



**Juhan Viik**

**JAHUTUSSÜSTEEMI  
PROJEKTEERIMINE FORMULA  
STUDENT VÕISTLUSAUTOLE  
FEST15**

LÕPUTÕÕ

Mehaanikateaduskond

Masinaehitus

Tallinn 2015

Mina, Juhan Viik, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Lõputöö autor

Juhan Viik .....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Üliõpilase kood 110820425

Õpperühm MI81

Lõputöö vastab sellele püstitatud kehtivatele nõuetele ja tingimustele.

Juhendajad

Tavo Kangru .....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Margus Villau (ettevõtte juhendaja) .....

Konsultandid

P.Sokolov .....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Kaitsemisele lubatud „.....“.....20....a.

Mehaanikateaduskonna dekaan Vello Vainola .....

Teaduskonna nimetus

Nimi ja allkiri

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1 JÕUÜLEKANDE KIRJELDUS .....	6
2 JAHUTUSSÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE .....	8
2.1 Jahutusskeemi valik.....	9
2.2 Soojuseralduse leidmine .....	10
2.3 Pumba maksimaalne lubatud võimsus.....	14
2.4 Toru torus jahutusvõimsuse leidmine.....	14
2.5 Radiaatori pindala arvutus .....	18
2.6 Soojusülekande intensiivistamine.....	18
2.7 Korpuse geomeetria analüüs.....	19
2.8 Voolavusanalüüs.....	19
2.9 Kontrolleri jahutus .....	21
3 KOMPONENTIDE VALIK.....	24
3.1 Radiaatorite valik.....	24
3.2 Pumba valik .....	25
3.3 Liitmike ja voolikute valik .....	26
4 VALMISTAMINE.....	28
4.1 Radiaatori valmistamine .....	28
4.2 Voolikute paigutamine .....	29
4.3 Veesärk .....	31
4.4 Süsteemi monitooring.....	32
MAJANDUSLIKUD ARVESTUSED.....	33
KOKKUVÕTE.....	34
SUMMARY .....	36
VIIDATUD ALLIKAD.....	37

## SISSEJUHATUS

Formula Student (FS) on rahvusvaheline tootearenduse võistlus tudengitele ja suurim haridusteemaline motosporti võistlus Euroopas. Projekti ülesandeks on arendada ettevõtlikke ja loovaid noori insenere pakkudes neile võimalust rakendada õpitud teadmisi projekteerides ja valmistades vormelauto. Maailmas on üle 600 meeskonna, kes on võtnud endale ülesandeks ehitada ühe- kohaline võidusõidu auto, et võtta mõõtu erinevate ülikoolide meeskondadega üle maailma. Võistlus sai alguse 1981. aastal USAst. Eestis ehitati esimene auto aastal 2008. Võistluse formaat jaguneb laialt kaheks, mis testimaks inseneride ja nende auto võimekust:

- staatilised alad- disaini kaitsmine, maksumus ja jätkusuutlikkus, äri ettekande hindamine
- dünaamilised alad- külgiirendus, 75 meetrilise distantsi kiirendus, sprint, kestvussõit ja auto ökonoomsus

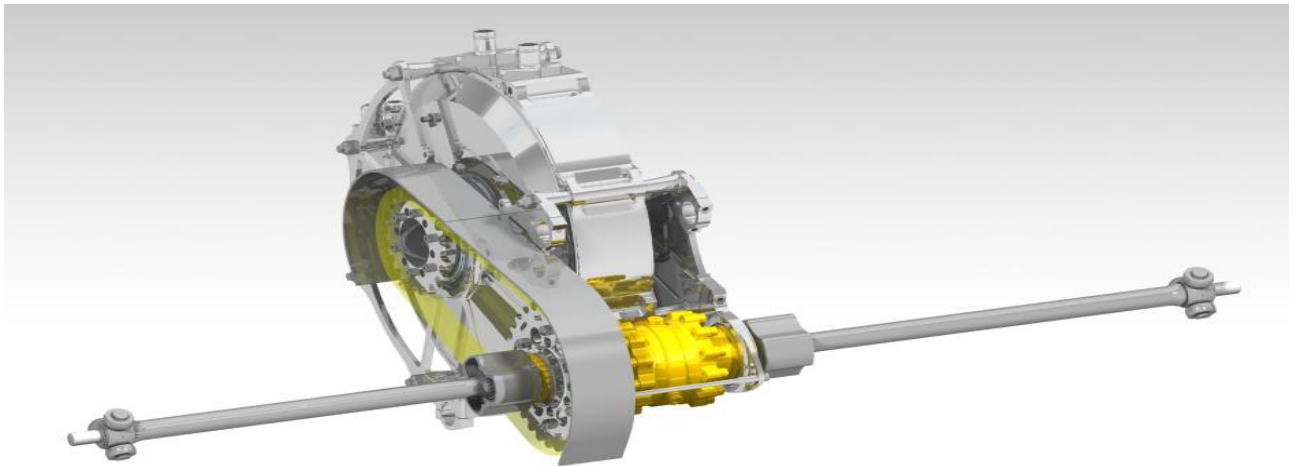
Käesoleval aastal ehitatakse järjekorras kaheksandat vormelit ja nende seas kolmandat elektrivormelit, FormulaESTonia15- FEST15. Kuna tegemist on tootearenduse võistlusega tuleb iga aasta liikuda edasi. Eelmine hüpe oli hooajal 2012/2013 kui hakati ehitama esimest elektrivormelit. FEST15 teeb sel aastal läbi kaks suurt uuendust. Esiteks, vahetatakse välja toruraam süsinik monokokkkere vastu. Teiseks, asendatakse Yasa-750 elektrimootor nelja eraldi seisva AMK [1] 35 kW elektrimootoriga, mis paigutaks vastavalt iga ratta rummu sisse.

Antud lõputöös projekteeritakse jahutussüsteem FEST15 mootoritele ja kontrolleriile. FS näol on tegemist tootearenduse võistlusega, kus suur osa mängib ka auto kiirus rajal. Selleks on projekteerimisel silmas peetud kahte põhilist parameetrit- süsteemi mass ja energia säästlikkus. Töö käigus valitakse jahutisvedeliku voolamisskeem, leitakse vajalik radiaatorite jahutuspindala, kavandatakse veesärk mootorile ja paigutatakse komponendid autole. Selleks leitakse mootorite poolt eraldatav soojus, mille andmete põhjal tehakse voolavusanlüüsid. Sellest omakorda leitakse mootoritest väljuva vedeliku temperatuur. Teades sisend- ja väljundtemperatuure arvutatakse vajalik radiaatorite jahutuspindala. Valmistamise peatükk annab ülevaate komponentide valikust ja

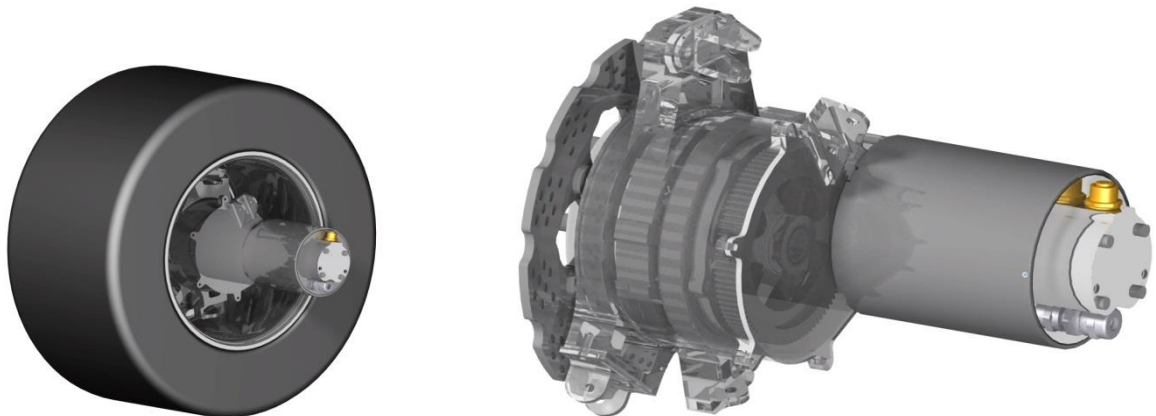
nende paigutamiseks autole. Andes ka ülevaate vajalike detailide valmistamise tehnoloogiast. Viimases peatükis eelarvestatakse auto vastavalt FS võistlusreeglitele.

# 1 JÕUÜLEKANDE KIRJELDUS

2015. aasta auto juures on võetud ette kaks väga suurt edasiarendust. Esiteks, toruraami asemel ehitatakse süsinik monokokkkere, mille eeliseks on suurem kere jäikus ja sealjuures väiksem mass. Kergemad kered FS sarjas on oma massilt kaalunud ligikaudu 15 kg, mis on 10-15kg kergem võrreldes toruraamiga. Teiseks, oluliseks muudatuseks on senise jõuülekanne asendamine nelja rummumootoriga, muutes auto neljarattaveoliseks. Selleks vahetatakse eelnev elektrimootor Yasa 750 [2] AMK [1] mootorite vastu, mis paiknevad vastavalt iga ratta rummus.



Joonis 1. FES14 Jõuülekanne



Joonis 2. FES15 Jõuülekanne

FEST14 puhul kasutatakse 100kW kolmefaasilist asünkroonmootorit (Joonis 3. Yasa 750), millest on vastavalt võistlusreeglitele lubatud maksimaalset kasutada 85kW. Jahutussüsteem on projekteeritud tootja poolt. Jahutuskanalid on mootorikorpuse sees, mis teeb jahutussüsteemi küllaltki lihtsaks. Süsteemis on üks pump tootlikkusega 14 l/min ja üks radiaator. Vedelik liigub järgnevalt:

Pump → Kontroller → Mootor → Radiaator → Pump

Mootor kinnitub toruraamile ja jahutamiseks kasutatakse spetsiaalset dielektrilist vedelikku OptiCool [3].



