



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## 3D PRINTERI EKSTRUUDERI ARENDUS

DEVELOPMENT OF 3D PRINTER EXTRUDER  
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Sander Mitendorf

Üliõpilaskood: 134250MAHB

Juhendaja: Ahti Põlder

Tallinn, 2017.a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis nooremteadur Ahti Põlderi juhendamisel

`` ..... ``.....2017 .a

Töö autor

Sander Mitendorf

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

`` ..... ``.....2017 .a

Juhendaja

Nooremteadur, Ahti Põlder

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava komisjoni esimees

`` ..... ``.....2017.a

..... allkiri

TTÜ mehhatroonikainstituut  
Mehhatroonikasüsteemide õppetool  
**BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

2017. aasta sügissemester

Üliõpilane: Sander Mitendorf 134250MAHB  
Õppekava: MAHB02/13  
Eriala: Mehhatroonika  
Juhendaja: Nooremteadur, Ahti Põlder  
Kaasjuhendaja: Insener, Dhanushka Liyanage

**LÕPUTÖÖ TEEMA:**

3D printeri ekstruuderi arendus  
Development of 3D printer extruder

**Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Olemasolevate lahenduste analüüs nende võimalused ning puudused. Uudsete lahenduste analüüs ning rakendamise võimaluste hinnang.	30.10.2016
2.	3D printeri ekstruuderi ühe võimaliku kontseptsioonilahenduse valik. Teostatava lahenduse detailsem kirjeldus koos eskiisidega ning vajadusel esialgsed katsetused.	13.11.2016
3.	Prototüübi projekteerimine, valmistamine ja testimine.	11.12.2016
4.	Prototüübi puuduste kõrvaldamine ning lahenduse täiendamine.	25.12.2016
5.	Töö vormistamine, trükkimine ja köitmine.	09.01.2017

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

3D printeri lootustandvaima ekstruuderi lahenduse valik ning selle prototüübi valmistamine. Erinevate sõlmede projekteerimine, valmistamine ning testimine. Töö peamine eesmärk on luua 3D printerile lisaväärtus läbi täienenud või uudse printitava materjali käsitlemisviisi.

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistaoitus esitada hiljemalt: 19.12.2016

**Töö esitamise tähtaeg** 10.01.2017

**Üliõpilane:** Sander Mitendorf /allkiri/..... kuupäev.....

**Juhendaja:** Ahti Põlder /allkiri/..... kuupäev.....

# SISUKORD

<b>EESSÕNA .....</b>	<b>6</b>
<b>SISSEJUHATUS.....</b>	<b>7</b>
<b>1. FDM PRINTERITE ÜLDINE KIRJELDUS.....</b>	<b>8</b>
1.1 Mõned mitut materjali printivad printepaad .....	10
1.2 Arendatava ekstruuderi lõpplahenduse hüpotees.....	13
<b>2. EKSTRUUDERI MEHAANIKA .....</b>	<b>14</b>
2.1 Materjali liigutamine.....	14
2.1.1 Materjalide vajalike liikumiste kiiruste arvutamine .....	14
2.1.2 Samm mootori vajalike kiiruste arvutamine.....	15
2.1.1 Materjali ja fiibri liigutamiseks sobilike samm mootorite valik.....	16
2.2 Fiibri liigutamismehhanismi ja lõikamissüsteemi projekteerimine .....	18
<b>3 EKSTRUUDERI ELEKTROONIKA JA VAJAMINEVATE ELEKTROONIKAKOMPONENTIDE VALIK .....</b>	<b>21</b>
3.1 Mikrokontrolleri valik.....	21
3.2 Samm mootori juhtimiseks vajalikud komponendid .....	21
3.3 Temperatuuri kontroll ja küttekeha lülitamine .....	22
3.4 Katseseadme elektroonikaskeem .....	25
<b>4 JUHTPROGRAMMI KIRJELDUS .....</b>	<b>26</b>
4.1 Katseseadme algoritm.....	26
4.2 Programmi detailsem kirjeldus .....	26
<b>5 FIIBRI LISAMISE VÕIMALIKUD MEETODID JA NENDE KATSETAMINE .</b>	<b>29</b>
5.1 Fiibri lisamine materjaliga ühest kanalist. ....	29
5.2 Fiibri lisamine peale samm mootorit .....	29
5.3 Fiibri lisamine läbi modifitseeritud kuuma osa .....	31
5.4 Esialgsete katsete kokkuvõte .....	32
5.5 Uue düüsi projekteerimine lähtudes katsetuste tulemustest .....	33
<b>6 MAJANDUSLIKUD – JA OHUTEGURID .....</b>	<b>34</b>
<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>35</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>36</b>
<b>KASUTATUD ALLIKAD .....</b>	<b>37</b>

<b>LISAD.....</b>	<b>39</b>
Lisa 1 Samm mootori andmeleht.....	40
Lisa 2 Katseseadme juhtprogramm .....	41
Lisa 3 Temperatuuri kontroll ja küttekeha algoritm.....	44
Lisa 4 Mootori juhtimine vastavalt nupu vajutusele algoritm.....	45

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema kujunes välja Tallinna Tehnikaülikooli algatusel mõelda välja tehnoloogia arendamiseks 3D printeri ekstruuderit nii, et sellega oleks võimalik printida mitmete materjalide kombinatsioone.

Kuna 3D printerite valdkond oli autori jaoks täiesti võõras teema, siis tänatakse Ahti Põlderit, kes jagas palju näpunäiteid, mis on oluline ja mida tuleb printimise juures jälgida. Antud teemasse süübitades tekkis autoril selle valdkonna vastu väga suur huvi ning kindlasti soetab töö autor võimaluse korral endale ka 3D printeri teadmiste kinnitamiseks. Ahti Põlderit sooviks autor tänada veel ka väga hea juhendamise eest. Tänu temale on see töö lõpuks kokku saanud. Lisaks sellele tänatakse ka Tallinna Tehnikaülikooli katsetamiseks vajalike seadmete ja materjalide võimaldamise eest.

## SISSEJUHATUS

3D printimise puhul on tegemist kolme dimensiooniliste objektide valmistamisega digitaalse faili põhjal. Tegemist on üha populaarsemaks muutuva valdkonnaga. Objektist valmistatakse *CAD* fail. Seejärel muudetakse valmistatud fail spetsiaalse tarkvara abil printerile sobivaks ning objekt on valmis printimiseks [1].

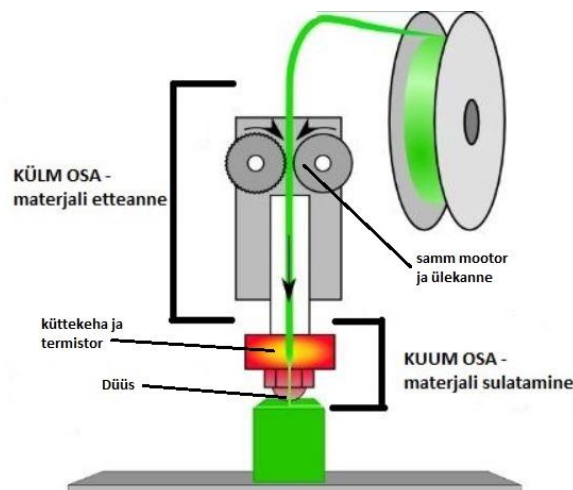
3D printerite põhiline kasutusvaldkond on prototüüpimine, kuid üha enam soovitakse neid kasutada ka lõpp toodete valmistamisel. Selleks on vaja aga oluliselt tõsta prinditavate materjalide kvaliteeti. Antud töös katsetatakse ning püütakse valmistada FDM (*fused deposition modelling*) printerile sobiv võimalikult odav ning lihtne lahendus klaasfiibri prindile lisamiseks. FDM tüüpi printerile just seetõttu, et tegemist on suhteliselt odava ning laialdast kasutust leidva meetodiga. Fiibri lisamine valiti seetõttu, et antud lahendusega printereid on hetkel turul väga vähe. Samuti annab fiibri lisamine printerile juurde palju lisandväärtust just kõrgema kvaliteediga materjalide saavutamisel. Üheks tuntuimaks ning hetkel ka ainukeseks ettevõtteks, kelle desktop printerid suudavad printida fiibrit lisades, on MarkForged. Nende printerid maksavad aga tuhandeid eurosid.

Töö peamiseks ülesandeks on katsetada erinevaid võimalusi klaasfiibri lisamiseks prindile. Selle jaoks luuakse katsestend, mis imiteerib reaalselt 3D printeri ekstruderit. Kirjeldatakse ekstruderit elektroonikat, mehaanikat ja ka juhtimist, viiakse läbi katsed ning valitakse kõige parem lahendus, mida võiks hiljem ka printeri külge lisada. Analüüsitakse nii katsetatud lahendusi kui ka ideelahendusi, mida kahjuks katsetada ei olnud võimalik. Antud juhul lõplikku lahendust printerile külge ei lisata.

# 1. FDM PRINTERITE ÜLDINE KIRJELDUS

FDM printer prindib 3-mõõtmelise objekti surudes samm mootori ja etteande süsteemi abil düüsisist välja joa sulatatud materjali. Materjal paigutatakse kiht-kihi haaval üksteise peale kasvades alt üles valmistades soovitava objekti [8]. Enim levinud prinditavateks materjalideks FDM printerite puhul on termoplastikud. Populaarsemateks termoplastikuteks on PLA ning ABS, kuid kasutatakse ka väga palju teisi plastmaterjale näiteks nailon, PVA (polüvinüül alkohol), polükarbonaat, TPU (termoplastiline polüretaan) jne. Väga populaarseks on saanud ka erinevad komposiitmaterjalid, näiteks erinevad fiibriga tugevdatud materjalid. [18]

3D printeri ekstruuderil eristatakse kahte osa, milleks on külm – ning kuum osa (sele 1.1). Ekstruuderi külm osa on mõeldud eelkõige materjali liigutamiseks ning kõikide teiste ekstruuderi osade kandmiseks. Külm osa koosneb tavaliselt samm mootorist ning ülekandest. Külm osa asub kas printeri kere küljes või siis liigub koos printepeaga kaasa. Teise osana on ekstruuderil kuum osa. Kuuma osa kutsutakse ka kui aktiivset osa, mille peamine eesmärk on materjali sulatada küttekeha abil. Kuuma osa abil surutakse sulanud plastik läbi düüsi printelauale, millest kiht-kihi haaval valmistatakse soovitav objekt. Materjali liikumine toimub külmast osast kuuma ossa. [2]

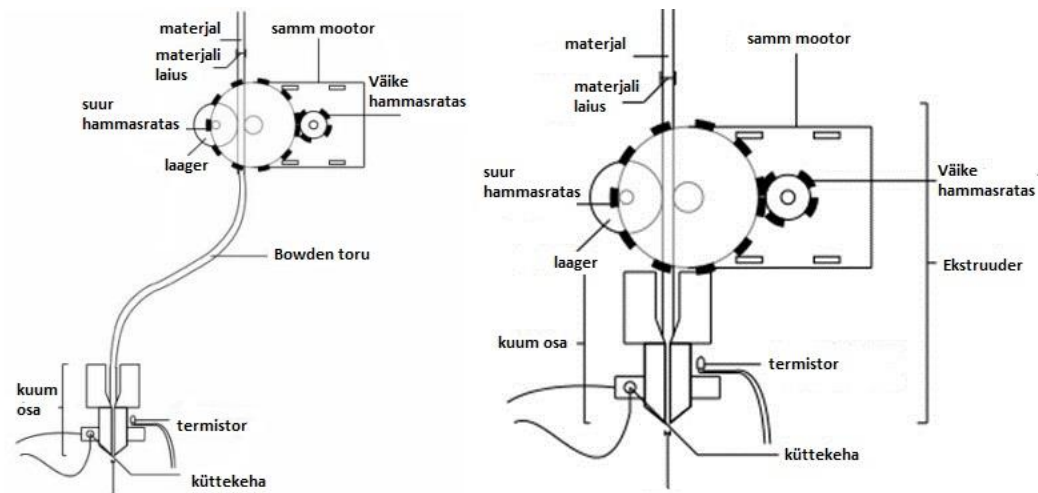


Sele 1.1 FDM meetodi kirjeldus [2]

