



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

**Egert Pedassaar**

**3D PRINDITUD DETAILIDE JÄRELTÖÖTLEMISE  
TEHNOLOOGIA**

POSTPROCESSING TECHNOLOGY OF 3D PRINTED PARTS

Bakalaureusetöö  
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: Kaarel Soots, *PhD*  
Tormi Lillerand, *MSc*

Tartu 2020

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 56, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Egert Pedassaar		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: 3D printitud detailide järeltöötlemise tehnoloogia			
Lehekülgi: 35	Jooniseid: 15	Tabeleid: 10	Lisasid: 2
<p>Osakond: Biomajandustehnoloogiate õppetool</p> <p>Uurimisvaldkond (ja mag. töö puhul valdkonna kood): CERCS: 5. TEHNIKATEADUSED T130 Tootmistehnoloogia</p> <p>ETIS: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine</p> <p>Juhendajad: Kaarel Soots, <i>PhD</i>; Tormi Lillerand, <i>MSc</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2020</p> <p>FDM ja FFF tehnoloogiat kasutatavate printeritega printitud detailide pind jääb krobeline. Siinse töö eesmärk on projekteerida järeltöötlusseade ABS-materjalist 3D printitud detailide pinnakvaliteedi parandmiseks. Töö teoreetilises osas on kasutatud ingliskeelset kirjandust. Järeltöötlusseadme projekteerimiseks kasutati <i>Solid Edge 2020</i> tarkvara. Toodi välja erinevad põhimõtte-lahendused, hinnati neid ja valiti hindamistulemuste põhjal järeltöötlusseadme jaoks parim tehni-line lahendus. Järeltöötlusseadme projekteerimisel välja valitud ostudetailid kinnitati sobivust programmis <i>Solid Edge 2020</i>.</p> <p>Töö tulemusena projekteeriti järeltöötlusseade. Töö edasine etapp hõlmab järeltöötlusseadme kat-setamist ja selle edasi arendamist.</p>			
Märksõnad: järeltöötlusseade, ABS, järeltöötlemine, FDM, 3D printimine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 56, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Egert Pedassaar		Speciality: Engineering	
Title: Postprocessing technology of 3D printed parts			
Pages: 35	Figures: 15	Tables: 10	Appendixes: 2
<p>Department / Chair: Chair of Biosystem Engineering</p> <p>Field of research:</p> <p>CERCS: 5. TECHNOLOGICAL SCIENCES T130 Production technology</p> <p>ETIS: 4. Natural Sciences and Engineering 4.14. Industrial Engineering and Management</p> <p>Supervisors: Kaarel Soots, <i>PhD</i>; Tormi Lillerand, <i>MSc</i></p> <p>Place and date: Tartu, 2020</p>			
<p>Parts printed with FDM and FFF technology printers have a rough surface. The aim of this work is to design a postprocessing device for improve surface quality of 3D printed parts made of ABS material. The theoretical part of this work is based on the materials that have been published in English. Solid Edge 2020 Software was used for designing this postprocessing device. Different basic solutions were introduced, evaluated and based on the evaluation results, the best technical solution for the postprocessing device was selected.. When designing the postprocessing device, the material selection and its fitting to the projection went hand in hand. As a result of the work, a postprocessing device was designed. Further research involves testing of the device and further development of the device.</p>			
Keywords: acetone bath, ABS, post-processing, FDM, 3D printing			

# SISUKORD

LÜHENDID .....	5
SISSEJUHATUS .....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	7
1.1. 3D-printeri tehnoloogia.....	7
1.2. Termoplastse materjali kihthaaval printimise tehnoloogia .....	8
1.3. Olemasolevad 3D-printerid.....	9
1.4. Pinnakvaliteedi parandamistehnoloogiad .....	10
1.4.1. ABS-materjali omadused.....	12
1.4.2. Mehaaniline järeltöötlemine .....	12
1.4.3. Keemiline järeltöötlemine .....	13
1.4.4. Atsetooniaurude ohutus .....	15
1.5. Turu-uuring .....	15
1.5.1. Desktop vapor polisher .....	15
1.5.2. Zortrax Apoller .....	17
2. MATERJAL JA METOODIKA .....	18
2.1. 3D prinditud detailide valmistamise tehnoloogia.....	18
2.2. 3D prinditud detailide järeltöötlusseadme projekteerimine.....	20
2.2.1. Projekteerimise tingimused .....	20
2.2.2. Ideede genereerimine.....	20
2.1.3. Lahenduste hindamine.....	22
2.1.4. Järeltöötlusseadme komponentide valik.....	25
3. TULEMUSED .....	28
KOKKUVÕTE .....	31
KASUTATUD KIRJANDUS .....	32
SUMMARY .....	34
LISAD .....	36
Lisa A. Seadme kooste- ja detailijoonised.....	37
Lisa B. Elektriskeemid .....	47
LIHTLITSENTS.....	52

## LÜHENDID

Lühend	Inglise keeles	Eesti keeles
ABS	- <i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>	Akrülnitriilbutadieenstüreen
ASA	- <i>Acrylonitrile styrene acrylate</i>	Akrülnitriil stüreen akrülaat
CPE	- <i>Chlorinated polyethylene</i>	Klooritud polüetüleen
CPE+		
EPDM	- <i>Ethylene propylene diene mono-mer</i>	Etüleenpropüleeni dienmonomeer
FDM	- <i>Fused Deposition Modelling</i>	Termoplastse filamendi kihthaaval 3D printimine
FFF	- <i>Fused Filament Fabrication</i>	Termoplastse filamendi kihthaaval 3D printimine
HIPS	- <i>High-impact polystyrene</i>	Suure vastupidavusega polüstüreen
PC	- <i>Polycarbonate</i>	Polükarbonaat
PLA	- <i>Polylactic acid</i>	Polüpiimhape
PP	- <i>Polypropylene</i>	Polüpropüleen
PVA	- <i>Polyvinyl alcohol</i>	Polüvinüülalkohol
PVB	- <i>Polyvinyl butyral</i>	Polüvinüülbutüraal
SLA	- <i>Stereolithography</i>	Stereolitograafia
DLP	- <i>Digital Light Processing</i>	Digitaalse valguse töötlemine
MSLA	- <i>Masked Stereolithography</i>	Maskeeritud stereolitograafia
SLS	- <i>Selective Laser Sintering</i>	Selektiivne laserpaagutamine
MJ	- <i>Material Jetting</i>	Materjalide pihustamine
DOD	- <i>Drop on Demand</i>	Kukkuma nõudlusel
SLM	- <i>Selective Laser Melting</i>	Valikuline lasersulatus
EBM	- <i>Electron Beam Melting</i>	Elektronkiire sulamine

## SISSEJUHATUS

Tänapäeval kasutatakse 3D printimist väga sageli. Kõige enam kasutatakse FFF või FDM tehnoloogial töötavaid 3D printereid. Paraku on prinditud detailide pind krobeline, mis halvendab toote kvaliteeti. Toote pinnakvaliteedi parandamiseks kasutatakse järeltöötlemise tehnoloogiaid.

Käesolev töö jaguneb kolme ossa, milles antakse ülevaate kirjandusest, materjalist ja meetodikast ning tulemustest. Kirjanduse osas tuuakse välja 3D prinditud detailide järeltöötlemise võimalused ja räägitakse lähemalt atsetooniga järeltöötlemisest. Materjal ja meetodika osas tuuakse välja erinevad seadme põhimõtte ettepanekud, hinnatakse lahendusi ja projekteeritakse järeltöötlemisseade.

Töö eesmärk on projekteerida järeltöötlusseade 3D prinditud detailide järeltöötlemiseks.

Töö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised tööülesanded:

1. anda ülevaade 3D-printeritest ja nende tehnoloogiast;
2. pinnakvaliteedi probleemi selgitamine;
3. järeltöötlemisseadme projekteerimine ja kuluanalüüsi koostamine;
4. järelduste tegemine.

Tulemusena saab projekteeritud katsestend.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. 3D-printeri tehnoloogia

3D printimise tehnoloogia on olnud olemas juba päris kaua, esimene printer ehitati 1984. aastal. Seevastu personaalsesse kasutusse on printer jõudnud alles hiljuti. Personaalne 3D-printer oli välja tulles menukas, kuna selle abil saab valmistada täpse mudeli/toote. Seetõttu sobib ta väga hästi prototüübi valmistamiseks. [5,15]

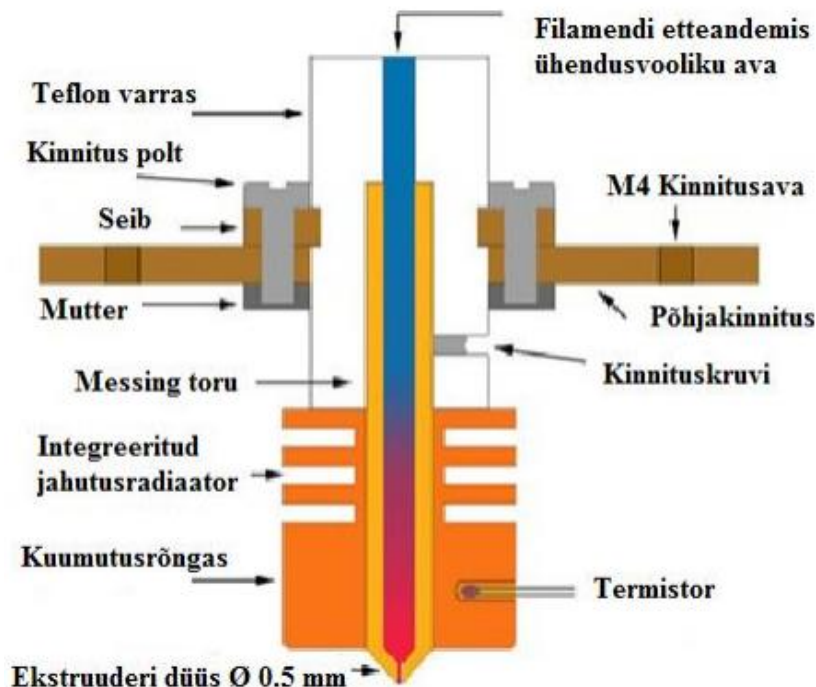
3D-printeri mehaanilised liikumised sarnanevad CNC-masinate kasutatavate mehhanismidega. Nad mõlemad kasutavad positsioneerimiseks x-, y- ja z- telge. Tänu sellele on võimalik juhtida arvuti abil kolme liikumistelge. 3D Printimiseks on mitu erinevat moodust, samuti kasutatakse 3D printimiseks erinevaid materjale. Kuid põhiidee on 3D printeritel ikka sama. [5]

3D prinditav objekt valmistatakse ette joonestustarkvaras, seejärel konverteeritakse joonis sellesse failiformaati, millest 3D-printeri tarkvara aru saab (nt: .stl failiformaat). Kõigi 3D-prinditavate objektide korral on vaja kolmemõõtmelist joonist, mille põhjal genereeritakse töörajad detaili loomiseks. STL-formaadiga faili korral tuleb joonise põhjal luua töörajad ja seejärel sisestada töörajad andmekandjal 3D-printerisse.

