

Ville Mattila

Sähköajoneuvon moottorin nestejäähdytyksen suunnittelu

Opinnäytetyö

Kevät 2020

SeAMK Tekniikka

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Auto- ja työkonetekniikan suuntautumisvaihtoehto



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: SeAMK Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Ville Mattila

Työn nimi: Sähköajoneuvon moottorin nestejäähdytyksen suunnittelu

Ohjaaja: Hannu Ylinen

Vuosi: 2020

Sivumäärä: 44

Liitteiden lukumäärä: 6

Sähköajoneuvojen ajomoottoreiden jäähdytys ilmalla on havaittu toimivaksi vaihtoehdoksi, mutta nykyään sähkömoottorien koon pienentyessä ja tehon kasvaessa jatkuvasti, alkaa riittävän tehokkaan ilmajäähdytyksen toteuttaminen olla haastavaa. Tämän vuoksi nykyisten sähköajoneuvojen ajomoottoreissa käytetään lähes poikkeuksetta nestejäähdytystä, jolla voidaan toteuttaa pieneenkin moottoriin tehokas jäähdytys.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä alustavaa tutkimusta ja suunnittelua sähkömoottoripyörän vannemoottorin nestejäähdytyksestä, jotta yritys pystyisi niiden pohjalta jatkamaan suunnittelua myöhemmin. Lisäksi työn tavoitteena oli saada aikaan suunnitellun nestejäähdytyksen simuloinneilla sellaisia tuloksia, joista olisi yritykselle hyötyä. Opinnäytetyö toteutettiin RMK Vehicle Corporation Oy:lle, jolla oli tarvetta alustavalle suunnitelmalle sähkömoottoripyörän nestejäähdytyksestä.

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin vannemoottorille sopiva lämmönvaihdin, josta tehtiin 3D-mallinnuksia ja simulointeja. Lisäksi teoria osioissa tutustuttiin eri sähkömoottorityyppeihin, lämmönsiirtoon ja lämmönvaihtimeen sekä sähköajoneuvoissa käytettyihin jäähdytysmenetelmiin. Simuloinneilla saatiin tuloksia lämmönvaihtimen lämmönsiirrosta sekä lämmönvaihtimen läpi virtaavan nesteen virtausnopeuksista. Lämmönsiirron osalta tulokset todettiin luotettaviksi laskurin avulla.

Avainsanat: vannemoottori, lämmönvaihdin, nestejäähdytys, 3D-mallinnus, simulointi

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Ville Mattila

Title of thesis: Planning of the liquid cooling for the motor of the electric vehicle

Supervisor: Hannu Ylinen

Year: 2020

Number of pages: 44

Number of appendices: 6

Using air cooling in motors of electric vehicles has been found to be a functional cooling method. However, it has become challenging to implement air cooling to electric motors, because they are continuously becoming smaller and more powerful. Liquid cooling is efficient enough to be used even in small but powerful motors. Because of that, liquid cooling is nowadays used in most electric vehicles.

The aim of the thesis was to conduct an initial study and planning of liquid cooling for the hub motor of an electric motorcycle so that the client company would be able to continue the planning in the future. Furthermore, the goal of the thesis was to get valid and useful results for the company by simulating the liquid cooling system. The thesis was executed for RMK Vehicle Corporation Oy which had a need for an initial plan of the liquid cooling for their electric motorcycle.

In the thesis a heat exchanger suitable for the hub motor was designed and simulations and 3D modelling were made of the heat exchanger. The theory chapter covered heat transfer, heat exchangers and different cooling systems on a general level. By simulating the heat exchanger, results from the heat transfer and flow rates of the flowing liquid was obtained.

Keywords: hub motor, heat exchanger, liquid cooling, 3D modelling, simulation

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	5
Käytetyt termit ja lyhenteet	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta	8
1.2 Työn tavoite ja tarkoitus	8
1.3 Työn rakenne	9
1.4 Yritysesittely	9
2 SÄHKÖAJONEUVON MOOTTORI	10
2.1 Harjallinen tasavirtamoottori.....	10
2.2 Induktiomoottori.....	11
2.3 Harjaton kestopagneettimoottori	13
2.4 Reluktanssimoottori.....	16
3 LÄMMÖNSIIRTO JA SÄHKÖMOOTTORIN JÄÄHDYTYS	20
3.1 Lämmönsiirto.....	20
3.2 Lämmönvaihdin.....	21
3.3 Jäähdytys ratkaisuja sähköajoneuvoissa	22
4 NESTEJÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU	26
4.1 Suunnittelu	26
4.2 Mallinnus.....	28
4.3 Simulointi	32
5 SIMULOINTIEN TULOKSET	34
5.1 Simulointi 6kW ja 400l/h suljettu nestekierto	35
5.2 Yhteenveto tuloksista.....	38
6 POHDINTA JA YHTEENVETO	40
LÄHTEET	42
LIITTEET	44

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo-

Kuva 1. Harjallisen tasavirtamoottorin periaatekuva	11
Kuva 2. Induktiomoottorin pääkomponentit	12
Kuva 3. Induktiomoottorin poikkileikkauskuva	13
Kuva 4. Harjattoman kestopagneettimoottorin rakenne	14
Kuva 5. PM BLDC vannemoottorin rakenne	15
Kuva 6. SRM:n rakenne, 3 vaihetta ja 6/4 napaa	17
Kuva 7. 4-vaiheinen ja 8/6-napainen rakenne	17
Kuva 8. 3-vaiheinen ja 12/10-napainen monihampainen rakenne	18
Kuva 9. Eri roottorityyppejä reluktanssimoottorissa	18
Kuva 10. Kestomagnetoitu SRM, PMSMR	19
Kuva 11. Ilman kierto EFC-moottorissa	23
Kuva 12. Märkä staattori	24
Kuva 13. Audi E-tron jäähdytysnestekierto moottorissa	27
Kuva 14. Nissan Leaf jäähdytysnestekierto moottorissa	27
Kuva 15. Konsepti jäähdytysnestekierto	28
Kuva 16. Lämmönvaihdin kokoonpano V1	29
Kuva 17. Lämmönvaihdin kokoonpano V1	30
Kuva 18. Pelkkä lämmönvaihdin V1	30
Kuva 19. Lämmönvaihdin kokoonpano V2	31
Kuva 20. Lämmönvaihdin kokoonpano V2	31

Kuva 21. Version 1 nestetilavuuden geometria.....	33
Kuva 22. Version 2 valmis nestetilavuuden geometria.....	33
Kuvio 1. Fluidin lämpötilan kuvaaja.....	36
Kuvio 2. Lämmönvaihtimen lämpötilan kuvaaja.	37
Taulukko 1. Laskuri lämpöteholle ja fluidin lämpötilan muutokselle	22
Taulukko 2. Eri sähköautoissa käytettyjä jäähdytysmenetelmiä.....	25
Taulukko 3. Simulointien tulokset.....	34
Taulukko 4. Suljetun nestekierron simuloinnin tuloksien luotettavuus.....	35

Käytetyt termit ja lyhenteet

Fluidi	Yleisnimitys väliaineelle, joissa rakenneosaset pystyvät liikkumaan vapaasti toistensa suhteen, pääasiassa nesteet ja kaasut.
Kypsä teknologia	Teknologia, joka on ollut tarpeeksi kauan käytössä, jotta suurin osa sen alkuperäisistä tai sille ominaisista ongelmista ja vioista on saatu osittain tai kokonaan korjattua.
PM	Permanent magnet, Kestomagneetti
PM BLDC	Permanent magnet brushless direct current motor, harjaton kestopagneettitasavirtamoottori
PMSM	Permanent magnet synchronous motor, kestopagneetti-tahtimoottori/ -synkronimoottori
SRM	Switched reluctance motor, kytkinreluktanssimoottori
SynRM	Synchronous reluctance motor, synkronireluktanssimoottori
Teho-/Vääntötiheys	Tehon tai väännön määrä tilavuuden yksikköä kohden, yksikkö W/m^3 tai Nm/m^3
Vannemoottori	Sähkömoottori, jossa roottori on staattorin ulkopuolella, mikä mahdollistaa renkaan kiinnityksen suoraan roottoriin.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Yrityksellä on tarve tehdä alustavaa tutkimusta ja suunnittelua sähkömoottoripyörän vannemoottorin nykyisen ilmajähdytyksen korvaamisesta nestejäähdytyksellä. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, millä eri tavoilla nestejäähdytys voidaan tässä tapauksessa toteuttaa. Lisäksi opinnäytetyössä tehdään lämmönvaihtimesta kaksi eri 3D-mallinnusta sekä muutamia simulointeja lämmönvaihtimen toiminnasta lämmön siirron ja nesteen virtausten osalta. Suunnittelussa keskitytään vain vannemoottorin lämmönvaihtimeen, eikä siten huomioida muita jäähdytysjärjestelmän komponentteja. Teoria osioissa tutustutaan sähkömoottorin eri tyyppeihin, yleistasolla lämmön siirtoon ja lämmönvaihtimeen sekä tutkitaan, millä tavoin ajomoottoreita jäähdytetään sähköajoneuvoissa.

1.2 Työn tavoite ja tarkoitus

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on etsiä tietoa yleisesti sähkömoottoreista, lämmönsiirrosta ja sähköajoneuvojen ajomoottoreiden jäähdytyksestä sekä suunnitella sähkömoottoripyörään nestejäähdytys vannemoottorin lämmönvaihtimen osalta. Lisäksi työn tarkoituksena on saada simuloimalla luotettavia tuloksia lämmönvaihtimen toiminnasta.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä alustavaa tutkimusta ja suunnittelua sähkömoottoripyörän vannemoottorin nestejäähdytyksestä, jotta yritys pystyy niiden pohjalta jatkamaan suunnittelua myöhemmin. Tavoitteena on myös saada lämmönvaihtimen simuloinneilla luotettavia tuloksia, joista on yritykselle hyötyä myöhemmin jäähdytyksen suunnittelussa.

1.3 Työn rakenne

Opinnäytetyön alussa luvussa kaksi käsitellään erityyppisiä sähkömoottoreita, joita käytetään sähköajoneuvoissa ajomoottoreina. Tämän jälkeen luvussa kolme kerrotaan yleisellä tasolla lämmönsiirtymisestä, lämmönvaihtimesta ja tutustutaan erilaisiin jäähdytysmenetelmiin, joita sähköajoneuvoissa käytetään. Teoriaosoiden jälkeen luvusta neljä alkaa varsinainen suunnitteluvaihe. Tässä luvussa tutkitaan eri toteutustapoja vannemoottorin nestejäähdytykselle sekä tehdään suunnitelmat kyseisen vannemoottorin lämmönvaihtimen osalta. Suunnitellusta lämmönvaihtimesta 3D-mallinnetaan kaksi eri versiota ja tehdään simulointeja sen lämmönsiirron, sekä nesteen virtauksien osalta. Luvussa viisi tarkastellaan simuloinneista saatuja tuloksia ja lopuksi luvussa kuusi analysoidaan opinnäytetyön kulkua ja toteutusta sekä pohditaan mitä on saatu aikaan ja mitä jäi tekemättä.

1.4 Yritysesittely

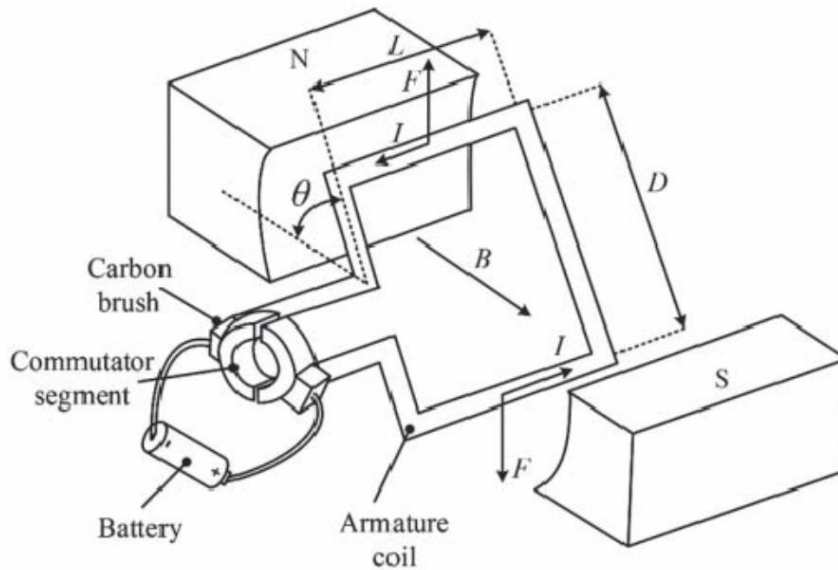
Tämä opinnäytetyö tehdään RMK Vehicle Corporation Oy:lle. Yritys on vuonna 2018 perustettu sähkömoottoripyörävalmistaja, jonka tuotanto- ja päätoimitilat sijaitsevat Seinäjoella. Yrityksen päähenkilöstöön kuuluu tällä hetkellä kahdeksan henkilöä. Ensimmäisen tuotantomallin Verge TS:n valmistus alkaa vuoden 2020 aikana.

2 SÄHKÖAJONEUVON MOOTTORI

2.1 Harjallinen tasavirtamoottori

Harjallinen tasavirtamoottori on ollut hyvin laajalti käytössä sähköajoneuvojen ajomoottorina. Sitä on käytetty erilaisissa sähköajoneuvoissa etujensa, kuten teknologian kypsyiden ja ohjauksen yksinkertaisuuden takia. Kuitenkin harjallisen tasavirtamoottorin ongelmia ovat muun muassa vaihtovirtamoottoreita huonompi hyötysuhde, matalampi tehopainosuhte ja suurempi huollon tarve. Näiden ongelmien takia nykyään sähköajoneuvoissa käytetään lähes poikkeuksetta vaihtovirtamoottoria tai harjatonta tasavirtamoottoria. (Chau 2015, 19.)

Perinteisen tasavirtamoottorin rakenne koostuu staattorista, roottorista ja kommutaattorista eli virrankääntäjästä (Chau 2015, 20). Tasavirtamoottorissa roottorin sähkökentän muutos saadaan aikaan vaihtamalla magneettien napaisuutta kommutaattorilla, joka harjallisessa moottorissa toimii mekaanisesti hiiliharjojen avulla ja harjattomassa sähköisesti, kun roottori on kestopagneetoitu. Kuluvien hiiliharjojen ja kommutaattorin takia harjallinen tasavirtamoottori vaatii enemmän huoltoa. Harjattomassa moottorissa kuluminen ja huollon tarve on vähäisempää, mutta sen toiminta on monimutkaisempaa tarvittavan ohjauselektronikan takia. (Motiva 3.6.2019, [viitattu 22.1.2020].) Kuvassa 1 näkyy harjallisen tasavirtamoottorin toimintaperiaate.



Kuva 1. Harjallisen tasavirtamoottorin periaatekuva (Chau 2015, 22).

2.2 Induktiomoottori

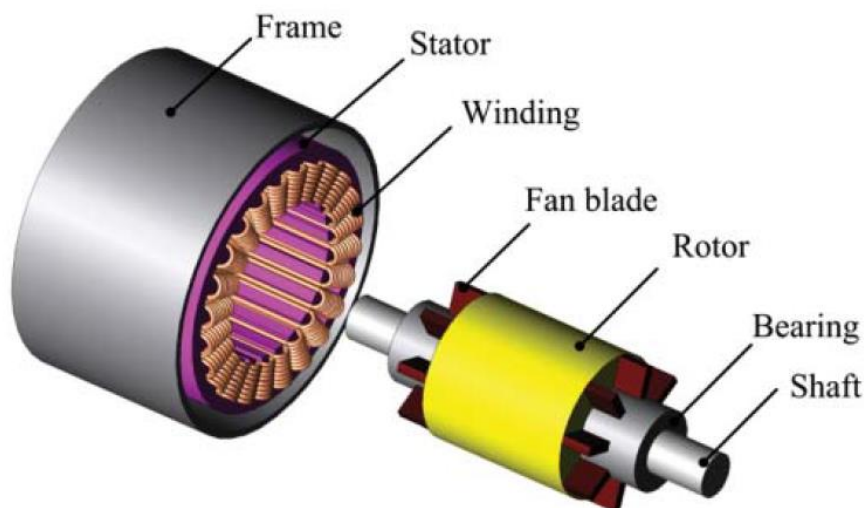
Induktiomoottorilla on ollut ja on nykyäänkin hyvin tärkeä rooli muun muassa tuotannossa ja muissa sovellutuksissa, joissa pyörimisnopeuden muuttaminen ei ole tärkeää. Kuitenkin hiljattain hyvien invertterien saatavuuden myötä, induktiomoottoria on alettu käyttämään paljon myös sovellutuksissa, joissa nopeuden säätöä tarvitaan, kuten sähköajoneuvoissa. (Hughes & Drury 2013, 141.) Esimerkiksi Tesla on käyttänyt ja osaksi käyttää vieläkin induktiomoottoria Model S ja -X autoissaan (Lee 24.4.2019, [viitattu 7.2.2020]).

Induktiomoottori toimii, kuten harjallinen tasavirtamoottori, mutta siinä virta siirtyy roottoriin induktion avulla, eikä kulje harjojen ja kommutaattorin kautta. Näin ollen staattorin käämitys ei pelkästään luo magneettikenttää, vaan myös välittää energiaa roottorille. Induktiomoottori toimii tasavirtamoottorista poiketen vaihtovirralla, useimmiten 3-vaihevirralla, sekä siinä magneettikenttä pyörii staattoriin nähden. (Hughes & Drury 2013, 141.)

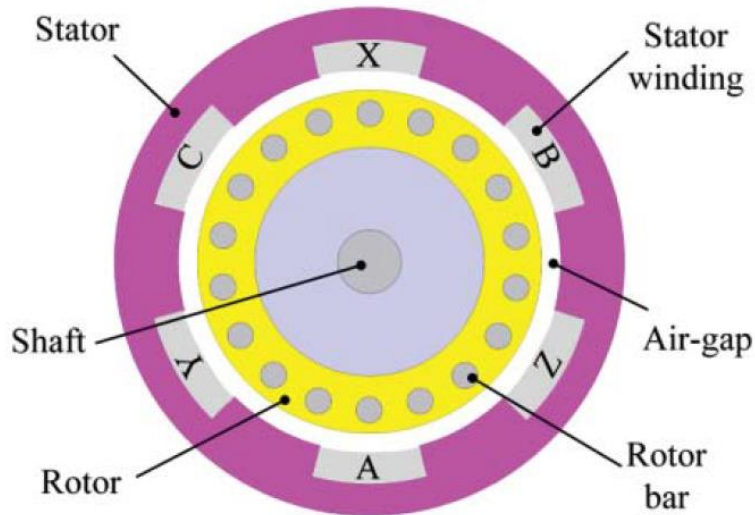
Induktiomoottoria kutsutaan myös epätahtimoottoriksi, koska siinä roottori pyörii aina hieman jäljessä staattorin synnyttämään magneettikenttään nähden. Tämä

pyörimisnopeusero aiheuttaa moottorille hieman energiahäviötä ja lisää lämpökuormaa. Puolestaan siitä, kun moottorissa roottorin navat ovat keskenään oikosuljettuja, tulee nimitys oikosulkumoottori. (Motiva 3.6.2019, [viitattu 23.1.2020].)

Kuvan 2 mukainen moottori edustaa kaikista yleisintä induktiomootorin tyyppiä. Tämän tyyppisessä moottorissa roottori on häkkikäännetty, eli roottorissa on johteita (Kuva 3: Rotor bar), jotka kaikki ovat molemmista päistä yhdistetty toisiinsa oikosulkulevyillä. Johteet ovat oikosuljettuja, jotta roottoriin saadaan aikaan yhtä monta napaa kuin staattorissa. Oikosulkulevyt voidaan valmistaa sellaisiksi, että niissä on siipiä moottorin jäähdytystä varten. Kuva 3 on poikkileikkauskuva normaalista 3-vaiheisesta ja 2-napaisesta oikosulkumoottorista ja siinä on vaiheittain käämitykset A-X, B-Y ja C-Z. Staattorin käämit ovat hajautettu siten, että magnetointivirta synnyttää sinimuotoisen magneettivuon jakauman ilmaraossa. (Chau 2015, 41.)



Kuva 2. Induktio­moottorin pää­komponentit (Chau 2015, 41).



Kuva 3. Induktiomoottorin poikkileikkauskuva (Chau 2015, 41).