Ekstruuderid jagatakse omakorda kaheks erinevaks tüübiks: *Direct* ja *Bowden*. *Direct* ekstruuderit iseloomustab materjali liikumine ekstruuderi kuuma ossa vahetult peale külma



osa (sele 1.2). Materjali juhtimiseks vajalik mootor koos hammasratastega paikneb otse kuuma osa küljes, mille tulemusena on materjali liikumisteed väga lühike. [3]



Sele 1.2 Bowdeni (vasakul) ja Direct (paremal) ekstruuderi selgitavad skeemid

Direct ekstruuderi puhul on võimalik ka igasuguse materjali tagastus. Materjali tagastamisel liigutatakse seda kuumast düüsi tagasi juhttorru. See on oluline printepea liikumisel, kui materjali ei väljastata, et tagada printimisel parem kvaliteet vältides materjali iseneselikku väljvoolamist (Sele 1.3). [3]



Sele 1.3 niiditaolised moodustised prinditaval objektil (*cobwebs* – ämblikuvõrgulaadsed moodustised) [3]

*Direct* ekstruuderi eeliseks on juhtimise lihtsus ja täpsus. See võimaldab prinditava materjali kiiret edasi-tagasi liigutamist [5]. Lisaks sellele on eeliseks ka materjali ettesötmise probleemide vähesus (näiteks haardumisest tekkivad probleemid) ning selle vahetamise lihtsus – ajakadu on väiksem [8]. *Direct* ekstruuderi (Sele 1.2) puuduseks on

printepea raskus, mis kiiresti printimisel tekitab probleeme (näiteks olukord, kus prinditaval objektil osad kihid paisuvad väljapoole) (sele 1.4) [5].



Sele 1.4 Parempoolsel objektil on näha väljapoole paisunud kihid [5]

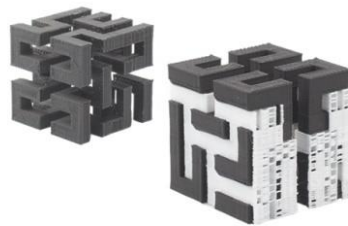
Bowden ekstruuderi puhul on tegemist lahendusega, kus materjali juhtimiseks vajalik ekstruuderi osa on eraldatud printeri kuumast osast. Tüüpiliselt on samm mootor koos hammasrataste ning muu materjali liigutamiseks vajalikuga paigaldatud 3D printeri kere külge. Erinevus võrreldes *direct* ekstruuderiga seisneb selles, et materjal jõuab kuumasse osasse eemalseisva ekstruuderi abil läbi juhttoru (nimetatakse ka kui *bowden* toru) [5]. Peamine eelis Bowden ekstruuderil (sele 1.2) on liikuvate osade palju väiksem kaal, jättes liigutamiseks vaid printeri kuumat osa. See võimaldab palju täpsemat printimist suurte kiirustel [3]. Bowden ekstruuderi suurim miinus on see, et kuumas osas jõudmiseks tuleb materjalil läbida pikk tee läbi selleks ettenähtud juhttoru. See tähendab seda, et paindlikumaid materjale on võimatu antud meetodiga printida [3].

Antud töös ehitatakse katseseadeldis *direct* ekstruuderit kasutades. Seda seetõttu, et antud juhul on oluline materjali etteanne ning sellest tuleneda võivad probleemid. Samuti on materjali vaja tagastada. Antud hetkel ei ehitata lahendust printerile külge seega on *direct* ekstruuderi kasutamine põhjendatud ka kompaktsuse tõttu.

## 1.1 Mõned mitut materjali printivad printepead

Üheks valdkonnaks on ekstruuderite arendamine andmaks neile võimekuse printida samaaegselt erinevate omadustega ja erinevat värvi materjale. Selleks on hakatud disainima mitme ekstruuderiga printepäid. Eeliseks on erinevate toetavate materjalide

kasutamine (sele 1.5). Ühest düüsiist väljuv materjal on nõ põhimaterjal, millest objekt valmib, ning teisest düüsiist väljub toetusmaterjal, mida vajadusel saab kasutada. Üheks selliseks materjaliks on näiteks polüvinüül alkohol (PVA), millel on omadus lahustuda vees. Peale printimist asetatakse detail vette ning üleliigne materjal lahustub [7]. Üheks suurimaks piiranguks aga antud tüüpi ekstruuderil on düüside ühine printepea, mille tõttu ei ole võimalik neil liikuda eraldi. Lisaks sellele on probleemiks ka materjali tilkumine düüsiist, mida hetkel printimiseks ei kasutata [4]. Samuti võib juhtuda, et kaks kõrvuti paiknevat düüsi ei ole ühel tasapinnal. Düüs, mis on temaga paralleelselt oleva düüsiga võrreldes prinditavale objektile lähemal, hakkab lõhkuma juba prinditud osa [6].



Sele 1.5 toetusmaterjali kasutamine [7]

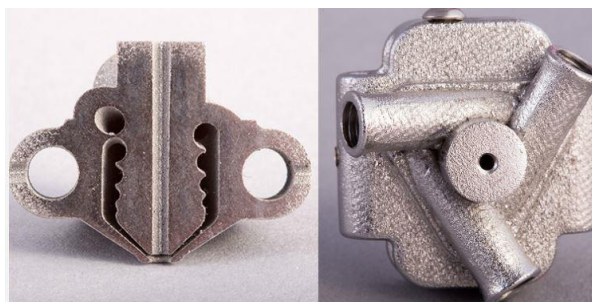
Enamus printimiseks mõeldud düüse on mõeldud vaid ühe materjali printimiseks. Üha enam üritatakse leida lahendust mis lubaks printida ühe düüsi kasutades mitut erinevat värvi või erinevate omadustega materjale. Üheks selliseks lahenduseks on *Diamond hotend* (sele 1.6), mis on välja arendatud RepRap (3D printimise spetsialistid) poolt. Antud lahenduse eripäraks on see, et kolm kuuma kambrit on ühenduses ühe düüsiga, mis võimaldab kolme erinevat värvi materjali printimise. Materjalide liigutamiseks kasutatakse kolme samm mootorit. [9]



Sele 1.6 *Diamond Hotend* printepea [9]

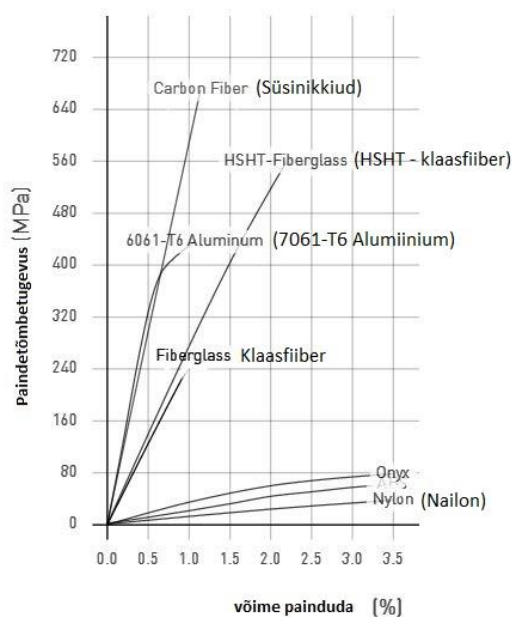
Üheks uudseks tehnoloogiaks on lisaks eelnevatele ka ettevõtte Orbital Composites arendatud *coaxial* ekstruuder, mille abil on võimalik printida süsinikkiudu, plastikut, traati ja veel palju erinevaid materjale. Põhimõtteliselt on võimalik printida kõike, mida

suudetakse läbi düüsi välja suruda. Tehnoloogia põhineb ühel ekstruuderil, mis liigub sarnaselt traditsioonilisele FDM printepeale. Erinevalt teistest printepeadest, lisatakse antud juhul süsinik kiudu (või mõnda muud soovivat materjali) otse prinditava materjali tuuma selleks spetsiaalselt kohaldatud düüsiga (sele 1.7). Võrreldes töid, mis on prinditud tavalisemate printepeadega kasutades vaid ühte materjali, siis sama tugevuse saamiseks süsinikuga vaja printida tunduvalt vähem kihte (tavalise materjali puhul 5-10 kihti, süsinikuga sama kõvadus printides 1-2 kihti). [10]



Sele 1.7 Coaxial ekstruuderi unikaalne düüs [10]

Eksisteerib ka üks fiibrit printiv desktop printer. Markforged puhul on tegemist ainsa ettevõttega maailmas, kes pakub selliseid printereid, mis lisavad prinditavale materjalile konstantset süsinikkiudu, klaaskiudu ja ka kevlarit. Sellega on nad suutnud tõsta materjalide tõmbetugevust viies süsinikkiuga printides selle isegi kõrgemale kui see on 6061-T6 Alumiiniumil (sele 1.9). Nende lahendus on aga patenteeritud, mis tähendab, et sooviga saavutada samasuguste omadustega detaile tuleb soetada nende printer [16].



Sele 1.9 Materjalide tõmbetugevused [16]

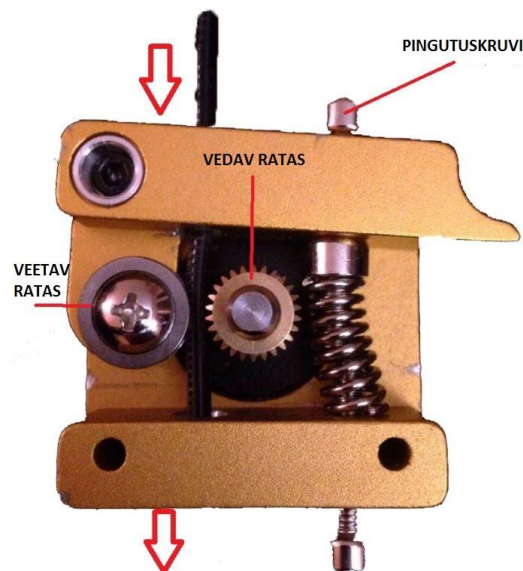
## **1.2 Arendatava ekstruuderi lõpplahenduse hüpotees**

Töös valmistatavas lahenduses on inspiratsiooni saadud just Markforged 3D printerist ja antud ettevõtte saavutatud tulemustest objektide omaduste parandamiseks. Nende printerite miinuseks on aga nende väga kõrge hind, mis jätab need tavakasutajast veel väga kaugemale. Antud töö lõplikuks eesmärgiks on luua fiibriga armeeritud materjali printimine ning seda teha võimalikult lihtsalt. Eesmärk on luua ekstruuder, mida oleks võimalik implementeerida erinevate FDM tüüpi printerite külge. Töös loodava seadme katsetamiseks kasutatakse klaasfiibri kiudu läbimõõduga 0.05 mm.

