



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

UV KAPI VÄLJATÖÖTAMINE STEREOLITOGRAAFIAGA 3D-PRINDITUD DETAILIDE KÕVENDAMISEKS

DEVELOPMENT OF AN UV CURING STATION FOR HARDENING
STEREOLITHOGRAPHY 3D PRINTED PARTS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Priit Norak

Üliõpilaskood: 164600

Juhendaja: Taavi Möller, insener

Tallinn, 2019

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 /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Priit Norak

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: UV kapi väljatootamine stereolitograafiaga 3D-prinditud detailide kõvendamiseks

Kuupäev: 20.05.2019

50 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: Insener Taavi Möller

Sisu kirjeldus:

Käesolevas bakalaureusetöös on kirjeldatud stereolitograafia teel 3D-prinditud detailide mehhaaniliste omaduste parandamist hõlbustava UV kapi disaini ning valmistamist. Lõputöö raames on kirjeldatud 3D-printimise ajalugu, vajadust ning enimlevinuid tehnoloogiaid, selgitatud stereolitograafia tööpõhimõtet ning UV kappide vajadust, analüüsitud olemasolevaid UV kappe ning seatud nõuded autori poolt konstrueeritavale UV kapile. Autor koostas seadme CAD disaini, elektriskeemi ning juhtkontrolleri tarkvara ning valmistas seadme kasutades autori ettevõttes saadavalolevaid tootmismeetodeid nagu näiteks laserlõikust ning 3D-printimist. Lõputöö tulemusena valminud seadme ohutust analüüsiti ning võrreldi UV-kiirguse taset ka seaduses ettenähtud piirnormidele.

Märksõnad: stereolitograafia, UV kapp, kõvendamine, 3D-printimine, prototüüp

ABSTRACT

Author: Priit Norak

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Development of an UV Curing Station for Hardening Stereolithography 3D Printed Parts

Date: 20.05.2019

50 pages (*the number of thesis pages including appendices*)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Engineer Taavi Möller

Abstract:

The following BSc thesis describes the design and construction of an UV curing station for improving the mechanical properties of stereolithography 3D printed parts. The author describes the need and history of 3D printing, most common technologies used for 3D printing, the working principle of stereolithography 3D printers, the need for UV curing, analyses existing UV curing stations and sets functionality requirements for developing a cheaper yet fully functioning UV curing chamber. The CAD desing, electrical scheme and software were developed by the author. The machine was manufactured using production methods available in the author's company, such as 3D printing and laser cutting. Finally, the safety of the machine was analysed and compared to legal liimits.

Keywords: stereolitography, UV chamber, curing, 3D printing, prototype

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Priit Norak, 164600

Õppekava, peeriala: MAHB02/13, mehhatroonika

Juhendaja: Taavi Möller, Tel: 6203708

Lõputöö teema:

Eesti keeles: *UV kapi väljatöötamine stereolitograafiaga 3D-prinditud detailide kõvendamiseks.*

Inglise keeles: *Development of an UV Curing Station for Hardening Stereolithography 3D Printed Parts.*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Valmistada kasutajasõbralik ning soodne UV-kapp, millega oleks võimalik kõvendada stereolitograafia teel 3D-prinditud detaile.
2. Seadme kasutajal on võimalik luua seadmele erinevaid aja- ning temperatuuripõhiseid profiile vastavalt kasutatavast materjalist.
3. Võrrelda antud seadme efektiivsust sama tüüpi kallimate masinatega.
4. Analüüsida seadme ohutust kasutajale (UV-kiirgus).

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Analüüsida turul saadaval olevaid UV-kappe, maksumust ja nende kehtestatud nõudeid.	15.03.2019
2.	UV-kapi korpuse projekteerimine ja koostamine, arvestades üldlevinumate stereolitograafia 3D-printerite prindiala suuruseid.	29.03.2019
3.	UV-valgustite ning kapi soojenduse valimine ning abiseadmete elektroonika projekteerimine.	12.04.2019
4.	Füüsilise kasutajaliidese ja seadistatavate kasutusprofiilidega juhtprogrammi loomine.	26.04.2019
5.	Tulemuste analüüs ning võrdlus turul pakutavate seadmetega; Kokkuvõte.	03.05.2019
6.	Lõputöö vormistamine ning kirjaliku osa viimistlemine	17.05.2019
7.	Lõputöö esitamine	21.05.2019

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 21. mai 2019. a

Üliõpilane: "....."201....a
/alkiri/

Juhendaja: "....."201....a
/alkiri

SISUKORD

SISSEJUHATUS	10
1. 3D-PRINTIMINE.....	11
1.1 Ajalugu ja enimlevinud tehnoloogiad	11
1.2 Kasutusala	12
1.3 Stereolitograafia.....	13
2. UV-KIIRGUSEGA SLA 3D-PRINDITUD DETAILIDE KÕVENDAMINE.....	14
2.1 Protsess	14
2.2 Olemasolevad UV kapid	14
2.3 Nõuded konstrueeritavale seadmele.....	17
2.4 Materjalidele vastavad kõvendamise parameetrid	18
2.4.1 Materjal <i>Clear</i>	18
2.4.2 Materjal <i>Standard</i>	19
2.4.3 Materjal <i>Rigid</i>	20
2.4.4 Materjal <i>Tough</i>	20
2.4.5 Materjal <i>Durable</i>	21
2.4.6 Materjal <i>Castable</i>	22
3. UV KAPI RIISTVARA JA TARKVARA DISAIN	24
3.1 Tehnoloogiline lahendus	24
3.2 Komponentide valik	24
3.3 Korpuse detailide CAD mudel ja valmistamine	26
3.4 Elektriskeem	30
3.5 Juhtkontrolleri tarkvara ja kasutajaliides	32
4. OHUTUS JA TESTIMINE	36
4.1 Ohutusanalüüs	36
4.2 Testimine.....	39
KOKKUVÕTE	40
SUMMARY	41
KASUTATUD KIRJANDUS.....	42
LISAD.....	44
Lisa 1 Formlabs Form 2 3D-printer.....	45
Lisa 2 RDWorks tarkvara	46

Lisa 3 Z-Suite tarkvara	47
Lisa 4 UV kapi elektroonika	48
Lisa 5 UML skeem programmi koodist	49
Lisa 6 UV LED tulede lainepikkuse mõõtmine	50

EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö teema valik on ajendatud autori isiklikust huvist 3D-printimistehnoloogiate vastu. Töö on koostatud koostöös autori ettevõtte 3DKoda OÜ-ga, kelle finantseerimisel on soetatud tarvilikud komponendid ning kelle töökojas antud lõputöö praktiline pool on valminud. Autor soovib avaldada tänu Taavi Möllerile, kelle juhendamisel lõputöö valmis ning Tarmo Koppelile, kelle abiga said teostatud seadme UV-kiirguse ja UV tulede spektri analüüs.

LÜHENDITE LOETELU

FDM – Sulatatud sadestumise vormimine (ingl k. *fused deposition modeling*, FDM).

SLA – Stereolitograafia (ingl k. *stereolithography*, SLA).

SLS – Laserpaagutamine (ingl k. *selective laser sintering*, SLS).

UV – Ultraviolett.

CAD – Arvuti abil projekteerimine (ingl k. *computer-aided desing*, CAD).

SISSEJUHATUS

Käesolev lõputöö kirjeldab stereolitograafiaga 3D-prinditud detailide mehhaaniliste omaduste parandamist hõlbustava seadme, UV (ultravioletse) kapi, väljatöötamist disainist teostuse ja katsetusteni. Töö toob välja antud valdkonna olulisuse, võrdleb sarnaseid seadmeid ning olemasolevaid lahendusi, seab paika erinevad profiilid seadme tööks ning kirjeldab üksikasjalikult seadme prototüübi ehitust.

Lõputöö teema on valitud autori isiklikust huvist 3D-printimistehnoloogiate vastu ning otsesest vajadusest autori eraettevõttes 3DKoda OÜ, mis tegeleb igapäevaselt toodete kiirprototüüpimisega kasutades selleks erinevaid printitehnoloogiaid. Lõputöö käigus valminud seadmest on autori ettevõttele otsene kasu, vähendades tunduvalt stereolitograafia teel 3D-prinditud detailide järeltötlusele kuluvat aega ning suurendades sedasi ettevõtte tootlikkust ja kasumlikkust.

Kiirprototüüpimine kiirendab tunduvalt tootedisaini protsessi kulgu ning vähendab toodete turule jõudmiseks kuluvat aega. 3D-printimistehnoloogiate areng ning seadmete hindade langus on viimasel aastakümnel võimaldanud muuta 3D-printimisega kiirprototüüpimist jõukohaseks ka eraisikute ning väikeettevõtjate jaoks, kes saavad toodete erinevaid iteratsioone kiiremini testida ning leida disainis esinevaid vigu kiiremini kui kunagi varem [1].

Stereolitograafiaga töötavate 3D-printerite eeliseks on tunduvalt suurem täpsus kui teiste printitehnoloogiate puhul. Küll aga on prinditud detailid seadmest väljudes hapramad ning vajavad soojust ning UV valgust, et parandada detailide mehhaanilisi omadusi. Selleks võib kasutada näiteks päikesevalgust või UV kappi, kuid päikesevalguse korral ei ole võimalik protsessi kontrollida. Saadavalolevad UV kapid on kallid, ei sisalda võimalust katsetada erinevate materjalidega või puudub võimalus detailide eelnevaks soojendamiseks, mistõttu pole saavutatud detailide maksimaalset tugevust [2].

Lõputöö eesmärgiks on disainida, valmistada ja programmeerida SLA 3D-prinditud detailide kõvendamiseks UV kapp, mis oleks kasutajasõbralik, soodne valmistada, sisaldaks võimalust detailide eelsoojendamiseks ning võimaldaks kasutajal valida või ise koostada erinevaid järeltötluse profiile vastavalt materjalile.

1. 3D-PRINTIMINE

1.1 Ajalugu ja enimlevinud tehnoloogiad

3D-printimine sai teoreetilise alguse juba 1980ndatel aastatel kui Dr. Hideo Kodama kirjeldas oma uurimuses kiirprototüüpimismeetodit, mis põhines fotopolümeeri kiht-kihilisel kõvendamisel UV valgusega. Sedalaadi tehnoloogiat peetakse 1984. aastal Charles Hulli poolt leiutatud SLA (stereolitograafia) 3D-printeri eelkäijaks. Juba 1988. aastal patenteeriti ka FDM (ingl k. *Fused Deposition Modeling*) ning SLS (ingl k. *Selective Laser Sintering*) printitehnoloogiad, mis on SLA tehnoloogia kõrval üks enimlevinuimad printitehnoloogiad tänaseni [3].

Tänapäeval on kasutusel valdavalt kolm järgnevat tehnoloogiat:

- **FDM 3D-printimise** puhul on materjaliks üldjuhul 1.75 mm või 2.85 mm läbimõõduga rullile keritud termoplastik. Plastik surutakse kuumutatud printipeasse, millest materjal väljub peene joana, kasvatades sedasi kiht-kihi haaval soovitud detaili. Tehnoloogia eeliseks on lihtsus ning lai ja soodne materjalivalik. Negatiivseks küljeks on aga keskpärane printikvaliteet ning keerukamate detailide puhul ka tugistruktuuride olemasolu, mis tuleb üldjuhul käsitsi eemaldada [4].
- **SLS 3D-printimise** puhul on materjaliks pulbristatud plastiku (üldjuhul nailoni) osakesed. Laseri abil paagutatakse ühel kihil paiknevad osakesed ühtseks detailiks ning masin tõmbab rullikuga järgmise kihi materjali peale, mille järel protsess kordub. Tehnoloogia eeliseks on tugistruktuuride puudumine, mis võimaldab printida väga keerukaid detaile ning muudab järeltöötlemise lihtsamaks. Negatiivseks küljeks on SLS 3D-printerite kõrge hind ning vähene materjalivalik [4].
- **SLA 3D-printimise** puhul on materjaliks valguskõvenevad vaigud. Vaik paikneb üldjuhul läbipaistva põhjaga anumal, kuhu langetatakse prindiplatvorm, mille külge kõvendatakse fotopolümeerisatsiooni käigus UV laseriga detaili kihte. Protsessi korratakse kuni detail on valminud. Tehnoloogia eeliseks on kõrge kvaliteet. Negatiivseks küljeks on SLA 3D-printerite puhul üldjuhul väikene prindiala, tugistruktuuride olemasolu ning materjalide kallid hinnad [4].

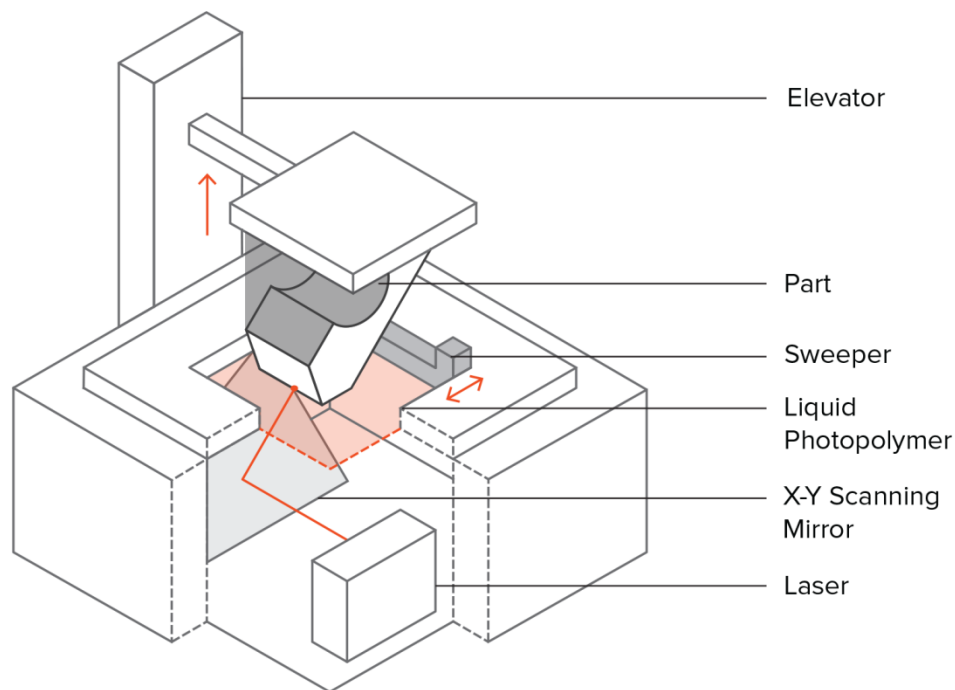
1.2 Kasutusala

3D-printimist kasutati selle kalliduse tõttu esmalt peamiselt suurtööstuses kiirprototüüpimiseks. Tehnoloogia areng ning patentide aegumine tõid turule ka soodsamad 3D-printerid, mis pakkusid konkurentsi 10 korda kallimatele seadmetele. See võimaldas 3D-printimist võtta kasutusele ka väikeettevõtetes, haridusasutustes ning eraisikutel. Põhiliselt kasutatakse 3D-printimist ka tänapäeval kiirprototüüpimiseks, et kiirendada erinevate disainivigade leidmist ning toodete turule jõudmist. Lisaks prototüüpimisele on levinud ka 3D-printimise kasutamine järgnevatel valdkondades [3] [1]:

- **Meditsiinitööstuses** valmistatakse hambaproteese, luuproteese, visualiseeritakse vähkkasvajaid jpm. [5].
- **Kosmetööstuses** printitakse keerulise struktuuriga kergeid, kuid samas tugevaid detaile [6].
- **Autotööstuses** valmistatakse vormide jaoks 3D-printitud positiive ning printitakse komponente mida teiste tehnoloogiatega pole võimalik valmistada [5].
- **Ehete valmistamisel** printitakse valuvormide jaoks positiive [5].
- **Varuosasid**, mida enam ei toodeta või mille komponendi väljavahetamiseks tuleks kogu seadme alamüksus välja vahetada, 3D-printitakse, et säästa raha ning aega [7].
- **Arhitektuuris** valmistatakse erinevate hoonete, linnaosade ning maastike makette [5].
- **Kunstis** printitakse skulptuure ja abstraktseid mudeleid [5].
- **Toitlustuses** kasutatakse toidu valmistamiseks 3D-printereid, mis võimaldavad erinevaid keerukaid söödavaid kujusid valmistada. Samuti kasutatakse 3D-printimist näiteks toiduvormide positiivide tegemiseks [5].