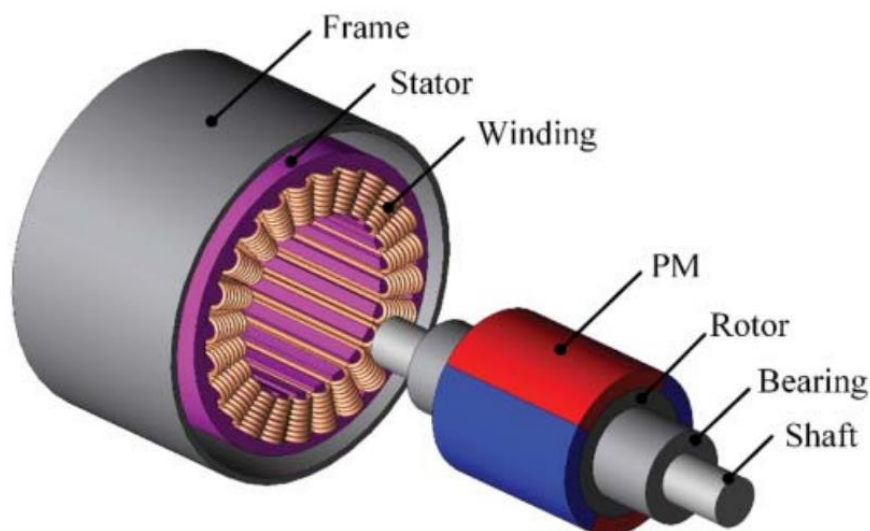
Nykyään, kun induktiomoottoria on kehitetty jo yli 130 vuotta, on sen teknologia hyvin kypsää ja siten soveltuu hyvin myös sähköajoneuvoihin. Kuitenkin teknologian kypsyyden takia kehitys etenee enää pienin harppauksin ja jatkuvasti kasvava kysyntä paremmalle tehopainosuhteelle ja hyötysuhteelle, ovat saaneet aikaan sen, että kestmagnetoidut harjattomat moottorit ovat alkaneet syrjäyttää induktiomoottoria sähköajoneuvoissa. Induktiomoottoria ei kuitenkaan ole vielä kokonaan syrjäytetty muun muassa kestmagneettien hinnan ja termisen epävakauden takia. Hyvien puoliensa, kuten halvan hinnan, jyvän rakenteen ja korkean kehityksen tason myötä on arvioitu, että induktiomoottori pystyy pitämään jonkinlaisen markkinaosuuden lähitulevaisuudessakin. (Chau 2015, 67,68.)

2.3 Harjaton kestmagneettimoottori

Tässä aluvussa perehdytään harjattomaan kestmagneettitasavirtamoottoriin (PM BLDC) sekä -tahtimoottoriin (PMSM). Kun tässä aluvussa kerrotaan tasavirtamoottorista tai tahtimoottorista, tarkoitetaan siis juuri harjattomiin kestmagneettimoottoreihin kuuluvaa moottoria, eikä perinteistä tasavirta- (DC-moottori) tai tahtimoottoria (SM).

Erityyppisten moottorien joukosta harjattomat kestmagneettimoottorit, erityisesti kestmagnetoitu tahtimoottori, ovat nykyään nousseet kiinnostavimmiksi moottoreiksi sähköajoneuvokäyttöön. Niissä korkeatehoisten kestmagneettien käytön myötä paino ja tilavuus ovat pienentyneet huomattavasti ja siten myös tehopainosuhte parantunut verrattuna induktimoottoriin. Lisäksi myös hyötysuhde on parantunut, mihin on osaltaan vaikuttanut kuparin käytön lopettaminen roottorissa. Myös jäähdytys on helpompaa lämmön syntyessä suurimmaksi osaksi staattorissa, josta sen haihduttaminen pois on helpompaa kuin roottorista. Ongelmana on kuitenkin muun muassa niiden korkea hinta, roottorin kestävyys suurilla pyörimisnopeuksilla ja magneettien lämmönkesto. (Chau 2015, 69,72.)

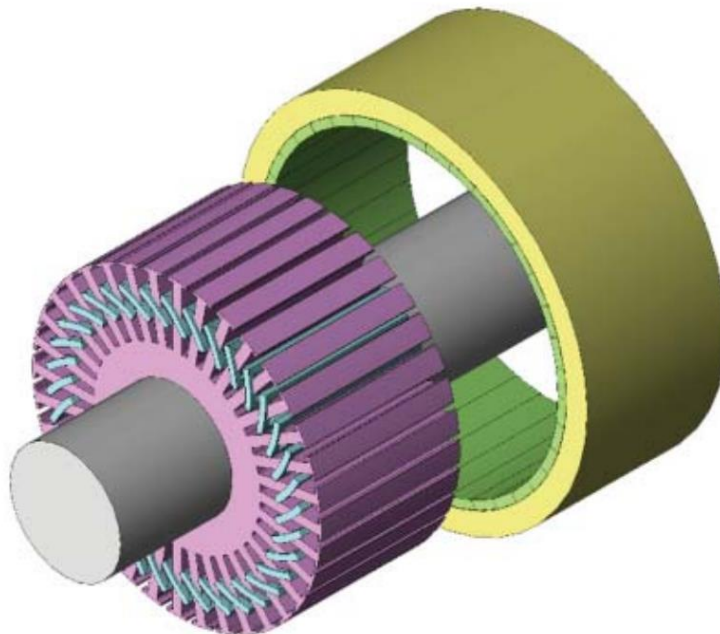
Harjattomat kestmagneettimoottorit voidaan jakaa kestmagneettitahtimoottoreihin (PMSM) ja harjattomiin kestmagneettitasavirtamoottoreihin (PM BLDC). Moottorien perusrakenne on muuten hyvin samanlainen kuin induktimoottorissa, mutta roottori on kestmagneettimoottoreissa hieman yksinkertaisempi, koska niissä ei tarvita häkkikäämitystä tai oikosulkulevyjä. Lisäksi niiden lämpöhäviöt ovat pienempiä, eikä siten yleensä tarvita siipiä roottorien aktiiviseen jäähdytykseen. Normaalin tasavirtamoottorin sekä tahtimoottorin rakenteet ovat siis samanlaisia (Kuva 4). (Chau 2015, 72,73.)



Kuva 4. Harjattoman kestmagneettimoottorin rakenne (Chau 2015, 73).

Tahtimootorissa staattorin käämit on hajautettu induktiomootorin tapaan siten, että magnetointivirta synnyttää sinimuotoisen magneettivuon ilma-araossa. Tämän suhteen tahtimootorin ollessa samanlainen induktiomootorin kanssa, pystytään siinä käyttämään samanlaisia, hyvin kehittyneitä, nopeuden hallinta -strategioita, kuten vektorisäätöä ja suoraa momentin säätöä. Nämä strategiat kuitenkin vaativat yleensä kalliin asentotunnistimen, kuten pulssianturin. Kun taas kestopagnetoidussa harjattomassa moottorissa staattorin käämit ovat keskitetty siten, että magnetointivirta synnyttää trapetsoidimuotoisen magneettivuon ilma-araossa, on kyseessä tasavirtamoottori. Myös tämän moottorin pyörimisnopeuden ohjaukseen tarvitaan asentotunnistin, mutta koska sen tarkkuus vaatimukset eivät ole niin korkeat kuin tahtimootorissa, voidaan käyttää edullista hall-anturia. (Chau 2015, 72.)

Koska tasavirtamoottorissa voi olla noin 15-33% parempi teho- ja vääntötiheys kuin tahtimootorissa, se on hyvä suoravetoisissa vannemoottori sovellutuksissa. Vannemoottorina tasavirtamoottorin staattori ja roottori ovat normaalista poiketen toisinpäin eli roottori on ulkopuolella ja tällöin rengas voidaan kiinnittää siihen suoraan. Jotta saadaan suoravedolle haluttu toimivuus matalilla nopeuksilla, tarvitaan suuri määrä napoja, esimerkiksi 38, kuten kuvan 5 moottorissa. (Chau 2015, 100,101.)



Kuva 5. PM BLDC vannemoottorin rakenne (Chau 2015, 101).

Kestomagnetoitujen moottorien kehitykseen vaikuttaa paljon kestopagneettien materiaalit. Koska materiaalit ovat kalliita, niiden tarjonnasta on pulaa ja magneettien terminen vakaus on ongelmallinen, näiden moottorien nopea kehitys on hiipunut. Tämän takia sähköajoneuvojen moottorien tutkimiselle ja kehitykselle on tullut kaksi uutta suuntaa: kehittyneet magneettittomat moottorit, kuten reluktanssimoottorit, ja kestopagneettimoottorit, joissa staattori on kestopagneetoitu. (Chau 2015, 105.)

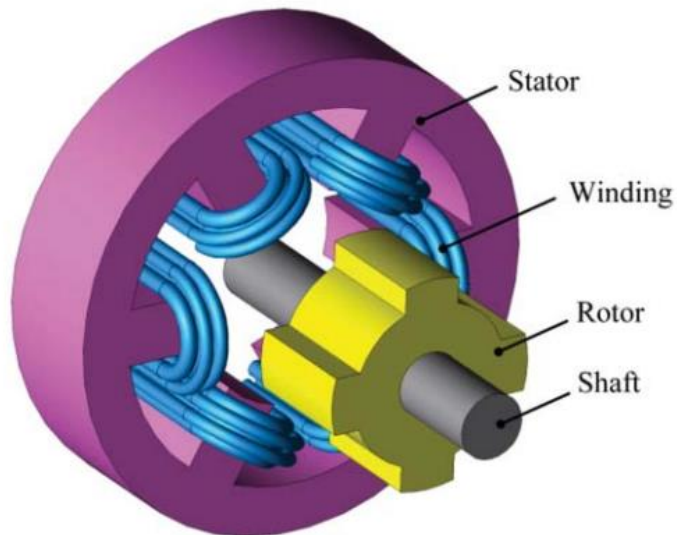
2.4 Reluktanssimoottori

Reluktanssimoottoreista on nykyään hyvin mielenkiintoinen vaihtoehto harjattomalle kestopagneettimoottorille muun muassa sen halvan hinnan, jyvän rakenteen, ohjauksen yksinkertaisuuden, sekä korkean hyötysuhteen, takia. Reluktanssimoottori ei kärsi PM-moottorien tapaan suurien keskipakoisvoimien aiheuttamista mekaanisista vaurioista ja näin ollen sopii hyvin sovellutuksiin, joissa vaaditaan korkeita pyörimisnopeuksia. Lisäksi, kun sen rakenne on jyvä, toimii se hyvin myös vanemoottorina. Kuitenkin reluktanssimoottorin heikkouksia ovat yleensä pienempi vääntötiheys, korkeammat vääntövärähtelyt ja kovempi akustinen kohina verrattuna vastaaviin moottoreihin. (Chau 2015, 108,110.)

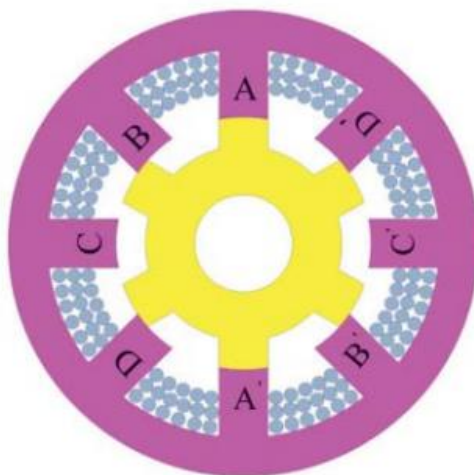
Reluktanssimoottori on roottorin rakenteen mukaan joko kytkinreluktanssimoottori (SRM) tai synkronireluktanssimoottori (SynRM). Toiminnaltaan moottorit ovat samanlaisia, kuitenkin roottorit eroavat rakenteeltaan siten, että SRM:n staattorissa ja roottorissa on eri määrä napoja, kun taas SynRM:ssa molemmissa on niitä yhtä monta. Reluktanssimoottorit toimivat monivaihevirralla. (Roberts 12.10.2019, [viitattu 7.2.2020].)

Kytkeinreluktanssimoottorin rakenteeseen kuuluu ulkonevia napoja, joita on sekä staattorissa että roottorissa. Staattorin navoissa on monivaiheiset keskitetyt käämitykset, kun taas roottorissa ei ole käämitystä tai kestopagneetteja. SRM:n rakenne vaihtelee vaiheiden ja napojen määrän mukaan, kuvassa 6 näkyy 3-vaiheisen ja 6/4 napaisen moottorin rakenne. Moottori voi myös olla esimerkiksi 4-vaiheinen ja 8/6 -napainen (Kuva 7) tai 3-vaiheinen ja 12/10 -napainen (Kuva 8). 4-vaiheisessa SRM:ssa (Kuva 7) on parempi vääntömomentti, jolla moottori alkaa pyöriä, alhaisempi melutaso ja pienemmät vääntövärähtelyt kuin 3-vaiheisessa (Kuva 6), mutta

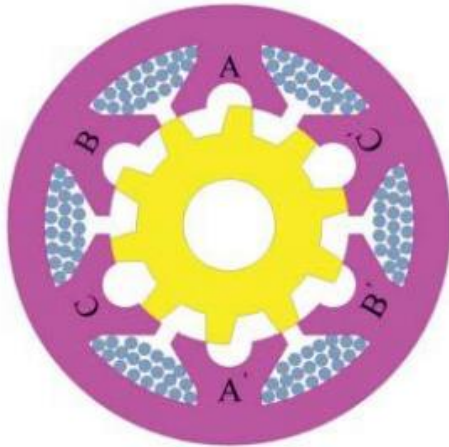
se vaatii paremman konvertterin ja on siten kalliimpi. SRM:n vääntötiheyttä voidaan parantaa käyttämällä useampaa hammasta jokaista staattorin napaa kohden, kuten esimerkiksi kuvassa 8. (Chau 2015, 110.)



Kuva 6. SRM:n rakenne, 3 vaihetta ja 6/4 napaa (Chau 2015, 110).

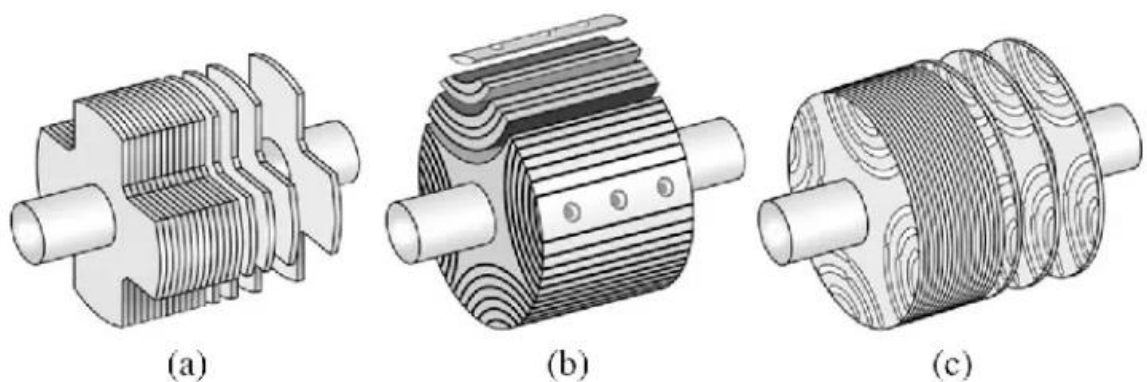


Kuva 7. 4-vaiheinen ja 8/6-napainen rakenne (Chau 2015, 111).



Kuva 8. 3-vaiheinen ja 12/10-napainen monihampainen rakenne (Chau 2015, 111).

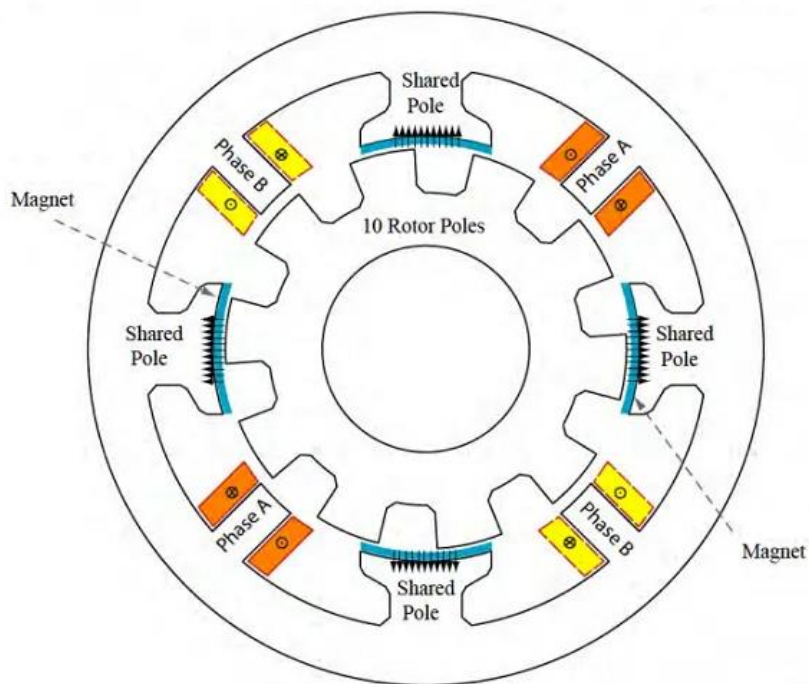
Kytkinreluktanssimoottorista poiketen synkronireluktanssimoottorissa roottorin rakenne perustuu pyöreisiin laminoituihin levyihin. SynRM:n roottori on yleisesti joko pitkittäis- (Kuva 9, b) tai poikittaislaminoitu (Kuva 9, c). Poikittaislaminoitu roottori on suunniteltu hyvin samanlaiseksi kuin induktiomootorin roottori ja se käytännössä toimiikin samalla tavalla. Lisäksi, kun staattorit ovat käytännössä samanlaiset moottorien kesken, on mahdollista vaihtaa normaaliin induktiomootoriin poikittaislaminoitu roottori, jolloin moottorista tulee SynRM. Molempien moottorien ohjaus toimii myös samalla tavalla. (Roberts 12.10.2019, [viitattu 7.2.2020].)



Kuva 9. Eri roottorityyppejä reluktanssimoottorissa (Roberts 12.10.2019, [viitattu 7.2.2020]).

SRM:sta on olemassa myös versio, jossa on normaali roottori ulkonevilla navoilla (Kuva 9, a), mutta staattorissa on osassa navoista käytetty kestmagneetteja, kuten kuvan 10 esimerkissä. Siinä magneetteja on vähemmän ja ne ovat pienempiä, kuin esimerkiksi PMSM:ssa tai PM BLDC:ssa, sekä ne ovat staattorissa ja näin ollen vältetään edellä mainittujen moottorien suurimmilta ongelmilta, mutta saadaan kuitenkin kestmagneettien hyötyjä aikaan. (Roberts 12.10.2019, [viitattu 8.2.2020].)

Tällaista kestmagnetoitua kytkinreluktanssimoottoria eli PMSRM, käytetään nykyään ainakin Teslan Model 3:ssa takamoottorina ja sitä on aloitettu laittamaan myös vanhempiin S- ja X-malleihin etumoottoreiksi. Tämän tyyppin moottorissa on induktiomootoria parempi hyötysuhde, mutta vääntömomentti pienillä kierrosnopeuksilla on huonompi. Tämän takia Tesla käyttää vieläkin induktiomootoria toisena moottorina PMSRM:n kanssa. (Lee 24.4.2019, [viitattu 8.2.2020].)



Kuva 10. Kestomagnetoitu SRM, PMSMR (Roberts 12.10.2019, [viitattu 8.2.2020]).

3 LÄMMÖNSIIRTO JA SÄHKÖMOOTTORIN JÄÄHDYTYS

3.1 Lämmönsiirto

Kun kaksi eri lämpötilassa olevaa väliainetta joutuu keskenään vuorovaikutukseen, syntyy niiden välinen lämpövirta. Tätä lämpövirtausta kutsutaan tavallisesti lämmönsiirroksi. Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla, johtumalla, konvektiolla ja lämpösäteilyllä. Johtumalla lämpö siirtyy kiinteissä tai levossa olevissa nestemäisissä ja kaasumaisissa kappaleissa, kun taas konvektiolla se siirtyy kiinteän kappaleen ja sen ympärillä virtaavan fluidin, eli kaasun tai nesteen välillä. Konvektiota ei voida kokonaan erottaa johtumisesta, sillä lämmön täytyy ensin siirtyä lämpöä luovuttavassa pinnassa johtumalla ohi virtaavaan väliaineeseen. Ilman väliainetta lämpö voi siirtyä säteilemällä. Useimmiten lämpö siirtyy samanaikaisesti kaikilla tavoilla. (Wagner 1994, 13.)