## 2. EKSTRUUDERI MEHAANIKA

### 2.1 Materjali liigutamine

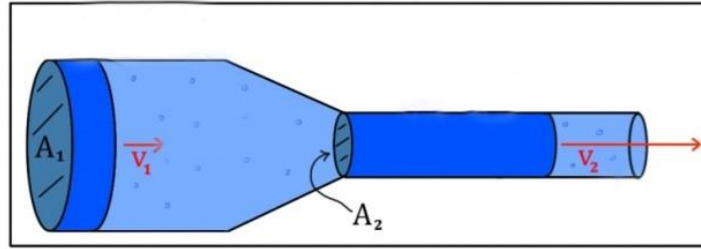
Ekstruuderi külmas osas toimub materjali ja fiibri liigutamine. Selleks kasutatakse samm mootorit ning spetsiaalset rakist, mis kinnitub mootori külge (sele 2.1). Rakis on pärit RepRap MK8 3D printeri küljest [30]. Mootori võlli küljes on hammasratas, mis koostöös rakise küljes oleva veeta rattaga liigutab materjali. Järgnevalt põhjendatakse erinevate komponentide valikut materjali liigutamiseks. Plastiku liigutava hammasratta läbimõõt antud juhul on 12 mm.



Sele 2.1 Kasutatav materjali liigutamise rakis

#### 2.1.1 Materjalide vajalike liikumiste kiiruste arvutamine

Väga oluline on, et sulatatav plastik ning lisatav fiiber liiguksid düüsist välja ühe kiirusega. Selle järelduseni jõuti pärast mõningate katsete läbiviimist, millest tuleb juttu edasistes peatükkides. Materjali etteande kiirus on määratud, selleks on  $v_m = 10$  mm/s. Järgnevalt tuleb leida fiibri vajalik liikumise kiirus düüsis ( $v_f$ ).



Sele 2.2 Materjali liikumine läbi kitseneva ava [24]

Esiteks leitakse 3 mm läbimõõduga materjali kiirus düüsi väljumisel. Teada olevate andmete põhjal on see võimalik leida vooluhulga valemi abil (sele 2.2).

$$Q = v \cdot A \quad [24] \quad (2.1)$$

kus  $Q$  – vooluhulk,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$v$  – voolukiirus,  $\text{m}/\text{s}$ .

$A$  – materjali ristlõike pindala,  $\text{m}^2$ .

Vooluhulk mõlemas ristlõikes on sama ( $Q_1 = Q_2$ ). Muutub materjali liikumise kiirus. Materjali ristlõike pindala on esialgu  $A_1 = 28,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  ning peale düüsi väljumist  $A_2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Materjali liikumise kiirus esimeses ristlõikes  $v_1 = 10 \text{ mm}/\text{s} = 0,01 \text{ m}/\text{s}$ . Kuna  $Q_1 = Q_2$ , siis  $A_1 v_1 = A_2 v_2$ . Asendades väärtused valemisse saadakse, et materjali liikumise kiirus düüsi väljudes on  $v_2 = 0,09 \text{ m}/\text{s}$ . Oluline on aga see, et fiibri ristlõike pindala düüsi läbides ei vähene. See tähendab, et fiibri kiirus peab juba düüsi sisenedes olema võrdeline materjali düüsi väljumise kiirusega ( $v_2 = v_f$ ). Üheks võimaluseks see saavutada on fiiber lisada sulatatavale materjalile hetkel, kui selle materjali ristlõike pindala on juba vähenenud. Nii tõmbab sulanud materjal fiibrit juba õige kiirusega endaga kaasa.

### 2.1.2 Samm mootori vajalike kiiruste arvutamine

Olles kätte saanud materjalide vajalikud liikumise kiirused, tuleb leida samm mootorite kiirused. Kiirus on võrdeline mootorile antavate juhtimplusside sagedusega. Kiirus sõltub ka sellest, millises režiimis mootorit juhitakse. Kiiruse leidmine käib arvestades sammu nurka ning impulsse. Enamasti on samm mootoritel üks täispööre jagatud 200 sammuks. Andes sellisele mootorile  $f = 1000$  implussi sekundis, on full step režiimis mootori kiiruseks  $n = 300 \text{ 1}/\text{min} = 5 \text{ 1}/\text{s}$ .

$$n = f / N \cdot 60s \quad (2.2)$$

kus,  $n$  = pöörete arv minutis, 1/min.

$f$  = impulssi sekundis, Hz.

$N$  = sammude arv

Hammasratas, millega materjali kuuma ossa liigutatakse on raadiusega  $r = 6$  mm. Tuleb leida hammasratta übermõõt leidmaks, kui palju materjali ühe täispöördega düüsi suunas liigutatakse.

$$u = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (2.3)$$

kus  $u$  = hammasratta übermõõt, mm.

$r$  = hammasratta raadius, mm.

Asendades väärtused valemisse saadakse hammasratta übermõõduks  $U = 37.7$  mm. Järgmisena leitakse materjali ja fiibri liigutamiseks vajalikud sammude arvud.

$$N_x = \frac{N}{\left(\frac{u}{x}\right)} \quad (2.4)$$

kus  $N_x$  - x mm materjali liigutamiseks vajalik sammude arv.

$U$  – hammasratta übermõõt, mm.

$x$  – kui palju on materjali vaja liigutada, mm.

10 mm materjali liigutamiseks peab mootor tegema 54 sammu. Seega vajalikuks mootori pöörlemiskiiruseks on 0,27 1/s. Sarnaselt tuleb toimida ka fiibri lisamiseks vajaliku samm mootori kiiruse leidmiseks. Eeldused on samad. Kasutatakse rullikut, mille übermõõt  $u = 37,7$  mm. Muutunud on vaid materjali etteande kiirus, milleks on 90 mm/s. Kasutades valemit 2.4 saadakse, et materjali liigutamiseks vajalik sammude arv on 478 sammu. See teeb mootori liikumise kiiruseks 2,4 1/s.

### 2.1.1 Materjali ja fiibri liigutamiseks sobilike samm mootorite valik

Samm mootori abil juhitakse ekstruuderiga hammasrattaid, mille abil toimub materjali ja fiibri liigutamine. Mootori valik on tehtud lähtudes vajaminevast jõust ning et see suudaks



materjali väljutada düüsis vähemalt  $v_m = 10$  mm/s ning fiibrit  $v_f = 90$  mm/s. Materjali väljutamiseks viidi läbi katse, leidmaks vajaliku jõu. Tulemusena selgus, et mass  $m_m = 700$  g raskuse abil hakkas materjal düüsis väljuma. Fiibri puhul on jõud pea olematud. Võetakse intuiitiivselt  $m_f = 50$  g. Kõigepealt leitakse jõud, mida on vaja materjalide surumiseks läbi düüsi.

$$F = m \cdot g \quad (2.5)$$

kus  $F$  = vajaminev jõud, N.

$m$  - vaja minev mass raskuse liigutamiseks, kg.

$g$  – raskusjõud,  $m/s^2$

Selgub, et vajaminev jõud materjali puhul on  $F_m = 6,86$  N ning fiibri puhul  $F_f = 0,5$  N. Järgmisena leitakse vajalikud pöördemomendid.

$$T = F \cdot r \quad (2.6)$$

kus  $r$  – hammasratta raadius, mis materjali liigutab, m.

Asendades väärtused valemisse selgub, et antud tingimustel on pöördemoment  $T_m = 0.041$  N/m ning  $T_f = 0,004$  N/m. Järgnevalt leitakse mootoritele vajalikud võimsused. Selleks leitakse pöörleva keha võimsus. Valemist 2.4 on teada, et materjali liigutamiseks on pöörete arv  $n_m = 0,27$  1/s ja fiibri liigutamiseks  $n_f = 2,4$  1/s.

$$P = T \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad [28] \quad (2.7)$$

kus  $P$  = võimsus, W.

$\pi$  – konstant (3,14...)

$n$  – pööret sekundis, 1/s.

Seejärel leitakse vajaminevad võimsused asendades juba leitud ja teada olevad väärtused valemisse 2.7. Vajaminev võimsus materjali liigutamiseks on  $P_m = 0,07$  W ning fiibri väljutamiseks  $P_f = 0,06$  W. Lähtudes andmetest saab valida sobilikud samm mootorid. Üheks sobivaks mootoriks on Nema 11 bi-polaarne mootor. Mootori näitajateks on 670 mA 4,5 V juures, pöördemoment 0.09 N/m. Võimsus seega kasutades valemit 2.8 on 3,02 W. [20]

$$P = U \cdot I \quad (2.8)$$

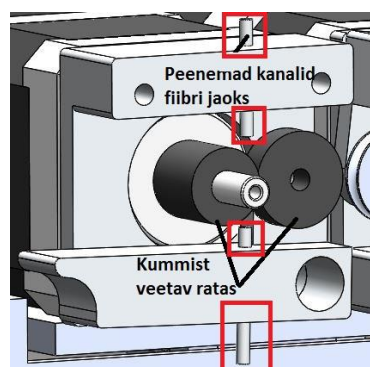
kus  $U$  = pinge, V.

$I$  = voolutugevus, A.

Antud juhul on töös aga kasutusele võetud materjali liigutamiseks Nema 17 tüüpi bipolaarne samm mootor, kuna seda ei ole vaja soetada vaid on olemas. Mootori andmete leht koos kogu vajaliku infoga on välja toodud lisas 1. Fiibri liigutamise mehhanismi antud juhul katsestendis ei rakendata ning seega mootorit esialgu ei ole vaja.

## 2.2 Fiibri liigutamismehhanismi ja lõikamissüsteemi projekteerimine

Fiibri etteandmiseks on sarnaselt materjali etteandele vaja selleks sobilikku mehhanismi. Idee on sama, kasutatakse eelnevalt leitud samm mootorit ning spetsiaalselt materjali jaoks kohaldatud liigutamise süsteemi, mille vahel fiiber liikuma hakkab (sele 2.3). Erinevus materjali liigutava süsteemiga on teised, kummist rullikud, et oleks parem hõõrdumine fiibri ja plastiku vahel. Lisaks sellele on MK8 ekstruuderiga võrreldes peenemad materjali sisenemise ja väljumise avad, mis on spetsiaalselt kohaldatud fiibri jaoks. Suurema rulliku abil, mis asub liigutatava rakise osa küljes, on võimalik muuta survet liigutatavale fiibrile selle edukaks liigutamiseks.