1.3 Stereolitograafia

SLA 3D-printimise puhul on peamiseks eeliseks FDM ja SLS tüüpi 3D-printimise ees kvaliteet (Joonis 1.1). Kvaliteedi all mõistetakse 3D-printimise puhul peamiselt ühe prindikihi kõige väiksemat paksust ning saavutatavaid tolerantse ja pinnakaredust. SLA prindikvaliteet sõltub peamiselt laseri galvanomeetrite positsioneerimise täpsusest ning laseri koondatud punkti läbimõõdust, mis on üldjuhul vahemikus 100 – 200 µm. Mida väiksem on laseri otspunkt, seda väiksemat punkti on võimalik korraga kivistada [8].



Joonis 1.1 SLA 3D-printeri ehitus [9]

SLA tehnoloogiaga 3D-prinditavate materjalide puhul on tegemist termoreaktiivsete lühikeste polümeeridega. UV valguse käes hakkavad polümeerid üksteisega liituma, moodustades aina pikemaid polümeeride ahelaid, mis selle protsessi käigus kõvendavad detaili. Sõltuvalt materjali koostisest vajavad materjalid kõvenemiseks erinevat kokkupuuteaega UV valgusega. Soojuse koosmõjul on võimalik kõvenemise protsessi kiirendada, sest materjali siseenergia suurenedes hakkavad molekulid polümeeris aktiivsemalt võnkuma, muutes kogu reaktsiooni kiiremaks ning kõvendades detaili ka seestpoolt. Seetõttu soojendavad ka üldjuhul tööstuslikud SLA 3D-printerid materjali enne printimist ülesse ning hoiavad printimise ajal ühtlast temperatuuri [9].

2. UV-KIIRGUSEGA SLA 3D-PRINDITUD DETAILIDE KÕVENDAMINE

2.1 Protsess

SLA 3D-printimise käigus ei saavutata enamusi materjalide puhul detailide maksimaalset tugevust, sest UV valgusega kokkupuude on lühikene ning detaili kõvenemiseks vajalikud reaktsioonid ei jõua lõpuni toimuda. Pikendades printimise ajal UV valgusega kokkupuudet, pikeneks ka detailide 3D-printimise aeg tunduvalt, mis muudaks kiirprototüüpimise omakorda aeglasemaks. Seetõttu kasutatakse SLA 3D-printimise puhul spetsiaalseid UV kappe, mis võimaldavad detailis kõvenemiseks vajalikud reaktsioonid lõpuni viia. Lõplikult kõvenenud detailil on tunduvalt paremad mehhaanilised omadused kui otse printerist tulnud detailide puhul. Suurenevad tunduvalt detailide tõmbetugevus, kõvadus ning temperatuuritaluvus [2].

SLA 3D-printimise juures kasutatavatel UV kappidel on üldjuhul UV valgusallikaks UV LED tuled, mis paiknevad seadme seinal või laes. Seadme teised seinad võivad olla kaetud UV valgust peegeldavate paneelidega, mis aitavad UV valgusel jõuda detaili kõikide külgedeni kiiremini ning muudab kogu protsessi efektiivsemaks. Kallimate UV kappide puhul on kogu kamber soojendatud et kõvendamise protsessi kiirendada ning täielikult lõpuni viia. Samuti on seadme alus tavaliselt pöörlev, et UV valgus kõvendaks detaili pinda ühtlaselt ning jõuaks võrdselt detaili külgedele [2].

2.2 Olemasolevad UV kapid

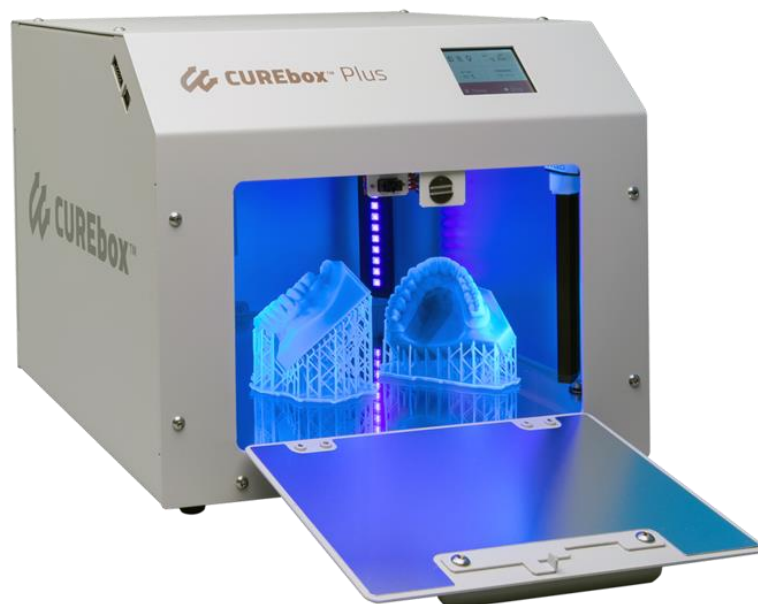
Järgnevalt on võrreldud kolme UV kappi (Tabel 2.1). Arvestades väikese ning keskmise ettevõtte printimismahtudega on UV kappide puhul olulisteks parameetriteks hind, tööala suurus, soojenduse olemasolu ning profiilide loomise võimalus, et vajadusel kasutada ka teisi materjale, mis võivad nõuda kõrgemat temperatuuri või pikemat UV valguse käes olemist.

Autori ettevõttes on kasutusel Formlabs Form 2 SLA 3D-printer (Lisa 1). Formlabs toodab ka enda UV kappi nimega Form Cure (Joonis 2.1). Antud seadme maaletoojaks on Eestis Infotark AS ning seadme hinnaks on 880€ (koos maksudega). Seadmega on võimalik kõvendada kuni 194 mm diameetri ning 185 mm kõrguseid detaile. Seadmel on sisseehitatud soojendus ning eelprogrammeeritud profiilid, mis sobivad kõikide Formlabsi poolt toodetud SLA materjalide kõvendamiseks. Puuduseks on oma temperatuuri ja aja profiilide loomise võimalus, mistõttu on teiste materjalide kasutamine seadmes raskendatud.



Joonis 2.1 Formlabs Form Cure UV kapp [10]

Wicked Engineering, LLC toodab CUREbox Plus UV kappi (Joonis 2.2), mille Eestisse tellimine läheks maksma 1105€ (koos maksudega). Seadme tööala suuruseks on masinal 300 x 300 x 165 mm. Seadmel on olemas detailide soojendus kui ka võimalus luua enda profiile.



Joonis 2.2 CUREbox Plus UV kapp [11]

Soodsaim UV kapp, mis on mõeldud just stereolitograafia teel 3D-prinditud detailide kõvendamiseks on XYZPrinting, Inc. poolt loodud XYZ UV Curing Chamber (joonis 2.3), mille hinnaks on 499€ (koos maksudega). Antud seadmega on võimalik kõvendada kuni 180 mm diameetri ning 200 mm kõrguseid detaile. Seadmel puudub detailide soojendamise ja eelprogrammeeritud profiilide kasutamise võimalus, mistõttu UV kõvendamise aeg tuleb sisestada kahekohalise numbrina.



Joonis 2.3 XYZ UV kapp [12]

Tabel 2.1 UV kappide võrdlus

Seade	Hind Eestise tellides (maksudega)	Tööala suurus	Detailide soojendus	Profiilide loomise võimalus
XYZ UV Curing Chamber	499€	180(D) x 200(H) mm	Ei	Ei
Formlabs Form Cure	880€	194(D) x 185(H) mm	Jah	Ei
CUREbox Plus	1105€	300 x 300 x 165 mm	Jah	Jah

Arvestades olemasolevate seadmete vähest funktsionaalsust või kallist hinda näeb autor, et on võimalik konstrueerida ettevõttesiseseks kasutamiseks UV kapp, mis oleks olemasolevatest lahendustest tunduvalt soodsam, kuid võimaldaks siiski detaile eelnevalt soojendada ning luua uusi temperatuuri ja aja profiile vastavalt vajadusele.

2.3 Nõuded konstrueeritavale seadmele

Lihtsustamaks ettevõttesisest tööprotsessi, kasutajamugavust ning ohutust on autor seadnud konstrueeritava UV kapi tööks ja funktsionaalsuseks järgnevad nõudmised:

- UV kapi on piisavalt suur tööala, et oleks võimalik ka terve prindiala suuruseid detaile kõvendada. Autori ettevõttes kasutusel oleva Formlabs Form 2 3D-printeri tööala on 145 x 145 x 175 mm, seega antud suurus oleks ka minimaalne UV kapi tööala.
- UV kapi UV LED tuledel lainepikkus peab olema 405 nm, sest antud lainepikkusel kõvenevad enimlevinuid SLA 3D-printimisel kasutatavad materjalid, sealhulgas ka autori ettevõttes kasutatavad materjalid [2].
- Detaile peab olema võimalik soojendada, et detailide kõvenemine oleks maksimaalselt efektiivne [2].
- Seade reguleerib detaili soojendamist automaatselt ning on võimeline hoidma stabiilset temperatuuri.
- Seadme alus peab pöörlema, et UV valgus ning soojendus jaotuks detaili pinnale ühtlasemalt.
- UV kapi kasutamine peab olema kasutajasõbralik ja lihtne – seadmel on olemas menüü ja nupud, millega on võimalik menüüs liikuda.
- Kasutajal on võimalik valida olemasolevate profiilide seast. Profiilid põhinevad Formlabs Form 2 SLA 3D-printeril kasutatavatel materjalidel
- Soovi korral on kasutajal võimalus luua ise uus temperatuuri ja aja profiil, et oleks võimalik kasutada ka kolmanda osapoole materjale.
- UV kapp peab olema ohutu. UV kiirgus ei tohi ületada töökohas lubatud piirnorme ning seadme töö peab ajutiselt peatuma kui seadme uks avatakse ootamatult.
- Seadme valmistamine on soodne ning tehtav üldlevinud materjalide ja autorile kättesaadavate tehnoloogiatega. Seadme prototüübi valmistamise ülempiiriks on ettevõtte poolt seatud 200€ (koos maksudega).

2.4 Materjalidele vastavad kõvendamise parameetrid

Autori ettevõttes kasutuses oleva SLA 3D-printeri, Formlabs Form 2, materjalivalikus on 25 erinevat materjali. Ettevõttesiseselt on kasutuses nendest materjalidest ainult kaheksa, mistõttu põhinevad seadme eelseadistatud profiilid just nendel kaheksal materjalil. Lisaks eelseadistatud profiilidele on kasutajal võimalus luua oma profiile ning sedasi kasutada ka teisi materjale [13].

Materjalide UV kõvendamise käigus suureneb detailide kõvadus, tõmbetugevus ning seega ka elastsusmoodul. Elastsusmoodul iseloomustab detaili vastupanuvõimet deformeerumisele. Mida suurem on elastsusmooduli arvuline väärtus, seda vähem antud materjal deformeerub erinevate jõudude avaldamisel. Elastsusmoodulit arvutatakse valemiga (Valem 2.1) [2] [14]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

kus E – elastsusmoodul, N/mm²,

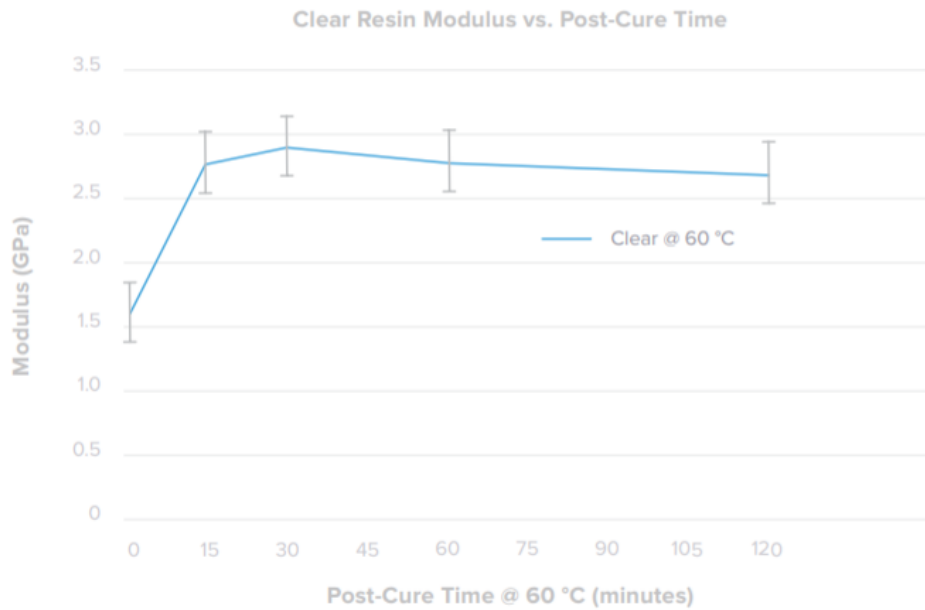
σ – mehaaniline pinge, N/mm²,

ε – keha suhteline deformatsioon.

Järgnevalt on välja toodud erinevate materjalide elastsusmooduli muutumine ajas. Kõik alljärgnevad graafikud pärinevad Formlabsi poolt teostatud katsetest antud materjalidega. Katsetuste käigus on kasutatud 405 nm lainepikkusega UV valgust ning kõige optimaalsemat temperatuuri, mis on leitud katsete tulemusena [15].