Lämmön johtuminen on lämpötilaeron aiheuttamaa ja molekyylien välittämää lämmönkuljetusta kiinteässä aineessa, nesteessä tai kaasussa. Tavallisin stationaarisen johtumisen tapaus tekniikassa on lämmönkuljetuksen jatkuva ylläpito tuomalla lisää lämpöä, kuten esimerkiksi lämmönsiirtimissä. Kiinteissä aineissa lämpö johtuu molekyylien värähtelyn välityksellä, mutta metalleissa vielä sen lisäksi elektronien välityksellä. Tämän takia sähköä johtavien aineiden lämmönjohtavuudet ovat huomattavasti korkeampia kuin eristeiden. Kaasuissa ja höyryissä molekyylit siirtävät lämpöä värähtelyn, pyörimisen ja niiden etenevän liikkeen energiana. Lämmönjohtavuus riippuu kaasun ominaislämpökapasiteetista ja viskositeetista. (Wagner 1994, 15,16.)

Konvektiossa lämpöä siirtyy kiinteän pinnan ja fluidin välillä, kun ne ovat eri lämpötiloissa ja fluidi liikkuu pinnan suhteen. Kun fluidin virtaukset aiheutuvat lämpötilaerojen aikaansaamasta tiheyden muutoksista, kutsutaan sitä vapaaksi tai luonnolliseksi konvektioksi. Mikäli fluidin virtaukset synnytetään keinotekoisesti esimerkiksi pumpulla tai puhaltimella, on kyseessä pakotettu konvektio. (Özişik 2018, 5.)

Sähkömagneettisten aaltojen välityksellä siirtyvää energiaa kutsutaan lämpösäteilyksi eli termiseksi säteilyksi. Yleensä lämpösäteily on infrapunasäteilyä, mutta korkeissa lämpötiloissa osa siitä muuttuu näkyväksi valoksi ja samalla sen energia kasvaa voimakkaasti. Kappaleeseen osuva säteily joko absorboituu siihen, heijastuu siitä tai menee sen läpi. Useimmista kiinteistä ja nestemäisistä kappaleista säteily ei mene läpi, vaikka ne olisivat ohuitakin. Kappale lähettää säteilyä sen lämpötilan ja pinnanlaadun mukaan. Niin sanottu musta kappale absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn, eikä siis heijasta sitä ollenkaan, sekä myös lähettää suurimman mahdollisen säteily määrän. Niin sanottu valkoinen kappale taas heijastaa kaiken siihen osuneen säteilyn. (Wagner 1994, 117.)

3.2 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdin on laite, jota käytetään lämpöenergian siirtämiseen kahden tai useamman fluidin, kiinteän pinnan ja fluidin tai kiinteiden hiukkasten ja fluidin välillä niiden ollessa eri lämpötiloissa ja lämpökosketuksessa. Tyypillinen sovellutus sisältää fluidi virran lämmittämistä tai jäähdytystä ja sen haihdutusta ja tiivistämistä. Useimmissa lämmönvaihtimissa lämmön siirtyminen fluidien välillä tapahtuu niitä erottavan seinämän läpi. Yleisiä esimerkkejä lämmönvaihtimesta ovat levy- ja putkilämmönvaihtimet, autojen jäähdyttimet, lauhduttimet, höyrystimet ja ilman esilämmittimet. (Sekulic 2003, 1.)

Lämmönvaihtimen läpi siirtyvä teho voidaan laskea seuraavasti:

$$Q = m c_p \Delta T = U \Delta T_{\ln} \quad (1)$$

missä Q on lämpöteho [kW], m on fluidin massavirta [kg/s], c_p on aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kg*K)], ΔT on ainevirran tulo- ja menolämpötilojen erotus [K], U on lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K] ja ΔT_{\ln} on nk. logaritminen lämpötilaero [K]. (Motiva 2016, [viitattu 13.3.2020].) Taulukossa 1 on edellisen kaavan (1) avulla tehty laskuri, jolla voidaan laskea lämmönvaihtimen läpi siirtyvä teho tai vastaavasti lämmönvaihtimen läpi virtaavan fluidin lämpötilan muutos.

Taulukko 1. Laskuri lämpöteholle ja fluidin lämpötilan muutokselle

Lämmönvaihtimen läpi siirtyvä teho			
	Lämpöteho	$Q = mc_p\Delta T$	1,002 kW
	Tilavuusvirta	[l/h]	400
	Massavirta	m [kg/s]	0,111
	Ominaislämpökapasiteetti	C_p [kJ/kg°C]	4,2
	Fluidin tulo- ja menolämpötilojen erotus	ΔT [°C]	2,15
	Fluidin tiheys	ρ (20°C)	0,9982
Fluidin lämpötilan muutos			
	Fluidin tulo- ja menolämpötilojen erotus	$\Delta T = Q/mc_p$	2,15 °C
	Tilavuusvirta	[l/h]	400
	Massavirta	m [kg/s]	0,111
	Ominaislämpökapasiteetti	C_p [kJ/kg°C]	4,2
	Lämpöteho	Q [kW]	1
	Fluidin tiheys	ρ (20°C)	0,9982

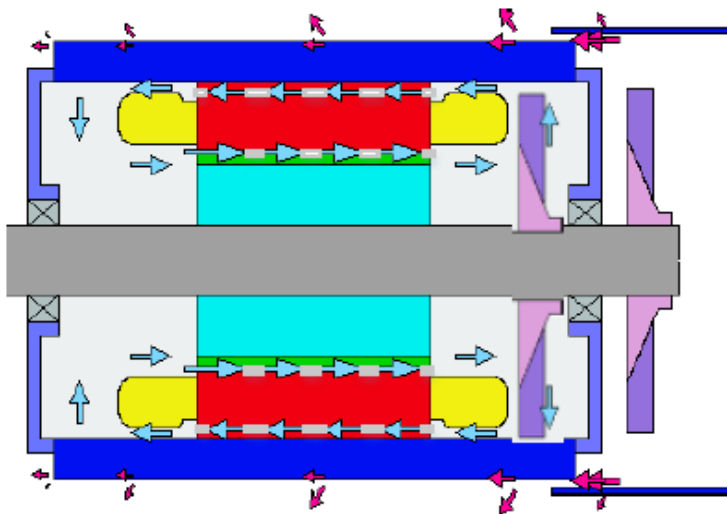
3.3 Jäähdytys ratkaisuja sähköajoneuvoissa

Sähköajoneuvoissa moottoria voidaan jäähdyttää passiivisesti vapaalla konvektiolla tai aktiivisesti pakotetulla konvektiolla käyttäen väliaineena ilmaa tai nestettä. Passiivinen jäähdytys soveltuu vain matalatehoisiin tai kooltaan suuriin moottoreihin, minkä takia useimmiten käytetään ilma- tai nestejäähdytystä pakotetulla konvektiolla. Useimmiten sähköajoneuvojen ajomoottoreissa käytetään nestejäähdytystä ja monesti vielä sen ohella ilmajäähdytystä, kun moottorilta vaaditaan korkeaa tehotiheyttä. (Gai ym. 2018, 2-4,6.)

Pakotetussa ilmajäähdytyksessä käytetään tuuletinta tai puhallinta tuottamaan jatkuvaa ilmavirtausta moottorin läpi. Moottori voi olla joko koteloidulla (enclosed fan cooled, EFC) tai avoimella puhallinjäähdytyksellä (open fan cooled, OFC). Jäähdytysteho ilmajäähdytteisessä moottorissa riippuu hyvin paljon moottorin koosta, joten

pieneen kokoon on vaikea saada hyvää jäähdytystehoä. Ilmajäähdytyksen haasteena on myös puhaltimen aiheuttama kova melu. (Gai ym. 2018, 3.)

EFC-moottorissa on sisäinen ja ulkoinen virtauspiiri ja siten myös kaksi tuuletinta. Sisäinen virtauspiiri kierrättää ilmaa moottorin sisällä, jolloin lämpö siirtyy moottorin sisältä sen runkoon, joka taas toimii jäähdytysseinänä. Ulkoisen virtauspiirin puhaltimella puhalletaan ulkoilmaa moottorin rungon läpi, milloin lämpöä saadaan haihduttua pois (Kuva 11). Tällä tavoin saadaan estettyä pölyn ja muiden epäpuhtauksien pääsy moottorin sisälle. (Gai ym. 2018, 3,4.)



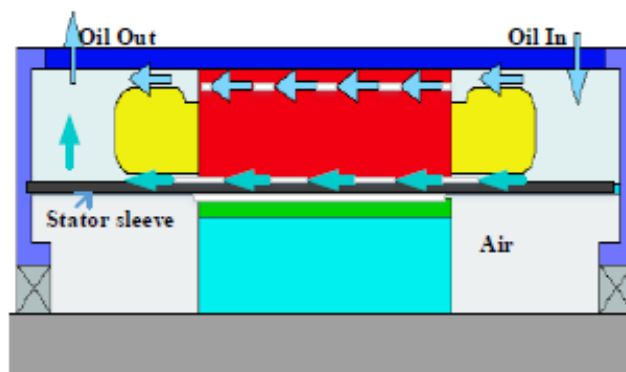
Kuva 11. Ilman kierto EFC-moottorissa (Gai ym. 2018, 3).

OFC-moottorissa ulkoilmaa puhalletaan jatkuvasti moottorin läpi yhdellä puhaltimella. Tuleva ulkoilma täytyy siis suodattaa, jotta saataisiin ilmasta epäpuhtauksia pois, eikä ne päätyisi moottorin sisälle. Moottoriin joutuu kuitenkin suodatuksesta huolimatta aina jonkin verran epäpuhtauksia, minkä takia tämän tyyppinen moottori pitää aika-ajoin puhdistaa. (Gai ym. 2018, 3.)

Nestejäähdytys on yleisin jäähdytysmuoto ajomoottoreissa ja se on sopiva varsinkin korkea tehoisiin moottoreihin, joihin ilmajäähdytys ei riitä. Nestejäähdytyksessä käytetään yleensä erillistä staattoriin kosketuksissa olevaa lämmönvaihdinta, jossa neste kiertää, mutta joissain tapauksissa voidaan käyttää niin sanottua märkää staattoria (Kuva 12), eli jäähdytysmenetelmää, jossa neste kiertää suoraan staattorin ympärillä ja siihen tehdyissä kanavissa. Lämmönvaihtimen avulla saadaan hyvin

jäähdytettyä staattoria, mutta yleensä ei niin hyvin staattorin käämityksiä. Nestejäähdytyksessä käytetään yleensä vesi-glykoli -seosta hyvän lämmönjohtokykynsä takia, mutta joskus käytetään myös öljyä. Nestejäähdytyksellä saadaan aikaan hyvä jäähdytysteho, mutta sillä on kuitenkin heikkouksia, kuten korrosio, epäpuhtaudet järjestelmässä ja vuodot, sekä usein roottorin heikko jäähdytys. (Gai ym. 2018, 4.)

Märkä staattori on harvemmin käytetty jäähdytysmenetelmä, jossa väliaineena käytetään yleensä jotain öljyä, kuten hydraulioiljyä. Öljy kiertää staattoriin tehdyissä kanavissa ja staattorin käämityksien ympärillä, mutta sen pääsy ilmarakoon on estetty (Kuva 12). Tällä tavoin saadaan jäähdytysnesteen ja lämpölähteen välinen lämpöresistanssi hyvin pieneksi ja siten hyvä lämmönsiirtokyky ja erityisesti staattorin käämityksiä saadaan hyvin jäähdytettyä muihin menetelmiin verrattuna. (Gai ym. 2018, 5.)



Kuva 12. Märkä staattori (Gai ym. 2018, 4).

Taulukossa 2 näkyy eri autojen sähkömoottorien tietoja ja niissä käytetyt jäähdytysmenetelmät. Taulukosta nähdään, että vain yhdessä näistä autoista käytetään pelkästään ilmaa staattorin ja roottorin jäähdytykseen, eli useimmiten käytetään nestejäähdytystä vedellä tai öljyllä ja muutamassa tapauksessa sen lisäksi ilmajäähdytystä.

Taulukko 2. Eri sähköautoissa käytettyjä jäähdytysmenetelmiä (Gai ym. 2019, 7).

TABLE II
THE VARIOUS COOLING METHODS APPLIED FOR AUTOMOTIVE TRACTION MOTO

Motor type	Max torque (Nm)	Max Speed (rpm)	Torque density: Mass/Volume (Nm/kg, Nm/L)	Peak Power (kW)	Power Density: Mass/Volume (kW/kg, kW/L)	Cooling methods	Reference
2010 Toyota Prius IPMSM	205	13,500	5.5 / 16.4	60	1.6 / 4.8	Housing jacket cooling with oil	[77]
2011 Sonata PMSM	205	6000	7.5 / 20.5	30	1.1 / 3.0	Housing jacket cooling with oil	[78]
2012 Tesla Roadster AC IM	370	14,000	6.98 / -	215	4.05 / -	Inner forced air + Fined housing + outer fan	[79]
2012 Nissan Leaf IPMSM	280	10,390	4.8 / 15.1	80	1.4 / 4.2	Housing jacket cooling with WEG	[80]
2013 Tesla S60 AC IM	430	14800	-	225	-	Housing Jacket cooling+ Shaft cooling	[1]
2015 Newcastle University SRM	280	10,500	5.2 / 15.9	80	1.5 / 4.5	Housing Jacket cooling with water	[81]
2016 BMW i3 IPMSM	250	11,400	6.0 / 18.2	125	3.0 / 9.1	Housing Jacket	[82]
GE Global Research IPMSM	180	14,000	>5.1 / >18.6	55	>1.5 / >5.7	Housing jacket + End winding spray + Rotor cooling	[16]
Zytek PMSM	460	12,200	6.1 / -	170	2.3 / -	Housing jacket + Forced fan cooling	[76]

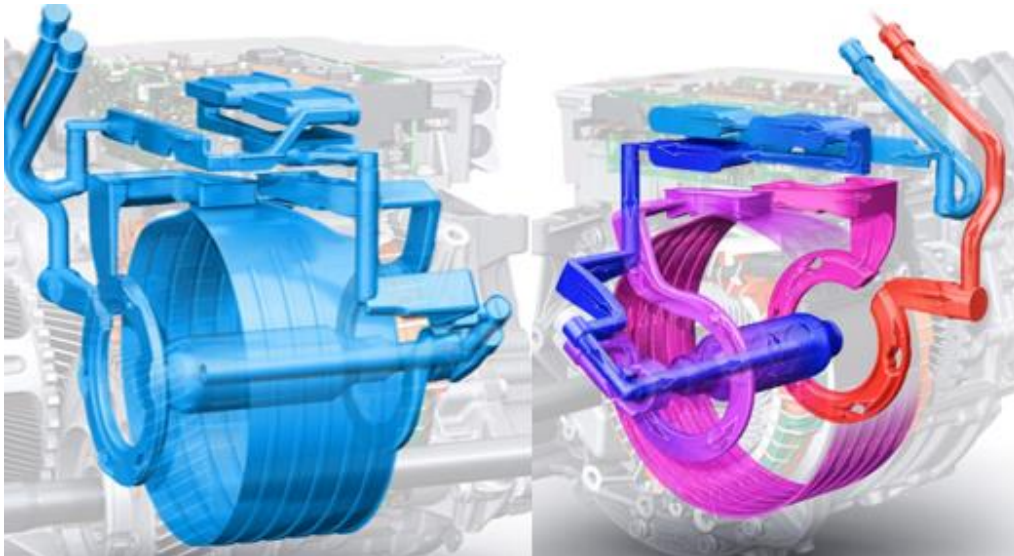
4 NESTEJÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa suunnitellaan tarpeeseen sopiva lämmönvaihdin vannemoottorille. Suunnittelussa ei huomioida tai oteta kantaa siihen, onko nestejäähdytys ylipäätään järkevää tässä tapauksessa tai kuinka sen pystyy valmistamaan, vaan tässä keskitytään vain lämmönvaihtimeen ja sen kykyyn siirtää lämpöä. Siten myöskään, vesipumppua lukuun ottamatta, muita nestejäähdytysjärjestelmään kuuluvia komponentteja ei huomioida. Suunnittelussa siis pysytään vain lämmönvaihtimessa, koska muiden komponenttien lisääminen tähän olisi turhaa, koska tässä tehdään vain alustavaa suunnittelua ja koko jäähdytysjärjestelmän suunnittelussa pitää ottaa koko moottoripyörä huomioon. Lämmönvaihtimen mallintamisessa käytetään Siemensin Solid Edgeä ja simuloinneissa Siemensin NX ohjelmistoa. Aina, kun tässä luvussa puhutaan lämmönvaihtimesta, tarkoitetaan juuri tätä suunnittelun kohteena olevaa vannemoottorin lämmönvaihdinta.

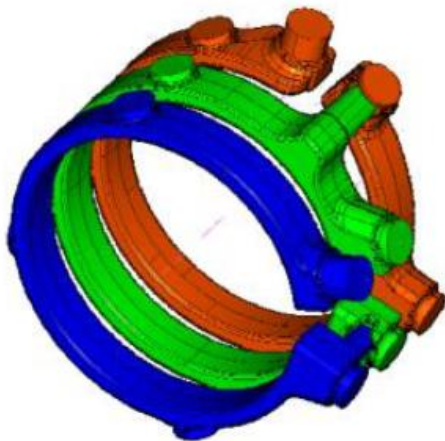
4.1 Suunnittelu

Tässä tapauksessa vannemoottorille jäähdytysmenetelmäksi olisi voitu valita joko märkä staattori käyttäen öljyä tai yleisempi nestejäähdytys lämmönvaihtimella käyttäen vettä. Märän staattorin etuna olisi erityisesti staattorin käämitysten parempi jäähdytys, mutta se vaatisi kuitenkin huomattavia muutoksia staattoriin ja pitäisi käyttää öljyä jäähdytysnesteenä. Tässä kohtaa ei haluttu lähteä suunnittelemaan staattoriin muutoksia, joten päädyttiin nestejäähdytykseen lämmönvaihtimella ja jäähdytysnesteeksi vesi-glykoli -seosta.

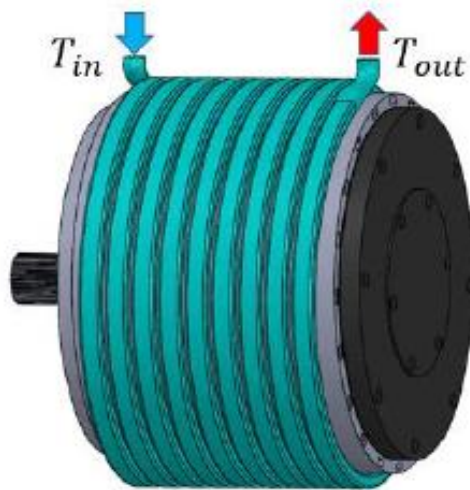
Seuraavaksi jäähdytysmenetelmän valinnan jälkeen aloitettiin miettimään, millainen lämmönvaihtimen geometria voisi olla. Mallia geometriaan saatiin tutkimalla, millaisia lämmönvaihtimia sähköautoissa käytetään ja kuinka niissä nestekanavat ovat toteutettu. Esimerkiksi Audin uudessa E-tron mallissa vesikanavat menevät kuvan 13 mukaisesti ja BMW i3:ssa kanavat ovat samankaltaiset, kun roottorin ja ohjainlaitteen nestekiertoa ei huomioida. Kuvassa 14 näkyy Nissan Leafin moottorin nestekierto ja kuvassa 15 erilainen suunnittelu vaiheessa oleva geometria jonkin ajo-neuvon lämmönvaihtimelle.



Kuva 13. Audi E-tron jäähdytysnestekierto moottorissa (Audi MediaCenter 10.8.2019 [viitattu 11.3.2020]).



Kuva 14. Nissan Leaf jäähdytysnestekierto moottorissa (Gai ym. 2018, 6).