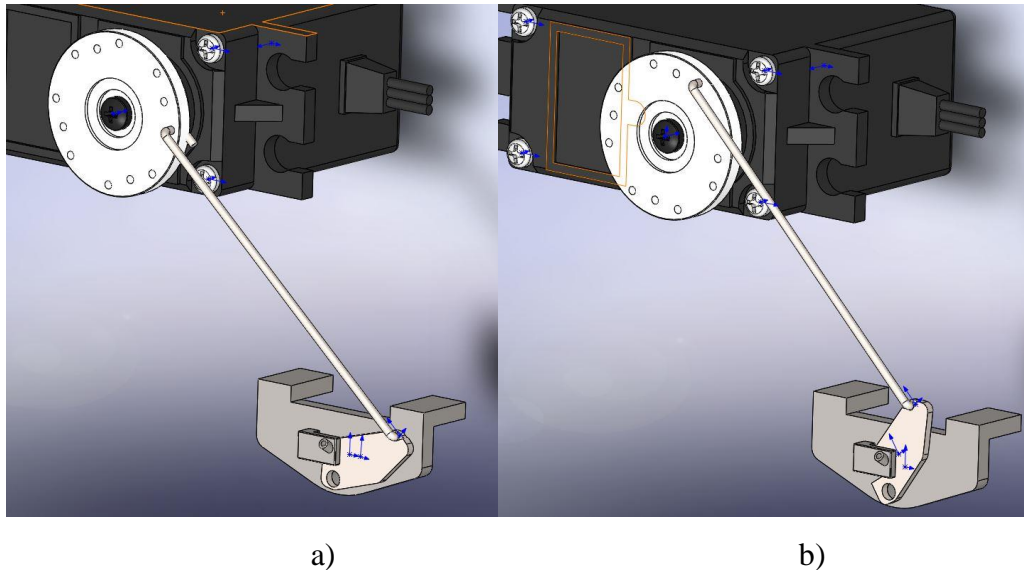
Sele 2.3 Fiibri liigutamismehhanism

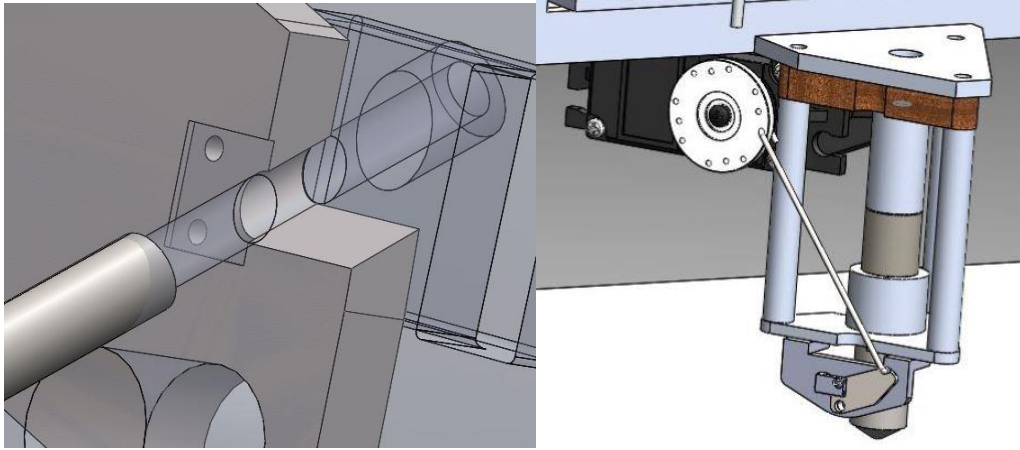
Kuna printimise käigus tuleb tihti ette olukordi, kus printepea liigub printimata, siis tuleb fiiber teatud kohtades katkestada. Selle jaoks projekteeriti ekstruuderi külge spetsiaalne

lõikamise mehhanism (sele 2.4). Mehhanismi projekteerimisel on lähtutud sellest, et fiibri lõikamine toimuks võimalikult düüsi lähedalt, et materjali kadu oleks minimaalne. Fiibri lõikamismehhanismi liigutamiseks kasutatakse antud juhul servomootorit. Mehhanismi külge käib lõiketera, mis lõikamist teostab. Fiiber liigub kanalit pidi, mis on näha seel 2.4 (c). Lõikaja liigub iga kord samasse asendisse peale lõikamise tegemist, kus ta enne oli, et fiiber saaks uuesti vajadusel peale liikuda.

Üheks võimaluseks printeri seadistamisel on see seadistada nii, et programm teaks pidevalt, kui palju tal on jäänud printida enne, kui liigutakse printimata. Oletame, et lõikaja kaugus düüsi otsast on 5 cm. Kui programm teab, et tal on printida jäänud nii palju, et kulub ära 5 cm fiibrit, tuleb teostada lõikamine ja fiibri pealejooks peatada. See eeldab aga vahepeal teatud pauside tegemist. Antud juhul aga ei ole töös jõutud rohkem süvitsi programmi kirjeldusse minna.

PS! Sele 2.4 d) nähtav kuum osa on autoril olemas ning läbi selle saab toimuma katsetamine.





c)

d)

### Sele 2.4 Fiibri lõikamise mehhanism

- a) Mehhanism algasendis, b) mehhanism lõppasendis, c) materjali liikumise kanal,
- d) mehhanism ekstruuderis küljes

### **3 EKSTRUUDERI ELEKTROONIKA JA VAJAMINEVATE ELEKTROONIKAKOMPONENTIDE VALIK**

#### **3.1 Mikrokontrolleri valik**

Kuna antud katseseade kasutab kahte nuppu, ühte samm mootori draiverit ja ühte MOSFET transistori, siis on vajaminevate digitaal sisendite/väljudnite kanalite arv 4. Termistor ühendatakse analoogsisendisse, seega on vaja ka ühte seda. Lähtudes termistori andmetest RepRap kommuunist, peab mikrokontrolleri lahutusvõime olema vähemalt 10 bit [27]. Kuna autoril on endal olemas Arduino UNO clone ch340 mikrokontroller (edaspidi mikrokontroller), siis kasutatakse antud juhul katses seda. Mikrokontrolleri lahutusvõime on 10 bit ning vajalike kanalite arv on komponentide ühendamiseks samuti olemas.

#### **3.2 Samm mootori juhtimiseks vajalikud komponendid**

Samm mootori juhtimiseks on vaja selle jaoks mõeldud spetsiaalset draiverit, mis vastaks valitud mootori parameetritele. Valitud Nema 17 samm mootori maksimaalse pöördemomendi saamiseks tuleb seda juhtida vooluga 2 A. Pinge, mille juures mähiseid selline vool läbib on 2,2 V. Vastavalt neile andmetele tuleb valida ka draiver. Nõutud parameetreid rahuldavad kaks enimkasutatud samm mootori draiverit. Nendeks on Texas Instruments DRV8825 ning Allegro A4988 [12]. Mõlemat draiverit saaks antud juhul kasutada, kuna nende parameetrid kattuvad nõutavate parameetritega. Antud juhul osutus valituks draiver Pololu DRV8825 samm mootori draiver, mis võimaldab voolutugevust 2,2 A faasi kohta. Draiver osutus valituks teise valiku ees, sest antud juhul oli võimalik see kiiremini kätte saada seadme valmistamiseks. [15]

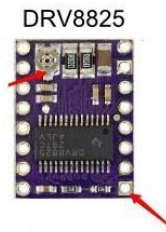
Draiveri seadistamiseks vastavalt töös kasutatud mootorile, tuleb referents voolu abil paika panna maksimaalne väljundvool (voolu limiit). Selle jaoks tuleb mõõta sele 3.1 näidatud kohtadest multimeetri abil referentspinge. [15]

$$\text{Current limit} = V_{\text{ref}} \times 2 \quad [15] \quad (3.1)$$

kus *current limit* – käsitletava mootori maksimaalne lubatud vool

$V_{\text{ref}}$  – Referentspinge mõõdetuna draiveril spetsiaalsete asukohtade vahel (sele 5.1).

Kuna antud juhul on ühte faasi kasutades maksimaalne lubatud vool 2 A, siis tuleb  $V_{\text{ref}}$  väärtuseks seadistada draiveril olevat kruvi keerates 1 V. [15]



Sele 3.1 referentspinge mõõtmine

Töös kasutatavat samm mootorit on võimalik valitud draiveri abil juhtida ka mitmes erinevas töörežiimis. Töörežiime eristatakse lülitusmeetodite järgi. Baas režiimiks on nõ full step režiim, mil ühe signaali andmisel pöörab samm mootor võlli soovitud suunas ühe sammu võrra (andmelehe järgi  $1.8^\circ$ ). Draiveri abil on võimalik täpsemaks juhtimiseks kasutada ka näiteks half-step meetodit, 1/4, 1/8, 1/16 ja 1/32 meetodit. Selline mikrosammude kasutamine muudab mootorit täpsemaks ning tagab sujuvama töö [15]. Töös kasutamiseks valiti half-step meetod. Tegemist on režiimiga, kus täispöörde tegemiseks kulub 400 sammu. Half-step meetodi kasuks otsustati just selle tõttu, et liigutatakse 3 mm läbimõõduga materjali. Selle jaoks on vajaminevad jõud üsna suured ning vajalikud kiirused väiksemad. Microsteppingut kasutades saaks saavutada suuremaid materjali liigutamise kiiruseid, kuid jõud selle arvelt väheneks. Microsteppingu puhul tuleks muuta ülekannet liigutatava ja veetava hammasratta vahel saavutamaks samad jõud. [21]

### 3.3 Temperatuuri kontroll ja küttekeha lülitamine

Termistor on elektriline takisti, mille takistus sõltub suuresti temperatuurist. 3D printeri ekstruuderites kasutatakse termistore kuuma osa temperatuuri mõõtmiseks [11]. Täpne ja

õige temperatuuri kontroll on oluline maksimeerimaks kasutatavate materjalide hulka (erinevatel materjalidel on erinevad sulamistemperatuurid).

Antud katseseadmes kasutatakse EPCOS 100kΩ NTC 4036 tüüpi termistori. Termistor valiti selle suure temperatuuri tajumisvahemiku tõttu. Termistor on negatiivse temperatuurikoefitsendiga, mis tähendab, et temperatuuri kasvades takistus termistoris väheneb. Just sellist tüüpi termistore kasutatakse mõõtmiseks. Antud termistori takistus 25 °C juures on 100kΩ. Maksimaalne temperatuuride vahemik on -55° C – 300° C. Termistori B - parameeter antud juhul on 4036. B-parameeter on koefitsient, mis iseloomustab termistori takistuse muutumist temperatuurist ja seda kasutatakse temperatuuri arvutamiseks takistuse alusel [26]. Tolerants mõõtmisel on +/- 1% [22].

Temperatuuri määramiseks koostatakse pingejagur. Nii on võimalik välja arvutada termistori väärtus, tuginedes valemitele 3.2, 3.3 ja 3.4.

$$U_2 = I_t \cdot R_2 \quad (3.2)$$

kus  $U_2$  – Pingelang koormustakistil, V

$I_t$  – Termistori läbiv vool, A

$R_2$  – koormustakisti, Ω

Mõõdetav signaal, ehk pinge  $U_2$  tekib koormustakistil, kuna jadaühenduses takistustest koosnev mõõteahel toimib pingejagurina.

$$I_t = U_1 / (R_1 + R_2) \quad (3.3)$$

kus,  $U_1$  = Sisendpinge, V

$R_1$  = termistori takistus, Ω

seega  $U_2 = U_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$

Saadud väärtus loetakse mikrokontrolleri poolt ning vastavalt algoritmile teisendatakse temperatuuriks.

Täpsete temperatuuri väärtuste saamiseks tuleb takistuse/temperatuuri kõver saada võimalikult täpne. Selle jaoks kasutatakse Steinhart – Hart võrrandit 3.5. [14]

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \quad [14] \quad (3.5)$$

kus  $T$  = absoluutne temperatuur  
 $a$ ,  $b$  ja  $c$  on Steinhart-Hart parameetrid

Kuna antud juhul on tegemist NTC tüüpi termistoriga, millel on teada beta koeffitsent ja nominaalne takistus  $25^\circ \text{C}$  juures, siis temperatuuri arvutamiseks kasutame Steinhart-Hart valemit järgneval kujul 3.6. Valemis on asendatud  $a = (1/T_0) - (1/B)(\ln(R_0))$ ,  $b = 1/B$  ja  $c = 0$ . Peale asendamist saadakse valem 3.6. [14]

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad [14] \quad (3.6)$$

kus  $T_0$  = nominaalne temperatuur ( $25^\circ \text{C}$ )  
 $B$  = beeta koeffitsent  
 $R_0$  = takistus temperatuuri  $T_0$  juures

Valemit kasutatakse mikrokontrolleri katseseadet juhtivas programmis.