2.4.1 Materjal *Clear*

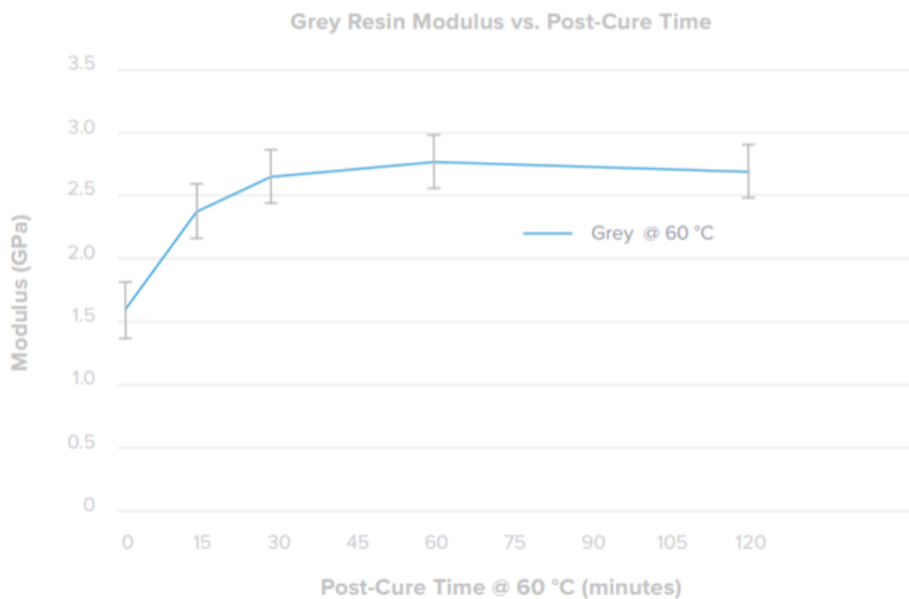
Antud materjali kasutatakse peamiselt läbipaistvate detailide prototüüpimiseks. Katsetulemuse graafiku (Joonis 2.4) põhjal on näha esimese 15 minuti jooksul elastsusmooduli kiiret tõusu. Pärast seda tõus aeglustub ning elastsusmoodul saavutab oma maksimaalse väärtuse 30 minuti pärast peale protsessi algust. Peale 30 minuti möödumist on näha elastsusmooduli vähenemist ajas. Antud graafiku põhjal oleks kõige optimaalsem profiil 60 °C soojendus ning 30 minutit UV-kiirgust.



Joonis 2.4 *Clear* materjali elastsusmooduli muutumine 60 °C juures 2 tunni vältel [15]

2.4.2 Materjal *Standard*

Standard materjale kasutatakse lihtsate prototüüpide, ehete, makettide ning valuvormide positiivide valmistamiseks. Materjali eeliseks on soodne hind ning värvivalik, mida on antud materjali puhul valikus kolm: must, valge ja hall. Erinevat värvi *Standard* materjalide koostis on sarnane ning värvus on saavutatud pigmentide abil, mistõttu need materjalid liigitatakse ühe grupi alla ning eeldatakse, et kõigi kolme materjali järeltötluse profiil on samasugune [15].

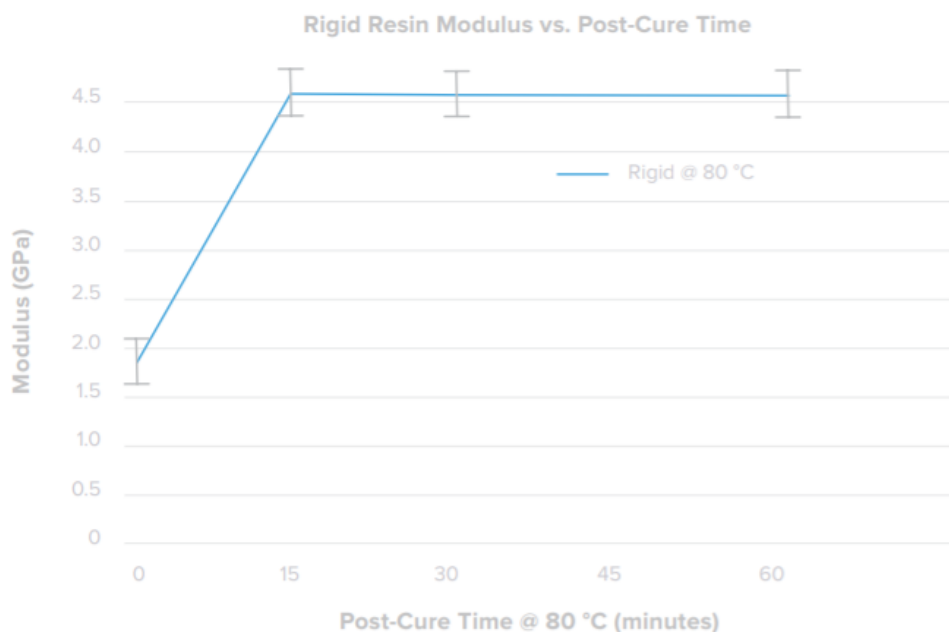


Joonis 2.5 *Standard* materjalide elastsusmooduli muutumine 60 °C juures 2 tunni vältel [15]

Katsetulemuse graafiku (Joonis 2.5) põhjal näeb esimese 30 minuti jooksul elastsusmooduli kiiremat kasvu. Seejärel saavutab elastsusmoodul oma maksimaalse väärtuse 60. minutil peale protsessi algust. Peale maksimaalväärtuse saavutamist on graafiku põhjal näha vähest elastsusmooduli vähenemist ajas, mistõttu võib antud materjalide puhul pidada kõige optimaalsemaks profiiliks 60 °C soojenduse juures 60 minutist UV valgusega kiiritamist.

2.4.3 Materjal *Rigid*

Rigid materjali kasutatakse peamiselt suurt mehaanilist koormust kannatavate detailide prototüüpimiseks või väikeseeriatootmiseks. Antud materjali puhul on kõige efektiivsema temperatuurina leitud UV valgusega kiiritamist 80 °C juures. Katsetulemuste graafikust (Joonis 2.6) on näha enam kui kahekordset elastsusmooduli muutumist esimese 15 minuti jooksul. Pärast seda elastsusmoodul enam ei muutu, mistõttu võibki antud materjali puhul pidada kõige optimaalsemaks profiiliks 80 °C juures 15 minutit UV valgusega kiiritamist. Formlabsi katsete tulemusena on välja toodud, et kiiritades kauem kui 15 minutit, materjali mehaanilised omadused ei muutu, kuid materjal muutub värvuselt kollakamaks.

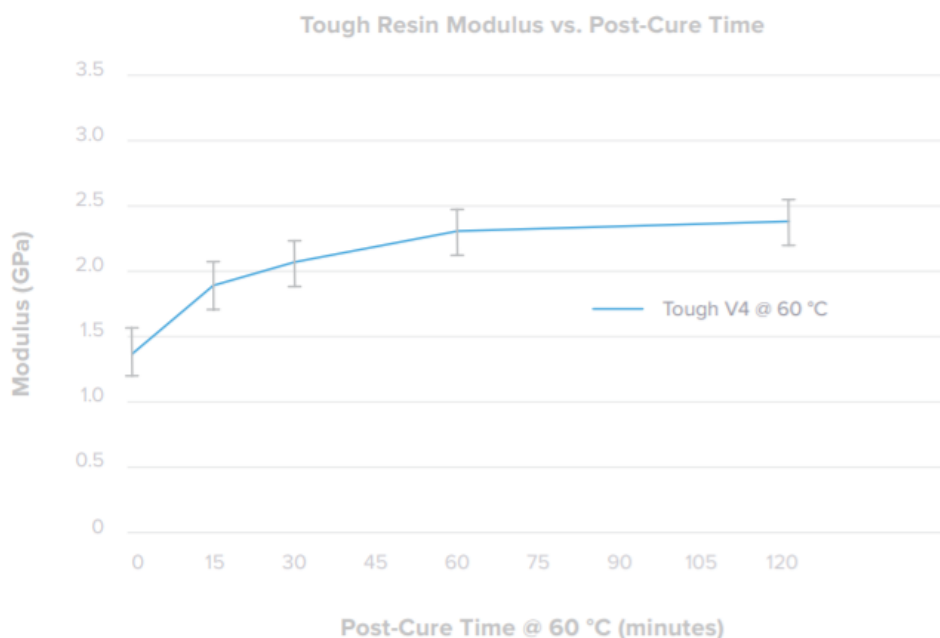


Joonis 2.6 *Rigid* materjali elastsusmooduli muutumine 80 °C juures 1 tunni vältel [15]

2.4.4 Materjal *Tough*

Tough materjali kasutatakse peamiselt erinevate kinnituste, rakiste ja korpuste valmistamiseks, sest materjal talub hästi erinevaid mehaanilisi koormuseid. Antud materjali katsetulemuste graafikust

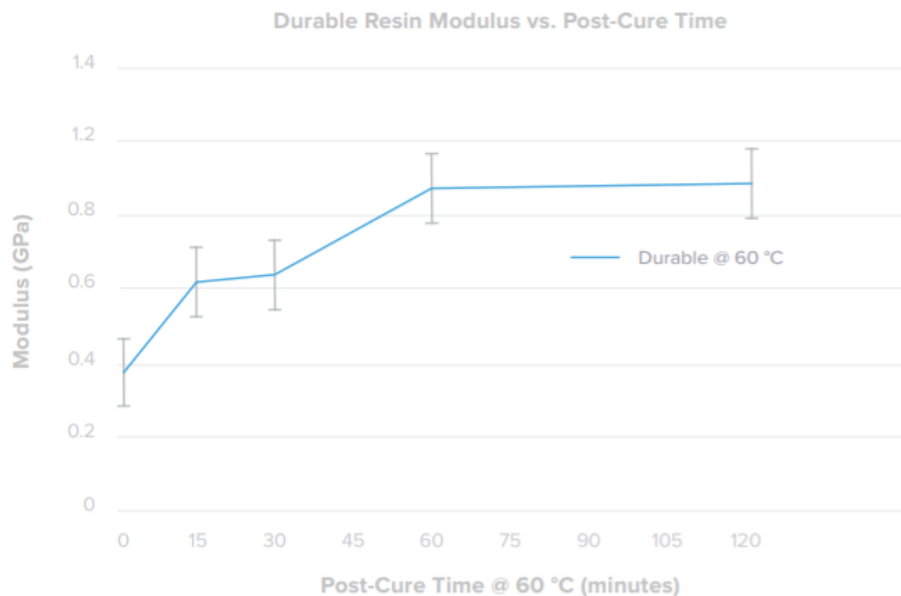
(Joonis 2.7) on näha esmalt elastsusmooduli kiiret kasvu, mis hakkab ajaga vaikselt vaibuma. 60 minutilise ja 120 minutilise aja vältel on elastsusmooduli kasv minimaalne, kuid parimate mehhaaniliste omaduste saavutamiseks on seame profiili optimaalseks väärtuseks siiski 120 minutit 60 °C soojenduse juures.



Joonis 2.7 Tough materjali elastsusmooduli muutumine 60 °C juures 2 tunni vältel [15]

2.4.5 Materjal *Durable*

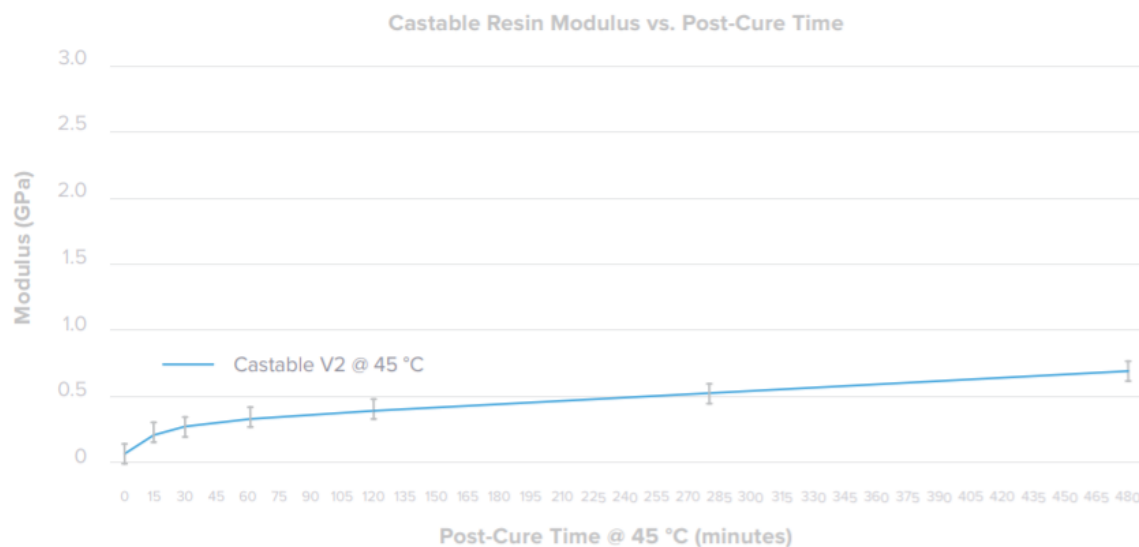
Durable materjal on tugev ja kergelt paindlik, mistõttu kasutatakse antud materjali peamiselt erinevate klambrite ja omavahel kokkukäivate detailide printimiseks. Katsetulemuste graafikust (Joonis 2.8) on näha esimese 15 minuti jooksul elastsusmooduli kiiret kasvu, mille järel kasv tunduvalt aeglustub ning 30. minutist kuni 60. minutini elastsusmooduli kiire kasv jätkub. Peale 60. minutit pole materjali elastsusmooduli kasv enam graafikust tuvastatav, mistõttu on seatud antud materjali profiiliks 60 °C juures 60 minutit UV valgust.



Joonis 2.8 Durable materjali elastsusmooduli muutumine 80 °C juures 2 tunni vältel [15]

2.4.6 Materjal Castable

Katsetulemuste graafikust (Joonis 2.9) on näha, et antud materjali elastsusmoodul suureneb aja möödudes aeglaselt. Esimese 15 ja 30 minuti jooksul on elastsusmooduli kasv kiirem, kuid peale seda kasv muutub lineaarsemaks. Graafikul on näha elastsusmooduli kasvu kuni 8 tunni jooksul ning kasv jätkub ka peale seda aega. Antud materjalist 3D-prinditud detaile kasutatakse aga valuvormides positiividena, mis vormi seest hiljem välja põletatakse. Formlabsi uurimistulemuste andmetel veelgi suurem elastsusmooduli väärtus aga ei suurenda tunduvalt detailide väljapõletamist valuvormidest, mistõttu valime antud materjali optimaalseks profiiliks 480 minutit 45 °C juures [15].



Joonis 2.9 Castable materjali elastsusmoduli muutumine 45 °C juures 8 tunni vältel [15]

Kõik ettevõttes kasutatavad materjalid saab koondada viieks aja ja temperatuuri profiiliks (Tabel 2.2), sest *Standard* ja *Durable* materjalide optimaalne temperatuur ja aeg kattuvad.

