

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Nikolai Ylimys

LED-valon lämmönhallinta

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2014



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Joulukuu 2014**  
**Kone- ja tuotantotekniikan koulu-**  
**tusohjelma**  
Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
p. (013) 260 6800 p. (013) 260 6906

Tekijä(t)  
Nikolai Ylimys

Nimeke  
LED-valon lämmönhallinta

Toimeksiantaja  
Karelia-ammattikorkeakoulu

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja kehittää uusia lämmönsiirtoon liittyviä menetelmiä sekä tutkia alumiinin korvaamista lämpöä johtavilla muovimateriaaleilla jäähdytys-elementtejä suunniteltaessa ja valmistettaessa. Työ toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun toimeksiannosta ja se oli osa laajempaa projektia, jota koulu teki.

Opinnäytetyön aiheena oli pääasiallisesti suunnitella ruiskuvalamalla valmistettava jäähdytys-elementti kahdelle LED-elementille ja tutkia tämän lämmönsiirtokykyä verrattuna samanlaiseen alumiinista valmistettuun kappaleeseen. Työssä tutkittiin näiden materiaalien ominaisuuksia, sekä erilaisten kappaleiden valmistettavuutta molemmista materiaaleista ja vertailtiin valmistuksen eri vaiheita sekä niiden edullisuutta verrattuna toisiinsa.

Työssä oli sekä teorian että käytännön osuus, joista käytännön osuus tehtiin laboratorio-olosuhteissa. Ruiskuvalumuotti suunnitellusta kappaleesta valmistettiin Karelia-ammattikorkeakoulun laitteilla ja varsinainen ruiskuvalaminen tehtiin Vesuto Oy:n toimesta.

Kieli  
suomi

Sivuja 32

**Asiasanat**

LED, lämmönjohtokyky, ruiskuvalu, jäähdytys, konvektio



**THESIS**  
**December 2014**  
**Degree Programme in Mechanical and**  
**Production Engineering**  
Karjalankatu 3  
80220 JOENSUU  
FINLAND  
Tel. 358-13-260 6800

Author (s)  
Nikolai Ylimys

Title  
Thermal management of LED-lighting

Commissioned by  
Karelia University of Applied Science

**Abstract**

The aim of this thesis was to explore and develop new heat transferring methods and to investigate the replacement of aluminium with thermally conductive plastic materials when designing and manufacturing cooling elements. The work was carried out on behalf of Karelia University of Applied Sciences and it was a part of a larger project which the school did.

The topic of this thesis was mainly to design a heatsink for two LED elements which will be manufactured by injection molding and to explore the heat transfer capacity compared to a similar shaped aluminium piece. The properties of these two materials were studied as well as the manufacturability of the two pieces made of both materials. The manufacturing process and its different phases with their profitability compared to each other were a part of the study.

The work had both the theoretical and practical part and the practical part was made under laboratory conditions. The injection mold pieces of my design were made with the devices owned by Karelia University of Applied Science and the actual injection molding was done by Vesuto Oy.

Language  
Finnish

Pages 32

**Keywords**

LED, thermal conductivity, extrusion molding, cooling, convection

# Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto .....	5
1.1	LedTrix-hankkeen tavoitteet.....	6
1.2	Lämmönhallinnan tutkimus .....	6
2	Yleistä teoretietoa .....	7
2.1	Ruiskuvalu .....	8
2.2	Ruiskuvalu muotti .....	9
2.2.1	Muotin suunnittelun lähtökohdat .....	9
2.3	LED-teknologia .....	10
2.3.1	Suurteholedit ja niiden käyttö.....	11
2.4	Lähtötietoja .....	12
2.5	FR4-lasikuituvahvistettu epoksilevy .....	13
2.5.1	Epoksilevyn jäähdytyskennojen suunnittelu.....	14
2.6	Kolmen teho-ledin alumiinipiirilevy .....	15
3	Ruiskuvalettavan kappaleen suunnittelu.....	16
3.1	Päästökulma .....	16
3.2	Muotissa huomioon otavat piirteet .....	17
3.3	Muotin suunnittelu.....	18
3.4	Plastic Advisor .....	19
4	Kuuden teholedin lamppu .....	20
4.1	Lopputuote.....	20
4.1.1	Kaksimateriaalielementti.....	21
5	Comsol Multiphysics ja sen käyttö .....	22
5.1	Emissiivisyys.....	23
5.1.1	Musta kappale .....	24
5.1.2	Kokonaisemissiivisyyskertoimen muutokset .....	24
5.2	Staattinen tila laskennassa .....	25
6	Lämpökamerakuvaus.....	28
6.1	Staattinen tila ja ilmavirran vaikutus jäähdytykseen.....	28
6.2	Lämpökameran kuvien analysointi.....	30
7	Johtopäätöksiä tuloksista ja pohdintaa .....	30
	Lähteet.....	32

## 1 Johdanto

Opinnäytetyö tehtiin Karelia-ammattikorkeakoulun toimeksiannosta. Tehtävänä oli suunnitella ja tutkia erilaisia jäähdytyskennostoja käytössä oleville LED-piireille. Tarkoituksena oli tutkia, voitaisiinko alumiinisia jäähdytyskennostoja korvata lämpöä johtavista muoveista valmistamalla ja mitä näihin muutoksiin sisältyisi sekä lämmönjohtavuuden että valmistettavuuden osalta. Tutkimus perustui laajempaan Ledtrix - LED-teknologian osaamispankki-hankkeen tavoitteisiin, jonka parissa työskenneltiin Karelia-ammattikorkeakoulussa vuosina 2010–2014 ja minä astuin siihen mukaan 2012.

LED-valaistuksen sovellusten yleisyys on jatkuvassa kasvussa ympäri maailman kaikilla teknologiateollisuuden aloilla, ja niiden edut muihin samankaltaisiin sovelluksiin on yleisesti ottaen huomioitu edukkaiksi ledien vähäisen kulutuksen, pienen koon sekä yleisen helppokäyttöisyyden vuoksi. Ledtrix-hankkeen yksi osa-alue oli tutkia LED-lamppujen käyttöiän pituutta ja ympäristön lämpötilan vaikutusta valotehon määrään.

Tutkimustyö alkoi yhden LED-lampun jäähdytyskennon suunnittelusta ja sen jäähdytyskyvyn tutkimisesta Comsol Multiphysics -ohjelmistoa hyväksikäyttäen. Itse 3D-mallinnus jäähdytyskennoja varten suoritettiin Creo-mallinnusohjelmistolla, mutta kappaleiden käyttäytyminen lämmön kanssa tutkittiin ja analysoitiin aina Comsolilla.

Yhden lampun sovelluksesta siirryttiin eteenpäin kolmen LED-lampun piiriin, jotka olivat aseteltuna yhteiselle alumiiniselle pohjalevyllä. Näitä piirejä päätettiin käyttää kaksi kappaletta vierekkäin ja yksi kolmen teholedin piiri tuottaisi yhteensä valotehoa 3000 lumenia. Työstä rajattiin pois osa ruiskuvalumuotin suunnittelusta.

## 1.1 LedTrix-hankkeen tavoitteet

Projektin tarkoituksena oli tutkia ja kehittää sekä tuottaa uutta tutkimustietoa LED-teknologioiden käytöstä valaistus-, lääketeollisuuden ja muun teollisuuden tarpeisiin. Projektin tarkoituksena oli tuottaa puolueetonta tietoa LED-valaistusteknologioista ja ledien käyttösovelluksista ja ledien soveltuvuudesta em. tarkoituksiin. Projektissa luotiin ensimmäisessä vaiheessa palvelukonsepti, minkä tarkoitus oli edistää LED-teknologioiden yleistymistä ja osaamisohjan täydentymisen avulla lisätä asiantuntemusta.

Projekti toteutettiin kolmena rinnakkaishankkeena: Itä-Suomen yliopiston (UEF) Fysiikan ja matematiikan laitos, Karelia-ammattikorkeakoulun liiketalouden ja tekniikan keskus (koko hankkeen koordinoija) ja Elektroniikan 3K-tehdas. Hankkeen tarkoitus oli Itä-Suomen alueen yritysten kilpailukyvyn lisääminen perustutkimuksen keinoin.

Projektin tavoitteena oli luoda osaamispankki LED-ratkaisujen tutkimuksen avulla lisäten ledejä tuotesovelluksissaan käyttävien tuotteiden jalostusarvoa siten, että siitä hyötyvät Itä-Suomen alueella toimivat yritykset. Projektin tavoitteet olivat monitieteellisen tutkimuksen vaatimia. Hankkeessa tutkittiin LED-teknologian ja -sovellusten optiikkaa ja sen toteutuksen eri ratkaisuja nykyisten ongelmien lähtökohdista, mekaanisia pinnoitemenetelmiä, lämmönhallintaan liittyviä uusia ratkaisuja, käyttöikänsä liittyviä ja vaikuttavia asioita sekä vertailtiin teknologioista riippuvia erikoisominaisuuksia. Eri osa-alueiden kautta saatua uutta tutkimustietoa yhdistettiin ja niiden mukaan kehitetään palveluja tukemaan tuoteinnovaatioiden ja uusien tuotesovellusten syntymistä. (Mönkkönen 2014.)

## 1.2 Lämmönhallinnan tutkimus

Tarkoituksena oli tutkia ledien tuottaman lämmön hallitsemiseen liittyviä eri ratkaisuja sovelluksissa, joissa tilanpuutteen vuoksi ei voida hyödyntää perinteisiä lämmönsiirtoratkaisuja (Mönkkönen 2014).

## 2 Yleistä teoriatietoa

Yleisesti tunnettu asia on, etteivät LED-lamput tuota paljoa lämpöä ja ne ovat pienestä koostaan huolimatta varsin tehokkaita valon lähteitä. Arkisessa käytössä LED-lampun käyttökohteena voi olla esimerkiksi taskulamppu tai avaimenperänä toimiva pienvalo, joiden valotehot liikkuvat verrattain pienissä lukemissa. Yleisesti itse LED-yksikkö jätetään paljastetuksi niiden visuaalisesti miellyttävän ulkomuodon vuoksi, mutta kun kyseessä onkin kohtalaisen suuren valotehon omaava teholedi, on tilanne täysin erilainen.