3D-printerid erinevad üksteisest toote loomiseks kasutatavate mehhanismide ja materjalide poolest. Erinevad 3D printimistehnoloogiad on: FDM, SLA, DLP, MSLA, SLS, MJ, DOD, SLM, EBM. Enim kasutatud tehnoloogia on FDM või FFF. Nende tehnoloogia on sarnane üksteisega, kuid FDM on Stratasys Inc. poolt kaubamärgina registreeritud. FFF-il ei ole mingisugust seost kaubamärgiga. Antud töös käsitletakse üksnes FFF-il põhinevat tehnoloogiat, kuna enamik EMÜ tehnikamaja laboris asuvaid personaalseid 3D-printereid töötavad FFF-i alusel. [6,7,26]

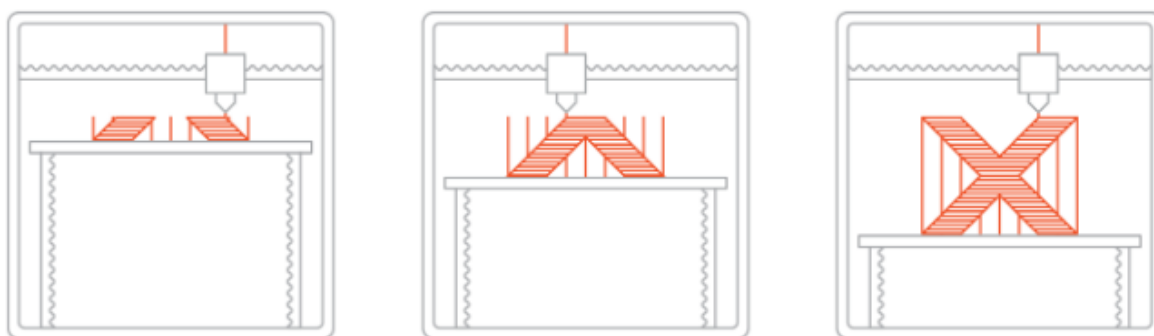
## 1.2. Termoplastse materjali kihthaaval printimise tehnoloogia

Ekstruuderil on kaks osa: tema keha kutsutakse külmaks ja otsikut kuumaks osaks. 3D-printerile antakse ette rull filamenti. Filament liigub etteandemehhanismi abil, mis surub filamenti otsa läbi ekstruuderi (joonis 1.1.). Etteandemehhanism asub kohe filamenti rulli järel ja enne toru või vahetult enne ekstruuderit. Ekstruuderis on termistor, mis annab ette temperatuuri, kus termoplast on viskoosne. Kuna tahket materjali surutakse kogu aeg juurde, siis viskoosses olekus materjal surutakse düüsi avast välja, moodustades sellega kihid pinnale. Pärast iga kihi valmimist liigub z telg allapoole, et lisada järgmine kiht (joonis 1.2.). Kihi kõrguseks on 0.05 mm – 0.5 mm ja printimiseks kasutatav temperatuur on 180°C – 320°C. [6,7,8]



Joonis 1.1. Ekstruuderi osad. [7]





**Joonis 1.2.** FDM-printeri protsess. [9]

FFF või FDM-i kasutades peab teadma, et detail kahaneb tardumisel ja tardumisjärgse jahtumise ajal ning see võib põhjustada 3D prinditud detailide kaardumise. Kaardumine tekib, kui materjal jahtub erinevates kohtades erineva kiirusega. Kõige kaardumisohtlikumad on suured siledad pinnad, õhukesed väljaulatavad osad ja teravad nurgad. Samas on tähtis teada, et 3D printides saab kasutada printimismaterjali toetavat struktuuri, mis pärast eemaldatakse. See aitab printimisel objekti toetada struktuursel kombel, et ei tekiks kujudeformatsioone.

Materjali kulu ja 3D printimise aja vähendamiseks ei 3D prindita detaili täiskehana, vaid täitetihedus jäetakse vahemikku 15 – 25% juurde. See küll vähendab detaili tugevust, kuid hoiab kokku aega ja raha. [9]

### 1.3. Olemasolevad 3D-printerid.

EMÜ mõõtelaboris asuvad 3D-printerid töötavad FFF ja FDM tehnoloogiatel, milleks on Ultimaker 2, Ultimaker 3 ja Stratasys uPrint SE Plus. Kõige suuremat kasutust leiab Ultimaker 3 (tabel 1.1.).

**Tabel 1.1.** Ultimaker 3 spetsifikatsioonid [10]

<b>Printimise omadused:</b>	
Prindipea	Kahe ekstruuderiga prindipea koos automaatse düüside tõstmise süsteemi ja vahetatavate ekstruuderitega.
Printimisala suurus	Kuni 215 x 215 x 200 mm
Filamendi diameeter	2,85 mm
Kihi eraldusvõime	0,25 mm ekstruuderiga ava korral: 150 – 60 µm 0,40 mm ekstruuderiga ava korral: 200 – 20 µm 0,80 mm ekstruuderiga ava korral: 600 – 20 µm

Tabel 1.1. järg

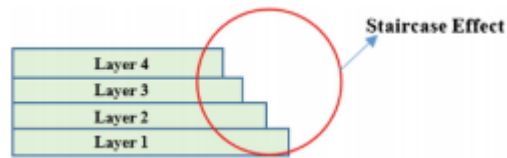
XYZ täpsus	12,5; 12,5; 2,5 mikronit
Prindipea liikumiskiirus	30 – 300 mm/s
Ekstruuderi tootlikkus	< 24 mm <sup>3</sup> /s
Alusplaat	Soojendusega klaas
Alusplaadi temperatuur	20 – 100°C
Toetatud materjalid/filamendid	Nylon, PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA, Breakaway
Ekstruuderi düüsi ava läbimõõdud	0,25 mm; 0,40 mm; 0,80 mm
Ekstruuderi ülessoojenemise aeg	< 2 min
Alusplaadi ülessoojenemise aeg	< 4 min (20 → 60 °C)
Töömüra	50 dB
Materjali äratundmine	Materjal tuntakse ära NFC skanneriga
Ühenduvus	Wi-Fi, LAN, USB-pesa
Jälgitavus	Otsepildis kaamera
<b>Elektritoide:</b>	
Sisend	100 – 240 V
	4 A, 50 – 60 Hz
Väljund	221 W max 24 V DC, 9.2 A
<b>Tarkvara:</b>	
Tööradade genereerimine	Ultimaker Cura; Cura Connect
Toetatavad failitüübid	STL, OBJ, X3D ja 3MF G ja GCODE BMP, GIF, JPG ja PNG

Tabelist leitav kasulik informatsioon:

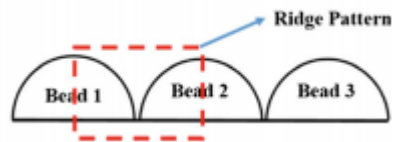
1. Filamendi diameeter 2,85 mm on vajalik optimaalsete tulemuste saamiseks.
2. 215 x 215 x 200 mm detaili suurus on võimalik saavutada kasutades ühte prindipead.
3. Selles töös projekteeritakse ABS materjalist 3D prinditud detailide järeltöötlusseade