Joonis 3. Yasa 750 [2]

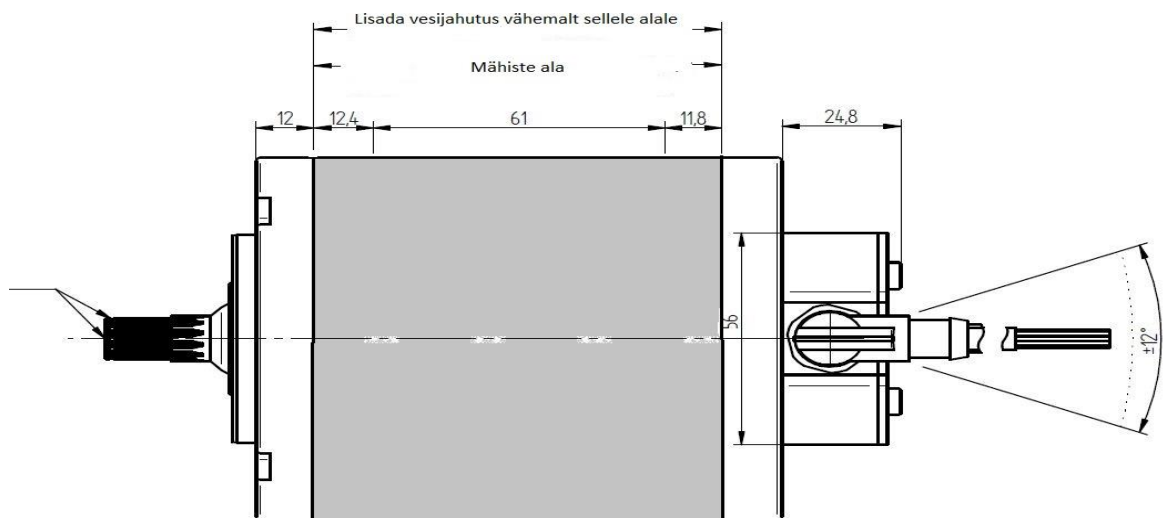
FEST15 jõuülekanne näol on tegemist nelja eri mootoriga, mis kinnituvad kere eri külgedes, vastavalt iga ratta rummus. Selline paigutus teeb nende jahutamise oluliselt keerukamaks võrreldes eelneva elektrivormeliga. Kasutada tuleb oluliselt pikemat voolamisskeemi, mille abil on võimalik kõikide mootorite võrdne jahutamine. Süsteemi suurimaks eeliseks on võimalus kasutada kõikide rataste võimsust üheaegselt, parandades oluliselt auto kiirendusvõimet. Vektorjuhtimine annab võimaluse juhtida eri rattaid eri kiirustega. Regeneratiivne pidurdamine, annab võimaluse kasutada pidurdamise energiat, vähendades seeläbi akupakkide kogust ja auto üldmassi.

## 2 JAHUTUSSÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE

AMK mootorite näol on tegemist mootori DD5 [1] edasiarendusega just Formula Student võistlusautodele, millel puudub jahutus. Mootor on võimeline arendama oluliselt suuremat pöörlemiskiirust, kuni 22 000 p/min. Tootja poolne informatsioon ütleb mootorite kohta järgnevat :

- vesijahutus projekteeritakse kliendi poolt;
- maksimaalne sisenev temperatuur ei tohi ületada 40°C;
- minimaalne vooluhulk 2l/min;
- maksimaalne jahutusvedeliku temperatuuri muutus < 10 °C;
- mootori korpuse välispinna temperatuur ei tohi ületada 60 °C.

Ette on antud ka mootori pindala mida peab jahutama:



Joonis 4. AMK DD5

Mootorikontroller KW26-S5-FSE-4Q koosneb neljast inverterist, mis on kinnitatud jahutusplaadile. Kontrolleri kaitseklassiks on IP00, mis tähendab et kontrolleril puudub igasugune kaitse väliskeskonna eest. Tootja poolt on nõutud kontrolleri vesijahutus ja ette antud töötemperatuuri piirid :

- nõutud on vesijahutus;
- kontrollerid on paigutatud alumiinium jahutusplaadi peale, mille pinna temperatuur ei tohi ületada 40°C;
- vooluhulk vähemalt 10 l/min;
- vesijahutusega mootorid on mõeldud kasutamiseks suletud jahutusringis koos pumbaga;
- kasutada võib ainult deioniseeritud vett.

Antud väärtused on tootja poolt mõeldud järgimiseks stabiilsetes tööstuslikes tingimustes. FS võistlustel on tegemist ka võidusõidu elementidega, seetõttu välisõhutemperatuuri tõustes ei pruugi olla võimalik tagada antud tingimusi. Tagajärjeks võib olla temperatuuri suhtes tundlike elektroonika komponentide optimaalse eluea vähenemisega.

Tabel 1

Kontrolleri KW26-S5-FSE-4Q tehnilised andmed

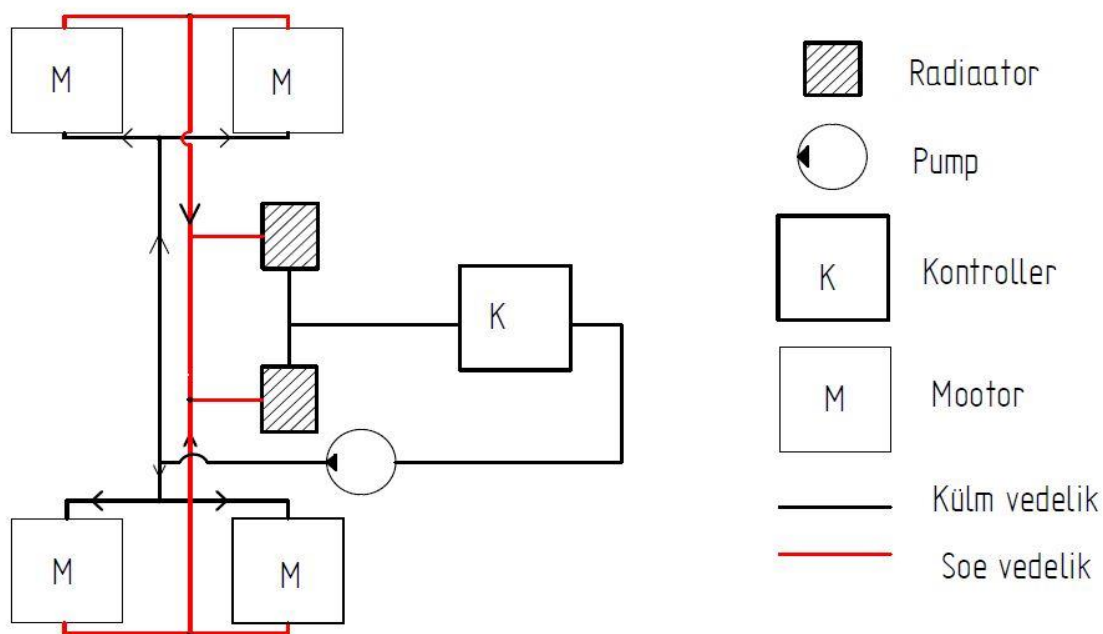
<b>Gabariit mõõtmed :</b>	241x399x183mm
<b>Kaitseklass:</b>	IP00
<b>Mass:</b>	11 kg
<b>Jahutus:</b>	Vesijahutus
<b>Vooluhulk:</b>	≤10 l/min
<b>Efektiivsus:</b>	98%
<b>Kaitse- ja jälgimis funktsioonid:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lühis/ maanduse vea kaitse</li> <li>• Temperatuuri andurid : 2.2 Mootoris 3.2 Kontrolleris</li> </ul>

## 2.1 Jahutusskeemi valik

Tegemist on nelja eraldiseisva mootoriga, mis teeb voolikute vedamise ja paigutamise autole keerukaks. Lühem ja lihtsaim viis oleks vedada voolikud ühe ringina ümber auto, mis aga

tähendaks juba soojenenud vedeliku läbimist igast järgnevast mootorist, tekitades mootorite ebahühtlase jahutuse. Teise variandina on kaalutud kahe pumba kasutamist, luues kaks eraldiseisvat jahutusringi kummalegi auto küljele. Selline süsteem lihtsustaks voolikute vedamist, kuid tekitaks topelt energiakulu. FEST15-1 puudub eraldi madalpinge aku. Vajalik energia saadakse kõrgepinge akupakkidest, mis nõuab energia säästliku kasutamist. Kolmanda variandina on kaalutud pikka skeemi, kus autol juhitakse vool laiali kolmikühenduste abil (Joonis 5. Vooluskeem). Voolamine toimub järgnevalt- pumbast jaguneb liin kaheks, millest suunatakse jahutusvedelik kummalegi auto küljele. Auto külgedel jaguneb vool kaheks, kust vedelik liigub esimestesse- ja ka tagumistesse mootoritesse. Eest ja tagant on vool suunatud auto keskel olevatesse radiaatoritesse. Viimases osas juhitakse vedelik kolmikühenduse abil kontrollerrisse ning sealt pumba.

Pump → Mootor → Radiaator → Kontroller → Pump



Joonis 5. Vooluskeem

## 2.2 Soojuseralduse leidmine

Eralduv soojuskogus on leitud kasutades kahte erinevat meetodit ja tulemusi võrreldes. Esimese variandina on analüüsitud auto liikumist rajal, millest on leitud mootorite keskmine efektiivsus. Teiseks on kasutatud tootja poolset meetodikat, mis seovad pöörlemiskiiruse, kasuteguri ja väändemomendi, et leida eralduv soojuskogus ja vajalik pumba tootlikkus.