Loogista on, että kun lampun valoteho kasvaa, myös sen vaatima sähkön kulutus kasvaa ja valo on hyvä suunnata ja kohdistaa erillisellä optisella linssillä tarkemmin haluttuun suuntaan. Useimmiten lampun taakse on laadittava sähköpiiri ja tukeva kiinnitys, sekä eteen pienen matkan päähän tai lähes kiinni lampun pintaan erikoisvalmistettu optinen linssi. Tämä jättää LED-lampun lähes aina suljettuun tilaan ja estää vapaan jäähdytyksen mahdollisuuden. Kaikki tämä yhdessä mahdollistaa kappaleen, joka ei ainoastaan lämpene käyttäjälle epämu-kavaksi tuotteeksi, vaan myös lyhyen käyttöiän omaavaksi laitteeksi.

Lämpökennostot taas ovat ulkoisesti lähes jokaiselle tuttuja elementtejä mm. autojen jäähdyttimistä sekä lämpöpattereista niiden ripamaisen kuvion vuoksi. Pääasiassa tärkein ominaisuus lämpöä johtavassa kennostossa on kokonais-pinta-ala, sillä konvektio eli lämmön siirtyminen ilmakehään tapahtuu vain kappaleen pinnalta. Mitä nopeammin kappaleen pinnalla oleva ilma saadaan vaihtumaan, sitä nopeammin kappaleen pinta jäähtyy. Seuraavaksi lämpö pitää saada johdettua kappaletta pitkin mahdollisimman tehokkaasti sen pintaa kohti, ja jokaisella materiaalilla on olemassa oma lämmönjohtokykynsä. Isotrooppisilla materiaaleilla lämmönjohtokyky on hyvin yksinkertainen, kuten alumiinilla lämmönjohtokyky on yleisesti ottaen n.  $236 \text{ W/km}$ . Toisilla materiaaleilla, kuten tässä opinnäytetyössä käytettävällä lämpöä johtavalla muovilla, lämmönjohtokyky on pinnan suuntaisesti eriarvoinen kuin pintaan kohtisuorasti mitattuna. Tämä joh-tui pääasiassa materiaalin kuitutäytteestä ja kuitujen orientoitumisesta ruiskuva-lun virtaussuuntien mukaisiksi.

## 2.1 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on yleisin kestopuovituotteiden valmistusmenetelmä ja se juontaa juurensa 1872-luvulle, kun Jon Wesley Hyatt patentoi veljensä Isaiihin kanssa ensimmäisen ruiskuvalukoneen. Kolmiulotteisten kappaleiden valmistukseen kehitettiin ruiskuvalu, jossa muovimassa muotoillaan muotissa lopputuotteen määräämään muotoon. Seuraavien vuosikymmenten kuluessa itse ruiskuvalussa ei tapahtunut suuria kehityksiä vaan ennemminkin materiaaleissa. Uusien muovien kehitys saavutti huippunsa 1930–50-luvuilla, jolloin suurin osa nykyään käytettävistä kaupallisista muoveista oli tullut alan valmistukseen. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 19.)

Nykyään ruiskuvalettujen tuotteiden kokonaisvaltainen suunnittelu on mekaniikkasuunnittelijoiden arkipäivää ja työhön kuuluu merkittävänä osana ruiskuvalu-prosessin kehittäminen ja uusien erikoistekniikoiden synnyttäminen. Erikoistekniikoiden avulla saadaan ruiskuvaletuista kappaleista entistä monipuolisempia ja eri valmistusmenetelmiä saadaan integroitua muovituotteen muotoiluun ja rakenteeseen. Tuotesuunnittelun kokonaisvaltaistuminen, tuotteistamissyklin nopeutuminen sekä standardointi ovat viimeaikaisen kehityksen suurimmat tunnuspiirteet, jotka edesauttavat ruiskuvalutoiminnan verkkoutumista ja globalisointia sekä koko prosessin automatisointia. (Mts. 20.)

Materiaaliteknisistä näkökulmista ruiskuvaluprosessi on viime vuosina saavuttanut myös suuria edistysaskelia, kun mukaan on saatu komposiitit. Laajat lisäaineistusmahdollisuudet erilaisille muovimateriaaleille sallivat suunnittelijoille erilaisia vapauksia ja uudenlaisia mahdollisuuksia uusien menetelmien etsinnöissä ja tutkimuksissa. Suunnitellessa kappaleita ja sovelluksia uusia menetelmiä varten ovat ruiskuvaletut komposiitit syrjäyttämässä muita valmistustekniikoita jatkuvasti. (Mts. 21.)



## 2.2 Ruiskuvalumuotti

Ruiskuvalumuotit ovat ruiskuvalukappaleille halutun muodon antavia, yksinkertaisimmillaan kahdesta osasta muodostuvia kokoonpanoja, jotka kiinnitetään ruiskuvalukoneen muottipöytiin. Muoteissa on aina kaksi peruselementtiä, kiinteä ja liikkuva muottipuolikas, mutta näiden lisäksi niissä on vielä usein monia elementtejä.

Muotin perustehtäviin kuuluu toimia massasulan juoksukanavana, antaa ruiskuvalukappaleelle haluttu muoto, jäähdyttää ja jähmeyttää massasula kiinteään olomuotoon ja työntää valmis kappale ulos muotista. Erilaisilta muoteilta odotetaan erilaisia paineenkesto-ominaisuuksia ja muita rasituksia kestäviä ominaisuuksia, johtuen esimerkiksi ruiskuvalukoneen sulkuvoimista ja muotin avautumisesta.

### 2.2.1 Muotin suunnittelun lähtökohdat

Jokaisen muotin suunnittelussa on ajateltava, miten muotin ja kappaleen toimintatavat, pesälukumäärät, pesien sijoittelut jne. lopullisesti määritetään. Itse tuotteen suunnittelijan tulee aina tietää muottisuunnittelun ja valmistuksen vähimmäisvaatimukset, jotta ruiskuvalukappaleissa voidaan soveltaa muottien valmistukseen käytettäviä menetelmiä. Ruiskuvalutuotteen suunnitteluun työkohtaisesti palaan vielä luvussa 3.3 enemmän.

Kappaleen ulostyönnön vuoksi muottiin on aina suunniteltava päästökulmia ja niiden suuruudet määritellään useimmiten suositusten mukaan, jotka määräytyvät taas kappaleen muodosta sekä muotin pinnanlaadusta. Päästökulmien täytyy olla riittävän suuria, jotta kappale saadaan ulostyönnettyä moitteettomasti, joten kappaleen muoto on hyvin ratkaiseva tekijä sekä muotin että kappaleen suunnittelijoille.

## 2.3 LED-teknologia

LED-lyhenne juontaa merkityksensä englannin kielisistä sanoista Light-Emitting Diode, joka tarkoittaa valoa emittoivaa diodia tai hohtodiodia. Ledin rakenne ja toimintaperiaate ovat molemmat hyvin yksinkertaisia. Valodiodi johtaa sähkövirtaa, kuten diodit aina, vain yhteen suuntaan lävitsensä ja tällöin puolijohde säteilee valoa ympärilleen. Diodin säteilemä valon väri määräytyy puolijohdekomponentin valmistemateriaalista, mutta valoa voidaan manipuloida lähteestään eteenpäin sovellusta valitessa esimerkiksi pinnoittamalla ledin pinta vaikkapa fluoresoivalla kalvolla.

Verrattuna hehkulamppuun ledien valotehoksi muuttuva energia on n. 95 % kokonaisenergiasta, kun taas hehkulampulla n. 5 %. Täten kokonaishyötysuhde valolle on energiamäärään nähden ledeillä lähes 20-kertainen verrattuna hehkulamppuihin. (Ledtriks 2014.)

Hehkulamppu muuttaa suurimman osan siihen syötetystä sähköenergiasta infrapunasäteilyksi, eli lämmöksi. Ledien infrapunasäteilyksi muuttuva energian määrä on valotehoonsa nähden huomattavan pieni. Ledit voidaan sytyttää ja sammuttaa lähes rajattomia määriä ilman minkäänlaista välkkymistä, eikä niiden säteilemä valo värähtele vaihtovirtalamppujen tavoin. Näiden ominaisuuksien avulla voidaan kehittää erittäin pitkän käyttöiän omaavia tehokkaita valaisimia esimerkiksi suurnopeuskameroille, missä lamppu on kytketty kuvauslaitteiston akkuun.

Ledien helppokäyttöisyys, nopea asennus ja ympäristöystävällisyys ovat vallanneet hehkulankapolttimoiden markkina-alaa viime vuosien aikana ja opinnäytetyön kaltaisten tutkimusten ansiosta ledien maailman valloitus jatkuu. Energiatehokkuutensa ja pitkän käyttöikänsä ansiosta voidaan ledit luokitella ekologisiksi tulevaisuuden tuotteeksi. Teknologiateollisuuden alojen yritykset tutkivat jatkuvasti uusia käyttökohteita ledeille ja kehittävät uusia sovelluksia, missä perinteisiä hehkulanka- ja loisteputkivalaisimia voitaisiin suoraan korvata mahdollisimman helposti ledeillä.

### 2.3.1 Suurteholedit ja niiden käyttö

Teholedvalaisimet eroavat normaaleista ledeistä hieman niiden käyttökohteiden sekä valaisutehon ansiosta. Sammuksissa oleva, valoa säteilemätön suurteholedi on ulkoisesti hyvin samanlaisen näköinen ja kokoinen kuin normaali lediyksikkö. Tavallisen käyttäjän ei tarvitse tietää niiden eroavaisuuksista, mutta teholedin käyttö valaisinsovelluksessa vaatii suunnittelijalta erikoishuomiota, sillä teholedi vaatii lähes poikkeuksetta led-driverin, jolla suurteholedin toimintaa ohjataan ja säädellään.

Led-driver ei ole pakollinen komponentti teholedipiiriä suunnitellessa, mutta se helpottaa tekijän työmääriä, kun ledipiiriin ei tarvitse enää mitoittaa erikseen vastuksia. Driverin ansiosta virtapiirin sisäänmeno-jännitteen tason ei tarvitse olla täysin tasaista, joka mahdollistaa akku- ja latauslaitteiston käytön ilman valotehon heittelyitä.

Led-driverin ei tarvitse olla teholediyksikön välittömässä läheisyydessä vaan se kytketään käyttökohteen virtapiiriin aina sovelluksen mukaisesti. Driverien käyttökohteita on olemassa hyvin paljon aina himmennysoptiosta ledipiirin käyttämään maksimisähkötehon rajaukseen asti. Himmennysoptio toimii yleisesti potentiometrillä.



Kuva 1. Tyypillinen led-driver himmennysoptiolla 1400 mA (Nadenex 2014.)

