



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

JAHUTUSPLAADI PROJEKTEERIMINE TUDENGIVORMELILE FEST19

COOLINGPLATE DESIGN FOR FORMULA STUDENT CLASS CAR FEST19

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Rico Jaanipere

Üliõpilaskood: 164392 MAHB

Juhendaja: Lauri Kollo, vanemteadur

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

TalTech Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Rico Jaanipere, 164392
Õppekava, peeriala: MAHB02/13 - Mehhatroonika
Juhendaja: Vanemteadur, Lauri Kollo, 620 3356

Lõputöö teema:

„Jahutusplaadi projekteerimine tudengivormelile FEST19“

„Cooling plate design for Formula Student class car FEST19“

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Projekteerida tudengivormelile FEST19 prinditav jahutusplaat nii, et võrreldes eelneva tehnilise taseme freesitud plaadiga saavutada kõrgem jahutusefektiivsus.
2. Valideerida tootmistehnoloogiat jahtutussüsteemides kasutamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Esialgsete ideede analüüsimine ja katsetamine	10.03.2019
2.	Terve jahutusplaadi analüüsimine	20.03.2019
3.	Valmistada lõppprototüüp	25.03.2019
4.	Andmete analüüs, bakalaureusetöö koostamine	23.05.2019

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "21 "Mai 2019.a

Üliõpilane:Rico Jaanipere "....."201....a

/allkiri/

Juhendaja:Lauri Kollo "....."201....a

/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. TOOTMISTEHNOLLOOGIA	10
1.1 3D Printimine	10
1.2 3D Printimise eelised ja puudused jahutusplaadi tootmisel	10
1.3 Materjal ja Printeri valik.....	11
2. LÄHTEPARAMETRID JAHUTUSPLAADI PROJEKTEERIMISEL	13
2.1 Võistlussari Formula Student	13
2.2 Jõuülekanne AMK RACING KIT	13
2.3 IGBT Infineon FS200R12PT4.....	14
2.4 Jahutussüsteemi üldine ehitus.....	15
2.5 Eelnev lahendus	16
2.6 Efektiivsuse tegurid.....	18
2.6.1 Soojusülekande tegurid iseloomustavad suurused.....	19
3. Jahutusplaadi analüüsimine	21
3.1 Esialgsete analüüside ülesehitus.....	21
3.2 Esialgsed mudelid ja analüüsid	22
3.3 Chevroni nurk.....	26
3.4 Esialgsete analüüside tulemused	28
3.5 Terve jahutusplaadi analüüs	29
4. LÕPLIKU GEOMEETRIA PROJEKTEERIMINE	36
5. JAHUTUSPLAATIDE VÕRDLUS.....	38
KOKKUVÕTE	40
SUMMARY	42

KASUTATUD KIRJANDUS.....	44
LISAD	46

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on valitud koostöös Tallinna Tehnikakõrgkooli ja Tallinna Tehnikaülikooli ühise tudengiorganisatsiooniga Formula Student Team Tallinn. Teemaks valitud arendus on tudengivormeli meeskonnale päevakohane ning vajalik. Lähteandmete püstitamisel võeti arvesse võistlussarja reeglid, kasutatavad seadmed, eelnev lahendus ja tudengivormeli FEST19 parameetrid.

Soovin tänu avaldada oma juhendajale, Lauri Kollole, hea nõu ja soovitude eest jahutusplaadi projekteerimisel. Veel soovin tänu avaldada FS Team Tallinna tegevliikmetele ja veteranidele, kes olid oma nõuga toeks antud lõputöö valmimisel.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- AMK - Saksamaal mootoreid ja kontrollereid arendav ettevõtte AMK Arnold Müller GmbH & Co. KG
- CAN - *Controller Area Network*, sõnumipõhine protokoll loodud algselt autotööstuses kasutamiseks
- FEST14 - FSTT 2013/2014 hooajal projekteeritud ja ehitatud Formula Student klassi elektri vormelauto
- FEST15 - FSTT 2014/2015 hooajal projekteeritud ja ehitatud Formula Student klassi elektri vormelauto
- FEST18 - FSTT 2017/2018 hooajal projekteeritud ja ehitatud Formula Student klassi elektri vormelauto
- FEST19 - FSTT 2018/2019 hooajal projekteeritud ja ehitatud Formula Student klassi elektri vormelauto
- FSG - *Formula Student Germany*, Formula Student võistlussari
- FSTT - Formula Student Team Tallinn
- IGBT - Insulated-gate bipolar transistor, isoleeritud paisuga bipolaartransistor
- NTC - *Negative temperature coefficient*, termistor, mille takistus väheneb temperatuuri kasvades

SISSEJUHATUS

Formula Student on Ameerika Ühendriikidest väljakasvanud tootearendusvõistlus, mille eesmärk on tutvustada tudengitele tänapäeva autotööstuse interdistsiplinaarset lähenemist, populariseerida inseneritehnilist haridust ja seeläbi pakkuda tudengitele praktilist kogemust. Formula Student võistlus erineb teistest mootorispori sarjadest sellega, et ei võida meeskond, kellel on kiireim vormel, vaid võitjaks osutub meeskond, kellel on kõige parem üldine koostus disainist, arendusest, raja sooritusest ning samuti ka raha, aja ja ressursi planeerimisest. Igal võistlusel hinnatakse võistkondi kahel arvestusel – staatilistel ja dünaamilistel aladel. Võistluste võitja otsustab kohtunike kogu, summeerides igal alal kogutud punkte ja ka trahvi punkte mida on võimalik koguda nii tähtaegadest mitte kinni pidamise puhul kui ka võistlusreegleid rikkudes. Maksimaalselt on elektrivormelite klassis võimalik koguda 1000 punkti. [1]

Formula Student Team Tallinn (edaspidi FSTT), on entusiastlikest tudengitest koosnev tudengiorganisatsioon, kelle eesmärk on ehitada igal aastal FSG võistlussarja reeglitele vastav vormel ning sellega võistlusi võita. Meeskond sai alguse 2006. aastal ning juba 2008. aasta suvel võideti esimese tudengivormeliga Silverstone ringrajal auhind – „parim uustulnuk“. Suured muutused toimusid hooajal 2012/2013, kui võeti vastu otsus hakata võistlema elektrivormelite klassis ning juba teine elektrivormel, FEST14 võitis Itaalia võistluse. 2015. aastal, FEST15 hooajal valmis esimene süsinikmonokokk kerega nelikveoline elektrivormel ning praeguseks on jõutud juba ka elektrilise isejuhtiva vormeli arenduseni.

Käesoleva bakalaureuse lõputöö teemaks on Formula Student Team Tallinna meeskonna poolt projekteeritavale elektrivormelile FEST19 kontrolleri jahutusplaatide projekteerimine. Antud teema arendus on meeskonnale vajalik, kuna kõrgepinge elektroonika jahutamine on väga oluline just nelikveolise elektrivormeli tulekuga ning eelnevalt on süsteemiga soojemas kliimas võisteldes esinenud probleeme. Maailma arenguid jälgides liigub kogu transpordisektor aina enam sise põlemismootorite väljavahetamise suunas, mille asemele arendatakse elektrimootoreid. Sellest tulenevalt on kõrgepinge elektroonika jahutuse temaatika ka autotööstuses üldisemalt muutumas üha olulisemaks.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on projekteerida vormel FEST19 kõrgepinge kontrolleri jahutusplaadid, mis oleks oma suutlikuselt eelnevatest paremad. Tehnoloogiaks valiti 3D printimine selektiivse lasersulatusmeetodil, millel on väiksed tehnoloogilised piirangud keeruliste geomeetriatega detailide valmistamisel. Töö kõrvaleesmärgiks on lisaks valideerida 3D printimist kui tootmistehnoloogiat erilahendustega jahutussüsteemides.

Töö esimeses osas antakse ülevaade tootmistehnoloogiast ja parameetritest, millega peab detaili projekteerimisel arvestama. Teine osa keskendub lähteparameetrite kirjeldamisele, milline on vormeli jahutussüsteem, millised on võistlussarja reeglitega seatud piirangud jahutussüsteemile ja milline on jahutatav isoleeritud paisuga bipolaar transistor (edaspidi IGBT). Kolmandas osas antakse ülevaade CATIA V5 modelleerimisprogrammiga projekteeritud geomeetriatest, Ansys 19.2 tarkvaraga teostatud analüüsides ja nende tulemustest. Viimases osas kirjeldatakse mudeli lõpliku viimistlust enne tootmist ja võrreldakse rajaolukorras katsetatud jahutusplaate.

1. TOOTMISTEHNOLLOOGIA

1.1 3D Printimine

3D-printimiseks nimetatakse virtuaalsest mudelist kiht-kihi haaval detaili valmistamist. Mudel lõigutakse printeri tarkvaras kahedimensioonilisteks kihtideks, mis seejärel printimise käigus üksteise peale kasvatatakse. Tuntuimad printimistehnoloogiad on:

- FDM – Filamendi sulatusmeetod (*Fused Deposition Modeling*), protsessi käigus kuumutatakse materjal ja ekstrudeeritakse läbi düüsi ühe joana, üks haaval igat kihti. Tegemist on kõige enam levinud printimismeetodiga. [2]
- SLS – Selektiivne laserpaagutus (*Selective Laser Sintering*), printimise käigus lisatakse materjali pulberkujul kiht-kihi haaval, mis laseriga paagutatakse kokku eelneva kihiga. SLS tehnoloogia üks peamine eelis on, et ta ei vaja tugistruktuure. [3]
- SLA – stereolitograafia (*Stereolithography*) kasutab materjalina fotopolümeervaiku. Vedelale polümeerile näidatakse peale UV-laserit, mille abil vaik kõveneb. [4]
- SLM – Selektiivne lasersulatus (*Selective Laser Melting*). Protsess sarnaneb SLS printimistehnoloogiale, kuid toimub kinnises inertses ruumis. Tööalale kantakse õhuke kiht materjali, mis seejärel sulatatakse laseriga kokku eelneva kihiga. Protsessi korratakse kuni detail on valmis. [5]

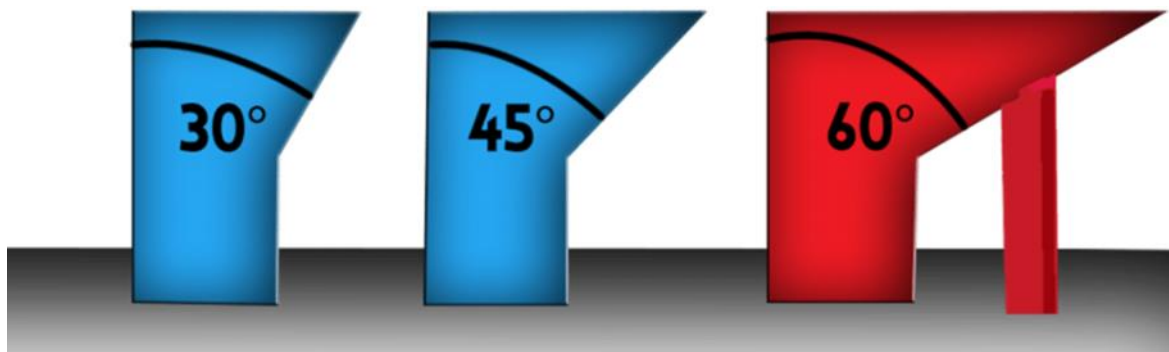
3D-printerite tehnoloogiad on küll erinevad, kuid tööpõhimõtte, kiht-kihi haaval detaili kasvatamine, on kõigil sama.

1.2 3D Printimise eelised ja puudused jahutusplaadi tootmisel

3D-printimine kui tootmismeetod on võrreldes teiste tootmismeetoditega (valamine, freesimine), uus. Praeguseks kasutatakse 3D-printimist kiirprototüüpimiseks, mille puhul avaldub tehnoloogia suur eelis – projekteeritud detailist saadakse kiiresti katsetatav detail. 3D-printides on võimalik valmistada ka geomeetriaid mida ei ole võimalik saavutada traditsiooniliste meetoditega. Insenerid saavad suurema vabaduse projekteerimise faasis olla loovamad. [6] See on ka põhjus, miks valiti jahutusplaadi tootmismeetodiks 3D printimine.

Metallide 3D-printimisel tuleb siiski arvestada ka piiranguid. Printides keerulisi geomeetriaid tuleb arvestada tugistruktuuridega. Tugistruktuuridega toestatakse pindu, mille kaldenurk jääb üle 45 kraadi. [7] Tugistruktuuri kirjeldus on näidatud Sele 1. Jahutusplaadi printimisel on eesmärgiks

saavutada kanal ilma tugistruktuurideta, sest hiljem tugistruktuure eemaldada kanali seest pole võimalik. Selleks tuleb projekteerida vastavad geometriad maksimaalselt 45 kraadise nurgaga.



Sele 1 3D printimisel tugistruktuuri kaldenurkade kirjeldus [7]

Teise parameetrina tuleb jälgida seinapaksust. Jahutusplaadi ülesanne on juhtida vett, mis tähendab, et prinditud kanalid, sisend- ja väljund voolikuliitmikud ja IGBT pind ei tohi lekkida. Eelkatsetuste käigus selgitati välja, et olla kindlad vettpidavuses, peavad kaali seinad olema paksusega vähemalt 1mm. Alla 1mm seinapaksus ei ole vettpidav kohtadest, kus kaldenurgad jõuavad ligilähedale 45 kraadile või üle selle.

