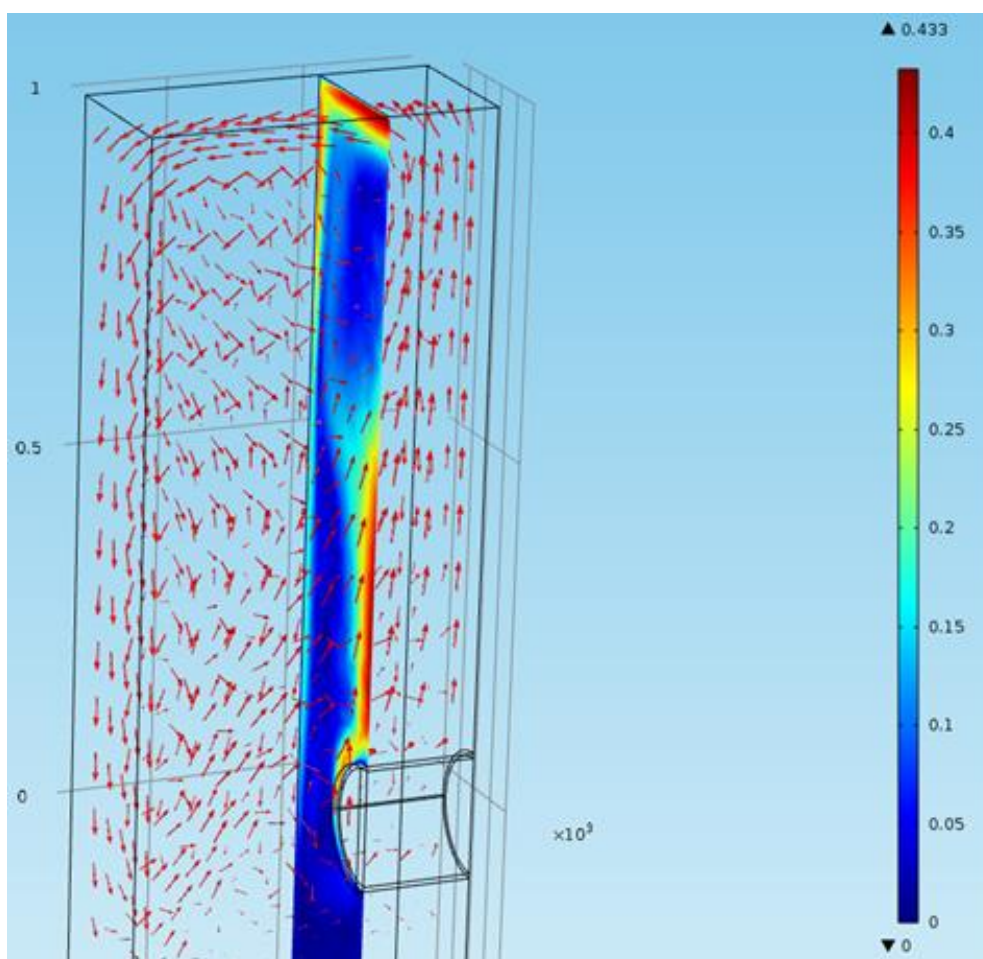
Kolmiulotteisista malleista saadaan simulointituloksia monipuolisemmin kuin kaksiulotteisesta mallista. Mallista saadaan lämpötilan ja virtausnopeuksien lisäksi määritettyä isotermit eli rajapinnat, joiden lämpötila on sama. Mallissa voidaan havainnollistaa ilmavirtauksia ja niiden suuntaa xyz-koordinaatistossa ja tarpeen vaatiessa eritellä eri suuntiin oleva komponentti virtauksesta, jolloin tuloksia pystyy suuntaa antavasti vertailemaan kaksiulotteiseen malliin.

Kolmiulotteisen mallin, jossa moottorin tukirakennetta ei otettu huomioon, simuloinneissa voitiin hyödyntää symmetriaa sekä moottorin akselin suuntaisesti että akselin normaalin suuntaisesti. Simulointeja tehtiin ympäristön lämpötiloissa  $-20-40$  °C aina kymmenen asteen välein. Moottorin lämpenemä ja mallin suurin ilmavirtaus on esitetty taulukossa 6. Moottorin ilmavirtausta on havainnollistettu kuvassa 16. Suurin virtausnopeus päätylevyn yläpuolella on  $0,433$  m/s. Kuvasta nähdään, että ilman virtaus moottorin alapuolella on vähäistä. Moottorin sivuilta ilma alkaa nousta ja se nouseekin tilan yläreunaan, josta se kiertää tilan seiniä pitkin alas ja sekoittuu viileämpään ilmaan.

Kolmiulotteisissa simulointimalleissa moottorin lämpenemä tarkoittaa moottorin kuuminta kohtaa joka simuloinneissa on keskimäärin 1-2 astetta kuumempi kuin rungon lämpötila. Tämä ei kuitenkaan vastaa mitattua moottorin käämin lämpenemää, koska moottorin lämpömalleissa moottorin sisäinen rakenne on hyvin yksinkertainen.

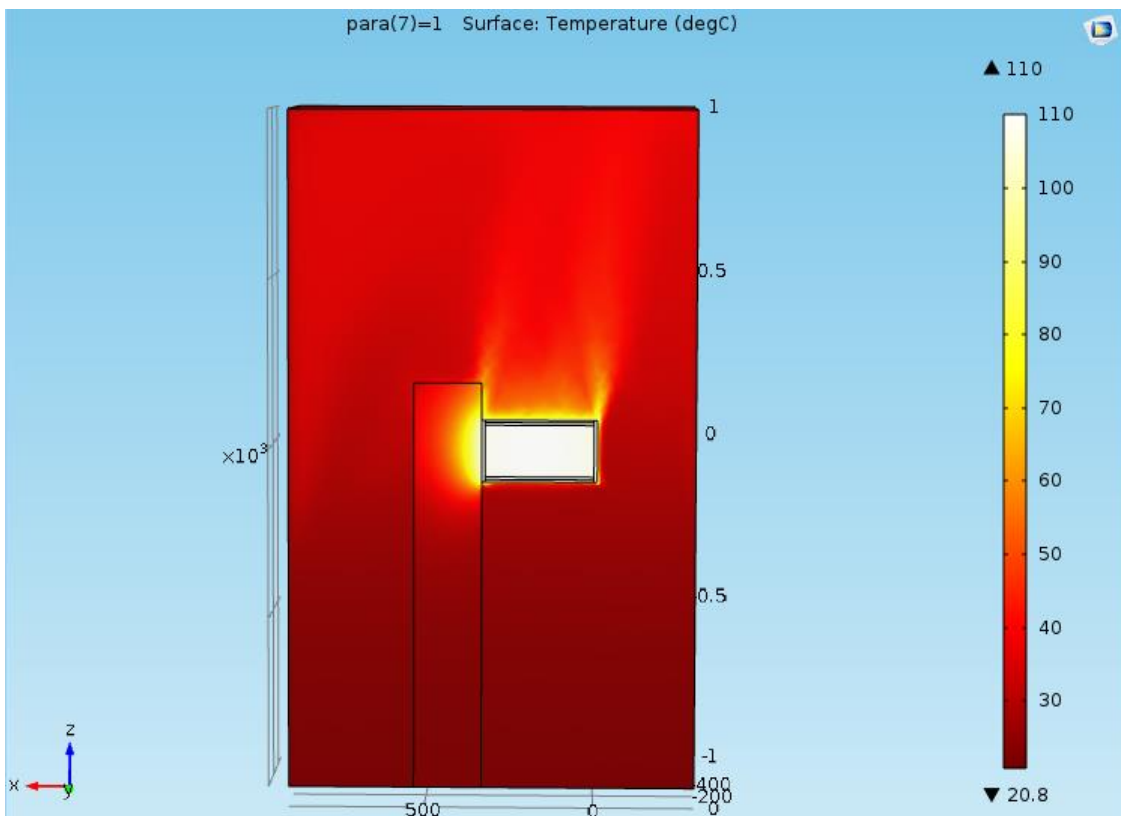
**Taulukko 6.** Moottorin lämpenemä ja ilmavirran suurin nopeus kolmiulotteisessa simuloinnissa, jossa moottorin tukirakennetta ei ole otettu huomioon. Häviöteho kaikissa ympäristön lämpötiloissa oli laskettu 186,6 W.

Häviöteho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin lämpenemä (K)	Moottorin lämpötila (°C)	Konvektion aiheuttaman ilmavirran suurin nopeus (m/s)
186,6	-20	86,6	66,6	0,436
186,6	-10	88	78	0,433
186,6	0	90,2	90,2	0,43
186,6	10	92	102	0,429
186,6	20	95	115	0,431
186,6	30	97	127	0,433
186,6	40	99	139	0,433

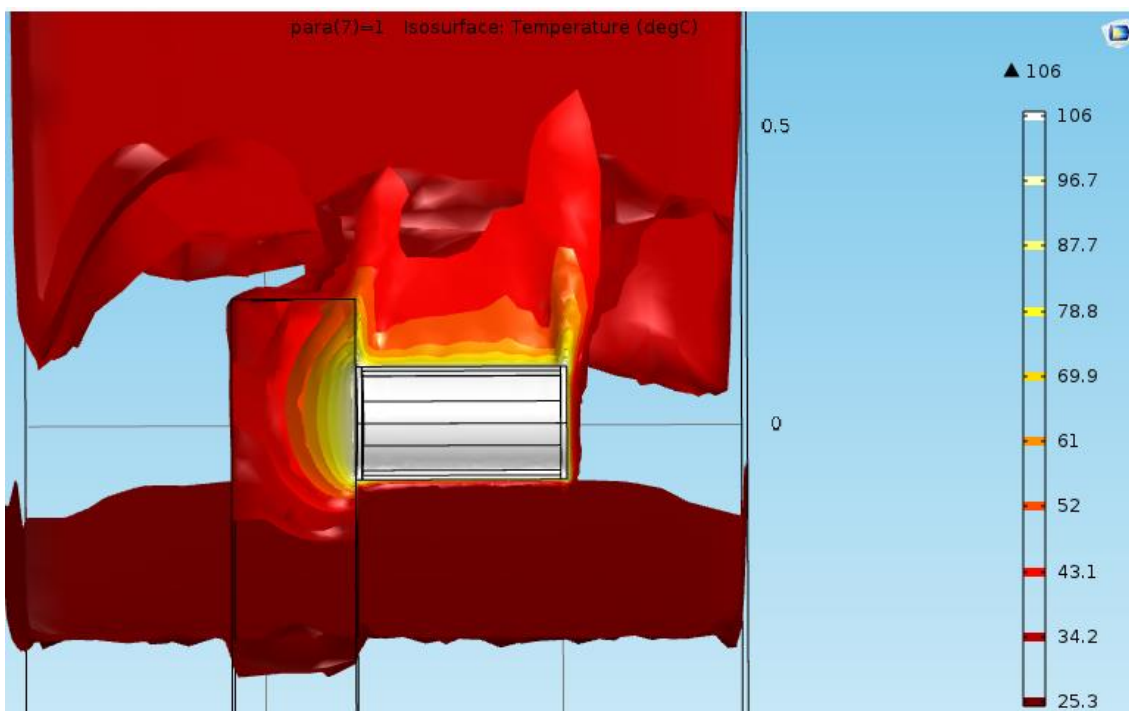


**Kuva 16.** 3D-simuloinnissa moottorin aikaansaama ilmavirtaus. Nuolet havainnollistavat ilmavirtauksen suuruutta ja suuntaa.