Tabel 2.2 Formlabsi materjalide jaoks koostatud eelseadistatud profiilid

Materjal	Kõvenemiseks kuluv aeg (min)	Optimaalne temperatuur (°C)
<i>Clear</i>	30	60
<i>Standard</i> (must, valge, hall) & <i>Durable</i>	60	60
<i>Rigid</i>	15	80
<i>Tough</i>	120	60
<i>Castable</i>	480	45

3. UV KAPI RIISTVARA JA TARKVARA DISAIN

3.1 Tehnoloogiline lahendus

UV kapi põhifunktsiooniks on seadmesse asetatud detailide soojendamine teatud temperatuurini ning UV valgusega kiiritamine. Autori ettevõttes on SLA 3D-printimiseks kasutusel peamiselt Formlabs Form 2 SLA 3D-printer ning sama tootja materjalid, mistõttu UV valgusallika valiku puhul on lähtunud samuti antud seadme tootjapoolsest uuringust, mille põhjal on 405 nm lainepikkusega UV valgus kõige efektiivsem lainepikkus antud tootja materjalidest 3D-printitud detailide kõvendamiseks, sest aitab saavutada kõige paremad mehhaanilised omadused [2].

Detailide soojendamiseks oleks võimalik kasutada soojusallikat ning ventilaatorit, mis soojusallika abiga kambri õhku soojendaksid. Sellisel juhul aga soojeneks üles ka terve UV kapi õhk ning soojuskadude vältimiseks peaks UV kapp olema ideaalselt õhukindel. Seetõttu on antud seadme arenduse puhul valitud detailide soojendamiseks 50 W halogeenlambid, millest kumbki on võimeline 30 cm kauguselt 2 minutiga soojendama metallplaadi 85 °C. Ohutuse mõttes on lampide kõrvale jäetud piisavalt palju vaba ruumi, et seinad ning muud seadme sisemised komponendid liigselt ei kuumeneks [16].

Detailid paiknevad UV kapis pöörleval alusel, mis on kinnitatud servomootori külge. Vältimaks valesid näite, toimub detailide temperatuuri mõõtmine pealtpoolt ning temperatuurisensor on suunatud pöörleva aluse tsentrisse ja kaetud külgedelt nii et soojusallikas ei kiirgaks otseselt temperatuurisensorisse, vältimaks valesid näite.

Kogu seadme tööd juhib kontrolleri, mis reguleerib automaatselt temperatuuri ja mõõdab iga profiili käivitamisel kulunud aega. Ohutuse tagamiseks jääb seade automaatselt ajutiselt seisma, kui kasutaja peaks UV kapi ukse poole töö pealt lahti tegema.

3.2 Komponentide valik

Seadme komponentide valiku puhul on lähtunud peamiselt Eestis kergelt kättesaadavatest komponentidest kui ka eelarvelisest piirangust. Kokku oli planeeritud seadme prototüübi koostamiseks ja komponentideks maksimaalselt 200€. See summa hõlmas endas peamiselt elektroonika ning kinnitusvahendite ostmist, sest seadme tootmist oli võimalik teostada ettevõtte

töökojas ning ettevõttele saadavalolevate töövahenditega. UV kapi prototüübi valmistamiseks soetatud materjalid on kirjas alljärgnevas tabelis (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Soetatud komponentide nimekiri

Komponent / materjal	Kogus (tk)	Tarnija	Hind tk (koos käibemaksuga)	Hind kokku (koos käibemaksuga)
Kinnitusvahendid (riivid)	3	Dutyhook OÜ	8.50€	25.50€
Kinnitusvahendid (hinged)	4	Dutyhook OÜ	2.0825€	8.33€
Kinnitusvahendid (M3 sisekuuskantpoldid)	85	Dutyhook OÜ	0.07€	5.95€
Kinnitusvahendid (M3 mutrid)	85	Dutyhook OÜ	0.05€	4.25€
Makettplaat	1	Dormikor OÜ	2.38€	2.38€
Juhtmed (erinevad värvid) 10 tk x 6 m	1	Dormikor OÜ	14.25€	14.25€
Klahvlüliti ON-OFF 6A 250 V	1	Dormikor OÜ	0.95€	0.95€
Toitekaabel 5 m must	1	Dormikor OÜ	3.33€	3.33€
ON-(ON) Omron Mikrolüliti 250 V 3 A	1	Dormikor OÜ	1.43€	1.43€
Arduino UNO Rev 3	1	ITT Group OÜ	18.00€	18.00€
Toiteplokk 12 V 4.2 A	1	Dormikor OÜ	16.15€	16.15€
Releemoodul 5 V 1 kanaliga 250 V 10 A	1	Dormikor OÜ	4.75€	4.75€
LCD ekraan sinine 1602 IIC/I2C mooduliga 5 V	1	Dormikor OÜ	11.40€	11.40€
POLOLU SM-S4303R servomootor	1	Transfer Multisort Elektronik Sp. z o.o.	10.70€	10.70€
Digitaalne kontaktivaba temperatuuriandur MLX90615	1	ITT Group OÜ	12.00€	12.00€
Halogeenlambid 50 W	2	Bauhof Group AS	1.50€	3.00€
UV LED tuled (405 nm) 5 m	1	LED House OÜ	34.80€	34.80€
Kokku:				177.17€

Antud komponentide valiku puhul on võimalik kogusummat alandada valides osadele toodetele soodsamaid alternatiive või tellides osasid komponente välismaalt. Komponentide tabel ei sisalda juba ettevõttel olemasolevaid materjale nagu näiteks laserlõikuseks sobilik vineer, 3D-printimiseks vajalik prindimaterjal, jootetina, elektriteip, takistid, transistorit, nupplüliteid jms.

3.3 Korpuse detailide CAD mudel ja valmistamine

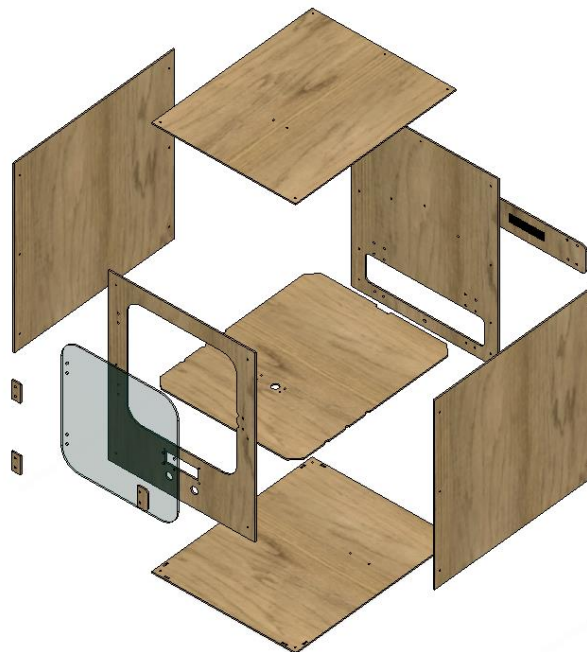
Enne seadme tootmist valmistati UV kapist 3D-mudel kasutades Autodesk Fusion 360 tarkvara. Seadme projekteerimisel lähtuti ka ettevõttes olemasolevatest tootmisvahenditest, milleks olid kuni 300 x 300 x 300 mm (0,3 x 0,3 x 0,3 m) tööalaga 3D-printerid ning kuni 500 x 700 mm (0,5 x 0,7 m) tööalaga laserlõikuspink.

3D-modelleerimise tulemusena valmis terve UV kapist CAD 3D-mudel, millega sai tootmiseks salvestada nii laserlõikuspinki jaoks DXF formaadis jooniseid kui ka 3D-printeritele sobivad STL formaadis 3D-mudeleid (Joonis 3.1).

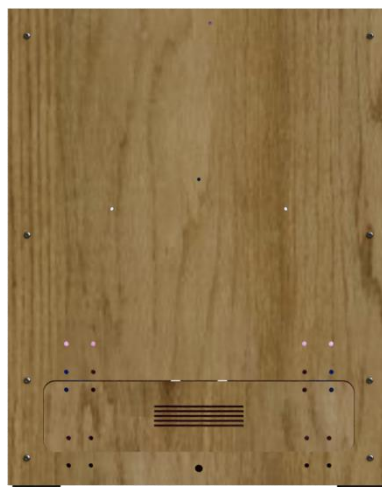


Joonis 3.1 3D-vaates renderdus UV kapi 3D-mudelist

Seadme korpus on valmistatud kasutades 80 W CO2 laserlõikuspinki (Joonis 3.2). UV kapi seinad on 3 mm paksusest kasevineerist. Paneelidesse on sisse lõigatud ka avad M3 poltide, ekraani, nuppude ja seadme jalgade paigutamiseks. UV kapi töökamber ning elektroonika asuvad eritasanditel, et vältida elektroonika liigset soojenemist ning UV-kiirgusega kokkupuudet. Elektroonikale pääseb ligi seadme taga paiknevast lahtikäivast luugist (Joonis 3.3). Sedasi on võimalik lihtsasti uuendada seadme tarkvara ning vajadusel kontrollida või välja vahetada elektroonikakomponente.

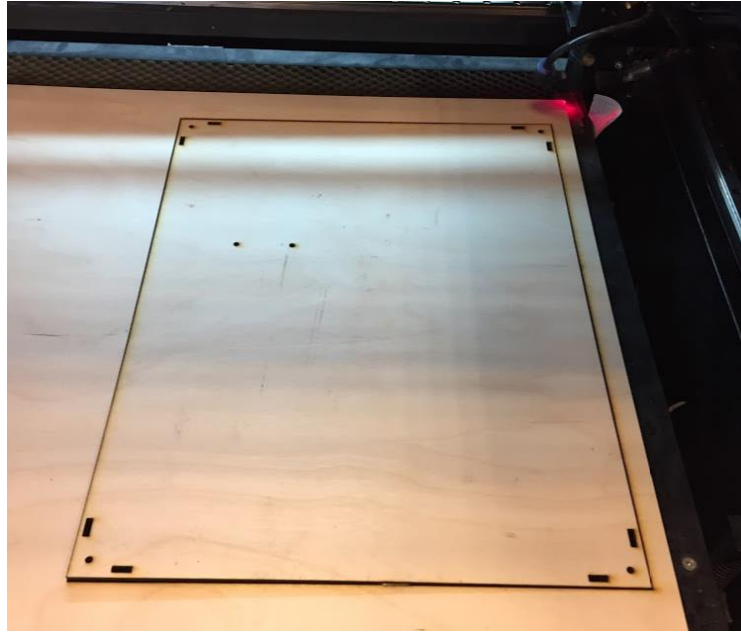


Joonis 3.2 Korpuse laserlõigatavad detailid 3D-mudel



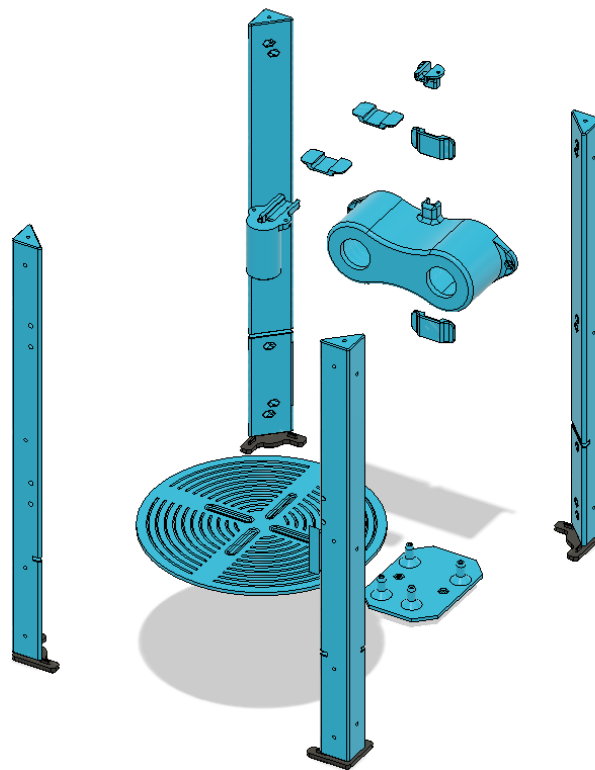
Joonis 3.3 UV kapi tagumine külg ja tagaluuk

Laserlõikamise teostamiseks on iga paneeli 2D profiil salvestatud eraldi DXF failiformaati, mida sai seejärel avada RDWorks tarkvaras (Lisa 2). RDWorks on tarkvara, mis on mõeldud lihtsamate CO₂ laserlõikuspinkide kasutamiseks. Laserlõikus sai teostatud nii vineeri kui ka pleksiklaasi puhul 80% võimsusega ning 10 mm/s (0.01 m/s) lõikekiirusega (Joonis 3.4).



Joonis 3.4 Seadme korpuse paneelide laserlõikus

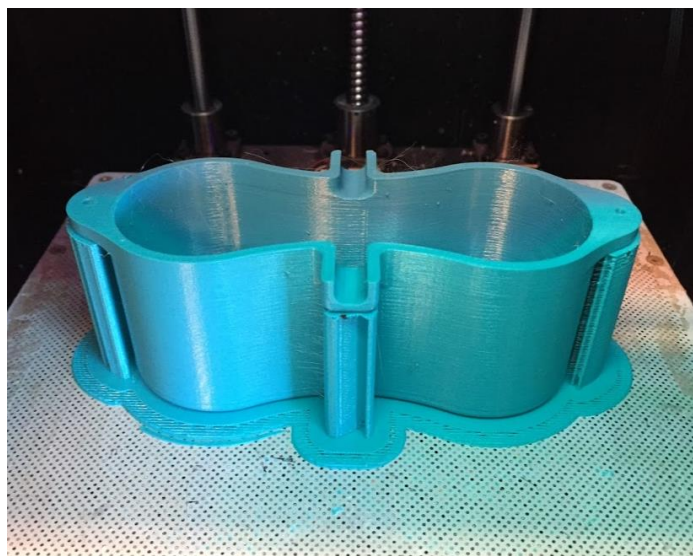
Seadme ülejäänud põhiosad on 3D-prinditud kasutades Zortrax M200 ning M300 3D-printereid (Joonis 3.5). Materjalina on kasutatud PCABS plastikut, mille puhul on tegemist kõrge temperatuuritaluvuse ja UV kindla plastikuga. Materjal kannatab püsivalt kuni 104 °C temperatuuri [17].



Joonis 3.5 UV kapi 3D-prinditavad detailid

Suurimad 3D-prinditud detailid on UV kappi läbivad neli tugiposti, mille külge on poltide ja mutritega kinnitatud kõik laserlõigatud paneelid. Sedasi jääb seadme konstruktsioon tugevaks ning võimaldab vajadusel hõlpsasti seadme konstruktsiooni lahti võtta. Iga posti kogupikkuseks on 394 mm (0,394 m), mistõttu pidi poste printima mitme tükina ning hiljem kokku liimima.