Vastavalt võistluse reeglile D8.7.1 [4] on pikima sõidu ehk kestvussõidu ligikaudseks pikkuseks 22 km. Kasutades eelmise aasta võistlustelt kogutuid andmeid Ungarist ja Austriast leitakse keskmine mootorite efektiivsus. Soojuskoguse leidmiseks vaadatakse aegasid, mis kulub kestvussõidu läbimiseks. Ühe ringi läbimiseks, olenevalt raja profiilist, kulub 40-60s. Kogu sõidu kestvuseks kulub ligikaudu 0,36 tundi. Kasutades tarkvara Optimum Lap (OL) ja eelneva aasta võistluste andmeid on leitud mootorite keskmine efektiivsus. Selleks on paigutatud rajale üle 6000 punkti, mille abil simuleeritakse auto käitumist rajal ja selleks kuluvat energiakulu. OL tarkvara põhjal on mootorite kasutegur 76,4% ja kogu energiakulu 9.88kWh. Nende andmete põhjal saab leida soojuseks eralduva energia (1), [5, p. 40]:

$$P_1 = P_2 * \eta , \quad (1)$$

kus  $P_1$ -kasulik energia kogus, kWh;  
 $P_2$ -sisendenergia, kWh;  
 $\eta$  –kasutegur.

$$P_1 = 9,88 * 0,764 = 7.55 \text{ kWh}$$

Soojuseks kulub järelkult 2.3kWh energiat. Teades kestvussõidu pikkust ja kulutatava energia kogust, saab leida keskmise soojuseralduse mootorikorpusele. Jagades energiakulu ajaga leian eralduva soojuse (2) [5, p. 40].

$$P = \frac{W}{t}, \quad (2)$$

kus  $W$ -elektriline töö, kWh;  
 $P$ - elektriline võimsus, W;  
 $t$ -aeg, h.

$$P = \frac{2,3}{0,366} = 6300 \text{ W}$$

Eeldades, et kõik mootorid soojenevad ühtlaselt on ühe mootori keskmiseks soojuseralduseks 1590 W.

Võrdleva variandina kasutatakse AMK poolt antud andmeid. Tootja manuaal annab valemid, mille abil saab leida soojuskao ja vajaliku pumba tootlikkuse.

$$P_1 = M * n * \left[ \frac{1}{\eta} - 1 \right],$$

kus  $P_v$ - soojuskadu, W;  
M-moment, Nm;  
 $\eta$  –kasutegur.

$$Q = \frac{P_v * 60}{\Delta T * C},$$

kus  $P_v$ - soojuskadu, W;  
 $\Delta T$ -temperatuuride vahe, °C;  
C –erisoojus, J/kg\*K.

Vastavalt efektiivsusele leian suurimad soojuskao ja reaalsed kasutatavad võimsused. Reaalsed kasutatavad võimsused on saadud OL analüüsi andmetel.

Tabel 2

## Mootori efektiivsuse tabel

DD5-14-10-xxW-19000

**AMK**

Current [Arms]	Torque [Nm]	speed [rpm]									
		500	1000	2000	3000	4000	6000	10000	12000	15000	19000
5	1,3	64,37	71,33	73,64	74,70	75,43	76,57	77,00	77,08	77,56	78,14
10	2,7	58,42	70,48	77,57	80,40	82,01	83,92	85,16	85,44	85,97	86,50
20	5,4	44,94	60,81	73,35	78,82	81,94	85,43	88,20	88,88	89,71	90,44
30	7,9	35,59	51,90	67,02	74,26	78,54	83,42	87,58	88,65	89,84	90,86
40	10,4	29,14	44,78	61,01	69,41	74,57	80,62	85,93	87,34	88,86	90,16
50	12,5	24,17	38,71	55,22	64,39	70,24	77,30	83,73	85,48	87,37	88,98
60	14,4	20,41	33,76	50,04	59,65	65,99	73,88	81,33	83,42	85,66	87,59
70	16,0	17,31	29,40	45,10	54,87	61,55	70,10	78,56	80,97	83,56	85,81
80	17,4	14,82	25,75	40,67	50,41	57,28	66,34	75,70	78,40	81,34	83,91
90	18,5	12,81	22,67	36,72	46,30	53,25	62,67	72,77	75,75	79,02	81,91
100	19,6	11,17	20,05	33,21	42,51	49,44	59,09	69,82	73,06	76,63	79,83

Field weakening 600VDC		speed [rpm]									
Current [Arms]	Torque [Nm]	500	1000	2000	3000	4000	6000	10000	12000	15000	19000
5	1,3	64,37	71,33	73,64	74,70	75,43	76,57	77,00	77,08	77,56	78,14
10	2,7	58,42	70,48	77,57	80,40	82,01	83,92	85,16	85,44	85,97	86,50
20	5,4	44,94	60,81	73,35	78,82	81,94	85,43	88,20	88,88	89,71	90,44
30	7,9	35,59	51,90	67,02	74,26	78,54	83,42	87,58	88,65	89,84	90,86
40	10,4	29,14	44,78	61,01	69,41	74,57	80,62	85,93	87,34	88,86	90,16
50	12,5	24,17	38,71	55,22	64,39	70,24	77,30	83,73	85,48	87,37	88,98
60	14,4	20,41	33,76	50,04	59,65	65,99	73,88	81,33	83,42	85,66	87,59
70	16,0	17,31	29,40	45,10	54,87	61,55	70,10	78,56	80,97	83,56	85,81
80	17,4	14,82	25,75	40,67	50,41	57,28	66,34	75,70	78,40	81,34	82,71
90	18,5	12,81	22,67	36,72	46,30	53,25	62,67	72,77	75,75	79,02	76,96
100	19,6	11,17	20,05	33,21	42,51	49,44	59,09	69,82	73,06	67,66	69,28

Tabel 3

## Soojuseraldus ja pumba tootlikus

Pv,W	Q,l/min	M,Nm	n,1/min	$\eta$	$\Delta T,K$	C,J/kg*K
<b>38</b>	<b>0,1</b>	<b>1,3</b>	<b>500</b>	<b>0,64</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>121</b>	<b>0,3</b>	<b>2,70</b>	<b>1000</b>	<b>0,70</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>418</b>	<b>1,2</b>	<b>5,4</b>	<b>2000</b>	<b>0,73</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>872</b>	<b>2,5</b>	<b>7,9</b>	<b>3000</b>	<b>0,74</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>1530</b>	<b>4,4</b>	<b>10,4</b>	<b>4000</b>	<b>0,74</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>3364</b>	<b>9,7</b>	<b>12,5</b>	<b>6000</b>	<b>0,70</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>5296</b>	<b>15,2</b>	<b>14,4</b>	<b>10000</b>	<b>0,74</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>5668</b>	<b>16,3</b>	<b>16</b>	<b>12000</b>	<b>0,78</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>6408</b>	<b>18,4</b>	<b>17,4</b>	<b>15000</b>	<b>0,81</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>8630</b>	<b>24,8</b>	<b>18,5</b>	<b>19000</b>	<b>0,81</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>10361</b>	<b>29,7</b>	<b>19,6</b>	<b>19000</b>	<b>0,79</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>10904</b>	<b>31,3</b>	<b>19,6</b>	<b>19000</b>	<b>0,78</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>3237</b>	<b>9,3</b>	<b>10</b>	<b>19000</b>	<b>0,86</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>3998</b>	<b>11,5</b>	<b>17,4</b>	<b>10000</b>	<b>0,82</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
Reaalne sõidupiirkond						
<b>4553</b>	<b>13,1</b>	<b>19,6</b>	<b>6000</b>	<b>0,73</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>3998</b>	<b>11,5</b>	<b>17,4</b>	<b>10000</b>	<b>0,82</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>3214</b>	<b>9,2</b>	<b>14,5</b>	<b>12000</b>	<b>0,85</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>
<b>3195</b>	<b>9,2</b>	<b>12,5</b>	<b>15000</b>	<b>0,86</b>	<b>5</b>	<b>4181</b>

Saadud andmetest näha, et suurte pöörete ja momentide juures võivad tekkida väga suured soojuseraldused (Tabel 2). Reaalse sõidu puhul on need vaid hetkelised olukorrad, mis esinevad auto kiirendamisel paigalseisult. Suurem osa sõidust toimub keskmiste pöörete ja momentide vahemikus. Analüüside ja tootja poolsete andmete põhjal on leitud reaalsed soojuskogused, mille abil projekteeritakse veesärk, valitakse pumba tootlikkus ja radiaatorite suurus.

### 2.3 Pumba maksimaalne lubatud võimsus

Pumba valikul peetakse silmas maksimaalset energia kogust, mida on võimalik kasutada. Jahutussüsteemile on eraldatud 3A, 24V-es madalpinge süsteemis, mille järgi arvutatakse pumba maksimaalne võimsus (3) [5, p. 56] :

$$P = E * I, \quad (3)$$

kus P-elektriline võimsus, W ;  
E-pinge, V ;  
I-voolutugevus, A.

$$P = 24 * 3 = 72 \text{ W}$$

Juhindudes saadud tulemusest on 72W piisav võimsus millega on võimalik tagada vajalikud vooluhulgad, mis maksimaalselt võivad jääda suurusjärku 30 l/min.

### 2.4 Toru torus jahutusvõimsuse leidmine

Mootoritele projekteeritakse vesijahutus, mis peab tagama vajaliku jahutusvõimsuse kestvussõidu ulatuses, milleks on 22km. Mootoritena kasutatakse nelja AMK mootorit DD5-14-POW-19000 (Joonis 4), mis on modifitseeritud spetsiaalselt seeriast DD5 FS võistluste jaoks. Pakkudes oluliselt suuremat pöörlemissagedust, väiksemaid gabariitmõõtmeid ja massi. Kasutades peatükk 2.1 leitud andmeid arvutan vajalikud parameetrid keskmise eralduva soojus ärakandmiseks. Selleks leitakse:

- pinnaühikule eralduv soojuskogus;
- massivooluhulk;
- voolurežiim;
- Nusselti arv;
- soojuslähikandetegur;
- jahutusvõimsus.