Kolmiulotteisessa mallissa, jossa moottorin tukirakenne on otettu huomioon, moottoria simuloitiin myös ympäristön lämpötiloissa välillä  $-20\text{--}40\text{ °C}$  aina kymmenen asteen välein, jotta pystytään vertaamaan simulointituloksia muihin malleihin. Mallissa moottori on kiinni tukirakenteessa, jonka materiaali on tiili. Kuvassa 17 ja 18 on havainnollistettu tätä simulointimallia. Kuva 17 on poikkileikkauskuva moottorin ja tilan lämpötilasta ja kuvassa 18 on esitetty mallin isotermit stationääritilassa. Kuvista nähdään, kuinka lämpöä johtuu moottorista hiukan palkkiin, mutta tiili johtaa lämpöä huonosti ja se ei juuri johdu eteenpäin, jolloin voidaan ajatella, että tukirakenteen vaikutus moottorin jäähtymiseen on pienehkö. Kuvasta 17 nähdään myös kuinka fluidin lämpötila tasaantuu kohti ympäristön lämpötilaa, sen noustessa kauemmaksi moottorista. Simulointitulokset eri ympäristön lämpötilassa on esitetty taulukossa 7.



**Kuva 17.** Poikkileikkauskuva keskeltä moottoria ja tilaa, jossa moottoria simuloitiin. Kuvasta näkyy moottorin lämpötila, lämmön johtuminen moottorissa ja siitä tukirakenteeseen, sekä konvektion aiheuttama nouseva ilmavirta, joka jäähtyy noustessaan. Ympäristön lämpötila simuloinnissa oli  $20\text{ °C}$ .



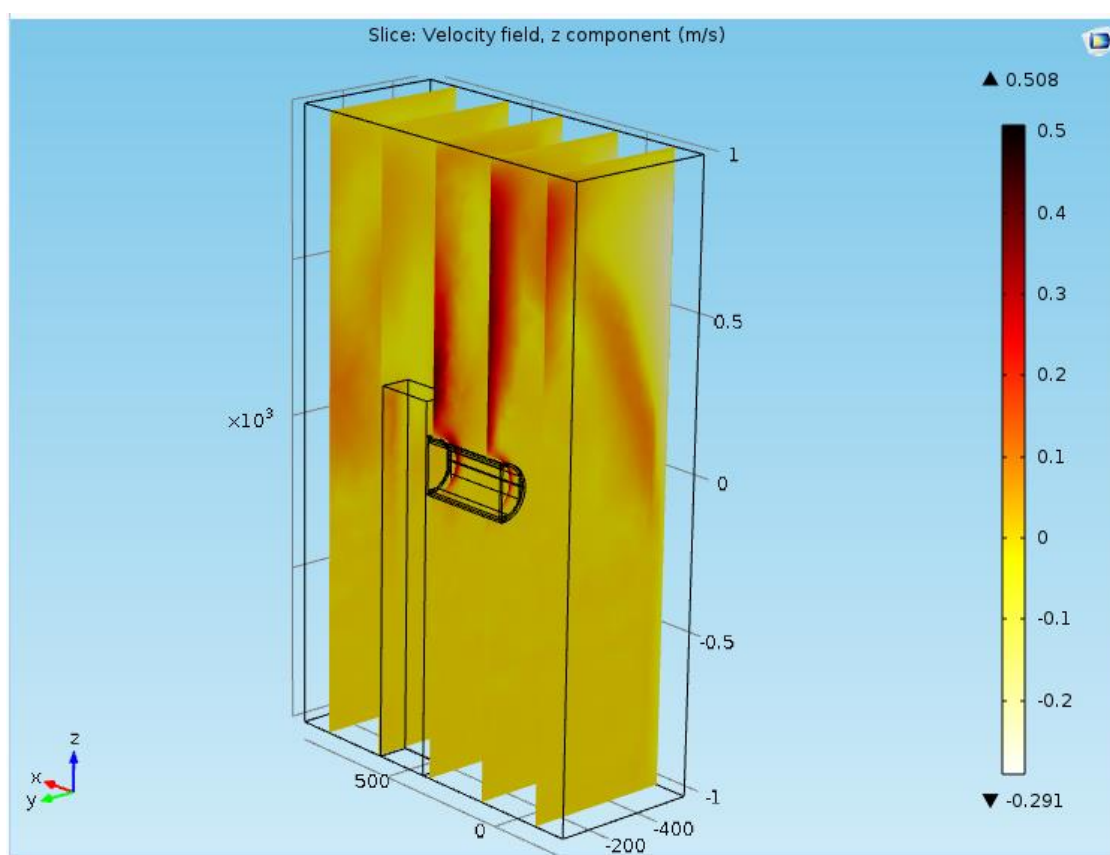
**Kuva 18.** Simuloidut isotermit eli alueet, joiden rajalla lämpötila on sama kolmiulotteisessa simuloinnissa, jossa moottorin tukirakenteen materiaali on tiili. Ympäristön lämpötila simuloinnissa oli 20 °C.

**Taulukko 7.** Moottorin lämpenemä ja konvektion aiheuttaman ilmavirran suurin nopeus eri ympäristön lämpötiloissa. Näissä simuloinneissa konvektiokerrointa ei oltu erikseen määrätty, vaan se määräytyi simuloitavan fysiikan mukaan.

Häviöteho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin lämpenemä (K)	Moottorin lämpötila (°C)	Konvektion aiheuttaman ilmavirran suurin nopeus (m/s)
186,6	-20	82,2	62,2	0,507
186,6	-10	84,2	74,2	0,508
186,6	0	86,2	86,2	0,508
186,6	10	88,1	98,1	0,508
186,6	20	90	110	0,508
186,6	30	92	122	0,507
186,6	40	94	134	0,506

Simulointituloksista, nähdään, että moottorin simuloitu lämpenemä kasvaa aina noin kaksi kelviniä jokaista ympäristön lämpötilan 10 asteen nousua kohti. Tuloksista huoma-

taan myös, että moottorista siirtyvän lämmön aikaansaama ilmavirran suuruus pysyy lähes vakiona. Syynä tälle on todennäköisesti se, että vaikka lämpenemä kasvaa hiukan ympäristön lämpötilan mukana, se ei kasva riittävästi, jotta ilmavirran nopeus kasvaisi. Simulointitulokset moottorin ilmavirtauksen suuruudesta ympäristön lämpötilassa 20 °C on esitetty kuvassa 19. Kuvasta näkyy kuinka moottorin ilmavirtauksen nopeus kasvaa moottorin alareunasta kohti yläreunaa siirryttäessä ja suurin nopeus muodostuu suoraan moottorin päälle.



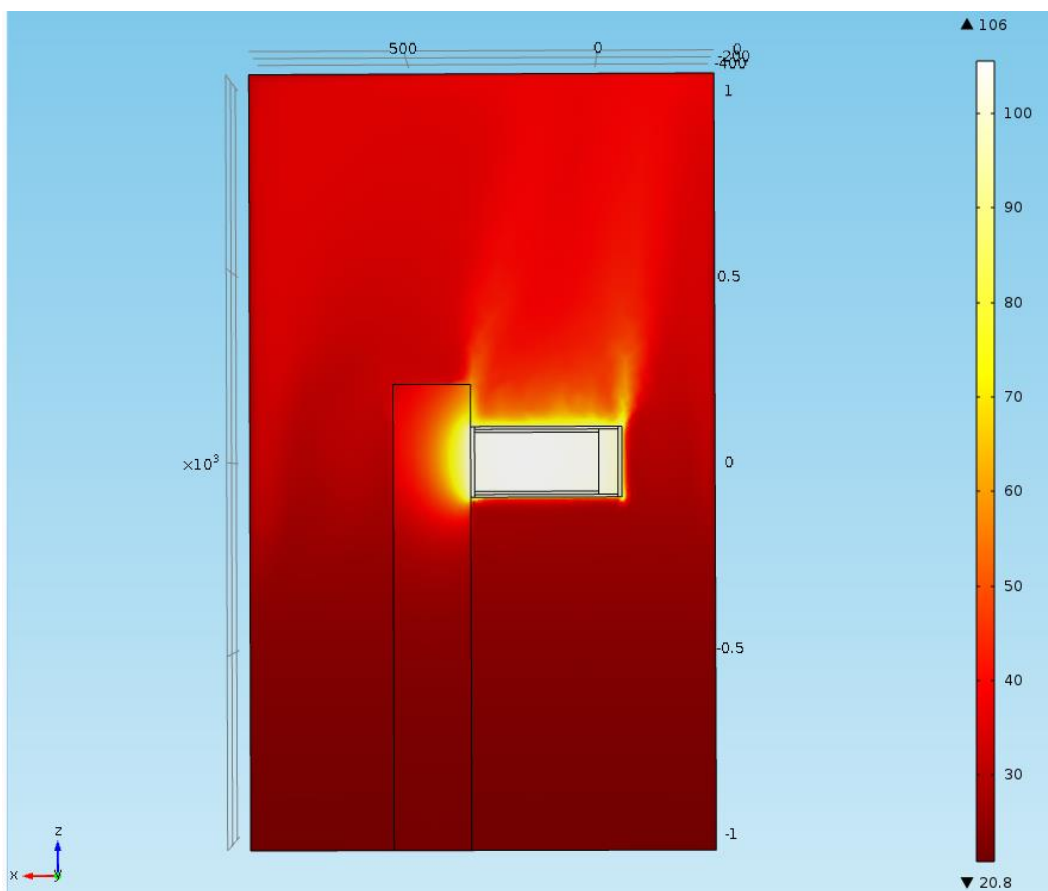
**Kuva 19.** Simuloitu konvektion aikaansaaman ilmavirran nopeus ympäristön lämpötilan ollessa 20 °C. Suurimmillaan ilmavirran suuruus on mallissa 0,508 m/s. Simuloinnissa konvektioeroin määrätty simuloitavan fysiikan mukaan.

Simulointituloksista on mahdollista tarkastella moottorin yksittäisten pisteiden lämpötiloja. Niistä havaitaan, että johtuminen metalleista toiseen on tehokasta ja moottorin rungon lämpötila eroaa staattorin lämpötilasta ainoastaan muutamia asteita. Simuloinneissa, joissa ympäristön lämpötila oli 20 °C, oli moottorin lämpötila suurimmillaan keskellä, staattoria 110 °C. Moottorin rungon lämpötilat vaihtelevat hieman sijainnista riippuen.

