

# Usporedba niskobudžetnih 3D printera

---

**Radoš, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2014**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:452474>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ivan Radoš**

Zagreb, 2014. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Ivan Radoš

Zagreb, 2014. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Damiru Godecu, na pruženom vremenu i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Tehničkom suradniku Miodragu Kataleniću se zahvaljujem na savjetima i sudjelovanju pri realizaciji usporedbe niskobudžetnih 3D printera.

Dr. sc. Marku Katiću se zahvaljujem pri pomoći i podršci prilikom provedbe mjerenja za usporedbu niskobudžetnih 3D printera.

Doc. dr. sc. Gorani Baršić se zahvaljujem za provedena mjerenja za usporedbu niskobudžetnih 3D printera.

Zahvaljujem se svim ostalima profesorima i asistentima koji su sudjelovali u mojem procesu studiranja, te prijateljima i obitelji na pruženoj podršci.

Ivan Radoš

# SARŽAJ

POPIS SLIKA .....	i
POPIS TABLICA.....	iv
POPIS KRATICA I OZNAKA .....	v
SAŽETAK.....	vii
SUMMARY .....	viii
1. UVOD .....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	2
2.1 Značajke aditivne proizvodnje.....	3
2.2 Načelo izrade tvorevina u aditivnoj proizvodnji .....	4
2.3 Brza proizvodnja prototipova (e. Rapid Prototyping, RP) .....	6
2.4 Postupci brze proizvodnje prototipova (RP postupci) .....	7
3. NISKOBUDŽETNI 3D PRINTER .....	8
3.1 Načelo rada .....	8
3.2 Izvedba niskobudžetnih 3D printera.....	11
3.2.1 Ekstruder (mlaznica).....	11
3.2.2 Mehanizam za dostavu materijala .....	13
3.2.3 Radna podloga .....	15
3.2.4 Pogon (prijenos gibanja, elektromotori) .....	16
3.2.4.1 Prijenos gibanja .....	16
3.2.4.2 Elektromotori .....	17
3.2.5 Elektronika .....	18
3.2.6 Kućište (okvir).....	19
3.3 Materijali za 3D ispis niskobudžetnih 3D printera.....	21
3.3.1 Akrlonitril butadien stiren (ABS).....	21
3.3.2 Polilaktid (PLA) .....	23
3.3.3 Polikarbonat (PC).....	24
3.3.4 PA (Poliamid) .....	26
3.3.5 Savitljivi materijali - Elastoplastomerni uretan (TPU) .....	27
3.3.6 Topljivi materijali - polivinil amid (PVA), polistiren visoke žilavosti (PS-HI) .....	28
3.3.6.1 Polivinil amid (PVA).....	28
3.3.6.2 Polistiren visoke žilavosti (PS-HI).....	29
3.4 Najčešće greške i problemi izrade tvorevina .....	30
3.4.1 Problemi materijala i njegove dostave .....	30
3.4.1.1 Pretjerano dodavanje materijala.....	30
3.4.1.2 Upravljanje materijalom i kvaliteta materijala.....	31

3.4.2 Problemi prijanjanja na podlogu.....	33
3.4.2.1 Nedovoljno prijanjanje na podlogu .....	33
3.4.2.2 Podizanje rubova .....	33
3.4.2.3 Pretjerano prijanjanje na podlogu .....	34
3.4.3 Problemi pogona i kalibracije .....	34
3.4.3.1 Prevelika brzina printanja .....	34
3.4.3.2 Preskakanje koraka kod motora .....	35
3.4.3.3 Kalibracija .....	37
3.4.4 Problemi temperature .....	37
3.4.4.1 Temperatura predmeta previsoka .....	37
3.4.4.2 Temperatura predmeta preniska .....	38
3.4.4.3 Temperatura ekstrudiranja materijala previsoka, preniska .....	38
3.4.5 Greške izrađenih modela .....	39
3.4.5.1 Površinske nepravilnosti.....	39
3.4.5.2 Netočnosti dimenzija .....	40
4. NISKOBUĐŽETNI 3D PRINTERI NA TRŽIŠTU.....	41
4.1 MakerBot Replicator 2x .....	42
4.2 Makerbot Replicator .....	43
4.3 Makerbot replicator mini .....	44
4.4 Ultimaker original.....	45
4.5 Ultimaker 2 .....	46
4.6 Cubify CubeX.....	47
4.7 Cubify CubePro .....	48
4.8 Cubify Cube.....	49
4.9 Airwolf AW3D HD .....	50
4.10 Mbot 3D Grid 2 .....	51
4.11 LulzBot TAZ 4 .....	52
4.12 UP Plus 2 .....	53
4.13 Solidoodle Workbench .....	54
4.14 Leapfrog Creatr HS .....	55
4.15 Ditto+ i Ditto pro .....	56
4.16 Samostalni projekti (Prusa Mendel) .....	57
5. USPOREDBA 3D PRINTANJA ZA MAKERBOT REPLICATOR 2X I ULTIMAKER ORIGINAL.....	58
5.1 Izvedbe uređaja.....	60
5.2 Softver (Mkaerbot Makerware i Cura) .....	64