1.3 Materjal ja Printeri valik

3D-printimiseks vajaliku tehnoloogia ja seadme valik tulenes olemasolevatest võimalustest. Jahutusplaadi printimiseks kasutatakse Tallinna Tehnikaülikooli laboritele kuuluvat printerit SLM Solutions 280 2.0. Seadme parameetrid on näidatud Tabel 1.1.

Tabel 1.1 SLM Solution 280 2.0 3D printer [8]

Tööala suurus	280 mm x 280 mm x 365 mm
Prinditava kihi paksus	20 µm - 90 µm
Inertgaasi kulu	3,0 l/min
Üldised mõõtmed	2600 mm x 1200 mm x 2700 mm
Laseri võimsus	700 W

Kasutatav seade suudab printida erinevaid materjale alustades tööriista terastest ja lõpetades vase-sulamitega. Käesolevas töös on tootmisel kasutatavaks materjaliks alumiiniumsulam AlSi10Mg. Materjali valik tuleneb materjali kättesaadavusest ja olemasolust Tallinna Tehnikaülikooli laboris. Sulamil AlSi10Mg on suhteliselt suur soojusjuhtivus ning tugevus, seega on materjal antud

kasutusvaldkonnas sobilik. Materjali kasutatakse laialdaselt lennutööstuses, autotööstuses aga ka soojusvahetites. Tootja iseloomustab materjali kui väga hea korrosioonikindlusega, hea elektrijuhtivusega, suure dünaamilise sitkusega aga ka suurepärase soojusjuhtivusega sulamit. [9] Materjali andmed on toodud Tabelis 1.2.

Tabel 1.2 AlSi10Mg tootja andmed [9]

Tõmbetugevus	Rm [MPa]	450
Tinglik voolepiir	Rp0,2 [MPa]	275
Katkevenivus	A [%]	5
Katkeahenemine	Z [%]	5
Elastusmoodul	E [GPa]	75
Soojusjuhtivustegur (20 °C)	W/(m*K)	130 – 150

2. LÄHTEPARAMETRID JAHUTUSPLAADI PROJEKTEERIMISEL

2.1 Võistlussari Formula Student

Formula Student võistlussarjas võisteldakse kolmel staatilisel alal ja viiel dünaamilisel alal, mille punktisummad on kirjeldatud Tabelis 2.1. Staatiliste aladega hinnatakse meeskondade tehnilisi teadmisi kuid ka esitlemisoskust, äriplaani planeerimist ja dokumenteerimise täpsust ja loogilisust. Erinevate dünaamiliste alade eesmärk on testida tudengivormeli kõikvõimalikke funktsionaalsusi rajaolukordades. [10]

Tabel 2.1 Võistlussarja maksimaalsete punktide tabel elektrivormeli klassis

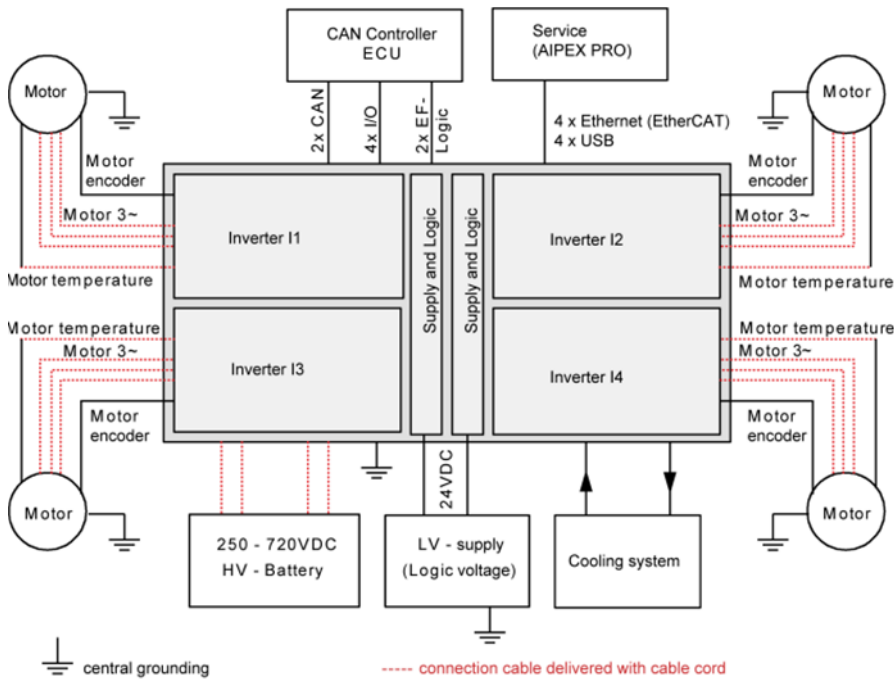
Staatilised alad	Äriplaani kaitsmine	75 punkti
	Kuluaruanne ja tootmine	100 punkti
	Disaini kaitsmine	150 punkti
<hr/>		
Dünaamilised alad	Kurvisuutlikuse test	75 punkti
	Kiirendus	75 punkti
	Rajasõit	100 punkti
	Kestvussõit	325 punkti
	Efektiivsus	100 punkti
<hr/>		
Kokku:		1000 punkti

Tabelist selgub, et võistluste maksimaalsetest punktidest annab 32,5% kestvussõit. Kestvussõit on üle 22km pikk võistlusala, koos juhivahetusega distantsi keskel. Distantsi jooksul pannakse proovile nii sõitjad, vormeli kiirus, dünaamika kui ka insenerlahenduste vastupidavus. Sealhulgas on kestvussõit ainuke võistlusala, mille jooksul saab jahutussüsteem koos jahutusplaadiga pikaajalist koormust. Kestvussõidu käigus võivad temperatuurid kõrgepingemoodulites tõusta üle lubatud piiride, kui jahutusplaat ei ole projekteeritud piisavalt suure jahutusvõimsusega.

2.2 Jõuülekanne AMK RACING KIT

Alates 2015. aastast on FSTT elektrivormelitel olnud kasutusel ostutootena AMK mootorid ja kontrollid. Tudengivormeli FEST19 jõuülekanne kasutatakse samuti Saksamaa ettevõtte AMK Formula Student klassi jaoks arendatud komplekti AMK RACING KIT. Komplekt koosneb neljast

püsimagnet-sünkroon servomootorist DD5-14 koos inverteritega AMKASYN KW26-S5-FSE-4Q, mootoreid juhtivast kontrolleri ja tarkvarast AMK AIPEX PRO V3 [11]. AMK poolt arendatud ja FEST19 kasutatava süsteemi skeem on välja toodu Sele 2. Antud süsteemis kuuluvad jahutussüsteemi alla mootorid ja inverteritel asuvad IGBT moodulid, millest mõlemad jahutatakse veega.



Sele 2 AMK RACING KIT [11]

2.3 IGBT Infineon FS200R12PT4

AMK poolt tudengivormelile arendatud inverteritel on kasutusel neli Infineon FS200R12PT14 IGBT-d. IGBT sisaldab endas kuut transistori ja ühte NTC termistori, mis mõõdab temperatuuri mooduli sees.

IGBT määrab geomeetriaga jahutatava pinna suuruse ja kinnituse asetuse. Bipolaar transistor kinnitub inverteri plaadile kuuest punktist, mida mööda toimub ka voolu lülitamine. Jahutusplaadi kinnitamiseks IGBT külge on nurkades neli 5,5 mm ava. IGBT joonis on nõidatud LISAS 1.

IGBT andmelehe järgi lubatakse maksimaalset eralduvat võimsust ühelt moodulilt 1000W. [12] Võimsusest saadav IGBT-lt eralduv soojusvoog arvutatakse valemiga: [13]

$$\dot{Q} = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

kus Q – Soojushulk, W

A – pindala kuhu soojushulk mõjub, m²

Teades, et IGBT maksimaalne eralduv võimsus on 1000 W ja tema pindala on 0,007 m², saame arvutada soojusvoo IGBT pinnal.

$$Q = \frac{1000W}{0,007m^2} = \frac{142857W}{m^2} \quad (2.2)$$

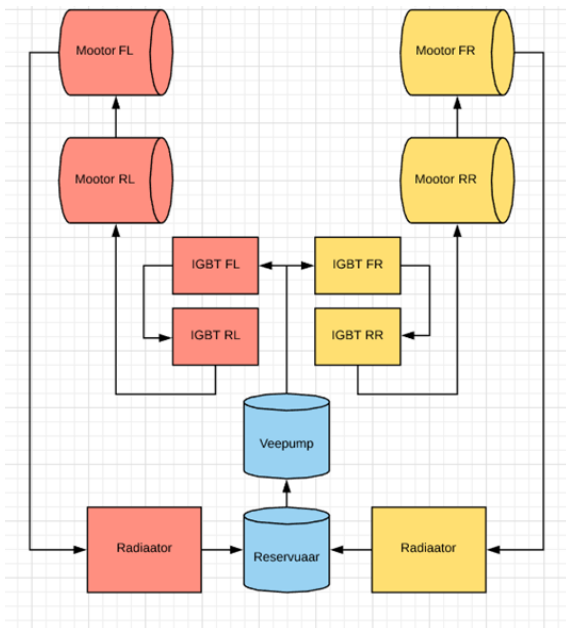
Arvutustest tuleb välja, et analüüsidest jahutusplaadil toimuvat soojusülekannet, tuleb määrata IGBT pinnale soojusvooks 142857 W/m².

2.4 Jahutussüsteemi üldine ehitus

Vormelil FEST19 on jaotatud jahutatavad elektroonikakomponendid kahte paralleelsesesse ossa. Süsteemil on kahe võrdse osa peale üks veepump ja reservuaar. Süsteemi hargnemine toimub peale veepumpa, kus jaotatakse süsteem kaheks – paremaks ja vasakuks pooleks. Selline paigutus määrab ära jahutusplaatide sisend- ja väljundkanalid. Süsteemi paigutus on nähtav Sele 3

Jahutussüsteemi projekteerimist piiravad järgnevad reeglid [1]:

- T 7.3.1 Kõik jahutus- või vedeliksüsteemid peavad olema tihendatud, et vältida lekkeid.
- T 7.3.4 Reservuaarid, jahutussüsteemi kinnitused ja liitmikud peavad olema materjalist, mille lubatud töötemperatuur on vähemalt 125 °C.
- Reservuaar peab asuma vormeli tulemüürist tagapool ja madalamal juhi õlgadest.
- T 7.2.2 Jõuülekanne komponente tohib jahutada ainult vee või õliga.

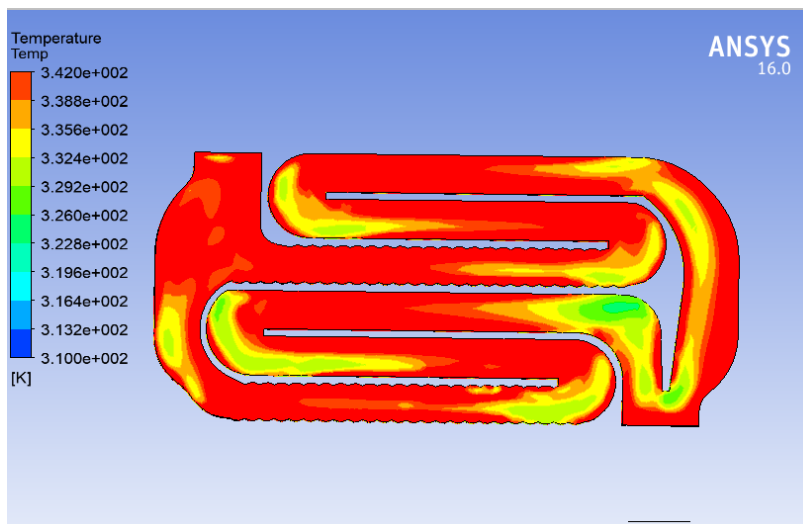


Sele 3 Jahutussüsteemi ülevaade

2.5 Eelnev lahendus

Kahel eelneval aastal on IGBT jahutamiseks kasutatud meeskonna poolt arendatud ja toodetud freesivat jahutusplaati. Freesimine on jõtnud projekteerimisfaasis piirangud geomeetria loomisele. Sellepärast on antud töös valitud tootmismeetodiks 3D printimine, sest laseb inseneril olla loovam projekteerimise käigus.

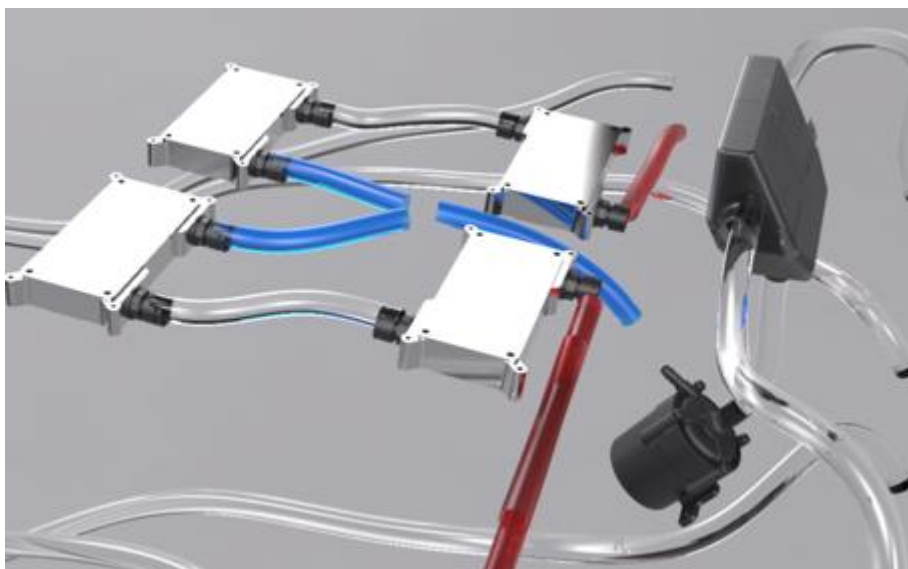
Keskendutud on jahutusplaadi veekanali vaheseinte analüüsimisele, et muuta soojusülekanne tõhusamaks. Tulenevalt tootmismeetodist oli keeruline projekteerida IGBT-ga kontaktis olevale seinale geomeetria, millega oleks suurem siijusülekandeegur. Analüüsid on teostatud veekehaga, mille IGBT poolsele pinnale on määratud soojusvoog. Selline meetod ei näita IGBT pinna temperatuuri, aga annab hinnangu, kui kõrgeks võib pinnatemperatuur kujuneda. Kanal on projekteeritud hargnema kaheks jahutusplaadis, et mitte langetada vägäpalju vee liikumise kiirust kanalis. Üks suur kanal oleks liigselt aeglase vee liikumise kiiruse põhjustanud. Seintele on projekteeritud lainetav geomeetria, mille eesmärk on aeglase vee kihtide segamine ja samuti soojusülekanne pindala suurendamine. Need mõlemad tegurid suurendavad soojusülekandeegurit ning soojusülekanne toimub madalama temperatuurivahemiku juures. Eelmisel hooajal kasutatud jahutusplaadi soojusülekanne analüüs on näha Sele 4.



