



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Tim Kontturi

# Kilpa-auton polttoaineen jäähdytys- järjestelmän suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

18.4.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tim Kontturi Kilpa-auton polttoaineen jäähdytysjärjestelmän suunnittelu ja toteutus 22 sivua 18.4.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaaja	Projektipäällikkö Joel Kontturi
<p>Tämän työn tavoitteena oli valmistaa polttoaineen jäähdytysjärjestelmä kilpa-autoon ja arvioida järjestelmästä saatua hyötyä. Valmistusmenetelmänä käytettiin 3D-tulostamista, jonka avulla yhdistettiin keskeiset komponentit toisiinsa.</p> <p>Työssä kerrotaan, kuinka FFF-3D-tulostusprosessia voidaan nopeuttaa, ja tarkastellaan tulostusmateriaalin valintaa käyttötarkoituksen mukaan. Teoriaosuudessa esitellään kilpa-auton polttoainejärjestelmän komponentteja ja kokoonpanoa sekä lasketaan jäähdyttimen arvioitua hetkellistä jäähdytystehoa. Lopussa tarkastellaan polttoaineen lämpötilan mittaus-tuloksia ja pohditaan jäähdyttimestä saatua hyötyä.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin valmistettua toimiva jäähdytysjärjestelmä. Lopputuloksista kuitenkin huomattiin, että lisää tutkimuksia on tehtävä: jäähdytinjärjestelmä hidasti polttoai-neen lämpenemistä, mutta ei saatu selville, onko siitä hyötyä moottorin tehon kasvattami-nessä. 3D-tulostettujen kappaleiden kestävyyttä olisi voinut tutkia myös lisää mitattavilla suureilla.</p>	
Avainsanat	kilpa-auto, 3D-tulostus, polttoaineen jäähdytys

Author Title	Tim Kontturi Making a Fuel Cooling System for a Race Car
Number of Pages Date	22 pages 18 April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructor	Joel Kontturi, Project Manager
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to fabricate a fuel cooling system for a racing car and evaluate the benefits of the system. The manufacturing method used was 3D printing, which was used to connect the components to each other.</p> <p>The thesis explains how the FFF 3D printing process can be speeded up and how to choose the right printing material depending on the application. The theory section explains the key components and the fuel system configuration of the fuel system of a race car. After that there are also measurement results of fuel temperature, and finally, the benefits of the cooler are discussed.</p> <p>As a result of this thesis a functional cooling system was fabricated. However, the results showed that more research is needed: the cooling system slowed down the heating of the fuel, but it was not found out whether it was useful for increasing engine power or reducing the risk of engine knocking. The durability of the 3D-printed pieces could also have been further investigated with measurable quantities.</p>	
Keywords	race car, 3D printing, fuel cooling

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Polttoainejärjestelmän kokoonpano kilpa-autossa	1
2.1	Kerääjäsäiliö	2
2.2	Polttoainepumppu	2
2.3	Polttoainesuutin	4
2.4	Polttoaineen paineensäädin	4
2.5	Polttoainesuodatin	5
2.6	Polttoaineen jäähdytin	5
2.7	Nakutus	6
3	Polttoaineen jäähdytyksen suunnittelu	6
3.1	Jäähdyttimen laskettu hetkellinen jäähdytysteho	7
3.2	Jäähdytysjärjestelmän kiinnikkeiden 3D-mallinnus	9
3.3	3D-tulostustekniikka	11
3.4	Jäähdytysjärjestelmän kiinnikkeiden 3D-tulostusmateriaalin valinta	11
3.5	Jäähdytysjärjestelmän sähkökaavio	14
4	Polttoaineen jäähdytysjärjestelmän valmistus ja asennus	14
4.1	Mallinnettujen kiinnikkeiden tulostus 3D-tulostimella	14
4.2	Jäähdytysjärjestelmän komponenttien asennus	16
4.3	Mittaustulokset	19
5	Loppupäätelmät	20
	Lähteet	22

## Lyhenteet

PLA	Polylactic-acid. Uusiutuvista materiaaleista valmistettu biohajoava muovi, joka on käytetyin materiaali 3D-tulostamisessa.
PETG	Polyethylene terephthalate, glycol Modified. polyeteenitereftalaattimuovi jossa G-kirjain tarkoittaa glykolimodifioitua, mikä tekee muovista kirkkäämmän, vahvemman ja helpomman käyttää, kuin esimerkiksi tavallisissa muovipulloissa käytetty PET-muovi ilman glykolimodifiointia.
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene. Akrylibutadieenistyreenuovi, joka on käytössä erittäin yleisesti aina legoista auton puskureihin.
FFF	Fused filament fabrication. 3D-tulostusmenetelmä, jossa syötetään jatkuvalla syötöllä kestopuovilankaa lämmitettävän suulakepuristimen läpi. Suulaketta liikuttamalla saadaan sulaneesta muovista muodostettua erilaisia muotoja ja kappaleita.
FDM	Fused deposition modeling. Teknisesti sama kuin FFF, mutta on rekisteröity Stratasys-yrityksen tavaramerkki.

## 1 Johdanto

Kilpa-autoilussa on aina haettu moottorilta sääntöjen puitteissa maksimaalista tehoa, mutta samalla on haluttu pitää moottori niin luotettavana, että se kestäisi kilpailun loppuun asti. Myös jokainen muu osa on usein kehitetty huippuunsa, jotta ajoneuvon suorituskyky olisi paras mahdollinen. Näiden syiden takia kilpa-autojen kehitystyö on jatkuva, ja usein henkilöautoihin päätyvän tekniikan kehitys on lähtenyt kilpa-autoilun puolelta.

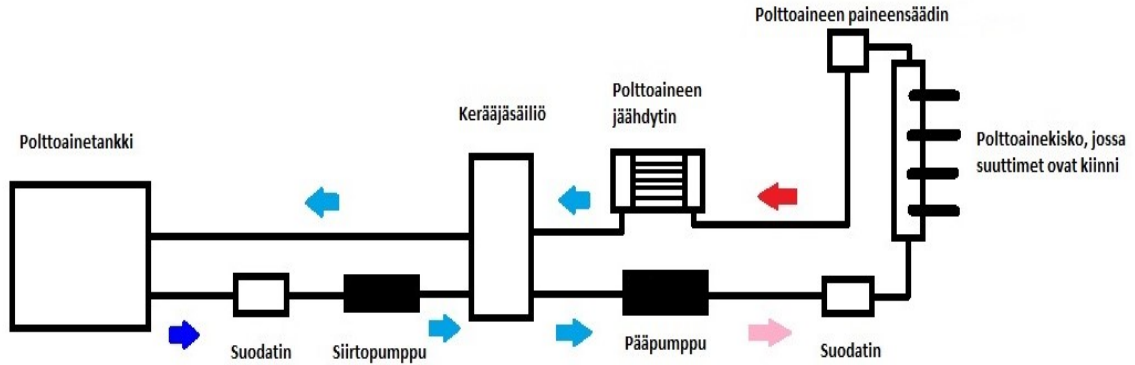
Tässä työssä valmistetaan polttoaineen jäähdytysjärjestelmä ja tutkitaan siitä saatavaa hyötyä kilpa-autokäytössä sekä tutkitaan 3D-tulostettujen kappaleiden soveltuvuutta kilpa-autokäyttöön. Teoriaosuus painottuu imusarja suihkutteisten ottomoottorien toimintaa, koska ne ovat edelleen määrällisesti yleisimpiä kilpa-autoilussa.

Aluksi esitellään polttoainejärjestelmän teoriaa ja komponentteja. Tämän jälkeen tarkastellaan polttoaineen jäähdytysjärjestelmän suunnittelua ja tutustutaan 3D-tulostamisen perusteisiin. Lopuksi esitellään valmistettu järjestelmä ja pohditaan siitä saatua hyötyä.