#### 1.4. Pinnakvaliteedi parandamistehnoloogiad

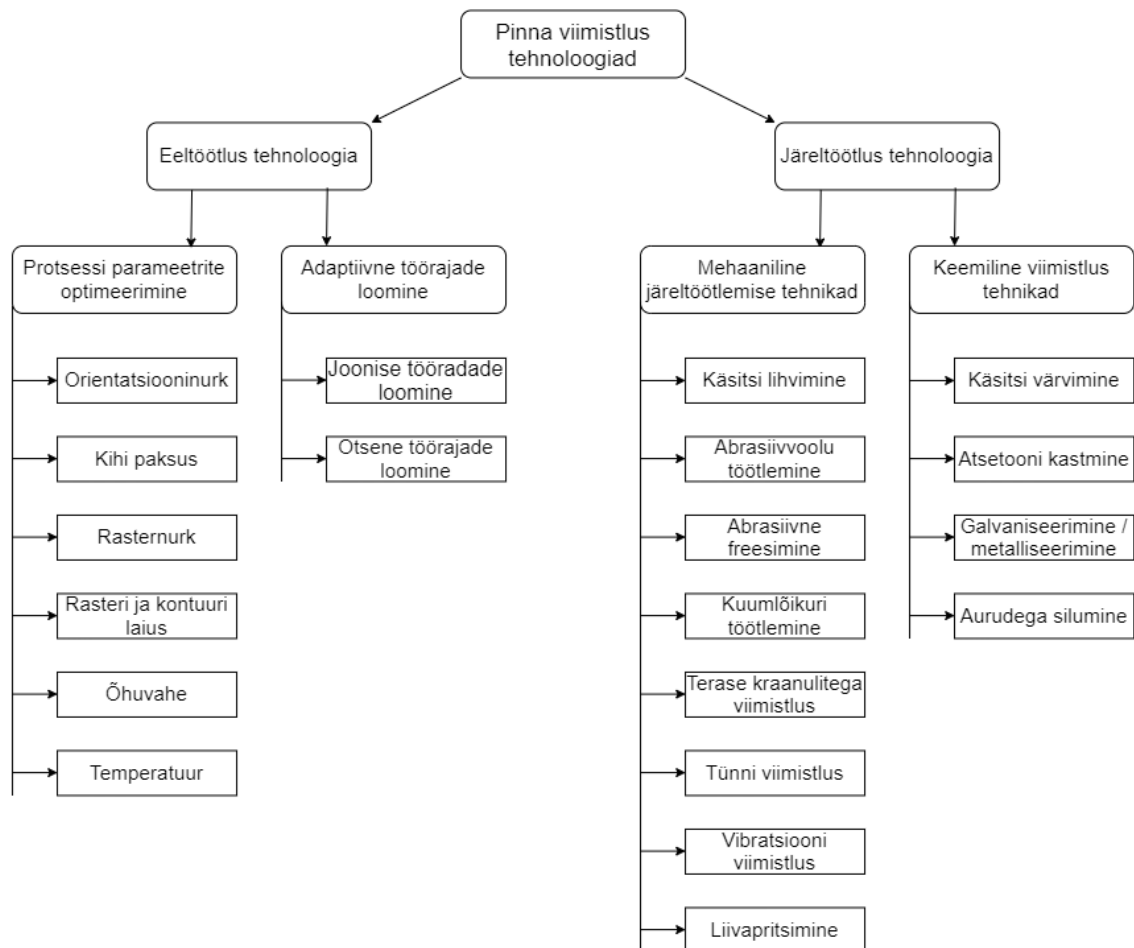
Detailide 3D printimisel tekib astmeline ja reljeefne efekt, mis tekitab krobelse pinna (joonis 1.1.,1.2.). Selle parandamiseks kasutatakse järeltöötlemistehnoloogiaid. 3D Prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogiaid võib jaotada kahte gruppi: mehaanilised ja keemilised. Oluline roll on ka eeltöötlusel, mis mõjutab tugevalt pinnakvaliteedi tulemust (joonis 1.3.). [14]



**Joonis 1.1.** Astmeline efekt [2].



**Joonis 1.2.** Reljeefne efekt [2].



**Joonis 1.3.** Pinnaviimistlus tehnoloogiad gruppidesse jaotatuna [14].

Kuna selles töös käsitletakse järeltöötlemise tehnoloogiat, siis eeltöötlukest siin pikemalt ei räägita.

### 1.4.1. ABS-materjali omadused

ABS on amorfne, löögikindel, läbipaistmatu termoplastik, mida kasutatakse plastitööstuses laialdaselt, sealhulgas ka 3D printimises. Keemiline valem:  $(C_8H_8 * C_4H_6 * C_3H_3N)_n$

**Tabel 1.2.** ABS-i tehnilised andmed 3D printimises [20]

Tehnilised omadused	Väärtus
Tõmbemoodul	1618,5 MPa
Voolepiir	39 MPa
Tõmbetugevus	33,9 Mpa
Suhteline deformatsioon voolepiir	3,5%
Suhteline deformatsioon purunemisel	4,8%
Paindetugevus	70,5 Mpa
Paindemoodul	2070 Mpa
Izodi löögitugevus (23 °C)	10,5 kJ/m <sup>2</sup>
Kõvadus	76 D - Duromeeter
Sulamassi voolukiirus	41 g/10 min
Pehmenemistemperatuur	97°C
3D printimise temperatuur	225 – 245°C
Tihedus	1.10 g/cm <sup>3</sup>

ABS-i peetakse suhteliselt mittetoksiliseks ja kahjutuks termoplastiks. ABS on suuresti taaskasutatav. Taaskasutatud ABS-i saab segada teiste materjalidega, et saada madalama hinnaga tooteid, säilitades samal ajal kõrge kvaliteedi. Praeguste teadmiste järgi ei sisalda ABS-materjal teadaolevaid kantserogeene, seega on selle kasutamine ohutu. [4]

### 1.4.2. Mehaaniline järeltöötlemine

Kõige kergem ja kättesaadavam mehaaniline protsess on lihvimine. Materjal lihvitakse siledaks, lihvimise käigus tekkivad detailile nähtavad praod, mida parandatakse täiteainega. [1,14]

Raskesti ligipääsevate kohtade silumiseks ja poleerimiseks kasutatakse abrasiivvooluga töötlemist. Enamasti kasutatakse seda tehnoloogiat teraste puhul. Tehnoloogia on kulukas ja raskesti kättesaadav. [14,16]

Liivapritsimine (*Sand blasting*) on materjali lihvimine liivaga, seejuures paraneb pinnakvaliteet kuni 96 protsenti. Võib järeldada, et see lihvimismeetod on efektiivne. See meetod annab mati viimistluse, kui seda protseduuri tehakse pärast keemilist töötlemist. [14]

3D prinditud detaili pinnakvaliteeti saab parandada ka kuumlõikuri töötlemisega (*Hot Cutter Machining*). Kuumlõikurid ühendatakse nn. CNC-pingi külge, kus saab ära määrata vajalikud silumise kohad. Kuna pingi seadistamine võtab liiga palju aega, siis pole see lahendus optimaalne. [1,14]

Tünniviimistlus (*barrel finishing*) on pinda parandav järeltöötlus, mille käigus detailid pannakse tünni koos abrasiivsete osakeste ja veega. Tünni pöörlemine põhjustab osakeste massi ja detailide üksteise peale kukkumist, tekitades hõõrdumist. Selle tulemuseks on detailide pindade silenemine. [2; 21]

Vibratsioonviimistluse abil saab tooteid massviimistleda. Anumas on abrasiivsed graanulid, mis siluvad vibreerides detaile, protseduuri ajal vee lisamine annab parema tulemuse. [14]

Mehhaaniliste protsesside peamised miinused on detailide mehaaniliste omaduste ja geomeetriliste mõõtmete muutused, tehnoloogiad pole hästi kättesaadav (v.a lihvimine) ning protsessikulud on kõrged. Tõhusam meetod suudab parandada pinna karedust ning säilitada toote mehaanilised omadused ja geomeetrilised mõõtmed. [2]

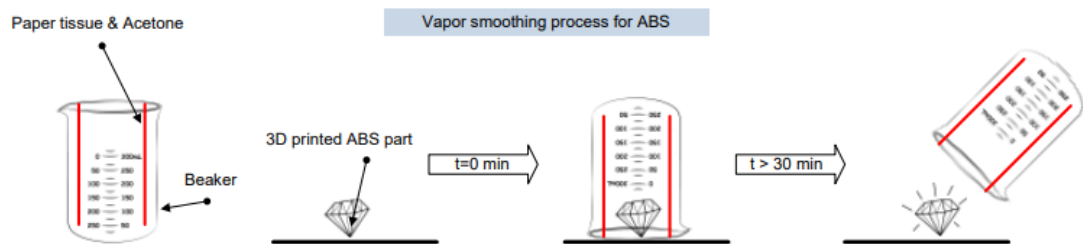
### **1.4.3. Keemiline järeltöötlumine**

Keemilise töötlemise kasutamine on piiratud kindlate toormaterjalidega, mis reageerivad keemikaalidega, nagu ABS ja PVB. ABS-detaile järeltöödeldakse atsetooni järeltöötluskambrid. Tehnoloogia käigus on järeldatud, et detaili välispind puutub kokku atsetooni aurudega ja selle tulemusel välimine kiht sulab ja voolab gravitatsiooni tõttu alla poole, täites astmelise- ja reljeefse efektide pinnad, mille tagajärjel saavutatakse siledam pind.

Külma auruga silumise protsess on näha joonisel (joonis 1.3.). Esiteks eemaldatakse detaililt tolm ja praht, paber asetatakse anumasse ja seejärel tehakse paber atsetooniga kokku. Nüüd keeratakse anum koos atsetooniga immutatud paberiga 3D prinditud detaili peale kummuli

ja hoitakse seda nii umbes 30 minutit. See on üks lihtsamaid lahendusi, kus atsetooniaur aitab vähendada 3D printitud detaili pinna karedust. [2]

Töö teises osas kirjeldan kuuma auruga silumise tehnoloogiat.



**Joonis 1.3.** Külma auruvanni protsess [3].

3D printitud detaili viimistlemisel atsetooni aurudega tuleb parima tulemuse saamiseks valida õige ajavahemik ja sukeldada 3D printitud detaili auruvanni mitu korda. Kihi paksus on peamine külgsinna pinnakaredust mõjutav tegur ning õhem kiht annab siledama külgsinna. Samas on teada, et auruvanni silumisprotsess nõrgendab ABS-ist 3D printitud detailide termilist stabiilsust ning klaasistumistemperatuur väheneb protsessiga järsult. [2,3]

PVB materjal võib tuua asenduse ABS-ile. Selle järeltöötlemises kasutatakse alkoholilahust kangusega alates 70%, millega on võimalik pinna karedust vähendada. See kemikaal on ohutum nii loodusele kui ka inimesele, kuna sellest ei eraldu mürgiseid aineid. Küll aga pole see väga populaarne oma kallima hinna tõttu. [11; 25]

Üks võimalikest meetoditest on 3D printitud detaili kastmine atsetooni sisse. Kastmise kestvus on umbes 5 min. Pärast kastmist on 3D printitud detaili materjalil suurem paindetugevus, veekindlus, kulumis- ja niiskuskindlus, kuid tõmbetugevus on nõrgem. Selle protsessi ohuks on detaili pinna söövituse. Samas kui kasutada lahjendatud atsetoonilahust, siis võtab järeltöötlemine kauem aega. [14]

Kasutatakse ka elektrokeemilist katmist. Näiteks kui ABS materjalist 3D prinditud detail kaetakse vasega, siis tõuseb materjali löögitugevus, korrosioonikindlus, tõmbetugevus, kõvadus ja kattekihi paksus. Miinuseks on 3D prinditud detaili mõõtmete muutumine, lisakulud ja piiratud rakendusala. [14]