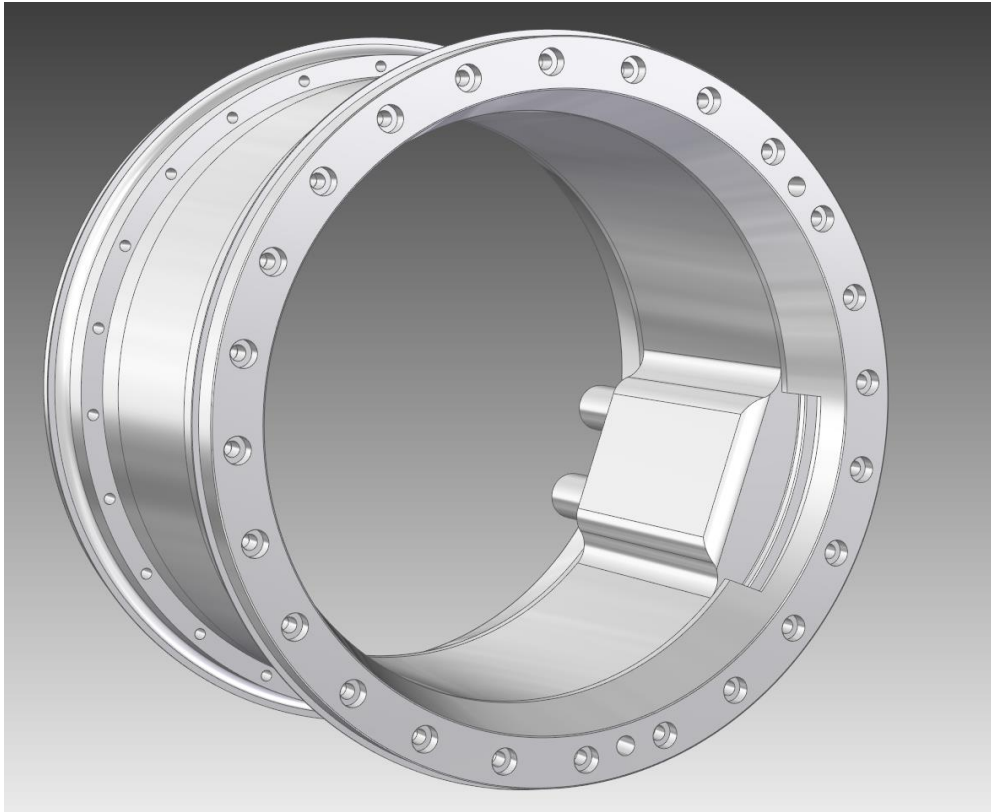
Kuva 15. Konsepti jäähdytysnestekierto (Huang ym. 2019, 6).

Lämmönvaihtimen toimintaa ja lämmönsiirtokykyä ei lähdetty käsin laskemaan vaan päädyttiin tutkia niitä simuloimalla, koska sillä saadaan monipuolisempia tuloksia ja niiden laskeminen manuaalisesti olisi huomattavasti vaikeampaa ja paljon aikaa vievää. Simuloinneilla saadaan myös visuaalisia tuloksia, jolloin niitä on myös helpompi tulkita. Simulointien ohella käytettiin kuitenkin yksinkertaista kaavaa (Kaava 1), jolla voitiin laskea yleisen lämmönvaihtimen läpi mennyttä lämpötehoa tai fluidin lämpötilan muutosta ja tämän avulla saatiin simulointien tuloksille vertailukohtaa ja pystyttiin tulkitsemaan tuloksien paikkansapitävyyttä.

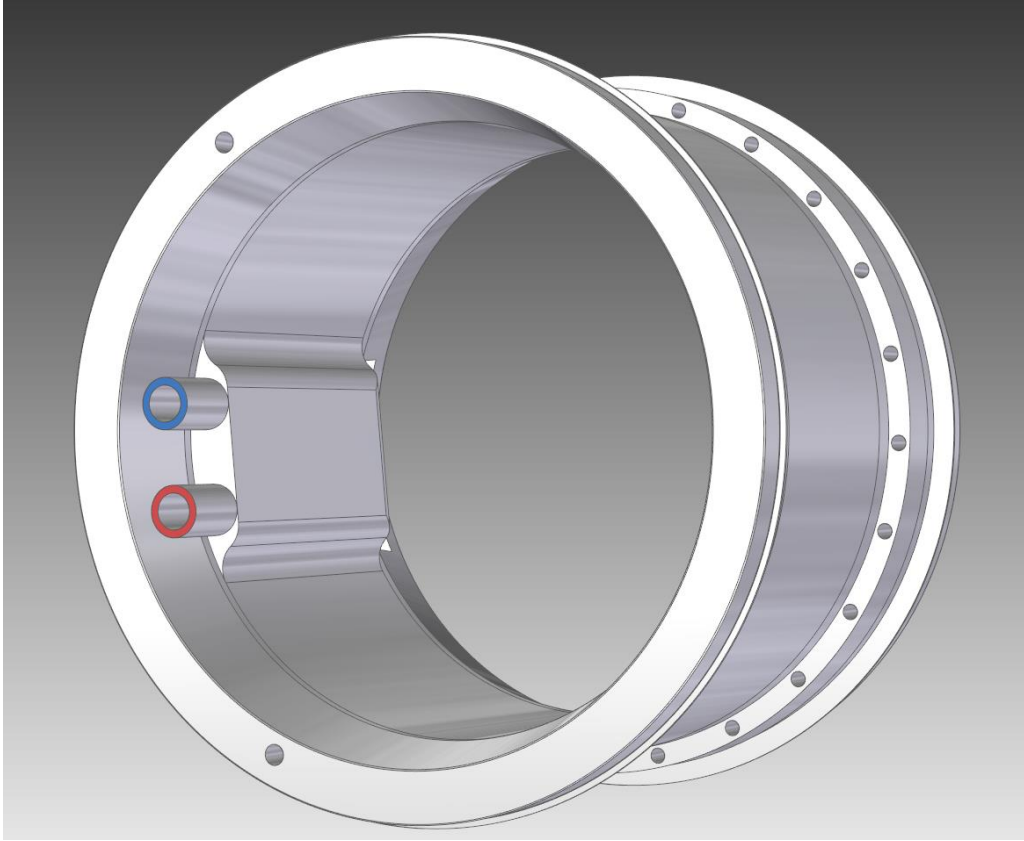
4.2 Mallinnus

Lämmönvaihtimen mallinnuksessa käytettiin apuna nykyisen ilmajäähdytteisen moottorin jäähdytyspiirin 3D-mallia, jotta saatiin oikeat mitat lämmönvaihtimelle. Näin ollen suunniteltu lämmönvaihdin sopisi teoriassa suoraan nykyisen jäähdytyspiiriin tilalle. Lämmönvaihtimesta piirrettiin kaksi eri versiota, joista ensimmäisen version nestekanavat ovat samantyyppiset kuin kuvassa 13 ja toisessa versiossa vastaavat kuin kuvassa 15. Versioita lämmönvaihtimesta tehtiin kaksi, koska haluttiin vertailla kuinka nestekanaavien geometrian muuttaminen vaikuttaa lähinnä virtaukseen, mutta myös lämmönsiirtoon. Kuvissa 16 ja 17 näkyy lämmönvaihtimesta tehdyn mallinnuksen ensimmäinen versio. Lämmönvaihdin mallinnettiin kokoonpanona neljässä osassa, mutta simuloinneissa käytettiin pelkästään itse lämmönvaihdinta, joka

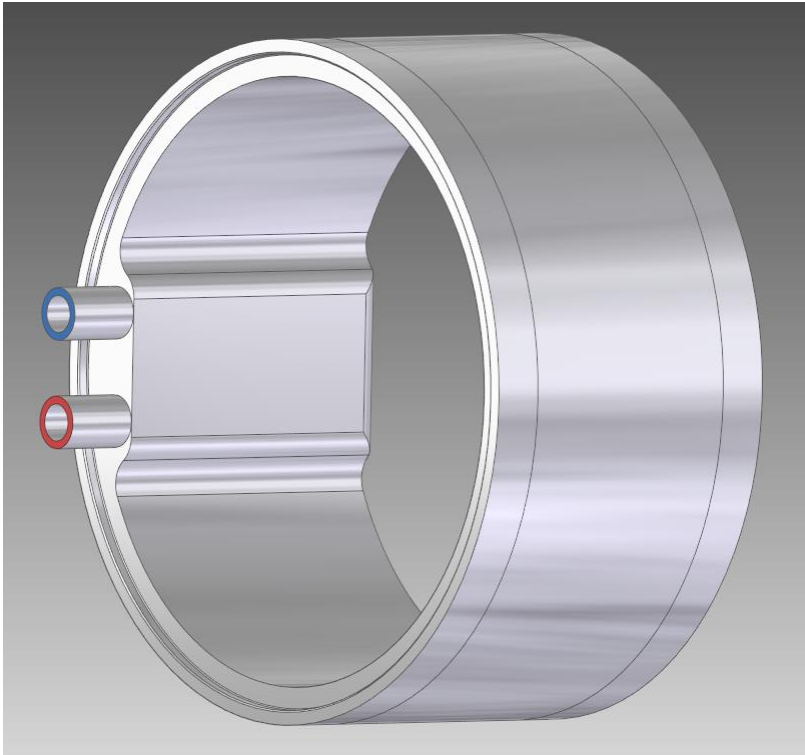
näkyvyydessä kuvassa 18, ja muut osat jätettiin pois, koska ne eivät olleet oleellisia simuloitien kannalta. Kuvissa 19 ja 20 näkyvä versio kaksi tehtiin samalla tavalla.



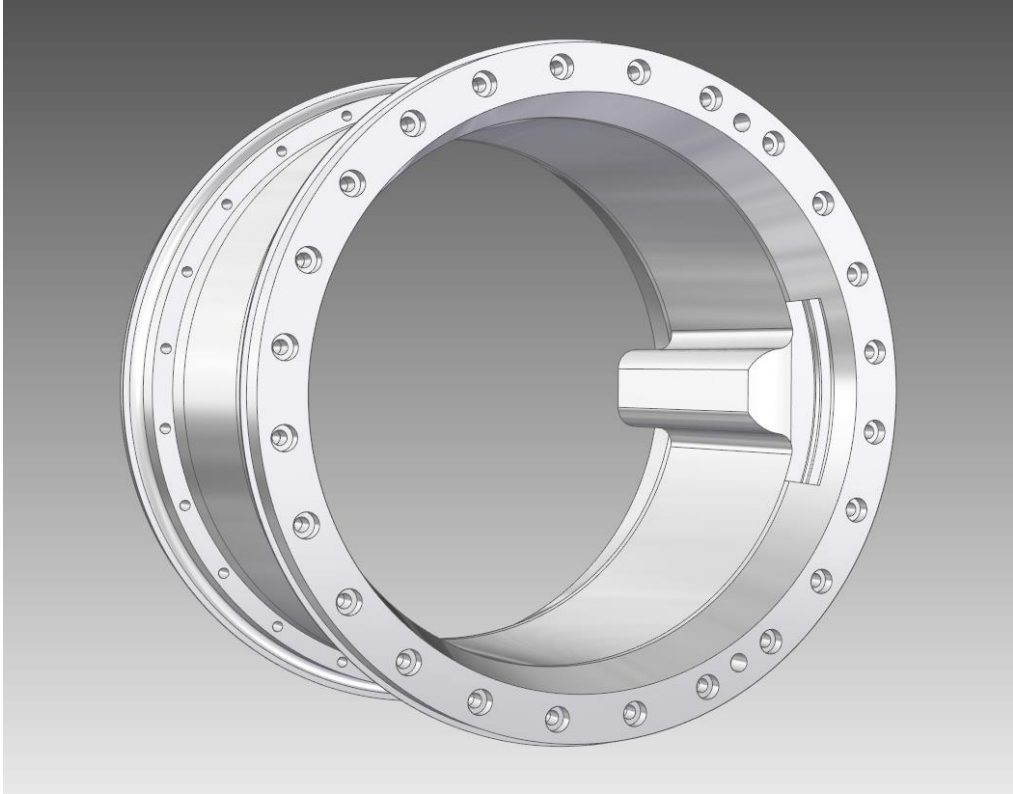
Kuva 16. Lämmönvaihdin kokoonpano V1.



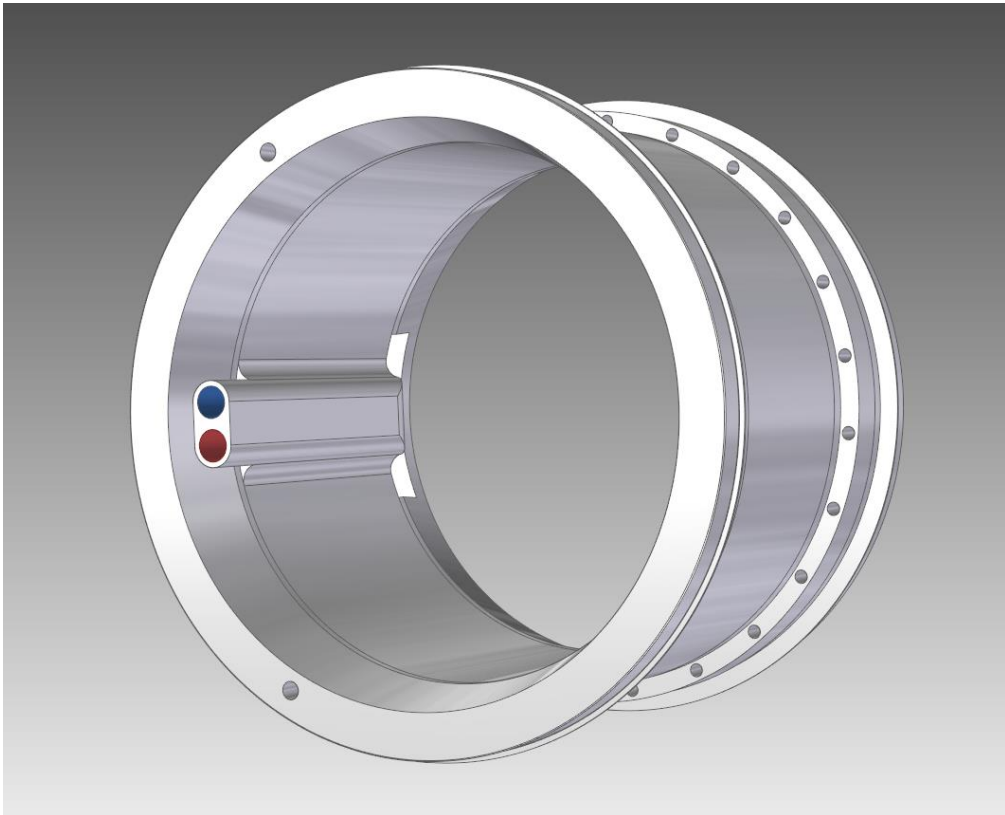
Kuva 17. Lämmönvaihdin kokoonpano V1.



Kuva 18. Pelkkä lämmönvaihdin V1.



Kuva 19. Lämmönvaihdin kokoonpano V2.



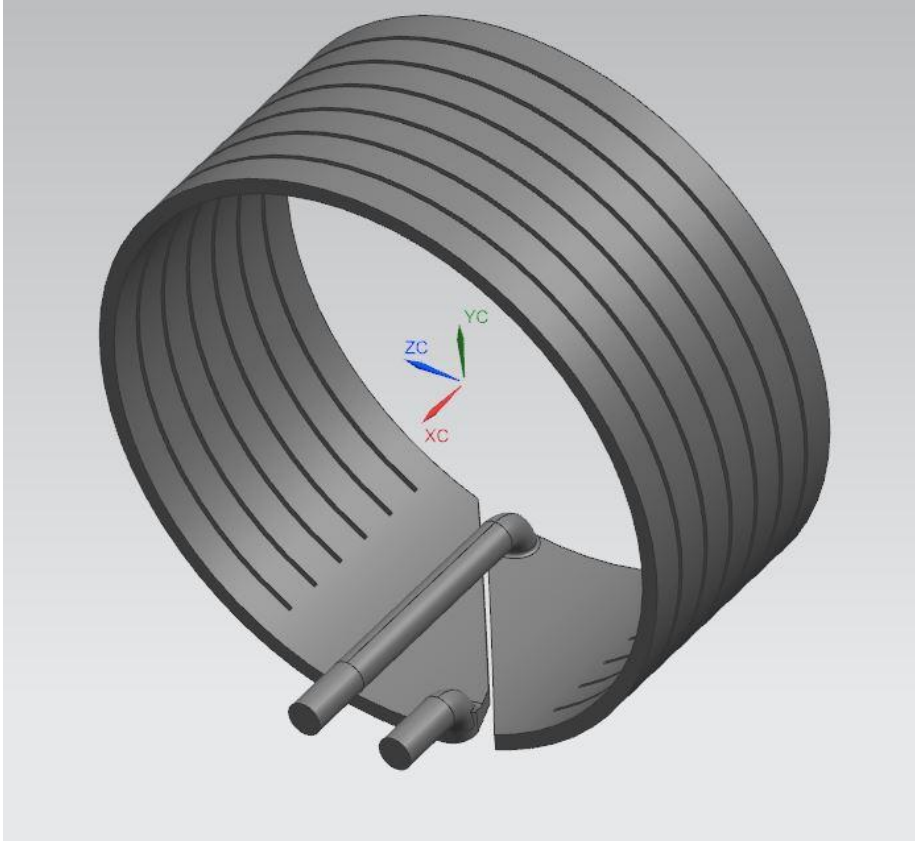
Kuva 20. Lämmönvaihdin kokoonpano V2.

4.3 Simulointi

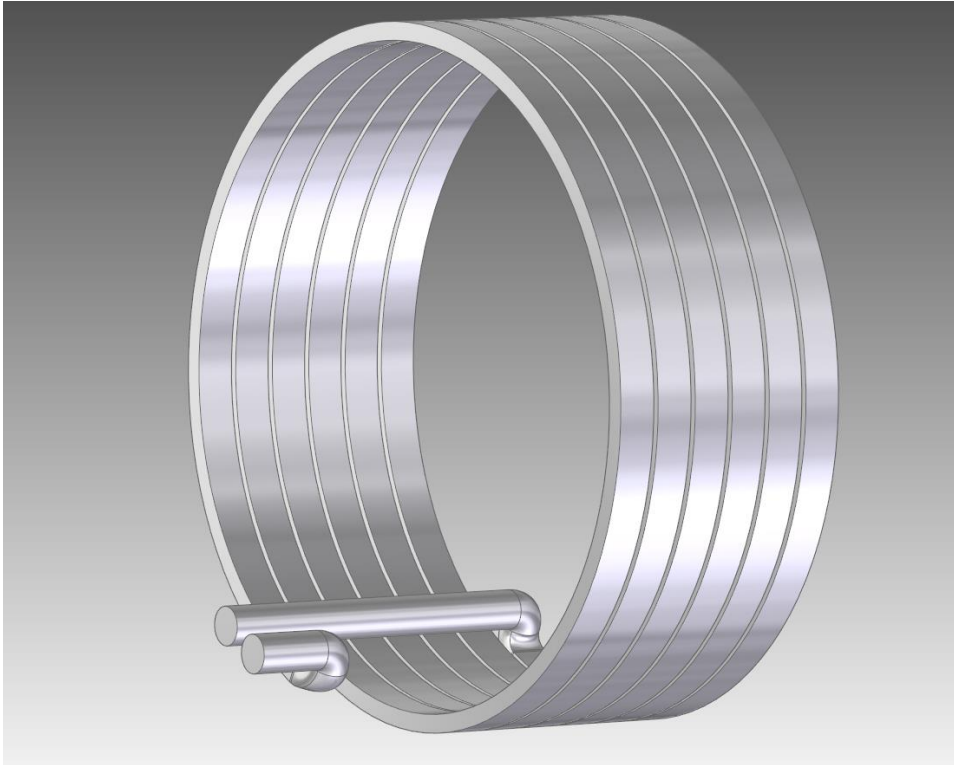
Ennen kuin simulointeja voitiin tehdä, täytyi molempien versioiden nestetilavuuden geometrioille tehdä mallit ja laittaa niille haluttu materiaali, joka tässä tapauksessa oli vesi. Nestetilavuuden geometrioiden mallit näkyvät kuvissa 21 ja 22, mutta tässä on huomioitava, että simuloinnit versiosta kaksi tehtiin kuvasta poikkeavalla ja yksinkertaisemmalla geometrialla, koska aika ei riittänyt, kun koulu sulkeutui virusepidemian takia. Samoin myös toisen version lämmönvaihtimen malli on simuloinneissa poikkeava kuviin 19 ja 20 verrattuna. Yksinkertaisemman geometrian käyttö ei kuitenkaan aiheuttanut mitään huomattavia eroja tuloksiin.