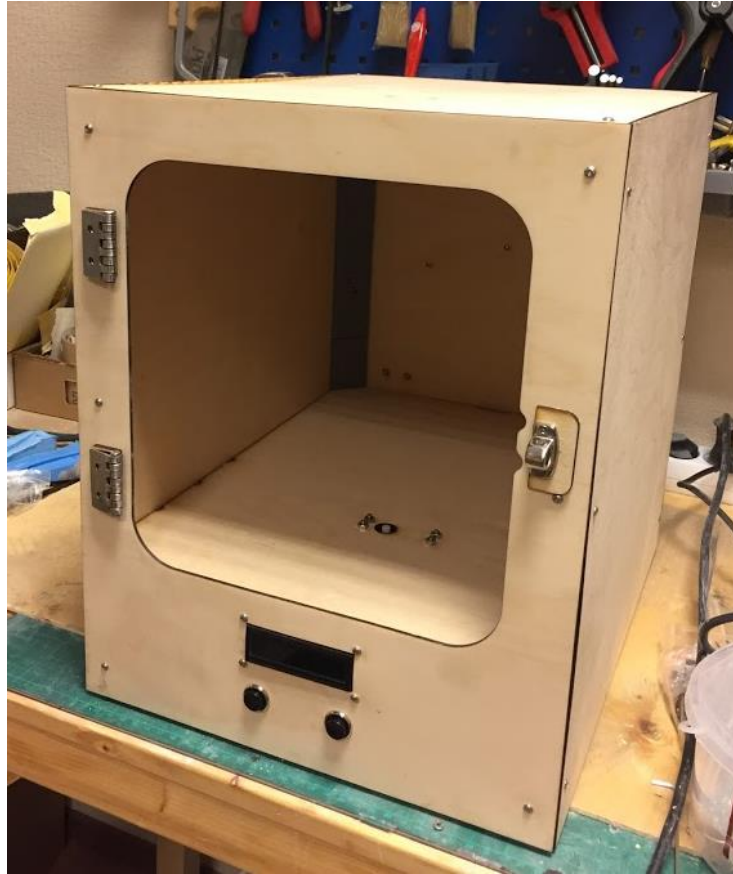
Teiste detailidena on 3D-prinditud ka UV kapi jalad, pöörlev alus, temperatuurisensori hoidik, juhtmete hoidjad, Arduino Uno kinnitusalus, lampide hoidja ning ukse mikrolüliti hoidja (Joonis 3.6).



Joonis 3.6 3D-prinditud UV kapi lampide hoidja

3D-printimiseks on failid esmalt ette valmistatud Z-Suite tarkvaras, mis genereerib STL formaadis 3D-mudelite põhjal prindisimulatsiooni ning g-koodi, mille põhjal 3D-printer antud detailid valmistab (Lisa 3). PCABS materjali printimiseks on 3D-printeri düüsi temperatuur 260 °C ning prindiplatvormi temperatuur 90 °C. Iga prindikihi paksuseks on 0.19 mm ja detailid on seest 30% ulatuses täidetud kargstruktuuriga, et säästa materjali ning prindiaega. Kõikide detailide puhul on kasutatud ka tugistruktuure, mis on hiljem käsitsi detailide küljest eemaldatud [17].

Seadme korpus on kokku pandud M3 poltide ja mutritega (Joonis 3.7). Seadme korpuse välismõõt on 400 (pikkus) x 320 (laius) x 400 (kõrgus) mm (0,40 x 0,32 x 0,40 m). Seadme efektiivne tööala on 200 (diameeter) x 200 (kõrgus) mm (0,2 x 0,2 m) (Lisa 4).

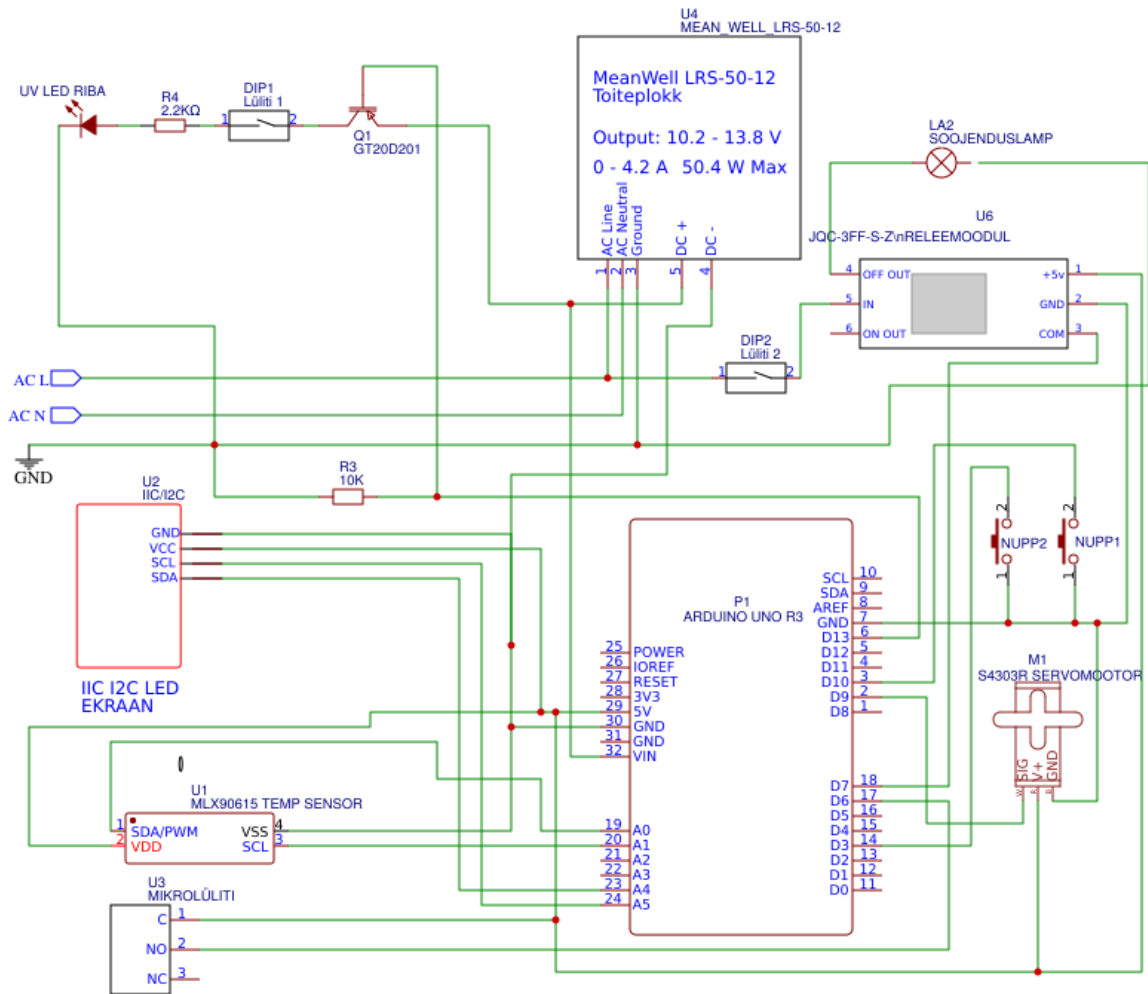


Joonis 3.7 Koostatud UV kapi korpus

3.4 Elektriskeem

UV kapi töö juhtimiseks on valitud Arduino UNO kontrolleri (Joonis 3.8). Kontrolleri ning UV LED tuled toide tuleb läbi MeanWell LRS-50-12 toiteploki, mille sisendiks on seinakontaktist tulev 230 V ning väljundiks on 12 V. UV LED tuled põlemist ja mittepõlemist juhib Arduino transistori abil, mille tööd kontrollitakse läbi pesa D13. Ohutuseks on paigaldatud ka mehaaniline lüliti, mille kontaktid on ühendatud ainult juhul kui seadme uks on kinni (Lisa 4).

Kapi soojendamiseks on kasutusel kaks 230 V peal töötavat 50 W halogeenlampi, mis on ühendatud Arduinoga läbi JQC-3FF-S-Z releemooduli. Relee abil on võimalik lülitada 230 V toitepinget otse halogeenlampidesse. Lülitust juhib Arduino läbi pesa D7. Taaskord on kasutaja ohutuseks paigaldatud ka mehaaniline lüliti, mille kontaktid on ühendatud ainult juhul kui seadme uks on kinni.



Joonis 3.8 UV kapi elektriskeem

UV kapi ukse avamise ja sulgemise registreerib Arduino läbi mikrolüliti, mis on paigaldatud vahetult ukse riivi alla. Mikrolüliti oleku registreerib kontrolleri läbi pesa D6.

Temperatuurisensorina on kasutatud MLX90615 digitaalset kontaktivaba infrapunatermomeetrit. Antud sensoriga on võimalik mõõta detaili temperatuurivahemikke $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $115\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sensori mõõteresolutsioon on kuni $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$. MLX90615 saadab signaali kontrolleri läbi andmevahetuseks mõeldud SDA (ingl k. *Serial Data Line*) pesa, mis on ühendatud Arduino analoogpesasse A0. SCL (ingl k. *Serial Clock Line*) pesa kaudu toimub andmete sünkroniseerimine ning see on ühendatud Arduino analoogpesasse A1 [18] [19].

UV kapi platvormi pöörlemise teostab 5 V pealt töötav servomootor SM-S4304R. Antud servomootori puhul on võimalik mootorit pidevalt pöörata ning ei ole limiteeritud ainult kindlate pöörämiskraadide peale. Servomootori toide tuleb läbi Arduino mikrokontrolleri ning signaal servomootori käivitamiseks ja peatamiseks tuleb läbi pesa D9.

Seadme kasutajal on võimalik seadet kontrollida ja menüüs orienteeruda kahe OFF-(ON) tüüpi nupu abil. Antud nuppude kontaktid on normaalolekus lahtiühendatud asendis ning nupule vajutades ühenduvad kontaktid kokku ning signaal liigub kontrollerrisse, mis registreerib nupulevajutuse. Nupud on ühendatud kontrollerrisse läbi D3 ja D10 pesade [20].

Profiilide valiku saab teostada seadme menüüs, mis on kuvatud kasutajale läbi LCD ekraani. Tegemist on 1602 LCD ekraaniga, millel on võimalik reaalselt ekraanile kuvada ainult kaks rida andmeid. Iga rea pikkus on maksimaalselt 16 tähemärki. Ekraani juhtimine toimub sarnaselt temperatuurisensorile läbi SDA ja SCL pesade, mis on ühendatud vastavalt kontrolleri A4 ja A5 analoogpesadesse.

3.5 Juhtkontrolleri tarkvara ja kasutajaliides

UV kapi kontrolleri, Arduino Uno, programmeerimiseks kasutati Arduino IDE keskkonda. Programmeerimise lihtsustamiseks on programmis kasutatud nendele komponentidele spetsiifilisi teeke. Teekide puhul on tegemist eelnevalt programmeeritud funktsioonidega, mida programmeerija saab oma põhiprogrammis esile kutsuda. Teekide kasutamisel tuleb need esmalt defineerida programmi alguses käsuga *#include*. UV kapi programmi kirjutamisel on kasutatud järgnevat väliseid teeke:

- *LiquidCrystal_I2C.h* – LCD ekraani programmeerimisel kasutatav teek. Antud juhul kasutame teeki 16 x 2 ekraani elemendi juhtimiseks. Antud ekraanil on seega võimalik kirjutada kokku maksimaalselt 32 tähemärki. Teegi initsialiseerimiseks tuleb programmi *setup* funktsioonis initsialiseerida LCD ekraan käsklusega *init()* ning panna tööle LCD ekraani taustvalgus käsklusega *backlight()*. UV kapi programmis on kasutusel antud teegi põhifunktsioonid, milleks on:
 - *clear()* – kustutab ekraanilt eelneva teksti;
 - *setCursor(x,y)* – seab paika milliselt koordinaadilt alustada kirjutamist. X ja Y on vastavalt horisontaalse ja vertikaalse rea koordinaadid;
 - *print(„x“)* – kuvab ekraanile eelnevalt paikaseatud koordinaatidest alustades teksti „x“.

- *MLX90615.h* – Infrapunatermomeetri programmeerimisel kasutatav teek. Teegi abil on võimalik saada sensorist kätte objekti temperatuuri hetkväärtus funktsiooniga *getTemperature()*.
- *Servo.h* – Servomootorite juhtimiseks kasutatav teek. Antud teegi puhul peab setup funktsioonis servomootori pesa deklareerima funktsiooniga *attach(x)*, kus *x* on pesa number. Funktsiooniga *write()* on võimalik servomootorit panna tööle ning peatada. Näiteks *write(90)* puhul servomootor seisab, *write(0)* puhul pöörleb servomootor maksimaalse kiirusega ühtepidi ning *write(180)* puhul pöörleb servomootor maksimaalse kiirusega teistpidi.