Päätylevyn yläreunan lämpötila moottorin päässä, joka on ilmassa, on 107,5 °C ja saman päätykilven alareunan lämpötila on 106,7 °C. Vastaavat lukemat päätykilvestä moottorin tukirakenteen puolelta ovat yläreunasta 108,3 °C ja alareunasta 107,4. Tästä nähdään se, että päätylevyn tuoma lisäpinta-ala tehostaa konvektiivista lämmönsiirtoa moottorin ilmassa olevassa päässä. Keskellä moottoria rungon päällä aivan rungon pinnassa lämpötila on 108,9 °C ja lähestyttäessä päätylevyjä lämpötila lähestyy ilmoitettuja päätylevyjen yläreunan lämpötiloja. Tästä voidaan päätellä, että johtumalla tukirakenteeseen siirtyvä lämpö laskee moottorin lämpötilaa 0,6 °C, mutta johtumalla siirtyy vähemmän lämpöä kuin toisesta päästä vapaalla konvektiolla.

#### 5.4 Lämpenemän kannalta optimaalinen runkorakenne

Moottorista tehtiin lisäksi simulointeja, joilla oli tarkoitus saada sileärunkoisen moottorin jäähtymisestä lisää tietoa. Jotta moottorin lämpenemä saataisiin pieneneväksi, on moottorin jäähdyttävää pinta-alaa kasvatettava. Yksi menetelmä kasvattaa jäähdyttävää pinta-alaa on kasvattaa rungon pituutta, jolloin vältetään myös hankalasti puhdistettavat kohdat moottorissa. Suunnittelussa on vain huomioitava rakenteen mekaaninen kestävyys. Rungon pituuden kasvattamisesta tehtiin kolme simulointia lisäämällä rungon pituuteen 5, 10 ja 15 cm staattoripaketin pituuden pysyessä samana. Pituus lisättiin moottorin N-päähän eli moottorin päätykilven ja staattorin välille jäi simulointimallissa ilmaväli. Simuloinnit tehtiin ympäristön lämpötilassa 20 °C ja simulointimalli vastasi moottorin rungon pituutta lukuun ottamatta simulointimallia, jossa moottorin tukirakenne on otettu huomioon. Simulointimallin staattorin ja päätykilven väli N-päässä on esitetty kuvassa 20. Moottorin päätykilven ja staattorin väliin jääväksi materiaaliksi määritettiin ilma.



**Kuva 20.** Moottorin simulointimalli, jossa moottorin rungon pituutta on kasvatettu 5 cm staattorin pituuden pysyessä ennallaan.

Simuloinnit, joissa moottorin pituutta on kasvatettu, tehtiin kaikki ympäristön lämpötilassa 20 °C. Moottorin lämpenemä ja ilmavirtauksen suuruus moottorin pinnalla on esitetty taulukossa 8. Tuloksissa moottorin lämpötila ja lämpenemä tarkoittaa staattorin kuuminta kohtaa. Vertailun vuoksi tuloksissa on mukana myös simulointi, jossa moottorin rungon pituutta ei ole kasvatettu yhtään. Tuloksista nähdään, että moottorin rungon lämpenemä laskee 3–4 astetta, aina kun moottorin pituutta kasvatetaan 5 cm. Moottorin lämpötilan ollessa pienempi, myös konvektiivisen lämmönsiirron aikaansaama ilmavirta pienenee. Moottorin rungon pituutta kasvattamalla 5 cm kasvaa moottorin rungon jäähdyttävä pinta-ala aina 258,9 cm<sup>2</sup>. On tärkeä huomata, että rungon pituuden kasvattaminen ei kuitenkaan kasvata moottorin kokoa ilman virtaussuunnassa.

**Taulukko 8.** Moottorin rungon pituuden kasvattamisen vaikutus moottorin lämpenemään. Ympäristön lämpötila simuloinneissa oli 20 °C.

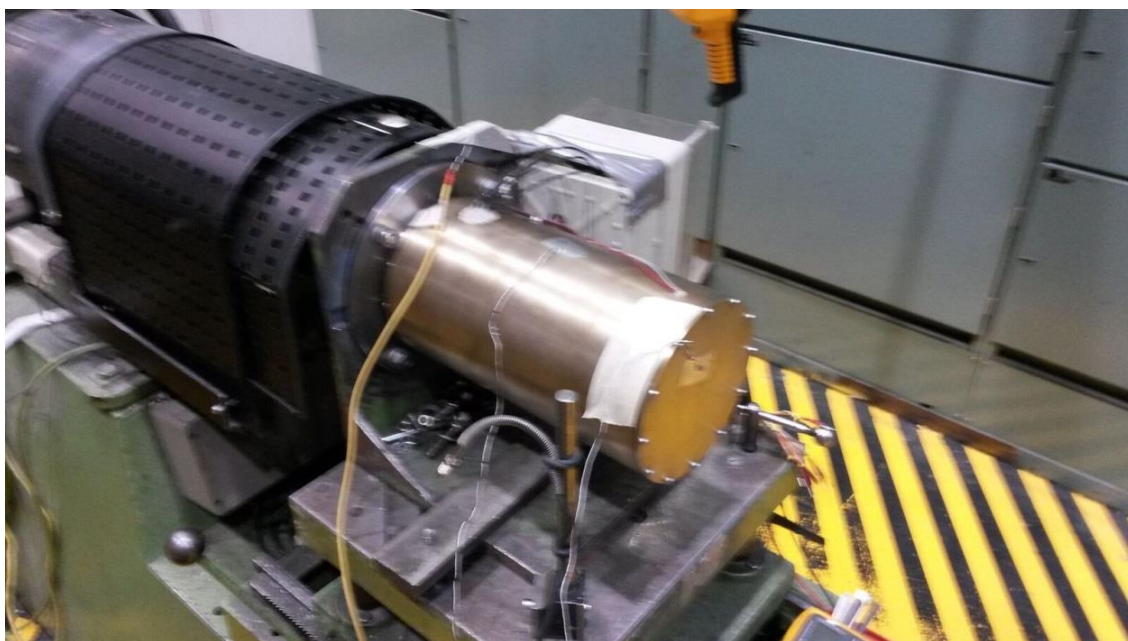
<b>Häviöteho (W)</b>	<b>Ylimääräinen runkon pituus (cm)</b>	<b>Moottorin lämpenemä (K)</b>	<b>Moottorin lämpötila (°C)</b>	<b>Konvektion aiheut- taman ilmavirran suurin nopeus (m/s)</b>
186,6	0	90	110	0,508
186,6	5	86	106	0,495
186,6	10	83	103	0,461
186,6	15	79,3	99,3	0,464

## 6 MOOTTORIN LÄMPENEMÄN MITTAUS JA VERTAILU ERI MENETELMIEN KESKEN

Tässä luvussa esitellään moottorin lämpenemän mittaustulokset ja verrataan niitä eri menetelmillä laskettuihin ja simuloituihin tuloksiin. Moottorista mitattiin lämpenemä sille etukäteen arvioidulla nimellisteholla 1,5 kW. Näiden mittausten aikana kokeiltiin myös mitata vapaan konvektion aikaansaaman ilmavirran suuruutta. Lisäksi moottorista mitattiin häviöt, jotta saadaan selvyys, kuinka lähellä moottorin häviöt ovat laskettuja arvoja. Koska häviöt ja mittaolosuhteet erosivat selkeästi simulointitilanteesta, on tässä luvussa tehty myös lisäsimulointeja, joissa olosuhteet ja häviöt vastaavat tarkemmin mittaustilannetta ja yritetty määrittää todellinen lämmönsiirtokerroin tämän kaltaiselle runkorakenteelle. Tällä määritetyllä lämmönsiirtokertoimella on myös simuloitu moottorin lämpenemää muuttuvilla häviöillä.

### 6.1 Moottorin lämpenemäajot

Moottorin rungon lämpenemää mitattiin kolmesta eri pisteestä ulkoisilla antureilla sekä moottorin sisälle asennetuilla antureilla. Antureita oli sijoitettu moottorin rungon päälle ja yksi kumpaankin moottorin päähän päätykilpien päälle. Anturit kiinnitettiin moottorin runkoon alumiiniteipillä. Moottorin sisäiset anturit oli asennettu moottorin kumpaankin päähän kääminpäiden päälle. Lämpötila-anturit oli kytketty suoraan piirturiin, joka piirsi anturien mittaamista lämpötiloista käyrän. Moottorin akseli kytkettiin momenttiakseliin, josta momenttianturi mittasi moottorin momenttia. Momentin ja moottorin mittaustulosten mittaamien sähköisten suureiden avulla on mahdollista mitata eri parametreja, joista voidaan tarkastella moottorin sähköistä käyttäytymistä. Moottorin mittaustulokset on havainnollistettu kuvassa 21.



**Kuva 21.** Moottorin lämpenemän mittausjärjestelyt.

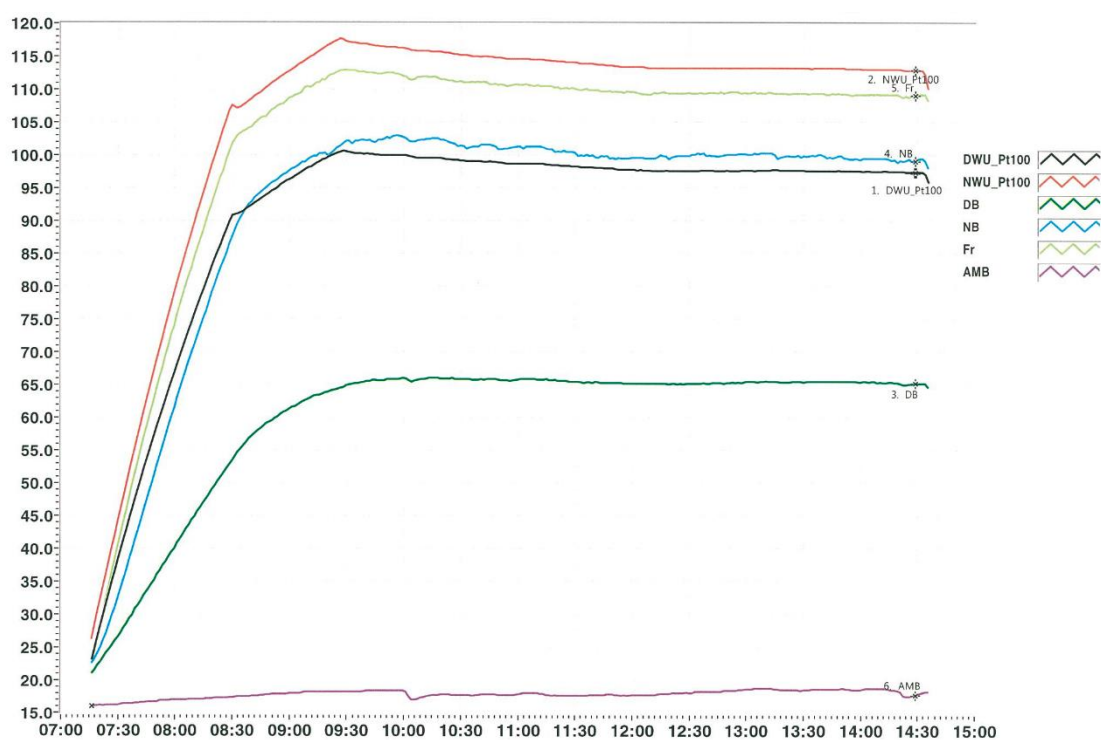
Moottorin lämpenemän aiheuttamaa ilman virtausta yritettiin mitata lämpenemäajojen yhteydessä moottorin rungon sivulta, jotta voitaisiin selvittää kuinka lähellä moottorin aikaansaaman ilmavirran virtausnopeus on simuloitua tilannetta. Käytetyllä mittarilla, Testo measuring kit 452 (Testo 2016), ei kuitenkaan pystytty luotettavasti mittaamaan vapaan konvektion aikaansaamia matalia virtausnopeuksia ja laite näytti ilmavirtauksen nopeudeksi moottorin rungon lämpötilasta riippumatta 0,7–0,8 m/s. Ilmavirran suuruus oli tämän suuruinen jopa ennen moottorin käynnistystä, joten käytetty mittari ei sovellu näin matalille virtausnopeuksille. Tuloksista ei voi päätellä vapaan konvektion aikaansaaman ilmavirran virtausnopeutta.