Sele 4 FEST18 jahutusplaadi soojusülekanne analüüs

Tulemusest on näha, et pealmine pind, mis IGBTle kõige lähemal, tõuseb temperatuur 342 K. Kuna see analüüs ei võta arvesse soojusjuhtivust läbi materjali, siis vastav analüüs ei näita õiget IGBT pinnatemperatuuri. Võib aga öelda, et kui jahutusplaadi kanali siseseina temperatuur on 342 K, siis IGBT pind peab olema kindalsti kõrgema temperatuuriga. Vastasel juhul ei toimu soojusülekanne.

Veel üks oluline faktor jahutusplaadi projekteerimisel on kanali ja voolikute asetuse määramine.. Sisend- ja väljundkanalite järjekord jäeti samaks eelneva vormeli FEST18 järjekorraga, mis on näha Sele 5. Kuid sisendite ja väljundite asetust muudeti, sest nii on võimalik jahutusplaadid projekteerida kompaktsemalt kokku ja voolikute asetuse ei sega teisi komponente vormelil.



Sele 5 FEST18 jahutussüsteemi voolikute asetuse, sinisega näidatud sissevoolu ja punasega väljavoolu voolikud

Sellise lahendusega hakkab jahutusvedeliku ringlus veepumbast, peale mida toimub hargnemine kahte jahutussüsteemi harusse. Edasi liigub jahutusvesi esimeste mootorite kontrolleri IGBT jahutusplaatidesse ning sealt tagasi tagumiste mootorite kontrolleri omadesse. Peale tagumisi jahutusplaate liigub jahutusvedelik vormeli kerest välja tagumistesse mootoritesse. Kuigi tagumised mootorid saavad suurema koormuse võistlusrajal, siis pidades silmas jahutusvoolikute kompaktselt lahendust, on otsustatud juhtida külm vesi enne esimeste mootorite kontrolleri jahutusplaatidesse.

2.6 Efektiivsuse tegurid

Soojusülekanne on kolm liiki: soojusjuhtivus, konvektsioon ja kiirgus. Konvektsioon ja soojusjuhtivus on sarnased mõisted, kuna mõlemad vajavad materjali olemasolu, aga samas ka erinevad, sest konvektsioon nõuab aine liikumist. Seepärast on soojusülekanne näol läbi tahke materjali alati tegemist soojusjuhtivusega, sest molekulid materjali sees püsivad suhteliselt kindlas asendis. Soojusülekanne läbi vedeliku saab aga toimuda nii soojusjuhtivuse kui ka konvektsiooni teel, olenevalt vedeliku liikumisest. Vedeliku liikumine suurendab soojusülekanne, kuna toob kontakti külma ja sooja vedeliku, mis suurendab vedeliku soojusjuhtivuse kasvu rohkemates punktides. Siit tekib ka seaduspära, mida suurem on voolukiirus, seda suurem soojusülekanne. [14]

Konvektsiooni soojusülekannetegurit peetakse proportsionaalseks temperatuuri erinevusega ja on seletatud Newtoni jahutusseaduses valemiga 2.3 [14]:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

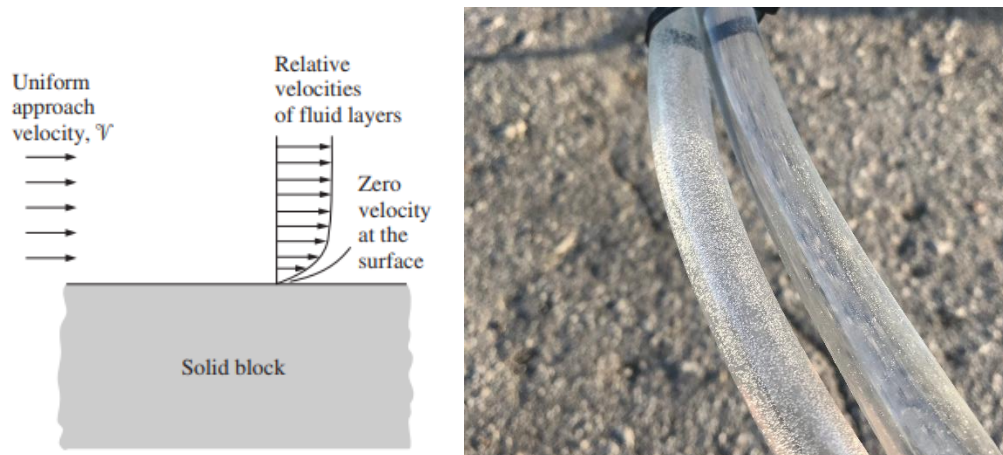
kus h – konvektsiooni soojusülekannetegur, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_s – soojusülekanne pinna pindala, m^2

T_s – Pinnatemperatuur, $^\circ C$

T_∞ – Vedeliku temperatuur efektiivsel kaugusel pinnast, $^\circ C$

Veel mõjutab soojusülekanne vedeliku voolamisel tuntud „kleepumis“ efekt. Kui vedelik voolab mööda pinda, on näha, et materjali pinnal saavutab vedelik pinna suhtes nullkiiruse. See tähendab, et vedelik on otseses kontaktis pinnaga, mida nimetatakse *no-slip* olukorraks. Seisev kiht mõjutab iga järgnevat pinnast eemalolevat kihti, mis omakorda aeglustab soojusülekanne. [14]



Sele 6 Pinnalähedase *no-slip* olukorra mõju voolukiirusele [14]

Sele 6 nähtaval pildil on pinnapealsete veemullidega näha jahutussüsteemi voolikutes toimuv *no-slip* olukord. Olukorras, kus jahutussüsteemi pump töötab ja destilleeritud vesi süsteemis liigub, on näha seisval pinnal õhumullikesi, mis tekivad vee seismisest pinna lähedal.

2.6.1 Soojusülekande tegurit iseloomustavad suurused

Soojusülekande teguri kirjeldamiseks kasutatakse mitmeid valemuid, üks nendest on Nusselti number. Nusselti number on dimensioonita konvektsiooni soojusülekande teguri konfidentsent. Selle kohaselt on soojusvoog konvektsiooni korral näidatud valemiga 2.4 [14]:

$$\dot{q}_{conv} = h\Delta T \quad (2.4)$$

kus $\Delta T = T_2 - T_1$ – Temperatuuri erinevus soojusülekande pinna ja voolise vahel

h – konvektsiooni soojusülekande tegur $W/m^2 \cdot ^\circ C$

ja soojusjuhtivuse korral [14] :

$$\dot{q}_{cond} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.5)$$

kus k – vedeliku soojusjuhtivustegur

L – vedeliku kihi paksus

ΔT – Temperatuuri erinevus voolise kihtide vahel, $^\circ C$

Võttes konvektsiooni ja soojusjuhtivuse teguri suhte, saamegi Nusselti arvu (Nu).

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{hL}{k} = Nu \quad (2.6)$$

Mida suurem on Nusselti arv, seda efektiivsem on konvektsioon. Kui teisendada sellest valemist soojusülekangetegur h , saame valemi 2.7:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (2.7)$$

Valemist 2.7 on näha, et soojusülekangeteguri jaoks on vajalik võimalikult suur Nusselti arv. Samuti on võimalik Nusselti arvu leida valemiga 2.8 [14]:

$$Nu = C Re_L^m Pr^n \quad (2.8)$$

kus m – konstant, mis sõltub Reynoldsi arvust ja voolu tüübist

n – konstant, mis sõltub Reynoldsi arvust ja voolu tüübist

C – konstant, mis sõltub geomeetriast

Re – Reynoldsi arv

Pr – Prandtl'i arv [14]

Valemist on näha, et suurendada Nusselti arvu on vaja maksimaalselt suurt Reynoldsi arvu, ehk veevool peab olema võimalikult turbulentsne, saavutamaks võimalikult suurt soojusülekanget. Nende valemite kooslust, et soojusülekangetegurit suurendada järgitakse ideede ja mudelite ülesehitamisel

3. Jahutusplaadi analüüsimine

Analüüsimiseks kasutatakse ANSYS 19.2 fluid (fluent) keskkonda, millega on teostatud nii veevoolu kui soojusülekanne analüüsid. Jahutusplaadi analüüsimine on jaotatud kaheks – ideede katsetamine ja terve plaadi analüüs. Kuna antud tüüpi analüüsid nõuavad väga palju arvutusjõudluse ressursi, on efektiivsem kasutada ideede katsetamiseks väiksemat mudelit jahutusplaadist. Kui ideed on katsetatud ja tulemused ilmnunud, liigutakse terve jahutusplaadi analüüsimiseni, millega parandatakse vee voolu ja valideeritakse terves jahutusplaadis vähendatud mudelis katsetatud ideed.

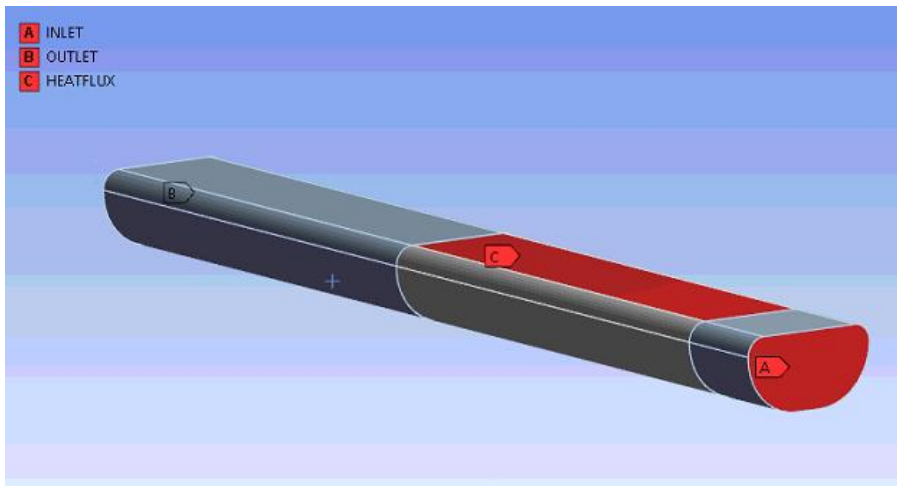
3.1 Esialgsete analüüside ülesehitus

Võrdluse tekkimiseks määrati kindlad parameetrid, mida kasutati kõigi esialgsete ideede analüüsimiseks. Analüüsimudel koosneb kahest osast: detailist ja vedelikkehast. Vedelikkehale määratakse vedelik, sissevoolava vedeliku kiirus, väljavoolava vedeliku rõhk, sissevoolava vedeliku temperatuur. Jahutusplaadi analüüsimisel on vedelikkeha vedelikuks määratud vesi ning sissevoolava vee temperatuur on määratud konstantseks 300 K juures. Detailile määratakse materjal ja soojusvoog vastavale pinnale, mis on kontaktis IGBT pinnaga. Analüüsi paremaks toimimiseks on vajalik pikendada sisend- ja väljundveekanaleid, et ei tekiks olukordi, kus sisend- ja väljundpinna lähedal on keerlevad vedelikujooned. See on arvutusmudeli jaoks keeruline lahendada ning võib tekkida olukord, kus analüüs katkeb enneaegselt. Pikemad kanalid aitavad just väljavoolaval veelenne vedelikukeha lõppu ühtlustuda.

Tabel 3.1 Esialgsed analüüsiparameetrid

Siseneva vee kiirus (m/s)	1
Soojusvoog (W/m²)	5000
Rõhk väljundis (Pa)	0
Vedelik	vesi
Detaili materjal	Alumiinium
Sissevoolu temp (K)	300

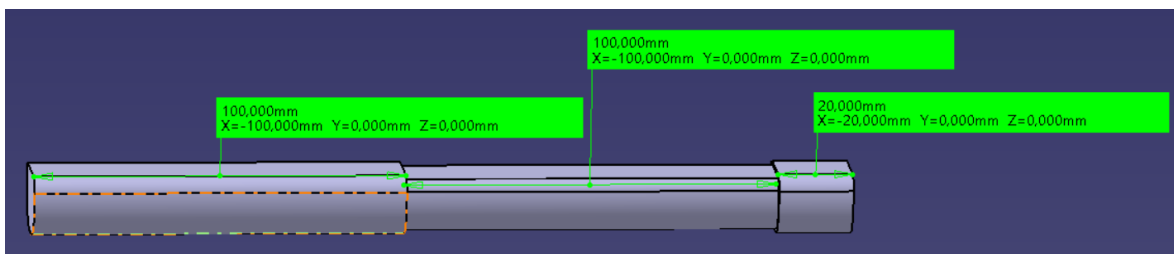
Järgmisena määratakse analüüsimudelile piiritingimused. Piiritingimusteks on vaja määrata mudelis veevoolu sisend- ja väljundpinnad, et analüüsida vee voolamist. Selleks, et tekiks analüüsis soojusülekanne, tuleb määrata ka soojusvoo pind. Määratud piiritingimused on näidatud Sele 7.