Konvektsioon sõltub suuresti vedeliku omadustest, mis teeb arvutusmodelid väga keerukaks ja ajamahukaks. On suur hulk parameetreid, millega peab arvestama täpsete tulemuste saavutamiseks.

Neist levinumad:

- viskoossus;
- soojusjuhtivus;
- tihedus;
- erisoojus;
- voolukiirus.

Voolavusanalüüside tegemiseks on vajalik leida järgnevad parameetrid:

- soojuseraldus pinnahüki kohta,  $W/m^2$ ;
- massi vooluhulk, l/min;
- vedeliku sisendtemperatuur,  $C^\circ$ .

Soojuseraldus pinnahüki kohta näitab kui palju soojust eraldub mootorikorpusele, võttes arvesse korpuse pindala ja eralduva soojuste kogust. Massi vooluhulk näitab kui suur kogus vedelikku peab levima üle pinna, et oleks tagatud vajalik jahutus. Kolmas parameeter näitab algtingimust, mis temperatuuril vedelik siseneb mootoritesse. Leian soojusvoo mootorikorpusele (4) [6, p. 427]:

$$q_s = \frac{Q}{A_s}, \quad (4)$$

kus  $q_s$ -soojusvoog, W;

$A_s$ - jahutus pindala,  $m^2$ .

$$q_s = \frac{4500}{0,026} = 173\,076 \text{ W/m}^2$$

Leian mootori korpuse pindala (5) [5, p. 27]:

$$A_s = \pi * D * L, \quad (5)$$

kus  $D$ -korpuse läbimõõt, m;

$L$ - jahutuspinna pikkus, m.

$$A_s = \pi * 0,096 * 0,086 = 0,026 \text{ m}^2$$

Soojusvoog pinnaühiku kohta tuleb küllaltki suur tulenevalt mootori väikestest gabariit mõõtmetest. Järgnevalt tuleb leida vajalikud vooluhulgad, mis võimaldavad ära kanda antud soojuskoguse. Arvutustel kasutan algset vooluhulka 20 l/min.(6) [6, p. 626]

$$V_m = \frac{m}{\rho A_c} = \frac{m}{\rho \left(\frac{1}{4} \pi * D^2\right)}, \quad (6)$$

kus  $m$ - massivoolu hulk, kg/s;  
 $\rho$  -vee tihedus, kg/m<sup>3</sup>;  
 $A_c$  - korpuse jahutuspinna pindala, m<sup>2</sup>;  
 $D$  - veesärgi hüdrauliline läbimõõt, m.

$$A_c = \frac{\pi * 0,1^2}{4} = 0,007 \text{ m}^2$$

$$V_m = \frac{0,33}{994 * 0,007} = 0,05 \text{ m/s}$$

Leian voolamisrežiimi mootori välispinnal (6) [6, p. 422]:

$$Re = \frac{V_m * D_h}{\nu}, \quad (6)$$

kus  $V_m$ - voolamise kiirus, m/s;  
 $D$ - korpuse hüdrauliline diameeter, m;  
 $\nu$ -vee kinemaatiline viskoossus,  $0,659 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [7].

$$Re = \frac{0,05 * 0,102}{0,659 * 10^{-6}} = 9105$$

Voolamine on turbulentne,  $Re > 2300$ . Reynoldsi arvu kaudu leian Nusselti arvu. Tegu on dimensioonita väärtusega, mis näitab soojus levimise kiirust läbi vedeliku eri kihtide (7) [6, p. 436]:

$$Nu = 0,017Re^{0,8}Pr^{0,3}, \quad (7)$$

kus Re- Reynoldsi arv;  
Pr- Prandtl'i arv;

$$Nu = 0,017 * 41781^{0,8}4,36^{0,3} = 131,5$$

Nusselti arvu abil leian soojusl\u00e4bikande teguri korpuse pinnale (8) [6, p. 436]:

$$h = \frac{Nu * k}{D}, \quad (8)$$

kus, Nu-Nusselti arv  
k-soojusjuhtivus tegur, W/m\*K  
D-mootori l\u00e4bim\u00f5dt.

$$h = \frac{131,5 * 0,6}{0,096} = 821 \text{ W/m}^2$$

Leian soojus \u00e4rakandmise v\u00f5imsuse(9) [8, p. 768]:

$$Q = kF(\Delta T), \quad (9)$$

kus h-soojusk\u00e4bikande tegur, W/m<sup>2</sup>\*K;  
t<sub>s</sub>- Siseneva vedeliku temperatuur, \u00b0C;  
t<sub>v</sub>- V\u00e4ljuva vedeliku temperatuur, \u00b0C;  
F-jahutuspindala, m<sup>2</sup>.

$$Q = 821 * 45 * 0,026 = 961 \text{ W}$$

Tingitud mootori suurest v\u00f5imsusest ja v\u00e4ikestest gabariitidest on keerukas \u00e4ra kanda kogu soojust mootori pinnalt ilma suure energia lisakuluta.. Klassikaline toru torus soojusvaheti kasutamine ei ole v\u00f5imalik mootorite liigse soojenemise t\u00f5ttu. Selleks projekteeritakse mootorile spetsiaalse geomeetriaga vees\u00e4rk, mille abil saab intensiivistada soojus\u00f5lekannet.

## 2.5 Radiaatori pindala arvutus

Kasutades keskmise logaritmilise temperatuurivahe valemit, saame leida vajaliku jahutuspindala(10) [6, p. 681]:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{lm}}, \quad (10)$$

kus  $A$ -radiaatori jahutuspindala,  $m^2$ ;  
 $U$ - soojuslähikandetegur,  $W/m^2$ ;  
 $\Delta T_{lm}$ - temperatuuride logaritmiline vahe,  $^{\circ}C$ .

$$A = \frac{1590}{50 * 46} = 0,69 \approx 0,7 \text{ m}^2$$

Nelja mootori jahutamiseks on vajalik jahutuspindala  $2,8 \text{ m}^2$ . Leian temperatuuride logaritmilise vahe(11) [6, p. 681]:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)}, \quad (11)$$

kus  $\Delta T_1$ -külma vedeliku temperatuur,  $^{\circ}C$ ;  
 $\Delta T_2$ -sooja vedeliku temperatuur,  $^{\circ}C$ .

$$\Delta T_{lm} = \frac{35 - 60}{\ln \frac{35}{60}} = 46^{\circ}C$$

Mootorist väljuv temperatuur on leitud kasutades Autodesk CFD tarkvara (CFD) peatükis 2.5. Radiaatori pindala on arvatud suuremate väärtustega kui on minimaalsed radiaatorisse suunduvad temperatuurid. Põhjuseks on radiaatori pindala minimaliseerimine. Mida väiksem on temperatuuride vahe, seda suurem peab olema jahutuspindala.

## 2.6 Soojusülekanne intensiivistamine

Üldiselt on konvektsiooni soojusülekande teguri parendamine võimalik keskkonna voolamiskiirust tõstes ja toru läbimõõtu vähendades. Kiiruse ja toru läbimõõdu kärpimine tõstab voolamise hüdrodünaamilist takistust, millega kaasneb lisaenergiakulu [8, p. 771]. Vajaliku soojusülekanne saavutamiseks on loodud erinevaid veesärgi (VS) geomeetriaid. Tehes voolavusanalüüsi leian

sobivama korpuse sisend- ja väljund ava asendid ja läbimõõdud. Eesmärgiga saada hea tasakaal temperatuuri ja pumba võimsuse vahel. Kasutades leitud soojuseralduse kogust  $175000 \text{ W/m}^2$  ja vooluhulka  $20 \text{ l/min}$  viin läbi simulatsioonid kasutades samasid parameetreid erinevate korpuste geomeetria juures.

Mootoritelt soojuse ära kandmiseks projekteeritakse veesärk, mida mööda juhitakse jahutusvedelikku. Mootori korpuse näol on tegemist  $3\text{mm}$  paksuse ja  $110\text{mm}$  pikkuse alumiiniumist silindrilise toruga.