Küttekeha lülitamiseks on sobilik kasutada näiteks Mos-Fet tüüpi transistori, mille abil on võimalik väikeste sisendsignaalidega juhtida suuri alalisvoolusid. Transistori valimisel tuleb eelkõige lähtuda sellest, et seda peab olema võimalik juhtida mikrokontrollerist saadava väljundvooluga 5 V. Lisaks sellele tuleb veenduda, et selle abil oleks võimalik lülitada ka küttekeha parameetritega 12 V / 40 W. Antud juhul ei ole teada küttekeha maksimaalne tarbitav vool. Vajaliku voolu saab leida Ohm'i seaduse abil.

$$I = \frac{P}{U} \quad (3.7)$$

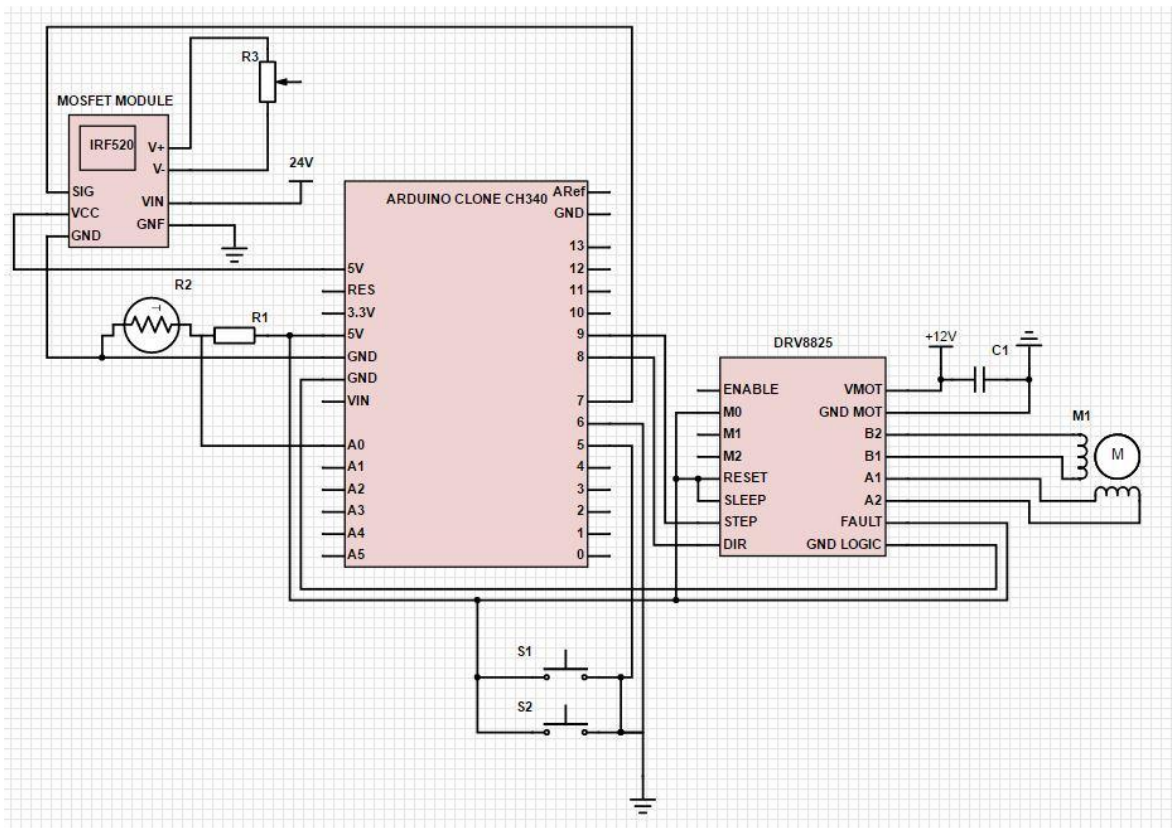
Kus  $P$  – võimsus, W.  
 $I$  – Voolutugevus, A.

Siit selgub, et vajalik voolutugevus  $I = 3,3 \text{ A}$ . Üheks sobivaks transistoriks on näiteks IRF520 Mos-Fet transistor, mille suurim lubatud väljundvoolu pinge on vahemikus 0 – 24 V ning suurim lubatud väljundvoolu tugevus  $< 5 \text{ A}$ . Töös kasutatakse spetsiaalset Mos-Fet moodulit, mis on ehitatud kasutades IRF520 transistori [13].



### 3.4 Katseseadme elektroonikaskeem

Antud juhul on tegemist katseseadme elektroonikaskeemiga (sele 3.3). Elektroonikaskeemil on näha materjali söötva samm mootori juhtimine kasutades draiverit DRV8825, temperatuuri lugemine koos pingejaguriga ning MOSFET moodul küttekeha lülitamiseks. Mootori poolt tekitatud pingepulsside kaitseks on lisatud skeemi ka üks kondensaator (C1) mahtuvusega 100  $\mu\text{F}$ . Nimelt indutseeritakse mootorit lülitades seal pingepulsside, mis võivad ületada kordades samm mootori draiveri talutava 45V piiri. Kondensaator aitab süsteemi nende eest kaitsta.



Sele 3.3 Katseseadme elektroonikaskeem

## 4 JUHTPROGRAMMI KIRJELDUS

### 4.1 Katseseadme algoritm

Töös valmistatud katseseadme programmi kirjeldamiseks on iga sõlme jaoks valmistatud eraldi algoritm, et tekiks parem ülevaade, kuidas programm töötab. Temperatuuri kontroll ja vastavalt sellele küttekeha lülitamine on välja toodud lisas 3. Mootori juhtimine Lisas 4. Algoritm on valmistatud voodiagrammina.

### 4.2 Programmi detailsem kirjeldus

Olles kätte saanud pingejagurit kasutades termistori takistust kasutades skeemi väljundpinge, tuleb seda temperatuuri kuvamiseks mikrokontrolleri abil töötlemata hakata. Mõõtes pinget mikrokontrolleriga, saadakse ADC väärtus (analoog – digitaal konverteri väärtus) (4.1).

$$\text{ADC väärtus} = U_2 \cdot \frac{1023}{U_1} \quad [29] \quad (4.1)$$

Sejärel kombinereerime väljundpinge leidmise valemi (3.2) ja analoog – digitaal väärtuse leidmise valemi (4.1) ning saame ADC leidmiseks täiendatud valemi.

$$\text{ADC väärtus} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1 \cdot \frac{1023}{U_1} \quad [29] \quad (4.2)$$

Nagu näha, siis taandub skeemi sisendpinge väärtus välja, mis tähendab, et antud süsteemi töötamiseks ei ole vahet, millist sisendpinget kasutada [29]. Soovitakse saada termistori takistust, mille saab valemist (4.2) edukalt tuletada.

$$R_2 = \frac{R_1}{\left(\frac{1023}{\text{ADC}-1}\right)} \quad [29] \quad (4.3)$$

Seejärel kasutatakse leitud väärtust juba eelnevalt mainitud Steinhart – Hart valemis temperatuuri väärtuse leidmiseks.

Küttekeha lülitamise üheks olulisemaiks aspektiks on suutmine hoida temperatuuri konstantsena ühe temperatuuri juures. Selleks kasutatakse antud juhul PID (proportsionaal-integraal-derivatiivkontroller) kontrollerit. Tegemist on tagasisidestatud juhtimise skeemiga. PID – kontrolleri algoritm sisaldab kolme eraldiseisvat konstantset parameetrit ja vastavalt sellele nimetatakse seda kolme tingimusega juhtimiseks. [17] Antud juhul kasutatakse PID kontrollerit vastavalt temperatuurile küttekeha lülitamisel. PID kontroller koosneb kolmest tingimusest.

1.  $K_p$  – proportsionaalne juhtimine (mida suurem viga, seda suurem parandustegur)
2.  $K_i$  – vea integreerimine ehk vea summeerimine pikema aja jooksul
3.  $K_d$  – derivatiivne komponent, mis mõõdab vea muutumise kiirust

Sobivad parameetrid saadi proovimise teel kasutades alltoodud tabelit. [17]

Tabel 4.1 PID väärtuste muutmine

Parameeter	Tõusu aeg	Overshoot	Stabiliseerimise aeg	Püsiseisnudi viga	Stabiilsus
<b><math>K_p</math></b>	Vähenda	Suurenda	Muuta minimaalselt	Vähenda	Alanda
<b><math>K_i</math></b>	Vähenda	Suurenda	Suurenda	Vähenda oluliselt	Alanda
<b><math>K_d</math></b>	Minimaalne vähendus	Minimaalne vähendus	Minimaalne vähendus	Ei mõjuta	Tõsta $K_d$ , kui madal

Väärtuste muutmisega saavutati olukord, kus temperatuur seadme käivitamisel läks üle soovitava piiri maksimaalselt 10 kraadi ning mõne aja pärast stabiliseerus mõõtmise ning viga jäi + / - 5 kraadi. Küttekeha lülitamine realiseeritakse Mos-Fet moodulile signaali andmisega digitaalväljundist.

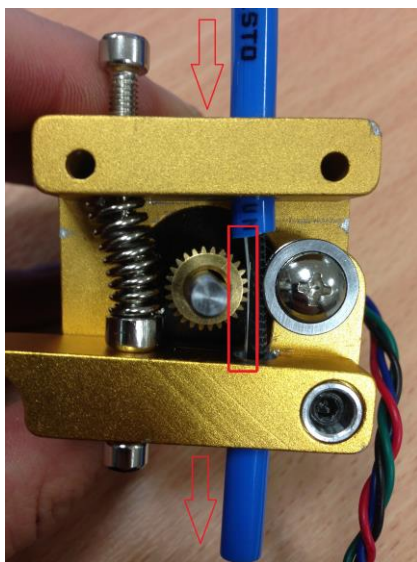
Samm mootori juhtimine käib kontrolleri abil samm mootori draiverile signaalide andmisega. Samm mootorile annab draiver kaks signaali: signaal sammu tegemiseks ning signaal pööramise suuna muutmiseks. Draiverile omakorda annab signaali mikrokontroller. Antud juhul liigutatakse mootorit katseseadmep nuppude abil, et oleks võimalik millal tahes materjali peale sööta või siis tagasi liigutada. Draiverile signaali andmiseks kasutatakse digitaalväljundeid ning nuppude ühendamiseks digitaalsisendeid. Vajutades nuppu, antakse signaal mikrokontrollerile, et mootorit tuleb liigutada (olenevalt nupust

liigub mootor kas edasi, või tagasi). Mootori liikumise kiirus määratakse signaalide andmise vahega, mida on võimalik programmis ka muuta, muutes väärtust Stepperdelay. Stepperdelay väärtus tuleb leida kasutades eelnevalt valemities (2.6) ja (2.7) leitud vajalikke materjali liikumise kiiruseid. Impulsside arv  $f$  avaldatakse valemist (2.6).

## 5 FIBRI LISAMISE VÕIMALIKUD MEETODID JA NENDE KATSETAMINE

### 5.1 Fiiibri lisamine materjaliga ühest kanalist.

Kõige esimese katsetuna alustati kõige lihtsamast variandist tegemaks kindlaks, kas fiiber on võimeline materjaliga kaasa liikuma. Selleks prooviti fiibrit liigutada sama hammasratta ja samm mootori abil, millega liigutatakse filamenti (sele 5.1). Kuid kuna fiiber on üsna painduv ning kiuline materjal, siis tekkisid probleemid ning fiiber ei liikunud materjaliga kaasa. Kiud hakkasid eralduma ning laiali minema mille tagajärjel fiiber takerdus juba ekstruuderi alguses jõudmata kuuma osani.