Moottorin lämpenemä oli tarkoitus mitata 1,5 kW nimellisteholla ja kahdella eri kuormitusasteella, 75 % ja 50 % osakuormalla, aloittaen osakuormamittauksista. Näistä ei kuitenkaan ehditty mitata lämpenemäajoja loppuun asti yhden työpäivän aikana ja koekentän henkilöstö työskenteli ainoastaan aamuvuorossa. Lisäksi tässä mittauspisteessä ei ollut tarvittavaa automaatiota ja suojausta siihen, että mittauksen olisi voinut jättää päälle yöksi. Koska osakuormilla moottori ei saavuttanut loppulämpenemäänsä, eivät tulokset ole käyttökelpoisia. Niistä kuitenkin havaittiin, että moottori lämpeni hitaasti kohti lop-

pulämpenemää. Jotta saatiin täydellä kuormalla moottorin lämpenemä mitattua, moottoria ajettiin ensin isommalla kuormalla kohti loppulämpenemää, josta se alennettiin vaiheittain nimellistehoonsa 1,5 kW.

Moottoria ajettiin nimellistehon lämpenemääjossa aluksi kolmen kilowatin teholla, josta se alennettiin hetkeksi 2 kilowatin teholle ennen nimellisteholle siirtymistä. Eri mittauspisteiden lämpötilat on esitetty kuvassa 22. Anturien sijainti on moottorissa seuraava:

- Fr -anturi on kiinnitetty moottorin rungon päälle keskelle runkoa.
- DB -anturi (*drive end bearing*) on kiinnitetty moottorin päätykilpeen lähelle kohtaan, josta moottorin akseli tulee ulos.
- NB -anturi (*non-drive end bearing*) on kiinnitetty keskelle N-pään päätykilpeä.
- DWU\_Pt100 ja NWU\_Pt100 -anturit ovat moottorin sisällä moottorien käämien päiden pinnalle asennettuna.
- AMB -anturi mittaa ympäristön lämpötilaa vähän matkan päästä moottoria.



**Kuva 22.** Moottorin lämpenemääjossa päivän aikana mitatut lämpötilat (°C).

Kuvasta voidaan nähdä, että moottori ehti hieman ylittää loppulämpötilan, koska nimelisteholle siirryttäessä lähes kaikki lämpötilat lähtevät laskemaan. Kuvaajat ovat mittauslaitteiston piirturista. Erikseen mitatut pisteet on esitetty taulukossa 9. Aikavälillä 9.40–14.13 moottorin lämpötila on tasaantunut kohti loppulämpötilaa ilman valvontaa, joten siltä väliltä ei ole tarkkoja mittauspisteitä. IEC 60034-1 -standardin (2010) mukaan moottorin käämin keskimääräinen loppulämpenemä mitataan alle 5 kW moottoreille 30 s kulluttua moottorin pysäyttämistä.

**Taulukko 9.** Lämpötilat eri mittauspisteissä sekä teho, jossa mittaus on suoritettu. Moottorin teho on vaihdettu 1,5 kilowattiin välittömästi 9.40 mitatun pisteen jälkeen.

<b>Klo</b>	<b>Amb (°C)</b>	<b>Pout (kW)</b>	<b>Runko (°C)</b>	<b>NB (°C)</b>	<b>DB (°C)</b>	<b>DWU (Pt100) (°C)</b>	<b>NWU (Pt100) (°C)</b>
7:29	16	3,064	22,2	22,5	20,9	22,8	25,9
7:59	16,7	3,012	59,5	48,3	33,9	54,5	63,7
8:29	17,2	3,017	89,7	76,1	47,4	80,3	95,2
8:42	17,4	3,01	100,6	86,5	53	86,5	106,2
8:46	17,5	1,976	102,9	89,5	54,7	89,5	107,2
9:18	18	2,026	109,3	98,5	62,1	98,5	113,9
9:40	18,2	1,999	112,9	101,4	64,5	101,4	117,7
14:13	18,5	1,53	109,1	99,2	65,3	99,2	113,1
14:43	17,8	1,544	109	99,1	65,1	99,1	112,8
14:46	18,1	1,511	109,1	99,4	65,1	99,4	112,8

Moottorin mittaustuloksista nähdään, että moottorin rungon loppulämpötila nousee arvoon 109,1 °C, jolloin rungon loppulämpenemä ympäristön lämpötilassa 18,1 °C, oli 91 °C viimeisessä mittauspisteessä. Mittauksista nähdään, että kummankin päätylevyn lämpötila on pienempi kuin rungon lämpötila keskellä moottorin runkoa. Moottorin N-päässä loppulämpötila on 99,4 °C, eli 9,6 °C vähemmän. Tämä selittyy päätykilven tuomalla lisäpinta-alalla, joka tehostaa konvektiivista jäähtymistä. Lisäksi päätykilpi ei koske suoraan moottorin staattoriin. Moottorin D-pään rungon lämpötila on huomattavasti matalampi kuin muu runko, ainoastaan 65,1 °C. Tämä on 34,3 °C viileämpi kuin N-pään päätylevy ja 44,0 °C viileämpi kuin moottorin rungon keskikohta moottorin päällä. Tämä selittyy sillä, että moottori on kiinnitetty rautaiseen tukirakenteeseen, joten D-pään

jäähtymistä tehostaa rautainen kiinnityspalkki. Lisäksi akselin kiinnityksen kautta momenttiakseliin siirtyy hieman lämpöä.

Moottorin rungon eri päiden lämpötilaerot eivät näy yhtä selkeästi käämin lämpötiloihin. N-pään käämin päästä mitattu loppulämpötila 112,8 °C ja D-pään käämin päästä mitattu loppulämpötila 99,4 °C eroavat toisistaan ainoastaan 13,4 °C. Kun tarkastellaan käämin päiden välisiä lämpötiloja, huomataan, että moottorin rungon epätasainen jäähtyminen vaikuttaa myös moottorin sisäiseen lämpötilaan. Lämpö kuitenkin tasaantuu paremmin moottorin sisällä, koska lämpö siirtyy moottorin sisällä pääsääntöisesti johtumalla metallista toiseen ja jäähtyminen tapahtuu ainoastaan rungon kautta. Kun verrataan lämpötilaeroja moottorin eri päiden päätylevyissä ja käämien päissä huomataan, että D-pään ja sen tukirakenteen kautta siirtyy ilmaan enemmän lämpöä kuin keskeltä runkoa ja N-päästä. D-pään tehokkaamman lämmönsiirron vaikutus moottorin käämien lämpötiloihin on kuitenkin pienempi kuin sen vaikutus päätylevyn pinnan lämpötiloihin.

IEC-standardin mukainen moottorin käämien vastusmittauksen mukainen lämpenemä on 98,8 K. Tämä on suurempi arvo kuin mittaushjelman antamat tulokset käämien päiden loppulämpenemille: D-päässä 79,2 K ja N-päässä 94,7 K. Näistä tuloksista voidaan päätellä, että D-pään kautta siirtyvä lämpö on hyvin merkittävä asia moottorin jäähtymisessä, mutta on myös huomioitava, että moottorin kuumin kohta ei ole N-pään päätylevyissä. Myös N-pään päätylevy tehostaa konvektiivista jäähtymistä, jolloin rungon ja käämin korkeimmat lämpötilat ovat keskellä moottoria ja voidaan myös olettaa, että käämi on kuumin keskellä moottoria. D-pään tukirakenteen kautta tapahtuva lämmönsiirto vaikuttaa kuitenkin merkittävästi moottorin jäähtymiseen ja se on suositeltavaa ottaa huomioon simuloinneissa. On tärkeää huomata, että Comsol-mallien simuloitu lämpenemä ei niiden yksinkertaisuuden vuoksi vastaa moottorin standardin mukaista mitattua lämpenemää vaan pikemminkin rungon lämpenemää.

Moottorista mitattiin häviöt standardin IEC-60034-1 (2010) mukaan ja niitä verrattiin laskettuihin häviöihin. Mitatut sekä lasketut häviöt on esitetty taulukossa 10. Häviöistä nähdään, että laskettujen ja mitattujen häviöiden jakauma on hyvin erilainen. Häviöiden syntytapojen eroja merkittävämpi tekijä on kuitenkin kokonaishäviöiden suuruusero. Mitatut

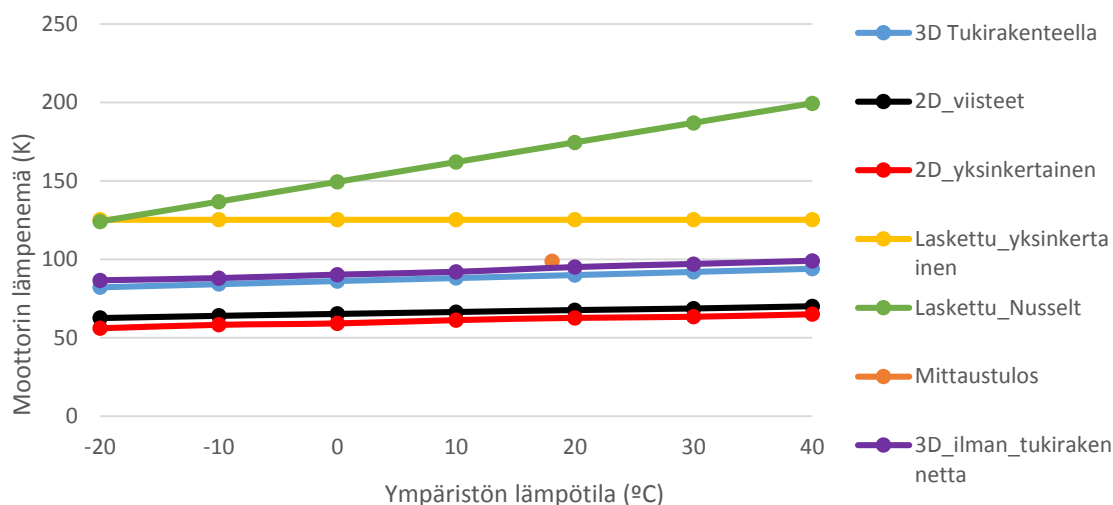
häviöt olivat 55,5 W suuremmat kuin lasketut häviöt, mikä tarkoittaa prosentuaalisesti 29,7 % suurempia häviöitä.