## 2 Polttoainejärjestelmän kokoonpano kilpa-autossa

Tässä luvussa käsitellään kilpa-auton polttoainejärjestelmä yleisellä tasolla. Kuvassa 1 on eritelty kaikki komponentit, jotka löytyvät monimutkaisimmista järjestelmistä. Kuvasta 1 poiketen järjestelmissä voi olla myös useampia pumppuja, polttoainekiskoja tai suuttimia, mutta ne ovat selkeyden vuoksi jätetty kuvasta pois. Yksinkertaisimmista järjestelmistä voi taas puuttua jäähdytin tai kerääjäsäiliö ja siirtopumppu. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että polttoainejärjestelmän komponentit ja kapasiteetti riippuvat siitä, mikä moottori autossa on ja mihin kilpa-autosarjaan sitä ollaan rakentamassa.

Täsmälleen kuvan 1 mukainen polttoainejärjestelmä on suunnitteilla tämän opinnäytetyön autoon, mutta työn painotus on polttoaineen jäähtymisen suunnittelussa ja toteutuksessa.



Kuva 1. Kilpa-auton polttoainejärjestelmä. Nuolet osoittavat polttoaineen virtaussuunnan ja niiden värit kuvaavat polttoaineen lämpötilaa eri kohdissa järjestelmää.

## 2.1 Kerääjäsäiliö

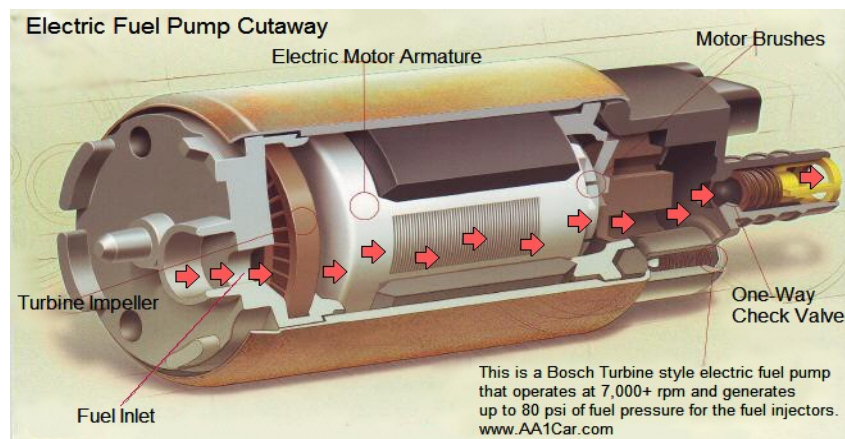
Kerääjäsäiliön tehtävä on estää pääpolttoainepumppua imemästä ilmaa polttoaineen sekaan [1]. Säiliö on lähes koko ajan täynnä polttoainetta, jotta esimerkiksi auton ajaessa kaarteissa säiliön sisällä ei esiintyisi polttoaineen loiskumista. Säiliö mahdollistaa myös polttoainetankin ajamista tyhjemmäksi. Koska isossa tankissa polttoaineella on enemmän tilaa liikkua, niin tankin tyhjentyessä riski ilman pääsemisestä polttoaineputkistoon kasvaa [2]. Ilman pääseminen moottoriin asti aiheuttaisi seossuhteeseen äkillisiä muutoksia, mikä käyntihäiriöiden lisäksi voisi aiheuttaa konerikon. Tyypillisesti kerääjäsäiliöt ovat tilavuudeltaan yhden ja kolmen litran väliltä.

## 2.2 Polttoainepumppu

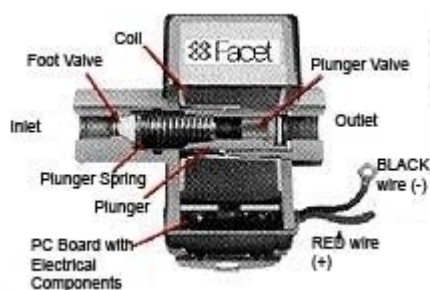
Nykyaikaiset sähköiset polttoainepumput voidaan jakaa kahteen luokkaan toimintaperiaatteensa mukaan. Yleisempi näistä on malli, jossa sähkömoottori pyörittää turbiinia tai ratasta, joka työntää polttoaineen pumpun läpi. Kuvassa 2 on esitelty turbiinimallisen pumpun toiminta tarkemmin. Tämän mallinen pumppu on tämän työn autossa pääpumppuna, joka paineistaa polttoaineen suuttimelle paineensäätimen mukaan. Käyttöpaine

on normaalisti alle kymmenen baaria kuvan 2 tyyppisissä pumpuissa. Pumpun tuotto muuttuu paineen mukaan, eli paineen kasvaessa tuotto pienenee ja päinvastoin.

Toisessa pumppumallissa on solenoidilla ja jousella ohjattu mäntä, joka pumppaa polttoainetta eteenpäin. Kun solenoidiin kytketään virta, mäntä liikkuu ja painaa jousen kaasaan. Samalla pumppu imee sisään polttoainetta. Kun solenoidin virta katkaistaan, jousi työntää männän takaisin ja työntää polttoaineen pumpun toisesta reiästä ulos. [4] Virtaussuunnan määrittää pumpun sisällä olevat takaiskuventtiilit, joista molemmat voivat olla liittimissä tai toinen männän sisällä kuten kuvassa 3. Tämäntyyppistä pumppua ei ole suunniteltu paineistamaan polttoainetta, ja siksi kilpa-autossa tätä mallia käytetään lähinnä siirtopumppuna. Kaasuttimella varustetussa autossa tämäntyyppistä pumppua voidaan käyttää myös pääpumppuna.



Kuva 2. Sähkömoottorilla ja turbiinilla varustetun polttoainepumpun läpileikkaus [3].

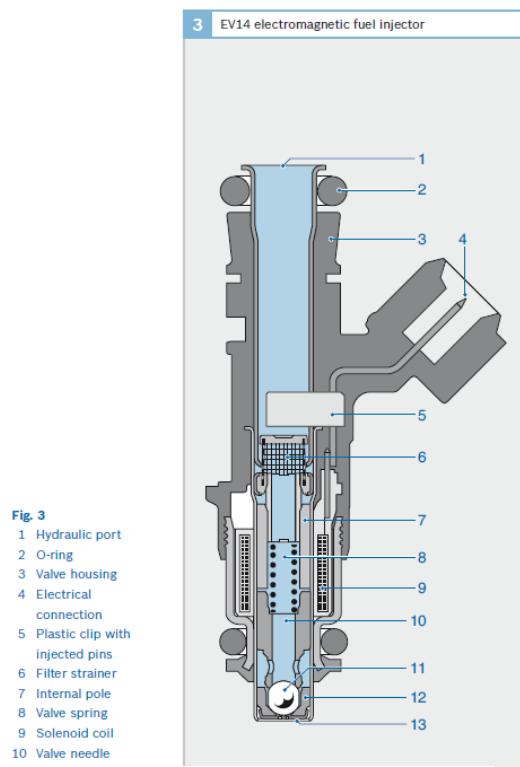


Kuva 3. Solenoidilla ohjattu polttoainepumppu. Käytössä tämän työn auton siirtopumppuna. [5]



## 2.3 Polttoainesuutin

Polttoainesuutin on solenoidiohjattu venttiili [6, s. 16]. Kun virta kytketään solenoidiin, virtaventtiili avautuu ja kun virta katkaistaan, jousi vetää venttiilin kiinni. Kuvassa 4 on esitelty tarkemmin suuttimen rakenne.



Kuva 4. Suuttimen rakenne [6, s. 16].