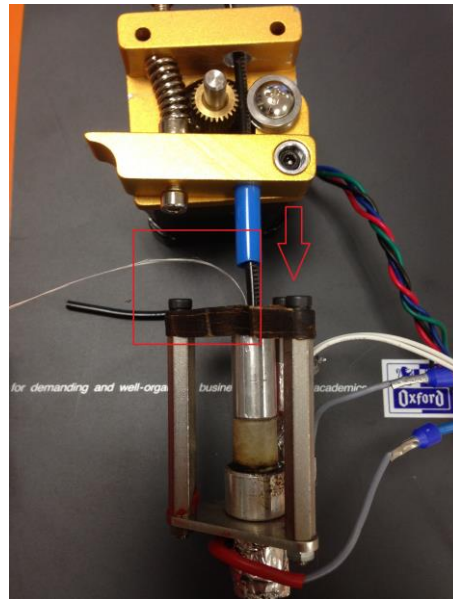


Sele 5.1 fiiibri lisamine samm mootori abil

### 5.2 Fiiibri lisamine peale samm mootorit

Teise lahendusena katsetati võimalust lisada materjali peale samm mootorit kuid enne kuuma ossa sisenemist (sele 5.2). Sellisel juhul siseneks fiiber süsteemi eraldiseisvalt materjali etteandest. Antud lahenduse probleemne koht oli fiiibri kinnitamine materjali külge, et toimuks fiiibri automaatne kaasavedu. Testimiseks kinnitati fiiber jootekolbi abil,

et näha, kas antud kujul on fiiber võimeline piisvalt hästi materjali kaasa liikuma ning ühtselt düüsisist väljuma



Sele 5.2 Fiibri lisamine peale samm mootorit  
(illustratsioon, töötav lahendus)

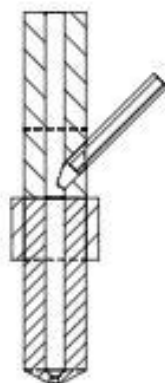
Antud meetodit katsetades aga oli probleemseks kohaks fiibri liiga pikk materjaliga kaasaliikumise teekond. Selle tõttu tekkis olukordi, kus fiiber libises materjali suhtes ning kaasaliikumise kiirus ei olnud ühtlane. Samuti tekkis olukordi, kus üldse fiiber tuli materjali küljest lahti ning enam kaasa ei liikunud. Fiibri olulisel mahajäämisel liikuvast materjalist tekitas ka olukorra, kus plastikut väljus düüsisist kordades rohkem, kui fiibrit, mille tulemusena ei väljunud printerist mitte üks juga, vaid plastik kuhjus vähese fiibri külge (sele 5.3)



Sele 5.3 Plastiku keerumine düüsisist väljudes

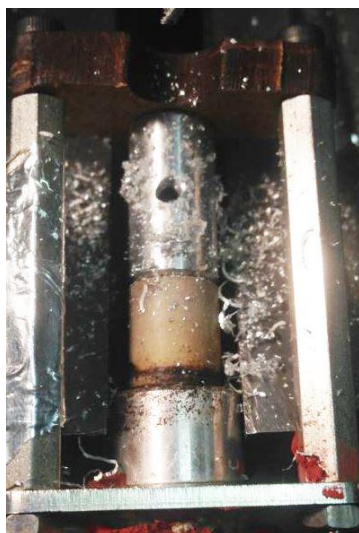
### 5.3 Fiiibri lisamine läbi modifitseeritud kuuma osa

Katset alustati materjali lisamisega kuuma osa keskelt, et vähendada fiiibri koos materjaliga liikumise vahemaad ning tagada kindlam fiiibri kaasa haaramine materjali poolt. Selleks kohaldati olmasolevat kuuma osa väikeste modifikatsioonidega (sele 5.4).



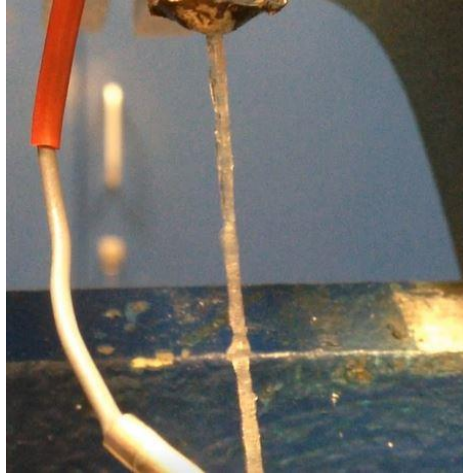
Sele 5.4 Modifikatsioonidega düüsi eskiis

Düüsi valmistamiseks puuriti kuuma ossa enne düüsi 3mm läbimõõduga 45 kraadi all ava (sele 5.5), mida mööda hakkaks fiiiber jooksuma. Antud lahenduse eeliseks on võrreldes eelnevatega fiiibri vähene takistus kuuma ossa sisenemisel. Samuti on prinditav materjal juba antud hetkeks üles soenenud ning fiiibri kaasa haaramisest tekkivaid probleeme on tänu sellele vähem.



Sele 5.5 Puuritud ava

Antud lahendust katsetades tuli fiiber sööta ekstruuderisse esimesena. Kui fiiber oli jõudnud kuuma ossa, söödeti peale ka materjal, mis siis hakkas fiibrit endaga kaasa vedama. Fiibri kaasavedamisega probleeme antud juhul ei tekkinud ning düüsisist tuli välja ka fiiberkiuga armeeritud prinditud materjal (Sele 5.6).



Sele 5.6 Kiuga armeeritud materjali printimine

Nagu saadud materjali kvaliteedist on näha, siis ei ole tegemist väga perfektse tulemusega. Kohati esineb piirkondi, kus materjali väljus düüsisist rohkem, kui fiibrit ning väljuv materjal hakkas ümber fiibri krussi keerduma. Siiski, mitte nii palju kui eelmistel juhtudel. Antud probleemi põhjus tuleneb sellest, et düüsisist väljudes materjali ristlõike pindala väheneb, aga fiibri oma mitte. Sellest tulenevalt muutub plastmaterjali joonkiirus suuremaks võrreldes fiibri joonkiirusega.

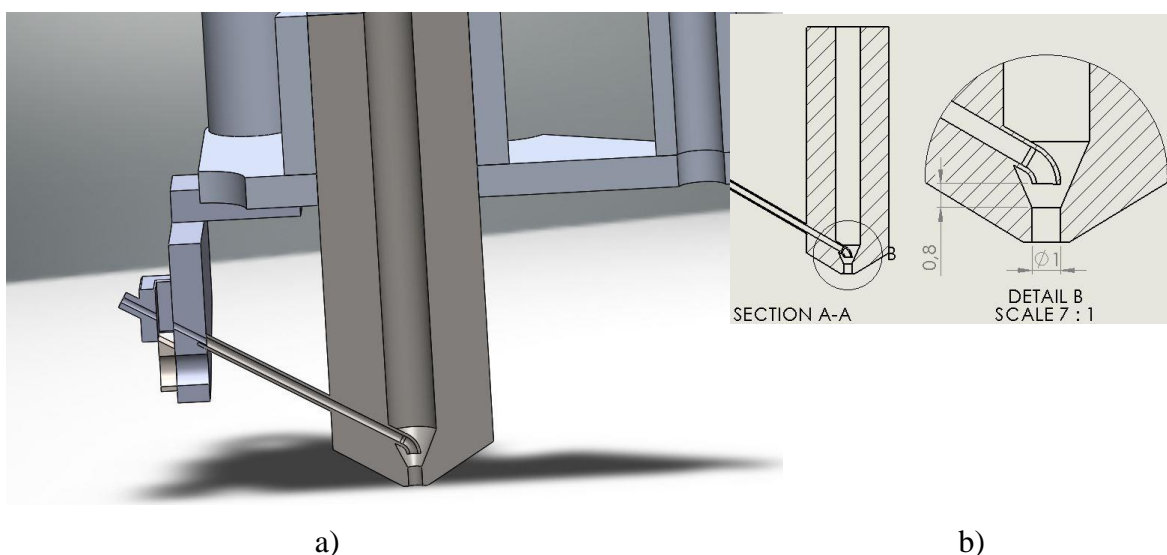
## 5.4 Esialgsete katsete kokkuvõte

Esialgsete katsete kokkuvõttena järeldatakse, et suurimaks probleemiks on materjali väljutamine düüsisist. Probleem on jätkuvalt selles, et plastik väljub düüsisist suurema kiirusega, kui seda teeb fiiber. Probleemi selgitamiseks leitakse vajalik fiibri liikumise kiirus, et siis näha, kas see üldse saab materjaliga koos liikuda võib peab liikuma kuni materjali sulatamiseni ja kokkupressimiseni eraldi (fiibri liikumise kiiruse leidmine kirjeldatud mehaanika osas peatükis 4.1.3)



## 5.5 Uue düüsi projekteerimine lähtudes katsetuste tulemustest

Vastavalt läbiviidud katsetele ning nende põhjal tehtud järeldusele projekteeritakse uus düüs (sele 7.7), mille abil on võimalik tagada materjalide ühtlased joonkiirused düüsi väljumisel. Uue düüsi projekteerimisel on üritatud luua lahendus, mille abil oleks võimalik fiiber sööta otse materjali tuuma. Minimaalse kuumas osas liikumise saavutamiseks tuleb fiibri lisamine viia võimalikult düüsi ava lähedale, kuid mitte täiesti ava otsa juurde, kuna materjal peab fiibri siiski kaasa endaga haarama. Selleks, nagu eskiisil (sele 5.7) näha, on jäetud 0.8 mm ala. Üheks probleemseks kohaks antud lahenduse puhul võib olla sulanud materjali tungimine fiibri kanalisse ja selle ummistamine. Teoorias ei tohiks sellega probleemi olla, kuna düüsi ava on suurem, kui fiibri kanal ning materjal peaks voolama väiksema takistusega ava suunas. Probleem võib tekkida aga siis, kui mingil põhjusel peaks printimise ajal tekkima tõrge ning materjali surutakse printelauale ühte kohta ilma ekstruuderi liikumata. Sellisel juhul on aga võimalik düüsi avad ummistusest puhastada.



Sele 5.7 Uus projekteeritud düüs, a) düüsi 3D mudel, b) düüsi eskiis

Antud düüsi puhul on aga miinuseks düüsi keeruline konstruktsioon, mis limiteerib selle valmistamise võimalusi. Üheks valmistamise meetodiks on see lasta 3D printida kasutades näiteks *Direct metal laser sintering* (laserpaagutus) meetodit. Meetod kasutab kõrge võimsusega laserit, et kiht – kihi haaval kuumutada kinni metallipulbrit objektide valmistamiseks. Meetodi suureks puuduseks on selle kallis hind [29]. Teise valmistusmeetodina võiks kasutada valuvormi abil düüsi valada laskmist. Sellist meetodit kasutades tuleks lasta valmistada spetsiaalne valuvorm antud düüsi jaoks.

## 6 MAJANDUSLIKUD – JA OHUTEGURID

Lõplik lahendus on disainitud nii, et seda oleks võimalik integreerida erinevat tüüpi FDM printerite külge. Lahendus on püütud disainida nii, et vajaminevad jupid oleks võimalik kergesti valmistada ja hankida.