Veel üks võimalus on kasutada keemilist meetodit, milleks on detaili värvimine. See annab detailile läikivama ja siledama pinna. Kuna see meetod on lihtsasti kättesaadav ja kergesti teostav, siis tavaliselt kasutatakse seda tehnikat pärast käsitsi lihvimist. Detaili värvimine toob endaga kaasa detaili kuju- ja mõõtmete muutumise. [1]

#### **1.4.4. Atsetooniaurude ohutus**

Atsetooniaur on väga tuleohtlik. Samuti põhjustab see silmade ärritust ning võib põhjustada ka unisust või peapööritust. Kuna atsetooniaur on ohtlik ja kahjulik, siis on hea lahendus kinnine järeltöötuskamber, mis hoiaks suuremad aurud keskkonnast eemal. Eeliseks on veel, et järeltöötuskamber võimaldab hoida aurud võimalikult detaili ligi. See kiirendab protsessi ja vähendab atsetoonikulu. Järeltöötuskambrit tuleb kasutada hästi ventileeritud kohas. Kunagi ei tohi asetada kütteseadet lahtise leegi, sädemete või muude süüteallikate lähedusse. Atsetooniauruga töötamisel tuleb alati kanda kaitsemaski, kaitsekindaid ja läheduses peab olema tulekustuti. Atsetoon hakkab aurustuma 56°C juures. [6,11,12]

### **1.5. Turu-uuring**

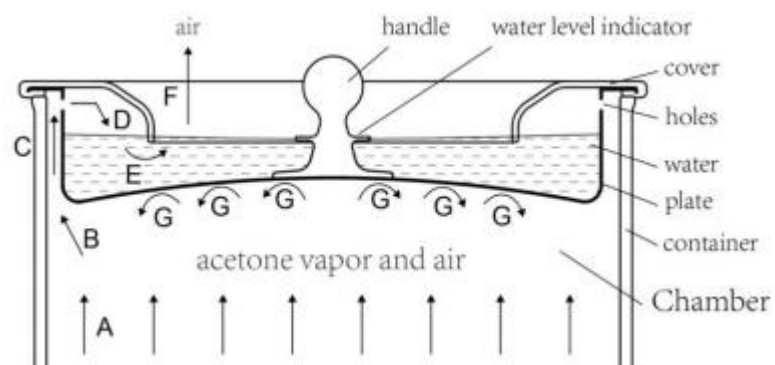
#### **1.5.1. Desktop vapor polisher**

Innovatiivne atsetooni imendumismehhanismiga seade (joonis 1.4.). Seade koosneb kaanest, konteinerist, platvormist, metallplaadist, induktsioonipliidist ja kontrollipaneelist. Atsetooniauru imendumismehhanism hoiab ära aurude sattumise keskkonda. Anuma kaane sees on spetsiaalsed avad, mille kaudu suunatakse aur rõhu muutumise ja kaane kuju abil kaane peal olevasse vette, kus atsetooniaur lahustub (joonis 1.5.). Ülejäänud aurud liiguvad tagasi

seadme põhja, kust need uuesti kasutusse võetakse. Kuumutamise kasuteguri suurendamiseks kasutatakse induktioonpliiti, mis on ohutum meetod. [11]



**Joonis 1.4.** Innovatiivne auru imendumismehhanismiga seade [11].



**Joonis 1.5.** Kaane joonis [11].

Selline disain teeb seadme puhastamise palju kergemaks, kuna sellel ei ole küljes elektroonikat.



### 1.5.2. Zortrax Apoller

See seade töötab Zortrax SVS tehnoloogial, mille puhul saab kasutada viimistlemiseks nii atsetooni kui ka butanooni (joonis 1.6.). Seade on automatiseeritud haldama kambri temperatuuri, rõhku ja selle kontsentratsiooni kambris. Silumisprotsess algab kuumutamisega, kui atsetoon aurustub, siis need aurud liiguvad spiraalselt üles igasse kambri nurka. Seejärel jõuavad aurud detaili pinnale. Pärast silumist aurud kondenseeruvad. Protsess lõpetatakse kambri soojendamise, et 3D prinditud detail ära kuivatada. Atsetoon on taaskasutatav. Kogu protsess võtab aega umbes 3 tundi. Seade on tehtud ohutuks seeläbi, et kambris olev rõhk on alati madalam atmosfääri omast. Samuti on uksele topelttihendid ja elektriühenduse katkemisel lukustub seadme uks ohutuse tagamiseks. Seade töötab androidi põhiselt ning tal on 4-tolline ekraan. [13]



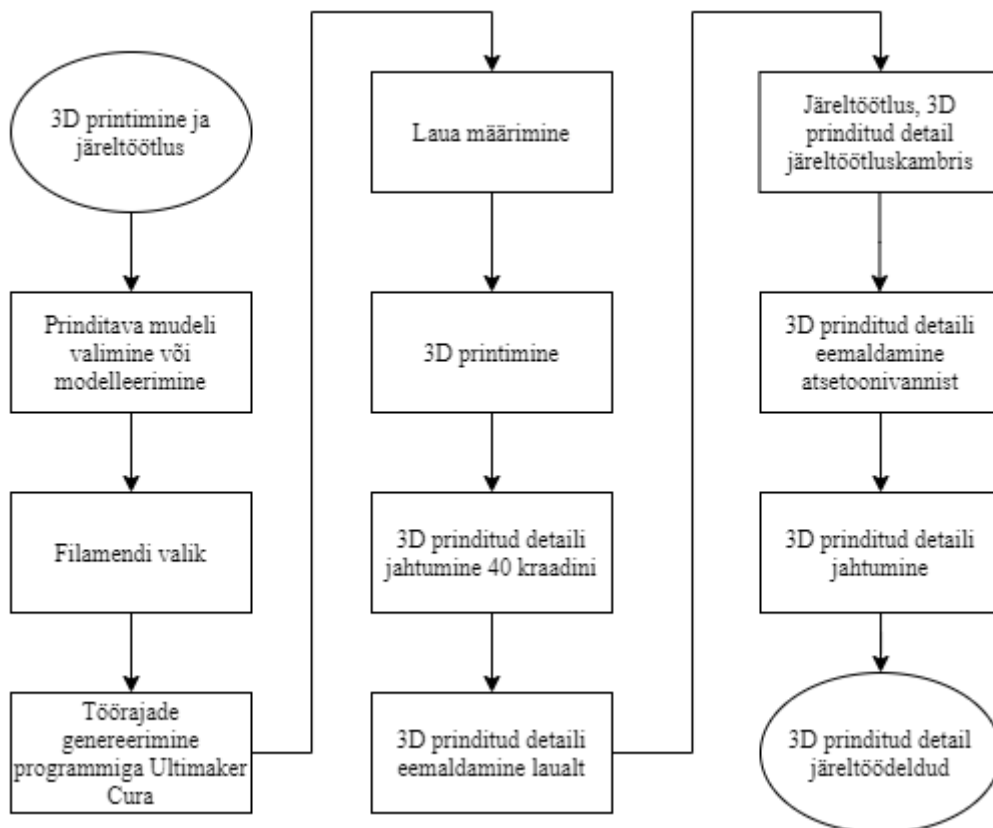
**Joonis 1.6.** Zortrax Apoller [13].

Materjalid, millest võivad olla detailid 3D prinditud on ABS, ASA, HIPS. [13]

## 2. MATERJAL JA METOODIKA

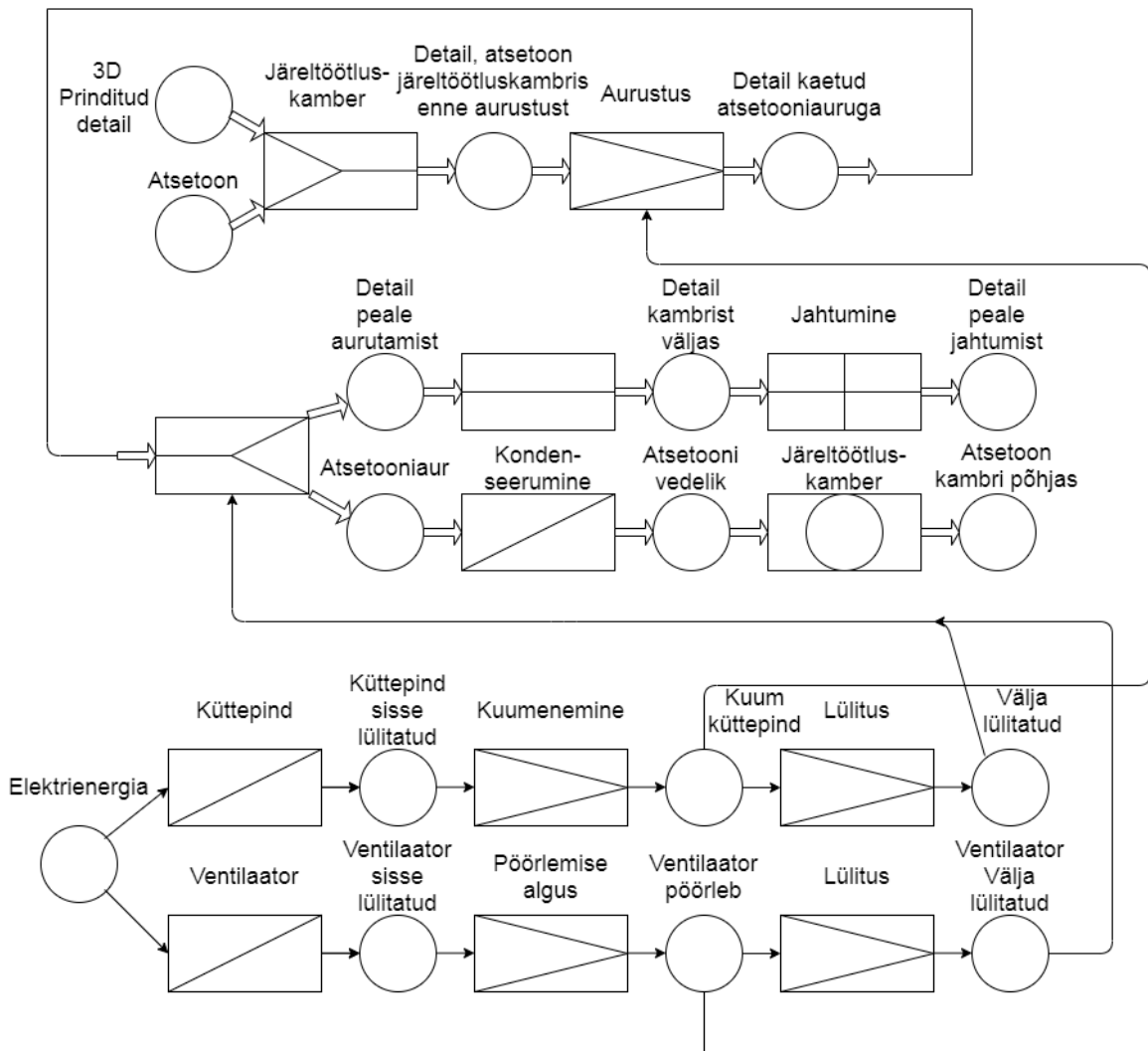
### 2.1. 3D printitud detailide valmistamise tehnoloogia