Simulointeja tehtiin eri lämpökuormilla ja nesteen virtausnopeuksilla, mutta staattorin ja lämmönvaihtimen välinen kosketuspinta-ala päätettiin pitää kaikissa samana. Lämmönsiirtoa säteilyllä ja konvektiolla ei haluttu tässä tapauksessa ottaa mukaa simulointeihin. Myöskään staattoria ei haluttu huomioida simuloinneissa muuten kuin lämpölähteenä, koska se olisi tehnyt simuloinneista huomattavasti monimutkaisempia, kun muuttujia olisi ollut enemmän, eikä se käytännössä olisi tuonut mitään lisäarvoa simuloinneille. Lämmönvaihtimen versio kaksi päättyi tässä pääosaan, koska sillä ehdittiin tekemään useampi simulointi sen yksinkertaisemman nestekierroksen takia, kun taas ensimmäisellä versiolla ehdittiin tekemään vain kaksi simulointia.

Simuloinneissa käytettiin lämpökuorman arvoina 1kW ja 6kW, jotka ovat arvioita lämpökuorman suuruudesta moottorin normaalilla jatkuvalla kuormituksella ja hetkellisellä täydellä kuormituksella. Tilavuusvirran arvoina käytettiin 200l/h ja 400l/h, jotka ovat kuvitteellisia arvoja, mutta kuitenkin hyvin mahdollisia. Tilavuusvirtojen arvoja valittaessa käytettiin apuna jonkin yleismallin sähköisen vesipumpun tuoton arvoja. Staattorin, eli simuloinneissa lämpökuorman, leveytenä käytettiin 100mm, joka on huomattavasti leveämpi kuin nykyinen staattori. Nykyisen staattorin leveyttä ei haluttu käyttää, koska mikäli vesijäähdytykseen siirryttäisiin, olisi staattori leveämpi, mahdollisesti lähellä 100mm. Mikäli aikaa olisi ollut, olisi muutama simulointi tehty vertailun vuoksi eri staattorin leveyksillä. Molemmissa versioissa neste-kanavat olivat profiililtaan 7x15mm kokoisia. Kaikissa simuloinneissa lämmönvaihtimen materiaalina käytettiin 6061 alumiinia, koska sen lämmönjohtavuus on eri alumiinilaatujen joukossa suurin piirtein keskitasoa.



Kuva 21. Version 1 nestetilavuuden geometria.



Kuva 22. Version 2 valmis nestetilavuuden geometria.

5 SIMULOINTIEN TULOKSET

Yhtä lukuun ottamatta kaikista simuloinneista saatiin kuvia, joista visuaalisesti tulkitsemalla saatiin varsinaiset tulokset. Koulun sulkeutumisen takia ei ehditty käyttää NX-ohjelman työkaluja simulointien tarkemmassa tulkinnassa. Kaikki simuloinnit tehtiin siten, että tuloksista nähtiin virtaus, fluidin lämpötila ja kappaleen lämpötila. Yhtä lukuun ottamatta kaikissa simuloinneissa oli avoin nestekierto, eli neste pääsee virtaamaan lämmönvaihtimelta suoraan ulos ja sisään menee aina 20 °C nestettä. Tällä tavoin saatiin simuloinneista poisluettua kaikki muut jäähdytysjärjestelmän komponentit, koska niitä ei tässä haluttu tutkia. Simuloinneista tehtiin Excel-taulukko (Taulukko 3 ja liite 1), johon merkittiin saadut tulokset ja taulukossa 1 olevalla laskurilla lasketut arvot fluidin lämpötiloille. Laskurin avulla nähtiin, että simulointien tulokset ovat hyvin lähellä laskettuja arvoja, joten niiden tuloksia voidaan pitää luotettavina. Taulukossa 3 on taulukoituna kaikkien simulointien tulokset, laajempina tulokset ovat liitteessä 1. Kaikista simuloinneista saadut kuvat ovat liitteissä 2-6 seuraavasti: Simuloinnit 1kW ja 200l/h liitteissä 2 ja 3, simuloinnit 1kW ja 400l/h liitteissä 4 ja 5 sekä simulointi 6kW ja 400l/h liitteessä 6.

Taulukko 3. Simulointien tulokset.

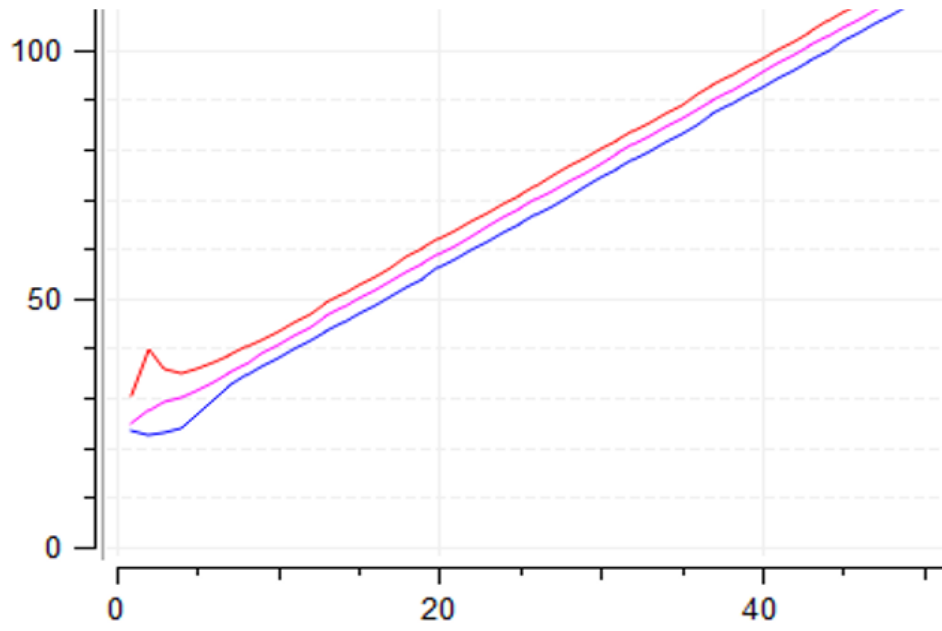
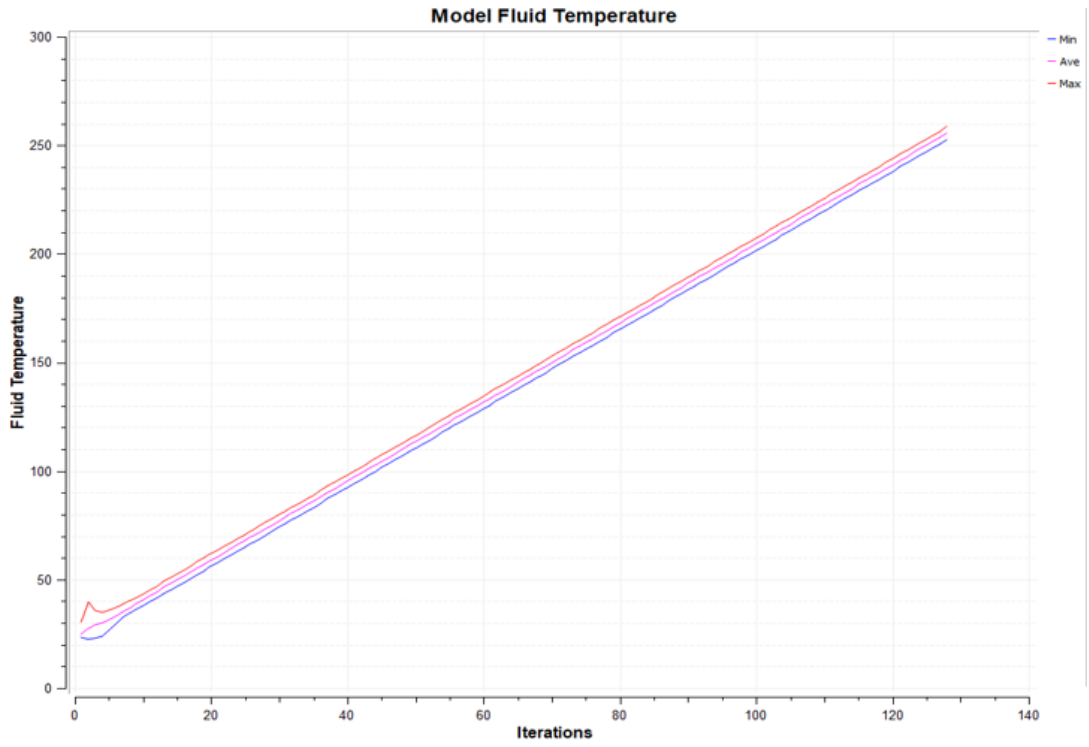
		Lähtötilanne 20 °C	
Luvut arvioitu visuaalisesti kuvista			
		Versio 1	Versio 2
1kW ja 200l/h			
Virtaus [mm/s]	Max	460	546
	Kanavissa ≈	75	500
Lämpötila	Fluidi max	25,3	24,3
	Fluidi ulostulo ≈	24	24,3
	Kappaleen pinta max	34,5	26,6
Laskettu fluidin lämpötila		24,29	
1kW ja 400l/h			
Virtaus [mm/s]	Max	874	1093
	Kanavissa ≈	240	1030
Lämpötila	Fluidi max	22,8	22,2
	Fluidi ulostulo ≈	22,2	22,2
	Kappaleen pinta max	28,9	23,9
Laskettu fluidin lämpötila		22,15	
6kW ja 400l/h			
Virtaus [mm/s]	Max		1093
	Kanavissa ≈		1030
Lämpötila	Fluidi max		33
	Fluidi ulostulo ≈		33
	Kappaleen pinta max		43
Laskettu fluidin lämpötila		32,88	

5.1 Simulointi 6kW ja 400l/h suljettu nestekierto

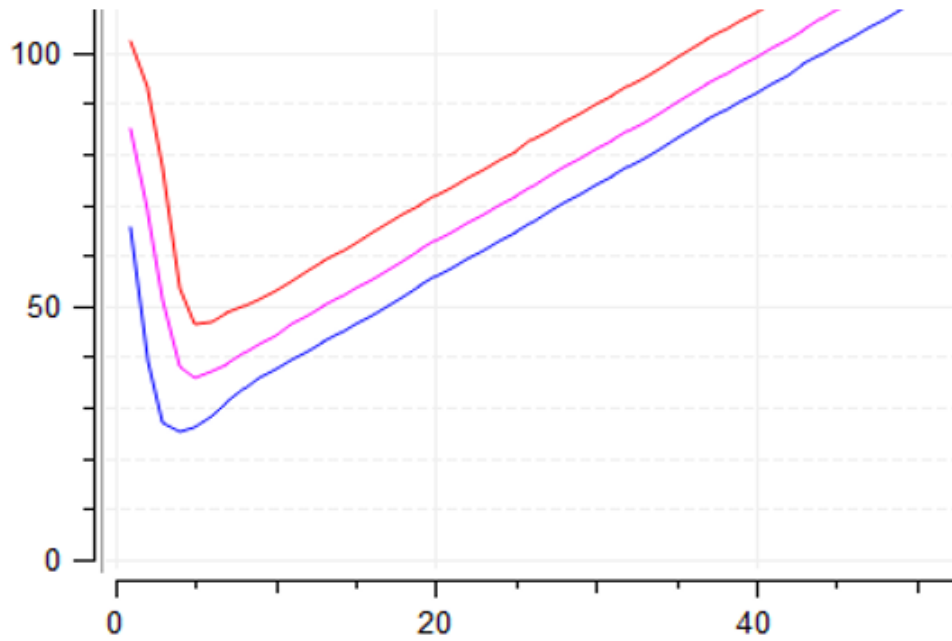
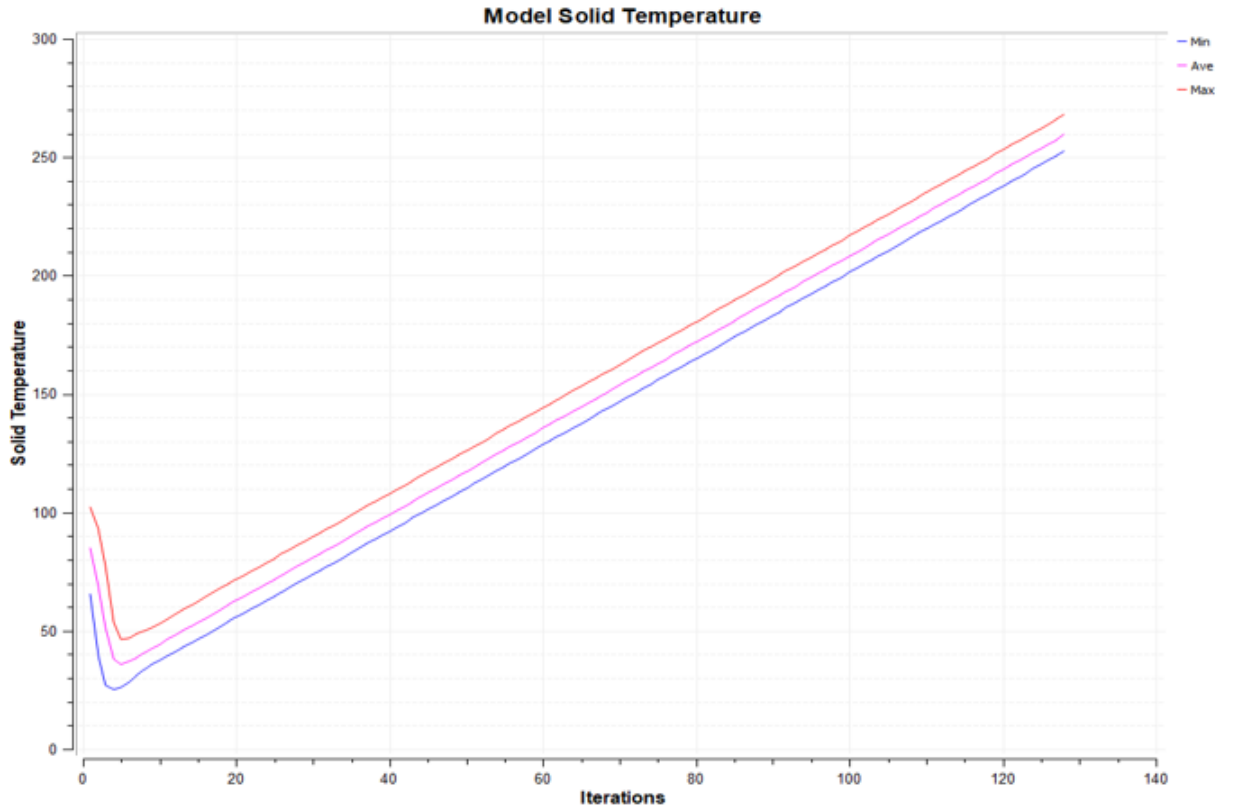
Tässä simuloinnissa simuloitiin tilannetta, jossa lämpökuormaa olisi 6kW, neste-kierto olisi suljettu ja se pystyisi haihduttamaan lämpöä 1kW teholla, eli simuloitiin hetkellistä suuren ylikuormituksen tilannetta. Simuloinnissa käytettiin lämmönvaihtimen versiota kaksi. Kuvaajissa pysty akselilla on lämpötila celsiusasteina ja vaakakselilla aika sekunteina. Simuloinnin alkutilanne vastaa liitteen 6 simulointia, eli vasta siitä tilanteesta alkaa suljettu nestekierto. Näin ollen myös tämän simuloinnin tulokset voitiin tarkistaa laskurilla (Taulukko 4). Kuvaajassa 1 lämpötilaero maksimin ja minimin välillä on noin 5 astetta ja laskurilla saatu arvo heittää vain noin 2 astetta, joten voitiin todeta kuvaajan tulokset luotettaviksi. Kuvaajasta 2 nähdään, että tällaisessa tilanteessa maksimitehoa voitaisiin käyttää noin 25-33 sekuntia ennen kuin lämmönvaihtimen lämpötila nousee 80 asteeseen. Kuvaajan 1 kulmakertoimen laskettiin olevan noin 1,84, eli tässä tilanteessa täydellä kuormituksella nesteen lämpö nousee 1,84 °C/s. Kuvaajan 2 kulmakerroin on luonnollisesti sama.

Taulukko 4. Suljetun nestekierron simuloinnin tuloksien luotettavuus.

Fluidin tulo- ja menolämpötilojen erotus	$\Delta T = Q/mc_p$	12,88 °C
	Fluidin lämpötila	32,88 °C
	Tilavuusvirta	[l/h] 400
	Massavirta	m [kg/s] 0,111
Ominaislämpökapasiteetti	C_p [kJ/kg°C]	4,2
	Lämpöteho	Q [kW] 6
	Fluidin tiheys	ρ (20°C) 0,9982
	Alkulämpötila	20
	Kuvaajasta 1 fluidin max lämpötila alussa (t=1)	≈ 30
		2s kohdalla ≈ 40
		4s kohdalla ≈ 35
Kuvaajassa alussa piikki, mikä tasoittuu noin 35 asteeseen ja lähtee siitä kasvamaan lineaarisesti. Laskurilla saatu arvo vain n. 2 astetta vähemmän, joten kuvaajia voidaan pitää luotettavina.		



Kuvio 1. Fluidin lämpötilan kuvaaja.



Kuvio 2. Lämmönvaihtimen lämpötilan kuvaaja.

5.2 Yhteenveto tuloksista

Simuloinneilla saatiin kohtuullisen hyviä tuloksia, vaikka muutamia simulointeja olisi vielä voitu tehdä lisää ja lämmönvaihtimen toisen version mallinnus olisi haluttu saada valmiiksi ennen simulointeja. Simulointien tuloksia lämmönsiirrosta voitiin pitää luotettavina, sillä laskurilla saadut arvot olivat hyvin lähellä niitä. Tuloksista nähtiin, että versioiden välillä on lämmönsiirron suhteen prosentuaalisesti kohtuullisen suuria eroja, mutta kuitenkin lämpötilaeroina ne olivat melko pieniä.

Versioiden välillä virtauksissa on todella suuri ero, mikä on selvää, kun huomioidaan, millainen kanavien geometria versiossa yksi on. Vaikka ensimmäisen version kanavissa virtausnopeus on vain noin 15% verrattuna toiseen versioon, siirtyy siinä kuitenkin pääosin hyvin lämpö nesteeseen, eli kanavien läpi kulkeva tilavuusvirta täytyy olla paljon suurempi. Versioiden välillä nesteen lämpötilat ulostulon kohdalla ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta taas nesteen ja lämmönvaihtimen maksimilämpötilat ovat huomattavasti korkeammat versiossa kaksi, mikä näkyy hyvin liitteiden 2 ja 3 lämmönvaihtimien lämpötilojen kuvissa. Liitteen 2 lämmönvaihtimen lämpötilan kuvista nähdään, että ensimmäisen version maksimilämpötilat ovat kohtuullisen pienellä alueella ja muuten lämpötilat ovat lähellä versiota kaksi. Tässä kuumassa kohdassa nesteen virtausnopeuksissa ei nähdä mitään erikoista, mutta voidaan kuitenkin päätellä, että tässä kohtaa on turbulenttista virtausta, vaikka virtauksien suunnista ei saatu tietoa näillä simuloinneilla. Näin ollen ensimmäisen version kanavien geometriassa on vielä hyvin varaa parannukselle.

Vaikka näiden tuloksien perusteella versio kaksi näyttäisi kaikin puolin toimivan paremmin, pitää huomioida, että ensimmäistä versiota pystyy kuitenkin vielä pienilläkin muutoksilla parantamaan. On myös huomion arvoista, että ensimmäisen version lämmönvaihtimessa olisi tarvittaessa mahdollista kasvattaa tilavuusvirtaa huomattavasti enemmän, kuin toisessa versiossa, ennen kuin siitä syntyvä paine aiheuttaisi ongelmia. Käytännössä voitaisiin siis käyttää yhtä hyvin kumpaa tahansa versiota, kun ajatellaan pelkästään lämmönsiirtoa.

Täyden kuormituksen simuloinnin tuloksista nähdään, että nesteen lämpötila nousee 13 astetta. Jos lisäksi kuvitellaan, että tuleva neste olisi 40 asteista, olisi lähtevä neste 53 asteista ja tällöin lämmönvaihtimen maksimilämpötila olisi noin 63 astetta,

eli hyvin alle 80 asteen, kun oletetaan, että koko lämpökuorma saadaan haihdutettua pois. Myös viimeisen simuloinnin tuloksien (Kuvio 1 ja 2) avulla voidaan todeta, että vaikka alkutilanteessa neste olisi 40 asteista ja lämpöä pystyttäisiin haihduttamaan pois 1kW verran, voitaisiin huipputehoa käyttää vielä noin 7 sekunnin ajan, ennen kuin lämmönvaihtimen maksimi lämpötila olisi 80 astetta. Laskennat ja simulointien tulokset kokonaisuudessaan ovat taulukoissa liitteessä 1 ja simulointien kuvat liitteissä 2-6.