## 2.4 Polttoaineen paineensäädin

Polttoaineen paineensäätimellä säädetään suuttimille tulevan polttoaineen painetta. Säädin säätelee polttoaineen painetta imusarjassa olevan paineen mukaan. Polttoaineen paineesta puhuttaessa tarkoitetaan polttoaineen peruspainetta, joka on polttoaineen yli-paine suhteessa imusarjan paineeseen. Polttoaineen paine siis pysyy koko ajan vakiona suhteessa imusarjan paineeseen, mutta jos vertaa taas normaaliin ilmakehän paineeseen, niin paine muuttuu koko ajan. Esimerkiksi ahdetussa moottorissa ahtopaineen noustessa polttoaineen paine nousee myös yhtä paljon. On erittäin tärkeää, että

polttoaineen peruspaine pysyy koko ajan vakiona, koska silloin myös suuttimen suihkut-taman polttoaineen määrä pysyy vakiona. Esimerkiksi kilpa-autossa voi tulla tilanne, että paineensäädin voi olla liian pieni, kun moottorin kuormitus on pientä ja lähes kaikki polt-toaine palaa takaisin kerääjäsäiliöön. Tällöin polttoaineen peruspaine ei ole enää vakio vaan alkaa nousta, koska paineen säädin ei pysty virtaamaan enempää takaisin kerää-jäsäiliöön. Lopputuloksena voi olla moottori, jonka suuttimien aukioloajan säätäminen voi olla vaikeaa tai sitten äärimmäisessä tilanteessa polttoaineen paine nousee niin korke-aksi, että polttoainepumpun varoke rikkoutuu.

## 2.5 Polttoainesuodatin

Polttoainesuodattimen tehtävä on vähentää kiinteiden partikkelien määrää polttoai-neessa. Nämä partikkelit aiheuttaisivat suuttimien ja polttoainepumppujen kulumista tai voisi johtaa jopa niiden tukkeutumiseen. Kuluminen ja tukkeutuminen taas johtaisi seos-suhteen muutoksiin, mikä voisi johtaa käyntihäiriöihin ja mahdolliseen konerikkoon. Suo-datin itsessään voi myös tukkiutua kaikesta liasta, jos sitä ei vaihda riittävän usein.

Suodattimia on polttoainejärjestelmässä usein kaksi. Ensimmäinen on heti polttoaine-tankin jälkeen tai tankissa ja suodatustarkkuudeltaan hieman karkeampi kuin toinen. Tämä ensimmäinen suodatin on lähinnä polttoainepumppuja varten ja pitämässä järjes-telmän yleisesti puhtaana. Toinen suodatin on taas juuri ennen polttoainesuuttimia ja on suodatustarkkuudeltaan parempi kuin ensimmäinen suodatin. Toisella suodattimille var-mistetaan, että polttoaine on riittävän puhdasta ja täten minimoi suuttimien kulumista ja vähentää myös niiden tukkiutumisen riskiä. [7]

## 2.6 Polttoaineenjähdytyn

Polttoaineenjähdyttimen tehtävä on vähentää järjestelmässä kiertävän polttoaineen lämpötilan nousua. Viileämpi polttoaine pienentää nakutusriskiä, ja pienempi nakutus-riski taas mahdollistaa sytytysennakon kasvattamisen tai ahtopaineen nostamisen ahde-tussa moottorissa ja sitä kautta suuremman moottorin tehon [1; 2]. Jähdyttimen hyöty on kuitenkin usein hyvin pieni [1], mutta mitään suoraa ohjetta, milloin jähdyttimestä on hyötyä, ei ole. Voidaan kuitenkin sanoa, että mitä kauemmin autolla ajetaan ja mitä

enemmän polttoainetta palaa kerääjäsiiliölle, niin sitä enemmän hyötyä jäähdyttimestä on. Jäähdyttimellä voidaan vähentää myös polttoaineen haihtumista tankin huohotuksen kautta. Mutta tämä lähinnä silloin, jos polttoaineen paluuputkessa oleva polttoaine kiehuu.

## 2.7 Nakutus

Nakutuksella tarkoitetaan polttoaineen ennenaikaista syttymistä, jossa polttoaine syttyy ennen sytytystulpan antamaa kipinää. Nakutushetkellä polttoaine syttyy useista kohdista räjähdysenomaisesti nostaten hetkellisen sylinterin lämpötilan ja sylinteripaineen erittäin korkeaksi. Nakutusta voi syntyä esimerkiksi, jos polttoaineen oktaaniluku on liian matala, sytytystulppien lämpöarvo on liian korkea tai polttoaineen seossuhde on liian korkea (ruiskutuksen häiriöt). Perimmäinen syy nakutukselle on kuitenkin liian korkea lämpötila palotilassa (tai palotilan yhdessä kohdassa) suhteessa polttoaineen laatuun ja seossuhteeseen. Seurauksena voi olla mäntä-, kiertokanki- tai laakerivaurioita. [8]

## 3 Polttoaineen jäähdytyksen suunnittelu

Jäähdytysjärjestelmän valmistuksessa päätettiin käyttää 3D-tulostettuja kappaleita mahdollisimman paljon, koska se mahdollistaisi monimutkaisten kappaleiden valmistamisen helpommin. Toinen syy oli halu kokeilla kyseisen valmistusmenetelmän sopivuutta kilpa-autokäyttöön. Suunnittelun alussa päätettiin myös, ettei järjestelmä painaisi yli kahta kiloa, jotta siitä saatava hyöty olisi varmasti suurempi kuin painollinen haitta. Jäähdyttimen asennuspaikka haluttiin myös pitää auton sisällä, jotta polttoaineletkujen kytkentä olisi helppoa. Jäähdytysilma oli tarkoitus tuoda auton ulkopuolelta, jotta jäähdytys olisi mahdollisimman tehokasta. Jäähdyttimeltä tuleva ilma oli taas tarkoitus viedä takaisin ulkoilmaan, ettei se lämmittäisi autoa sisältä.

Jäähdytinkennoksi valittiin suurin (220 x 146 mm) Setrabin valmis öljynjäähdytin, joka mitoitaan mahtui tulostimen tulostusalueelle (220 x 220 mm). Tuulettimeksi valittiin 120 mm:n tietokoneen tuuletin, jotta ilma virtaisi jäähdyttimen läpi myös auton paikalla ollessa. Tuulettimen ohjaimeksi valittiin valmis ohjain, joka mahdollistaisi tuulettimen käynnistämisen halutussa lämpötilassa.

### 3.1 Jäähdyttimen laskettu hetkellinen jäähdytysteho

Lasketaan jäähdyttimen hetkellinen jäähdytysteho auton ollessa tyhjäkäynnillä ja jäähdyttimen tuulettimen ollessa päällä. Näiden valittujen olosuhteiden perusteella on jäähdytysteho helpointa laskea, koska tiedetään jäähdyttimen läpi menevä ilmavirtaus suhteessa jäähdyttimen läpi menevään polttoaineeseen.

Tiedetään, että tyhjäkäynnillä polttoainetta palaa 325 l/h ( $\approx 5,42$  l/min) takaisin kerääjä-säiliölle ja että tuulettimen tilavuusvirta on  $q_v = 184 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $\approx 0,05111 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Lämpötilojen laskennallisina arvoina käytetään  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :n ulkoilman lämpötilaa ja  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ :n polttoaineen lämpötilaa. Loput tarvittavat arvot löytyvät kuvan 5 taulukoista ja käytetyt laskukaavat ovat jäähdytinkenovalmistajan antamia [9].

Ennen laskukaavojen käyttöä pitää kuitenkin laskea tuulettimen läpi menevän ilman nopeus ( $v$ ), joka saadaan laskettua tuulettimen tilavuusvirrasta. Kennon pinta-ala ( $A$ ) (mitattu) on  $142 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} = 17040 \text{ mm}^2 = 0,01704 \text{ m}^2$ .

$$q_v = Av \Rightarrow v = \frac{q_v}{A}$$

$$v = \frac{0,05111 \text{ m}^3/\text{s}}{0,01704 \text{ m}^2} = 2,93736 \text{ m/s} \approx 3,0 \text{ m/s}$$

Seuraavat laskut ovat tehty Setrabin ohjeen mukaan [9]. Ohjeissa lasku on laskettu öljylle ja oletettavasti kuvan 5 kuvaajissakin käyrät ovat öljystä, mutta muita arvoja ei ollut saatavilla.