Tehnoloogia seletamisel on abiks plokk skeem (joonis 2.4.). Protsessi alustuseks on vaja valida või ise modelleerida vajalik 3D printitav detail. Seejärel tuleb valida materjal, millest detail 3D printida. Atsetooniga järeltöötlemiseks sobivad ainult ABS-materjalid. Pärast filamendi valikut tuleb luua töörajad 3D detaili printimiseks, lisaks tuleb valida optimaalsed printeri ekstruuderi ja aluslaua temperatuurid. 3D printeri töölaud kaetakse liimiga. Detail 3D printitakse, lastakse sel jahtuda ja pärast jahtumist asetatakse detail järeltöotluskambris. Järeltöotluskambris 3D printitud detaili pinnakvaliteet paraneb. Kuna 3D printitud detail on pärast atsetooniauru seest välja võtmist habras, siis lastakse sel uuesti jahtuda. Peale jahtumist on lõplik detail valmis.



Joonis 2.1. Tehnoloogia protsess.

Siinne töö on keskendub järeltöötlemise tehnoloogiale. Järgnevalt selgitatakse järeltöötlemise tehnoloogiat põhjalikumalt (joonis 2.5.). Tehnoloogia protsess algab atsetooni valamise järeltöötlusseadmesse. 3D printitud detail asetatakse järeltöötlusseadmesse ja seade lülitatakse sisse. Atsetooni aurustamise ajal töötavad nii ventilaator kui ka küttepind. Aurud sulatavad detaili pinda, luues siledama pinna. Pärast protsessi lõppu lülitatakse seade välja, detail eemaldatakse seadmest ja lastakse sel jahtuda. Atsetooniaur kondenseerub tagasi järeltöötuskambri põhja ja osa aurudest liigub veeanumasse.



**Joonis 2.2.** Järeltöötlemise protsessi funktsiooniskeem.

Põhja tagasi kondenseerunud atsetooniaurud on võimalik taaskasutada. Tänu taaskasutamisel on atsetoonikulud väiksemad.

## **2.2. 3D printitud detailide järeltötlusseadme projekteerimine**

### **2.2.1. Projekteerimise tingimused**

3D printimine oleks täiuslik siis, kui 3D printitud detail oleks sile ja krobelse pinnata. FFF või FDM tehnoloogiat kasutades jääb detaili pind krobelseks, seega on vaja projekteerida järeltötlusseade, kuidas pinda saaks lihtsal viisil parendada. Parendamine annab 3D printitud detaili kvaliteeti ja visuaalset välimust juurde ning seeläbi tõsta toote hinda. ABS-materjali suur pluss on see, et seda saab järeltöödelda atsetooniga.

Töökäik:

1. Pakkuda välja põhimõttelahendused
2. Hinnata lahendusi
3. Projekteerida järeltötlusseade
4. Leida vajalikud komponendid
5. Modelleerida järeltötlusseade

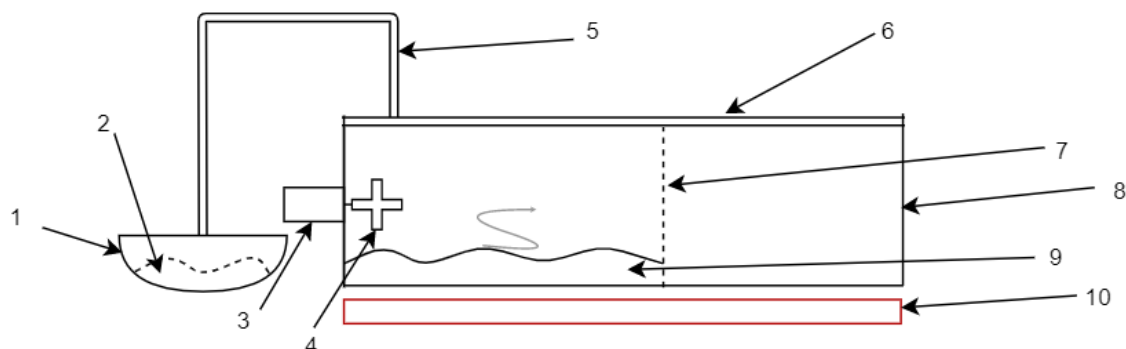
Projekteeritava 3D printitud detailide järeltötlusseadme projekteerimistingimused:

1. konstruktsioonimaterjalid peavad taluma atsetooniaure;
2. järeltötluskambri konstruktsioonis peab olema läbipaistev materjal, et hinnata aurustamise tehnoloogia protsessi ja jälgida 3D printitud detaili pinda;
3. järeltötluskambrisse peab ära mahtuma kaks maksimaalsete mõõtmetega 3D printeriga Ultimaker 3 printitud detaili. Suurem kamber täidab oma eesmärgi, kui detaile printitakse kahe või enama printeriga ning kui 3D printitud detaile töödeldakse koos. Selle järgi võib tekkida vajadus siis, kui on tegemist mahukama tellimustööga.

### **2.2.2. Ideede genereerimine**

Esimene lahendus: Vaheseinaga 3D printitud detailide järeltötlusseade (joonis 2.3.).

Järeltöötuskambris on liikuv vahesein, mis jaotab kogu kambri kaheks eraldi osaks. Vahesein vähendaks atsetoonikulu väiksemate detailide viimistlemise korral. Kuumutamiseks kasutatakse aluslauda. Et atsetooni ei pääseks keskkonda ja et ei tekiks ülerõhku, siis selleks on abiks eraldi nõu veega, kuhu üleliigsed atsetooniaurud liiguvad. Atsetoon seguneb veega väga hästi ja tänu sellele on see tõhus variant ohutuse tagamiseks. [17]

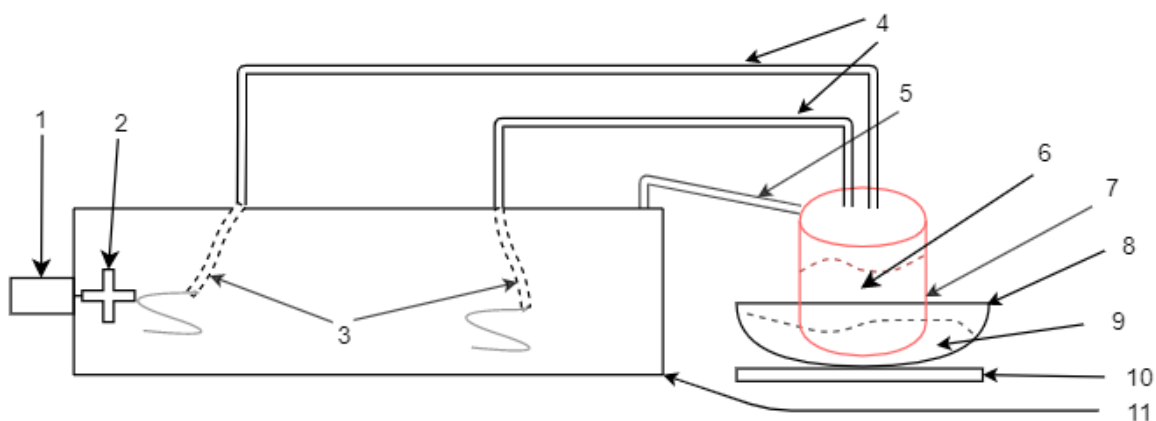


**Joonis 2.3.** Vaheseinaga järeltöötlusseade

1 – veeanum, 2 – vesi, 3 – elektrimootor, 4 – ventilaator, 5 – nailontoru, 6 – kaas, 7 – vahesein, 8 – klaasanum, 9 – atsetoon, 10 – kuumutav aluslaud.

Teine lahendus: Jugatöötusega järeltöötlusseade (joonis 2.4.).

Jugatöötuse korral paikneb atsetoon järeltöötuskambrist eraldi olevas nõus, mis paikneb kuuma vee sees ja vett on võimalik soojendada aluslauaga, mis omakorda paneb atsetooni auruma. Atsetooniaur juhatakse kambrisse ventilaatori abil. Et süsteem umbne ei oleks, on järeltöötuskambrist olemas tagasivool atsetoonianumasse.