**Taulukko 10.** Moottorin lasketut ja mitatut häviöt.

	<b>Staattorin kuparihäviöt (W)</b>	<b>Roottorin kuparihäviöt (W)</b>	<b>Rau- tahäviöt (W)</b>	<b>Mekaan- iset häviöt (W)</b>	<b>Lisähäviöt (W)</b>	<b>Häviöt yhteensä (W)</b>
Mitatut	25,53	33,13	98,20	18,60	66,63	242,1
Lasketut	64,40	23,90	49,77	16,00	32,84	186,6

## 6.2 Eri laskenta- ja simulointimenetelmillä saatujen tuloksien vertailu mittaustuloksiin

Moottorin lämpenemää laskettiin ja simuloitiin monella eri tavalla, ennen moottorin lopullisia mittauksia. Eri menetelmiä kokeiltiin, jotta löydettäisiin mahdollisimman yksinkertainen tapa arvioida sileärunkoisten moottorien jäähtymistä ilman tuuletusta. Eri tavoilla laskettu ja simuloitu moottorin lämpenemä eri ympäristön lämpötiloissa on esitetty kuvassa 23. Kuvaan on lisätty vertailuun myös mittaustulos moottorin lämpenemästä. Tuloksista nähdään, että eri menetelmien välillä on paljon eroja. Syynä tälle on todennäköisesti se, että laskut ja simuloinnit perustuvat korrelaatiokaavoihin. Eri korrelaatiokaavoilla lasketut tulokset perustuvat aina mittaustuloksiin ja laskennan helpottamiseksi yksinkertaistavat varsinaista ongelmaa, jolloin niiden tarkkuus huononee.



**Kuva 23.** Moottorin laskettu, simuloitu ja mitattu lämpenemä. Kuvaajassa käyrä ”3D” vastaa kolmiulotteista simulointimallia, käyrä ”2D\_viisteet” vastaa kaksiulotteista simulointimallia, jossa staattorin viisteet on otettu huomioon ja käyrä ”2D\_yksinkertainen” vastaa kaksiulotteista simulointimallia ilman staattorin viisteitä. Lasketuista tuloksista käyrä ”laskettu\_yksinkertainen” vastaa yhtälöillä 2 ja 3 laskettua lämpenemää, ”laskettu\_Nusselt” vastaa yhtälöillä 5, 7, 8, 9, 10 ja 11 laskettuja tuloksia ja 3D\_ilman\_tukirakennetta vastaa kolmiulotteista simulointimallia, jossa moottorin tukirakennetta ei ole otettu huomioon. Mittaustulos on moottorin käämien IEC-standardin mukainen moottorin lämpenemä.

Kuvasta nähdään, että kaikissa lasketuissa ja simuloituissa tuloksissa on eroa mitattuihin tuloksiin ja tulokset eroavat myös keskenään. Lasketut tulokset määrittävät moottorin rungon lämpötilan kummallakin menetelmällä väärin. Käyttämällä yhtälöitä 2 ja 3 ei oteta huomioon ympäristön lämpötilaa, kun määritetään konvektiokertoimen suuruus. Lisäksi laskettu lämpenemä on liian iso verrattuna simulointitulokseen. Yhtälöillä 5, 7, 8, 9, 10 ja 11 määritetty lämpenemä eroaa simuloinneista ja mittaustuloksesta. Syynä laskettujen tuloksien suurelle lämpenemälle on todennäköisesti se, että niissä ei oteta johtumista huomioon. Kaikki simulointimallit määrittävät konvektiokertoimen liian suureksi, jolloin lämpenemä on hiukan pienempi kuin mittauspisteessä.

Mittaustuloksissa lämpenemä oli lähimpänä kolmiulotteisen mallin lämpenemää, mutta tarkasteltaessa mittaustuloksia tarkemmin huomattiin, että mitatut häviöt erosivat lasketuista häviöistä ja mittaolosuhteet erosivat simulointitilanteesta. Mitatut häviöt olivat

suuruudeltaan 242,1 W, kun lasketut häviöt olivat 186,6 W. Lisäksi mittauksissa huomattiin, että metallinen tukirakenne, johon moottori on kiinnitetty, laski merkittävästi moottorin lämpötilaa moottorin toisessa päässä. Alun perin simuloinneissa valittiin tukirakenteen materiaaliksi tiili, jonka kuviteltiin vastaavan melko huonoa lämmönjohdettua, jotta saadaan määritettyä moottorin jäähtymisen tilanteessa, jossa johtumalla siirtyy heikosti lämpöä esimerkiksi metalliseen tukirakenteeseen verrattaessa.

### 6.3 Mittausten jälkeiset lisäsimuloinnit

Mittauksien tilanteessa ja kolmiulotteisessa simulointimallissa oli moottorin jäähtymisen kannalta erilaiset olosuhteet. Mittauksissa moottorin tukirakenne oli teräslevy ja simuloinneissa tukirakenteen materiaali oli tiili. Johtumalla tapahtuva lämmönsiirtyminen tehostaa huomattavasti moottorin jäähtymistä mittauksien tilanteessa ja tällöin tuloksia ei pystytä luotettavasti vertailemaan muiden tuloksien kanssa. Lisäksi mitatuissa ja lasketuissa häviöissä oli merkittävä ero. On siis perusteltua tehdä lisäsimulointeja, jotta voidaan varmistaa, että Comsolilla voidaan mallintaa riittävän tarkasti oikean käyttötilanteen lämpenemä, mikäli lasketut häviöt ovat lähellä oikeita häviöitä. Lisäsimuloinneissa oli tarkoitus saada simuloitu lämpenemä vastaamaan moottorin rungon lämpenemää riittävällä tarkkuudella.

Lisäsimuloinneissa moottorin malliin lisättiin teräksinen tukirakenne, johon moottori kiinnitetään laipalla ja moottorin sisäiseen rakenteeseen lisättiin sentin ilmaväli staattorin ja päätylevyn väliin, jotta malli vastaisi myös tältä osin tarkemmin oikeaa tilannetta. Tukirakenteen mitat ja materiaali vastaavat koekentällä olevaa tukirakennetta, mutta simulointimallissa ei ole otettu huomioon esimerkiksi tukirakenteen yläreunassa kulmissa olevia pieniä viisteistä ja rakenteen alareunassa olevia pieniä tukia, joiden vaikutus tukirakenteen jäähdyttävään kokonaispinta-alaan on hyvin pieni. Tukirakenteen korkeus on 34 cm ja leveys 28 cm, ja kappaleen pituus pohjana olevalla levyllä on 30,7 cm. Levyn paksaus on kaikkialla 1,8 cm. Tukirakenteen jäähdyttävä pinta-ala, josta on vähennetty moottorin päätylevyn pinta-ala ja sen pohjan pinta-ala, on 0,27 m<sup>2</sup> eli se tuo merkittävästi jäähdyttävää pinta-alaa lisää rungon pinta-alaan lisäksi. Toki tukirakenteen lämpötila ei

ole yhtä suuri tukirakenteen alareunassa kuin rungon lämpötila, joten siitä ei siirry konvektiivisesti myöskään yhtä paljoa lämpöä.

Metallisen tukirakenteen alla olevan palkin materiaalina on tiili, jolloin palkin jäähtytävä vaikutus saadaan pieneksi. Simuloinnin muut määrittymiset vastaavat täysin ympäristön lämpötilassa 20 °C kolmiulotteisen mallin simulointeja, joissa tukirakenne on otettu huomioon.

Simuloinneissa moottorin N-pään päätylevyn lämpötila keskellä päätylevyä on noin 92,4 °C, D-pään päätylevyn lämpötila on noin 84 °C, ja rungon yläreunan lämpötila keskeltä moottoria on 92 °C. Mallissa ilman suurin virtausnopeus on 0,458 m/s. Simulointimallin lämpötilan tulokset on esitetty kuvassa 24. Mallista nähdään, että metallisen tukirakenteen kautta johtuu lämpöä ja se tehostaa lämmönsiirtoa merkittävästi. Moottorin tukirakenteen yläreunan lämpötila on 80,5 °C ja saman pään alareunan lämpötila 53,5 °C. Kuvasta nähdään myös, että kummassakin moottorin päässä konvektiivinen lämmönsiirto on tehokkaampaa kuin keskellä moottoria, koska nouseva ilma on lämpimämpää moottorin päädyissä.



**Kuva 24.** Moottorin simulointitulokset metallisella tukirakenteella ympäristön lämpötilassa 20 C. Moottorin sisäiseen rakenteeseen on lisätty ilmaväli staattorin ja päätylevyjen välille. Metallinen tukirakenne on mallissa tiilipalkin päällä.

Simulointituloksista huomataan, että simulointimallin lämpenemä jää huomattavasti pienemmäksi kuin mitattu rungon lämpenemä. Syynä tälle on todennäköisesti se, että Comsol määrittää konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen liian isoksi, jolloin jäähtyminen on liian tehokasta verrattuna käytännön tilanteeseen. Tästä johtuen tehtiin vielä simulointeja, joissa lämmönsiirtokertoimen suuruus määritetään manuaalisesti. Kokeilemalla eri arvoja, yritetään määrittää lämmönsiirtokertoimelle arvo, jolla simulointitulostusta vastaisi mitaustulosta mahdollisimman tarkasti. Lämmönsiirtokertoimen määrittäminen tehdään Comsolin konvektiivista lämmönsiirtoa käsittelevässä osiossa muuttamalla *Heat transfer in solids*- osion *Heat flux*- kohtaan lämmönsiirtomuodoksi käyttäjän oma valinta, jolloin simuloija pääsee määrittämään lämmönsiirtokertoimen arvon. Simulointimallin lämmönsiirtokerroin oli tarkoitus saada määritettyä kokeilemalla lähelle tilannetta, jolloin tulokset vastaavat mitattuja tuloksia ja lämmönsiirtokerroin saadaan selville. Simuloinnit tehtiin ympäristön lämpötilassa 20 °C ja simulointimallin muut parametrit vastasivat mallia,

jossa moottorin tukirakenne oli otettu huomioon.

Lähdettäessä hakemaan lämmönsiirtokerroimen oikeaa arvoa sen suuruudeksi kokeiltiin ensin  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Simuloinnista huomattiin, että lämmönsiirtokerroimen arvolla  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  moottorin lämpenemä pieneni tilanteeseen nähden, jossa Comsol määrittä lämmönsiirtokerroimen automaattisesti perustuen mallissa käytettyjen materiaalien aineominaisuuksiin ja lämpötiloihin. Mallissa moottorin kuumin lämpötila oli  $91,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , mikä oli  $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$  viileämpi, kuin kuvassa 22 esitetystä mallissa, jossa lämmönsiirtokerroin määritettiin simuloinnin määritetyn lämmönsiirron ja aineominaisuuksien mukaan. Tämän jälkeen lämmönsiirtokerroimen arvoja alettiin laskea askeleittain kohti arvoa, jolla tulokset ovat mahdollisimman lähellä simuloituja tuloksia. Tulokset eri lämmönsiirtokerroimen arvoilla on esitetty taulukossa 11. Tuloksissa lämpötila on mallin korkein lämpötila.