### Majanduslikud tegurid

Fiibriga printimise puhul tuleb kindlasti arvestada sellega, et samades mahtudes objektide hind tuleb võrreldes tavaliste objektidega kallim. Näiteks, ettevõtte Markforged pakub oma kodulehel klaasfiibri kiudu rullis hinnaga 71eur 50 cm<sup>3</sup>, mis teeb 10 cm<sup>3</sup> hinnaks ligikaudu 14eur [33]. Tavalise, 1kg kaaluva ABS plastiku rulli hind on 26eur. ABS plastiku tihedus on 1,01 g/cm<sup>3</sup>, seega üks rull on 990 cm<sup>3</sup>, mis teeb 10 cm<sup>3</sup> hinnaks 0,36eur.

Oletame, et fiiber kiud 1 mm düüsisist väljudes on 1:20 osa prinditavast plastikust. Sellisel juhul näiteks 10 cm<sup>3</sup> objekti valmistamiseks kulub 0,5 cm<sup>3</sup> fiibrit. Fiibriga prinditud objekti hinnavahe tavalisega võrreldes on kuskil 2 – 3 kordne. See on aga juhul, kui printida sama mahuga detaile. Fiibriga printimise eeliseks on aga paremate omadustega detailide saavutamine. Tänu sellele on võimalik kvaliteetseid objekte printida vähemat materjali kasutades.

### Ohutegurid

Ekstruuderi puhul on ohutegureid mitmeid, millele tuleb kindlasti tähelepanu pöörata. Järgnevalt on toodud välja 3D printereid puudutavad ohutegurid.

- Esiteks on kuuma osa saavutatavad temperatuurid kuni 250. Selle jaoks on rangelt soovituslik lisada ekstruuderi külge kuuma temperatuuri hoiatusmärgis, vältimaks võimalike õnnetusi. Kõik toimingud viia läbi, kui printer on jahtunud.
- Teise ohutegurina on liikuvad ülekandesüsteemid. Kindlasti tuleb veenduda, et mootorit käivitades ülekande liigutamiseks ei oleks käed hammasrataste vahel.
- Kolmandana on ohuteguriks materjalide poolt sulatades õhku paiskuvad heitgaasid, mis osade materjalide puhul võivad olla väga kahjulikud. See tähendab, et printerit tuleks kasutada hästi ventileeritud ruumis ning kemikaale sisaldavaid materjale tuleks vältida. [25]
- Ekstruuderi toitelüliti või siis pistikupesa peab olema lihtsasti ligipääsetav
- Elektrishoki oht

## KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö teema pakuti välja Tallinna Tehnikaülikooli poolt. Ülikoolipoolseks töö juhendajaks oli autorile Tallinna Tehnikaülikooli Mehhatroonikainstituudi nooremteadur Ahti Põlder.

Lõputöö ülesanne tekkis Tallinna Tehnikaülikooli poolsest huvist arendada välja 3D printeri ekstruuder, mille abil oleks võimalik printida mitmete materjalide kombinatsioone. Antud juhul püüti leida lahendus fiibri lisamiseks prinditavale termoplastikule materjali omaduste parandamiseks.

Lõputöö algfaasis uuris autor juba olemasolevaid lahendusi saamaks ideid uute võimaluste valmistamiseks. Seejärel mõtles autor välja erinevaid lahendusi, kuidas võiks fiibrit prinditavale materjalile lisama hakata. Selle jaoks projekteeriti katseseade (mehaanika, elektroonika ja juhtimine), mis imiteeris reaalselt 3D printeri ekstruderit. Katseseadme loomiseks saadi osad vajalikud komponendid Tallinna Tehnikaülikoolist. Teine osa vajalikest komponentidest leiti arvutuslikul teel ning soetati erinevatest tehnikapoodidest.

Katseseadme abil viidi läbi erinevad katsed ning analüüsiti tulemusi. Erinevate katsete analüüsi tulemusena töötas autor välja prototüüplahenduse fiibri lisamiseks koos erinevate vajalike mehhanismidega. Analüüsi teel välja töötatud lõpplahendusest loodi 3D mudel, mille täieliku valmistamiseni töö käigus ei jõutud.

Projekti võib lugeda õnnestunuks, sest väga palju jõuti lähemale fiibri prindile lisamisele. Saadi valmis ideelahendus, mis teoreetiliselt peaks toimima. Töö jätkamiseks võiks valmistada loodud ideelahenduse ning seda katsetada, et võimalikke kitsaskohti tuvastada parima lõpplahenduseni jõudmiseks. Seejärel võiks katseseadeldise 3D printerile külge seada viimaseks testimiseks ja juhtprogrammi loomiseks.

## SUMMARY

The topic of the Bachelor's thesis was proposed by Tallinn University of Technology. The topic was issued by and the thesis was tutored by Ahti Põlder who is an early-stage researcher at Department of Mechatronics in Tallinn University of Technology.

The topic was evolved by the interest of Tallinn University of Technology in order to develop a 3D printer extruder which could print multiple materials through one nozzle. In this thesis, the author has tried to find a solution on how to add fiberglass to printable thermoplastics.

In the first stages of the thesis, author searched for similar existing solutions to generate ideas so he could make something more innovative and different. Next step was to think through different methods on how to add fiber to printable materials. To test the ideas, a test rig imitating 3D printer extruder was developed. One part of the needed components author got from Tallinn University of Technology. Other parts he found through calculations and purchased them himself.

The test rig was used to play through different solutions and analyse them. By analysing different solutions, author managed to design a prototype solution for adding fiber to printable objects. A 3D model was created from the development. Sadly, author did not have enough time to make the prototype solutions to work on table.

But other than that the project was very successful. Author is much more closer to developing a working fiber printing extruder. Next steps should be making the prototype solution to work and to test it to make further modifications. Then it should be added to 3D printer for final testing and implementing with other 3D printer parts.

## KASUTATUD ALLIKAD

1. What is 3D printing?  
<http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/> (26.10.16)
2. RepRap community; Category:Extruders  
<http://reprap.org/wiki/Category:Extruders> (26.10.16)
3. Bowden or direct? A primer on Extruder Styles  
<http://www.fabbaloo.com/blog/2015/11/11/bowden-or-direct-a-primer-on-extruder-styles> (30.10.2016)
4. Peter Smith - Important things to know about 3D printers; 3D printers online store  
<https://www.3dprintersonlinestore.com/important-things-to-know-about-dual-extrusion-in-3d-printers> (30.10.2016)
5. Pinshape blog – Direct drive vs Bowden Extruder Guide ...  
<https://pinshape.com/blog/direct-drive-vs-bowden-extruder-guide/>
6. 3D Hubs Forum: Dual Extruder issues  
<https://www.3dhubs.com/talk/thread/dual-extruder-issues> (12.11.2016)
7. 3D Printer and 3D printing news  
<http://www.3ders.org/articles/20130228-3d-printing-parts-with-overhangs-using-new-dissolvable-support-material.html> (12.11.2016)
8. 3D printing for beginners: A Comprehensive Introduction to 3D Printing Technology  
<http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-technology/> (12.11.2016)
9. New Atlas; Francis X Govers III – Diamond hotend makes multi color 3D printing ...  
<http://newatlas.com/diamondhotend-color-3d-printer-extruder/36950/> (30.11.2016)
10. 3D print; Orbital composites to Make 3D printing 100 times faster using Carbon fiber, fiber optics, injection & more  
<https://3dprint.com/60662/orbital-composites/> (30.11.2016)
11. Wikipedia; Termistor  
<https://et.wikipedia.org/wiki/Termistor> (02.12.2016)
12. RepRap community; Stepper motor driver  
[http://reprap.org/wiki/Stepper\\_motor\\_driver](http://reprap.org/wiki/Stepper_motor_driver) (02.12.2016)
13. Hobby components E-Shop MOSFET Driver Module  
<http://hobbycomponents.com/motor-drivers/661-irf520-mosfet-driver-module> (26.12.2016)
14. Wikipedia; Thermistor  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor#Steinhart.E2.80.93Hart\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor#Steinhart.E2.80.93Hart_equation) (26.12.2016)
15. Pololu DRV8825 Stepper motor driver  
[www.pololu.com/product/2133](http://www.pololu.com/product/2133) (26.12.2016)
16. Markforged 3D printing company; Materials  
<https://markforged.com/materials/> (26.12.2016)
17. Rasmus Raag – PID-Kontroller; Teeme Ise 2011

- [https://www.robotiklubi.ee/\\_media/kursused/teeme\\_ise/pid.pdf](https://www.robotiklubi.ee/_media/kursused/teeme_ise/pid.pdf) (06.01.2017)
18. All About 3D printers; Guide to 30 types of 3D printer filament & comparison chart  
<https://all3dp.com/best-3d-printer-filament-types-pla-abs-pet-exotic-wood-metal/>  
(06.01.2017)
  19. Stratasys; Direct Metal Laser Sintering  
<https://www.stratasysdirect.com/solutions/direct-metal-laser-sintering/>  
(08.01.2017)
  20. Pololu; Stepper Motors  
<https://www.pololu.com/category/87/stepper-motors> (08.01.2017)
  21. RepRap community; Microstepping and direct drive Extruder  
<http://forums.reprap.org/read.php?1,79959> (08.01.2017)
  22. Farnell; EPCOS B5760G104F THERMISTOR, 100K, 1%, NTC, RAD  
<http://uk.farnell.com/epcos/b57560g104f/thermistor-100k-1-ntc-rad/dp/3878697>  
(08.01.2017)
  23. Markforged company; Order Materials  
<https://markforged.com/order-materials/> (08.01.2017)
  24. KhanAcademy; What is volume flow rate?  
<https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate> (08.01.2016)
  25. 3D printer and 3D printing news; Hazards of 3D printing  
<http://www.3ders.org/articles/20160201-new-study-shows-health-hazards-of-3d-printing-suggests-pla-could-be-your-safest-bet.html> (08.01.2017)
  26. Gregg Lavenuta – An explanation of the beta and Steinhart-Hart equations for representing the resistance vs. Temperature relationship in NTC thermistor materials.  
<https://www.thermistor.com/sites/default/files/specsheets/Beta-vs-Steinhart-Hart-Equations.pdf> (08.01.2017)
  27. RepRap community; EPCOS 100k Thermistor  
[http://reprap.org/wiki/Thermistor#EPCOS\\_100K\\_Thermistor\\_.28B57540G0104F00.29](http://reprap.org/wiki/Thermistor#EPCOS_100K_Thermistor_.28B57540G0104F00.29) (08.01.2017)
  28. The Engineering Toolbox  
[http://www.engineeringtoolbox.com/angular-velocity-acceleration-power-torque-d\\_1397.html](http://www.engineeringtoolbox.com/angular-velocity-acceleration-power-torque-d_1397.html) (08.01.2017)
  29. Adafruit; Using a thermistor  
<https://learn.adafruit.com/thermistor/using-a-thermistor>
  30. Isetegija e-pood; MK8 materjali liigutamise rakis  
<http://isetegija.ee/toode/mk8-metallist-ekstruuder-2/>

**LISAD**

# Lisa 1 Samm mootori andmeleht



## Stepper Motor NEMA 17

This document describes mechanical and electrical specifications for PBC Linear stepper motors; including standard, hollow, and extended shaft variations.