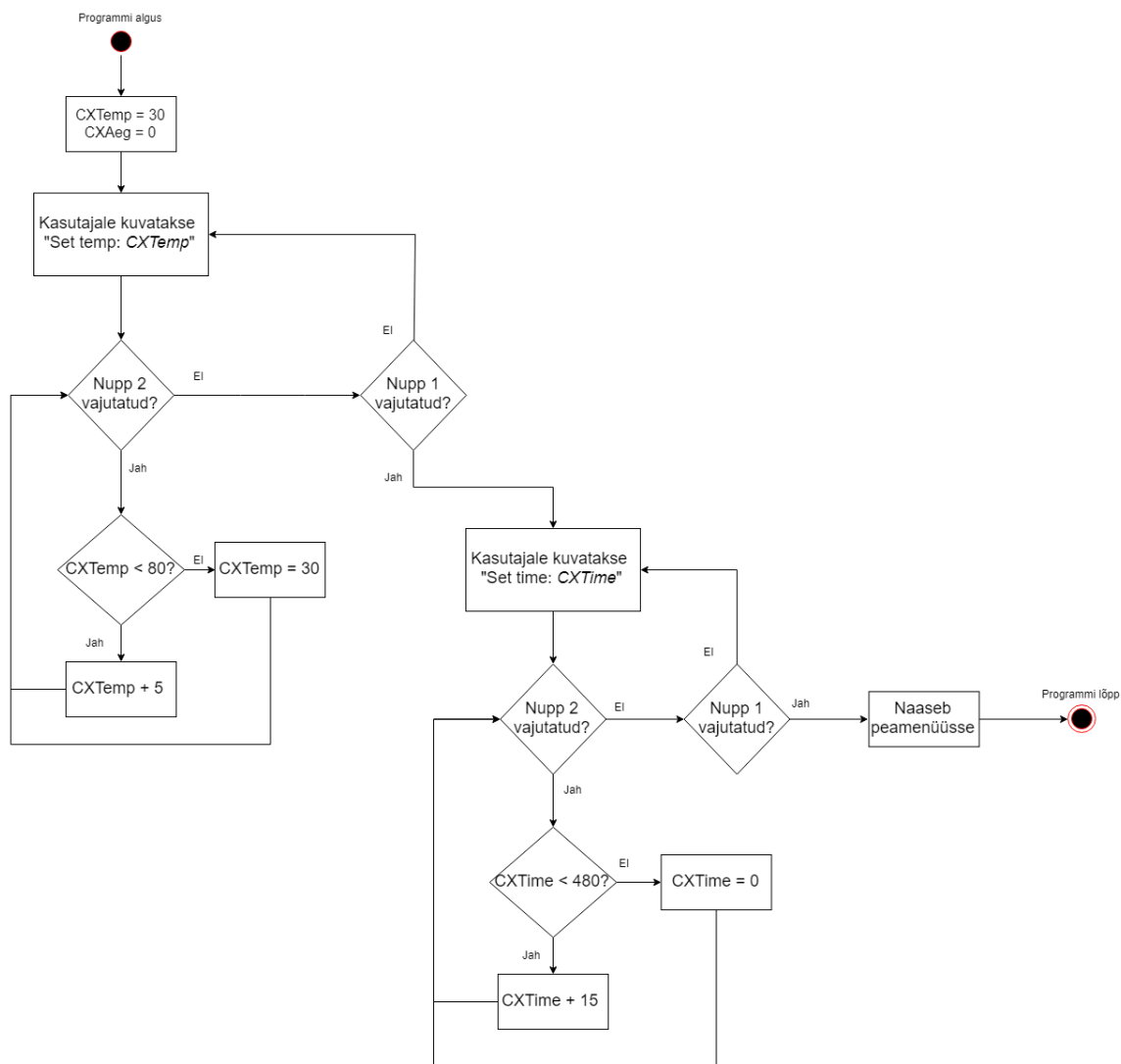
Programmile sai eelnevalt koostatud UML skeem, mis kujutab endast kogu programmi loogikat (Lisa 5). Programmi alguses on defineeritud kõik muutujad, sisendid ja väljundid. Eelseadistatud on temperatuur, aeg ja loendur, mille väärtusteks on algselt 0. Kasutajale kuvatakse menüü, kus on viis eelseadistatud profiili ning kolm kasutaja poolt seadistatavat profiili. Kasutaja saab menüüs liikuda vasakpoolse nupuga (nupp 1) ning valiku teha parempoolse nupuga (nupp 2).

Valides juba eelseadistatud profiili, muutuvad vastavalt profiilide temperatuuri (muutuja *temp*) ja aja (muutuja *aeg*) väärtused. Näiteks valides *Clear* profiil on aeg 30 minutit ning temperatuuriks seatud 60 °C. Seejärel kontrollitakse kas UV kapi uks on suletud. Kui ei ole, kuvatakse kasutajale kiri „*Please close the door*“ senikaua kuni uks on suletud ning mikrolüliti kontakt on aktiveeritud. Seejärel lähevad detaili soojendamiseks põlema halogeenpirnid ning alus, millel detail paikneb, hakkab servomootori abil pöörlema. Esmalt soojendatakse detail *temp* muutuja väärtuseni ning seejärel käivitatakse taimer ja aktiveeritakse UV LED tuled. Taimer kestab kuni on jõudnud väärtuseni, mis on salvestatud muutujasse *aeg*. Tööaja vältel kuvatakse ekraanile aktiivselt temperatuuri ja aja hetkväärtuseid, et kasutajal oleks ülevaade seadme tööst. Temperatuuri hoidmiseks lülitatakse halogeenlampe releemooduli abil sisse ja välja.

Kui aja hetkväärtus on võrdne muutujaga *aeg*, siis seadme töö peatatakse lülitades välja halogeenlambid, UV LED lambid ning servomootor. Ekraanile kuvatakse kiri „*Job finished!*“ senikaua kuni kasutaja on avanud seadme ukse ning mikrolüliti kontakt vabaneb. Seadme programm naaseb põhimenüüsse ning jääb ootama uusi käskluseid.

Kasutajal on ka võimalus luua kindla aja ja temperatuuriga profiile. Menüüs on 3 profiili, mille väärtuseid on võimalik kasutajal ise muuta. Profiilide nimeks on *Custom 1*, *Custom 2* ja *Custom 3*. Iga profiiliga on seatud ka vastavalt muutuja *C1*, *C2* ning *C3*. Kui mõnda profiili on juba kasutaja poolt aja ja temperatuuri väärtused salvestatud, siis seatakse vastavalt *C1*, *C2* või *C3* väärtuseks 1

ning menüüst antud profiile valides kopeeritakse nendesse salvestatud väärtused *temp* ja *aeg* muutujatesse ning seadme töö jätkub sarnaselt eelseadistatud profiilidele. Profiilides puuduvad salvestatud väärtused kui profiilile vastava muutuja *C1*, *C2* või *C3* väärtus on 0. Sellisel juhul kui profiil valida kuvatakse ekraanile kiri „*Want to set profile CX?*“, kus *X* on vastavalt profiilile 1, 2 või 3. Vajutades vasakpoolsele nupule (nupp 1) naastakse menüüsse. Vajutades parempoolsele nupule algab aga antud profiili seadistamine (Joonis 3.9).



Joonis 3.9 Profiili seadistamise loogika UML skeemina

Kasutajapoolse profiili seadistamiseks on abiks muutujad *CXTemp* ja *CXAeg*, kus „*X*“ on vastavalt profiili valikust 1, 2 või 3. Algväärtustatult on *CXTemp* 30 °C ning *CXAeg* 0 minutit. Antud muutujatele seadistatud väärtused kirjutatakse Arduino EEPROMi. EEPROMi (ingl. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) puhul on tegemist püsimaluga kuhu saab informatsiooni talletada, mis jääb alles isegi peale seadme välja lülitamist.

Kui kasutaja on valinud profiili, millele ei ole eelnevalt andmeid salvestatud, siis kuvatakse kasutajale tekst „Set temp: *CXTemp*“, kus *CXTemp* kuvab antud muutuja hetkväärtust. Maksimaalseks temperatuuriks on 80 °C. Kasutaja saab temperatuuri nupulevajutusega (nupp 2) suurendada 5 °C võrra. Kui temperatuur läheb üle 80 °C, seatakse uuesti antud muutuja väärtuseks 30 °C, mis on minimaalne temperatuur.

Kui soovitud temperatuur on valitud, vajutab kasutaja esimesele nupule (nupp 1) ning seejärel kuvatakse ekraanile tekst „Set time: *CXTime*“, kus *CXTime* on aja hetkväärtus. Vajutades ka sel korral teisele nupule (nupp 2), saab kasutaja suurendada iga nupulevajutusega ajalist väärtust 15 minuti võrra. Aja maksimaalseks väärtuseks on 480 minutit, et vältida liigset seadme ülekuumenemist. Selle väärtuseni jõudes läheb antud muutuja väärtus taaskord nulli. Kui sobiv aeg on valitud, vajutatakse taaskord esimesele nupule (nupp 1) ning antud profiili väärtused on salvestatud ja ilmuvad nähtavale ka menüüs profiili valiku all.

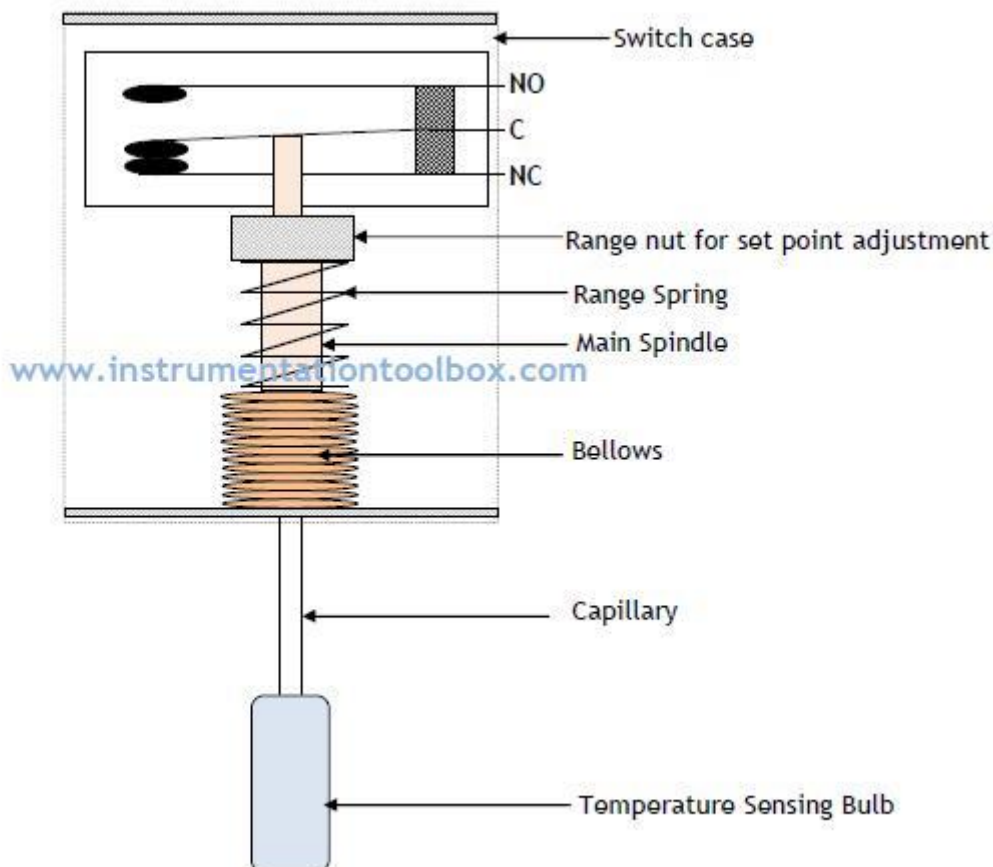
4. OHUTUS JA TESTIMINE

4.1 Ohutusanalüüs

UV kapi puhul on seadme põhilised funktsioonid, UV kiiritamine ning detailide soojendamine, ka põhilisteks ohuteguriteks seadme kasutajale. UV kiirguse ja põletamise mõju kasutajale on minimeeritud mehaaniliste lülitustega kapis. Seadme ukse avamine ja sulgemine aktiveerib ja deaktiveerib 3 erinevat lülitit:

- Esimese lülitit puhul on tegemist mikrolülitiga, mis annab UV kapi kontrolleri teada kui kapi uks on avatud. Seejärel läheb kogu UV kapi programm pausile ning UV kapp teostab UV LED tulede väljalülituse transistori ja halogeenlampide väljalülituse releemooduli abil.
- Teine lülitit on ühendatud vahetult enne UV LED tulede toitevoolu ning on sõltumatu kontrolleri. Olukorras, kus kontrolleri või tarkvara peaks olema vigane, toimub siiski kapi ukse avamisel UV LED tulede väljalülitamine, sest vool katkeb mehaaniliselt lülitit abil.
- Kolmas lülitit on ühendatud vahetult enne halogeenlampide releemooduli toitevoolu ning on sõltumatu kontrolleri. Olukorras, kus kontrolleri või tarkvara peaks olema vigane, toimub siiski kapi ukse avamisel halogeenlampide väljalülitamine, sest sisendvool releemoodulisse katkeb mehaaniliselt lülitit abil.

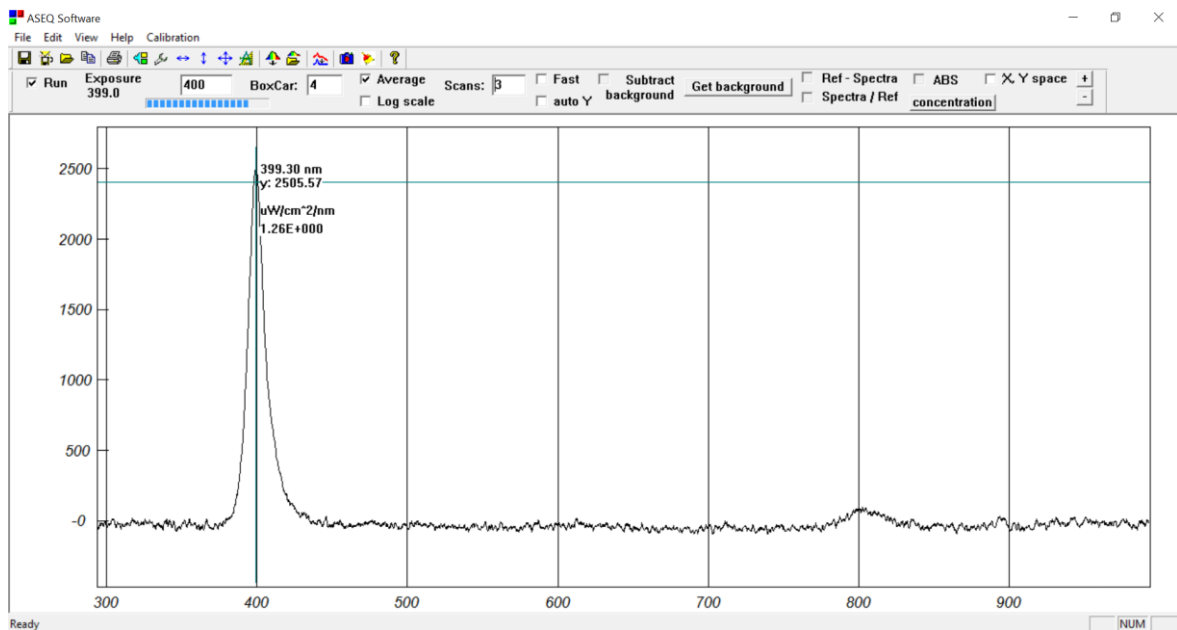
Lülitid kaitsevad kasutajat ainult seadme töö ajal avamisel, kuid seadme ülekuumenemisel on risk seadme süttimisel. Ülekuumenemise risk on suurim kõrgete temperatuuride (*Rigid* materjali puhul 80 °C) või süsteemivea korral. Riskide maandamiseks oleks võimalik kasutada temperatuurilülitit, mis oleks sõltumatu kontrolleri ning lülitab mehaaniliselt voolu halogeenlampidesse välja, kui temperatuur ületab kindlat taset. Temperatuurilülitite ehitused on erinevad, kuid üldjuhul alati sarnase ülesehitusega kus mingi element temperatuuri tõusmisel lülitub ümber teise positsiooni. Üks levinud lülitusmeetoditest on temperatuuri tõusmisel näiteks kapillaarpaisumise (vedeliku või gaasi) abil lülitit teise asendisse lülitamine (Joonis 4.1) [21].