**Taulukko 11.** Simuloitu moottorin lämpenemä ja ilman suurin virtausnopeus eri lämmönsiirtokerroimen arvoilla. kun häviöteho oli  $242,1 \text{ W}$ .

Häviöteho (W)	Lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ )	Moottorin lämpenemä (K)	Moottorin lämpötila ( $^\circ\text{C}$ )	Konvektion aiheut- taman ilmavirran suurin nopeus (m/s)
242,1	5	71,5	91,5	0,461
242,1	4	72,9	92,9	0,457
242,1	3	75,3	95,3	0,451
242,1	2	80	100	0,446
242,1	1,5	85	105	0,444
242,1	1,3	88	108	0,444
242,1	1,2	89	109	0,444
242,1	Cmsolin sisäinen lämmönsiirtokerroin	74,4	94,4	0,458

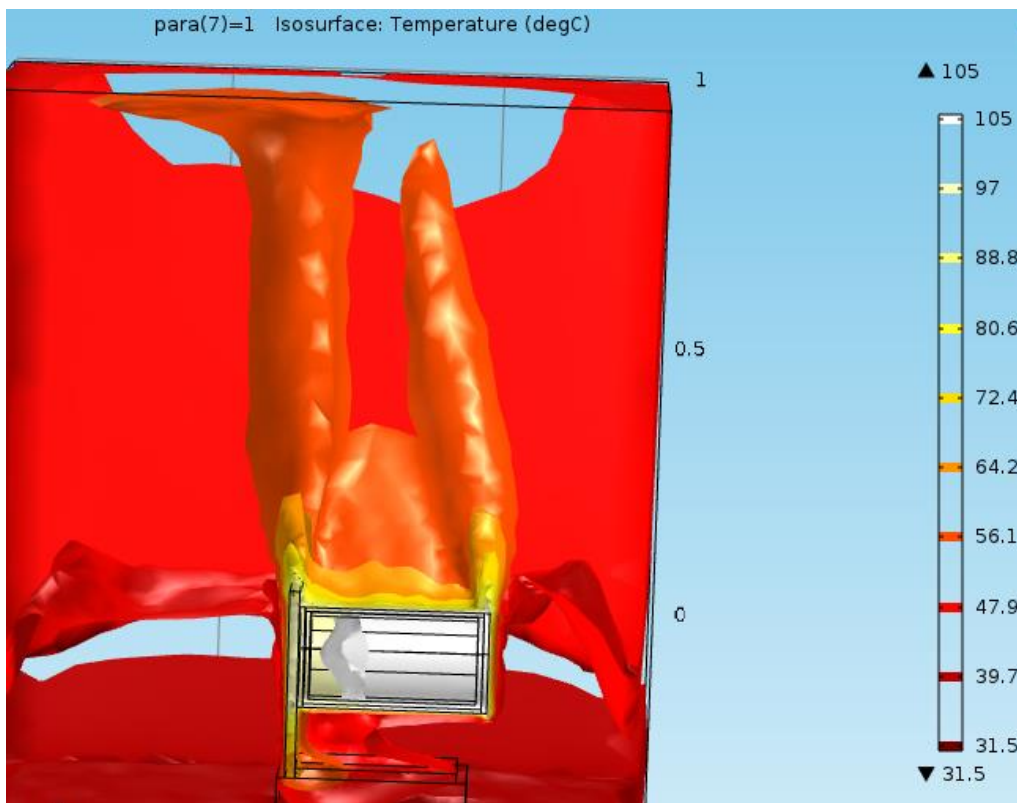
Tuloksista huomataan, että todellinen lämmönsiirtokerroin mittauksissa on lähimpänä simuloituja tuloksia lämmönsiirtokerroimen ollessa 1,2. Tällä lämmönsiirtokerroimella mitatun moottorin rungon lämpenemä vastaa simuloitua moottorin korkeinta lämpötilaa hy-

vin tarkasti, kun mitattu lämpötila viimeisessä mittauspisteessä on 109,1 °C ja simuloinneissa 109 °C. Mittaustilanteessa ympäristön lämpötila oli 18,1 °C ja simuloinneissa 20 °C. Tässä tilanteessa simulointimallin lämpötilat ovat myös lähellä mitattuja lämpötiloja käämien päissä: simuloinneissa N-pään lämpötila moottorin sisällä oli 109,2 °C, kun käämin päässä mitattu tulos oli 112,8 °C ja D-pään lämpötila moottorin sisällä oli 105,1 °C, kun käämin päässä mitattu tulos oli 99,4 °C. D-pään päätylevyn lämpötila on hyvin lähellä lämpötilaa moottorin sisällä staattorin päissä kaikissa simuloinneissa, mikä ei vastaa mitattua tilannetta, jossa D-pään päätylevyn pinta jäähtyi huomattavasti tehokkaammin. Yksi merkittävä tekijä, joka aiheuttaa edellä mainittuja pieniä eroja, on moottorin sisäisen rakenteen yksinkertaistaminen yhdeksi kappaleeksi.

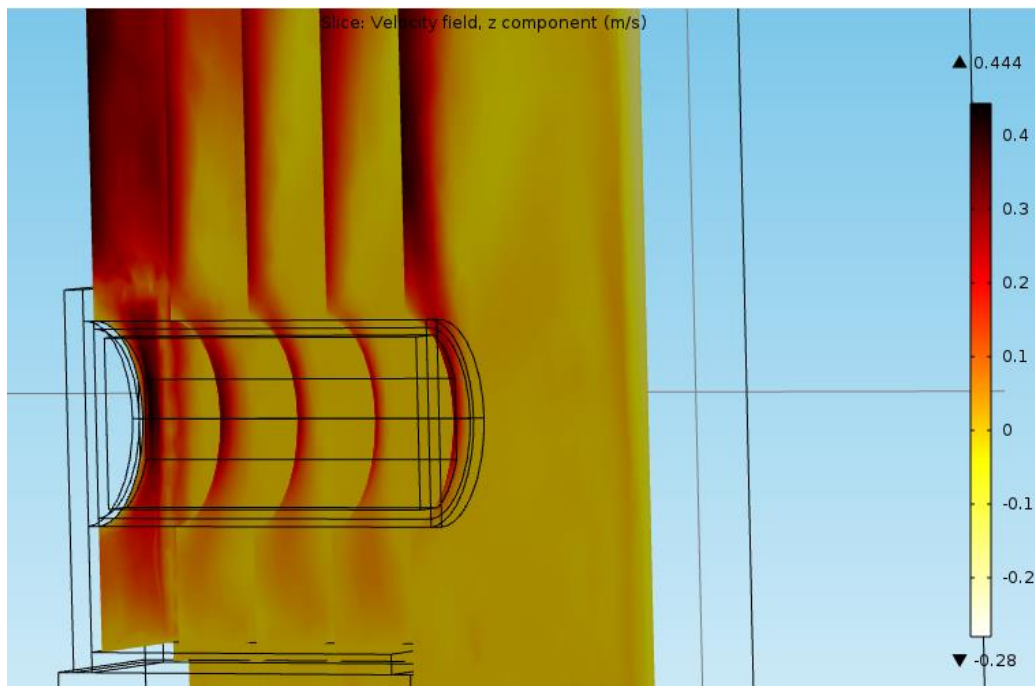
Tällä tavalla tehdyissä simuloinneissa moottorin sisälämpötilat vastaavat mitattua tulosta riittävän tarkasti konvektiokertoimen ollessa ainoastaan 1,2 W/m<sup>2</sup>·K. Tulos on odotettua matalampi ja esimerkiksi kirjallisuudessa annettuja arvoja pienempi. Simulointien tuloksena tällä lämmönsiirtokertoimella saadut lämpötilat on esitetty kuvassa 25 ja mallin isotermit on esitetty kuvassa 26. Niistä nähdään selkeästi johtumalla tukirakenteeseen siirtyvä lämpö. Kuvasta 26 on myös nähtävissä selkeästi laajemman jäähdyttävän pinta-alan aikaansaama parempi lämmönsiirtyminen siitä, että isotermit ovat ilman virtaussuuntaan pidempiä. Ero on selkeä kun verrataan sitä kuvassa 18 esitetyn simulointimallin isotermeihin, jossa moottori oli kiinni tiilipalkissa. Ilmavirtauksen mallissa on esitetty kuvassa 27. Kuvasta nähdään, kuinka tukirakenteesta siirtyvä lämpö muodostaa ilmavirtauksen jo moottorin alapuolella ja ilmavirtaus tehostuu moottorin sivuilla. Kuvasta huomataan myös kuinka moottorin tukirakenteen pystysuora osa tehostaa lämmönsiirtoa ja saa aikaan selkeästi isomman ilmavirtauksen kuin keskellä moottoria.



**Kuva 25.** Lämpötilat simulointimallissa, jossa on teräksinen tukirakenne ja konvektio kertoimen suuruudeksi on määritetty  $1,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .



**Kuva 26.** Simuloidut isotermit eli alueet, joiden rajalla lämpötila on sama kolmiulotteisessa simuloinnissa, jossa on teräksinen tukirakenne ja konvektiokertoimen suuruudeksi on määritetty  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .



**Kuva 27.** Ilmavirtaus mallissa, jossa on teräksinen tukirakenne ja konvektiokertoimen suuruudeksi on määritetty  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Simulointituloksista on tärkeää huomata, moottorin simuloitu lämpenemä vastaa mitattua moottorin rungon lämpenemää eikä standardin mukaista staattorin käänin lämpenemää. Tuloksista voidaan päätellä, että moottorin johtumalla siirtyvä lämpö on merkittävässä osassa moottorin jäähtymisessä, jolloin konvektion osuus jäähtymisestä pienenee. Toinen syy konvektiivisen lämmönsiirron pienuudelle verrattuna kirjallisuuteen on todennäköisesti moottorin tukirakenteen sileä ja pyöreä muoto. Vapaalla ilmajäähdytyksellä jäähdytettävissä kappaleissa on yleensä jäähdytysripoja tai kappaleet ovat ilman virtaussuunnassa pidempiä, jolloin ilman virtausnopeus kasvaa kappaleen pinnalla lisäten jäähdytystehoa.