## 2.7 Korpuse geomeetria analüüs

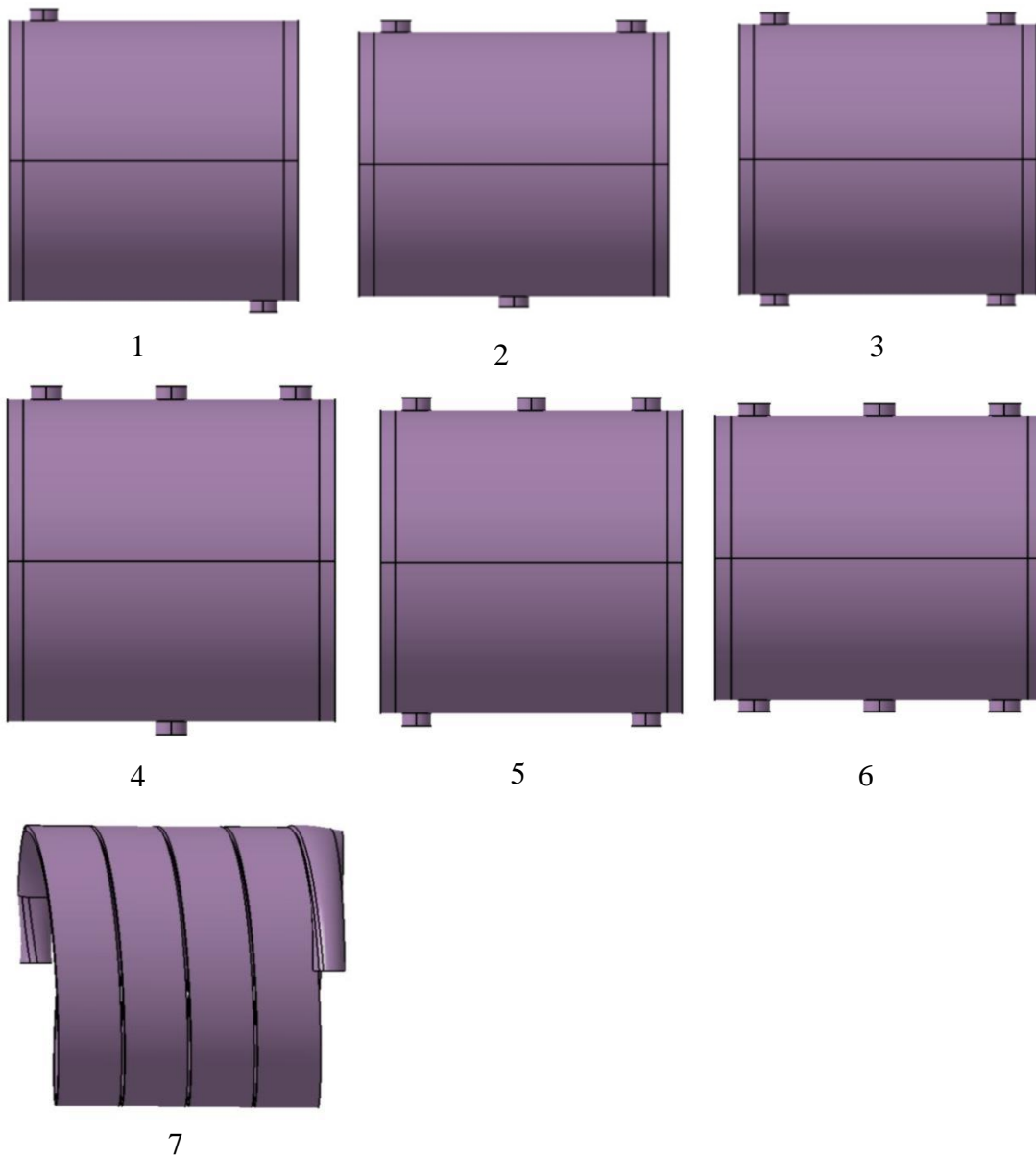
VS projekteerimisel on silmas peetud sisend- ja väljund avade asukohti ja veekihi paksust, mis tagaks vajaliku jahutuse. Analüüside teostamisel kasutatakse järgnevaid parameetreid:

- sisend voolukiirus,  $\text{m/s}$ ;
- sisend temperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- soojusvoog pinnale  $\text{W/m}^2$ ;
- rõhk, Pa.

## 2.8 Voolavusanalüüs

Kasutades CFD tarkvara analüüsitakse erinevaid lihtsustatud konstruktsioone, et leida parim avade asend. Selleks on veesärgile paigutatud sisend- ja väljund avad erinevatesse asukohtadesse, et leida parim jahutusvõimsus. Järgnevatelt joonistel on näidatud sisendite(s) ja väljundite(v) asendid (Joonis 6. Veesärgi konstruktsioonid). Ülemistest avadest suunatakse vesi sisse ja alumistest välja. Sobivamast variandist tehakse edasiarendus ja projekteeritakse lõplik veesärk mootorile.

1. avad diagonaalis veesärgi eri otstes (1s1v)
2. kaks sisendit üks väljund (2s1v)
3. kaks sisendit kaks väljundit (2s2v)
4. kolm sisendava üks väljundava (3s1v)
5. kolm sisend/kaks väljund ava (3s2v)
6. kolm sisend/kolm väljund ava (3s3v)
7. voolamine rõngaskanalis (RK)



Joonis 6. Veesärgi konstruktsioonid

Tabel 4

Voolavusanalüüside tulemused

Geomeetria	Sisendite/Väljundite arv	Sisend/Väljundid läbimõõt, [mm]	Väljund temperatuur, [C°]	Soojusülekanne, [W°]	Voolukiirus, [l/min]
Silinder	1/1	10	60,4	5146	20
Silinder	2/1	10	59,2	5059	20

Geomeetria	Sisendite/Väljundite arv	Sisend/Väljund d läbimõõt, [mm]	Väljund temperatuur, [C°]	Soojusülekanne, [W°]	Voolukiirus, [l/min]
Silinder	2/2	10	55	5300	20
Silinder	3/1	10	48,8	5209	20
Silinder	3/2	10	51,2	5327	20
Silinder	3/3	10	46	4836	20
Spiraal	1/1 RK	10	42	3198	20

Analüüsides on näha, et parim tulemus saadakse vee voolamisega rõngaskanalis. 20 l/min läbi viidud simulatsioonid näitavad, et on võimalik kasutada oluliselt väiksemaid sisend- ja väljund avasid ja väiksema tootlikkusega pumpa kui peatükis 2.3 leitud andmed näitavad. Selle läbi on võimalik säästa kasutatavat energiat ja vähendada auto massi. Järgnevalt analüüsitakse kanalit väiksemate vooluhulkade ja väiksemate sisend- ja väljund toru läbimõõtude juures.

Tabel 5

#### Vooluhulkade ja geomeetria optimeerimine

Geomeetria	Vooluhulk, [l/min]	Sisend/Väljund ava ø, [mm]	Väljund temperatuur, [C°]
RK 1/1	15	8s8v	42
RK 1/1	10	8s8v	38
RK 1/1	5	8s8v	58

Tulemused (Tabel 5) näitavad, et optimaalne pumba tootlikkus võiks jääda 10-15 l/min vahemikku. Vähendades vooluhulka juba 5 l/min toimub väljuva temperatuuri suur tõus, lähenedes maksimaalsele lubatud temperatuurile 60C° .

## 2.9 Kontrolleri jahutus

Mootori kontrolleri koosneb neljast inverterist, mis on kinnitatud keskele jahutusplaadile. Plaat on tehtud AlMgSi0.5, EN1706 alumiinium sulamist koos integreeritud jahutuskanalitega, mille abil toimub soojusülekanne. Soojus juhitakse ära vee abil, mis läbib jahutuskanaleid. Tootja poolt on täpsed nõudmised jahutusvedelikule, milleks peab olema deioniseeritud vesi.

Tabel 6

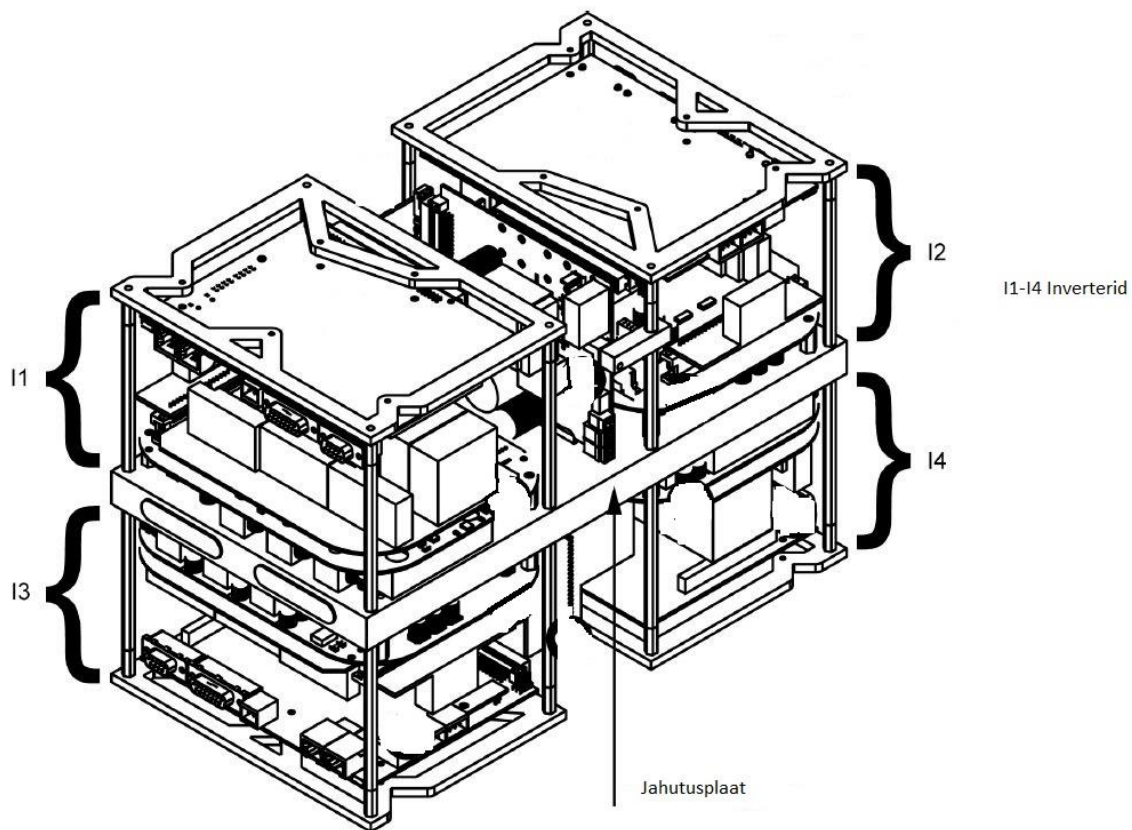
## Nõutav vee koostis

<b>Koostisosa</b>	<b>Kogus</b>
Kloriidiioon	<40 ppm
Sulfiididioon	<50 ppm
Nitraatioon	<50 ppm
pH tase	6-12
Elektrijuhtivus	<500 $\mu$ S/cm
Vee karedus	<170 ppm