5.3 3D printanje referentnih prototipova .....	66
5.3.1 Referentni prototipovi .....	66
5.3.2 Softverska priprema modela za 3D printanje .....	68
5.3.3 3D printanje .....	70
5.4 Usporedba performansi pri izvedbi referentnih prototipova .....	72
5.4.1 Izvedba samih prototipova .....	72
5.4.2 Odstupanje od dimenzija i skupljanje .....	75
5.4.3 Zadovoljavanje traženih dimenzija .....	79
5.4.4 Usporedba hrapavosti prototipa .....	83
5.4.5 3D printanje na Ultimaker Originalu s slojem debljine 0,02 mm .....	86
6. ZAKLJUČAK .....	88
POPIS LITERATURE .....	89

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Usporedba aditivnih postupaka s konvencionalnim postupcima .....	2
Slika 2.2 Područja primjene aditivnih postupaka u 2012. godini.....	3
Slika 2.3 Proces izrade sloj po sloj.....	4
Slika 3.1 Načelo rada niskobudžetnih 3D printera (FDM) .....	9
Slika 3.2 Primjeri 3D tiskanih predmeta .....	10
Slika 3.3 Ekstruder .....	11
Slika 3.4 Presjek ekstrudera .....	12
Slika 3.5 Materijal namotan na kolutu .....	13
Slika 3.6 Mehanizmi ovisno o položaju motora.....	13
Slika 3.7 Mehanizam kotača .....	14
Slika 3.8 Mehanizam pužnog prijenosnika .....	14
Slika 3.9 Podloga niskobudžetnog 3D printera.....	15
Slika 3.10 NEMA 14 i NEMA 17 .....	18
Slika 3.11 Elektronika niskobudžetnih 3D printera .....	19
Slika 3.12 Različiti oblici niskobudžetnih 3D printera i njihovih kućišta .....	20
Slika 3.13 Predmeti od ABS-a .....	22
Slika 3.14 Vijak i matica od PLA-a .....	23
Slika 3.15 3D tiskan profil od PC-a .....	25
Slika 3.16 3D tiskanje PA-a .....	26
Slika 3.17 3D tiskane uzice od TPU-a .....	27
Slika 3.18 3D isprintan predmet s otopivim PVA .....	28
Slika 3.19 PS-HI potpora 3D isprintanog ležaja .....	29
Slika 3.20 Čestice pretjerano dodanog materijala.....	30
Slika 3.21 Rupice zbog nekvalitetnog materijala.....	31
Slika 3.22 Printanje sa začepljenim ekstruderom.....	32
Slika 3.23 Rupice uslijed apsorbirane vlage u materijalu .....	32
Slika 3.24 Problem prijanjanja materijala na podlogu .....	33
Slika 3.25 Podizanje rubova.....	33
Slika 3.26 Pretjerano prijanjanje na podlogu .....	34
Slika 3.27 Rezultat prevelike brzine printanja .....	35
Slika 3.28 Preskakanje koraka .....	35
Slika 3.29 Preskakanje u smjeru z-osi.....	36



Slika 3.30 Spljoštjeni otvor u smjeru y- osi .....	37
Slika 3.31 Izobličenje rubova zbog prevelike temperature .....	37
Slika 3.32 Raslojavanje modela zbog preniske temperature .....	38
Slika 3.33 Neispunjavanje materijalom do kraja.....	39
Slika 3.34. Poligon s manje vrhova za rupe .....	40
Slika 4.1 Zastupljenost pojedinih niskobudžetnih 3D printera .....	41
Slika 4.2 Makerbot Replicator 2X.....	42
Slika 4.3 Makerbot Replicator .....	43
Slika 4.4 Makerbot Replicator mini .....	44
Slika 4.5 Ultimaker original .....	45
Slika 4.6 Ultimaker 2 .....	46
Slika 4.7 Cubify CubeX .....	47
Slika 4.8 Cubify CubePro.....	48
Slika 4.9 Cubify Cube .....	49
Slika 4.10 Airwolf AW3D HD.....	50
Slika 4.11 Mbot 3D Grid 2.....	51
Slika 4.12 LulzBot TAZ 4.....	52
Slika 4.13 UP Plus 2.....	53
Slika 4.14 Solidoodle Workbench.....	54
Slika 4.15 Leapfrog Creatr HS .....	55
Slika 4.16 Niskobudžetni 3D printeri tvrtke Tinkerine.....	56
Slika 4.17 Prusa Mendel.....	57
Slika 5.1 Izvedba MakerBot Replicator 2X i Ultimaker Original.....	60
Slika 5.2 Izvedbe mehanizma za dostavu materijala a) MakerBota i b) Ultimakera .....	61
Slika 5.3 Prijenos i način gibanja ekstrudera a) MakerBota i b) Ultimakera.....	62
Slika 5.4 Upravljačka ploča a) MakerBota i b) Ultimakera .....	63
Slika 5.5 Radne podloge a) MakerBota i b) Ultimakera .....	63
Slika 5.6 MakerBot Makerware .....	65
Slika 5.7 Cura (Ultimaker) .....	65
Slika 5.8 Vijak i matica .....	66
Slika 5.9 Držać osovine (SHF 16).....	66
Slika 5.10 Zupčanik.....	67
Slika 5.11 Maska za mobitel (Apple iPhone 5).....	67
Slika 5.12 Posuda (stalak) .....	68