Ensimmäiseksi lasketaan, kuinka paljon polttoainetta virtaa jäähdyttimen yhdessä putkessa. Se saadaan jakamalla koko jäähdyttimen läpi virtaava polttoaine, putkien määrällä. Jäähdyttimessä on 19 putkea.

$$\frac{5,42 \text{ l/min}}{19} = 0,285263 \text{ l/min} \approx 0,3 \text{ l/min}$$

Seuraavaksi katsotaan kuvan 5 kuvaajasta, mikä on lasketulla virtauksella (0,3 l/min/tube), yhden putken jäähditysarvo ( $W/^{\circ}C/tube$ ). Jäähdytinkkenno kuuluu ensimmäiseen sarjaan, joten tutkitaan alinta kuvaajaa. Huomataan, että laskettu arvo on kuvaajan ulkopuolella (pienin arvo on 0,5 l/min/tube). Tästä voidaan päätellä, että jäähdytin on hieman ylimitoitettu suhteessa käyttötarkoitukseen, koska valmistaja ei ole antanut arvoa niin pienelle virtaukselle. Valitaan laskuun jäähditysarvoksi 1,8  $W/^{\circ}C/tube$ . Oikeasti arvo voisi olla mitä tahansa alle 2,1  $W/^{\circ}C/tube$  (kuitenkin  $\neq 0$ ), mutta nyt joudutaan käyttämään kuvaajan muodosta arvoitua arvoa. Yksikko  $W/^{\circ}C/tube$  kertoo, millä teholla yksi putki jäähdyttimestä haihduttaa lämpöenergiaa celsiusastetta kohden jäähdyttimen sisällä kiertävän nesteen ja ulkoilman välillä.

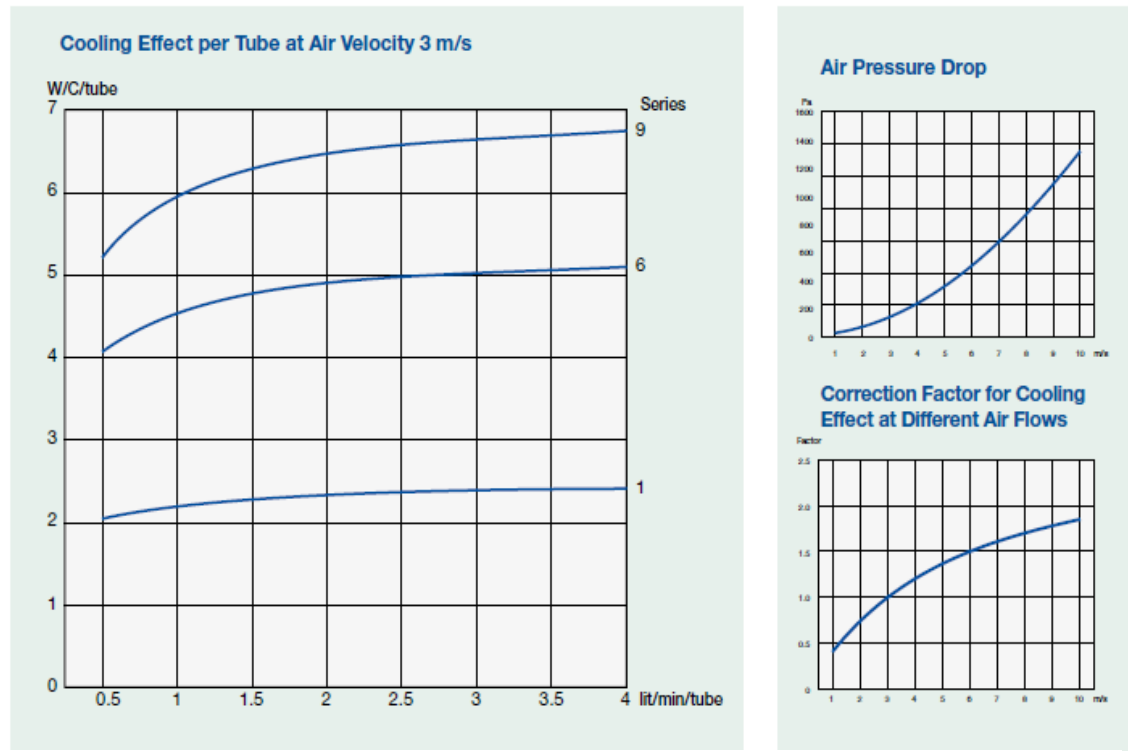
Lämpötilaero polttoaineen ja ulkoilman välillä on

$$\Delta t = 60^{\circ}C - 25^{\circ}C = 35^{\circ}C$$

Kun tiedetään, että putkia (tube) on 19, lämpötilaero on  $35^{\circ}C$  ja  $W/^{\circ}C/tube$  arvo on 1,8, voidaan laskea, millä teholla jäähdytin luovuttaa lämpöenergiaa ulkoilmaan.

$$19 \text{ tubes} \cdot 35^{\circ}C \cdot 1,8 \text{ } W/^{\circ}C/tube = 1197 \text{ } W$$

Jäähdyttimen hetkellinen jäähdytysteho on siis 1197 W auton ollessa tyhjäkäynnillä, polttoaineen lämpötilan ollessa 60 °C, ulkolämpötilan ollessa 25 °C ja tuulettimen ollessa päällä. Jäähdytysteho muuttuu koko ajan lämpötilan mukaan. Esimerkiksi jos lämpötila ero olisi vain 10 °C olisi hetkellinen jäähdytysteho 342 W. Koska laskettu tuulettimen aikaansaama ilman nopeus oli sama kuin kuvan 5 ”cooling effect” -kuvaajassa, ei tehoa tarvinnut kertoa kuvan 5 ”correction factor” -kuvaajan arvolla.



Kuva 5. Valmistajan (Setrab) antamia kuvaajia jäähdytinkensojen suoritusarvoista [9]. Kuvaajassa on virhe y-akselin yksikössä, jonka pitäisi olla W/°C/tube.

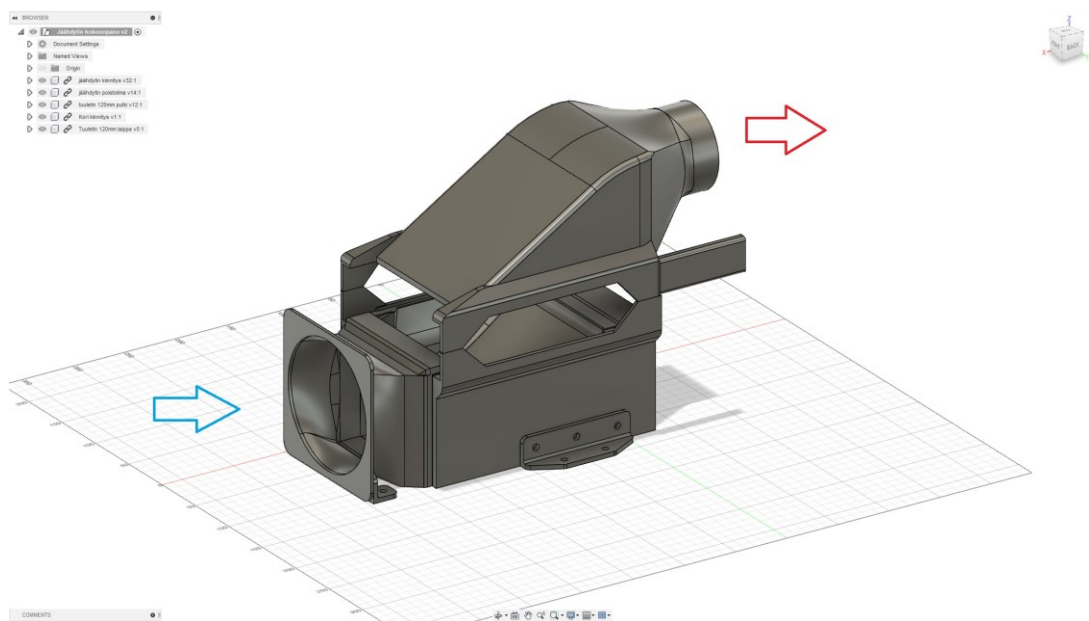
### 3.2 Jäähdytysjärjestelmän kiinnikkeiden 3D-mallinnus