## 2.4 Lähtötietoja

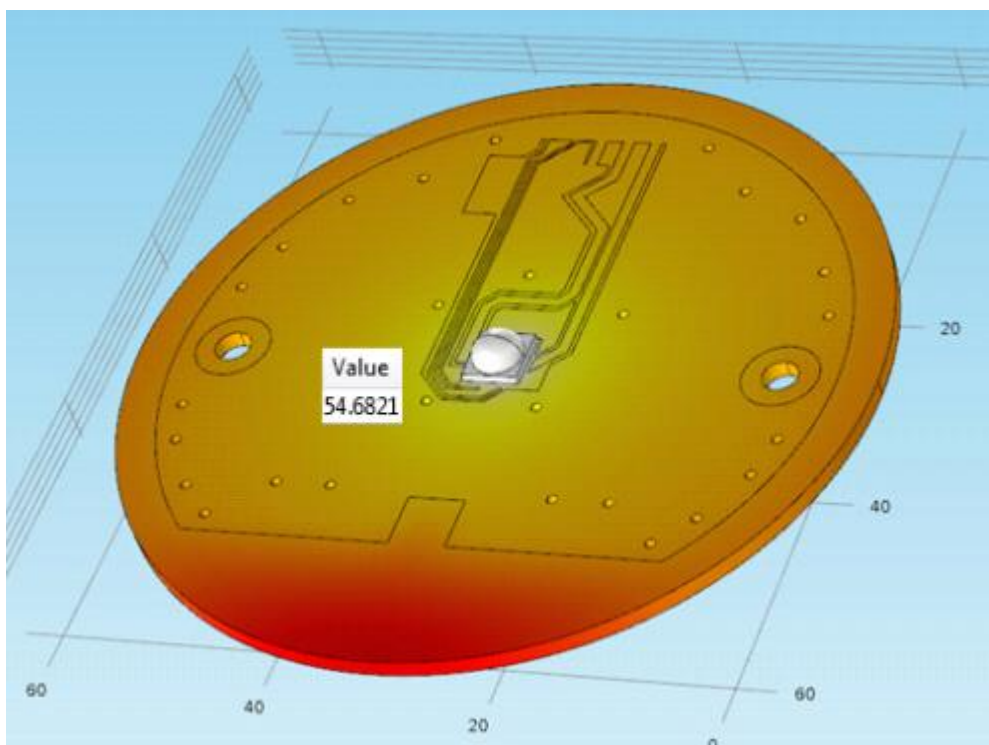
Alun perin toimimiseni Ledtrix-hankkeessa alkoi vuonna 2012, kun tehtäväkseni annettiin suunnitella jäähdytys siili FR4-lasikuituvahvistetulle epoksilaminaatille asetetulle LED-yksikölle ja piirilevyille. Työnä tehtävä oli mielenkiintoinen ja haastava, sillä lämmönjohtavuus ei ollut aiheena tuttu ja materiaaliopin kannalta lämpöä johtavat muovit eivät kuuluneet opintosuunnitelmaamme. Yleisesti muovitekniikkaa tunteva henkilö tietää muovien lisäaineina käytettävän paljon lasi-, hiili- ja aramidikuituja (kevlar), mutta teknologian kehittyessä on huomattu näillä lisäaineistuksilla olevan etuna myös lämmönjohtokyvyn kasvaminen kuitujen orientoitumisen mukaiseen suuntaan.

Muita lämpöä johtavia muoveja on käytetty jo pidemmän aikaa laajalti, mutta opinnäytetyössäni käsitelimme kahta eri muovimateriaalia, joiden lämmönjohtavuuden parantaminen perustui lisäaineistukseen. Molemmissa lämpöä johtavissa muoveissa oli kyseessä hiilikuidulla täytetty PA6/6. Lämmönjohtokykynsä puolesta materiaalit erosivat toisistaan hieman, toisen pinnan suuntainen lämmönjohtokyky oli  $32 \text{ W/Km}$  ja toisen  $4 \text{ W/Km}$ . Pintaan kohtisuoraan nähden vastaavat luvut olivat  $6,3$  ja  $1,3 \text{ W/Km}$ . Itse ruiskuvaluprosessin parantamista varten käytettiin näiden kahden materiaalin 50/50-sekoitusta.

Suunnittelu ja kappaleiden mallinnus oli työllisesti pitkäaikaisin ja haastavin osuus opinnäytetyössä, mutta ajallisesti eniten meni Comsol Multiphysics-ohjelmiston käytön opettelemiseen sekä lämpöä johtavien muovien ja jäähdytuselementtien opiskelemiseen. Comsol ei ole mallinnustyökaluna parhaita luokassaan, joten varsinainen mallinnus suoritettiin aina Creo-ohjelmistolla Karelia-ammattikorkeakoulun lisenssillä joko etätöinä VPN-yhteydellä tai kampuksen tiloissa. Mallinnetut jäähdytuselementit sekä LED-piirilevyt muunnettiin Creolla stp-tiedostomuotoon ja siirrettiin Comsolin laskentaympäristöön, sillä Creon oma prt-tiedostomuoto ei ole Comsolille ymmärrettävä formaatti. Stp-tiedostomuoto on 3D-mallinnuksessa sekä -tulostamisessa kaikkein tarkin ja edistyneisin, vaikka nykyisin paljolti käytetäänkin stl-muotoa (stereolithography).

## 2.5 FR4-lasikuituvahvistettu epoksilevy

Vaikka FR4-piirilevyn tutkiminen ei ollutkaan tämän työn päätavoite, se oli kaikesta lopputulokseen johtavan työn alku ja tärkeä osa tutkimustyötä. Mikä tästä yksittäisestä LED-piirilevystä teki niin merkityksellisen, oli sille lopulta kehitetty jäähdytyskennoston muotoilu, jolle annoin tutkimuksen aikana nimen ”Snowflake” (lumihietale) sen hiutalemaisesta muodosta johtuen.



Kuva 2. FR4-lasikuituvahvistettu epoksilevyinen LED-piiri Comsol ohjelmistossa. Puolijohdealueen simuloitu maksimilämpö mitattuna staattisessa tilassa näkyy kuvassa myös. (Turunen 2012.)

Hiutalemuotoilu salli kaikista jäähdytyslementtien kappaleista suurimman kokonaispinta-alan käytettäväksi vähimmällä materiaalin käytöllä sekä suosi muovimateriaalin omaa lämmönjohtamiskykyä monella tavalla. Ruiskuvaluprosessin mukainen sulan muovin kulkusuunta oli myös ihanteellinen hiilikuidun orientoitumista ajatellen hiutalekuviossa, sillä kuidut suuntautuivat valuprosessissa juuri lämmönsiirtymisen mukaiseen suunniteltuun suuntaan. Comsolilla tutkittaessa hiutalekuviointi oli suuri menestys ja odotettu ratkaisu jäähdytyskennoston muotoilulle, kun kyseessä oleva ledipiiri oli pyöreän mallinen alumiinipiirilevy.

### 2.5.1 Epoksilevyn jäähdytyskennojen suunnittelu

Tutkintatyön alkuvaiheessa suunnittelin monenlaisia malleja ja kuvioita jäähdytyskennoille, mitä mieleeni vain tuli ja tärkeä osa suunnittelutyötäni oli itsenäinen brainstorming. Comsolin avulla paljastui kuitenkin kaikkien kuvioiden edut ja haitat mahdollisimman tehokasta jäähdytystä saavutettaessa. Etuna tässä yllälaajassa tutkinnassa oli, että ehkä tärkein asia, mitä saatoin oppia paljastuikin faktaksi, ettei suurimman mahdollisen jäähdytystehon saavutus itse lämmön kohteeseen välttämättä aina ole paras vaihtoehto käyttäjäystävällistä tuotetta suunniteltaessa. Ensimmäiset mallit muistuttivat hyvin pitkälle nykyisin kaupallisia jäähdytyskennoja muodoltaan.

Mallinnuksen ja analyysien aikana huomasimme kuitenkin lasikuituvahvistetun epoksilevyn haitat lämmönjohtamisen kannalta, sillä suurin lämmönsiirtymisen esto tapahtui LED-lampun ja sen alla sijaitsevan epoksilevyn välillä (kuva 2). Matkana tämä oli vain alle 2 mm:n paksuinen levy, jonka läpi lämpö olisi pitänyt saada kulkemaan jäähdytysrivastolle.

Kaikesta yrityksestä huolimatta epoksilevy osoittautui tutkimusta hidastavaksi tekijäksi, kun tavoitteena oli tutkia alumiinin korvaamista muoveilla, eikä vain kyseisen LED-piirin jäähdytyksen maksimointia. Toisin sanoen itse LED-yksikön ja jäähdytysseinän lämpötilaero oli liian suuri epoksilevyä käytettäessä vaikka niiden välistä etäisyyttä pyrittiin kompensoimaan monin tavoin. (Pitkänen 2013.)



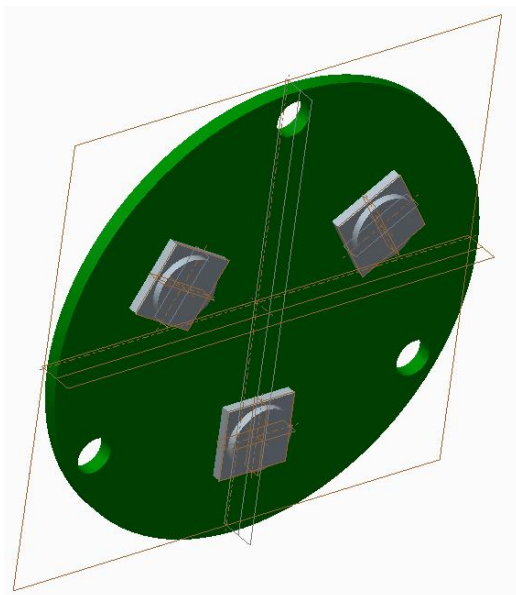
Kuva 3. FR4-piirilevyn sisäinen lämpötilaero näkyy lasikuitulevyn poikkileikkauksessa voimakkaasti.

## 2.6 Kolmen teho-ledin alumiinipiirilevy

Tutkimustyöni tavoitteita ajatellen siirryimme alumiinista valmistettuun LED-piirilevyyn, joka tuli lopputuotteessa käytettäväksi valon lähteeksi. Kyseinen osa muodostui kolmesta teholedistä, alumiinipohjasta sekä näille valmistetusta virtapiiristä, joka oli kaiverrettu alumiinilevyn pintaan. Kyseisen osan valmistajan ilmoittama lämmöksi muuttuva teho yhtä LED-lamppua kohti oli n. 5,6 W. Toinen valmistajan ilmoittama tärkeä lähtötieto tämän LED-piirilevyn käytön kannalta suunnittelussa oli sille määritelty 150 °C:n maksimikäyttölämpötila.