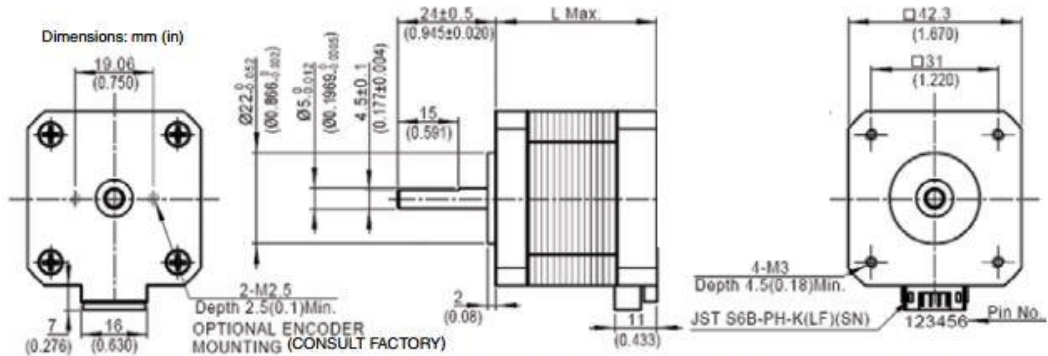


Phases	2
Steps/Revolution	200
Step Accuracy	±5%
Shaft Load	20,000 Hours at 1000 RPM
Axial	25 N (5.6 lbs.) Push 65 N (15 lbs.) Pull
Radial	29 N (6.5 lbs.) At Flat Center
IP Rating	40
Approvals	RoHS
Operating Temp	-20° C to +40° C
Insulation Class	B, 130° C
Insulation Resistance	100 MegOhms

Standard shaft motor shown.

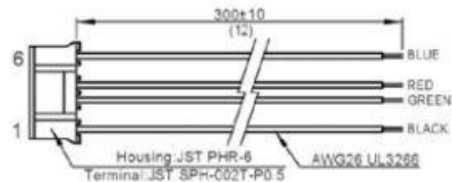
Description	Length	Mounted Rated Current	Mounted Holding Torque		Winding Ohms mH		Detent Torque		Rotor Inertia		Motor Weight	
			Nm	oz-in	±10% @ 20°C Typ.	mNm	oz-in	g cm <sup>2</sup>	oz-in <sup>2</sup>	kg	lbs	
(Stack)	"L" Max	Amps	Typ.	Typ.	Typ.	Typ.						
Single	39.8 mm (1.57 in)	2	0.48	68	1.04	2.2	15	2.1	57	0.31	0.28	0.62
Double	48.3 mm (1.90 in)	2	0.63	89	1.3	2.9	25	3.5	82	0.45	0.36	0.79
Triple	62.8 mm (2.47 in)	2	0.83	120	1.49	3.8	30	4.2	123	0.67	0.6	1.3

\*All standard motors have plug connector. Consult factory for other options.



Standard shaft dimensions shown. All other dimensions apply to hollow and extended shaft options.

Dimensions: mm (in)  
4 Lead Connector, PBC Part#6200490  
(Consult factory for optional motor connectors)





## Lisa 2 Katseseadme juhtprogramm

```
[code]
// Määrame analoogsisendi, millist kasutame
#define THERMISTORPIN A0
// Mosfeti lülitamiseks vajalik digitaalpin
#define MOSFETPIN 7
// Termistori takistus mõõdetud 25c juures
#define THERMISTORNOMINAL 100000
// Nominaalne temperatuur takisti takistuse 100k ohmi juures
#define TEMPERATURENOMINAL 25
// Mitu näidistust võetakse keskmise arvutamiseks (saada sujuvam temp'i näitamine)
#define NUMSAMPLES 5
// Termistori Beeta koefitsent
#define BCOEFFICIENT 3950
// võtan ühe nõ seeria takisti, mida kasutan arvutamisel. Nõ teise takisti takistus
#define SERIESRESISTOR 100000
// temperatuur, mida soovitakse hoida
#define TEMPCONST 250
//samm mootori sammude vahelise aja konstant
#define STEPPERDELAY 150 //Muutuja, mida muutes on võimalik muuta
//stepermootori kiirust
//PID kontrolleri jaoks vajaliku library avamine
#include <PID_v1.h>

//defineerin muutujad
int samples[NUMSAMPLES];
int buttonState = 0;
int button1State = 0;
int button2State = 0;

const int stepPin = 9;
const int dirPin = 8;

const int button1Pin = 6;
const int button2Pin = 5;

double Setpoint, Input, Output;
double Kp=21, Ki=1.053, Kd=105; //PID väärtused, mida muutes on võimalik
//stabiliseerida temperatuuri hoidmine

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

int WindowSize = 300; //defineerime PID kontrolleri kasutatava oleva akna väärtuste
//lugemiseks

unsigned long windowStartTime;

const int numReadings = 10;
```

```

void setup(void) {
  //kuidas kasutan defineeritud pine, kas sisendite, või väljunditena
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(stepPin,OUTPUT);
  pinMode(dirPin,OUTPUT);
  pinMode(button1Pin, INPUT);
  pinMode(button2Pin, INPUT);
  windowStartTime = millis();
  //PID kontrolleri jaoks vaja initialiseerida temp, kus ta end hoidma hakkab
  Setpoint = TEMPCONST;

  //Ütleb Pid regulaatorile, et hoiaks end 0 ja maksimaalse lubatud akna vahemikus
  myPID.SetOutputLimits(0, WindowSize);

  //Lülitame PID kontrolleri sisse
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  uint8_t i;
  float average;
  button1State = digitalRead(button1Pin);
  button2State = digitalRead(button2Pin);

  // Võtan N proovide arvu vähese viitega, et sujuvamalt tempi kuvada
  for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
    samples[i] = analogRead(THERMISTORPIN);
  }

  // võtan kõikidest võetud proovidest keskmise
  average = 0;
  for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
    average += samples[i];
  }
  average /= NUMSAMPLES;

  // konverteerin saadud analoog sisendi näidu takistuseks
  average = 1023 / average - 1;
  average = SERIESRESISTOR / average;

  // Arvutan temperatuuri kasutades steinhart funktsiooni
  float steinhart;
  steinhart = average / THERMISTORNOMINAL; // (R/Ro)
  steinhart = log(steinhart); // ln(R/Ro)
  steinhart /= BCOEFFICIENT; // 1/B * ln(R/Ro)
  steinhart += 1.0 / (TEMPERATURENOMINAL + 273.15); // + (1/To)
  steinhart = 1.0 / steinhart; // Inverteerin
  steinhart -= 273.15; // Teisendab Celsiusesse

```

```

//Prinin temperatuuri serial monitori, kuvan errori, kui temp ei ole anduri poolt
mõõdetavas vahemikus
if (steinhart >= -55 && steinhart <= 300) {
  Serial.print("Temperature ");
  Serial.print(steinhart);
  Serial.println(" *C");
} else Serial.print ("Viga temperatuuri lugemisel");

Input = steinhart;
myPID.Compute();

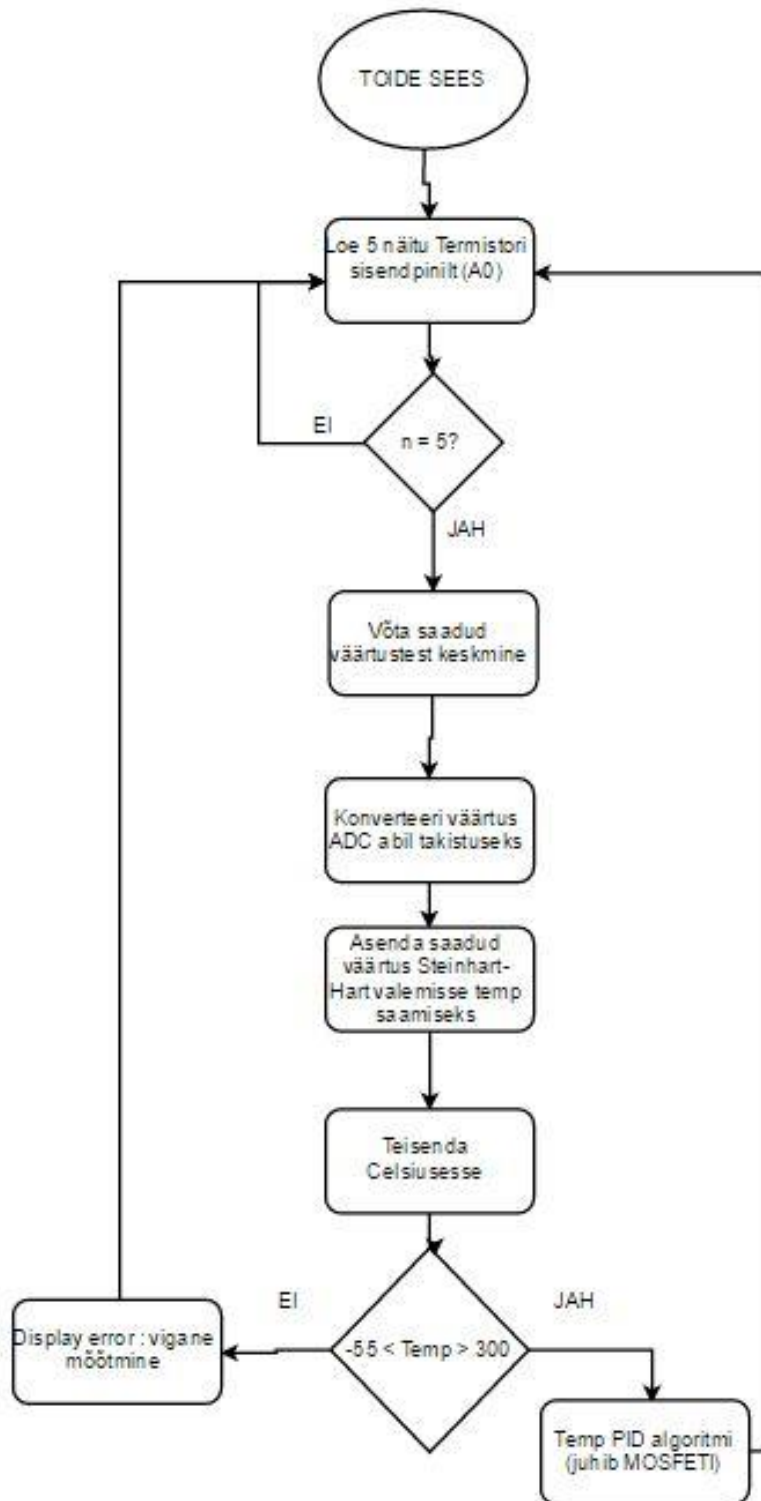
if (millis() - windowStartTime > WindowSize)
{ //aeg muuta akent, mida kasutatakse
  windowStartTime += WindowSize;
}

if (Output > millis() - windowStartTime) {
  digitalWrite(MOSFETPIN, HIGH);
} else digitalWrite(MOSFETPIN, LOW);

if (button1State == HIGH && button2State == LOW ) {
  digitalWrite(dirPin,HIGH);
  digitalWrite(stepPin,HIGH);
  delayMicroseconds(STEPPERDELAY);
  digitalWrite(stepPin,LOW);
  delayMicroseconds(STEPPERDELAY);
}
if (button2State == HIGH && button1State == LOW) {
  digitalWrite(dirPin,LOW);
  digitalWrite(stepPin,HIGH);
  delayMicroseconds(STEPPERDELAY);
  digitalWrite(stepPin,LOW);
  delayMicroseconds(STEPPERDELAY);
}
}
}
[/code]

```

### Lisa 3 Temperatuuri kontroll ja küttekeha algoritm



## Lisa 4 Mootori juhtimine vastavalt nupu vajutusele algoritm