6 POHDINTA JA YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä alustavaa tutkimusta ja suunnittelua vanhemmoittorin nestejäähdytyksestä, jotta yritys pystyisi jatkamaan sen suunnittelua ja kehitystä myöhemmin. Tavoitteena oli myös saada lämmönvaihtimen simuloinneilla luotettavia tuloksia, joista olisi yritykselle hyötyä myöhemmin jäähdytyksen suunnittelussa. Tavoitteissa onnistuttiin siltä osin, että simuloinneilla saadut tulokset olivat luotettavia, kuten luvun 3.2 laskurin avulla todettiin. Yrityksellä ei ole juuri nyt tarvetta suunnitella nestejäähdytystä, joten jää nähtäväksi, kuinka yritys pystyy hyödyntämään tuloksia ja alustavia suunnitelmia. Luultavasti kuitenkin tässä on hyvä pohja yritykselle lähteä suunnittelemaan nestejäähdytystä ja varsinkin simuloinneista ja niiden tuloksista tulee varmaankin olemaan hyötyä.

Opinnäytetyö eteni vaihtelevasti, koska etenkin teoriaosoiden tekeminen ja yleisesti tekstin tuotto aiheuttivat paikoin vaikeuksia, mutta kuitenkin suunnittelu, mallinnus ja simulointi vaiheet etenivät kohtalaisen hyvin. Työn aloitus tuotti myös vaikeuksia, kun ei tiennyt, mistä lähteä liikkeelle ja työlle oli vaikea keksiä järkevää rakennetta, mutta kuitenkin kaiken kaikkiaan hankalinta oli tekstin tuottaminen. Mielenkiintoisinta työssä oli mallinnusten ja simulointien tekeminen, joten niiden osalta työ eteni hyvin.

Eniten työstä jäi vaivaamaan se, kun ei ehditty tekemään kaikkia simulointeja, joita olisi haluttu, eikä tekemään valmiiksi lämmönvaihtimen toisen version mallinnusta ennen simulointeja, koska koulu suljettiin hyvin lyhyellä varoitusajalla virusepidemian vuoksi ja simulointeja ei pystynyt tekemään muualla. Simulointeja olisi haluttu tehdä vielä ainakin eri staattorin leveyksillä, eri lämpökuormilla ja virtauksilla, sekä kaikki toisen version simuloinnit valmiilla mallinnuksella. Lisäksi olisi haluttu kokeilla 6kW ja 400l/h simulointia eri arvoilla, sekä rauhassa kokeilla tähän tapaukseen sopivia erilaisia simulointeja. NX-ohjelmassa olisi erittäin paljon tuntemattomia ominaisuuksia, mutta tässä tilanteessa ei niihin ehditty tutustumaan. Kuitenkin loppujen lopuksi näilläkin simuloinneilla saatiin luotettavia ja kohtuullisen hyviä tuloksia, joten kokeilematta jääneillä simuloinneilla ei välttämättä olisi saatu tuloksille paljoo lisäarvoa.

Tulevaisuudessa tästä voisi jatkaa esimerkiksi tutkimalla, millä eri tavoilla lämmönvaihtimen pystyisi käytännössä valmistamaan ja mikä tapa olisi kustannustehokain. Lisäksi tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista perehtyä lämmönvaihtimen nestetilavuuden geometrian optimointiin varsinkin version 2 osalta, sekä tehdä simuloitteja kokonaisesta jäähdytysjärjestelmästä.

LÄHTEET

- Audi MediaCenter. 10.8.2019. Audi e-tron cooling concept e-motor (animation). [Verkkosivu]. Audi-mediacyter.com. [Viitattu 11.3.2020]. Saatavana: <https://www.audi-mediacyter.com/en/audimediacytv/video/audi-e-tron-cooling-concept-e-motor-animation-4847>
- Chau, K., 2015. Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application. [Verkkokirja]. New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated. [Viitattu 22.1.2020]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Gai, Y., Kimiabeigi, M., Chong, YC., Widmer, J., Deng, X., Popescu, M., Goss, J., Staton, D. & Steven, A. 2018. Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples and Computation Methods - A Review. [Verkkoartikkeli]. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers. [Viitattu 3.3.2020]. Saatavana: <https://eprints.ncl.ac.uk/248797>
- Huang, J., Naini, SS., Miller, R., Rizzo, D., Sebeck, K., Shurin, S. & Wagner, J. 16.3.2019. A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System– Design, Model, and Control. [Verkkoartikkeli]. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers. [Viitattu 11.3.2020]. Saatavana: https://www.researchgate.net/publication/331417484_A_Hybrid_Electric_Vehicle_Motor_Cooling_System-Design_Model_and_Control
- Hudges, A. & Drury, B. 2013. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. [Verkkokirja]. Amsterdam: Elsevier Science & Technology. [Viitattu 22.1.2020]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Lee, T. 24.4.2019. Motor technology from Model 3 helps Tesla boost Model S range 10%. [Verkkajulkaisu]. Massachusetts: Ars Technica. [Viitattu 7.2.2020]. Saatavana: <https://arstechnica.com/cars/2019/04/motor-technology-from-model-3-helps-tesla-boost-model-s-range-10/>
- Motiva. 2016. Energiatehokas Lämmönsiirto. [pdf-tiedosto]. Helsinki: Motiva Oy. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavana: https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf
- Motiva. 3.6.2019. Sähkömoottorityytit. [Verkkosivu]. Helsinki: Motiva Oy. [Viitattu 22.1.2020]. Saatavana: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikeminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottorittekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityytit

- Roberts, R. 12.10.2019. Switched Reluctance motors, an old design is suddenly important now. [Verkojulkaisu]. Electricbike.com. [Viitattu 7.2.2020]. Saatavana: <https://www.electricbike.com/switched-reluctance-motors-an-old-design-is-suddenly-important-now/>
- Sekulic, D. & Shah, R. 2003. Fundamentals of Heat Exchanger Design. [Verkkokirja]. New Jersey: John Wiley & Sons. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavana Knovel Mechanics & Mechanical Engineering Academic -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. Suomentaja Osmo Ranta. Helsinki: Painatuskeskus Oy.
- Özişik, M. 2018. Heat Transfer. [Verkkokirja]. New Delhi: Scientific International. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavana Knovel Mechanics & Mechanical Engineering Academic -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.

LIITTEET

Liite 1. Tulokset ja laskennat

Liite 2. Version 1 simulointi 1kW ja 200l/h

Liite 3. Version 2 simulointi 1kW ja 200l/h

Liite 4. Version 1 simulointi 1kW ja 400l/h

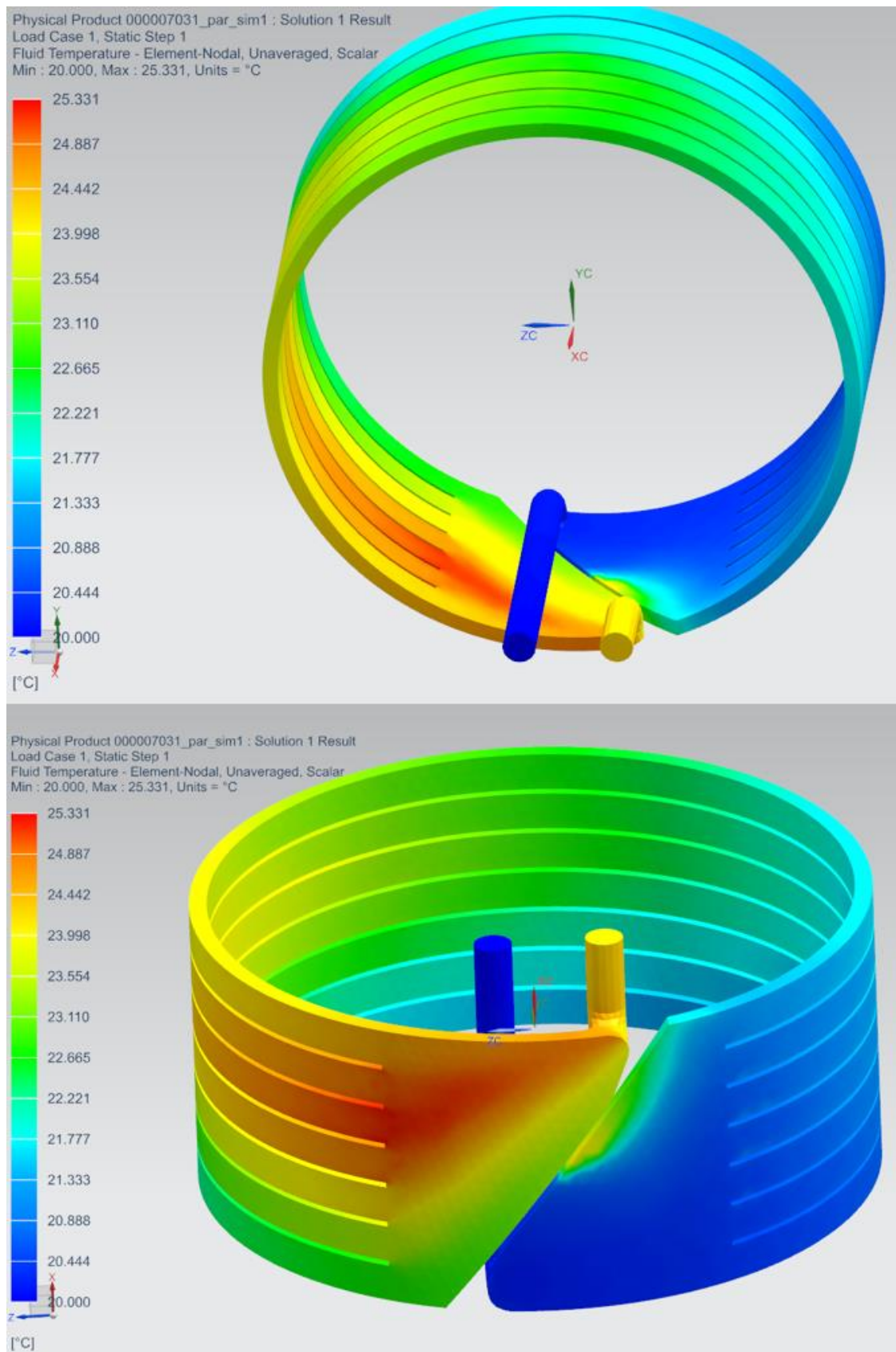
Liite 5. Version 2 simulointi 1kW ja 400l/h

Liite 6. Version 2 simulointi 6kW ja 400l/h

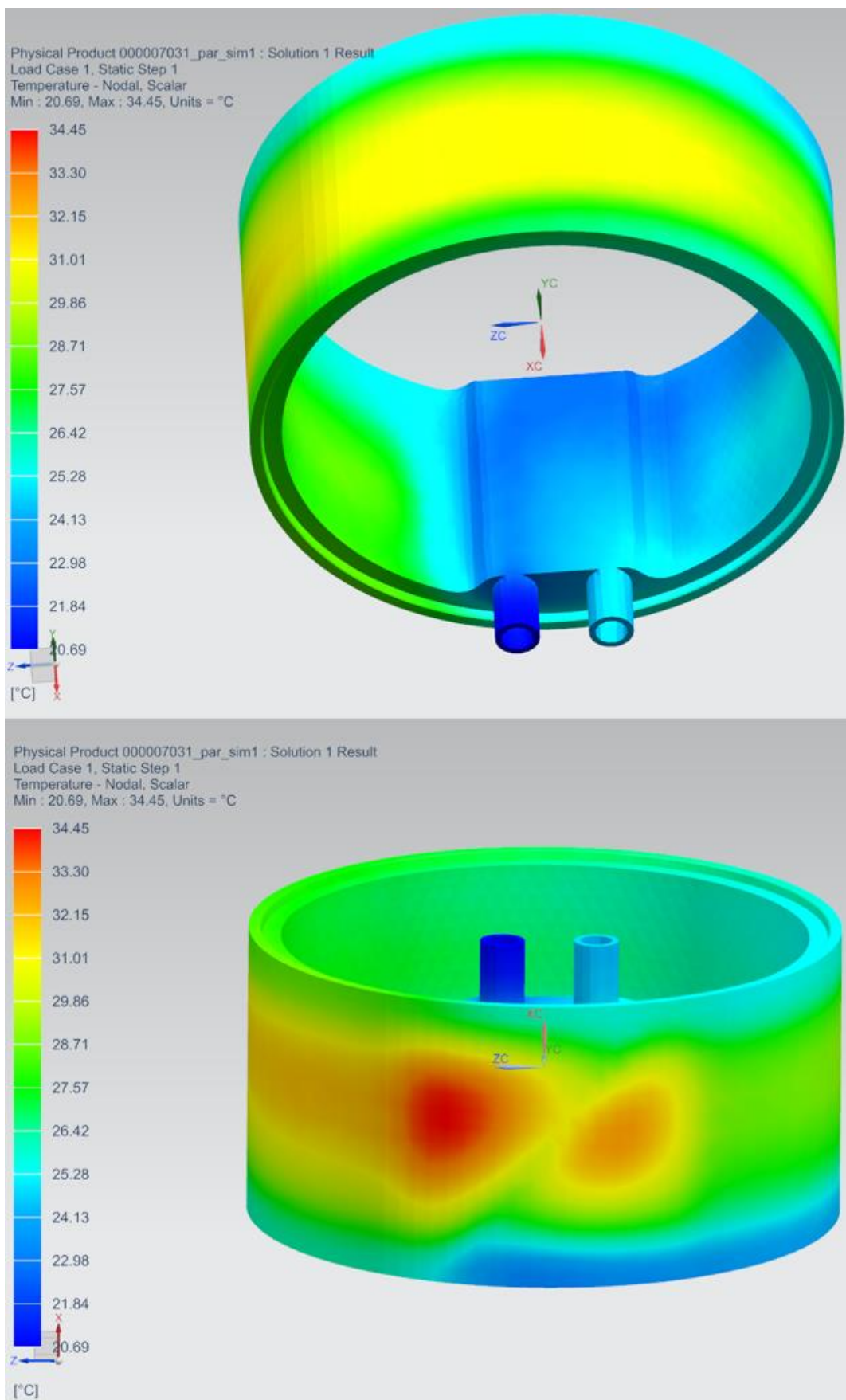
Liite 1. Tulokset ja laskennat

Simulointien tulokset ja niiden luotettavuus						
	Lähtötilanne 20 °C					Tulos
	Luvut arvioitu kuvista visuaalisesti					Syöttö
		Versio 1	Versio 2			
		1kW ja 200l/h		Fluidin tulo- ja menolämpötilojen erotus $\Delta T = Q/mc_p$ [°C]		4,29
Virtaus [mm/s]	Max	460	546		Fluidin lämpötila [°C]	24,29
	Kanavissa ≈	75	500			
Lämpötila	Fluidi max	25,3	24,3		Tilavuusvirta [l/h]	200
	Fluidi ulostulo ≈	24	24,3		Massavirta m [kg/s]	0,055
	Kappaleen pinta max	34,5	26,6	Ominaislämpökapasiteetti C_p [kJ/kg°C]		4,2
	Laskettu fluidin lämpötila	24,29			Lämpöteho Q [kW]	1
	Fluidi lasketun ja simuloitun erotus	1,01	0,01		Fluidin tiheys ρ (20°C)	0,9982
		1kW ja 400l/h			Alkulämpötila	20
Virtaus [mm/s]	Max	874	1093			
	Kanavissa ≈	240	1030			
Lämpötila	Fluidi max	22,8	22,2			
	Fluidi ulostulo ≈	22,2	22,2			
	Kappaleen pinta max	28,9	23,9			
	Laskettu fluidin lämpötila	22,15				
	Fluidi lasketun ja simuloitun erotus	0,65	0,05			
		6kW ja 400l/h				
Virtaus [mm/s]	Max		1093			
	Kanavissa ≈		1030			
Lämpötila	Fluidi max		33			
	Fluidi ulostulo ≈		33			
	Kappaleen pinta max		43			
	Laskettu fluidin lämpötila	32,88				
	Fluidi lasketun ja simuloitun erotus		0,12			
Lasketut arvot eroavat simuloituista enintään vain noin 1 asteen verran ja kun huomioi, että versiossa 1 havaittiin turbulენტista virtausta ja siten kuumia kohtia, voidaan pitää saatuja tuloksia luotettavina						

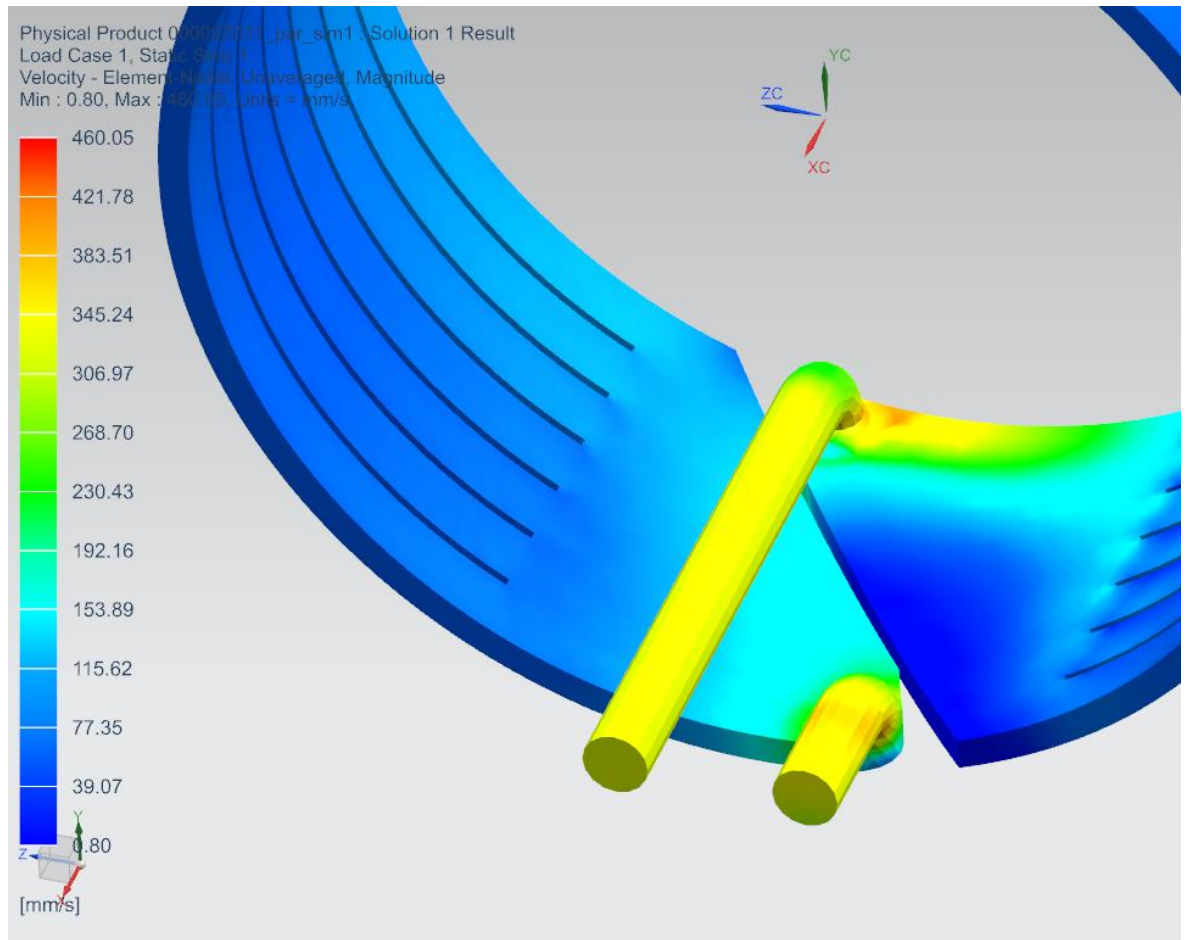
Suljetun nestekierron simuloinnin tuloksien luotettavuus			
Fluidin tulo- ja menolämpötilojen erotus	$\Delta T = Q/mc_p$ [°C]	12,88	Kuvio 2
Fluidin lämpötila [°C]		32,88	
Tilavuusvirta	[l/h]	400	T max alku 47
Massavirta	m [kg/s]	0,111	T max loppu 60
Ominaislämpökapasiteetti	C_p [kJ/kg°C]	4,2	ΔT 13
Lämpöteho	Q [kW]	6	nousu 1/s 1,84
Fluidin tiheys	ρ (20°C)	0,9982	kesto s 7,07
Alkulämpötila		20	
Kuvaajasta 1 fluidin max lämpötila alussa (t=1) \approx		30	
	2s kohdalla \approx	40	
	4s kohdalla \approx	35	
Kuvaaja 1 (Fluidin lämpötila)		Kuvaaja 2 (Pinnan lämpötila)	