Jäähdyttimien kiinnikkeet ja ilmanohjaimet mallinnettiin sopiviksi jäähdyttimen ja tuulettimen mittojen mukaan. Ulkomitoilla ja muodoilla ei ollut tarkkoja vaatimuksia asennuspai-kan suhteen, koska tilaa oli lähes koko auton takakontin verran. Sen sijaan 3D-tulostimen tulostustilavuuden mitat (22 x 22 x 30 cm), määrittivät tulostettavien kappaleiden äärimittat mitat. Mittojen lisäksi täytyi miettiä, että kulmat ja muodot olisivat sellaisia, joita tulostimella pystyisi tulostamaan. Esimerkiksi kuvan 6 ylintä poistoilman ohjainta ei ollut mahdollista tulostaa kuvan mukaan vaakatasossa sen pituuden takia. Koska tulostin tulostaa vain alhaalta ylöspäin, kappaleessa olisi ollut myös paljon kohtia, jossa materiaalia

tulostettaisiin tyhjän päälle. Nämä kohdat olisivat vaatineet alleen paljon tukimateriaalia, mikä olisi lisännyt materiaalin kulutusta ja tulostusaikaa, joten kappale oli järkevintä suunnitella tulostettavaksi pystysuunnassa.

Asentamisen kannalta suunnittelussa taas pyrittiin siihen, että kokoamisen ja mahdollinen osien vaihtaminen olisi mahdollisimman selkeää ja helppoa. Koska jäähdytin on symmetrinen, sen liitännät voivat olla kummalla puolella tahansa. Symmetrisyys mahdollistaa myös ilmanohjaimien asentamisen joko samaan suuntaan tai eri suuntaan. Mutta muuten osat sopivat yhteen vain yhdellä tavalla.

Kappaleiden seinämien vahvuutta ei mietitty mallintamisessa erityisen tarkasti, koska kappaleet piti ajaa 3D-tulostinta varten oman ohjelmansa kautta. Tässä ohjelmassa määritettiin erikseen kappaleiden pohjan, kannen ja ulkoseinämien vahvuudet sekä näiden sisään jäävän tilavuuden täyttöprosentti. Nämä asetukset vaikuttavat sekä kappaleen kestävyteen että tulostusaikaan.



Kuva 6. 3D-mallit koottuna yhteen. Jäähdyttimen paikka on kuvassa vaakatasossa, kappaleiden välissä olevassa tyhjässä tilassa. Nuolet osoittavat ilmavirtauksen suunnan.

### 3.3 3D-tulostustekniikka

3D-tulostustekniikaksi valittiin FFF (FDM), sen edullisuuden ja yleisyyden takia [10]. Kuvassa 7 on tulostuksessa käytetty tulostin. Kyseisessä tulostimessa suulake liikkuu x- ja y-suunnassa ja alusta, jolle kappale tulostetaan, z-suunnassa. Tulostimen sivussa on kestopuovilankakela, josta syötetään lankaa suulakkeelle sähkömoottorin avulla. Muovia tulostetaan aina yksi kerros x–y-suunnassa, minkä jälkeen alusta liikkuu z-suunnassa (alaspäin) määritetyn kerrostarkkuuden verran ja tulostaa jälleen x–y-suunnassa yhden kerroksen. Tätä kiertoa jatketaan valitulla nopeudella niin pitkään, kunnes tulostettu kappale on valmis.



Kuva 7. Creality Ender 5 [11].

### 3.4 Jäähdytysjärjestelmän kiinnikkeiden 3D-tulostusmateriaalin valinta

Tulostusmateriaalia valitessa tärkeimpänä valintakriteerinä pidettiin kestävyttä ja kuumuuden kestoja, mutta käytettävissä olevan tulostimen ominaisuudet kuten tulostussuulakkeen maksimilämpötila kuitenkin lopulta määrittivät valitun materiaalin.

Kestävimpänä vaihtoehtona olisi ollut metallin tulostaminen, mutta tämäntasoista laitetta ei ollut käytettävissä. Seuraavaksi tutkittiin hiilikuituvahvisteisten muovien tulostamista,



mutta tulostimen ominaisuudet rajasivat tämänkin vaihtoehdon pois. Näiden materiaalien tulostus lämpötilat vaihtelivat suunnilleen 240–300 °C:n välillä ja tulostimen maksimilämpötila oli 260 °C. Tulostamista ei lähdetty kokeilemaan, koska ei voitu olla varmoja sen onnistumisesta.

Lopuksi päädyttiin tutkimaan taulukosta 1 yleisimpiä tulostusmateriaaleja, jotka ovat PLA, ABS ja PETG. Taulukosta 1 voidaan todeta, että ABS ja PETG ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaiset, mutta PETG on hieman helpompi tulostaa ja hieman kovempi materiaali. Käyttölämpötila on taas ABS:llä hieman parempi, mutta se ei ole ongelma tässä käyttötarkoituksessa. PLA ja PETG:tä vertaillen huomataan, että ne ovat lähes yhtä helppoja tulostaa, mutta PLA on materiaalina kovempi kuin PETG. PLA:n kovuus tosin tekee siitä myös hauraamman, mikä huomataan sen kestävyudessa, joka on puolet PETG:stä. Käyttölämpötila on myös PETG:tä matalampi ja se lähestyy jäädyttimen lämpötilaa, mikä ei ole toivottu asia.

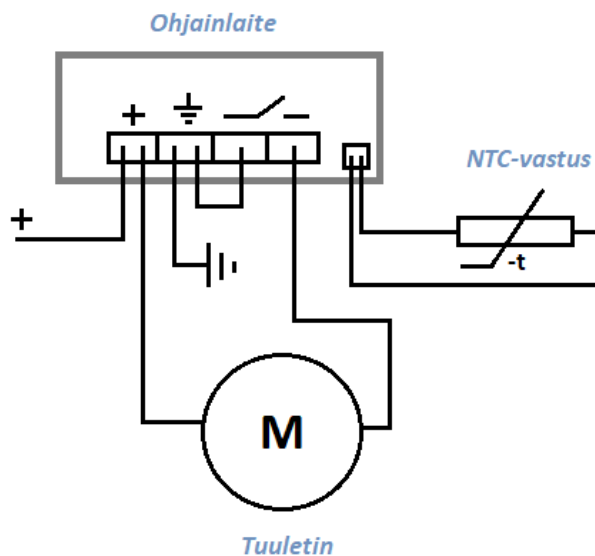
Tulostus materiaaliksi valittiin lopulta PETG, koska sen tulostaminen on yhtä helppoa kuin PLA:n, mutta helpompaa kuin ABS:n. Muiden ominaisuuksien puolesta myös tulostettujen kappaleiden olisi parempi olla kestävämpiä kuin kovia. Koska autossa kappaleet altistuvat värinälle ja auton korin joustoliikkeille, niin voidaan olettaa, että pehmeämpi ja joustavampi materiaali kestää murtumatta käyttöä pidempään kuin kovempi materiaali. Joten näiden ominaisuuksien puolesta PETG olisi siis parempi valinta kuin PLA. Materiaalin hintojen puolesta PETG on hieman kalliimpi kuin PLA ja ABS, mutta koska se tässä käyttötarkoituksessa yhdistää PLA:n ja ABS:n parhaimmat ominaisuudet, voidaan korkeampi kustannus sallia.

Taulukko 1. Simplify3D-merkkisten tulostusmateriaalien ominaisuustaulukko [12]. Taulukkoa voidaan soveltaa myös muunmerkkisiin materiaaleihin, mutta tarkat arvot löytyvät aina kyseiseltä valmistajalta. Kuvassa oleva hiilikuitumuovi on PLA-pohjainen, kun taas tekstissä arvioidut hiilikuitumuovit olivat ABS- ja PETG-pohjaisia.