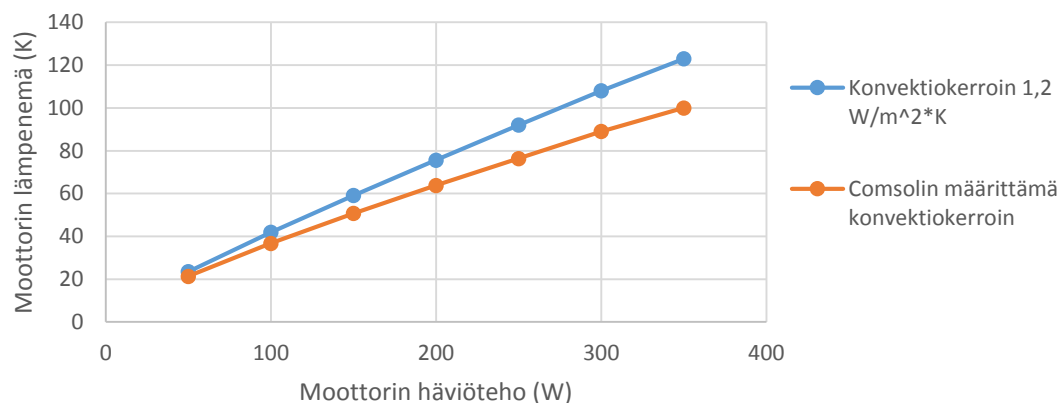
Mittausten perusteella määritetyllä lämmönsiirtokertoimella tehtiin lisäsimulointeja erisuuruksilla häviöillä, jotta niiden perusteella saataisiin parempi käsitys siitä, kuinka moottori lämpenee häviöiden muuttuessa. Simulointitulokset on esitetty taulukossa 12. Vertailun vuoksi simulointeja tehtiin myös niin, että Comsolin konvektiokerrointa ei määritetty manuaalisesti. Näistä simuloinneista voidaan tarkastella häviöiden vaikutusta moottorin lämpenemään ja verrata tuloksia simulointeihin, jossa konvektiokerroin on mittauksiin perustuva  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Lisäsimuloinnit Comsolin määrittämällä konvektiokertoimella on esitetty taulukossa 13. Moottorin lämpenemä suhteessa häviötehoon on kummassakin simulointitilanteessa esitetty kuvassa 28.

**Taulukko 12.** Moottorin simuloitu lämpenemä muuttuvalla häviöteholla. Konvektiokerroin suuruus simuloinneissa oli  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Häviöteho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin lämpenemä (K)	Moottorin lämpötila (°C)	Konvektion aiheuttaman ilmavirran suurin nopeus (m/s)
50	20	23,5	43,5	0,273
100	20	41,9	61,9	0,336
150	20	59,1	79,1	0,379
200	20	75,6	95,6	0,416
250	20	92	112	0,448
300	20	108	128	0,476
350	20	123	143	0,5

**Taulukko 13.** Moottorin simuloitu lämpenemä muuttuvalla häviöteholla Comsolin sisäisellä konvektio kertoimella.

Häviöteho (W)	Ilman lämpötila (°C)	Moottorin lämpenemä (K)	Moottorin lämpötila (°C)	Konvektion aiheuttaman ilmavirran suurin nopeus (m/s)
50	20	21,3	41,3	0,283
100	20	36,7	56,7	0,349
150	20	50,7	70,7	0,394
200	20	63,8	83,8	0,43
250	20	76,4	96,4	0,463
300	20	89	109	0,49
350	20	100	120	0,511



**Kuva 28.** Moottorin simuloitu lämpenemä suhteessa moottorin häviöihin konvektio kerroinella  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ja Comsolin sisäisellä lämmönsiirtokertoimella.

Tuloksista nähdään, että pienillä häviöillä moottorin simulointitulokset eivät eroa toisistaan juurikaan. Häviöiden kasvaessa Comsol määrittää konvektion hiukan tehokkaamaksi kuin mittauksissa, mikäli konvektio kerrointa ei määritetä manuaalisesti. Jos si- leärunkoista moottoria kuormitetaan enemmän kuin lasketuilla häviöillä, saattaa konvek-

tiokertoimella  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  määritetty lämpenemä olla isompi kuin todellisessa tilanteessa, koska konvektiokerroin paranee hiukan moottorin lämpenemän kasvaessa. Todennäköisesti moottoria ei kuitenkaan jatkuvassa käytössä tulla käyttämään isommalla teholla kuin  $1,5 \text{ kW}$ .

#### 6.4 Ohjeita ja ajatuksia sileärunkoisen moottorin suunnittelua varten

Mittausten ja simulointien perusteella mallin jäähtymisen kannalta merkittävä jäähdyttävä tekijä on moottorin tukirakenne. Mikäli moottorin runko ja tukirakenne ovat kumpikin metallia, siirtyy lämpö moottorin rungosta hyvin tukirakenteeseen. Metallinen tukirakenne johtaa lämpöä edelleen kiinnityksen kautta eteenpäin ja se lisää merkittävästi jäähdyttävää pinta-alaa myös konvektiivisessa lämmönsiirrossa. Säteilemällä siirtyvä lämpö on moottorin jäähtymisen kannalta hyvin pienessä roolissa, mikäli rungon materiaali on metallia, jonka pintaa ei ole maalattu, mutta se tehostaa moottorin jäähtymistä hieman. Konvektiokerroin pystyttiin määrittämään moottorille ja tukirakenteelle suuntaa-antavasti niin, että tulokset vastasivat simulointituloksia suhteellisen tarkasti.

Uusien sileärunkoisten moottorien lämpenemän määrittäminen onnistuu siis suuntaa antavasti Comsolilla. Tulosten oikeellisuuden takia on ehdottaman tärkeää käyttää simuloinneissa tukirakennetta, joka vastaa mahdollisimman tarkasti oikeaa käyttöön tulevaa tukirakennetta tai tukirakennetta, jolla moottorin lämpenemä mitataan sekä materiaaliltaan että pinta-alaltaan. Mallin parametroinnissa on suositeltavaa määrittää konvektiokerroin manuaalisesti arvoon  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , jolloin tämän kokoisella moottorin rungolla simuloitujen lämpötilat olivat hyvin lähellä mitattuja rungon lämpötiloja. Suunnittelussa on huomioitava, että staattorikämin lämpötila on isompi kuin simuloitu lämpenemä, joka kuvaa rungon lämpenemää. Mikäli moottorin rungon halkaisija muuttuu paljon, on suositeltavaa varmistaa lämmönsiirtokertoimen suuruus vertaamalla simuloituja tuloksia uuden prototyypin mittauksiin.

Suunnittelussa on myös hyvä ottaa huomioon, että moottorin lämpenemä kasvaa hieman ympäristön lämpötilan kasvaessa. Simuloinneissa, joissa käytettiin Comsolin sisäistä

lämmönsiirtokerrointa ja moottorin tukirakenteen materiaali oli tiili, mallin lämpenemä kasvoi aina noin kaksi astetta jokaista kymmenen asteen lämpötilan nousua kohden. Pienemmällä lämmönsiirtokertoimella lämpenemä saattaa kasvaa jopa enemmän. Kasvun suuruutta ei voida kuitenkaan ilman mittauksia varmentaa.

Moottorin lämpenemälle on määritetty IEC-60034-1 -standardissa (2010) lämpöluokkia, jossa moottorin käämien keskimääräiselle lämpenemälle on asetettu yläraja. Lämpenemäluokassa B, moottorin käämien keskimääräinen lämpenemä vastusmittauksella mitattuna saa olla 80 kelviniä ympäristön lämpötilan ollessa 40 °C ja lämpenemäluokassa F 105 kelviniä. Yleensä ABB:n vakio moottorit suunnitellaan pysymään lämpenemäluokassa B, mutta niissä on F-luokan eristys. Mikäli moottorin lämpenemäluokaksi määritetään F eristysluokan ollessa F, jätetään marginaalia sallittuun lämpenemään vielä 10 K, jotta voidaan varmistaa, että eristys kestää. Tällöin suurin sallittu lämpenemä on siis 95 K ja moottorin mitattu lämpenemä 98,8 K ylitti tämän rajan. (IEC60034-1 2010.)

Moottorin suunnittelussa on jatkossa määritettävä teho, jolla moottoria voidaan kuormittaa lämpenemäluokan rajoissa. Mitatulle prototyypille määritetty nimellisteho oli liian suuri, jotta moottorin lämpenemä pysyisi yleisesti suunnittelussa F-luokalle sallittujen rajojen sisällä. Tarvittaessa moottorin eristys voidaan jatkossa suunnitella lämpenemäluokkaan H, jolloin standardin mukainen suurin sallittu lämpenemä on 125. Suunnittelussa on kuitenkin hyvä jättää enemmän marginaalia, jotta hetkellisten ylikuormien tai jännitteen ja taajuuden vaihteluiden aikana moottorin eristys kestää. Lisäksi on varmistettava, että moottorin muut osat, kuten vaikkapa laakerit ja läpivientien hartsaus, soveltuvat korkeaan lämpötilaan.

Suunnittelussa on myös tärkeä huomioida, että moottorin jäähtyminen on tehokkainta moottorin päissä. Moottorin lämpenemä, joka on mitattu puolen minuutin jälkeen moottorin pysäyttämisestä, on isompi kuin käämien lämpötilat moottorin päissä moottorin pysäyttämishetkellä. Kun moottorissa ei ole jäähdytysripoja, moottori saattaa lämmitä keskeltä enemmän kuin tavallisella jäähdytysrivillisellä moottorin runkorakenteella. Vaikka moottorin lämpenemä olisi sallituissa rajoissa, saattaa moottorin käämin kuumien kohta olla käämin keskimääräistä lämpötilaa yli 10 astetta kuumempi, joka on suunnittelussa

huomioon otettu marginaali moottorin kuumimmalle kohdalle. Seuraavaan prototyyppiin olisi hyvä asentaa lämpötila-anturit moottorin käämin keskelle, jotta voidaan varmistua moottorin riittävän tasaisesta jäähtymisestä.

Tässä työssä mitattua prototyyppiä ei oltu optimoitu sähköisesti häviöiden suhteen. Käytetyn moottorin sähköinen rakenne on käytössä perinteisellä runkorakenteella moottorissa, jossa on tuuletin ja jäähdytysrivat, jolloin moottoria voi kuormittaa paremman jäähtymisen takia enemmän. Sileärunkoisella rakenteella moottoria ei voida kuormittaa yhtä paljon ja jatkossa moottorin sähköinen rakenne olisi mahdollista optimoida häviöiden suhteen paremmin. Tällä saadaan moottorin lämpenemää laskettua, jolloin moottori käy viileämpänä ja sitä voidaan kuormittaa enemmän lämpenemäluokan sallimissa rajoissa.

## 7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Moottorin jäähtyminen vapaalla konvektiolla on riippuvainen monista asioista. Tilanteessa, jossa sekä moottorin runko ja tukirakenne ovat metallia, on johtumalla siirtyvä lämpö merkittävässä osassa koko lämmönsiirrossa. Metallinen tukirakenne lisää myös merkittävästi jäähdyttävää pinta-alaa, josta lämpö siirtyy konvektiivisesti. Lämmönsiirto konvektiivisesti onkin tämän kaltaisella runkorakenteella vähäisempää ja konvektiokerroin pienempi kuin kirjallisuudessa annetut arvot. Lisäksi moottorin kiiltävä metallinen runko siirtää huonosti lämpöä säteilemällä. Sileä metallinen moottorin runko ilman jäähdytysripoja ja tuuletusta on jäähdytyksen kannalta haasteellinen ratkaisu, mutta se vastaa elintarviketeollisuuden hygienian vaatimuksiin.