Sele 7 Esialgsete analüüside piiritingimused, INLET – sisend veevoolu pind, OUTLET – Väljund veevoolu pind, HEATFLUX – soojusvoo pind

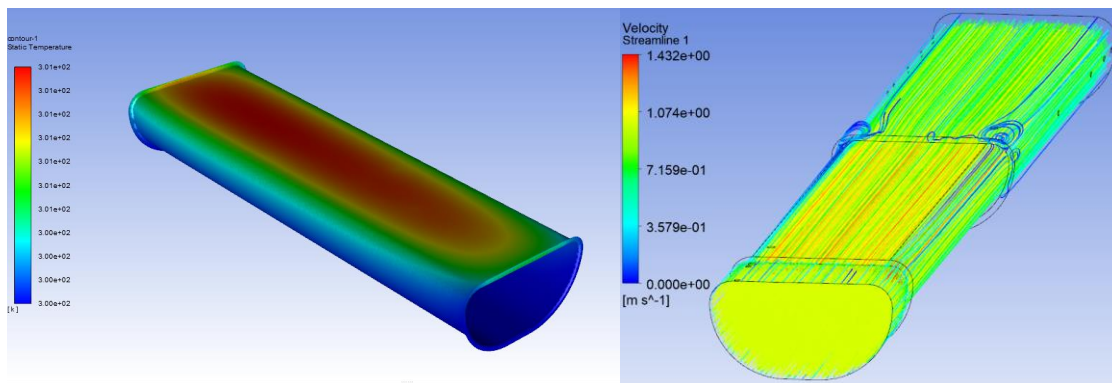
3.2 Esialgsed mudelid ja analüüsid

Esimese analüüsina katsetati antud parameetreid tavalise sirge kanaliga, eesmärgiga saada hilisemate lahenduste võrdlemiseks algne tulemus ja katsetada analüüsi toimimist tarkvaras Ansys. Kõigil analüüsi vedelikkehadel pikendati sisend- ja väljundkanaleid vastavalt 20mm ja 100mm. Vedelikkeha mõõtmed on näidatud Sele 8.



Sele 8 Vedelikkeha koos pikendatud sissevoolu ja väljavoolu kanalitega.

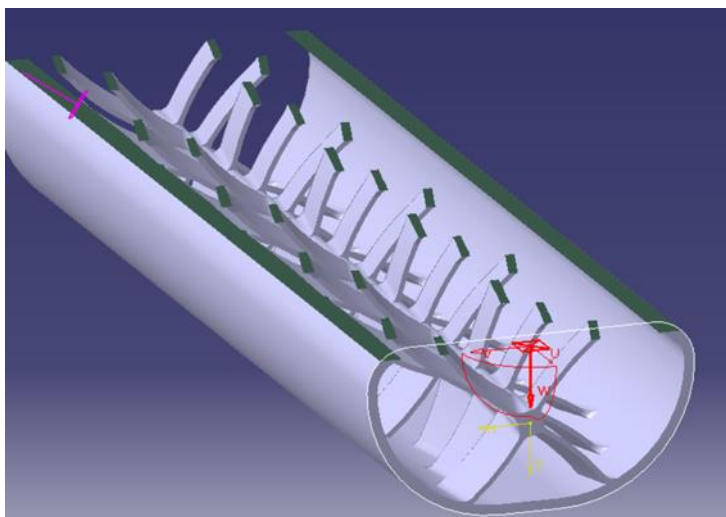
Esimese analüüsi tulemused on näidatud Sele 9, mis võetakse aluseks järgnevate lahenduste võrdlemisel.



Sele 9 Esialgne kanali analüüs

Analüüsi tulemustest on näha, et pinnapealne temperatuur on maksimaalselt 301.45 K ja vee voolukiirus on kogu kanali pikkuses ühtlane. Saadud tulemusi võetakse arvesse järgnevate analüüside ja järelduste teostamisel.

Järgneva mudeli eesmärk oli saavutada suurem Reynoldsi arv, mille tulemusena suureneb soojusülekanalitegur. Selleks uurit propellerlahenduse, propellerlabad modelleeritakse kasutades spiraalset joont kanali sihis. Spiraali sammu muutes on võimaik muuta propellerlaba nurka kanali suhtes. [15] Antud laendust katsetati mudelis Sele 10, kus on järjestikku kolme kaupa 15 kraadise nurga all 5mm pikkused ja 0,5 mm paksused propellerlabad.

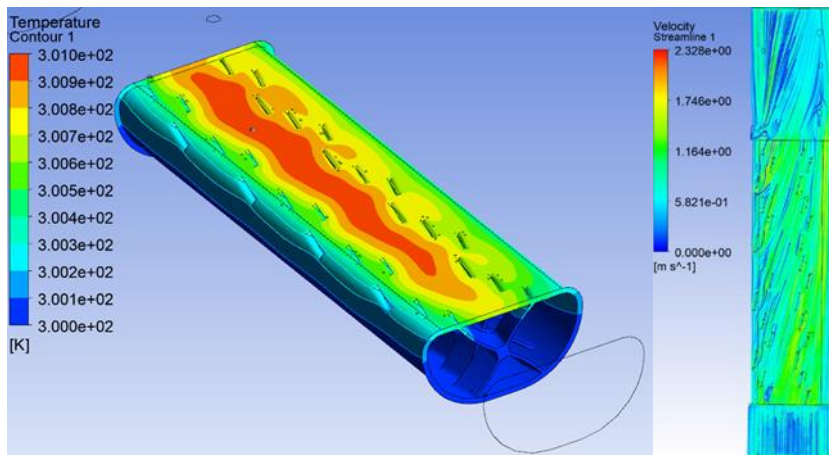


Sele 10 Versioon 2, 15 kraadised propellerlabad kolme kaupa

Versioon 2 analüüsis keskenduti turbiini lahenduse valideerimisele. Vaadeldes analüüsi tulemusi on vee segamine risti suunas kanalile toimunud, kuid mitte sellises mahus nagu sooviti. Vesi segatakse kanalis, aga see ei tekita pinnakihtides tekkivale seisva vee lähedates kihtides turbulentsemat voolu.

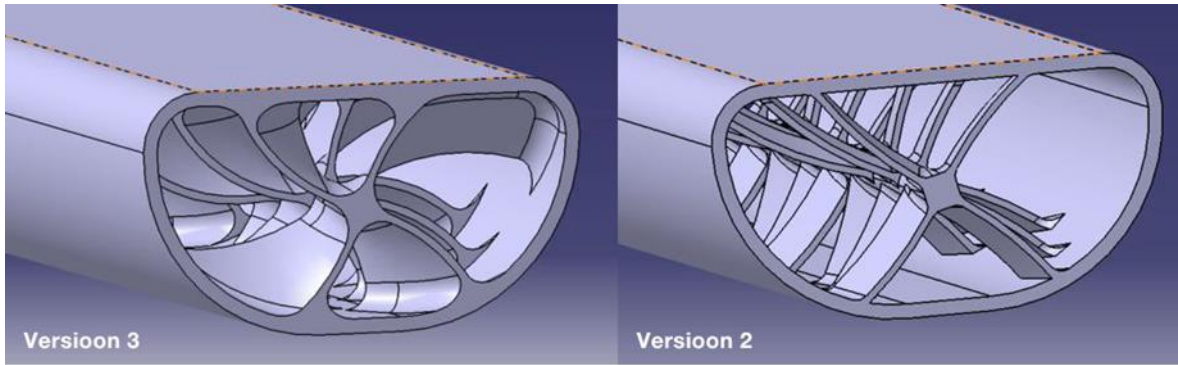
Seda kinnitab ka temperatuuride jaotumine Sele 11, millest on näha, et maksimaalne temperatuur pinnalt võrreldes esialgse kanaliga on langenud ligikaudu 0.5 K, jäädes 300.95 K juurde. Samas on veevoolu kiirus suurenenud, mis kinnitab eelpool mainitud seaduspära – mida suurem voolukiirus, seda suurem soojusülekanndetegur.

Veevoolu kiirust vaadeldes on näha, et järjestikused labad takistavad üksteist. Jälgides propellerlaba nurka tuleks nurka suurendada, et tekiks veel suurem vee segunemine kanalis. Kui sarnase lahendusega keerata kõik labad ühes suunas 15 kraadise nurga alla, tekiks propellerlabadest kanalile täisring ,labad ei takitsaks üksteist ja kaoks kanali peale tekkiv kõrge temperatuuriga ala. Lahendusega tekib seevastu probleem tootmisel, kuna neljandast propellerlabast tekiks suuremad kui 45 kraadise tõusunurgaga pinnad, mis eeldaks printimiselt tugistruktuure, mida ei saaks hiljem enam eemaldada, nagu kirjeldati esimeses peatükis.



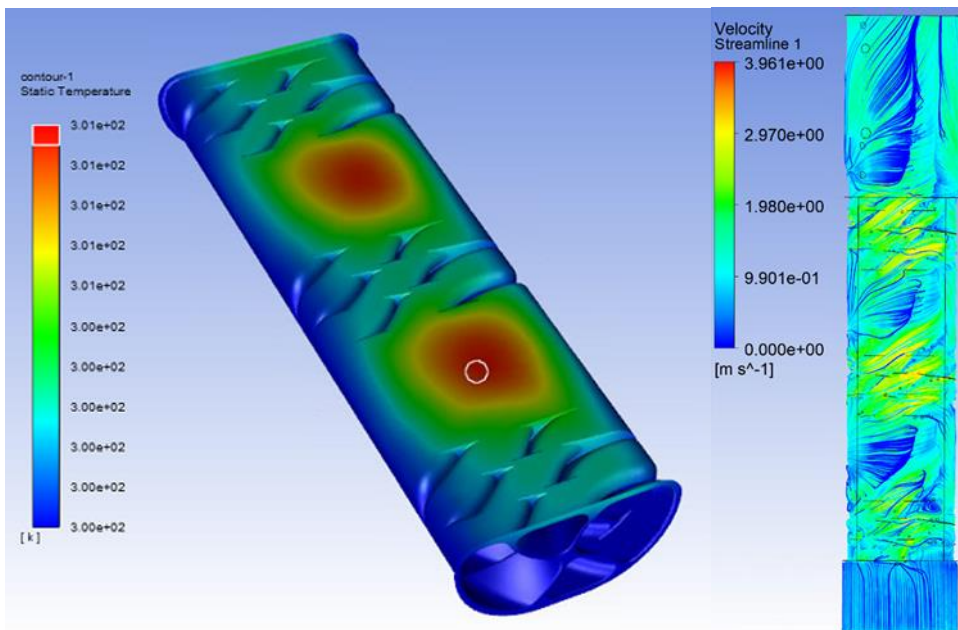
Sele 11 Versioon 2, Temperatuuri ja veevoolu analüüs

Eeltoodud tulemusi arvesse võttes tehti kolmandas versioonis suuremad muudatused. Et veelgi suurendada vee segamist kanalis, muudeti laba geometriat ja nurka. vastavalt suurendati pöördenurga geometriat loova spiraali keerdude arvu, mis suurendaks vee segamist terve kanali ulatuses. Propellerlaba paksus ja pikkus jäeti 0.5 mm.



Sele 12 Võrdlus versioon 2 ja versioon 3 propellerlaba geometrias

Mudelisi muudeti lisaks labade arvu kanalis. Tulenevalt 2. versioonist paigutati kanalisse labad kolme kaupa vahedega 24 mm, et geometria ei hakkaks üksteist segama. Antud geometriaga analüüsi tulemused on näidatud Sele 13.



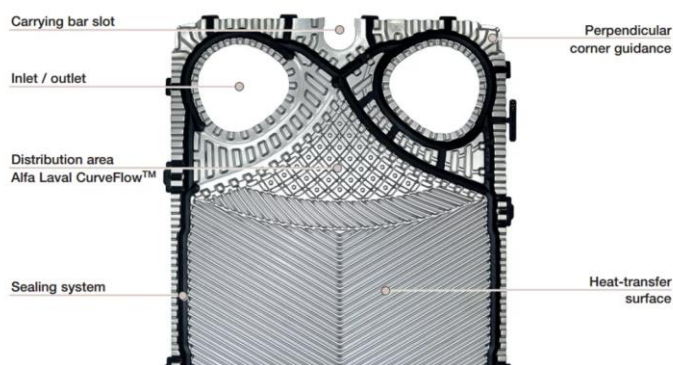
Sele 13 Versioon 3, temperatuuri jaotus ja veevool

Temperatuurijaotuse mudeliilt on näha, et propellerlabade geometria muutus viis ka temperatuuri madalamaks, maksimaalselt 300.84 K, kuid tekitab propellerite vahele seisva vee, millest tingitult tekkisid nendesse kohtadesse kuumad punktid. Saavutamaks eesmärki saamaks võimalikult suurt soojusülekandeegurit IGBT pinnalt, tuleb lisaks uurida, kuidas pinnal turbulentsust tõsta ja seisva veekihi paksust vähendada [14].