Kyseinen alumiinipiirilevy oli kooltaan pienempi kuin FR4-epoksilevy ja sen käyttö oli suunnittelun osalta helpompaa, mutta toisaalta kyseisen osan rakenne oli hieman monimutkaisempi kuin epoksilevyllä. Elementin optimiasetelmaa oli harkittava tarkemmin LED-yksiköiden sijoittumisen kannalta jäähdytysrivaston muotoa tarkastellessa. Alumiinilevyn haasteellisuus liittyi teholedien asetteluun ympäri pyöreän kappaleen kehää kolmeen suuntaan (kuva 4).

Ledilevyn kiinnittämistä varten siihen oli porattu kolme reikää kappaleen ulkokehälle, mutta vaikka kuvasta 4 sitä ei selvästi huomaakaan, on kappaleen keskellä kaksi pientä paikkaa sähköpiirin kytkentää varten. Näiden liitinpaikkojen asemointi ei ollut kuitenkaan suunnittelun kannalta olennaista.



Kuva 4. Creolla mallinnettu LED-alumiinilevy.

### 3 Ruiskuvalettavan kappaleen suunnittelu

Ruiskuvalettavan kappaleen suunnittelu on kokeneellekin suunnittelijalle joskus haastava toimenpide eikä kappaletta voida suunnitella vain asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Ruiskuvalussa sula muovi pitää saada jouhevasti muottiin hyvillä virtauksilla ja paineilla, kappale on saatava jäähdytettyä mahdollisimman tasaisesti sekä painettua ehjänä ulos muotista. Nämä kolme seikkaa hankaloittavat suunnittelijan työtä runsaasti, varsinkin kun rajoittavia tekijöitä on aina laitekanasta ja niiden mahdollisuuksista aina materiaalin käyttäytymiseen asti enemmän kuin tarpeeksi.

Opinnäytetyössä käsittelin ruiskuvalettavan kappaleen suunnittelua käsikädessä sen kanssa, että kyseisen kappaleen oli tarkoitus olla mahdollisimman tehokas jäähdytyselementti kuudelle teho-ledille sekä toimia koko käytettävän lampun runkorakenteena. Ulkomuodolta odotin myös käyttäjäystävällistä ja houkuttelevaa lopputulosta vaikka kyseessä ei ollutkaan kaupallinen tuote.

Eräs tärkeimmistä raja-arvoista mitä suunnittelutyölle annettiin, oli materiaalin paksuudet kaikissa mahdollisissa suunnissa, sillä käytettyjen 2° päästöjen kanssa rivoituksen paksuus olisi heitellyt suhteellisen runsaasti kappaleen eri kohdissa. Päästöt ovat ruiskuvalukappaleelle pakollisia ominaisuuksia, koska täysin suoraa pintaa ei saada ruiskuvalukappaleesta ehjänä ulos valmistusteknisistä syistä.

#### 3.1 Päästökulma

Ruiskuvalumuottia suunniteltaessa päästökulma tarkoittaa kappaleen poistosuunnan mukaisesti suunnattujen pintojen kallistamista. Ruiskuvaluprosessin ulostyöntövaiheessa valetun kappaleen mikään pinta ei saa luistaa muotin pintaa vasten ja täten aiheuttaa kitkaa tai korostaa ruiskuvaluprosessissa aina syntyvää muotin ja kappaleen välille syntyvää alipainetta. (Kurri, Malén, Sandell, & Virtanen, 1999, 140.)



### 3.2 Muotissa huomioitavat piirteet

Ruiskuvaluprosessi ei ole koskaan yksinkertainen toimintatapa kappaleen valmistukseen ja huomioitavia asioita on suunnittelijalla erittäin paljon sekä kappaleen valettavuutta että muotin valmistusta huomioiden. Kaikki materiaalien virtauksista lisäaineistuksiin, muotin jäähtytykseen sekä kappaleen poistamiseen muotista pitää ottaa huomioon erittäin tarkasti ennen kuin varsinaista muottia aletaan valmistaa.

Tärkeimpänä seikkana itselleni kappaletta suunniteltaessa oli tietenkin yksinkertaisuus, jotta kappale voitaisiin valmistaa ns. luonnollisella muotilla, jonka jakotaso on suora. Monimutkaisempi muottipesä vaatisi isompia koneistuskustannuksia sekä hankaloittaisi itse muotin suunnittelua sekä ruiskuvaluprosessia. Nimellisesti sain raja-arvoiksi, että kappaleen seinämäpaksuudet olisivat ohuimmillaan 2–3 mm, päästöt 2 astetta kaikkialla ja jäähdytyskennoston rivoitus saisi olla maksimissaan 60 mm syvää muottipesässä (Turunen 2012.)

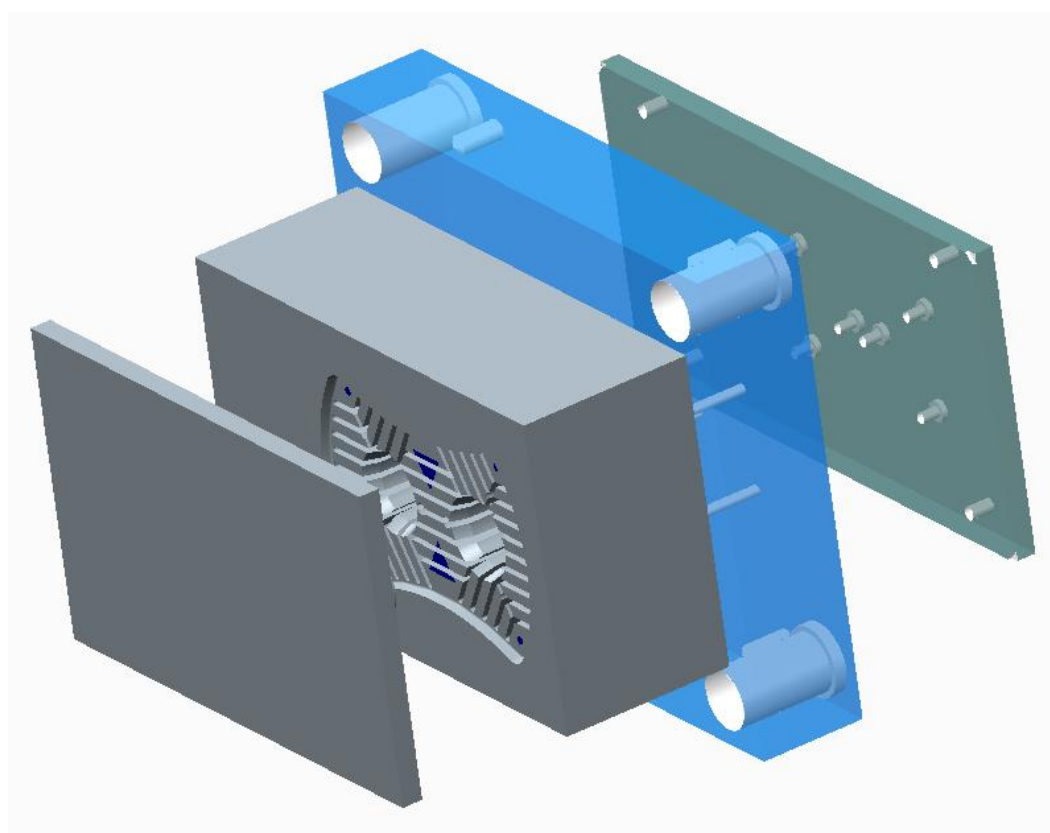
Ruiskuvalettavan kappaleen seinämäpaksuuksien heitot olisi aina minimoitava, vaikka muotissa onkin käytettävä runsaita päästöjä kappaleen irrottamista varten. Vaihtelevat seinämäpaksuudet kappaleen eri kohdissa vaikuttavat huomattavasti kappaleen jäähtymiseen muotissa, imujen syntyyn valmiissa kappaleessa sekä sulan materiaalin virtauksiin muottipesässä.

Ruiskuvaluprosessin viimeinen vaihe ennen uuden syklin alkamista on jäähdetytyn kappaleen ulostyöntö valumuotista. Ulostyöntöä varten käytetään usein paineilma-avusteista toimintaa, sillä kappaleen seinämien sekä muotin väliin jää tyhjiö, jonka poisto paineilmalla helpottaa kappaleen ehjänä pysymistä ulostyönnön aikana. Kyseiselle kappaleelle suunnittelin muottia vain pintapuolisesti, sillä se ei sinänsä liittynyt lämmönjohtavuuteen, mutta pidin muotin geometriaa myös tärkeänä kappaleen valmistettavuutta sekä lämpöominaisuuksia ajatellen.

Ulostyöntötappien paikkoja suunnittelin alustavasti viisi, sekä ruiskutuspuoleen kappaletta varten. Tämä antoi hyvän kuvan siitä kuinka ruiskuvalumuotin valmistustekniset muutokset ilmeni valmistettavan kappaleen lämmönjohtokykyyn.

### 3.3 Muotin suunnittelu

Muotin suunnittelussa käytin Creon lisäosaa EMX 8, jonka avulla saatiin muottipesän rakenne luotua suoraan suunnitellun kappaleen geometrian perusteella, etenkin kun kyseessä oli luonnollinen muotti, eikä luisteille tai hankalille jakotasoille ollut tarvetta. EMX on hyvä työkalu muottien suunnittelussa sen tietopankki ja muottikirjaston avulla. Ohjelmassa on mahdollisuus automaattiseen kutistumiskertoimen asetukseen sekä automaattiseen päästökulmien säätöön, jonka mukaan ohjelma luo suoraa oikeanlaisen muottipesän kappaletta varten.