	ABS	PLA	PETG	Hiilikuitu vahvistettu PLA
Materiaalin vahvuus	40 MPa	65 MPa	53 MPa	45–48 MPa
Jäykkyys	5/10	7,5/10	5/10	10/10
Kestävyys	8/10	4/10	8/10	3/10
Maksimi käyttölämpötila	98 °C	52 °C	73 °C	52 °C
Hinta	10–40 \$	10–40 \$	20–60 \$	30–80 \$
Tulostettavuus	8/10	9/10	9/10	8/10
Tulostuslämpötila	220–250 °C	190–220 °C	230–250 °C	200–230 °C

### 3.5 Jäähdytysjärjestelmän sähkökaavio

Jäähdyttimen tuulettimen toteutettiin oman ohjainlaitteensa avulla. Ohjainlaitteessa on NTC-vastus, joka mittaa lämpötilaa ja ohjainlaitteesta valitaan lämpötila, jossa halutaan tuulettimen käynnistyvän. Kun valittu lämpötila saavutetaan, ohjainlaitteen sisäinen rele sulkee tuulettimen virtapiirin ja tuuletin käynnistyy. Kuvassa 8 on esitelty sähköjärjestelmän kytkentäkaavio lukuun ottamatta ohjainlaitteen sisäisiä kytkentöjä.



Kuva 8. Jäähdytysjärjestelmän kytkentäkaavio. Kun ohjainlaitteen valittu lämpötila saavutetaan, sen sisäinen rele kytkee tuulettimen maihin ja tuuletin käynnistyy.

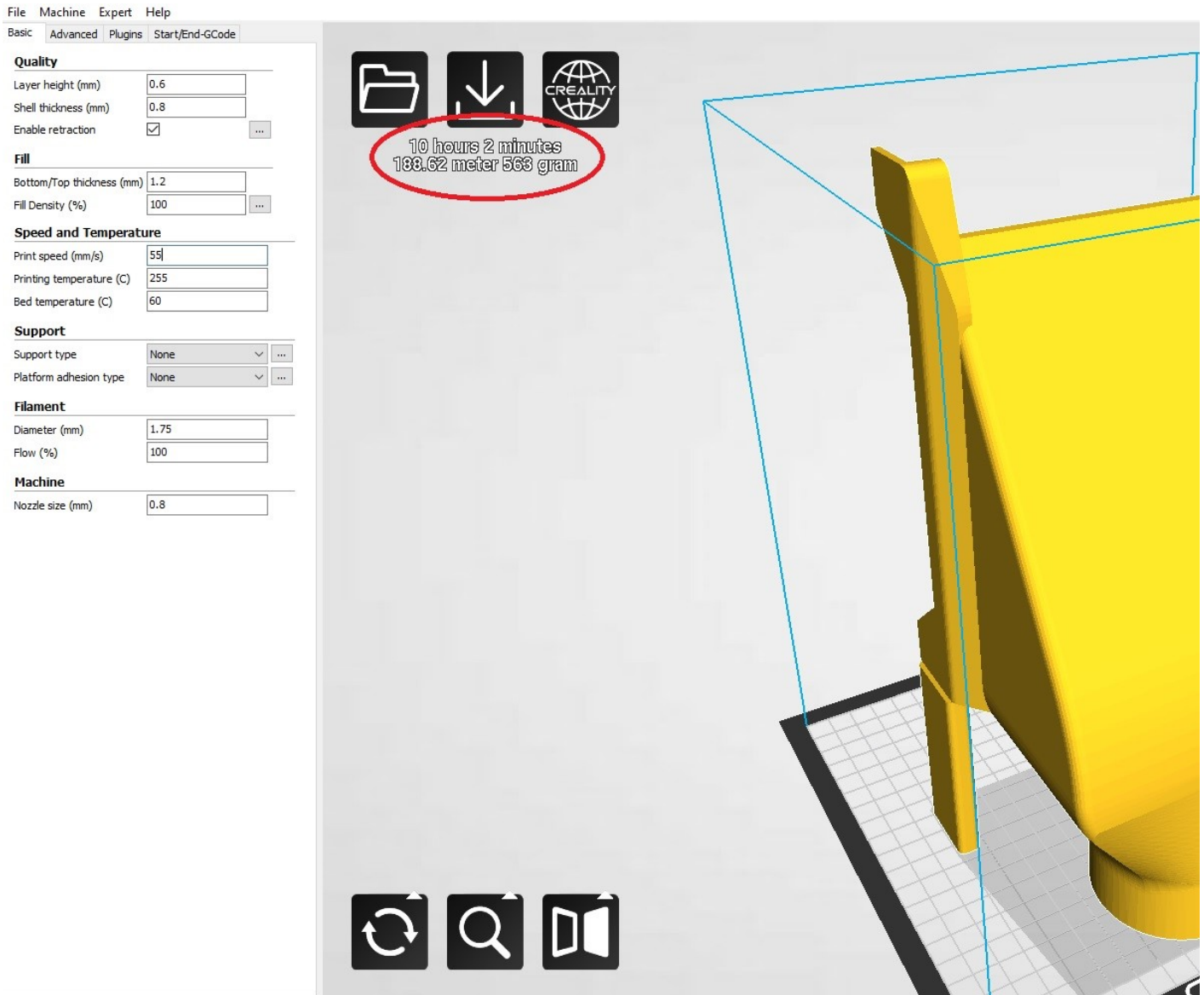
## 4 Polttoaineen jäähdytysjärjestelmän valmistus ja asennus

### 4.1 Mallinnettujen kiinnikkeiden tulostus 3D-tulostimella

Tulostamisessa pyrittiin siihen, että tulostusaika olisi alle 12 tuntia ja että kappaleiden kestävyys olisi riittävä ajoneuvokäyttöön. Aikarajoituksella haluttiin mahdollistaa, että kappaleen voisi tulostaa saman päivän aikana tai sitten se olisi valmiina yön tulostamisen jälkeen. Tulostus voi mennä myös pieleen, esimerkiksi kappaleen irrotessa kesken tulostuksen alustasta ja pidemmällä tulostusajalla tämä riski aina kasvaa.

Tulostusaikaa pystyi arvioimaan tulostimen ohjelman kautta, jossa määritettiin tulostusasetukset kappaleille. Tulostimessa oli kiinni 0,4 mm:n suutin, joka yhdessä 0,2 mm:n kerrostarkkuuden ja 100 %:n täyttöasteen kanssa antoi arvioksi lähes kahden vuorokauden tulostusajan isoimmalle kappaleelle. 10 %:n täyttöasteella pääsi reilun vuorokauden tulostusaikaan, joka ei ollut vielä tavoitteiden mukainen. Ratkaisu ongelmaan oli suuttimen vaihtaminen isompaan ja kerrostarkkuuden kasvattaminen. 0,8 mm:n suuttimella, 0,6 mm:n kerrostarkkuudella ja 100 %:n täyttöasteella arvioitu tulostusaika laski kuvan 9 mukaisesti alle 12:n tunnin.

Tulostettujen kappaleiden kestävyyttä oli vaikea arvioida millään mitattavalla suurella. Ensimmäisissä tulostuksissa kokeiltiin 10–30 %:n täyttöasteita ja 0,8 mm:n seinämävahvuutta ja kappaleet olivat hyvin hauraita, kappaleet murtuivat sormin puristamalla. Tulostusajat olisi tosin saanut pidettyä alle kuuden tunnin. Tämän jälkeen tulostettiin kuvan 9 kappale 100 %:n täyttöasteella, ja kappaleesta tuli niin kestävä, että sen päällä pystyi seisomaan. Tulostus parani myös silmämääräisesti. Koska materiaalia tulostettiin koko ajan tasaisesti kerrosten välissä, ei suuttimen tarvinnut ”hyppiä” kerrosten välissä ja jättää tyhjää tilaa kappaleeseen. Tulostettu kappale painoi yli tuplasti enemmän kuin 10 %:n kappale, mutta laatu oli parempaa, joten tämän jälkeen muokattiin 3D-mallien ulkomittoja. Lopullisissa malleissa seinämien vahvuudet ovat 1–4 mm ja 100 %:lla täyttöasteella arvioitu tulostusaika oli reilu yhdeksän tuntia.