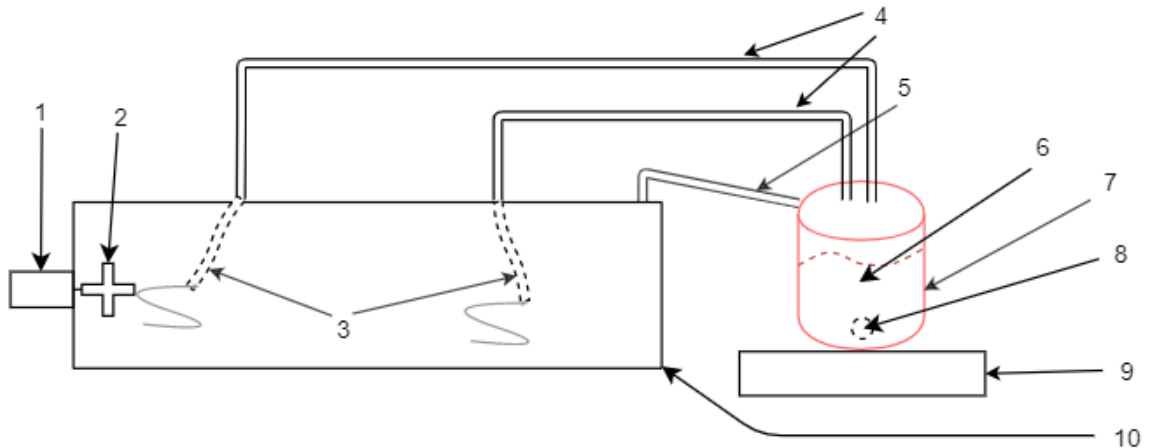


**Joonis 2.4.** Jugatöötusega järeltöötlusseade

1 – elektrimootor, 2 – ventilaator, 3 – liigendtorud, 4 – atsetoonile vastupidavad torud, torudes on ventilaatorid, 5 – tagasivoolutoru, 6 – atsetoon, 7 – atsetoonianum, 8 – veeanum, 9 – vesi, 10 – soojendatav aluslaud, 11 – järeltöötuskamber.

Kolmas lahendus: Ultrahelitehnoloogiaga järeltötlusseade (joonis 2.5).

Ka sel juhul paikneb atsetoon eraldi nõus. Nõu põhja on kinnitatud ultraheli aurusti. Ultrahelisagedus paneb atsetooni auruma, mis paneb aurud liikuma.



**Joonis 2.5.** Ultrahelitehnoloogiaga järeltötlusseade

1 – elektrimootor, 2 – ventilaator, 3 – liigendtorud, 4 – atsetoonile vastupidavad torud, 5 – tagasivoolutoru, 6 – atsetoon, 7 – atsetoonianum, 8 – ultraheli aurusti seade, 9 – elektroonikakomponentide karp, 10 – järeltötluskamber.

Eraldi tasub käsitleda töötlemiskambri lahenduse valikut. Esimeseks lahenduseks oleks, et järeltötluskamber on klaasist. Teiseks oleks järeltötluskamber, kus järeltötluskambri raam on valmistatud võrdkülgsest nurkprofiilist ehk vinklist. Sellisel juhul on võimalik klaase kinnitada klambritega. Samas on võimalik klaasi asemel kasutada roostevaba terast AISI-304/316.

### 2.1.3. Lahenduste hindamine

Hindamisel võtan aluseks järgmised kriteeriumid: maksumus, tehnoloogilisus, ohutus, järeltötluskambri materjali läbipaistvus. Lisaks hindan ka järeltötluskambri tüübi valikut. Esiteks tuleb leida punktid lihtpunkthindamisega (tabelid 2.4., 2.5.), seejärel kaalutud punkthindamisega (tabelid 2.6., 2.7.). Seejärel teha otsus, milline oleks optimaalne lahendus. Enne hindamise alustamist on vajalik teada algandmeid, mille saaks hindamise aluseks võtta. Need on näha tabelites 2.2. ja 2.3.

**Tabel 2.1.** Hindeskaala

Tähendus	Punkte
Eriti hea, ideaalne	4
Hea	3
Piisav	2
Vaevalt vastuvõetav	1
Hüljatav	0

**Tabel 2.2.** Järeltötlusseadme kriteeriumid.

Kriteeriumid	Lahendus		
	Vaheseinaga järeltötlusseade	Jugatötlusega järeltötlusseade	Ultrahelitehnoloogiaga järeltötlusseade
Maksumus	500 €	600 €	700 €
Tehnoloogilisus	Järeltötluskambri kuumutamine	Tagasivoolu ehitus, emulsioonitorude paigutus	Keerukas, ohutuse kindlustamine
Ohutus	Kuumutamine toimub järeltötluskambri põhjast, ülerõhku alandab veeanum	Atsetoon asub eraldi nõus, kus seda soojendatakse	Ohtlik, kuna elektroonika atsetooni ligi
Keerukus	Kõik loogiline ja hõlpsalt kätte saadav	Torustikku sobiva ventilaatori leidmine võib olla keeruline	Ohutuse tagamine

Märkused: Tehnoloogilisuse hindamisel võeti aluseks tehnikmaja töökoja võimekus ja seal olemasolevad materjalide töötlemistehnoloogiad. Maksumuse aluseks on võetud vaheseinaga järeltötlusseade, teiste lahenduste kulud on arvestatud ligikaudselt.

**Tabel 2.3.** Järeltötluskambri algandmed.

Kriteeriumid	Lahendus		
	Ainult klaas	Nurkprofiiliga klaas	Roostevaba teras (läbipaistva kaanega)
Maksumus	Väga Hea	Piisav	Väga hea
Läbipaistvus	Väga hea	Hea	Materjal pole läbipaistev, läbipaistev kaas mingil moel kompenseerib seda
Vastupidavus	Ei talu löökkoormust	Ei talu löökkoormust	Väga vastupidav
Tihenduse valik	Vajaliku tihendi kättesaadavus on raskendatud	Vajaliku tihendi kättesaadavus on raskendatud	Järeltötluskambri küljed saab üksteisega kinni keevitada

Märkus: Läbipaistvuse all mõeldakse töötlemiskambri seinte läbipaistvust.

**Tabel 2.4.** Järeltöötlusseadme lihtpunktihindamine. Hindeskaala on tabelis 2.1. Nagu näha, siis jugatöötlusega järeltöötlusseadmel on üks kõige rohkem punkte

Lahendus	Kriteeriumid				Punkte kokku
	Maksumus	Tehnoloogilisuus	Ohutus	Keerukus	
Vaheseinaga järeltöötlusseade	4	3	3	4	18
Jugatöötlusega järeltöötlusseade	3	4	4	2	17
Ultrahelitehnoloogiaga järeltöötlusseade	3	2	1	2	8

**Tabel 2.5.** Järeltöötuskambri lihtpunktihindamine. Tabelist on näha, et kaks lahendust on omavahel jäänud viiki.

Järeltöötuskambri lahendus	Kriteeriumid				Punkte kokku
	Maksumus	Läbipaistvus	Vastupidavus	Tihenduse valik	
Ainult klaas	4	4	3	2	13
Nurkprofiiliga klaas	2	4	3	2	11
Roostevaba teras (läbipaistva kaanega)	4	1	4	4	13

Kuna lihtpunktihindamisest selget võitjat ei selgunud, siis tuleb teha kaalutud punktihindamine. Kaalutud punktihindamisel võetakse hindamisele abiks kriteeriumite olulisus punktidega.

**Tabel 2.6.** Järeltöötlusseadme intensiivhindamine. Tabelist on näha, et optimaalseim lahendus on vaheseinaga järeltöötlemisseade.

Lahendus	Kriteeriumid				Punkte kokku
	Maksumus	Tehnoloogilisuus	Ohutus	Keerukus	
Vaheseinaga järeltöötlusseade	1,2	0,3	0,9	1,2	3,6
Jugatöötlusega järeltöötlusseade	0,9	0,4	1,2	0,6	3,1
Ultrahelitehnoloogiaga järeltöötlusseade	0,9	0,2	0,3	0,6	2,0

Märkused: Kaalumisel võtsin väärtused (mida suurem väärtus seda olulisem): maksumus – 0,3; tehnoloogilisuus – 0,1; ohutus – 0,3; Keerukus – 0,3.



**Tabel 2.7.** Järeltöötuskambri intensiivhindamine. Punktide järgi tuleks võitjaks klaaslahendus.

Järeltöötuskambri lahendus	Kriteeriumid				
	Maksumus	Läbipaistvus	Vastupidavus	Tihenduse valik	Punkte kokku
Ainult klaas	1,2	1,2	0,3	0,6	3,3
Nurkprofiiliga klaas	0,6	1,2	0,3	0,6	2,7
Roostevaba teras (läbipaistva kaanega)	1,2	0,3	0,4	1,2	3,1

Märkused: Kaalumisel võtsin väärtused: maksumus – 0,3; läbipaistvus – 0,3; vastupidavus – 0,1; ohutus – 0,3.

Kõik hinnangud on tehtud ja tuleb välja, et optimaalsemaks lahenduseks on vaheseinaga järeltöötusseade, mille järeltöötuskamber on klaasist.

#### 2.1.4. Järeltöötusseadme komponentide valik

Järeltöötusseadme joonestamiseks kasutati tarkvara *Solid Edge 2020*. Komponentide lisamine joonisesse ja kuluanalüüsi tegemine toimus paralleelselt. Sobivuse testimiseks joonestati programmis samade mõõtmetega ostudetailid, mis olid müügis. Seejärel testiti detailide sobivust. Kõik sobituvad detailid telliti. Detailid modelleeriti piltide ning andmelehtede põhjal. Lisades on toodud detailide koostud ja joonised (Lisa A). Detailide valikul võeti aluseks hinnangust saadud tulemuse lahendus. Vaheseinaga järeltöötuskambri valmistamiseks oli vaja järgmisi põhidetaile:

1. klaasist anum mõõtmetega 450×250×350 mm, et järeltöötuskambrisse mahuks kaks täismahus detaili;
2. roostevabast terasest kaas järeltöötus kambrile;
3. tühi nõu veega, et ülerõhu tekkimisel liiguksid aurud läbi vooliku vette;
4. vahesein roostevabast terasest ja EPDM-tihenditest, et atsetoonikulu vähendada väiksemate detailide puhul;
5. elektrikomponente, et seadet saaks nupust tööle panna.

Materjalide sobivuse testimiseks tuli kindlaks teha atsetoonikindlus. Selleks kasutati kahte andmebaasi: *CP Lab Safety* ja *macro rubber*. [23;24]

Elektroonikakomponentide valikul võeti aluseks see, et järeltöötuskambris olevat atsetooni on vaja kuumutada, et selle aur hakkaks ringlema. Kuna atsetoon hakkab aurustuma juba 56 °C juures, siis väga võimsat küttekeha pole vaja. Probleemi lahendamiseks sai välja valitud küttekeha võimsusega 150 W. Detaili ühtlasema pinnaviimistluse jaoks on vaja ka ventilaatorit. Kui auru aetakse kambris ventilaatoriga ringi, ümbritseb aurud töödeldavat detaili ühtlasemalt. Välja valitud ventilaatori puhul on tegemist praeahju varuosaga. See töötab 230 VAC peal ja maksimaalne võimsus on 28 W. See lahendus tuli komplektis koos tiivikuga, mis on valmistatud roostevabast terasest. Ahjuventilaatori eesmärk on panna õhk võimalikult hästi ringlema. Tiivikul ongi selline konstruktsioon, mis suunab õhu ühtlasemalt ringi.