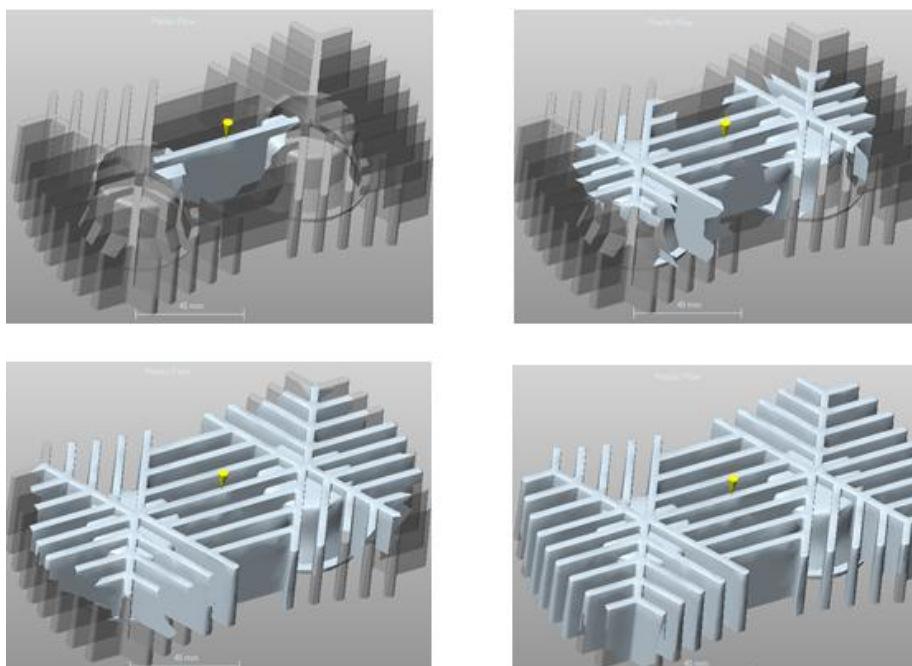
Kuva 5. EMX 8, Creo 2 lisäosalla valmistetut neljä ruiskuvalumuotin osaa.

Ruiskuvalumuotin suunnittelussa Creo Parametrics tarjoaa useita lisäosia ja työkaluja. Yksi niistä on edellä mainittu EMX 8, mutta toinen on Plastic Advisor, jonka avulla on mahdollisuus analysoida kyseisen kappaleen täyttymistä muottipesässä eri ruiskutuspuisteista. Lampun jäähdytyskennon ruiskutuspuisteiden asemoinnin optimointi oli ruiskuvaluprosessin kannalta tärkein ominaisuus, sillä se varmisti muovimateriaalin lisäaineistuksessa käytettyjen kuitujen parhaan mahdollisen orientoitumissuunnan. (Niemi 2013.)

### 3.4 Plastic Advisor

Kyseisellä työkalulla tarkastellaan 3D-mallin mukaisen kappaleen täyttymistä ruiskuvalumuotissa sekä sulan muovin virtauksia muotin sisällä. Ohjelman käyttö on yksinkertaista ja luotettavaa, mutta tulosten analysoinnissa pitää kokeneenkin suunnittelijan olla tarkkana.

Aluksi kappaleelle annettiin ruiskutus piste ja sen jälkeen ohjelma asetettiin simuloimaan ruiskuvaluprosessia. Kuvasarjassa 6 voidaan ruiskuvalussa tapahtuvan virtaussuunnan nähdä olevan juuri halutun lainen. Sula muovimassa virtaa ensimmäisenä kappaleen keskimmäistä jäähdytysripaa pitkin kummankin teholedipiirin alla sijaitsevan hiutalemuodon keskelle ja sieltä jatkaa matkaansa aina haluttuun jäähdytyksen suuntaan. Tämä varmistaa lisäaineena olevien kuitujen oikean orientoitumissuunnan.



Kuva 6. Plastic Advisorin mukainen ruiskuvalumuotin täyttymisen simulointi.

Toisena vaihtoehtona olisi ollut suunnitella kaksi ruiskutus pistettä niin, että kummankin hiutalemuodon keskeltä sulaa muovia olisi syötetty kappaleeseen. Tämä olisi myös varmistanut kuitujen hyvän orientoitumisen, mutta olisi lisännyt kappaleen keskelle syntyvien hitsisaumojen rajapintojen heikkoutta, kun taas yhden ruiskutus pisteen avulla ei hitsaus saumojia synny kappaleeseen montaa.

## 4 Kuuden teholedin lamppu

Jäähdytyskennoston suunnittelussa tarkasteltiin tärkeimpinä ominaisuuksina koko lampun kuuminta pistettä, joka yleisimmin sijaitsi teholedin puolijohteiden pinnoilla tai niiden välittömässä läheisyydessä. Tarkoituksena oli saada tämä maksimilämpö mahdollisimman kylmäksi ja muu kappale samalla mahdollisimman tasalämpöiseksi kaikkialta, niin ettei eri kohdissa kokoonpanoa olisi suuria lämpötilaeroja. Aiemmin suunniteltu kennoston hiutalemuoto osoittautui jälleen parhaaksi vaihtoehdoksi sekä lämmön johtumisen että valmistettavuuden kannalta, vaikka suunnittelun eri vaiheissa kokeilimme hyvin monenlaisia ratkaisuja.

### 4.1 Lopputuote

Jokainen suunniteltu lamppu saavutti maksimissaan liian korkeita lämpötiloja staattista tilaa tutkiessa, jolloin tutkimus näytti saavuttaneensa päätepisteensä. Tällöin totesimme, etteivät nykytekniikalla valmistetut lämpöä johtavat muovit voi täysin korvata kyseisissä sovelluksissa käytettäviä alumiinisia kennostoja. Kun ajatus alumiinin täydellistä korvaamista muovituotteella oli kumottu, halusin tutkia lämpöä johtavan muovin käytön mahdollisuutta jäähdytyskennostoissa laajemmin. Aloin tutkia teholedin alla sijaitsevan alumiinisen piirilevyn ja muovisen jäähdytyskennoston lämpötilaeroja ja huomasin lämmön johtuvan voimakkaimmin teholedin pohjasta alumiinin läpi muovikennostoon. Tämä oli suurin läpimurto koko tutkimuksessa, koska se antoi alkukipinän varsinaiselle lopputuotteelle, jota kutsuin tutkimukseni jälkeen innovaatioksi, koska kyseessä oli hybridi jäähdytyslementti.



Kuva 7. Ruiskuvalettu lopputuote ilman linssejä.

#### 4.1.1 Kaksimateriaalielementti

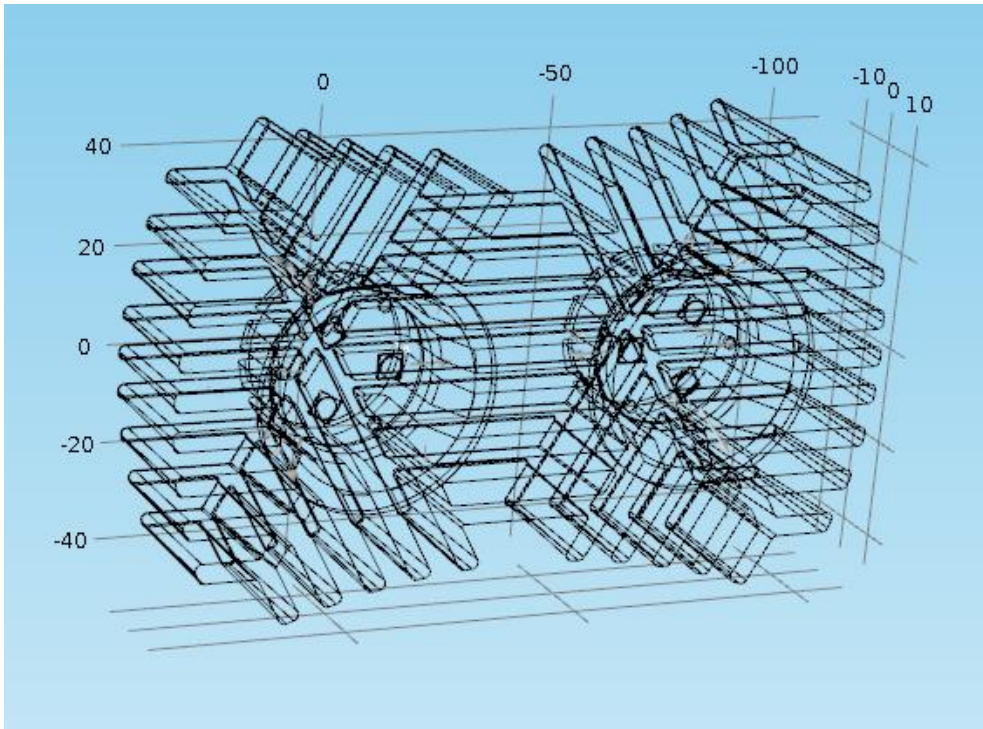
Myöhemmin kun olin tutkinut alumiinin ja käytössä olevan lämpöä johtavan muovin yhdistämistä lämpöelementtinä, ymmärsin että tehokkaimman jäähdytyksen saa aikaan käyttämällä lämpölähteen välittömässä läheisyydessä alumiinia, joka johtaa lämmön nopeasti pois jäähdytettävältä alueelta ja siirtää sen muoviselle kennostolle. Kennosto vuorostaan haihduttaa lämmön sitä ympäröivään ilmaan, joten alumiinin muokkaus jäähdytyskennostoksi ei ole pakollista näissä sovelluksissa. Kun muoviosalla oli tarpeeksi pinta-alaa tehokasta konvektiota varten ja lämpöä siirtyi alumiinin avulla muoviosaan, oli jäähdytys voimakkaimmillaan. Alumiinista valmistettu standardiosa inserttinä ruiskuvalussa mahdollistaa edullisemman jäähdytyskennon, sillä ruiskuvalulla valmistettu muovinen jäähdytyskennosto on huomattavasti edullisempi kuin koneistettu alumiininen, samanmuotoinen kappale.

Jäähdytyskennosto sai täten uuden suunnan hybridisovelluksen keksinnän jälkeen ja antoi tutkimukselle lisää intoa, sillä tunsin olevani innovatiivisen, uuden sovelluksen äärellä, jolla voisi olla mahdollisuudet muuttaa teknologiateollisuudessa käytettyjen jäähdytyskennostojen valmistusta suurissa sarjoissa. Kaksimateriaalinen jäähdytyselementti perustui täten ruiskuvalussa käytettävään metalli-inserttiin, jonka ympärille jäähdytyskennosto ruiskuvalamalla muodostettiin. Prototyyppiä valmistettaessa ruiskuvalumuotissa ei käytetty kuitenkaan inserttiä, vaan alumiinipalat valmistettiin standardin mukaisesta alumiinitangosta. Kiekot liimattiin lämpöä johtavalla liimalla PA6/6:sta valmistetun ruiskuvaletun kappaleen sisään ja ledipiiri kiinnitettiin mekaanisesti alumiinikiekkojen pintaan.

Alumiinikiekkoja ei kuitenkaan voitu kiinnittää muovikappaleeseen mekaanisella liitoksella, mikäli lämmönjohtavuus haluttiin pitää maksimissaan näiden kahden kappaleen välillä. Mekaaninen liitos jättää kappaleiden väliin aina ilmaa ja vaikka kyseessä olisi hyvälläkin pinnanlaadulla olevat kaksi pintaa, on niiden kosketuspinta silti maksimissaan vain 0,3-kertainen toivottuun lämmönsiirtoon käytettävään pinta-alaan. Kosketuspintojen väliin jäävä ilma toimii lämmön eristeinä joten liimalla ilma saatiin kappaleiden välistä poistettua.