3.3 Chevroni nurk

Esimeste analüüsidega nähti, et ainult vett segades, jäävad pinnale seisvad veekohad ja pinnal märgatavat temperatuurilangust ei toimu. Seepeale uuriti, kuidas oleks võimalik soojusvoog pinnalt koheselt ära juhtida. Leiti, et paljudes soojusvahetites kasutatakse lainetuse lahendust, mida nimetatakse Chevroni nurgaks.

Soojusvahetites kasutatav Chevroni nurga geomeetria on mõeldud võimalikult suure soojusvahetuse pinna tekitamiseks ja nurga all olevad kanalid tagavad maksimaalse turbulentsi kanali sees. Lahendust kasutatakse näiteks plaatsoojusvahetites. Plaatsoojusvahetid kasutavad metallplaate, et kanda soojust ühelt vedelikult teisele. Plaadid laotatakse tihendatult üksteise peale kindla nii, et plaatide vahed on ligikaudu 1.5mm. Plaatsoojusvahetitest vaadeldakse jahutusplaadi jaoks ainult soojusvaheti geomeetriat, millega soojust üle kantakse. Plaatsoojusvaheti geomeetriat on näidatud Sele 14.



Sele 14 Alfa Laval plaatsoojusvaheti näidis [16]

Katsetamaks Chevroni lainetuse teooriat, mida Sele 14 nimetatakse kui *heat transfer surface*, modelleeriti lainetus viimasesse katsemudelisse. Võimalikult suure turbulentsi tekitamiseks peab Chevroni nurk olema võimalikult suur. Võrdlus väikse nurga ja suure nurga erinevuste vahel on toodud Tabelis 3.2.

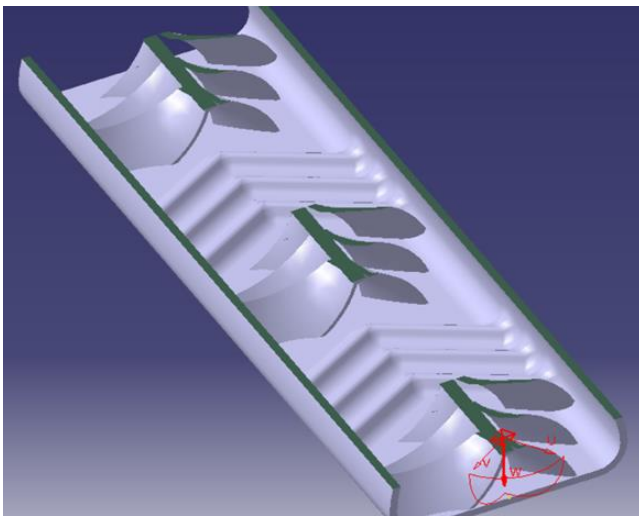
Tabel 3.2 Chevroni lainetuse erinevus nurga muutusest [16]

Väike Chevroni nurk
Madal rõhu langus
Väike soojusülekanne
Väike takistus

Suur Chevroni nurk
Suur rõhu langus
Suur soojusülekanne
Suur takistus

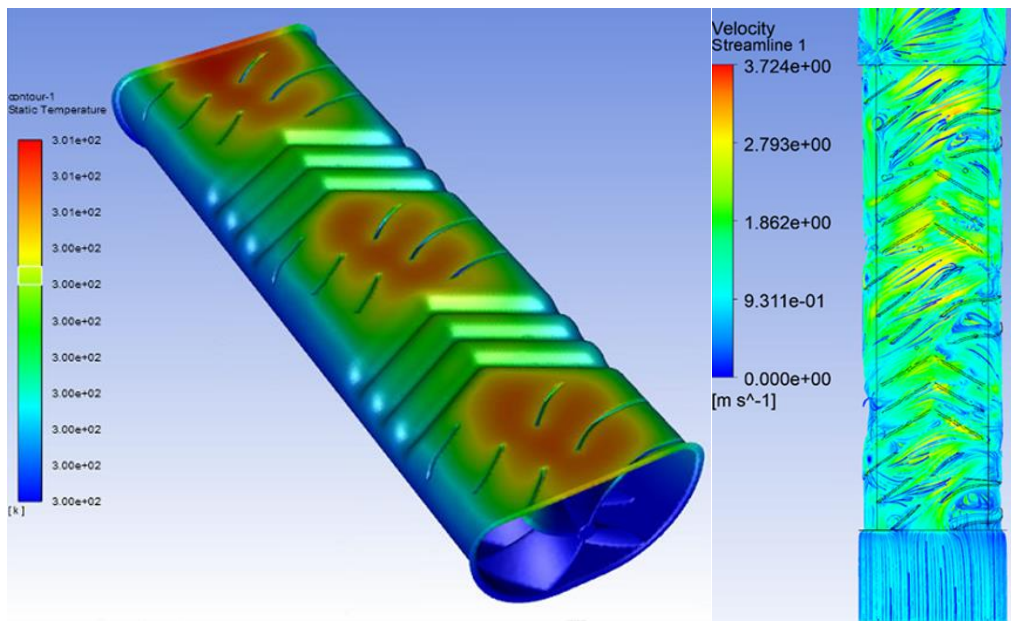
Eelnevalt näidatud valemitest ilmnes, et suurema soojusülekande teguri saamiseks tuleb suurendada Reynoldis arvu. Selleks tuleb muuta vesi võimalikult turbulentselt pinna lähedal, mida teeb Chevroni nurk. [17]

Versiooni 4 modelleeriti aladele, kus tekkisid soojusest kuumpunktid, 60° Chevron'i nurga geomeetria, säilitades labade geomeetria ja asetuses sarnaselt kolmandale versioonile. Lainetuse projekteerimisel jälgiti enim nurka 60° keskteljest mõõtes, mis on uurimustes katsetatud nurk [17]. Lained on näha Sele 15.



Sele 15 Versioon 3 Chevroni nurga geomeetria

Chevroni lainetusega kanal näitas analüüsis märgatavat erinevust. Sele 16 olevalt temperatuurimudelilt on näha, kuidas maksimaalne temperatuur pinnal, kus versioonil 3 oli temperatuuriks 300.84 K on nüüd koos lainetusega 300.24 K. Maksimaalne voolukiirus kanalis on kasvanud ja kohad, kus esines seisvat vett, on lainetuse tõttu kadunud.

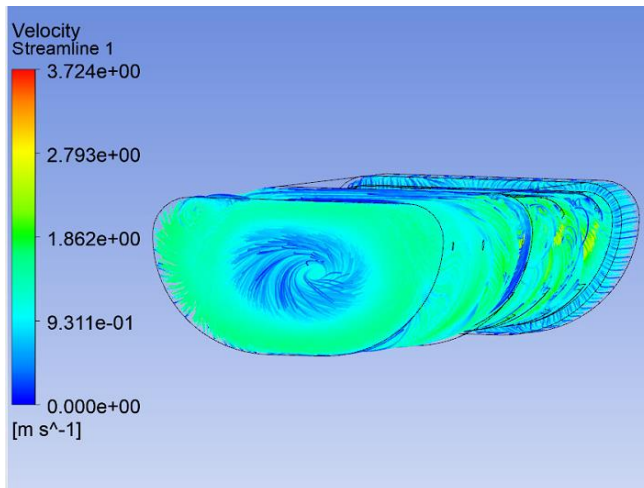


Sele 16 Versioon 4 Peopellerlabad koos Chevroni lainetusega.

Tulemusi edasi uurides selgub, et uued, kõrge temperatuuriga alad on labade vahel ning piirkonnas ei toimu nii intensiivset vee vahetust ja turbulentsete veevoolude tekkimist. Informatsiooni võetakse arvesse kogu jahutusplaadi projekteerimisel. Labad on head vedeliku segamiseks, kuid neid ei ole eeldatavasti vajakasutada niivõrd tihedalt, nagu praegustes katsemudelites tehtud on. Selle asemel on võimalus kasutada suuremat Chevroni nurga geomeetriaga ala ja labasid ainult kanali alguses.

3.4 Esialgsete analüüside tulemused

Sele 17 on näha, kuidas analüüsitud propellerlabade geomeetria tekitab kanalis turbulentset voolu. Samuti soojusvahetites kasutatav Chevroni nurk tekitab efektiivsema soojusülekanndeteguri ka jahutusplaadi puhul, sest vähendab seisva vee kihti lainelisel pinnal. Esialgsete ideede võrdlused on nähtavad Tabelis 3.3.



Sele 17 Turbulentne vool kanali sees

Tabel 3.3 Esialgsete ideede võrdlus

	Version 1	Version 2	Version 3	Version 4
Iseloomustav nimi	Sirge puhas kanal	Väiksed propellerlabad 15 kraadise nurgaall	Suuremad propellerlabad	Chevroni nurk
Maksimaalne temperatuur pinnal, (K)	301.454	300.959	300.84	300.58
Voolukiirus kanalis, (m/s)	1,432	2.326	3,961	3,724

Tabelis 3.3 nähtaval võrdlusel saab kinnitust seaduspära mida kiirem veevoolu kiirus, seda suurem on soojusülekanne. Samas peab arvestama turbulentsust, mida tekitab Chevroni geomeetria. Tulemusi arvesse võttes liigutakse edasi terve jahutuskanali analüüsimiseni, kus arvestatakse just Chevroni nurga tulemusi.

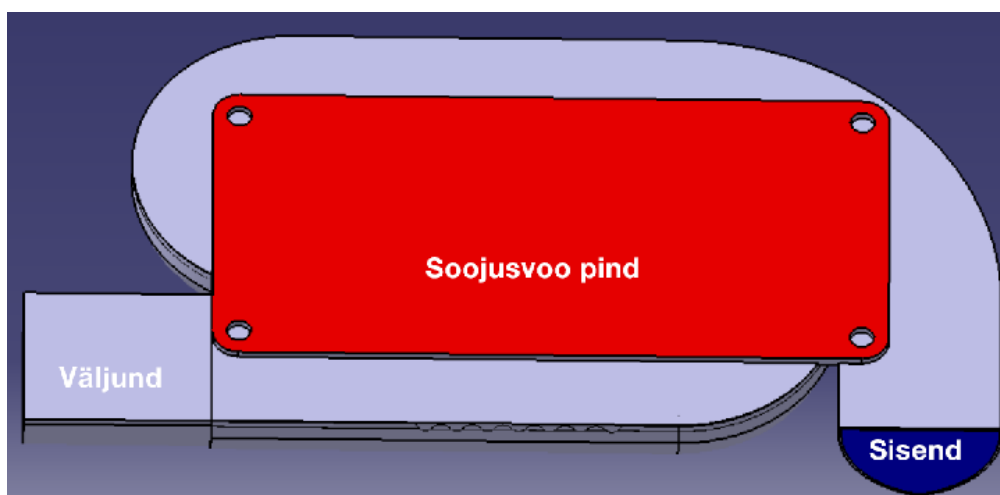
3.5 Terve jahutusplaadi analüüs

Terve jahutusplaadi analüüsimiseks võeti eesmärgiks analüüsida esimest vasakut jahutusplaati. Analüüsi piirtingimused säilisid samad, määrata tuli veekanalite sisend- ja väljundpinnad, sisenevad voolukiirused, vedeliku temperatuur ja soojusvoo pind koos soojusvoo hulga. IGBT-lt tulev soojusvoog on arvatud IGBT-lt eralduva maksimaalse võimsuse ja pinna pindalaga punktis 2.2. Sisend veevoolu kiiruse saame konsulteerides meeskonna jahutussüsteemi vastutava isikuga, tulenevalt jahutussüsteemis kasutatavast veepumba massihulgast. Kuna analüüsis materjali

määramisel detailile on oluline ainult soojusjuhtivustegur, siis on jäetud materjaliks tarkvara poolt määratud alumiinium millel on muudetud soojusjuhtivustegurit vastavalt AlSi10Mg andmetele. Piirtingimused ja andmed on nähtavad Tabelis 3.4.