Joonis 4.1 Temperatuurilüliti ehitus [21]

UV-kiirgusega kokkupuute piirnormid on sätestatud töötervishoiu ja tööohutuse seaduses. UV-kiirgus jaguneb kolmeks piirkonnaks: UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) ning UV-C (100-280 nm). Peamiselt loetakse nendest kiirgustest inimesele ohtlikuks UV-B ning UV-C tüüpi kiirgust, mis võivad tekitada erüteemi (patoloogiline veresoonte laienemine) või koguni nahavähki. UV-A tüüpi kiirgus jõuab küll inimese nahas sügavamale, kuid ei ole sedavõrd ohtlik. Näiteks päikese poolt maale jõudev UV-kiirgus on enamjaolt UV-A tüüpi. Samuti võivad kiirata ka tavalised säästupirnid UV-A tüüpi kiirgust [22] [23].

Konstrueeritud UV kapis on kasutusel UV LED tuled, mille lainepikkuseks on tootja märkinud 405 nm. Lainepikkuse kontrollimiseks on teostatud ASEQ Instruments poolt toodetud LR1 spektromeetriga spektri analüüs UV LED tuledest 1 cm kauguselt, mille tulemusena selgus, et kõige intensiivsemalt registreerub 399,3 nm lainepikkus (Lisa 6). Registreeritud on UV LED tuledest lainepikkused vahemikus 384,7 nm kuni 421,7 nm (Joonis 4.2).



Joonis 4.2 ASEQ LR1 spektromeetriga teostatud lainepikkuse kontrolli tulemus

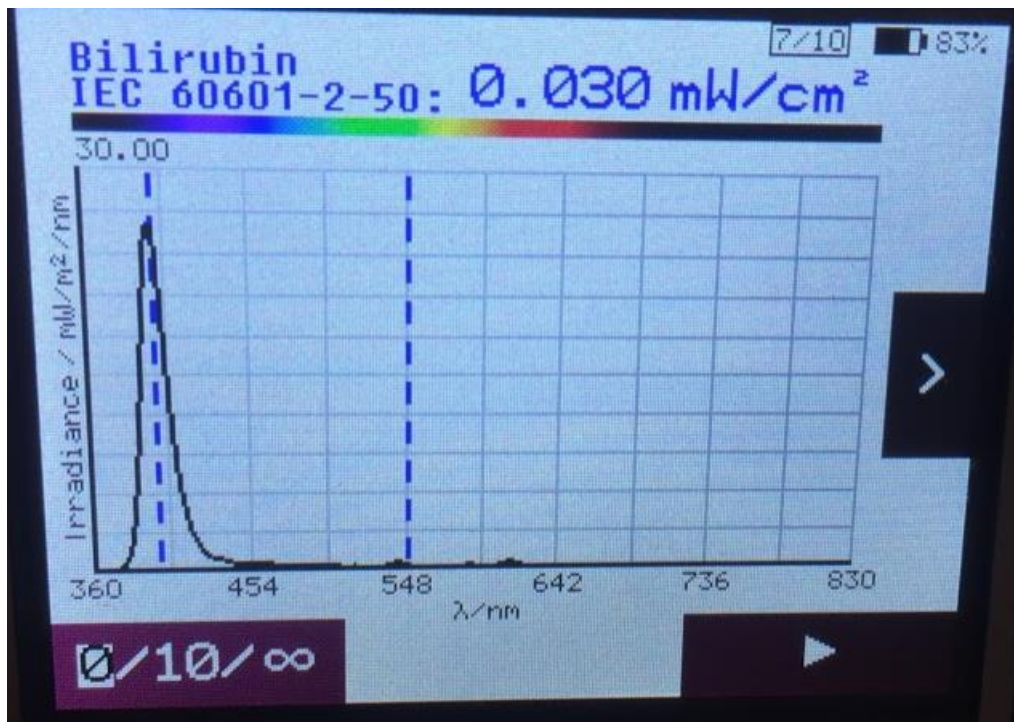
Katsetulemusena registreeritud lainepikkus on seega täpselt UV-A tüüpi kiirguse (315-400 nm) ning nähtava (sinise) valguse (380-700 nm) piiril. Nähtava valguse piirnormi saab määrata efektiivse kiirgusintensiivsusega, mis sõltub valgusega kokkupuute ajast (Valem 4.1) [23].

$$E_B = \frac{100}{t}, \tag{4.1}$$

kus E_B – efektiivne kiirgusintensiivsus (sinise valguse korral), Wm^{-2} ,

t – allikaga kokkupuute aeg, s.

Eeldades et kokkupuuteaeg allikaga on 1 sekund, tuleks ajalise väärtuse valemisse asendamisel efektiivse kiirgusintensiivsuse piirnormiks ligikaudu $100 Wm^{-2}$ (Valem 5.1). Seadme vastavuse kontrollimiseks on teostatud kiirgusintensiivsuse katse 10 cm kaugusel seadme uksest Gigahertz-Optik MSC15 spektroradiomeetriga. Mõõtetulemusena on näha kiirgusintensiivsust $0.3 Wm^{-2}$. Mõõtetulemus ilmub katseseadmele mõne sajandiku jooksul, seega realselt võib seadme eralduv sinise valguse efektiivne kiirgusintensiivsus olla 1 sekundi jooksul veelgi väiksem. Seetõttu võib lugeda seadme nähtava valguse kiirgusintensiivsuse piirnormidele vastavaks [23] [24] (Joonis 4.3).



Joonis 4.3 Mõõtetulemus Gigahertz-Optik MSC15 spektroradiomeetriga

4.2 Testimine

Konstrueeritud seadme katsetamine viidi läbi ettevõtte igapäevase töö käigus klientide detailidega. Nädalapikkusel vaatlusel oli märgata, et varasemalt päikese käes või tavalise UV lambiga kõvendatud detailid olid kas liiga pehmed või värvuselt muutunud kollakaks. Esimesel juhul oli UV-kiirgust liiga vähe ning teisel juhul oli UV-kiirgust liiga palju. UV kapi kasutuselevõtuga muutusid detailid kõvemaks ning ei murdunud enam sedavõrd lihtsalt. Kõvenemist oli märgata ka hilisemalt detailide lihvimisel - kui varasemalt oli lihvimine olnud keerukam ning lihvimise tulemusel tekkisid suuremad plastiku tükid (materjal oli kergelt pehme ning tõmbas kaasa suuremaid tükke), siis peale UV kapi kasutuselevõttu oli lihvimine kergem ning detaili pind jäi visuaalselt puhtam ja siledam.

Ettevõttel on plaanis jätkata UV kapi kasutamisega ning täpsemad testid on kavas 2019. aasta suvel. Seadme töö tulemuse hindamiseks on võimalik võrrelda SLA 3D-prinditud ning UV kapis kõvendatud teimide tõmbetugevust, elastsusmoodulit ning katkeahenemist antud materjali tootja poolsete katsetulemustega.

KOKKUVÕTE

Käesolevas bakalaureusetöös on kirjeldatud stereolitograafia teel 3D-prinditud detailide mehhaaniliste omaduste parandamist hõlbustava UV kapi disaini ning valmistamist.

Lõputöö esimeses osas toob autor välja 3D-printimise olulisuse ühiskonnale ning majandusele ja võrdleb enimlevinuid 3D-printimise meetodeid ning ajalugu. Võrdluse käigus on selgitatud ka stereolitograafia eelised, puudused ning detailide UV valgusega kiiritamise vajadus.

Järgnevalt on lähemalt kirjeldatud stereolitograafia teel 3D-prinditud detailide kõvendamise protsessi UV kappides, selgitatud UV kappide tööpõhimõtet ning parema ülevaate saamiseks ka võrreldud kolme erinevas hinnaklassis olevat UV kappi. Võrdlusest tulenevalt ilmneb vajadus UV kapi järele, mis oleks soodsam, kuid samas sisaldaks kõiki funktsioone, et oleks võimalik saavutada detailide maksimaalne tugevus. Autor seab konstrueeritava seadmele funktsionaalsuse nõuded ning toob välja valitud materjalide parameetrid, millest lähtuvalt on võimalik koostada profiilid erinevate materjalide kõvendamiseks UV kapis.

Enne seadme valmistamist on kirjeldatud konstrueeritava UV kapi tehnoloogilist lahendust, põhjendatud komponentide valikut ning teostatud seadme korpuse CAD disain, elektriskeem ja tarkvara ülesehitus plokk skeemina. Seadme valmistamiseks on kasutatud autori ettevõttes olemasolevaid tootmismeetodeid nagu näiteks laserlõikus ning 3D-printimine FDM tehnoloogial.

Viimases peatükis on välja toodud seadme kasutamisel ilmnevad ohud kasutajale ning analüüsitud seadme ohutumaks muutmise lahendusi. Lisaks on teostatud seadmes kasutusel olevate UV LED tuled spektri kui ka UV-kiirguse taseme mõõtmine ning võrreldud saadud tulemusi töötavishoiu ja tööohutuse seaduses ettemääratud piirnormidega. Samuti on kirjeldatud seadme testimist autori ettevõttes ning tulevaste testide võimalusi konstrueeritud seadme töö efektiivsuse kinnitamiseks.

Lõputöö tulemusena valmis kõiki autori poolt etteseadud nõudmisi täitev UV kapp, mis on edukalt leidnud rakendust ka autori eraettevõttes. Seadme konstrueerimisel sai kinnipeetud ettemääratud eelarvest ning valminud seade on kasutajasõbralik ja ohutu. Seadme töö efektiivsuse testimiseks on planeeritud tõmbetugevuse katsed 2019. aasta suveks. Autor näeb, et antud seadet oleks võimalik veelgi soodsamalt valmistada, kui analüüsida komponentide valikut põhjalikumalt ning mitte piirdudes ainult Eesti tarnijatega.

SUMMARY

The following BSc thesis describes the design and construction of an UV curing station for improving the mechanical properties of stereolithography 3D printed parts.

In the first part of the thesis, the autor brings out the importance of 3D printing to the society and economy and compares the most common 3D printing technologies and history. The comparison also bring out the advantages and disadvantages of stereolithography 3D printing and the need for UV curing.

Furthermore, the UV curing process and working principle is explained in more detail. For a better understanding, the autor has compared three differently priced UV curing stations. Upon the analysis of this comparison, the need for a more affordable, yet fully functioning UV curing chamber rises. The author sets functionality requirements for the device and chooses parameters of selected materials, from which it is possible to create profiles for the hardening of these materials in the UV curing chamber.

Before the manufacturing of the UV curing chamber, the author describes the technological solution for the machine and describes the CAD design, circuit diagram and software architecture. The device has been manufactured using production methods available in the company of the author, such as laser cutting and 3D printing with FDM technology.

The final chapter outlines the dangers to the users of the machine and analyses different solutions to make it safer. In addition, the spectrum and UV radiation levels were measured from the UV LED lights of the machine. These results were compared with the limits set in the Occupational Health and Safety Act. Also, testing of the device in the author's company and the possibilities of future tests to confirm the efficiency of the device's work are also described.

As a result of the thesis a fully functioning UV curing chamber was constructed. The constructed machine met all the requirements set by the author and is being actively used in the author's company. The construction was well within the previously set budget and the final device was user-friendly and safe to use. Tensile strength test are planned for the summer of 2019 to confirm the efficiency of the device. The author sees that the device could be constructed even more affordably when analyzing the selection of components more thoroughly and not limiting the components to only Estonian suppliers.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Ben Redwood. 3DHubs. [Online]. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing>
- [2] Formlabs, Inc. An Introduction to Post-Curing SLA 3D Prints. [Online]. <https://formlabs.com/blog/introduction-post-curing-sla-3d-prints/>
- [3] Leo Gregurić. (2018, detsember) History of 3D Printing - When Was 3D Printing Invented? [Online]. <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [4] Formlabs, Inc. (2017, oktoober) 3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS. [Online]. <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>
- [5] Ihor Brahin. Who Really Uses 3D Printing and Why. [Online]. <http://blog.zmorph3d.com/really-uses-3d-printing/>
- [6] SPACE EXPLORATION TECHNOLOGIES CORP. (2014, juuli) SPACEX LAUNCHES 3D-PRINTED PART TO SPACE, CREATES PRINTED ENGINE CHAMBER. [Online]. <https://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed>
- [7] Stratasys Direct, Inc. Spare Parts & 3D Printing. [Online]. <https://www.stratasysdirect.com/manufacturing-services/3d-printing/3d-printing-spare-parts>
- [8] Formlabs, inc. (2016, mai) What Does Resolution Mean in 3D Printing? [Online]. <https://formlabs.com/blog/layer-height-meaning-3d-printing/>
- [9] Alkaios Bournias Varotsis. Introduction to SLA 3D Printing. [Online]. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing#work>
- [10] Formlabs, Inc. Form Cure. [Online]. <https://formlabs.com/wash-cure/>
- [11] Wicked Engineering, LLC. CUREbox Plus UV Post-Cure Chamber. [Online]. <https://wickedengineering.com/products/curebox-plus-uv-post-cure-chamber>
- [12] XYZprinting, Inc. UV Curing Chamber. [Online]. <https://www.xyzprinting.com/en-US/product/uv-curing-chamber>
- [13] Formlabs, Inc. Formlabs Resin Library. [Online]. <https://formlabs.com/materials/>
- [14] Karin Lellep. (2011) Tehnilise mehaanika põhialused. [Online]. http://ekool.ttkk.ee/failid/E/objekt/11/teh_meh_pohialused/paigutis_ja_deformatsioon.html