## 5 Comsol Multiphysics ja sen käyttö

Comsol multiphysics on insinööritieteisiin tarkoitettu simulointi- ja mallinnusohjelmisto, joka soveltuu fysiikan sovellusten tutkintaan ja analysointiin. Normaalisti kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelmassa Comsolin käyttöä ei opeteta, mutta muutamalle opiskelijalle, itseni mukaan lukien, ohjelmiston käyttöä valmistettiin erinäisten webinaarien sekä nettiluentojen välityksellä.



Kuva 8. Lampun kokoonpanomalli, tuotu Comsol-ympäristöön Creosta STP-formaatilla.

Comsol on mallinnustyökaluna välttävä, siksi suunnittelu tapahtui Creo Parametricsin puolella ja suunnitellut 3D-kokoonpanot piti tuoda niin sanotuilla neutraaleilla tiedostomuodoilla Comsolin simulointiympäristöön. Ohjelmistossa on useita eri moodeja erilaisia laskentoja varten ja Comsol itse käyttää niistä vain termejä "Physics", joita lisäämällä laskentaympäristöön ohjelma voi suorittaa laajempia laskentoja kappaleesta annettujen lähtötietojen perusteella. Lampun jäähdytyskennostoa simuloitaessa käytin vain lämmönsiirtoon tarkoitettuja laskentoja staattisessa tilassa tarkasteltuna sekä ajan mukaisesti erilaisilla sykleillä mitattuna.

## 5.1 Emissiivisyys

Comsolilla simuloitaessa lämmön johtumista eri fluideissa tai kiinteissä aineissa, on simuloitavien materiaalien lähtötiedot annettava aina mahdollisimman tarkasti vastaamaan todellisuutta. Yksi olennaisimmista lähtöarvoista mitä Comsol vaati simulaation kannalta, oli muovin pinnan emissiivisyys, jonka symbolina oli  $\epsilon$  (epsilon). Pinnan emissiivisyys määritellään suhteellisenä arvona kappaleen pinnan emittoimasta säteilystä verrattuna mustan kappaleen (blackbody) emittoimaan säteilyn määrään samassa lämpötilassa. Emissiivisyys on siis kerroin, jonka arvo vaihtelee nollan ja yhden välillä,  $0 \leq \epsilon \leq 1$ .

Emissiivisyyden arvoa määrittäessä on olemassa jonkin verran valmiita kaavoja ja taulukoita eri materiaalien emissiivisyyskerroimista, mutta opinnäytetyön tutkimuksessa käytössä ollut muovimateriaalin emissiivisyyskerroin piti määrittää itse. Olemassa olevia emissiivisyyskerroimia on useanlaisia, mutta tässä työssä käytettävä oli kokonaisemissiivisyys  $\epsilon(T)$ . (Çengel 1998, 506.)

Kokonaisemissiivisyyskerroimen voi laskea kaavalla 1, missä  $E(T)$  on kokonaisesti emittoitunut energia pinnalta.

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$$

Kaava 1. Kokonaisemissiivisyyden kaava

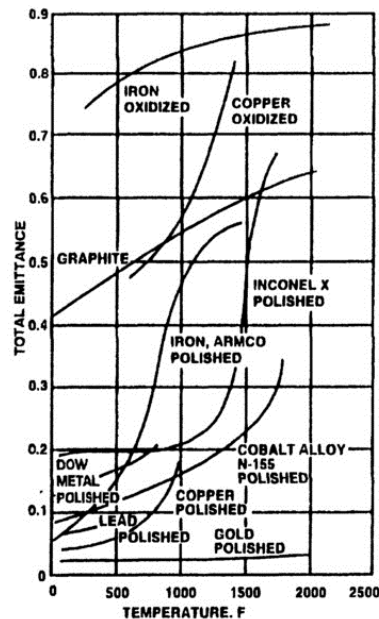
Tutkimuksessa käytetty emissiivisyyskerroin jäähdytyskennoa varten oli  $\epsilon = 0.8$  ja kyseistä arvoa käytettiin sekä Comsolin simulaatioissa, että infrapunakamerakuvauksissa. Samaa arvoa käytettiin myös varsinaisen ruiskuvaletun muovikappaleen pinnan lämpötilaa mitattaessa stationaarisessa tilassa. Lisäksi tämä emissiivisyyskerroin oli käytössä sekä pakotetun konvektion tapauksissa eri tuulen nopeuksilla, että vapaan konvektion tapauksessa.

### 5.1.1 Musta kappale

Fysiikassa musta kappale (blackbody) on termi kappaleesta, joka absorboi itseensä kaiken kappaleen pintaan kohdistuvan säteilyn ja sen emissiivisyyden arvo  $\epsilon = 1$ . Musta kappale on terminä aavistuksen verran johdatteleva, sillä fysiikassa tunnettu musta kappale ei ole välttämättä väriltään musta lainkaan. Luonnossa esiintyvä esimerkki täydellisestä mustasta kappaleesta on aurinko.

### 5.1.2 Kokonaisemissiivisyyskertoimen muutokset

Opinnäytetyön tutkimuksellisen osan lähtökohtana oli tutkia jäähdytyskennostojen käyttäytymistä eri lämpötiloissa, joten eräs mahdollinen huomioon otettava seikka oli emissiivisyyskertoimen muutokset eri lämpötiloissa. Selvitimme kuinka suurina nämä muutokset olivat työssä olevien lämpötilaerojen aikana.



Kuva 9. Emissiivisyyskertoimien arvoja materiaaleilla eri lämpötiloissa

(Thoughtventions Unlimited LLC 2014.)

Kuten kuvasta 9 voidaan kuitenkin havaita, lämpötilan muutoksien pitää olla hyvin suurina, jotta emissiivisyyskertoimen arvo muuttuisi merkittävästi. Työssä käytettävien ledien maksimilämpötila kuitenkin oli valmistajan mukaan 150 °C, joten työssä ei ilmennyt tarvetta muuttaa emissiivisyyskertoimen arvoa  $\epsilon = 0.8$  missään vaiheessa simulaatiota tai lämpökameralla kuvaamista.

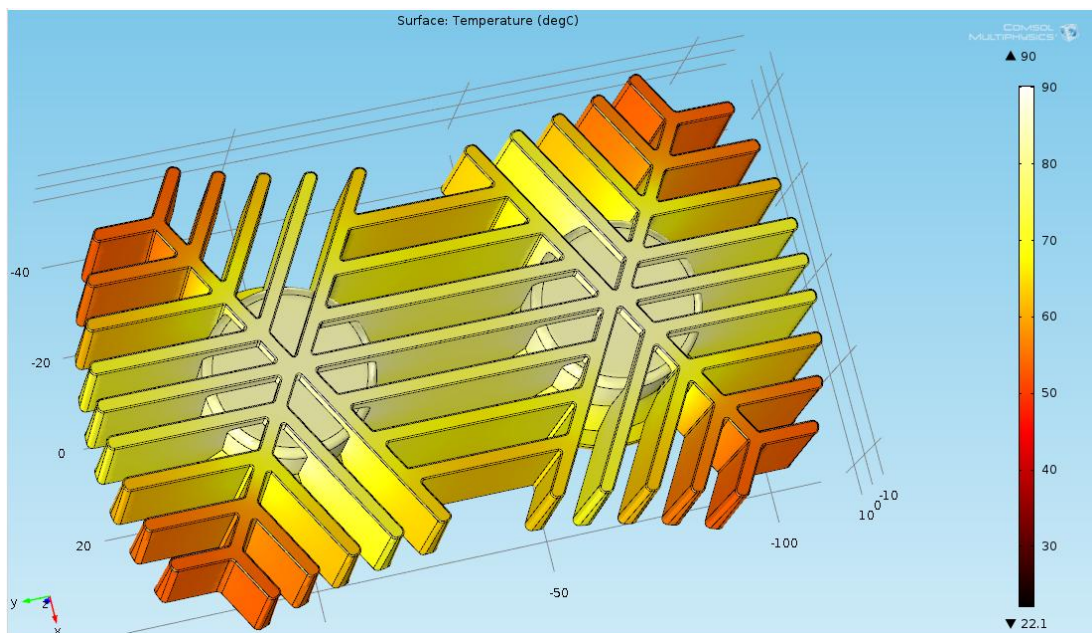


## 5.2 Staattinen tila laskennassa

Simulointiohjelmistoissa on lähes poikkeuksetta ajasta riippuvainen ja staattinen laskentaympäristö joka poikkeaa toisistaan siten, että ajasta riippuvaisessa laskennassa tarkastellaan esimerkiksi mitä kappaleelle tapahtuu näillä lähtöarvoilla minuutin aikana sekunnin välein. Laskennan jälkeen ohjelma antaa 60 kpl erilaisia simulaatioita, jotka vastaavat eri aikana tapahtuvia muutoksia.

Staattisessa analyysissä ohjelmisto laskee annetuilla lähtöarvoilla saavutetun tasaisen huipun. Staattisesta analyysistä ei kuitenkaan tiedä välittömästi, kauanko tämän tasapainotilanteen saavuttaminen kestää, joka osoittautui aika ajoin jopa humoristiseksi tekijäksi erilaisia laskentatapoja kokeillessa.

Lampun jäähdytyskennostoa tarkastellessa staattinen tila oli ensimmäisenä tarkastelussa koska tarkoituksena oli tutkia pääasiassa vapaalla konvektiolla tapahtuvaa jäähtymistä. Tavoitteena oli tasata jäähdytysrivaston pinnalla esiintyviä lämpötilaeroja sekä laskea maksimilämpötilaa teholedin pinnalta mahdollisimman alas erilaisilla muutoksilla kappaleen geometriassa.



Kuva 10. Staattinen tila simuloituna Comsolilla, koko avoimen kappaleen maksimilämpötila on 90 °C.