Pärast kahe põhikomponendi valikut hakati koostama elektriskeemi (Lisa B). Atsetooni kuumutamiseks aurustuine intensiivistub. Aurustumiskiiruse reguleerimiseks võeti kasutusele temperatuurikontroller. Temperatuuri kontrolleri eesmärgiks jäi järeltöötuskambri temperatuuri hoidmine seatud vahemikus. Et temperatuure jälgida saaks, oli vaja temperatuuriandurit, milleks sai võetud PT-100. Vahemikus hoidmiseks ühendati kontrollerisse relee mähis ja relee NO kontakt ühendati kütteplaadi pluss ühenduse vahele. Kuna aluslaud töötab 12 või 24 V peal, tuli valida ka alaldi. Alaldi peab vastu pidama koormusele 150 W ja võimaldama muundada pinget 24 V peale. Valikuks osutus 200 VA trafo, mille koormustaluvus võeti lisaga 33%. Tagamaks seadme ohutuse lisati kaitselüliti, hädaseiskamislüliti ja pööratav koormuslüliti. Kaitselüliti valikul liideti tarbijate võimsused kokku ja jagati vooluringi pingega (valem 1.).

$$I = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{U}, \quad (2.1.)$$

kus  $P_1, P_2, P_n$  on komponentide võimsus 1 W;

U - Vooluringi pinge 1 V;

I - Vooluringi maksimaalne vool 1 A.

Temperatuuri kontrolleri võimsustarve on 5 W. Teades komponentide võimsusi ja vooluringi pinget, saab kaitsme valiku teha pärast arvutust. [22]

$$\frac{150 \text{ W} + 28 \text{ W} + 5 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 0,80 \text{ A}$$

Kaitselüliti valikul arvestati 20% varuteguriga. Sellest tingitult valiti 1 A kaitselüliti. Ventiilaatori käitamiseks kasutati releed, mille mähist pingestati alaldi väljundist.

Arvutan seadmete energiakulud. Eelnevalt on teada, et järeltöötlemisseadme elektroonika komponentide võimsuste summa on 183 W. Arvesse tuleb võtta 3D-printeri võimsus, milleks on maksimaalselt 221 W. Oletades, et väikse detaili printimiseks kulub 3 h ja detaili silumiseks järeltöötlemiskambris läheb aega 5 minutit. Arvutatakse teoreetiline energiakulu. Esiteks arvutatakse energiakulu printimisel:

$$E = P * t, \tag{2.2.}$$

kus E on energiakulu Wh;

P - Võimsus W;

t - Aeg h.

$$221 \text{ W} * 3 \text{ h} = 663 \text{ Wh}$$

3D printeri energiakulu 3 tunniga. Järgmisena arvutatakse sama valemi abil järeltööluskambri energiakulu:

$$183 \text{ W} * 0,083 \text{ h} = 15,189 \text{ Wh},$$

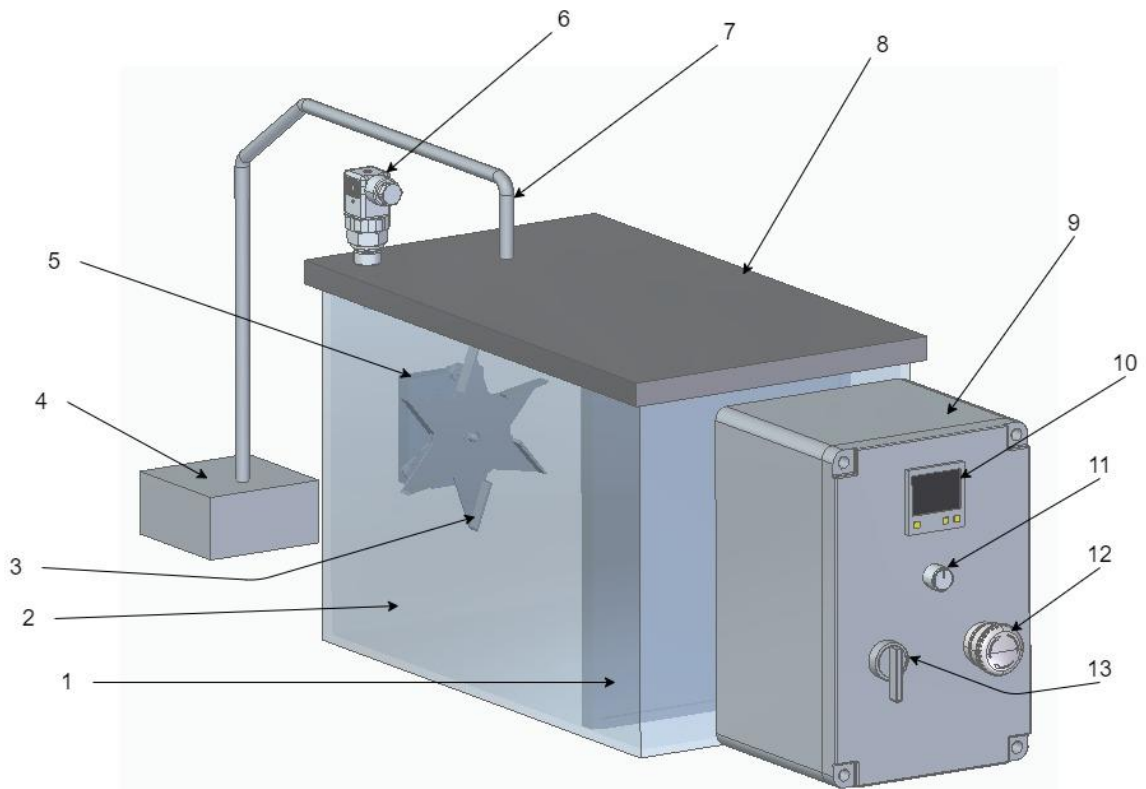
Järeltöötlemisseadme energiakulu tunnis. Kogu energiakulu tuleb seejärel omavahel liita:

$$15,189 \text{ W} + 663 \text{ W} = 678,2 \text{ Wh}$$

Teoreetilise energiakulu korral kulub väikse detaili printimiseks ja järeltöötlemiseks 678,2 Wh, millest järeltöötlemisseadme energiakulu on ainult 15,2 Wh. Võib öelda, et detaili järeltöötlemine järeltöötlemiskambri kulutab vähe energiat.

### 3. TULEMUSED

Programmis *Solid Edge* projekteeritud järeltöötlemisseade (joonis 3.1.). Joonisel on välja toodud erinevad komponendid. Kaas käib pealt ära, selle ääred on tihendatud EPDM-tihendiga.



**Joonis 3.1.** Järeltöötlemisseadme isomeetiline joonis

1 – vahesein, 2 – klaasist järeltöötlusamber, 3 – tiivik, 4 – veeanum, 5 – ventilaatori mootor, 6 – temperatuuri andur, 7 – voolik, 8 – roostevaba kaas, 9 – jaotuskeskus, 10 – temperatuuri kontroll, 11 – mootori kiiruse regulaator, 12 – hädaseiskamislüliti, 13 – pööratav koormuslüliti.

Järeltöötlemisseadme koostamiseks oli vaja sobivaid materjale ja tooteid, et seadme põhimõtet kasutada saaks. Komponentide valikul ja seadme projekteerimisel peeti meeles eelmises peatükis välja toodud kriteeriumeid. Tabelis on näha, et komponentide maksumus kujunes 524 eurot (tabel 3.1.).

**Tabel 3.1.** Järeltöötlemisseadme komponendid ja nende maksumus

NR	Komponendi nimetus	Mudel	Materjal	Kogus	Ühik	Summa kokku EUR
1	Tihend		EPDM	2	m	3,5
2	Roostevabast terasest kaas ja vahesein		AISI 304	1	m	41,1
3	Temperatuuri andur	PT100	Sensor: AISI 316	1	tk	24,5
4	Temperatuuri juhtimine	TC533AX	Enamasti plastik	1	tk	50,8
5	Kütteleht	MK3	Alumiinium	1	tk	26,0
6	Ventilaator	W4-43001/GOR	Erinevad	1	tk	20,5
7	Järeltöötuskamber	Käsitöö	Karastatud klaas	1	tk	135,0
8	Liimi käsipüstol			1	tk	42,2
9	Segamisotsik liimile			1	karp	7,4
10	Liim	Loctite HY 4090	Tsüanoakrülaadi -epoksiidi segu	1	tk	47,0
11	Alaldi / trafo	STM 200VA 230V/24V		1	tk	47,3
12	Kaitselüliti	MCB 1C 1A 6kA		1	tk	2,1
13	Mootori rele	RCI314024 1CO 16A 240VAC, jp 24VDC, Weidmüller		1	tk	3,0
14	Relepesa	SRC-I 2CO, 16A 250VAC, RCI/RCL 1/2CO releed, Weidmüller		1	tk	3,0
15	Küttelehtri rele	RFT, 1CO 12A 250VAC/30VDC, cv 24VDC		1	tk	3,0
16	Relepesa	SRU08-E ^SR2P ^SR20T, 2P 10A 300V,		1	tk	3,6
17	Avariinupp D22	SGB2-BS542		1	tk	3,6
18	Klemmplokk XB2	SGB2-BE102		1	tk	0,6
19	Elektrikarp	CA-43as	Polüester	1	tk	23,3
20	Koormuslüliti XB2	SGB2-BJ53		1	tk	4,0
21	Paigaldusplaat	PP-43		1	tk	3,5
22	Riputusklamber	OFC-400		1	tk	4,0

Tabel 3.1. järg

23	Mootori kiiruse re- guleerimine	FR4-GSB		1	tk	25,0
24					Kogu- summa	524,1

Kõige kallim komponent oli järeltötluskamber hinnaga 135 eurot ja kõige odavam kaitse-  
lülit 2,1 eurot.