Liite 2. Version 1 simulointi 1kW ja 200l/h

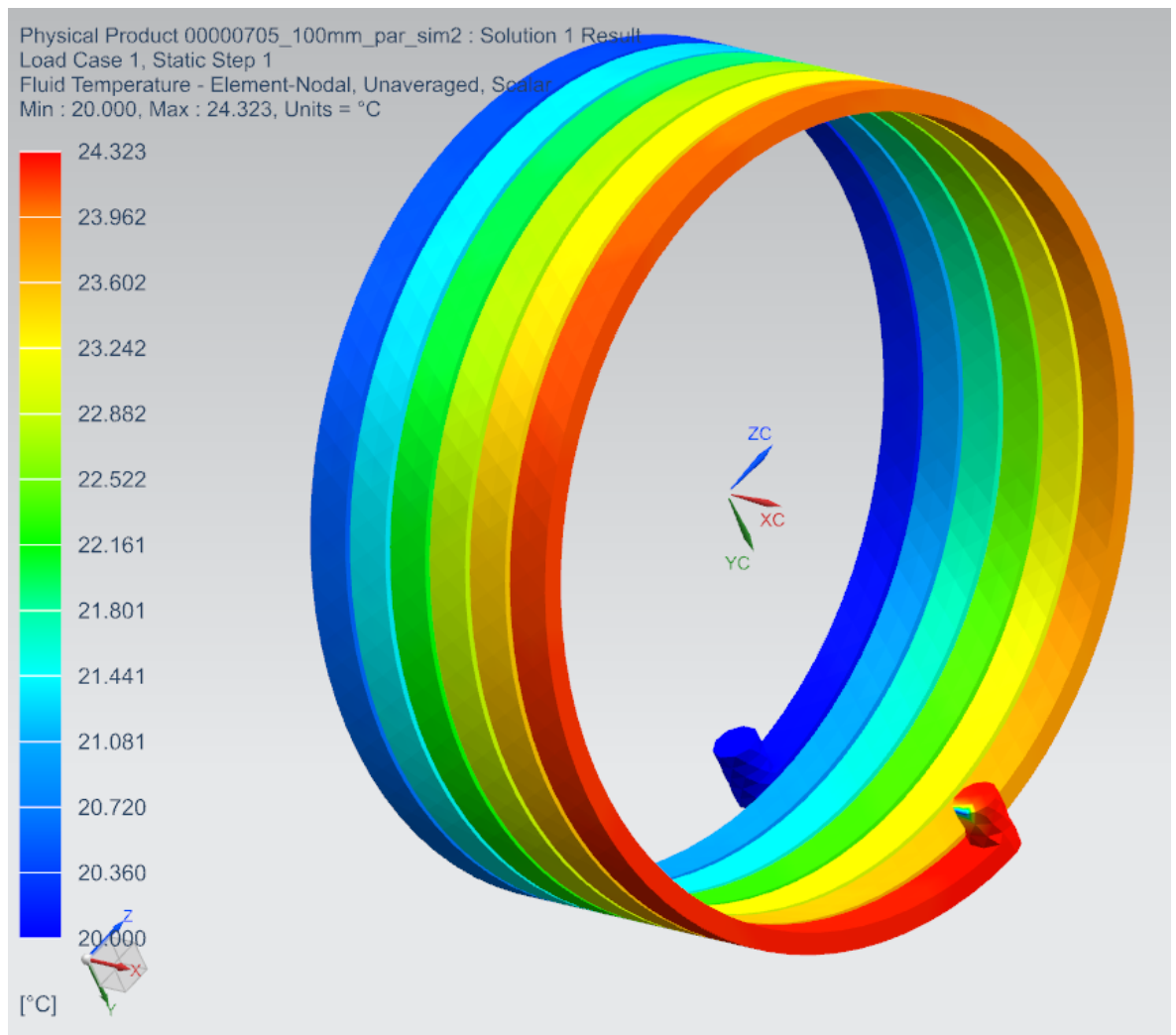
Fluidin lämpötila



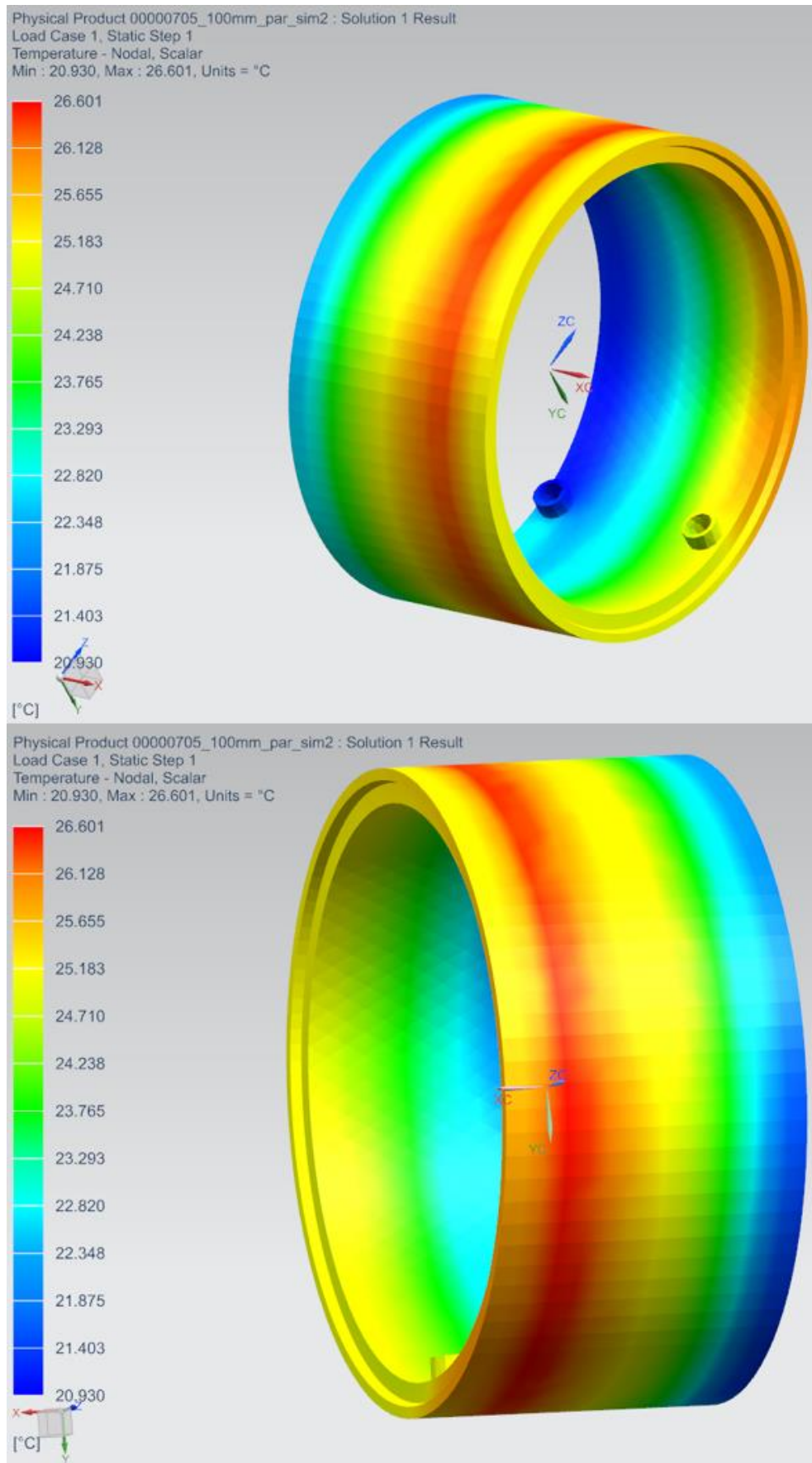
Lämmönvaihtimen lämpötila



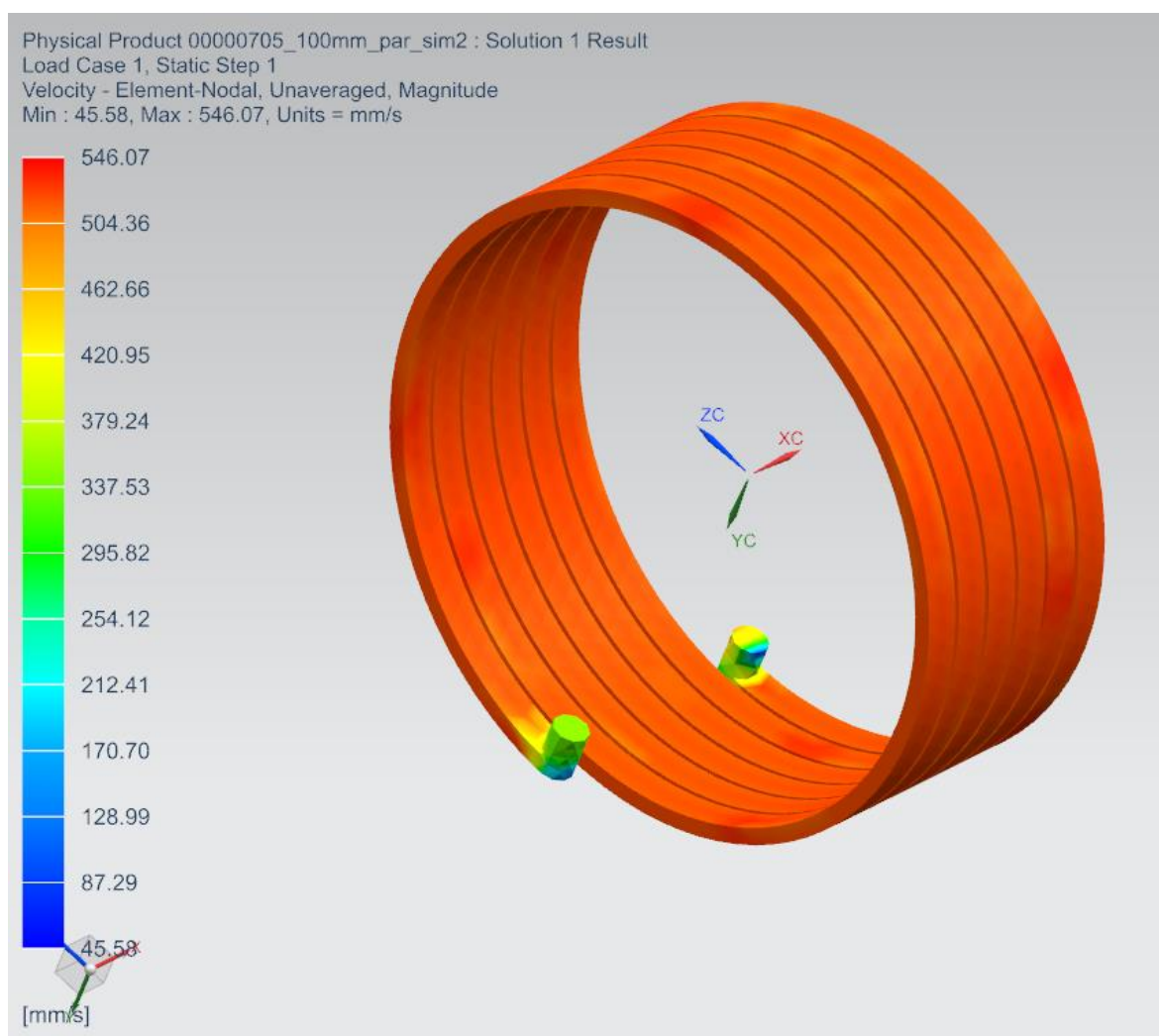
Virtausnopeudet

Liite 3. Version 2 simulointi 1kW ja 200l/h

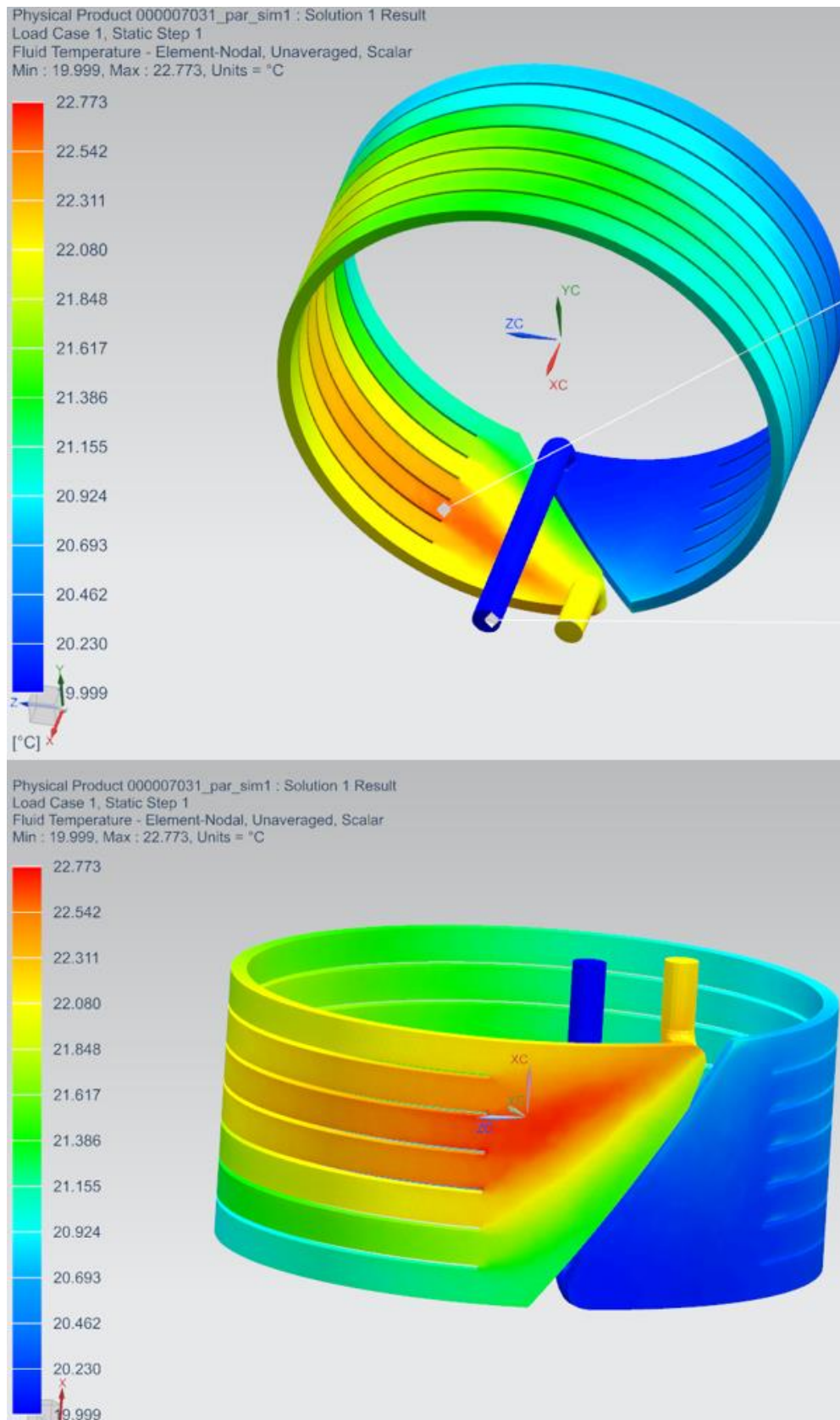
Fluidin lämpötila



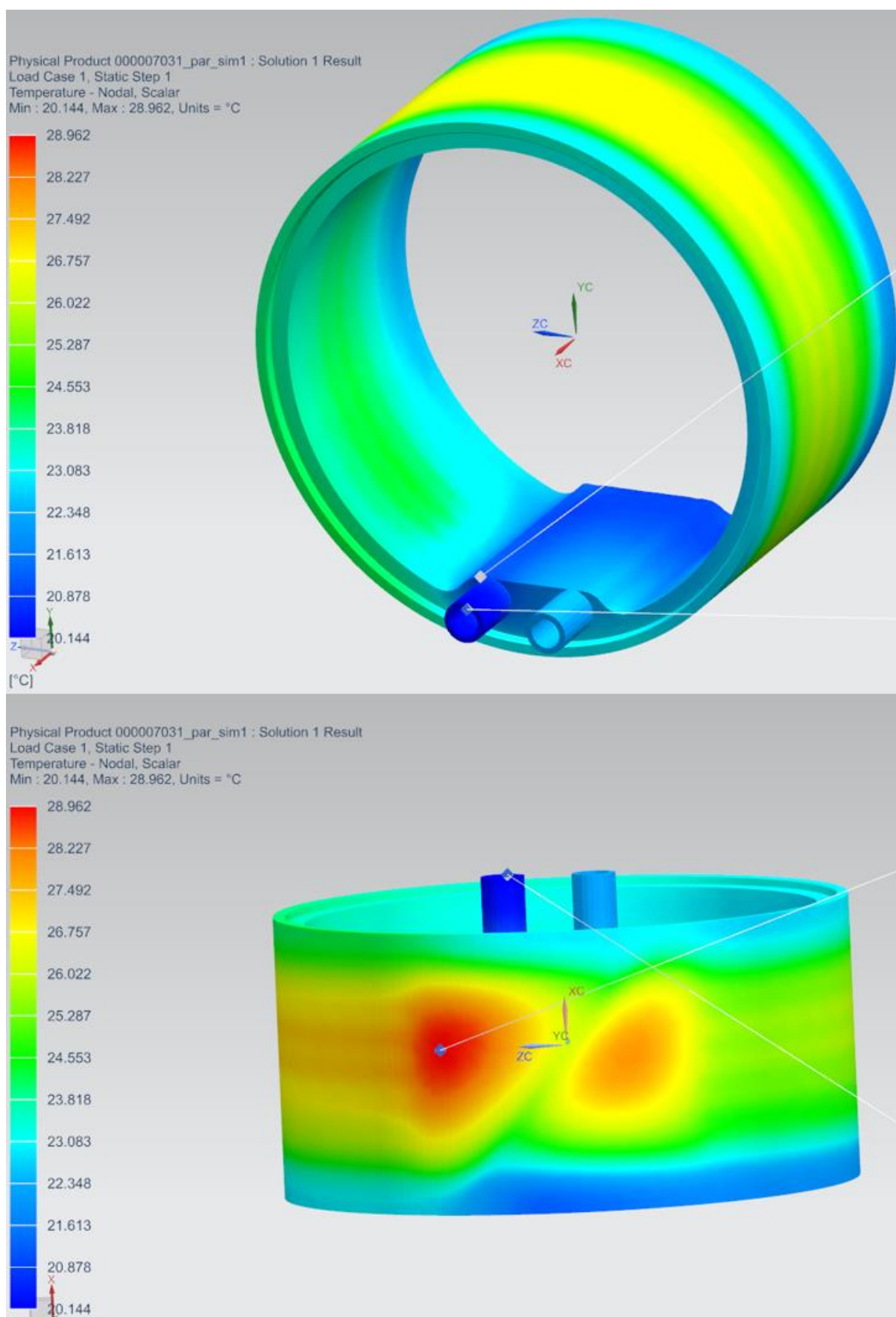
Lämmönvaihtimen lämpötila



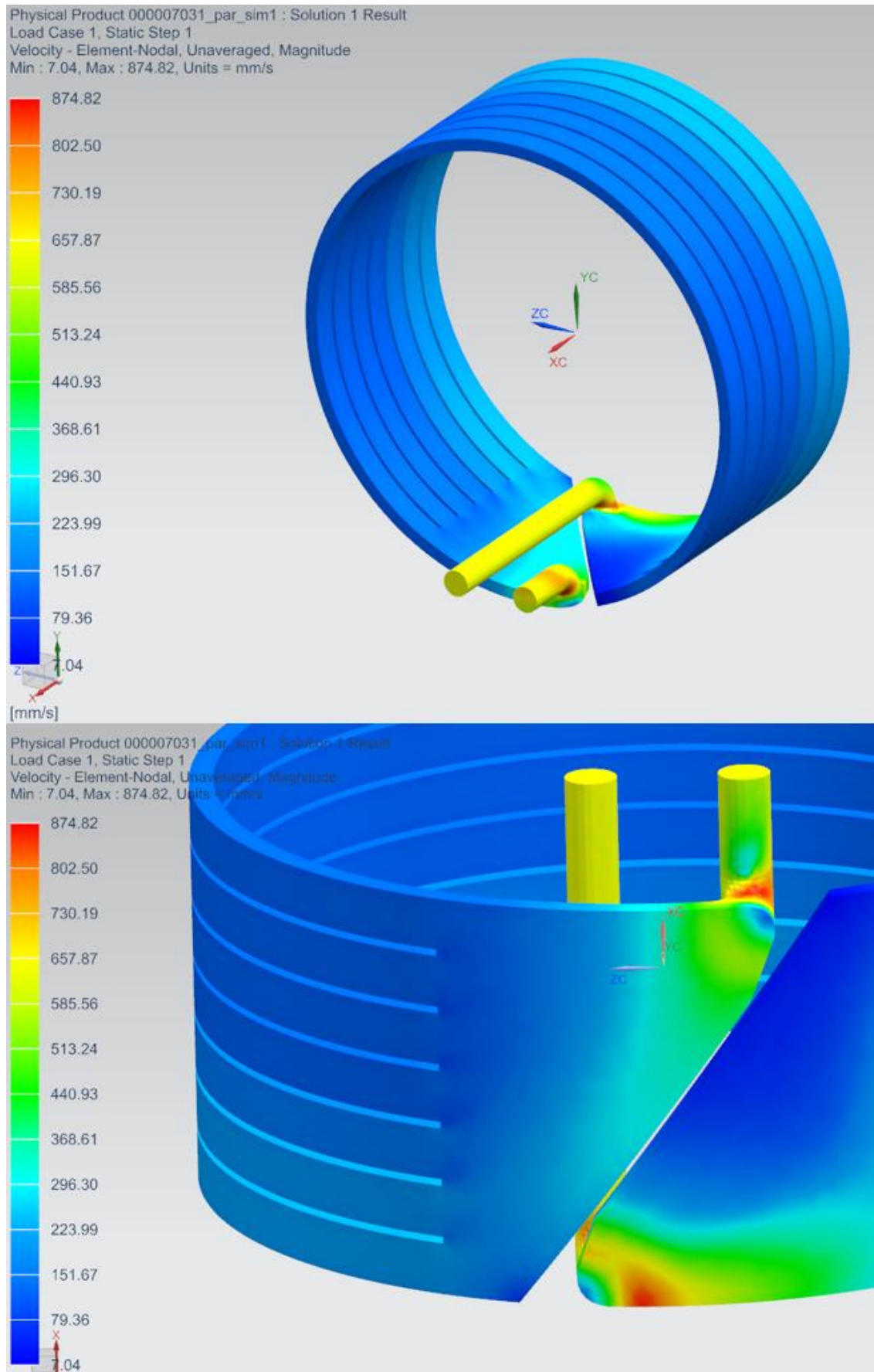
Virtausnopeudet

Liite 4. Version 1 simulointi 1kW ja 400l/h