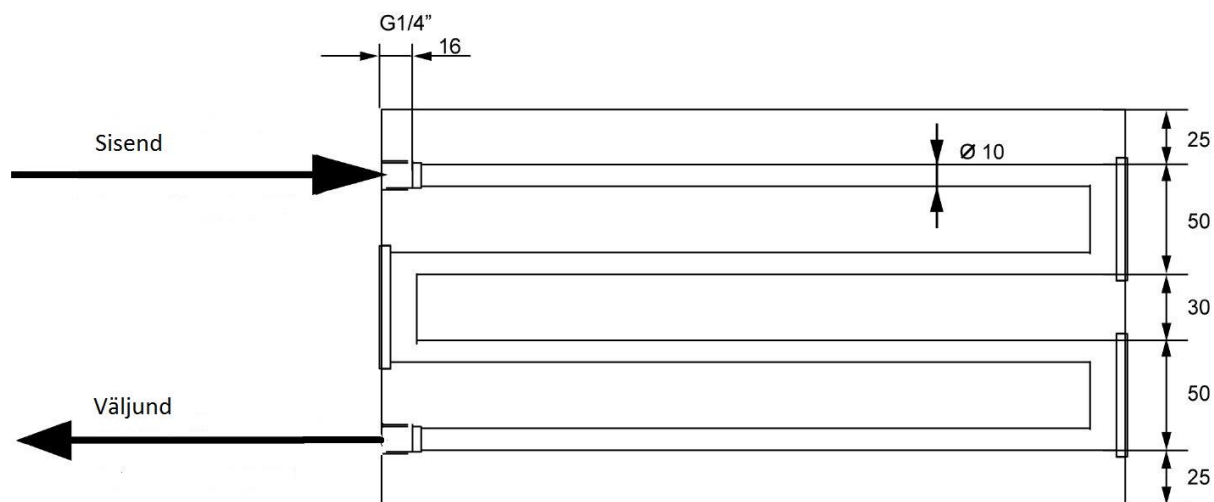
Tabel 7

## Kontrolleri tehniline info

<b>Maksimaalne eraldatav võimsus</b>	2000 W
<b>Töö temperatuuri vahemik</b>	+5C kuni+40C
<b>Plaadi materjal</b>	AlMgSi0.5
<b>Mõõtmed</b>	339*208*180 mm
<b>Ühendused</b>	G 1/4 sisekeere



Joonis 7. Mootori kontrolleri



Joonis 8. Jahutusplaat

Kontrollerid on jahutusskeemis (Joonis 1) paigutatud peale radiaatoreid. Põhjuseks, et mootoritest tekitatud soojus ei läbiiks kontrolleri, seeläbi kahjustades elektroonika komponente. Kontrollerist läbinud vedelik suundub pumba, kus on jahutusringi algus.

### **3 KOMPONENTIDE VALIK**

Komponentide valikul tuleb silmas pidada kahte põhilist parameetrit :

- mass;
- töökindlus.

Vajalik on leida võimalikult hea seos nende kahe parameetri vahel, sealjuures tagades vajaliku jahutuse. Sealjuures lihtsusta süsteemi haldamist ja -hooldamist, hoides auto üldmassi võimalikult väikese.

#### **3.1 Radiaatorite valik**

Soojusvaheti valikul on esimeseks kriteeriumiks jahutusvõimsus, mis tagab mootorite efektiivese töötamise. Kõige parema soojusülekanne ja massi suhte saab kasutada alumiinium kõrge jahutuspinna. Simulatsioonidest saadud tulemuste abil on leitud vajalik jahutuspinna  $0.7 \text{ m}^2$  mootori kohta ehk radiaatorite kogu jahutuspinna peab olema  $2,8 \text{ m}^2$ . Jahutuspinna leidmiseks kehtib üldine seos pinna ja ruumala vahel  $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  [6, p. 668].

### 3.2 Pumba valik

Analüüsidesaadud andmete põhjal otsiti pumba tootlikkusega 10-15 l/min. Pumba valikul otsitakse väiksema massi ja võimsusega pumba, mis tagaks vajaliku tootlikkuse suurusjärgu. Valitud sai pump W920904 [9]:

Tabel 8

Tsirkulatsiooni pumba W920904 tehnilised andmed

<b>Pinge, [V]</b>	24
<b>Võimsus, [W]</b>	14
<b>Vooluühedus, [mm]</b>	Ø20
<b>Tootlikus, [l/min]</b>	15
<b>Mõõtmed, [mm]</b>	177X68x85
<b>Mass, [kg]</b>	0,53

Tagatud on vajalik tootlikkus ja pump on sealjuures küllaltki säästlik ja kerge. Valitud on veidi suurema tootlikkusega pump, et tagada vajalik jahutusvõimsus ka suurema potentsiaalse soojuseralduse korral. Testperioodi käigus kogutud andmete põhjal otsustatakse kas on võimalik kasutada väiksema tootlikkusega pumba.

### 3.3 Liitmike ja voolikute valik

Voolikute, kolmikute ja liitmike paremaks valikuks kasutan peatükis 2.1 leitud vooluskeemi (Joonis 5). Pumbast jaguneb liin kaheks, millest suunatakse jahutusvedelik kummalegi auto küljele kolmik ühenduse abil. Auto külgedelt jaguneb liin kaheks, kust vedelik liigub esimestesse- ja tagumistesse mootoritesse. Eest ja tagant on suunatud vool radiaatoritesse. Radiaatoritest liigub liin auto keskele, kus läbi kolmiku suundub vedelik kontrollerrisse ja sealt tagasi pumpa.

Pump → Mootor → Radiaator → Kontroller → Pump

Voolikutena kasutatakse polütetrafluoroetüleen(PTFE) voolikuid, mis on sobilikud erinevate kemikaalide, sealhulgas hapete, aluste, lahustite, aromaatsete ühendite ja muu käitlemiseks. Samuti kleepuvate, tihkete ja madalatel temperatuuridel viskoosseks muutuvate ainete käitlemiseks. Voolikutel on väga lai töötemperatuur, vahemikuga -250...250 °C. Massilt kerged 0,061 kg/m ja sobilikud kasutamiseks rõhu juures kuni 6bar. Koostamisel aitab kaasa voolikute hea tugevus ja paindumus. Madal hõõrdetegur, mittekleepuv sise- ja välispind hõlbustavad puhastamist.

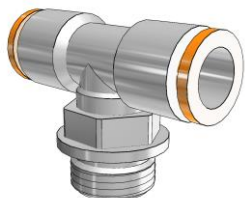
Liitmikena kasutatakse „push-in“ (PI) R-seeria tehnopolümeer liitmikke (Joonis 9), mis lihtsustavad süsteemi kiiret hooldamist ja on kergemad kui valikus järgnevad C seeria messing liitmikud. Voolikud kinnituvad liitmikesse vedru ja neid fikseerivate haaratsite abil, mis töötavad ilma voolikut kahjustamata.

Mootori korpusele prinditakse sisend- ja väljund kanalitesse astmega ava, kuhu liimitakse PI liitmik, tagades vajadusel mootorite kerge eemaldamine jahutussüsteemist. Radiaatoritel ja pumbal kasutatakse 3/4` tollkeermega ühendusi, saades kasutada suuremat vee sissevoolu, mille abil saavutatakse parem soojusülekanne.

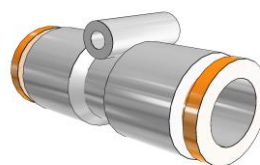
Tabel 9

Liitmike valik

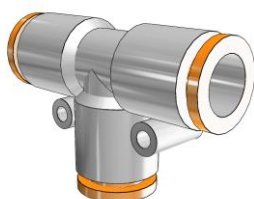
Detail	Tootekood/Seeria	Asukoht autol	Kinnitus	Materjal
keermega kolmik	2L35014/RL35	pump/radiaatori/kontroller	3/4` tollkeere	Tehnopolümeer
push in liitmik	2019005/(RL19)	korpuse liitmik	push in	Tehnopolümeer
push in kolmik	2022005/RL22	ristumiskohad	push-in	Tehnopolümeer
pööratava peaga põlv	2L34011/(RL34)	kontroller/radiaator	1/4` tollkeere	Tehnopolümeer/ Messing



2L35014/RL35



2019005/RL19



2022005/RL22



2L34011/RL34

Joonis 9. R-seeria liitmikud

## 4 VALMISTAMINE

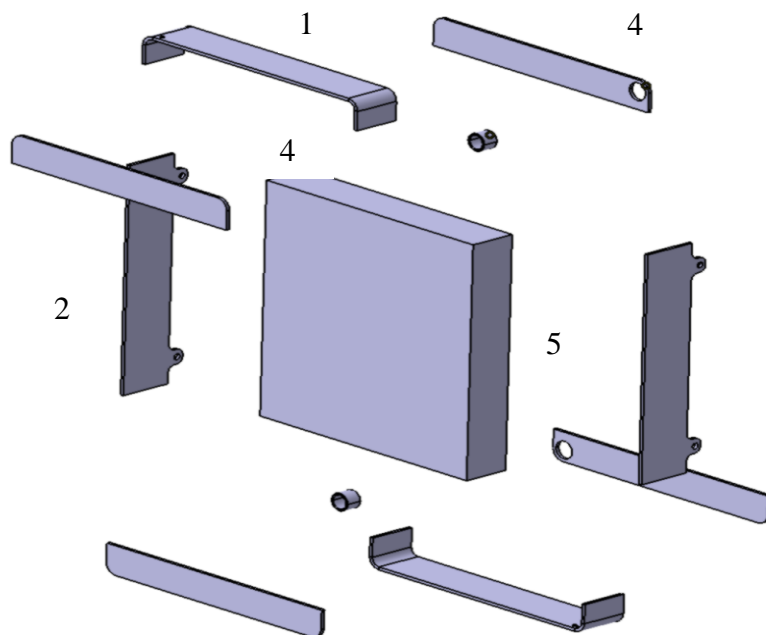
VS valmistatakse 3D printides polüamiidist PA12, mille pikaajaline töötemperatuur on kuni 100°C ja sulamistemperatuur 220 °C. Eelnevatel aastatel on auto külge samast materjalist prinditud ka teisi detaile, mis nõuavad vastupidavust kõrgele temperatuurile, nt FEST12 sisselaskekollektor. Printimise eeliseks on keeruka geomeetria lihtne valmistamine, mis oleks raskendatud valmistades korpus trei- ja frees detailina.