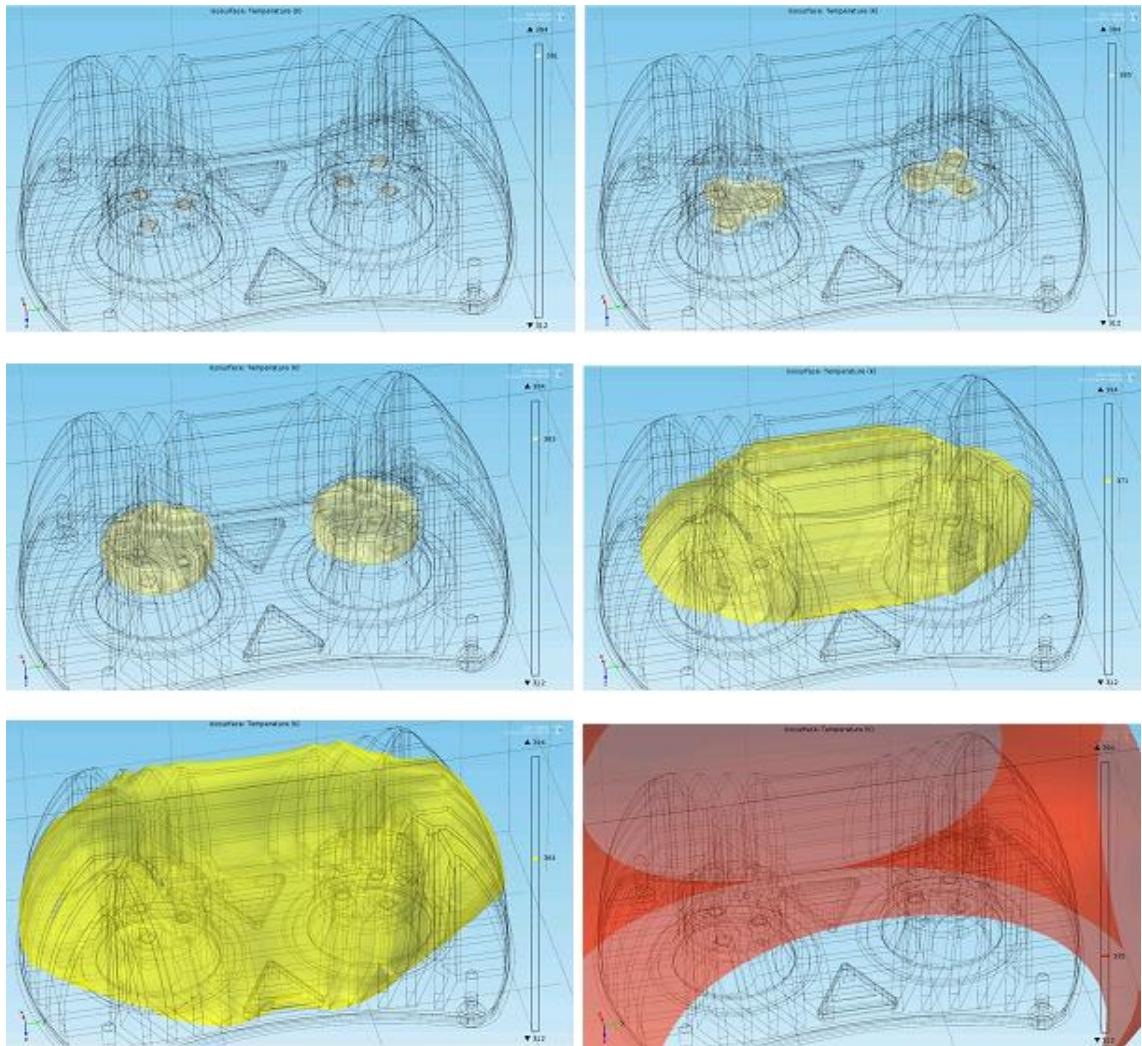
Staattinen analyysi antoi lopulta luotettavan oloisia vastauksia lämpösimulaatiosta. Kun kyseistä tilannetta tarkasteltiin ajasta riippuvaisena, oli merkittävää, että maksimilämpötilan saavuttamisessa kesti Comsolin simulaation mukaan jopa 26 minuuttia. Tämä vastasi tilannetta NTP-olosuhteissa täysin ilman minkäänlaista ilmanvaihtoa kappaleen ympärillä ja vain vapaan konvektion ollessa jäähdytykselle mahdollista.

Kuten kuvasta 10 voi havaita, jäähdytyskennosto on ideaalitulassa lämmönjohtavuutensa suhteen. Etäisimmät pisteet lampun keskiöstä ovat hieman viileämpiä kuin alumiinikiekkojen läheisyys. Alumiinikiekkojen ympäristö taas on tasaisen lämpöinen, joten jäähdytyskenno ohjaa lämpöä oikeaan suuntaan ympäri kappaletta. Lämmön siirrolle tärkeää oli ruiskuvalussa käytettävän muovin hiilikuidun orientoituminen, josta huolehdittiin muotissa käytettävän suuttimen asemoinnilla. Kuitujen oikeanlainen orientoituminen varmistuu ruiskuvaluprosessissa aina tälle valmistustyyppille ominaisen ilmiön vuoksi, jota kutsutaan suihkulähdeilmiöksi.

Suihkulähdeilmiön ansiosta ruiskuvaluprosessissa muottiin ensimmäisenä syötetty sula muovimassa jähmettyy muotin seinämille. Kun massassa on lisäainena kuituja, on kuitujen orientoituminen aina sulan massan liikkeen suuntainen kaikkialla muualla kuin hitsaussaumojen ympäristössä.

Plastic Advisorilla simuloitu sulan muovin virtaussuunta muotissa havainnollisti, mihin suuntaan muovin lisäaineena olevat kuidut orientoituivat valuprosessissa. Täten seuraavana tutkittiin, missä suunnassa lämpö kulkisi kappaleessa Comsol Multiphysicsin simulaatiolla ja vastaisivatko kahden ohjelmiston tulokset toisiaan. Kuvassa 11 voidaan havaita lämmön siirtyvän täsmällisesti ledien keskelä alumiinikiekkoon ja kiekkoista erittäin tasaisesti muovirivastolle.

Comsolin simulaation mukainen lämmönjohtuminen vastasi hyvin pitkälle samansuuntaisia liikkeitä kuin Plastic Advisorilla tehty massan liikesimulaatio muotin sisällä. Täten oletettavasti suuttimen paikka oli juuri optimissa asemassa kuitujen orientoitumista ja kappaleen lämmönjohtumista ajatellen.



Kuva 11. Comsolilla simuloitu lämmön kulku lampussa.

Comsolin simulaatiot osoittivat moninkertaisesti suunnitellun kappaleen muotojen tukevan lämmönjohtavuutta maksimaalisen jäädyttämisen saavuttamiseksi juuri ledien välittömään läheisyyteen. Koko lampun kokoonpanossa täydellä teholla maksimilämpötila oli näiden simulaatioiden mukaan aina alle  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , joka oli ledipiirin valmistajan ilmoittama maksimikäyttölämpötila. Kyseinen lämpötila alitettiin simulaatioiden mukaan reilusti, mutta vasta lämpökamerakuvalla saatiin todellisia lämpötiloja mitattua kappaleen pinnasta eri teholumilla ledeistä.

## 6 Lämpökamerakuvaus

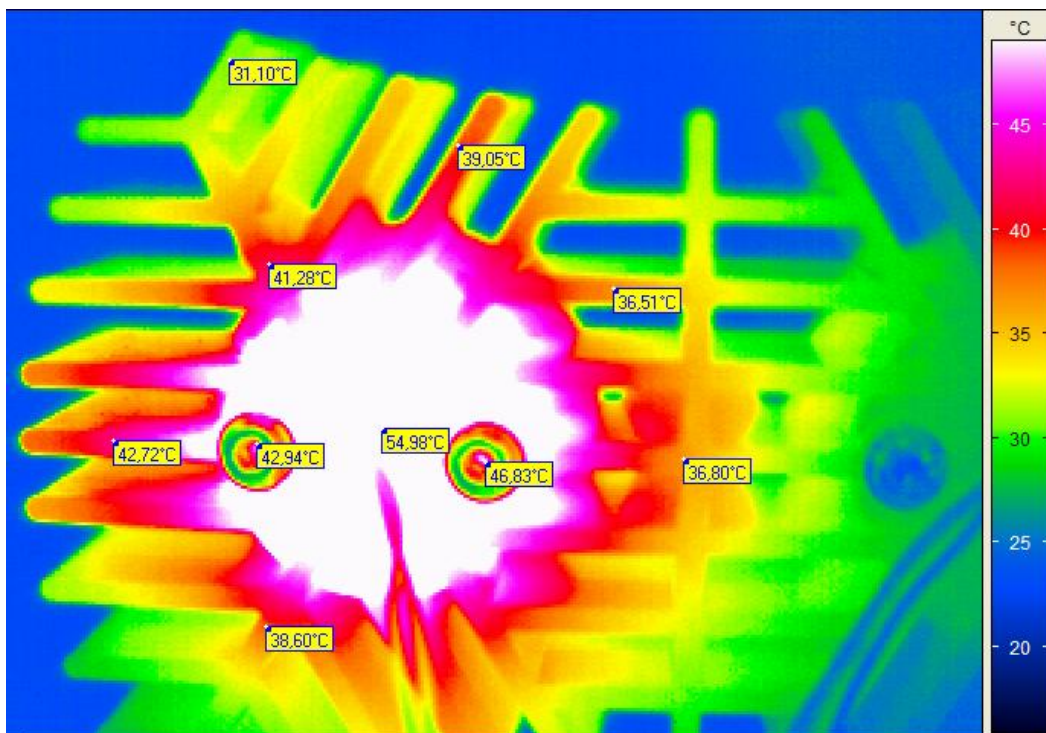
Lämpökamera ja infrapunakamera sekoitetaan usein toisiinsa. Työssä käytettiin kuitenkin lämpökameraa kappaleen kuvaukseen ja lyhyesti lämpökameran toiminnan voi tiivistää niin, että kamera kuvaa lämpösäteilyn määrää kuvattavan kohteen pinnasta ja muuttaa kyseisen säteilyn voimakkuuden lämpötilatiedoksi. Tästä tiedosta muodostetaan taas reaaliaikaisesti digitaalinen lämpökuva ja kuvaajan pitää pystyä analysoimaan lämpökuvan realistisuutta. (Uusitupa 2007.) Jotta lämpökameralla kuvattu lämpökuva on mahdollisimman tarkka, on käyttäjän ilmoitettava manuaalisesti kuvauskohteen emissiivisyys ja ympäröivä taustasäteily (Infradex 2014).

Comsolin simulaatioissa käytetty arvo  $\varepsilon = 0.8$  oli myös lämpökameralla kuvattaessa kappaleelle asetettu pinnan emissiivisyyskerroin. Turusen ja Mönkkösen (2014, 49) mukaan kyseinen emissiivisyyskerroin ei kuitenkaan ollut tarkoin mahdollinen, joten lämpökameralla kuvatut arvot vaikuttivat luultavasti hieman vertailutuloksiin.