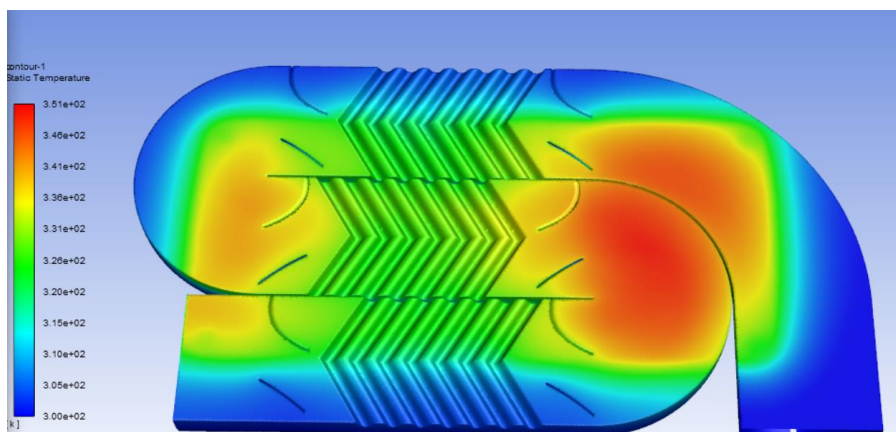
Tabel 3.4 Terve jahutusplaadi analüüsi piirtingimused

Sisend veevoolukiirus, (m/s)	0.144
Soojusvoog, (W/m ²)	142857
Väljund veevoolurõhk, (Pa)	0
Vedelik	Vesi
Detaili materjal	Alumiinium
Sisend veevoolu temperatuur, (K)	300

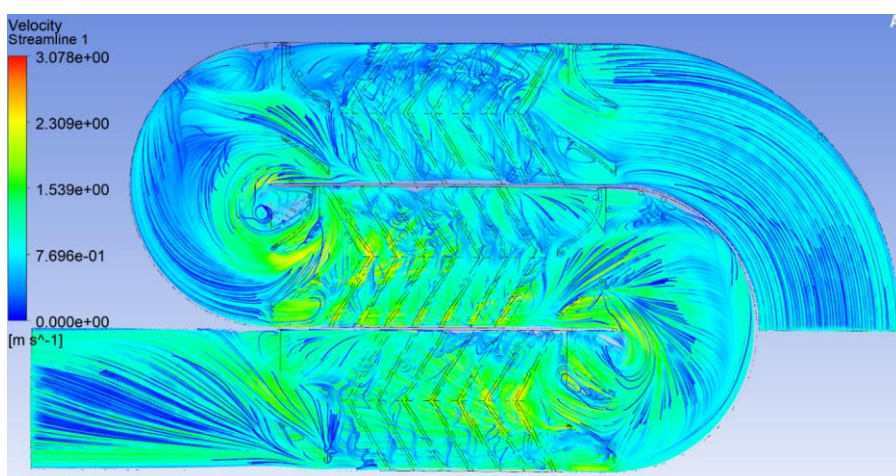


Sele 18 Jahutusplaadi analüüsi piirtingimused

Analüüsi mudelist on ära jäetud lõplikud sisend- ja väljundkanalid, et lihtsustada analüüsi. Esialgsetest analüüsides valideeritud ideedest leiti, et tuleb ära kasutada just sama kombinatsiooni Chevroni nurga ja propellerlabade vahelt. Selleks modelleeriti tervesse jahutusplaadi kanalisse propellerlabad vaheldumisi Chevroni nurgaga. Analüüsi tulemused on nähtavad Sele 20 ja Sele 20.

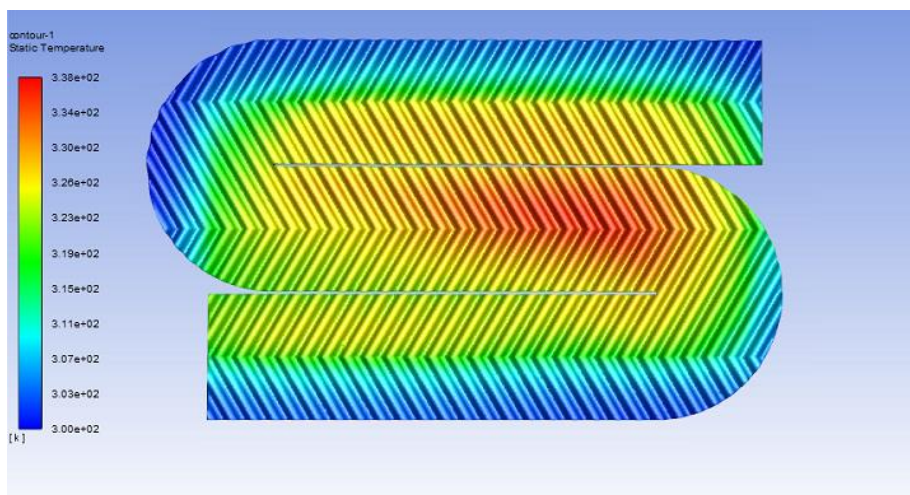


Sele 19 Versioon 1 jahutusplaadi analüüsi tulemus



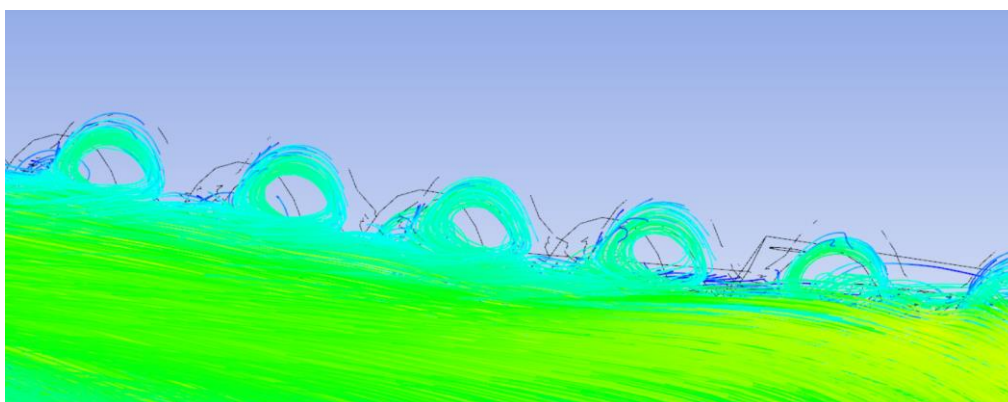
Sele 20 Versioon 1 jahutusplaadi veevool

Analüüsi tulemusest on selgelt näha, et kohad, kus Chevroni lainetus asetseb, on temperatuur võrreldes lainetuse pinnaga ligikaudu 10 K madalam. Samuti analüüsitud veevoolu tulemusest Sele 20 on ilmnenu veevoolu tagasipööretel veetühje kohti. Tulemusi arvesse võttes prooviti Chevroni lainetuse mõju ilma labasid kasutamata.



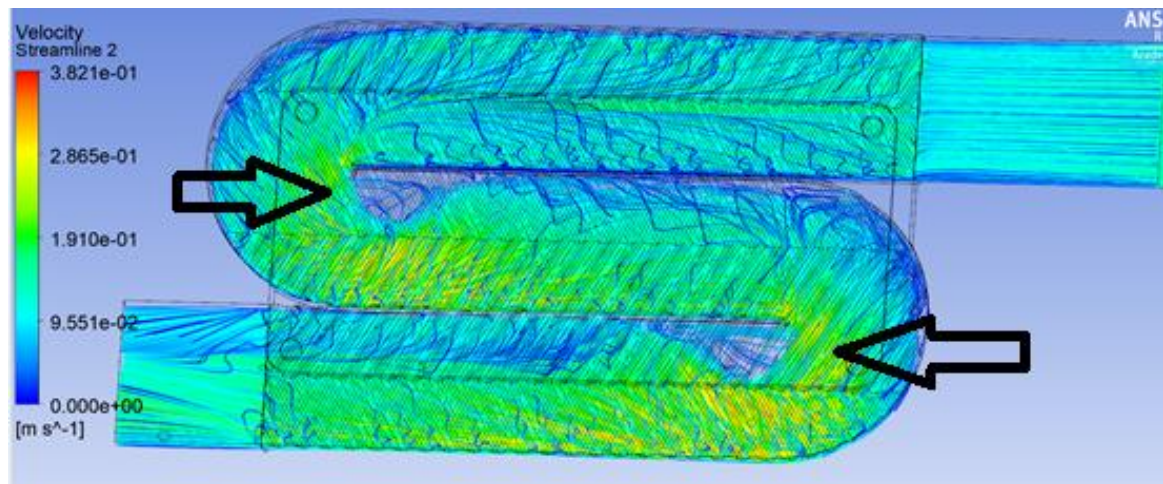
Sele 21 Chevroni lainetuse mõju jahutusplaadile

Analüüsi temperatuuri tulemustest on näha, kuidas Chevroni nurga kasutamine kogu pinna ulatuses langetab pinnapealset maksimaalset temperatuuri võrreldes esimese versiooniga 351 K juurest 338 K peale. Vaadeldes veevool, on näha põhjus temperatuuri langemisele Sele 22. Veevool lainetuste vahel on muutunud turbulentseks, mis annab hea soojusülekanndeteguri.



Sele 22 Vee liikumine lainetusel

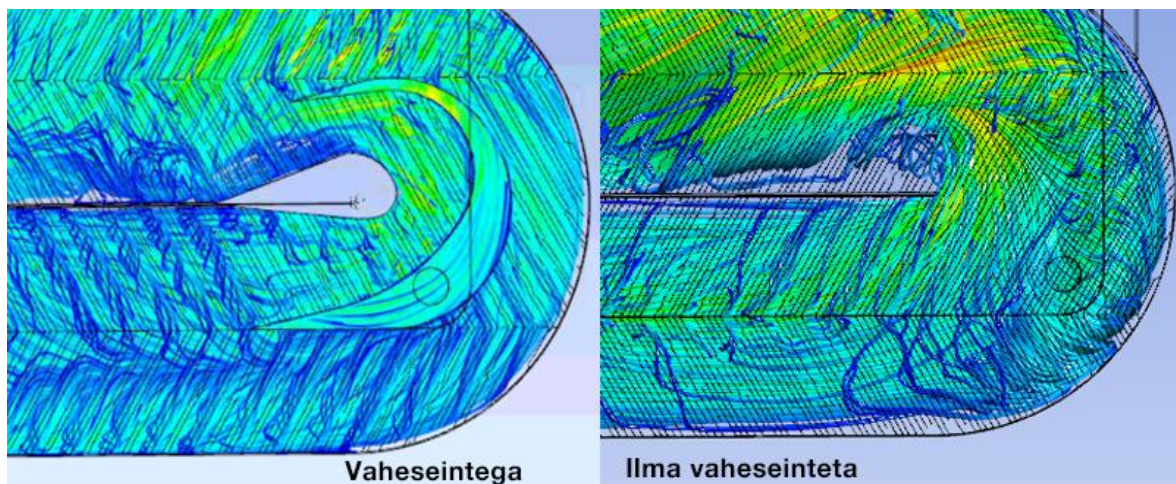
Analüüsi tulemusete põhjal saab öelda, et Chevroni lainetus võetakse kasutusele kogu IGPT pinna ulatuses. Järgmisena uuritakse vee liikumist mudeli tagasipööretel, kuna esimene versioon näitas, et tagasipööretel tekivad aeglase või seisva voolukiirusega piirkonnad. Sele 23 on näha tagasipööretel seisva vee alad, mida tuleb vältida, sest sellistes kohtades ei toimu soojusülekanndet.



Sele 23 Veetühjad kohad kanali tagasipööretel, näidatud nooltega

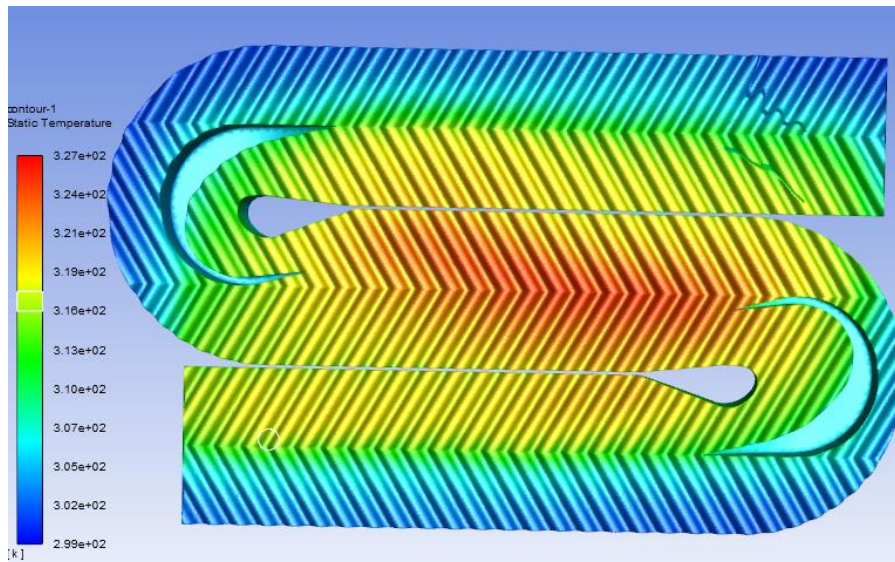
Aeglaste või seisvate veevooludega piirkonnad tekivad, kuna vedelik ei suuda täispööret vaheseina taha ilma suunamata teha. Vedelikul on samuti liikumisest tekkinud inertsus ning voolujooned ei muuda koheselt oma suunda, mistõttu liigub vesi kõigepealt otse vastu tagasipöörduvat kanali seinu ning alustab siis voolusuuna muutmist. Tulemusena kulgeb suunamuutus mööda kõige pikemat teepikkust mööda ja tagasipöörde keskele tekib seisva või väga aeglase vedelikuga piirkond.

Tagasipöörete parandamiseks modelleeriti kanalisse vaheribi, mis aitab veel tagasipööret teostada ja kaotab tühimikud. Samuti on kanali sisekurvi modelleeritud veetilgakujuline sein, et tekitada veele suurem pöörderaadius tagasipöörde lõpus. Modelleeritud geomeetrialet tehtud analüüs näitas tagasipööretel veevoolul ühtlasemat tulemust. Alljärgnevas võrdluses Sele 24 on näha, kuidas tagasipööretel on veevool muutunud ühtlasemaks tänu vaheseina ja lõike tegemisele.



Sele 24 Võrdlus, kanalid vaheseinaga ja ilma

Arvestades eelnevaid analüüse, otsustati koos tagasipöörde seintega lisada kanali algusesse katsetatud propellerlaba, mis sunnib vedelikukihte omavahel segunema. Tagasipööretele lisati kanalid ning terve jahutusplaadi ulatuses Chevroni nurk. Analüüsi tulemus on nähtav Sele 25 .