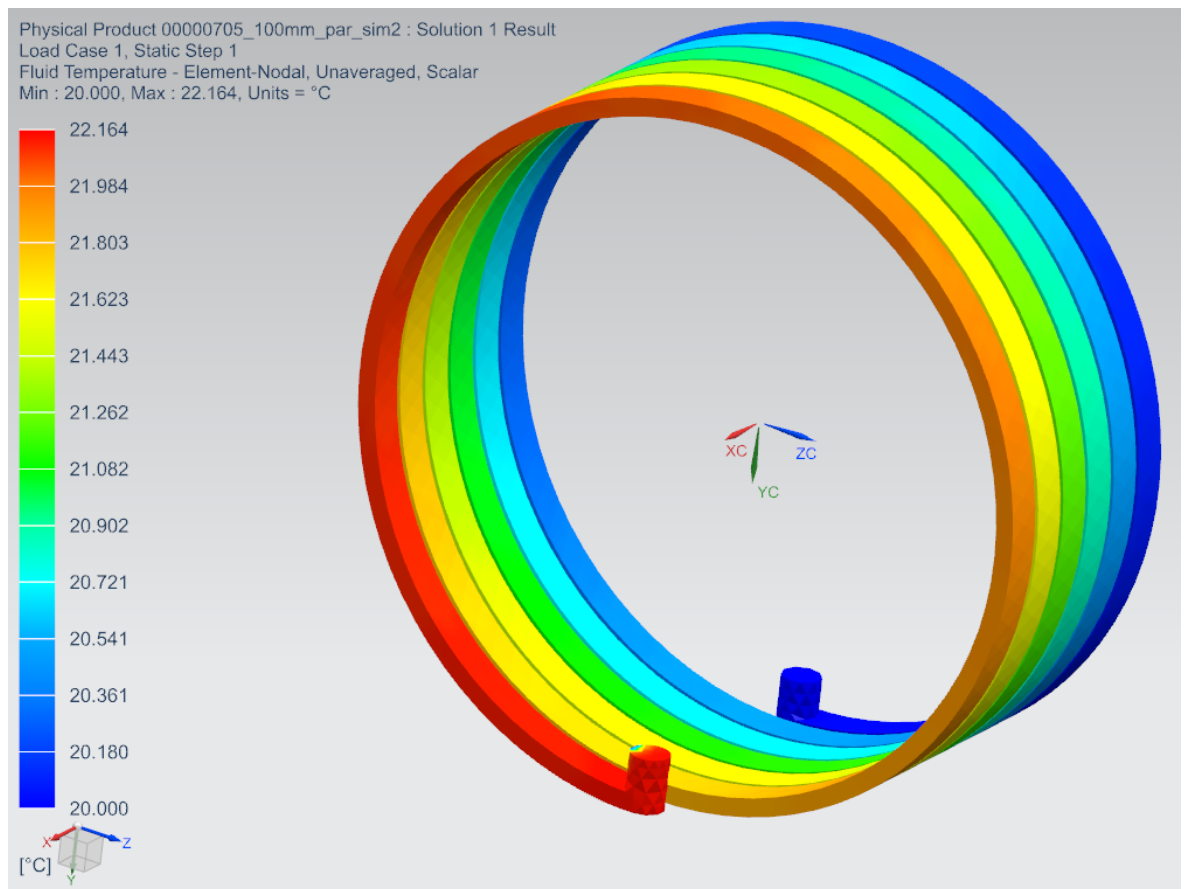
Fluidin lämpötila



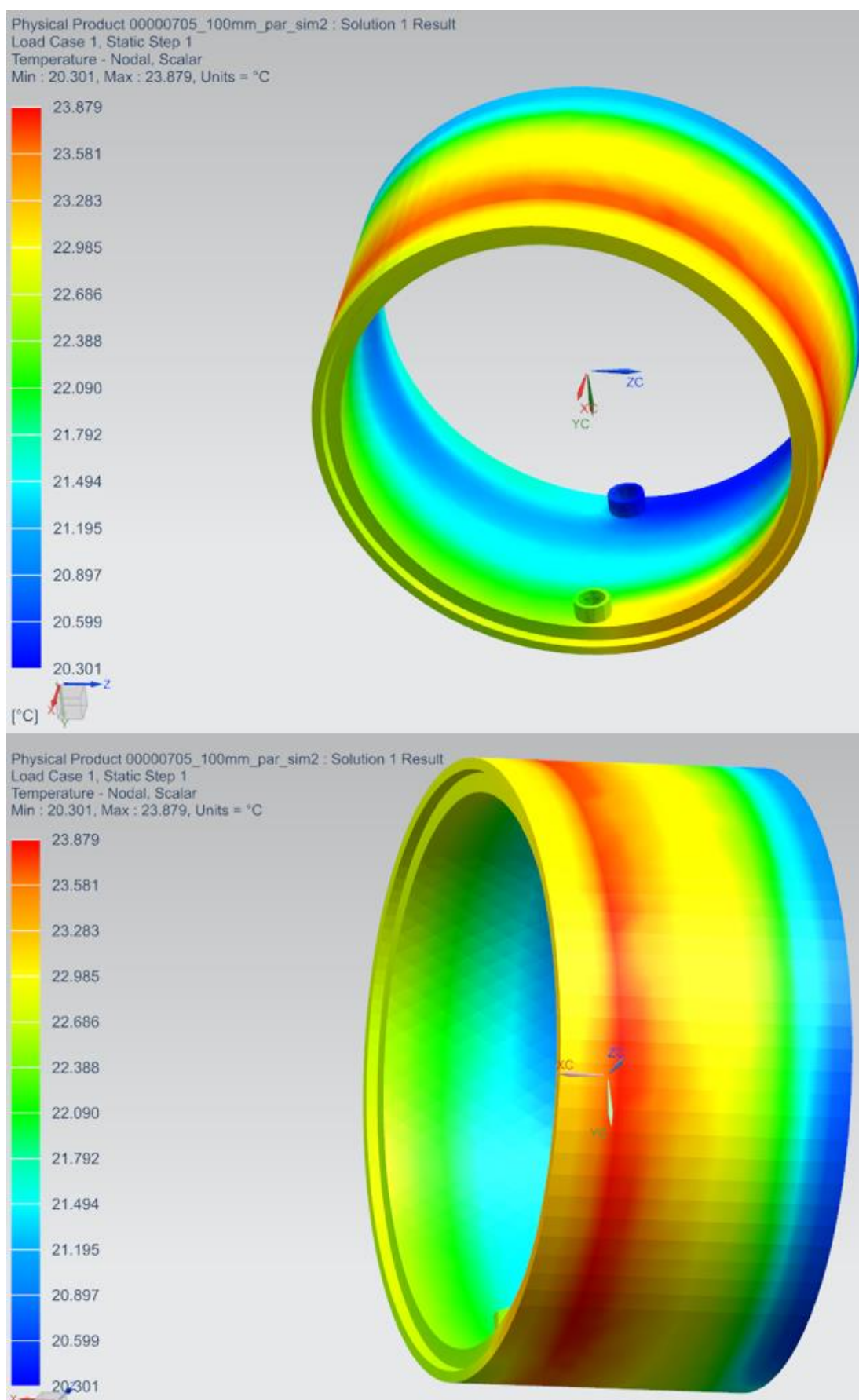
Lämmönvaihtimen lämpötila



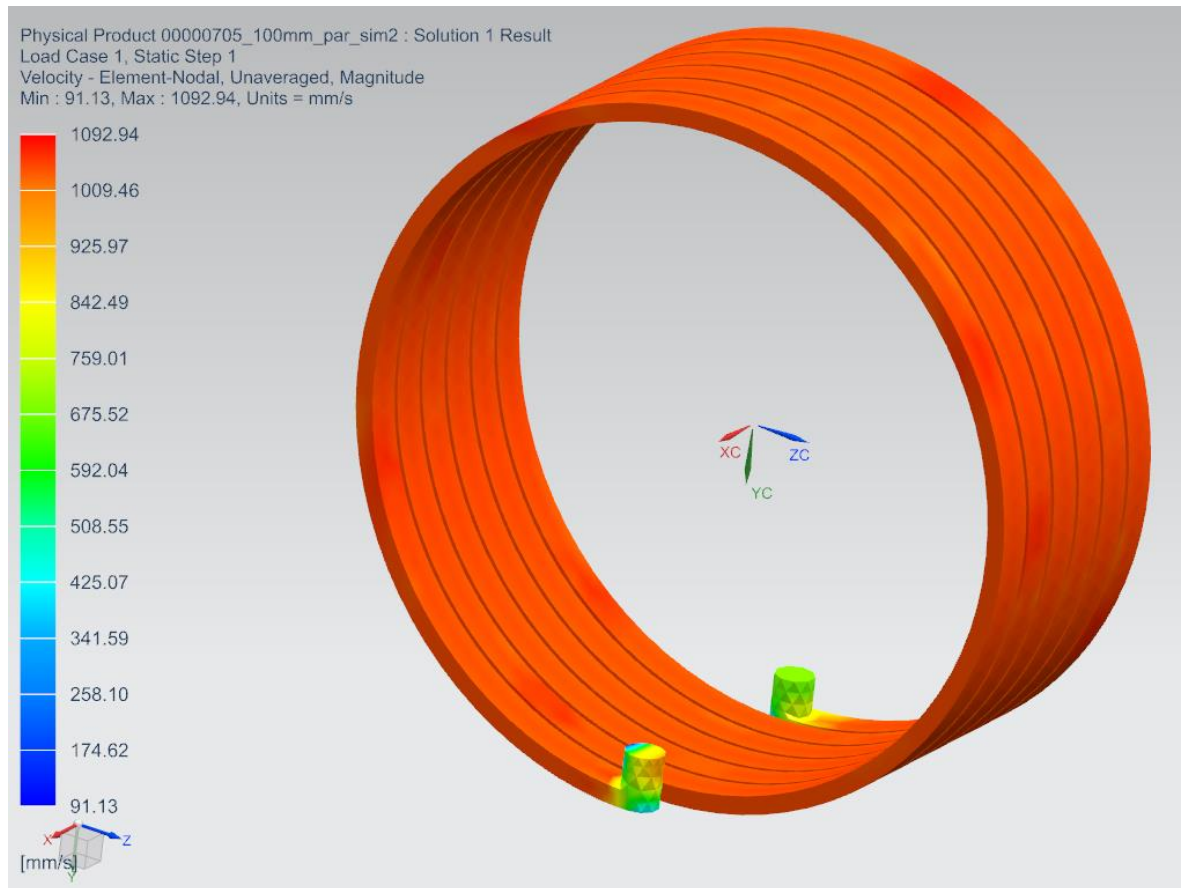
Virtausnopeudet

Liite 5. Version 2 simulointi 1kW ja 400l/h

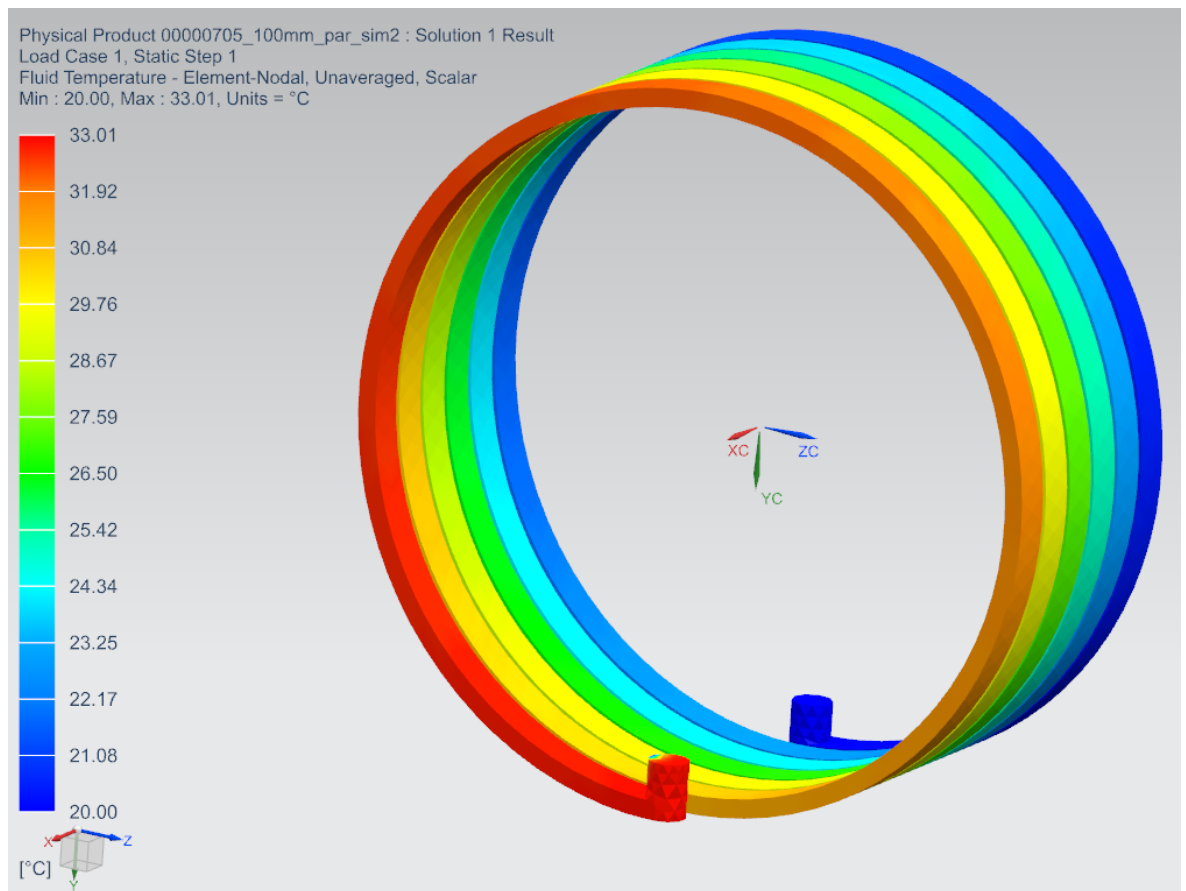
Fluidin lämpötila



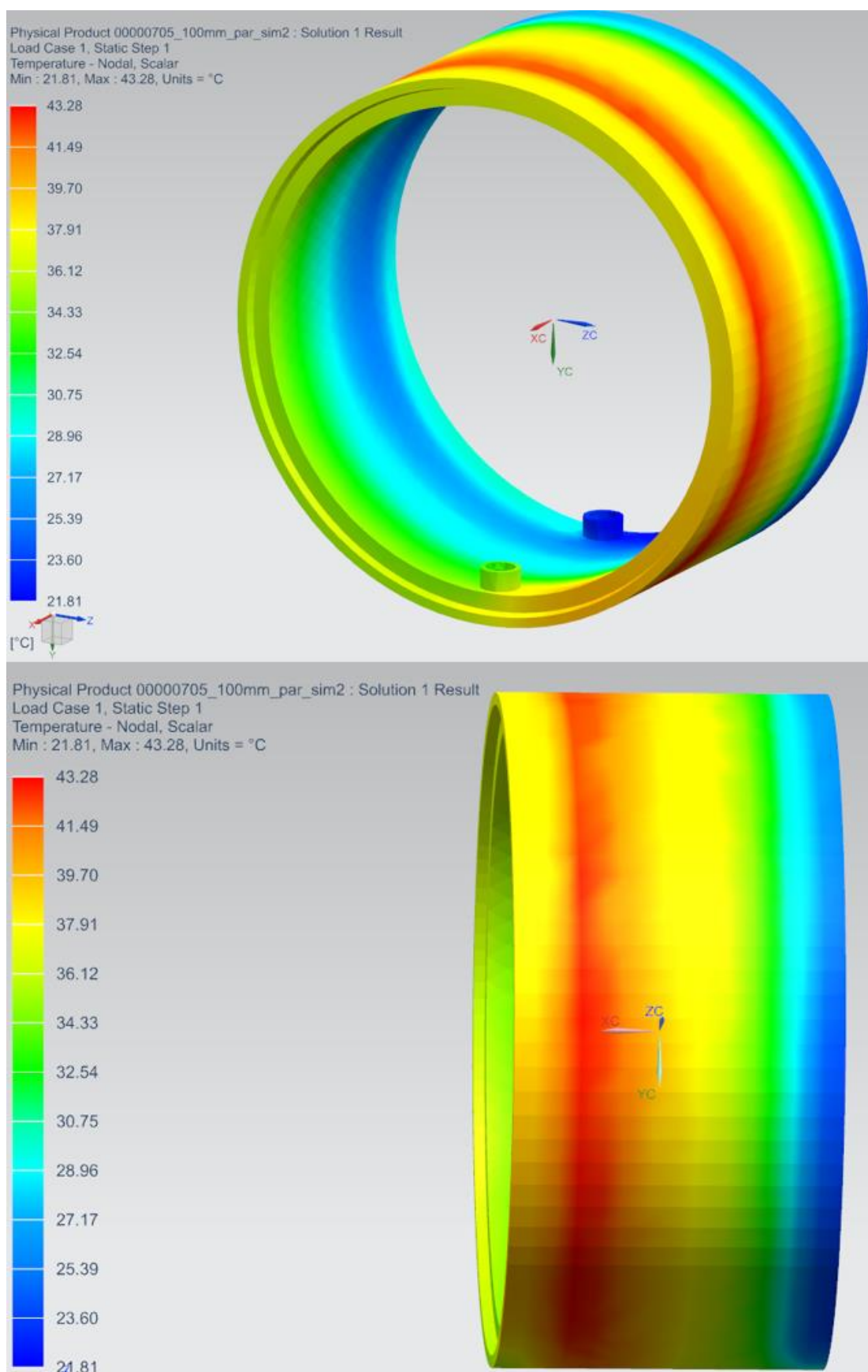
Lämmönvaihtimen lämpötila



Virtausnopeudet

Liite 6. Version 2 simulointi 6kW ja 400l/h

Fluidin lämpötila



Lämmönvaihtimen lämpötila