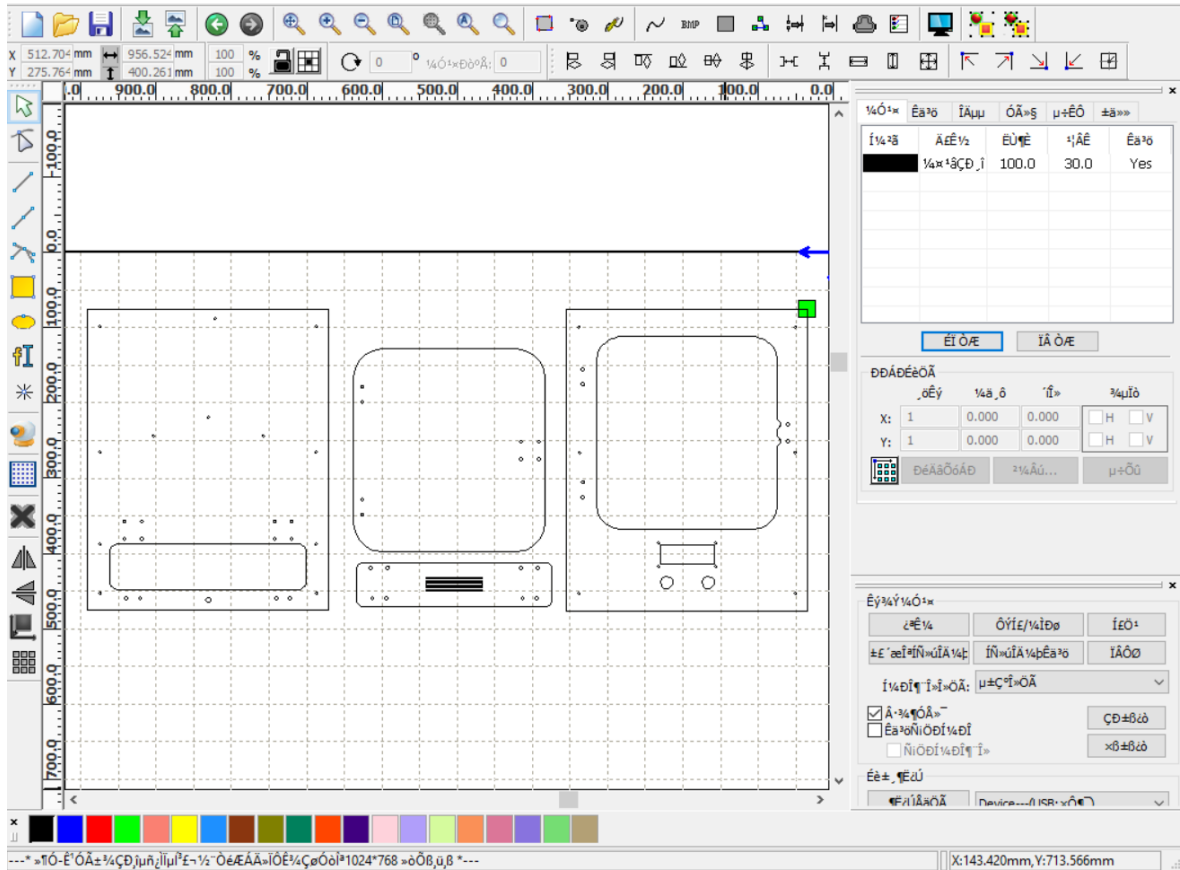
- [15] Formlabs, Inc.. (2018, märts) Formlabs White Paper: A Guide to Post-Curing Formlabs Resins. [Online]. <https://archive-media.formlabs.com/upload/A-Guide-to-Post-Curing-Formlabs-Resins.pdf>
- [16] Bob MacCargar. (2006, jaanuar) Watts, Heat and Light : Measuring The Heat Output of Different Lamps. [Online]. <https://www.reptileuvinfo.com/html/watts-heat-lights-lamp-heat-output.html>
- [17] Zortrax S.A. Zortrax Z-PCABS. [Online]. <https://zortrax.com/filaments/z-pcabs/>
- [18] Digikey, Inc. MLX90615 Series Infrared Thermometers. [Online]. <https://www.digikey.com/en/product-highlight/m/melexis/mlx90615-series-infrared-thermometers>
- [19] Devantech, Ltd. Using the I2C Bus. [Online]. <https://robot-electronics.co.uk/i2c-tutorial>
- [20] Carling Technologies Ltd. Basic Circuit Function. [Online]. <https://www.carlingtech.com/basic-circuit-function>
- [21] How Temperature Switches Work. [Online]. <https://www.instrumentationtoolbox.com/2015/11/how-temperature-switches-work.html>
- [22] Tööelu. (2018, aprill) Ultraviolettkiirgus. [Online]. <http://toelu.ee/et/tootajale/tookeskkond/Tookeskkonna-ohutegurid/Fysikalised-ohutegurid/Ultraviolettkiirgus>
- [23] Vabariigi Valitsus. (2019, jaanuar) Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded tehnikust optilisest kiirgusest mõjutatud töökeskkonnas, tehniliku optilise kiirguse piirnormid ja kiirguse mõõtmise kord. [Online]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/105122018014>
- [24] Gigahertz-Optik GmbH. MSC15. [Online]. https://www.gigahertz-optik.de/en-us/product/msc15#_specification
- [25] Spectra Group Limited, Inc. UV/Vis Light Curing Process. [Online]. <http://www.sglinc.com/Home/AboutUs/BlogSpectraGroup/UVVisLightCuringProcess.aspx>

LISAD

Lisa 1 Formlabs Form 2 3D-printer



Lisa 2 RDWorks tarkvara



Lisa 3 Z-Suite tarkvara

Z-SUITE

MODEL LIBRARY [Login or Register](#)

POWERED BY **zortrax**

MODEL

ROTATE ?

X: 180.000

45°

Y: 0.000

45°

Z: 0.000

45°

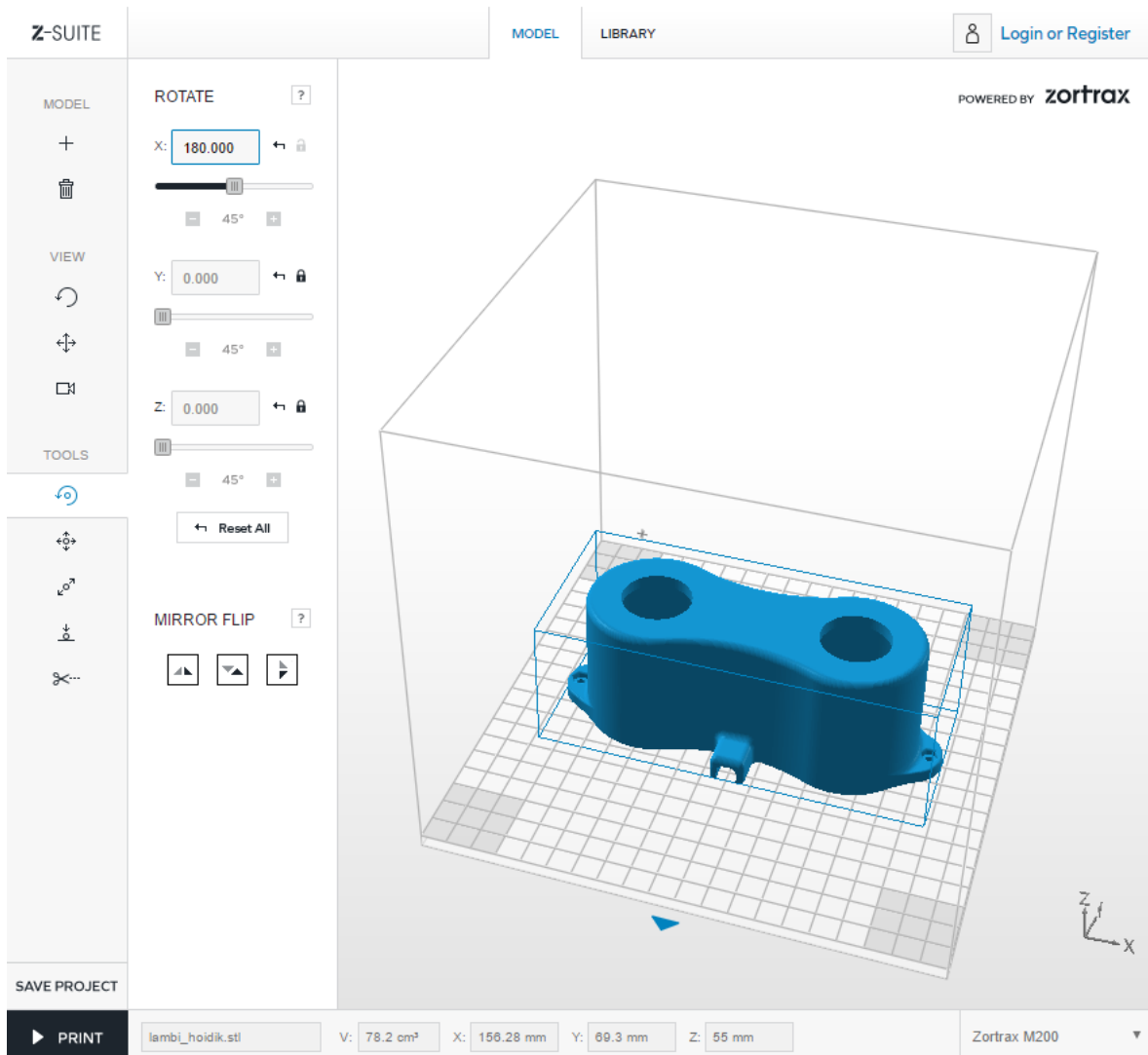
Reset All

MIRROR FLIP ?

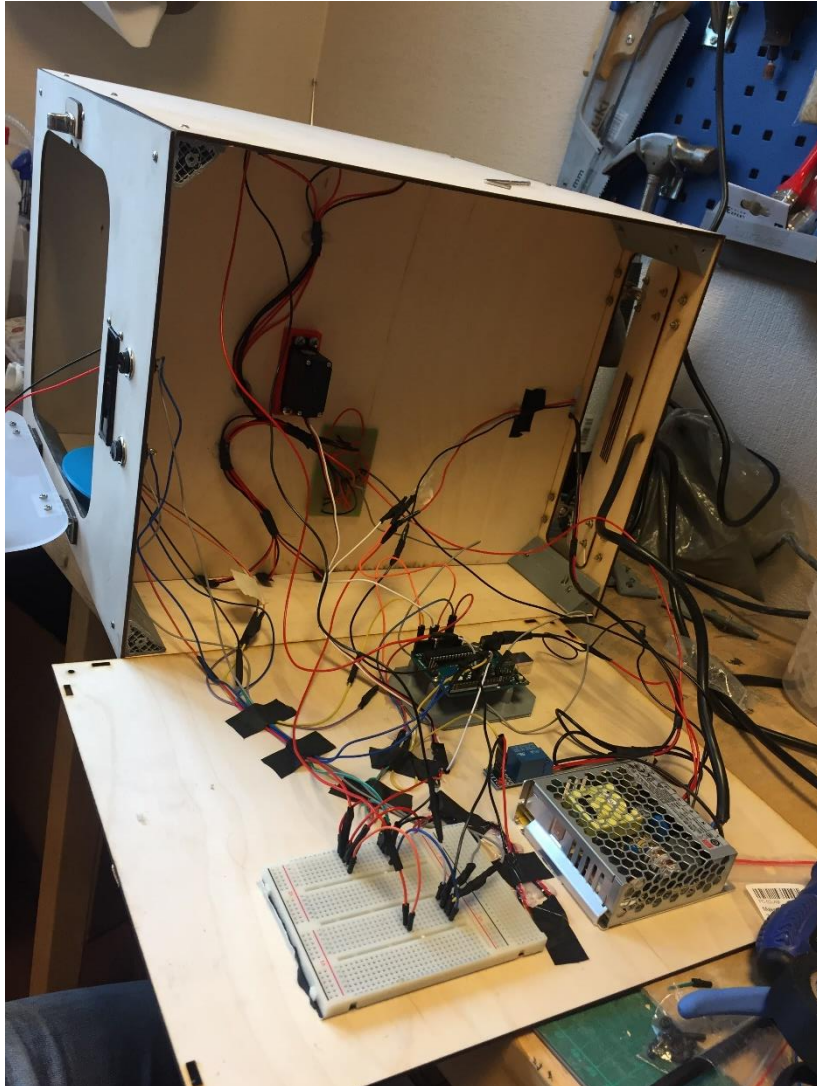
SAVE PROJECT

PRINT

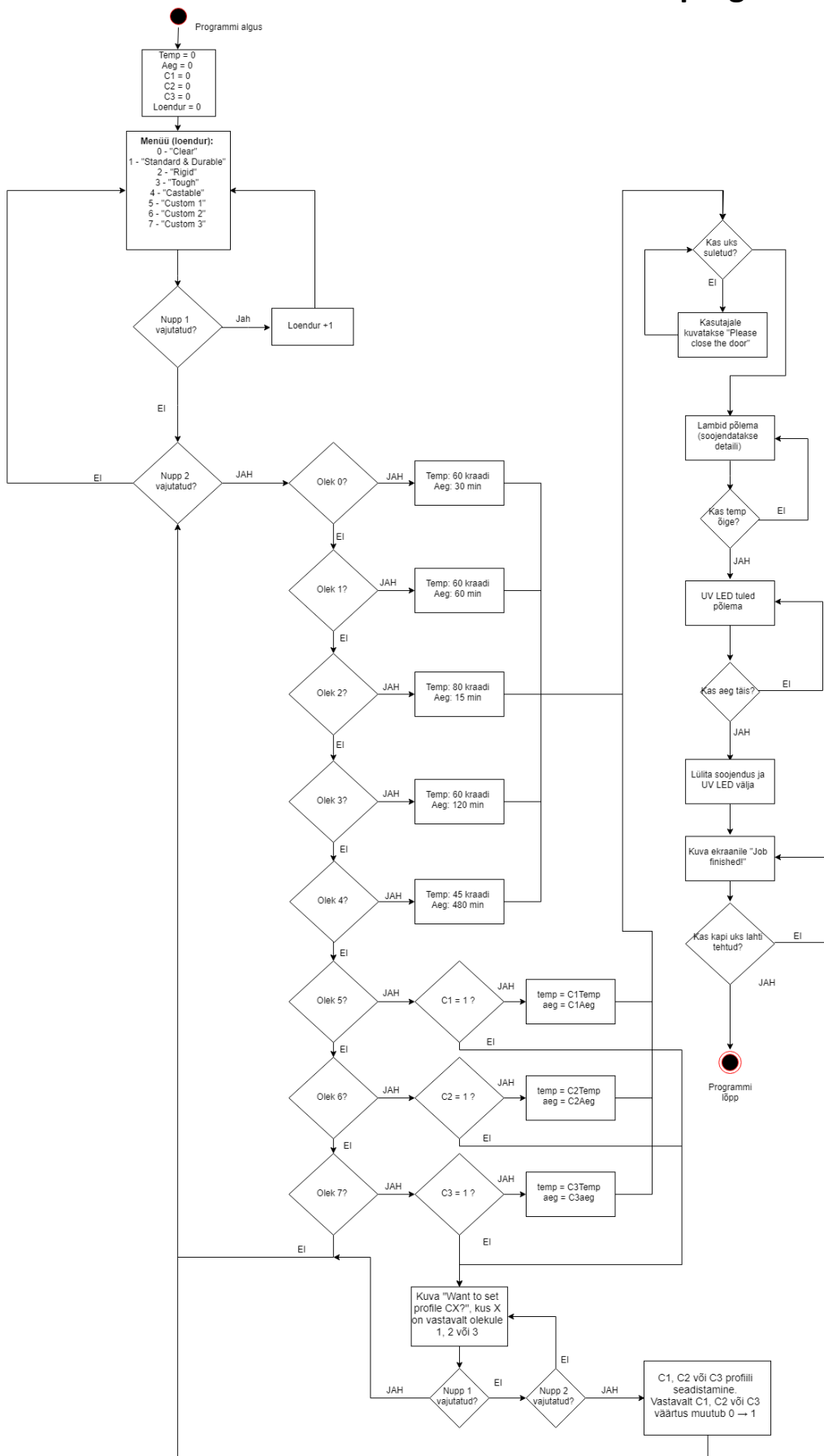
lambi_hoidik.stl V: 78.2 cm³ X: 156.28 mm Y: 69.3 mm Z: 55 mm Zortrax M200



Lisa 4 UV kapi elektroonika



Lisa 5 UML skeem programmi koodist



Lisa 6 UV LED tuledel lainepikkuse mõõtmine