Sele 25 Viimane versioon jahutusplaadi analüüsist

Analüüsi maksimaalne pinnatemperatuur on langenud 327 K peale, mis on esimesest versioonist 24 K võrra madalam. Analüüsi võrdlustel Tabelis 3.5 on näha, kuidas Chevroni nurga ja propellerlaba koostöös on jahutustemperatuur langenud, mille tulemusena on soojusülekanne suurenenud. Võrdluses ilmneb ka nähtus, kus versioonis 2 ainult Chevroni lainetust kasutades on pinna temperatuur 10 K võrra suurem kui viimases versioonis 3. Nähtusest võib järeldada, et kuna kanali geomeetria on võrreldes Chevroni lainetusega küllaltki kõrge, on kanalisse vaja propellerlaba, mis sunniks vedelikul seguneda ka kõrgemates kihtides kui ainult lainetusel.

Tabel 3.5 Võrdlus terviklike jahutusplaatide analüüsiga

	Versioon 1	Versioon 2	Versioon 3
Maksimaalne pinna temperatuur, K	351	338	327
Maksimaalne voolukiirus, m/s	0,307	0,382	0,451
Muudatus	Vaheldumisi laba ja lainetus	Ainult lainetus tervel pinnal	Lainetus koos ühe laba ja vaheseintega

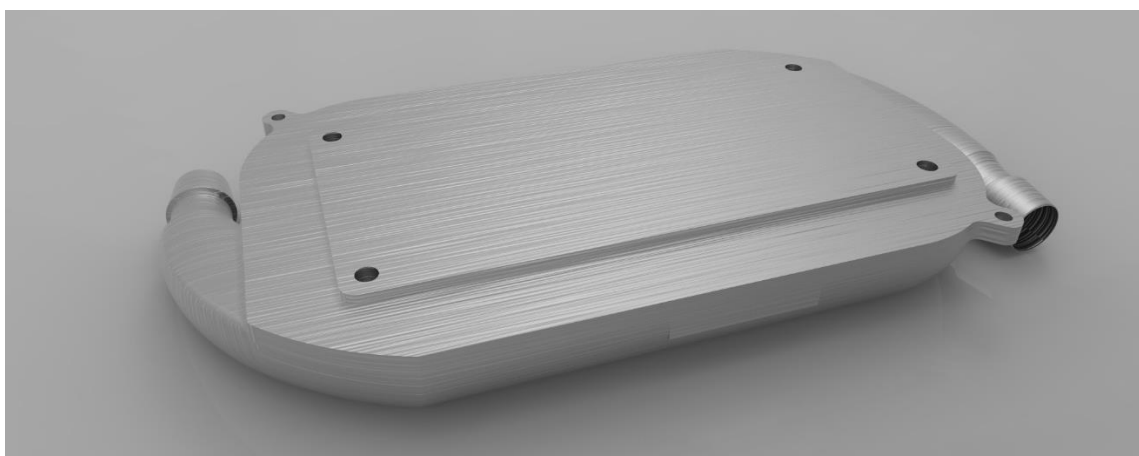
4. LÕPLIKU GEOMEETRIA PROJEKTEERIMINE

Enne jahutusplaadi tootmist tuleb analüüsitud mudel modifitseerida tootmiskõlblikuks. Mudelisse tuli sisend- ja väljundkanalid modelleerida arvestades kõrval asuva jahutusplaadi ja üldise voolikute asetusega jahutusplaatide vahel.

Esmalt projekteeriti jahutusplaadile sisend- ja väljundkanalid. Nende projekteerimisel võeti arvesse vooliku paksust, et kanalid paigutada võimalikult jahutusplaadi lähedale, kuid arvesse ei võetud printimiseks vajalikke kaldenurki, sest nendest osadest on võimalik tugistruktuur eemaldada. Kanalite kuju on projekteeritud jahutusplaadi kanali kujult üle minema geomeetria, mis on sobiv liitmikule.

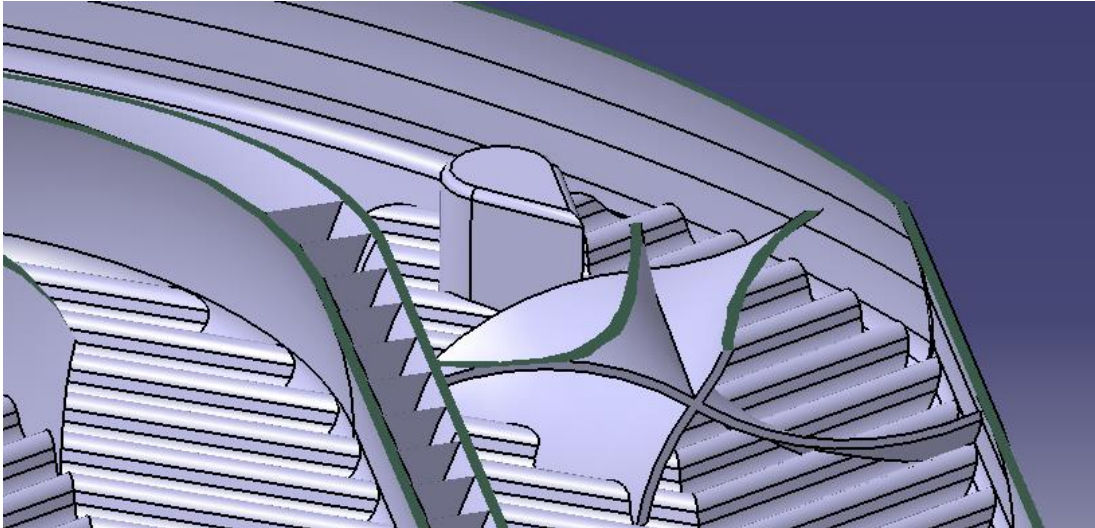
Teisalt tuli jahutusplaadile modelleerida kinnitusavad. Jahutusplaadid kinnituvad kontrolleri külge kahest kohast. Esmalt kinnitatakse jahutusplaat nelja poldiga IGBT avadest, tagades võimalikult hea kontaktpinna IGBT ja jahutusplaadi vahel. Teisalt kinnitub jahutusplaat kontrolleri külge, et vältida olukorda, kus jahutusplaat toetab ainult IGBT peale mis omakorda koormaks inverteri trükkplaate.

IGBT neli kinnitusava asetsevad jahutusplaadi kanalite keskel, kuna kanali laius on 30 mm ja kanal asetseb igalt küljelt 15 mm üle IGBT ääre. Kaks kinnitust on võimalik ilma kanali veevoolu takistamist paigutada vaheseinte sisse, mis projekteeriti, et veevoolu tagasipööretel soodustada. Teised kaks asetsevad sisend- ja väljundkanalite keskel, mis tähendab, et kinnitused tuleb modelleerida kanalisse nii, et need segaks veevoolu võimalikult vähe. Kinnituste asetus on nähtav Sele 26. Veel tuli projekteerida kontrolleri kinnitamiseks kõrvad. Kinnitamiseks projekteeriti kaks kinnituskõrva, mille eesmärk on vähendada jõudu, mis mõjub inverteri trükkplaadile.



Sele 26 Jahutusplaadi IGBT poolne pind

IGBT kinnitused on 10 mm sügavad, millest kahel juhul sisend- ja väljundkanalil ulatub kanalisse 8 mm. Uurides, millised geomeetriad on kõige väiksema takistusega, leiti, et veetilgale sarnane geomeetria on kõige väiksema takistusteguriga [18]. Selleks modelleeriti kinnituste ümber veetilga kuju, mis on nähtav Sele 27.



Sele 27 Kinnitusava paigutus jahutuskanali sees

5. JAHUTUSPLAATIDE VÕRDLUS

Tõestamaks, et 3D-prinditud jahutusplaat koos väljatöötatud geomeetriatega on efektiivne, tuleb omavahel võrrelda kahe hooaja jahutusplaate. Antud tüüpi soojusülekanne analüüsi ei ole varasematel jahutusplaatidel katsetatud, mis raskendab võrdlemist, kuid mõlemad jahutusplaadid on olnud katsetuses rajasõidul AMK jõuülekandega. Temperatuurianduritelt saadud tulemusi võetaksegi võrdlemisel kasutusse.

Võrdlemaks temperatuurianduritelt saadud tulemusi kahel erineval jahutusplaadil, tuleb valida sarnate oludega peetud testpäev. Valituks osutus 18.06.2018 testipäev vormeliga FEST18 ja 20.05.2019 testipäev vormeliga FEST19. Vaadeldes Riikliku Ilmateenistuse andmeid on valitud päevade õhutemperatuurid vastavalt 18.06.2018 21.6°C ja 20.05.2019 21.8°C [19]. Õhutemperatuuri sarnasus annab eeldused võrdseteks oludeks. Eeldused selleks loovad ka jahutussüsteemis kasutatav sama tootja veepumba mudel ja radiaatorid. Ainsaks erinevuseks on IGBT jahutamiseks projekteeritud jahutusplaat.

Temperatuurianduritest võrreldakse kahe erineva aasta jahutusplaadile paigutatud temperatuurisensoreid. Temperatuurianduritelt kogutavad andmed liiguvad mööda vormeli sõnumipõhist protokolliga andmekogumisseadmesse Gems [20]. Gemi tarkvaras Data Analysis analüüsitakse ja võrreldakse iga IGBT temperatuurisensori andmeid mõlema vormeli puhul. Tabelis 5.1 on näidatud FEST18 ja FEST19 vormelitel IGBT temperatuuri iga ringi lõpus.

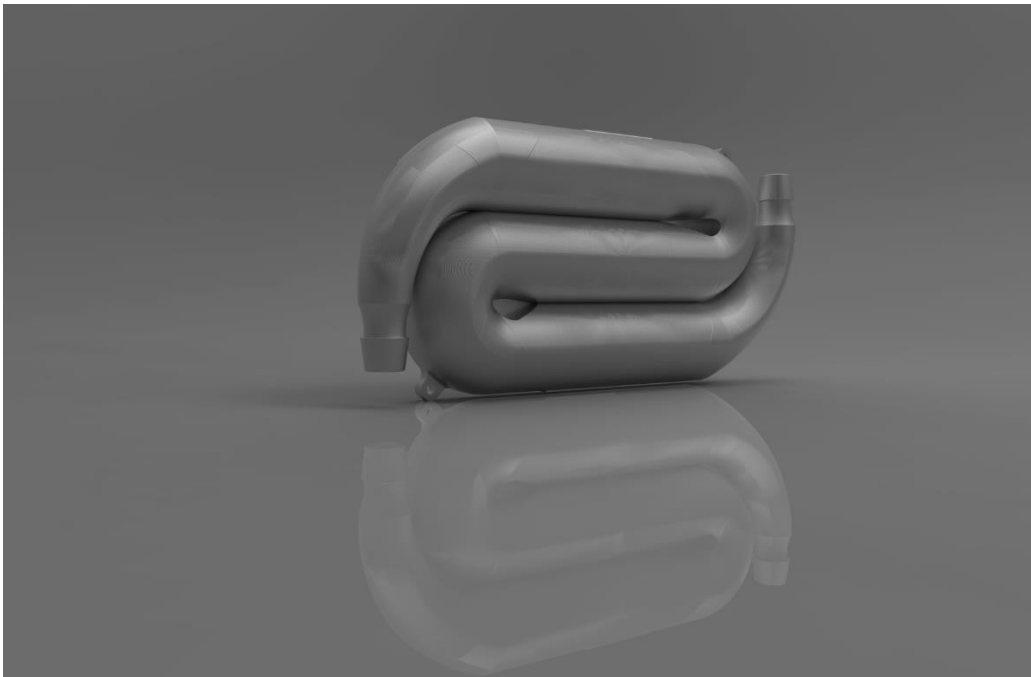
Ainuke erinevus FEST19 testiga võrreldes FEST18 testsõiduga on vormelile määratud maksimaalne võimsuse piir, mis on FEST18-l 10kW madalam. Temperatuure vaadeldakse, kui mõlemad vormelid on läbinud viis ringi rajal. Viienda ringi lõpus on näha erinevust IGBT-l olevatest andurite näitudest. Projekteeritud jahutusplaatide temperatuur on jäänud pidama 50.5°C juurde, kuid FEST18 jahutusplaadi temperatuur on tõusnud üle 56 °C. Lisaks on temperatuurid madalamad sõites ka 10 kW suurema maksimaalse võimsusega, millest võib järeldada, et jahutusplaatide soojusülekande tegur on suurenenud ning soojusülekanne toimub madalama temperatuurivahemiku juures.

Tulemused näitavad, et selle hooaja jahutusplaadid on tõhusamad ja suurema soojusülekande teguriga, kuna soojusülekanne toimub madalama temperatuurivahemiku juures. Metallprintimistehnoloogiat kasutades on olnud võimalus luua keerulisi geomeetriaid, millel on suurem soojusülekande tegur. Võistlusauto temperatuurianduritelt saadud tagasiside näitab, et analüüsitulemustes nähtud madalam IGBT pinna temperatuur vastab ka tõele. Saadud 327 K on

53,85°C, mis on väga lähedane tulemus tegelikult saadud tulemustele 50°C – 52°C. Seel 27 on näidatud projekteeritud IGBT lõplik disain.

Tabel 5.1 IGBT temperatuuriandurite võrdlus iga ringi lõpus

	FEST 18 (°C)	FEST 19 (°C)
1 Ring	33,2	41,7
2 Ring	47,6	43,7
3. Ring	50,5	46,3
4. Ring	54,7	48,5
5. Ring	56,6	50,5



Sele 27 Projekteeritud IGBT lõplik disain

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö teemal „jahutusplaadi projekteerimine tudengivormelile FEST19“ eesmärgiks oli projekteerida efektiivsem jahutusplaat Formula Student Team Tallinn viimasele ja kõige uuemale vormelile ning sellega koos valideerida 3D-printimist kui tehnoloogiat erilahendustega jahutussüsteemide valmistamisel.