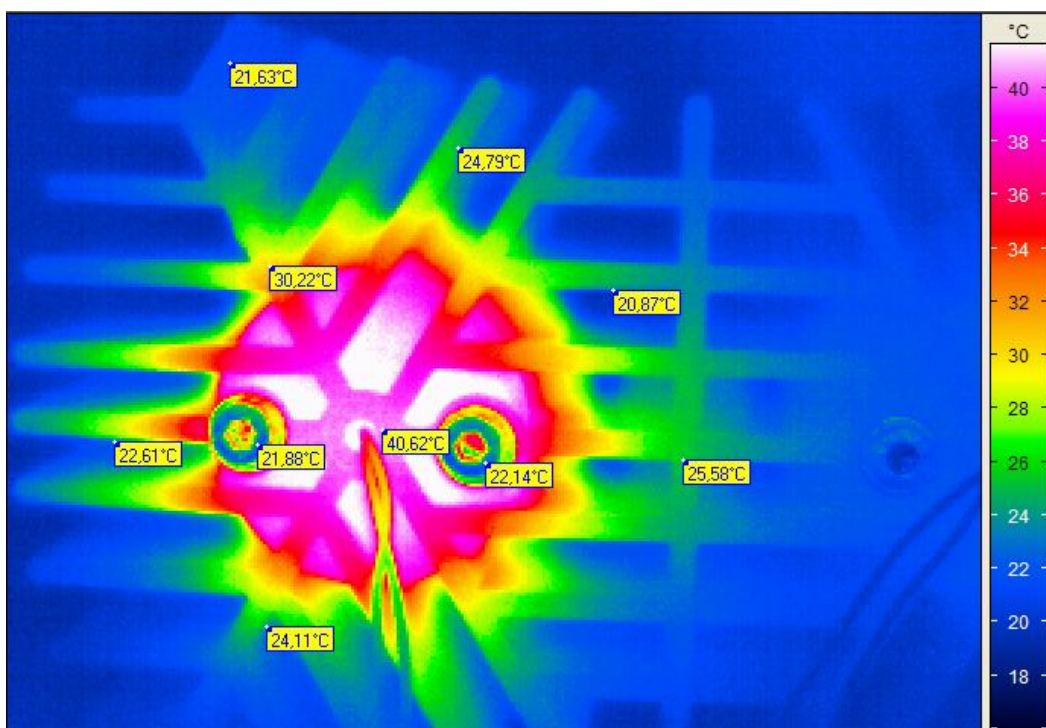
### 6.1 Staattinen tila ja ilmavirran vaikutus jäähdytykseen

Lämmönjohtumista simuloitaessa Comsolilla olennaisinta oli aina tarkastella staattista analyysiä ja minkä maksimilämpötilan lamppu saavutti tasapainotilanteessa. Lampusta valmistettiin ruiskuvalumuotti ja muutamia jäähdytyskennoja ruiskuvalettiin edellä mainituin menetelmin käyttäen kahta eri lämpöä johtavaa muovia sekaisin. Lamppu koottiin Karelia-ammattikorkeakoululla ja työn seuraava vaihe oli kuvata lamppua lämpökameralla tilanteissa, joista yksi vastasi mahdollisimman tarkasti Comsolin simulaation mukaisia olosuhteita. Muita kuvausolosuhteita olivat eri tuulen nopeudet lampun ympärillä, jotta vapaan ja pakotetun konvektion erot saatiin mahdollisimman selvästi näkyville, kuten kuvista 11 ja 12 voidaan havaita. (Piirainen 2014.)





Kuva 12. Lämpökameran kuva staattisesta lämpötilasta ilman minkäänlaista ilmanvaihtoa kappaleen ympärillä.



Kuva 13. Tuulen nopeus  $7 \text{ m/s}$  kappaleen ympärillä, pakotetun konvektion vaikutus näkyvillä selvästi.

## 6.2 Lämpökameran kuvien analysointi

Kuten kuvista 11 ja 12 nähdään, staattisessa tilanteessa lämpöjakauma pitkin jäähdytysrivastoa on hyvin pitkälle vastaavanlaista kuin Comsolin simulaation mukainen lämpöjakauma. Kuumin alue muodostuu hiutalemuodon keskelle alumiinikiekon päälle ja levittyy siitä rivastoja pitkin kappaleen laiduille. Tuulen vaikutus konvektioon näkyy kennoston äärilaitojen tehostettuna jäähtymisenä sekä alumiinikiekon matalempina käyttölämpötilana. Itse kiekko on lämpökamerakuvien perusteella tasaisen lämpöinen kaikkialta.

Ledipiireihin syötettävä maksimivirta oli lähes 3 ampeeria, mutta lämpökameralla kuvattuja arvoja ei ole mitattu maksimivirralla ajetuilla lampuilla. Ledipiirin valmistajan mukaan yksi kolmen ledin piiri pystyisi tuottamaan 3 000 lumenia valotehoa. Näin ollen kyseessä olisi ollut maksimivirralla mitattuna valoteholtaan tuhansien lumenien lamppu. Vertailukohteena kyseiselle valoteholle voidaan antaa esimerkiksi henkilöauton xenon-läihvalo, joka on kirkkaimmillaan n. 2000 lumenia. Täten valmistetun lampun valotehon määrää ajatellen kyseessä oli koonsa nähden erittäin tehokas valonlähde.

## 7 Johtopäätöksiä tuloksista ja pohdintaa

Pitkän tutkimustyön päätteeksi oli selvää, että kaksimateriaalinen jäähdytyskenno voitaisiin valmistaa lämpöä johtavasta muovista ja se toimi oikein sekä vapaalla että pakotetulla konvektiolla. Creolla suunniteltu ruiskuvalettava kappale jonka virtaussimulaatio oli tarkasteltu Plastic Advisoria hyväksikäyttäen tuki täysin Comsol Multiphysicsin lämmönjohtumisen simulaatioita sekä lämpökameralla kuvattua materiaalia. Alumiinista valmistettuna jäähdytyskennoa ei tarvi suunnitella läheskään samalla tavalla kuin ruiskuvalettavaa kappaletta, mutta sen valmistaminen samanlaiseen muotoon on äärimmäisen kallista verrattuna ruiskuvalettuun muovikappaleeseen.

Tilanteissa missä normaaleja jäähdytysmetodeja ei voida tai haluta soveltaa, lämpöä johtavat muovit on mahdollista tuoda mukaan. Opinnäytetyö on mielestäni osoitus siitä, kuinka alumiinista valmistettava jäähdytyskennosto voidaan korvata lämpöä johtavalla muoviosalla, kun olosuhteet muuten sen sallivat eikä jäähdytettävä kohde esimerkiksi ylitä muovin sulamislämpötilaa. Jotta lämpöä johtavat muovit saadaan toimimaan jäähdytyskennostoissa, on niiden parissa vietettävä tutkimuksien ja suunnittelun parissa enemmän aikaa kuin alumiinista valmistettujen kennostojen ja lämpöelementtien kanssa.

Jos kuitenkin tarkoituksena on valmistaa suuria määriä jäähdytys-elementtejä edullisesti, voidaan ruiskuvalettavat kappaleet tuoda mukaan. Mikäli jäähdytys-elementtejä jatkossa valmistetaan kaksimateriaalimenetelmillä ja niiden ruiskuvaluprosesseissa aletaan käyttää enemmän metalli-inserttejä, saadaan lämpöä johtavat muovit tehokkaaksi osaksi jokapäiväistä tuotantoa yrityksissä, missä lämmönsiirtoon kappaleita tuotetaan.

Työn tarkoituksena oli tutkia, voidaanko alumiinista tai muista materiaaleista valmistettuja jäähdytyskennostoja korvata lämpöä johtavilla muoveilla ja opinnäytetyöni mukaan niitä voidaan. Osittain tai kokonaan, riippuen paljon käyttökohteesta, muovisia jäähdytyskennostoja voidaan käyttää ja niiden sarjavalmistus on runsaasti edullisempaa kuin metalleista koneistetut jäähdytyskennostot. Muovit ovat myös erittäin kevyitä verrattuna metalleihin, joten osittainen metallin korvaus lämpöelementeissä muoveilla mahdollistaa suunnittelussa uusia reittejä kokoonpanojen painon pudotuksessa.

Työssä suunniteltu lamppu soveltuu käytettäväksi esimerkiksi urheilulajeissa, kuten suunnistuksessa otsalamppuna, motocross-pyörän keulalamppuna ja kuljettajan kypärävalona tai polkupyörän valona. Opinnäytetyönä aihe oli mielestäni erittäin mielenkiintoinen ja olen ylpeä tekemästani työstä. Suunnittelussa ja simuloinnissa vietin erittäin paljon aikaa, mutta jälkeenpäin ajateltuna se kaikki ajoi työtäni aina eteenpäin.

## Lähteet

Çengel, Y. 1998. Heat Transfer: a practical approach. Yhdysvallat: McGraw-Hill.

Järvelä, P., Syrjälä, K. & Vastela, M. 2000. Ruiskuvalu. Tampere: Plastdata Oy.

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 1999. Muovitekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

LedTriks – Led-tekniikan osaamispankki 2014. Tietoa ledeistä.  
<http://ledtriks.fi/index.php/tietoa-ledeista> 11.11.2014.

Mönkkönen, K. 2014. Yliopettaja. LedTrix-hankkeen tavoitteet. Sähköposti. Vastaanottaja N. Ylimys. 1.4.2014

Nadenex 2014. LED-valaisimet.  
<http://www.nadenex.fi/online/contents/fi/d155.html#p720> 11.11.2014.

Niemi, J. 2013. Laboratorionsinööri. Karelia ammattikorkeakoulu. EMX 8 käyttökoulutus 20.8.2013.

Piirainen, M. 2014. Lehtori. Ohjeita työn tekijälle. Sähköposti. Vastaanottaja N. Ylimys. 9.9.2014.

Pitkänen, T. 2013. LED-valon lämmönjohtuminen. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma.  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013053112258> 7.6.2014

Thoughtventions Unlimited LLC. Radiation heat transfer.  
<http://www.tvu.com/PLowPowerFurnaceWeb.html> 9.10.2014.

Turunen, L. & Mönkkönen, K. 2014. LedTrix – Led-tekniikan osaamispankki. Loppuraportti. Karelia ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-275-128-7> 18.10.2014

Uusitupa, T. 2007. Lämpökamerakuvaaminen ja kuvien analysointi. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, talotekniikan koulutusohjelma.  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003064624> 9.11.2014