## KOKKUVÕTE

Siinses bakalaureusetöös uuriti erinevaid 3D prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogiaid, põhjalikumalt käsitleti atsetooniga järeltöötlemist. FDM ja FFF tehnoloogiat kasutades tekib 3D prinditud detaili pinnale astmeline ja reljeefne ehk krobeline pind. Krobeline pinna silumine on võimalik erinevate järeltöötlemismeetoditega. Üheks sellest on atsetooniga töötlemine, mille jaoks on vaja järeltööluskambrit, atsetooni ja ABS- materjalist välja prinditud detaili. ABS on tuntud filament ja üks ainsaid, mis atsetooniga sellisel viisil reageerib. Kuna atsetoon on kergesti lenduv ja samas ka mürgine keemiline ühend, siis püstitati eesmärk projekteerida kinnine atsetoonikamber, kus saaks 3D prinditud detaili ohutult töödelda. Järeltööluskambri eeliseks on see, et ta hoiab atsetooni aurud detaili lähedal ja väliskeskkonnast eemal. Järeltööluskambris on võimalik atsetooni kuumutada. See kiirendab töötlemisprotsessi, atsetooniauru ringi ajav ventilaator aitab tagada 3D prinditud detaili ühtlasema järeltöötuse.

Eesmärgi lahendamiseks projekteeriti 3D prinditud detailide järeltöötlusseade. Järeltöötuskambri projekteerimise kriteeriumid olid järgmised: materjalid peavad olema atsetoonile vastupidavad, konstruktsioonis peab olema läbipaistev materjal ja järeltöötuskambrisse peab ära mahtuma kaks maksimaalsete mõõtmetega 3D printeriga Ultimaker 3 3D prinditud detaili. Kriteeriumeid arvesse võttes koostati järgmised lahendusettepanekud: vaheseinaga järeltöötlusseade, jugatöötusega järeltöötlusseade ja ultrahelitehnoloogiaga järeltöötlusseade. Lahendusi hinnati nii lihthindamise kui ka punkhindamisega. Hindamise lõpus selgus, et optimaalseimaks lahenduseks on vaheseinaga järeltöötuskamber.

Raalprojekteerimise käigus otsiti ja sobitati tellitavaid komponente omavahel kokku *Solid Edge 2020* keskkonnas. Peale sobitamist telliti kõik komponendid Maaülikooli. Arvutati järeltöötlemise tehnoloogia energiakulu, milleks tuli 15,2 Wh, tingimusel, et tunnis kasutatakse seadet 5 minutit. Töö tulemustes toodi tabelina välja komponentide maksumus, milleks kujunes 524 eurot, ja esitati järeltöötlemisseadme isomeetiline joonis. Joonise peal on välja toodud enamus ostudetailid, kus kalleim ostudetail oli järeltöötuskamber hinnaga 135 eurot.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Homb, R., R.** (2013). Finishing a 3D-printed part: ABS smoothing and coloring without Chemicals. [õpetus] <https://www.norwegiancreations.com/2013/05/finishing-a-3d-printed-part-abs-smoothing-and-coloring-without-chemicals/> (21.03.2020).
2. **Colpani, A., Fiorentino, A. & Ceretti, E.** (2019). Characterization of chemical surface finishing with cold acetone vapours on ABS parts fabricated by FDM. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00894-3> (21.03.2020).
3. **Zhang, S-U.** (2017). Numerical evaluation of ABS parts fabricated by fused deposition modeling and vapor smoothing. – *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. Vol. 2, No. 6, pp. 157-161. <https://dx.doi.org/10.25046/aj020620> (21.03.2020).
4. Omnexus. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic> (23.03.2020).
5. **Evans, B.** (2012). Practical 3D printers: Springer Science+Business Media. 306 lk. [on-line] <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4302-4393-9> (24.03.2020).
6. **Bell, C.** (2014). Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer: SSBM Finance Inc. 498 lk. [on-line] <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4302-6808-6> (25.03.2020).
7. **Hermanson, E.** (2017). 3D printimine termoplastse polüuretaaniga. (Magistritöö). Eesti maaülikooli tehnikainstituut. Tartu (26.03.2020).
8. **Grames, E.** (2019). FDM (3D Printing) – Simply Explained – *All3DP*. [e-ajakiri] <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/> (26.03.2020).
9. **Varotsis, A., B.** (2019). Introduction to FDM 3D printing – *3Dhubs*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#work> (26.03.2020).
10. Ultimaker 3 Installation and user manual. (2017). – *Ultimaker*. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360013053880-Ultimaker-3-PDF-manuals> (27.03.2020).
11. **Xu, K., Xi, T., Liu, C.** (2019). Design of the desktop vapor polisher with acetone vapor absorption mechanism – *Journal of Physics: Conference Series*. Vol 1303. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1303/1/012061/meta> (02.04.2020)
12. Ohutuskaart. (2012). Atsetoon. <https://kemetrv.ee/wp-content/uploads/2016/11/OHUTUSKAART-Atsetoon.pdf> (03.04.2020)
13. Device User Guide. Apoller. (2019). – *zortrax*.



- [https://support.zortrax.com/wp-content/uploads/2019/08/user\\_guide\\_zortrax\\_apoller\\_v4.pdf](https://support.zortrax.com/wp-content/uploads/2019/08/user_guide_zortrax_apoller_v4.pdf)  
(04.04.2020)
14. **Chohan, S. J., Singh, R.** (2017) Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications – *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 495-513. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2015-0059> (09.04.2020)
  15. **Gregurić, L.** (2018). History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? – *All3DP*. [e-ajakiri] <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> (28.04.2020).
  16. **Sankar, M., R. & Jain, V., K. & Ramkumar, J.** (2011). Abrasive flow machining (AFM): An Overview. [artikkel] [https://www.researchgate.net/publication/228747468\\_Abrasive\\_flow\\_machining\\_AFM\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/228747468_Abrasive_flow_machining_AFM_An_Overview) (28.04.2020)
  17. Acetone (CID=180). National Center for Biotechnology Information. PubChem andmebaas. (andmed uuendatud 25.04.2020). <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetone> (29.04.2020)
  18. iDig3Dprinting. (2016). XYZ 20mm Calibration Cube. [katsekeha] <https://www.thingiverse.com/thing:1278865> (04.05.2020)
  19. How to print with Ultimaker ABS. (2020). – *Ultimaker*. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011953520-How-to-print-with-Ultimaker-ABS> (04.05.2020)
  20. Technical data sheet ABS. (2018). – *Ultimaker*. [EN] <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS> (19.05.2020)
  21. Tumble vs. Vibratory finishing: are you using the right one? (2018) – *Finishingsystems*. <https://www.finishingsystems.com/blog/tumble-vs-vibratory-finishing/> (19.05.2020)
  22. TC533 Economic temperature controller – *Selec*. [tehnilised andmed] <https://www.elit.ee/et/shelf.do?cmd=iv&pid=TC533AX-CU> (20.05.2020)
  23. Acetone. Marco Rubber & Plastics. - *Rubber O-Ring Chemical Compatibility Chart – O-Ring Material Resistance Guide*. [andmebaas] <https://www.marcorubber.com/o-ring-chemical-compatibility-chart.htm> (20.05.2020)
  24. Chemical Charts. – *CP lab safety*. [andmebaas] <https://www.calpaclab.com/chemical-compatibility-charts/> (20.05.2020)
  25. Polymaker Polysher - 3D Print Finishing Machine. – *MatterHackers*. [e-pood] <https://www.matterhackers.com/store/l/polymaker-polysher/sk/MMK8EQZZ> (20.05.2020)
  26. 2020 Types of 3D Printing Technology. (2020). – *All3DP*. [e-ajakiri] <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/> (25.06.2020)

## SUMMARY

In this work various post-treatment technologies were studied, of which the acetone post-treatment was discussed more thoroughly. By using FDM and FFF technology, a staircase and ridge pattern surface is created on the surface of the printed detail and therefore its surface is rough. It is possible to smooth the rough surface by using post-treatment. The post-treatment with acetone requires a chamber, acetone and a detail that is printed out of ABS. ABS is a well-known filament and one of the only 3D printable material that reacts with acetone. Since acetone is highly volatile and at the same time also harmful to health, the aim was to construct a closed postprocessing chamber where the 3D printed part could be safely postprocessed. A good feature of the postprocessing chamber is that it keeps acetone vapors close to the part and away from the environment. It is possible to heat acetone in the acetone bath and create acetone vapor. Acetone vapor is distributed evenly in the chamber with a fan. This process speeds up the smoothing and turns the surface of the detail more even.

A postprocessing device for 3D printed parts was designed to solve this paper's goal. The design criteria for the postprocessing device were: the construction materials must be resistant to acetone, the construction must be made out of transparent material and the postprocessing chamber must be fit for two maximum sized parts that is 3D printed by Ultimaker 3. Taking into account the criteria, different basic proposals were made: postprocessing device with partition, postprocessing device with jet treatment and postprocessing device with ultrasonic technology. The solution proposals were evaluated with both simple evaluation and point evaluation. At the end of the evaluation it was found that the best solution is a partition postprocessing device.

During the design of the drawing, the ordered components were searched and matched in *Solid Edge 2020* software. After matching, all components were ordered to the University of Life Sciences. The energy consumption of the post-processing technology was calculated to be 15,2 Wh if the device is used for 5 minutes per hour. As a result of the work, the cost of the components was shown in the table, which was 524 €, and an isometric drawing of the

test device was presented. Most of the purchase details were introduced in the drawing. The most expensive detail was postprocessing chamber which paid 135 euro.

**LISAD**

# LIHTLITSENTS

Mina, Egert Pedassaar  
sünniaeg 28.12.1997

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö,  
3D Prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogia

mille juhendaja(d) on, Kaarel Soots, *PhD*; Tormi Lillerand, *MSc*

salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.1. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.2. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(kuupäev)

---

## Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)