Simuloinneista huomattiin, että konvektion aikaansaama ilmavirtaus pysyi melko hitaana kaikissa simuloinneissa. Ilmavirran suurin nopeus simulointimalleissa oli suuruusluokkaa 0,4–0,5 m/s. Kaikista simulointituloksista oli nähtävissä, että ilman virtaus pysyi laminaarisena, koska virtaus muodostui selkeästi rungon pinnalle ja ilmavirtaus kiersi moottorin yläreunaan melko lähellä moottoria, josta se jatkoi nousua. Laminaarisella virtauksella jäähdytysteho on pienempi kuin turbulenttisella virtauksella. Moottorin rungon pyöreä rakenne ilman jäähdytysripoja ja lyhyt karakteristinen pituus pitivät virtauksen laminaarisena.

Moottorin mittauksista havaittiin, että moottorin mitattu lämpenemä 98,8 kelviniä lähes tyy standardin mukaista F-luokan lämpenemää ja ylittää lämpenemärajan, jota suunniteltaessa käytetään moottoreille, joissa on F-luokan eristys. Moottorin mitatut häviöt erosivat lasketuista häviöistä merkittävästi. Myös mittausolosuhteet erosivat merkittävästi simulointitilanteesta. Tästä johtuen alkuperäisten simulointimallien lämpenemää ei voitu pitää luotettavana verrattaessa sitä mitattuun tulokseen ja oli syytä tehdä lisäsimulointeja. Lisäsimuloinneissa moottorin tukirakenne vaihdettiin vastaamaan koekentän tukirakennetta ja häviötehoksi vaihdettiin moottorin mitatut häviöt. Tästä mallista huomattiin, että Comsolin sisäinen konvektiokerroin oli liian iso verrattuna mitattuun tilanteeseen nähden, koska simulointimallissa moottorin lämpenemä mallin kuumimmassa kohdassa 74,4 kelviniä oli huomattavasti pienempi kuin mitattu tulos. Jotta simuloinneista saatava tulos

vastaa mitattua tulosta, oli mallin konvektiokerroin määritettävä manuaalisesti arvoon  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , jossa tulokset vastaavat mitattuja arvoja. Simulointimallin lämpenemä vastaa rungon, lämpenemää melko tarkasti, mutta varsinainen staattorikäänin lämpenemä on isompi kuin simulotu rungon lämpenemä.

Kolmiulotteisen mallin simuloinneista erityyppisillä tukirakenneratkaisuilla huomattiin, kuinka suuri merkitys tukirakenteella oli moottorin jäähtymiselle. Simuloinneissa metalliseen tukirakenteeseen siirtyi johtumalla lämpöä, mikä lisäsi jäähdyttävää pinta-alaa merkittävästi. Tukirakenteen alareunaan johtuva lämpö sai myös aikaan sen, että ilmavirtaus alkoi muodostua jo moottorin rungon alapuolella ja tämän seurauksena virtausnopeudet sekä rajakerros kasvoivat hiukan moottorin rungon läheisyydessä, verrattuna tilanteeseen, jossa moottori oli kiinni tiilipalkissa. Tämä tehostaa konvektiivista lämmönsiirtoa moottorin rungosta. Tukirakenteen pystysuora osa, jossa moottori on kiinnitettynä, jäähdyttää myös tehokkaasti moottoria, koska sen pituus on virtaussuunnassa isompi kuin moottorin rungon.

Kolmiulotteisten mallien laskenta kestää keskimäärin 2–3 tuntia ja kaksiulotteisten mallien laskenta kymmenistä sekunneista minuutteihin. Koska tukirakenne vaikutti merkittävästi tulosten oikeellisuuteen, ei laskenta-ajaltaan nopeampia kaksiulotteisia malleja voida hyödyntää suunnittelussa.

Moottorin tukirakenteen jäähdyttävän vaikutuksen hyödyntämistä voisi tutkia tarkemmin. Tukirakenteen erilaisella suunnittelulla saataisiin laskettua moottorin lämpenemää. Simulointien ja mittausten perusteella huomattiin, että johtumalla siirtyvä lämpö vaikutti merkittävästi moottorin jäähtymiseen. Mittaustuloksissa moottorin käänin päiden lämpötilat olivat D-päässä  $99,4 \text{ }^\circ\text{C}$  ja N-päässä  $112,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Eroa oli siis 13 astetta. Yksi tapa, jolla moottorin jäähtymistä olisi mahdollista tehostaa, olisi suunnitella tukirakenne niin, että moottori kiinnitettäisiin kummastakin päästä laippakiinnityksellä samaan tukirakenteeseen, jolloin lämpöä johtuisi tukirakenteen kautta kummastakin päädystä. Tämä myös todennäköisesti tasaisi moottorin käänien päiden lämpötiloja. Lisäksi moottorin runko ja sen tukirakenne ovat yhä helposti pestävissä. Toteutuksena tämä tuo selkeästi enemmän jäähdyttävää lisäpinta-alaa kuin moottorin rungon pituuden kasvattaminen.

Toinen jatkotutkimusaihe voisi olla vesijäähdytteinen sileärunkoinen moottori. Tällä tavalla voitaisiin parantaa sileärunkoisen moottorin jäähtymistä, jolloin moottorin tehokkuutta voidaan parantaa. Sileärunkoista moottoria voidaan kuormittaa vähemmän kuin perinteisellä runkorakenteella olevaa moottoria. Nyt sileärunkoisen moottorin kanssa joudutaan valitsemaan isompi moottori kuin perinteisellä rakenteella, mikä nostaa sileärunkoisen moottorin kustannuksia verrattuna saman tehoiseen jäähdytysrivalliseen moottoriin. Käyttämällä moottorissa vesijäähdytystä saataisiin moottori jäähtymään paremmin. Käytännössä jäähdytysnesteen pumpun ja liitäntöjen rakenteet tulisi suunnitella myös helposti puhdistettaviksi.

Comsol Multiphysics® on käyttökelpoinen työkalu moottorin lämpenemän arvioinnissa, kun jatkossa suunnitellaan sileärunkoisia moottoreita. Simuloinneissa on tärkeää käyttää konvektio kertoimen arvona  $1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , jolla saatiin tarkimmat tulokset. Tällä arvolla moottorin simuloitujen lämpötilat olivat hyvin lähellä moottorin mitattuja lämpötiloja moottorin sisällä käämin päissä. Käämin keskimääräinen lämpötila on kuitenkin korkeampi, koska moottori on kuumin moottorin keskellä. Moottorin häviöt on hyvä arvioida hieman yläkanttiin ainakin pienillä moottoreilla, joiden lasketuissa häviöissä saattaa olla eroa verrattuna todellisiin arvoihin. Mikäli seuraavat sileärunkoisten moottorien prototyytit eroavat runkokooltaan on hyvä varmistaa mittauksilla ja simuloinneilla todellinen konvektio kertoimen suuruus myöhempää suunnittelua varten.

## LÄHDELUETTELO

- Aarniovuori, Lassi (2010). *Induction motor drive energy efficiency – simulation and analysis*. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 396. 130 s. ISBN 978-952-214-963-3. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/63346/isbn%209789522149633.pdf?sequence=1>.
- ABB (2011). *Uudet suojausluokat herättävät huomiota. Compact-ohjauskalusteet, suojausluokat IP67 ja IP69K*. [Viitattu 9.3.2015]. Saatavissa: [http://www08.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/c3c0b2076850542ec12575010041fd16/\\$file/Tiedote%20Compact%20IP67%20ja%20IP69K%20.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/c3c0b2076850542ec12575010041fd16/$file/Tiedote%20Compact%20IP67%20ja%20IP69K%20.pdf)
- Cengel, Yunus A. & Michael A. Boles (2011). *Thermodynamics – an engineering approach*. 7. Painos. New York: McGraw-Hill. 978 s. ISBN 978-007-131111-3.
- Cengel, Yunus A. (2002). *Heat transfer – a practical approach*. 2. painos. New York: McGraw-Hill. 932s. ISBN: 0-07-245893-3.
- Comsol (2015). *Comsol reference manual*. Comsol 5.1 version sisäinen dokumentti.
- Fagerholm, Nils-Erik (1986). *Termodynamiikka* 1. painos Tampere: Tammer-Paino 382s. ISBN: 951-671-327-0.
- IEC 60034-1 (2010). *Rotating electrical machines*. Part 1: Rating and performance. 144 s.
- Incropera, Frank P, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine (2007). *Fundamentals of mass and heat transfer*. 6. Painos. New York: John Wiley & Sons. 997 s. ISBN: 978-0-471-45728-2.

- International Copper Association (2015). *ICA Antimicrobial Copper Logo and Cu+ Mark. Conditions of Use*. [Viitattu 6.4.2016]. Saatavissa: <http://www.antimicrobial-copper.org/sites/default/files/orig/media/83761/amc-conditions-of-use.pdf>.
- Karvinen, Timo (2015) *Lämmönsiirron ja virtauksen simulointi Comsolilla*. Avoin luento ja koulutus Vaasan yliopistolla 29.10.2015.
- Kaunismäki, Ville (2015). *Tehomuuntajan apusähkötoteutus kuivamuuntajalla – Tekninen toimivuus ja taloudellinen kannattavuus*. Vaasan yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 69s.
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto (2014). *Lämmönsiirron perusteet – Konvektion erityismuodot*. Luento 6 luentomateriaali. [Viitattu 7.4.2016]. Saatavissa: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bh20a0300/luennot>.
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto (2015a). *Terminen laitesuunnittelu – Konvektio*. Luento 2 luentomateriaali. [Viitattu 7.4.2016]. Saatavissa: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot>.
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto (2015b). *Terminen laitesuunnittelu – Ilmajäähdytys vapaalla konvektiolla ja säteilemällä*. Luento 5 luentomateriaali. [Viitattu 7.4.2016]. Saatavissa: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot>.
- Marttila, Pasi (2015a) Comsol. Sähköpostikeskustelu, huhtikuu 2015.
- Marttila, Pasi (2015b) Comsol. Sähköpostikeskustelu, elokuu 2015.
- Pyrhönen, Juha, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová (2008). *Design of rotating electrical machines*. 1. Painos. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd. 512 s. ISBN: 978-0-470-69516-6.

Sayma, Abdalnaser (2009). *Computational fluid dynamics*. 123 s. ISBN 978-87-7681-430-4. Saatavissa: <http://bookboon.com/en/computational-fluid-dynamics-ebook>.

Testo (2016). *Yrityksen verkkosivut*. [Viitattu 20.4.2016] Saatavissa: <https://www.testo.com/>.

United States environmental protection agency (2009). Test method for the continuous reduction of bacterial contamination on copper alloy surfaces. [Viitattu 6.4.2016]. Saatavissa: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1003RIK.PDF?Dockey=P1003RIK.PDF>.

VTT (2002). *Laittehygieniä elintarviketeollisuudessa* [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.3.2015]. Saatavissa: [www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2002/P480.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2002/P480.pdf).