### 4.1 Radiaatori valmistamine

Radiaatorid on projekteeritud vastavalt alapeatükis 2.2 arvatud vajalikule jahutuspindalale. Tootmine toimub AL 5454, mis on levinud materjal survemahutite valmistamisel. Soojusvaheti vann on keevis toode, mis valmistatakse järgnevatest detailidest (Joonis 10. Radiaatori detailid) :

- 1) pealmine osa;
- 2) külge;
- 3) külge sisendavaga;
- 4) sissevoolu toru.

Radiaatori kõrgemasse punkti on projekteeritud  $\varnothing 3$  õhutusava. Paisupaagina kasutakse  $\varnothing 10$  mm toru, mis viiakse kontrolleri kõrvalt üles läbi autokere välja, millega kompenseerib temperatuuri tõustes vee paisumise. Samuti kasutatakse seda toru süsteemi täitmiseks. Radiaatorid paigutatakse auto külgedele difuuseristes olevatesse pesadesse. Paigutamisel on silmas peetud, et oleks tagatud piisav õhuvool väikseima õhutakistuse juures. Selleks on soojusvaheti keeratud nurga alla, saades kasutada suuremat jahutuspindala väiksema õhutakistuse juures. Radiaator kinnitatakse auto kere külge kahe M4 polt-mutter lahendusega, kinnitus avad on projekteeritud eelnevalt monokoki vormi sisse.



Joonis 10. Radiaatori detailid

## 4.2 Voolikute paigutamine

Voolikud paigutatakse autole vastavalt voolamisskeemile, pidades silmas ligipääsu teistele sõlmedele ja vajadusel kerget vahetatavust. Esimene liin on veetud mööda auto sisekülge. Pumbast väljudes jaguneb liin kaheks, liikudes mootoritesse. Mootoritest tagasivool radiaatorisse ja radiaatoritest külm vesi mootori kontrollerrisse, millega jahutusring lõppeb ja vedelik suundub tagasi pumpa.

Voolikute kinnitamiseks auto külge kasutatakse võimalikult palju auto küljes olevaid detaile: vedrustusekõrvad, difuusor ning õõtsad, mis annavad võimaluse voolikuid fikseerida ilma lisa kinnitusteta. Kohal, kus puudub lisakinnitus võimalus fikseeritakse voolikud auto külge Loctite 9225 SF liimi abil, mis on mõeldud keredetailide liimimiseks.

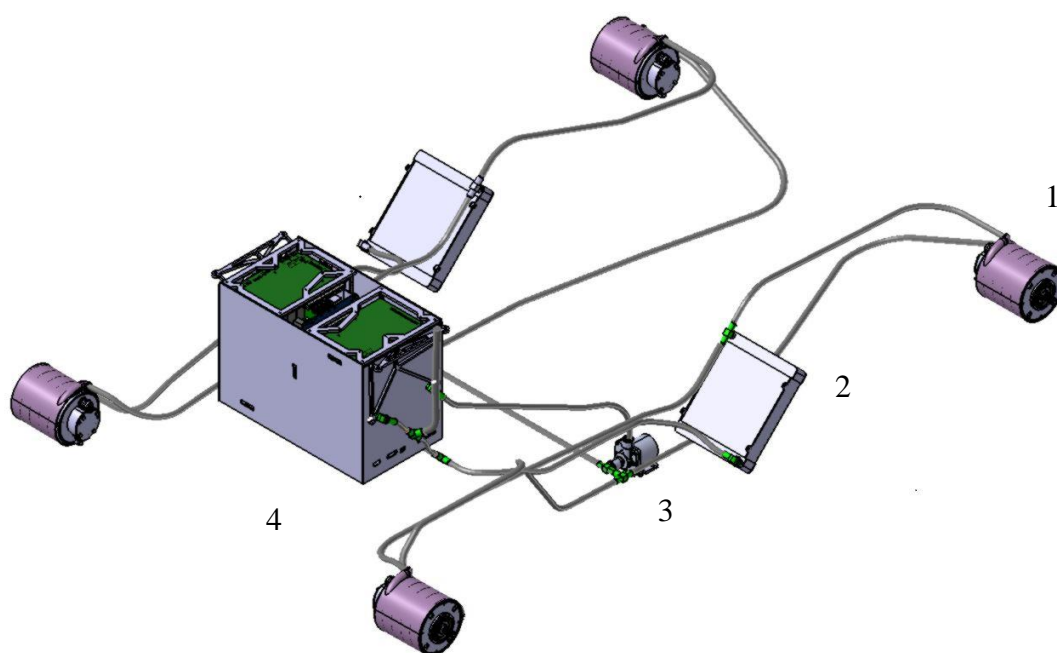
Voolikute kogu pikkuse saamiseks on loodud vooluskeemist 3D (Joonis 11. Komponentide paigutus) mudel, kuhu on paigutatud kõik jahutussüsteemi detailid:

- 1) mootor koos veesärgiga;
- 2) radiaator;
- 3) pump;
- 4) mootori kontrollerr;
- 5) liitmikud, kolmikud ja põlved.

Tabel 10

Komponentide kogus

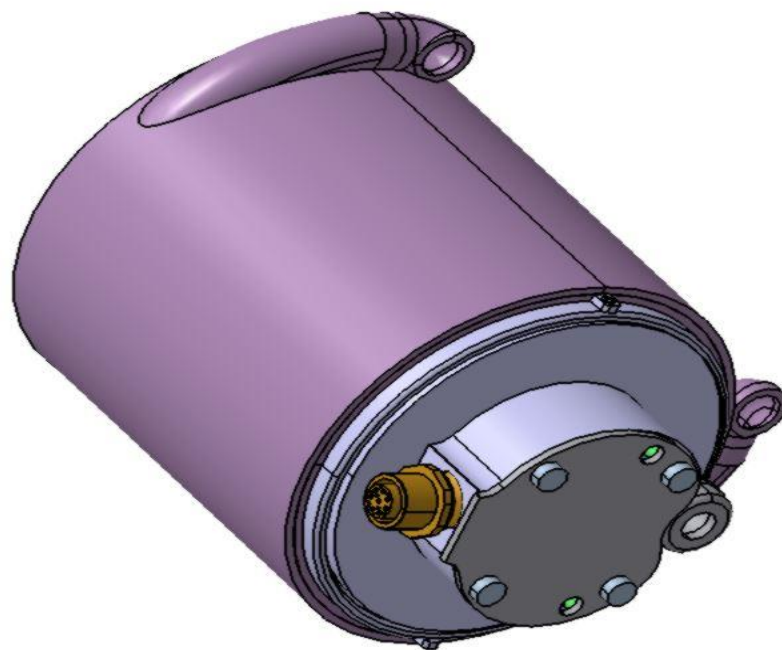
Detail	voolikud	keermega kolmikud	push-in kolmikud	põlv
<b>Kogus, [tk]</b>	9,6 [m]	3	3	4



Joonis 11. Komponentide paigutus

### 4.3 Veesarik

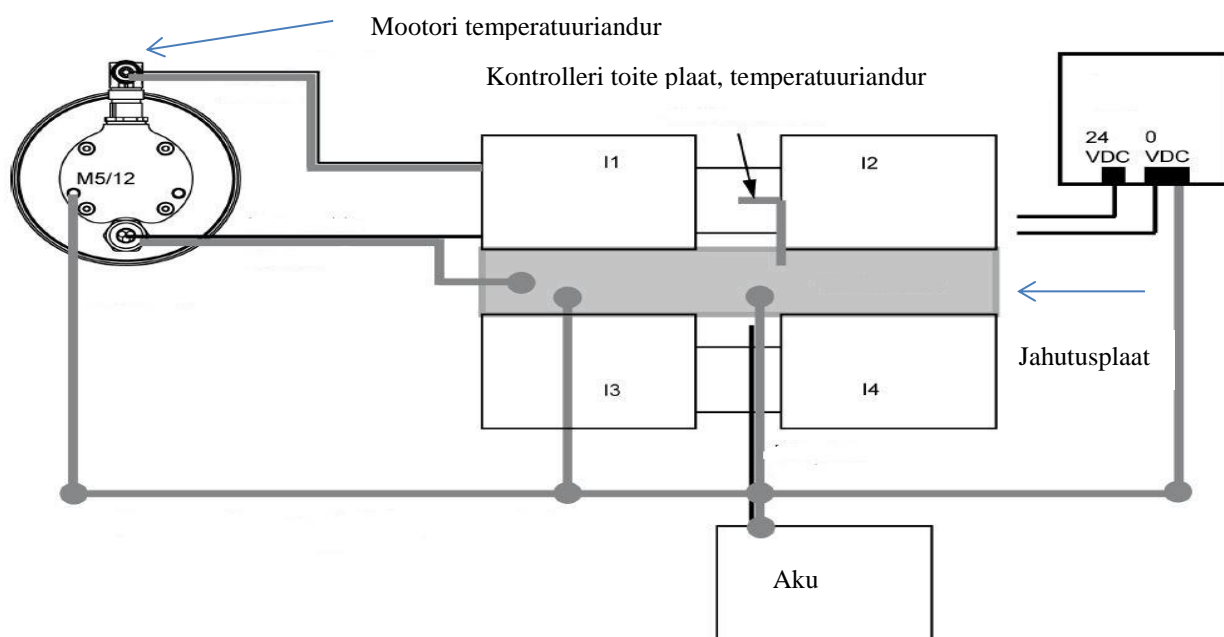
Mootor ja veesarik (Joonis 12) fikseeritakse kahe 4,5 mm pikkuse kinnitus- kõrvaga mootori korpusel paiknevatesse avadesse. Korpus tagumine äär on kohakuti mootori servaga. Korpuse ääred tihendatakse silikooniga hoidmaks ära lekkeid, mis võiksid kahjustada mootorit.