Enne jahutusplaadi projekteerimise alustamist valiti välja tootmismeetod, millega jahutusplaat toodetakse. Kuna eelnevatest aastatest on ilmnunud, et freesimine piirab jahutusplaadi kanali projekteerimisel keeruliste geomeetria loomist, otsustati valida tootmismeetodiks 3D-printimine. 3D-Printimine annab vabaduse modelleerida geomeetriaid väiksemate piirangutega võrreldes teiste tootmismeetoditega.

Veel enne analüüsideni jõudmist määrati lähteparameetrid tulenevalt nii võistlussarjast tulenevatest reeglistest, kui kasutatavast jõuülekandest. Kirjeldati eelnevat süsteemi ja jahutusplaate, mida võrreldakse projekteeritava jahutusplaadiga. Toetudes soojusülekanne valemitele, kirjeldatakse, milliseid parameetreid tuleb edasises töös geomeetria modelleerimisel meeles pidada, et soojusülekanne jahutusplaadil suureneks.

Järgmise sammuna, toetudes lähteparameetrites leitud valemitele, liiguti esialgsete ideede analüüsimise juurde. Analüüsi ressursi ja aja kokku hoidmiseks teostati neid kahes osas – esialgsete ideede valideerimine ja terve jahutusplaadi analüüsimine tarkvaras ANSYS 19.2. Mudelid on modelleeritud tudengivormeli meeskonnas kasutatava tarkvaraga CATIA V5. Esimeste ideedena asuti katsetama propellerlaba lahendust, et tõsta turbulentsust terves kanalis. Esimeste tulemustega nähti, et kasutada tuleb ainult paari propellerlaba kanalis, vastasel juhul hakkavad tekkivad keerised üksteist segama. Kuna tulemustega ei saavutatud pinnatemperatuuril märgatavat muutust ning pinnale tekkisid kuumkohad, asuti uurima lahendusi, kuidas pinnatemperatuuri veel madalamaks tuua. Leiti, et soojusvahetites kasutatav Chevroni nurga geomeetria tasub proovimist.

Uurimustest leitud Chevroni nurga kirjeldused ja katsetused erinevate nurkadega kasutati ära lainetuse kanalisse projekteerimisel. Chevroni nurga geomeetria tõi pinnale märgatava muutuse temperatuuris kuna tekitab kanali sisse turbulentsu voolu. Chevroni nurga tulemusi arvesse võttes otsustati minna edasi terve jahutusplaadi analüüsimiseni.

Tervikliku jahutusplaadi analüüsimisel tuli välja, et Chevroni nurga geomeetria IGBT poolisel pinna langetab temperatuuri märgatavalt. Analüüsist ilmusid aga probleemid veevooluga jahutusplaadi

kanalis. Tagasipööretel tekkisid seisva veevooluga tühimikud, mis parandati suunavate kanalite projekteerimisega.

Lisades jahutussüsteemi kanali algusesse koos chevroni nurgaga ka propellerlaba on näha ligemale 10 K suurust erinevust pinnatemperatuurist. Järgmiseks projekteeriti jahutusplaadile sisend- ja väljundkanalid ning kinnituspunktid.

Lõpliku tulemuse saamiseks tuli detaile katsetada reaalses rajaolukordades. Selleks sõideti vormeliga 5 ringi ja koguti andmeid temperatuurianduritelt. Võrdluseks kahe jahutusplaadi vahel valiti kõige võrdsemate oludega testpäevad, kus isegi õhutemperatuur ei erineks rohkem kui kraadi võrra. Testipäevade tulemusena on näha projekteeritud ja eelneva jahutusplaadi vahel ligi 5°C erinevust. Testandmed kinnitavad ka jahutusplaadi analüüsi õigsust, kuna temperatuurid on vastavalt katsetusele 50°C-52°C ja analüüsis 53,85°C, mis on väga lähedane tulemus rajaolukorra ja analüüsi tulemuste vahel.

Kokkuvõtteks võib öelda, et projekteeritud FEST19 jahutusplaat täitis püstitatud eesmärgid. Valmis saadi neli jahutusplaati vormelile FEST19, mis töötavad efektiivsemalt kui eelnevad. Samuti sai tõestust, et erilahendustega jahutussüsteemides on võimalik kasutada tootmismeetodina 3D-printimist, et anda inseneridele suurem projekteerimisvabadus.

SUMMARY

The aim of the bachelor thesis *Cooling plate design for Formula Student class car FEST19* was to design a higher heat transfer rate cooling plate compared to the last seasons solution on the vehicle. The second aim of this bachelor thesis is to validate 3D-printing as a production method.

The first step was to choose the production method. Last years experiences with milled cooling plates showed that milling has many restrictions. Because of the designing freedom that engineers can have when using 3D-printing was the reason to choose 3D-printing as the production method.

Before starting with the design process, initial parameters were chosen while keeping in mind the rules from the competition as well as the motors and inverters used in formula vehicle FEST19. Last years cooling plate was described, which was later compared to the cooling plate designed for FEST19. Based on heat transfer formulas, it was studied which parameters should be kept in mind when designing the geometries in order to increase heat transfer coefficient in the cooling plate.

Based on the heat transfer formulas and parameters, first model analyses were made. In order to save time and resources, the analysis were completed in two parts. The validation of the initial ideas as well as the analysing of the cooling plate was carried out using ANSYS 19.2 and CATIA V5 software. Firstly, a propeller blade geometry was designed to increase Reynold's number in the cooling plate. The results showed that only a few blades must be used, otherwise the turbulent flows will collide and affect each other. Because the results with propeller blades did not show noticeable results on the IGBT surface temperature, it was found that the Chevron angle geometry that is used in the plate heat exchangers might be a potential solution to decrease the surface temperature.

Studies of Chevron angle geometries were kept in mind when designing Chevron angle into the IGBT surface. The analyse results with geometries made a noticeable difference in temperature as it creates a turbulent flow in the canal.

3 analysis were made with the complete cooling plate. Results showed that using the Chevron angle by itself instead of alternating the angle with the blades has higher heat transfer and lower temperature all over the IGBT surface. Analysis showed also a problem with the flow in the curve where waterflow was very slow. To fix the problem, wall geometries were made to help turn the water flow.

Combining Chevron angle geometry and one propeller blade in front of the inlet showed a decreasing temperature by 10 K compared to the analysis where Chevron angle was used by itself. The final solution was tested in the track, where five laps were completed and data from


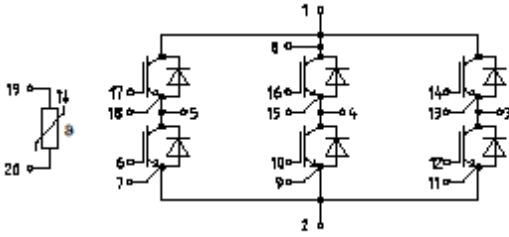
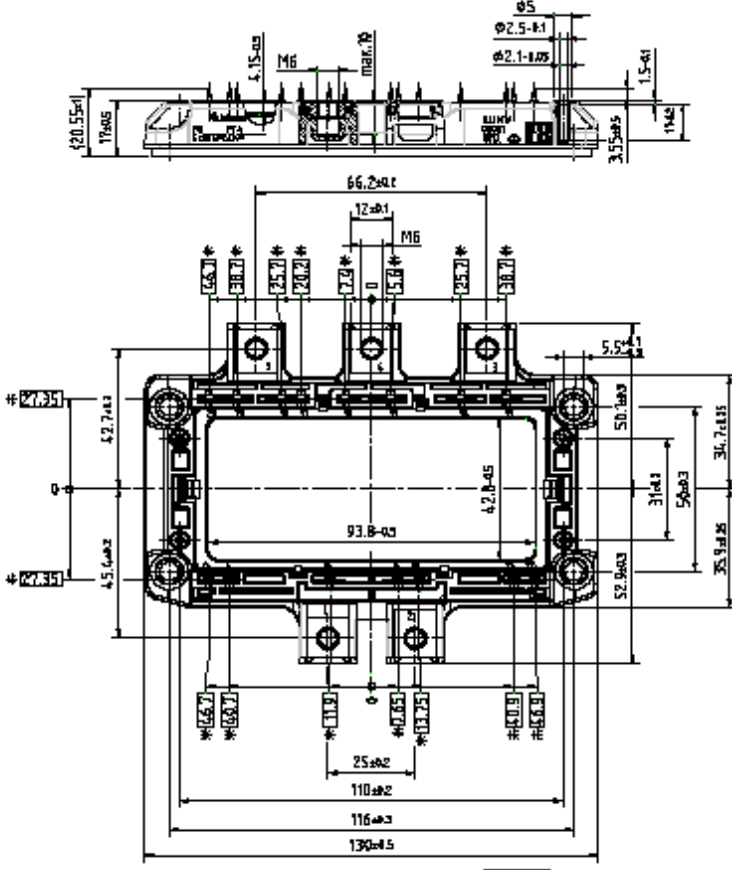
temperature sensors was gathered. To compare the two cooling plates, two testing days with similar conditions were chosen. Testing days results showed that the cooling plate designed for FEST19 has a higher heat transfer coefficient. Compared to FEST18, the designed cooling plate has a five degree lower temperature at the end of the five laps.

In conclusion, the designed cooling plate for formula vehicle FEST19 fulfilled the set aims. The tests showed a decrease in the temperature. In total, four cooling plates were made for FEST19 which show improved results compared to last seasons cooling plates, validating 3D-printing as a proper production method for custom solutions.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] F. Germany, „FS Rules 2019 V1.1,“ 2019. [Võrgumaterjal].
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FSRules_2019_V1.1.pdf.
[Kasutatud 07 Mai 2019].
- [2] 3. Hubs, „3D Hubs,“ [Võrgumaterjal]. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>. [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [3] 3. Systems, „3D Systems,“ [Võrgumaterjal]. <https://www.3dsystems.com/selective-laser-sintering>.
[Kasutatud 12 Mai 2019].
- [4] Formlabs, „Formlabs,“ [Võrgumaterjal]. <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>. [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [5] „Sculpteo,“ [Võrgumaterjal]. <https://www.sculpteo.com/en/glossary/selective-laser-melting-definition/>. [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [6] „3Space,“ 27 12 2018. [Võrgumaterjal]. <https://3space.com/blog/pros-and-cons-of-3d-printing/>.
[Kasutatud 12 Mai 2019].
- [7] ALL3DP, „ALL3DP,“ [Võrgumaterjal]. <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>.
[Kasutatud 12 Mai 2019].
- [8] S. S. G. AG, „SLM Solutions,“ SLM SOLUTIONS GROUP AG, [Võrgumaterjal]. <https://www.slm-solutions.com/en/products/machines/slmr280-20/>. [Kasutatud 12 05 2019].
- [9] S. S. G. AG, „SLM Solutions,“ SLM SOLUTIONS GROUP AG, [Võrgumaterjal]. https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Al-Alloy_AISi10Mg_0219.pdf. [Kasutatud 25 Aprill 2019].
- [10] F. Germany, „Formulastudent,“ Formulastudent Germany, [Võrgumaterjal].
<https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>. [Kasutatud 07 05 2019].
- [11] A. Group, „AMK RACING KIT 4 wheel drive "Formula Student Electric",“ AMK Group, 2016.

- [12] Infineon, 11 11 2013. [Võrgumaterjal]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS200R12PT4-DS-v02_02-en_de.pdf?fileId=db3a30432239cccd01230df5d3f555e9. [Kasutatud 07 Mai 2019].
- [13] J. Monteith, „sciencing,“ 13 Märts 2018. [Võrgumaterjal]. <https://sciencing.com/calculate-heat-flux-6494497.html>. [Kasutatud 10 Mai 2019].
- [14] Y. A. Cengel, Heat Transfer.
- [15] ScienceDirect, „ScienceDirect,“ [Võrgumaterjal].
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/propeller-blade>. [Kasutatud 10 Mai 2019].
- [16] A. Laval, „Alfa Laval,“ [Võrgumaterjal]. <https://www.alfalaval.com/microsites/gphe/tools/plate-types/>. [Kasutatud 17 Mai 2019].
- [17] K.-J. B. O.-K. K. Ting Chen, „Effect of chevron angle on heat transfer performance in,“ 21 Aprill 2017.
- [18] NASA, „National aeronautics and space administration,“ [Võrgumaterjal].
<https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/shaped.html>. [Kasutatud 17 Mai 2019].
- [19] K. R. I. Ilmaproгноoside, „Riigi Ilmateenistus,“ [Võrgumaterjal].
<http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/#>. [Kasutatud 19 Mai 2019].
- [20] GEMS. [Võrgumaterjal]. <https://gems.co.uk/>. [Kasutatud 21 Mai 2019].

<p>Technische Information / Technical Information</p> <p>IGBT-Module IGBT-modules</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">FS200R12PT4</p>					
<p style="text-align: right; font-weight: bold;">Vorläufige Daten Preliminary Data</p>					
<p>Schaltplan / circuit_diagram_headline</p> 					
<p>Gehäuseabmessungen / package outlines</p>  <p style="text-align: center;">* = alle Maße mit einer Toleranz von ± 0.4</p>					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 2px;">prepared by: MK</td> <td style="width: 50%; padding: 2px;">date of publication: 2013-11-11</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">approved by: MK</td> <td style="padding: 2px;">revision: 2.2</td> </tr> </table>		prepared by: MK	date of publication: 2013-11-11	approved by: MK	revision: 2.2
prepared by: MK	date of publication: 2013-11-11				
approved by: MK	revision: 2.2				