Kuva 9. Punaisella on ympyröity isoimman kappaleen arvioitu tulostusaika.

#### 4.2 Jäähdytysjärjestelmän komponenttien asennus

Kaikkien komponenttien asennus sujui alle neljässä tunnissa ilman suurempia ongelmia. Eniten aikaa kului jäähdyttimen sovittamisessa 3D-tulostettuihin osiin, koska jäähdytyn ei ollut ihan täysin suora ja symmetrinen. Epäsymmetrisyyden takia joutui tulostetuista osista hieman joka kohdasta poistamaan materiaalia, jotta kaikki osat istuivat tiukasti

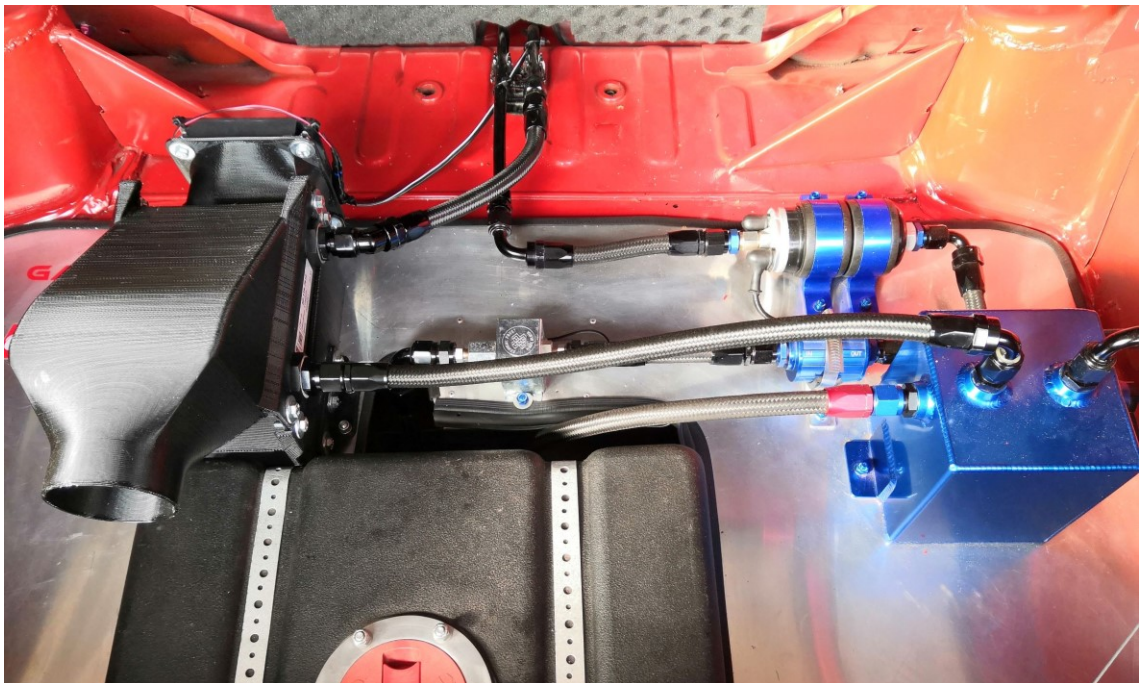
kiinni toisiinsa. Kuvassa 10 on valmis jäähdytinjärjestelmä asennettuna autoon. Tarkoituksena oli vielä tuoda ilma jäähdyttimelle auton ulkopuolelta ja viedä jäähdyttimen läpi mennyt ilma takaisin ulkoilmaan, mutta nämä asiat rajataan työn ulkopuolelle. Kuvassa 11 on tuulettimen ohjain, jonka kiinnityskehys tuli kiireessä mallinnettua hieman liian isoksi. Ohjaimen lämpötila-anturi asennettiin moottorille menevän polttoaineputken kylkeen ja putken molemmille puolille tuli tulostettua palat, jotka puristavat anturin tiukasti putkea vasten. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska anturissa ei ollut kierteitä eikä sen mukana tullut kiinnitystarvikkeita. Kuvasta 12 nähdään, miten jäähdytin on asennettu suhteessa muihin komponentteihin.



Kuva 10. Jäähdytinjärjestelmä asennettuna autoon. Oikeassa reunassa on tuuletin, joka vetää ilmaa jäähdyttimelle ja ilma poistuu vasemmassa yläkulmassa olevan letkuliitännän kautta.



Kuva 11. Tuulettimenohjain. Punaisilla numeroilla on mitattu lämpötila ja sinisillä valittu lämpötila, jossa tuuletin käynnistyy.



Kuva 12. Polttoainejärjestelmän osat, jotka ovat auton takakontissa. Huomaa asennus virhe: sininen polttoainesuodatin on kiiltävän siirtopumpun jälkeen, vaikka suodattimen pitäisi olla ennen pumpua. Toinen suodatin on auton etuosassa moottoritilassa.

### 4.3 Mittaustulokset

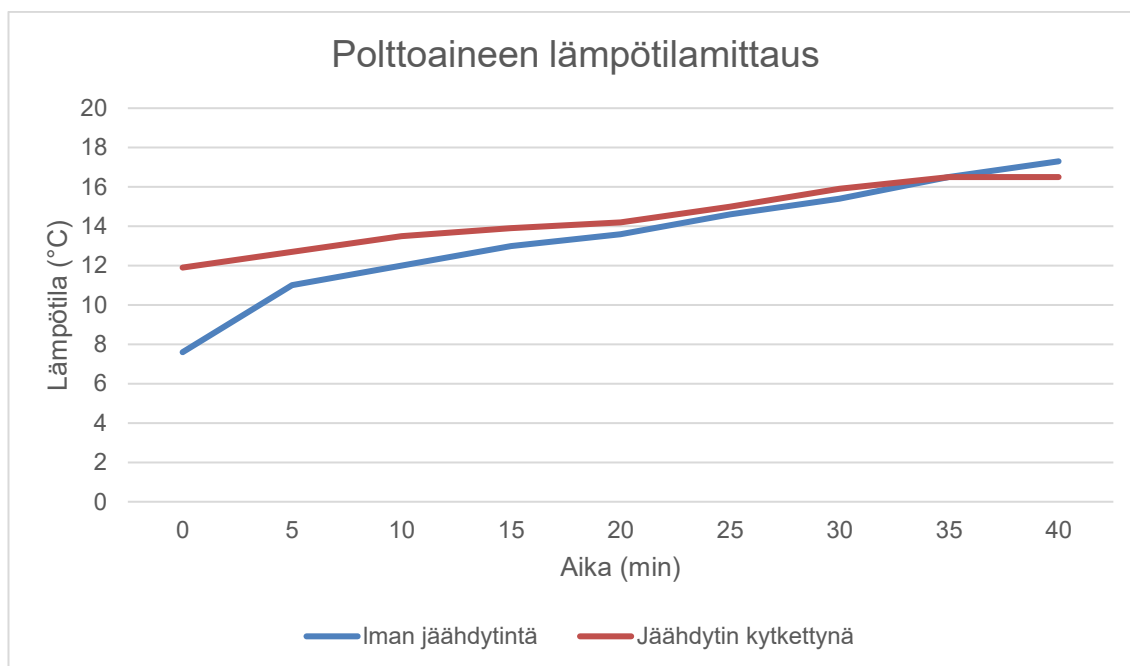
Mittaaminen tehtiin ajamalla liikenteessä ja lukemalla lämpötiloja ohjainlaitteesta viiden minuutin välein. Ensimmäisenä päivänä mittaus tehtiin ilman jäähdytintä ja seuraavana päivänä jäähdytin kytkettynä. Molempina mittauspäivinä autolla oli ajettu muutama tuntia ennen mittausta, joten polttoaine ei ollut mittauksen alussa täysin samassa lämpötilassa ulkoilman kanssa. Tankki oli kuitenkin molempien mittauksien alussa puolillaan, joten lämpötilan nousua suhteessa aikaan voidaan vertailla. Kun tuuletin kytkettiin päälle 16,5 °C:ssa, polttoaineen lämpötilan nousu käytännössä pysähtyi.