Joonis 12. Mootor koos veesärgiga

## 4.4 Süsteemi monitooring

Süsteemi kahjustamise vältimiseks toimub pidev süsteemi monitooring mootori kontrolleri poolt (Joonis 13). Mõõdetakse mootorisse sisenevat ja väljuvat temperatuuri, et vältida mootorite ülekuumenemist ja mähistehävimist. Teiseks mõõtepunktiks on kontrolleri temperatuuri andurid, mille abil kontrollitakse jahutusplaadi temperatuuri. Kui mõne sõlme temperatuur ületab lubatud parameetreid, lülitab süsteem end välja vältimaks kahjustusi inverteritele ja mootortitele.



Joonis 13. Temperatuuri kontrollskeem

## MAJANDUSLIKUD ARVESTUSED

Jahutussüsteemi kuluaruande koostamine toimub vastavalt Formula Student võistluste Cost Report (CR) reeglitele. Üks osa Formula Student võistlusest on kõikide autode maksumuse võrdlemine. Selleks on loodud maksumuste tabelid: kinnitustele, materjalide, protsessidele ja rakistele. Seda selleks, et autosid saaks hinnata võrdsetel tingimustel. Kuluaruandes tuuakse välja 1000 koostu maksumus dollarites. CR koosneb neljast osast:

- 1) detail (Part);
- 2) materjal (Material);
- 3) koostamine (Process);
- 4) kinnitus detailid (Fastners).

Esimeses osas eelarvestatakse kõik detailid, mis valmistatakse meeskonna poolt nt. radiaator või veesärk. Selleks koostatakse igale detailile tootmistehnoloogia ja vastavalt CR tabelitele määratakse iga detaili hind. Teises osas määratakse ära kõikide ostutoodete hind, sh pump, voolikud, kinnitused. Kolmandas rühmas tuuakse täpselt välja kõik vajalikud toimingud süsteemi koostamiseks. Alustades vedeliku valamise ja jahutusringi kuni poltide kinnitamiseni. Neljandaks näidatakse ära kõik kinnituselemendid, mida auto küljes kasutatakse. Kuluaruande koostamine toimub kõik vastavalt etteantud tabelitele, kus on kirjas materjalide-, kinnituste- ja protsesside maksumus.

Jahutussüsteemi kogumaksumuseks tuli 265,36 \$, mis teeb 233€ mis jaguneb järgnevalt:

- detail :124.44\$ (109.3€);
- materjal: 116.50 \$ (102,3€);
- koostamine: 19.20 \$ (16.9€);
- kinnitus elemendid : 5.24 \$ (4.6€).

CR tabelid on lisatud lisadesse.

## KOKKUVÕTE

Antud töös projekteeriti jahutussüsteem FS Team Tallinn esimesele neljaveolisele elektrivormelile. Selleks toodi välja põhimõttelised erinevused FEST15 ja varasemate elektrivormelite ehituse vahel. Peamisteks erinevusteks on jõuülekanne edasiarendus neljaveoliseks ja toruraami asendamine süsinikmonokokk-kerega. Punktid, mis mõlemad mõjutavad jahutussüsteemi projekteerimist. Esiteks, muutub jahutusring oluliselt pikemaks, et tagada kõikide mootorite võrdne jahutus. Teiseks, peab detailide paigutamine autole olema varasemat veel rohkem läbimõeldud, sest enamik kinnitustest peavad olema projekteeritud kerevormi sisse.

Lähteülesande analüüsis tehti valik erinevate jahutusskeemide vahel ja arvutati maksimaalne pumba võimsus, milleks on 72W. Et leida vajalik süsteemi jahutusvõimsus arvutati eralduv soojuskogus, ligikaudne vajalik pumba tootlikus, mis on vastavalt 20l/min ja 175 000W/m<sup>2</sup>. Kasutades saadud andmeid teostati voolavusanalüüsid, et leida parim jahutusärgi geomeetria ja optimeerida vajaliku pumba tootlikkust. Lisaks kasutati simulatsioonidest saadud väljund temperatuure radiaatori jahutuspinna arvutamiseks, milleks leti 2,4m<sup>2</sup>. Kasutati arvutitarkvara, et leida mootori veesärgi optimaalne kuju jäädes vajalike temperatuuride piirkonda. Lõplike tulemustena saadi vooluhulgaks 10l/min ja kaks radiaatorit mis, kinnituvad kummalegi auto küljele, gabariitmõõtmetega 195x162x32 mm

Järgnevalt koostati kogusüsteemist 3D mudel. Kus vooluskeem paigutati autole, mille abil leiti täpsed voolikute pikkused, vajalikud liitmike kohad ja kinnitus elemendid mis on vajalikud jahutusringi koostamiseks. Kõikide voolikute kogu pikkuseks on 9,6m. Liitmikena Metal Work R-seeria push-in ühendusi, mis tagavad süsteemi kiire ühendamise ja lihtsa hoolduse.

Viimaks eelarvestati auto vastavalt Formula Student võistlusreeglitele, kus loetleti üles kõik autol olevad detailid, vajalikud materjalid ja ostutooded, koostamise kulud ja kinnitus elemendid andes neile maksumuse. Auto kogumaksumuseks tuli 233€ (265\$), mis on kallim kui, eelnev elektrivormel oma pikema vooluskeemi ja eraldi projekteeritud jahutussärkide tõttu.

Kuna tegemist on tootearendus projektina pakun välja tulevase edasiarendusi. Olles saadud juba reaalseid andmeid test ja võistlus perioodis, võib proovida siduda pump mootori pöörlemiskiirusega vältides seeläbi pumba liigset tööd ja teiseks radiaatorite pindala optimeerimine vastavalt testtulemustele..

## SUMMARY

The goal of this thesis is to design and manufacture the necessary parts for 2015 FS Team Tallinn electric formula car cooling system. Firstly differences between the previous electric cars and FEST15 are brought out. There are two big developments changing the drivetrain from 2WD to 4WD and secondly building a monocoque chassis compared to the previous car tubular space frame. These concepts make the design of the cooling system more complicated by making the cooling circuit considerably longer and the attachment of components has to be more thoroughly thought through.

For the cooling system, base parameters were analyzed by comparing different possible cooling assemblies, calculating the maximum pump power and heat dissipation. The circuit schematics were developed consisting of two radiators attached to each side of the car. The developed cooling system is designed with one circulation pump connected with coolant hoses and fittings.

From these calculations, it was determined to find out the heat generation at the motors, from which the outlet temperatures were found using Computational fluid dynamics analyses at the same time comparing different cooling jacket geometries. Using the results from the analyses, the pumping power was optimized. Resulting in  $\varnothing 10$  polytetrafluoroethylene hoses connected with Metal Work R-series “push in” fittings that make the connecting and maintenance of the system simple. 3D printed cooling jackets with spirally running cooling channels are fitted to all 4 motors. The optimal cooling temperature is achieved by running a circulation pump with 14 W pumping power at 15 l/min.

In the last chapter, the cost of the assembly was determined by complying with the Formula Student Cost Report rules. Where all parts, materials, processes and fasteners are listed and priced. The cost of the FEST15 cooling assembly is 233€ (265\$) being more expensive compared to previous cars because of the long cooling circuit needed to cool four separate motors.

For future developments, I suggest connecting the pumping speed and the wheel rotational speed to avoid unnecessary pumping where heat is not generated. Also, after gathering the results from the testing period, to further optimize the radiator size.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] AMK Automotive GmbH & Co. KG, „AMK Motors,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://amk-group.com/en/product/servomotors\\_dd5](http://amk-group.com/en/product/servomotors_dd5). [Kasutatud 9. Mai, 2015].
- [2] YASA Motors Ltd, „Mootor Yasa-750,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.yasamotors.com/products/yasa-750/>. [Kasutatud 5. Märts, 2015].
- [3] DSI Ventures, Inc., „Jahutusvedelik Opticool,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://dsiventures.com/electronics-cooling/opticool-fluid/>. [Kasutatud 2. Mai 2015].
- [4] Formula SAE, „Võistlusreeglistik,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20FSAE%20Rules%20revision%2091714%20kz.pdf>. [Kasutatud 10. Märts, 2015].
- [5] K. Priit, Mehaanika Inseneri käsiraamat, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012, p. 492.
- [6] Y. A. Cengel, Heat Transfer A Paractical approach 2nd edition, New York: Mcgraw-Hill, 2002.
- [7] Kraschnochokv, задачей по теплопередаче, Москва: энергия, 1980.
- [8] A. Ots, Soojustehnika algkursus: Termodünaamika, Põlemine, Soojusülekanne, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [9] KomarAuto OÜ, „Veepump,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.autostuudio.ee/tooted/detail/600-tsinkulatsioonipumbad/flypage/7100-tsinkulatsioonipump-universaalne-24v.html?sef=hcfp>. [Kasutatud 15. mai, 2015].
- [10] Hydroscand AS, „Kolmikud ja Liitmikud,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.hydroscand.ee/storage/ma/>. [Kasutatud 5. aprill 2015].

# **LISAD**

Lisa 1. Cost Report I

Lisa 2. Cost Report II

Lisa 3. Cost Report III

Lisa 4. Cost Report IV

Lisa 5. Cost Report VI

Lisa 6. Graafiline materjal