Taulukon 2 mittaustuloksista huomataan, että polttoaineella kestää kymmenen minuuttia pidempään nousta 12 °C:sta 16 °C:seen, kun jäähdytin on kytkettynä. Lämpötilan nousu olisi varmasti ollut vieläkin hitaampaa, jos jäähdyttimen läpi olisi mennyt viileää ulkoilmaa. Olisi myös ollut mahdollista, että lämpötila olisi alkanut laskea alkulämpötilasta. Tätä laskemista voisi perustella sillä, että pelkkä tuulettimen kierrättämä sisäilmakin pysäytti lämpenemisen kokonaan.

Moottoritehoon vaikuttavaa hyötyä ei kuitenkaan ole mahdollista arvioida taulukon 2 mittauksien perusteella, vaan se olisi järkevintä tehdä dynamometrissä, jolla mitataan moottoritehoa. Viileämmän polttoaineen laskiessa nakutusriskiä voitaisiin ahtopainetta mahdollisesti nostaa, mikä tuottaisi enemmän moottoritehoa.



Taulukko 2. Polttoaineen lämpötilan mittauksesta saadut arvot. Ulkolämpötila ilman jäähdytintä tehdyssä mittauksessa oli noin 3 °C ja jäähdyttimen kanssa tehdyssä noin 4 °C.



## 5 Loppupäätelmät

Työn lopputuloksena syntyi toimiva jäähdytysjärjestelmä, joka hidasti polttoaineen lämpenemistä. Huomattiin myös, että jäähdytinkennolle valittu tuuletin oli sopivan kokoinen, koska se pysäytti polttoaineen lämpenemisen.

Työn tekeminen oli haastavaa mutta mielenkiintoista. Vaikka pelkästään mallintamiseen ja tulostamiseen meni yhteensä yli sata työtuntia, niin eteni työ kuitenkin koko ajan ja lopputuloskin vaikutti toimivalta. Haastavinta oli mitoittaa 3D-mallit niin, että ne sopivat jäähdyttimeen ja että ne oli vielä mahdollista tulostaa. Mielenkiintoista oli tutkia, miten erilaiset asetukset vaikuttivat 3D-tulostimen tulostusaikaan ja tulostuslaatuun.

3D-tulostettujen kappaleiden kestävyyttä olisi voinut tutkia enemmän mitattavilla suureilla. Olisi ollut hyvä tehdä, vaikka vertailukappale pelistä taivuttelemalla ja hitsaamalla ja verrata sen kestävyyttä tulostettuihin kappaleisiin. Tulostetut kappaleet tuntuivat kässissä hyvin kestävilä eivätkä ne murtuneet, vaikka ne kiristivät toisiin teräksestä tehdyillä pulteilla ja muttereilla. Valmistusmenetelmänä 3D-tulostaminen on kuitenkin omassa

luokassaan, koskaan millään muulla valmistusmenetelmällä ei saada yhtä monimutkaisia yksittäisiä kappaleita tehtyä yhtä nopeasti.

Mikäli kokoonpanon haluaisi hioa huippuunsa, voisi muotoja optimoida virtaussimuloinnilla. Tosin siinä vaiheessa voidaan miettiä, olisiko autossa joitakin muita tärkeämpiä kohtia, joita voisi parantaa, koska käytetty aika suhteessa mahdolliseen hyötyyn olisi varmasti hyvin pientä.

Lämpötilamittauksen olisi voinut tehdä paremmin. Koska jos jäähdyttimen läpi olisi johdettu ulkoilmaa ja jos aloituslämpötilat ja ulkoilman lämpötila olisivat olleet samat molemmissa mittauksissa, niin mittaustulokset olisivat olleet myös paremmin vertailtavissa keskenään. Mittaustuloksista voidaan kuitenkin todeta, että jäähdytin selkeästi hidastaa polttoaineen lämpenemistä eli siitä on hyötyä. Tuloksista ei kuitenkaan voida päätellä, voiko moottoritehoa nostaa jäähdyttimen ansiosta, joten asian ratkaiseminen vaatii lisää tutkimuksia.

Alkutavoitteisiin oli kirjattu, että järjestelmä saisi painaa enintään kaksi kiloa, mutta kaikkien osin punnitseminen unohtui loppukiiireessä. Jäähdytin ja siinä kiinni olevat ilmanohjaimet painoivat yhteensä noin 1,6 kg ja kokonaispaino 3D-mallista arvioituna oli 2,2 kg. Vaikka tarkkaa painoa ei tiedetä, voidaan sanoa, että tavoite saavutettiin kohtuullisen hyvin.

Loppujen lopuksi tämän työn kaltaista polttoaineen jäähdytysjärjestelmää ei ole kannattavaa lähteä toteuttamaan kilpa-autoon kuin vasta viimeisimpien parannusten joukossa. Jos tämän saman ajan käyttäisi, vaikka alustan säätöjen tutkimiseen, olisi auto varmasti nopeampi radalla kuin sama auto pelkällä polttoaineen jäähdyttimellä.

## Lähteet

- 1 Rowswell, Glenn. 2018. Fast car fuel system guide. Verkkoaineisto. Fast car. <<https://www.fastcar.co.uk/tuning/fast-car-fuel-system-guide/>>. 8.5.2018. Luettu 6.3.2021.
- 2 Collings, Sam. Technology Explained: F1 fuel systems. Verkkoaineisto. Racecar engineering. <<https://www.racecar-engineering.com/articles/f1/technology-explained-f1-fuel-systems/>>. Luettu 6.3.2021.
- 3 Electric Fuel Pump. Verkkoaineisto. AAA1Car <[https://www.aa1car.com/library/fuel\\_pump.htm](https://www.aa1car.com/library/fuel_pump.htm)>. Luettu 6.3.2021.
- 4 Muir, Alex. How a fuel pump works. Verkkoaineisto. How a car works. <<https://www.howacarworks.com/basics/how-a-fuel-pump-works>>. Luettu 6.3.2021.
- 5 Facet Fuel Pump. Verkkokauppa. Rugged Roads. <<https://ruggedroads.co.uk/Facet-Fuel-Pump>>. Luettu 15.4.2021.
- 6 Robert Bosch GmbH Ed.2007. Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics; Systems and Components, Networking and Hybrid Drive. Plochingen, Germany: Springer Vieweg.
- 7 Fuel filter: The Ultimate Guide. Verkkoaineisto. MZW Motor. <<https://mzwmotor.com/fuel-filter-guide/>>. Luettu 8.4.2021.
- 8 Gustafson, Craig. 2021. What to Do When Your Engine Is Knocking. Verkkoaineisto. family handyman. <<https://www.familyhandyman.com/article/what-to-do-when-your-engine-is-knocking/>>. Päivitetty 16.3.2021. Luettu 18.4.2021.
- 9 Setrab Proline. Verkkoaineisto. Setrab. <<http://www.setrab.com/media/28769/Setrab-ProLine-STD-performance-graphs.pdf>>. Luettu 5.4.2021.
- 10 Lohilahti, Jarkko. 2018. Vertailussa FDM-, SLA- ja SLS- teknologiat. Verkkoaineisto. 3D-tulostus.fi. <<https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Vertailussa-FDM-SLA-ja-SLS-teknologiat>>. 10.8.2018. Luettu 18.4.2021.
- 11 Creality Ender 5 3D-tulostin. Verkkokauppa. 3D-Cadsolutions. <<https://www.ancadsolutions.fi/tuote/creality-ender-5-3d-tulostin/>>. Luettu 31.3.2021.
- 12 Filament properties table. Verkkoaineisto. Simplify3D. <<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>>. Luettu 31.3.2021.