Slika 5.13 Pripremanje prototipova za 3D printanje u MakerBot Makerware.....	68
Slika 5.14 Pripremanje prototipova za 3D printanje u Cura .....	69
Slika 5.15 3D printanje na MakerBot Replicatoru 2X .....	70
Slika 5.16 3D printanje na Ultimaker Originalu .....	71
Slika 5.17 Vijak i matica MakerBota .....	72
Slika 5.18 Vijak i matica Ultimakera .....	73
Slika 5.19 Posuda-stalak a) MakerBota i b) Ultimakera .....	73
Slika 5.20 Držač osovine (SHF 16) a) MakerBota i b) Ultimakera .....	74
Slika 5.21 Maska za mobitel (iPhone 5) a) MakerBota i b) Ultimakera .....	74
Slika 5.22 Zupčanik a) MakerBota i b) Ultimakera .....	74
Slika 5.23 Trokoordinatni mjerni uređaj Ferranti 750 .....	75
Slika 5.24 Mjerenje unutarnjeg promjera zupčanika.....	76
Slika 5.25 Mjerenje promjera držača osovine (SHF 16).....	77
Slika 5.26 Mjerenje debljine držača osovine (SHF 16) .....	78
Slika 5.27 Alatni mikroskop.....	80
Slika 5.28 Snimanje profila maske mobitela (iPhone 5).....	80
Slika 5.29 Prikupljene točke profila maske za mobitel 3D isprintane na MakerBotu .....	81
Slika 5.30 Prikupljene točke profila maske za mobitel 3D isprintane na Ultimakeru .....	81
Slika 5.31 Dimenzije profila maske 3D isprintane na MakerBotu.....	81
Slika 5.32 Dimenzije profila maske 3D isprintane na Ultimakeru.....	82
Slika 5.33 MAHR Perthometer S8P.....	83
Slika 5.34 Hrapavost gornje površine za MakerBot .....	84
Slika 5.35 Hrapavost gornje površine za Ultimaker .....	84
Slika 5.36 Hrapavost bočne površine za MakerBot .....	85
Slika 5.37 Hrapavost bočne površine za Ultimaker .....	85
Slika 5.38 Uzorak za ispitivanje 0,02 mm debljine sloja.....	86
Slika 5.39 Profil površine uzorka .....	87

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Karakteristike ABS-a za 3D ispis.....	22
Tablica 3.2 Karakteristike PLA-a za 3D ispis.....	24
Tablica 3.3 Karakteristike PC-a za 3D ispis .....	25
Tablica 3.4 Karakteristike PA-a za 3D ispis .....	26
Tablica 3.5 Karakteristike TPU-a za 3D ispis.....	27
Tablica 3.6 Karakteristike PVA-a za 3D ispis .....	28
Tablica 3.7 Karakteristike PS-HI-a za 3D ispis .....	29
Tablica 4.1 Značajke Makerbot Replicatora 2X-a .....	42
Tablica 4.2 Značajke Makerbot Replicatora-a .....	43
Tablica 4.3 Značajke Makerbot Replicator Mini-a .....	44
Tablica 4.4 Značajke Ultimaker original-a .....	45
Tablica 4.5 Značajke Ultimaker original-a .....	46
Tablica 4.6 Značajke Cubify CubeX-a.....	47
Tablica 4.7 Značajke Cubify CubePro-a .....	48
Tablica 4.8 Značajke Cubify Cube-a.....	49
Tablica 4.9 Značajke Airwolf AW3D HD-a .....	50
Tablica 4.10 Značajke Mbot 3D Grid 2-a .....	51
Tablica 4.11 Značajke LulzBot TAZ 4-a .....	52
Tablica 4.12 Značajke UP Plus 2-a .....	53
Tablica 4.13 Značajke Solidoodle Workbench-a .....	54
Tablica 4.14 Značajke Leapfrog Creatr HS-a .....	55
Tablica 4.15 Značajke Ditto+ i Ditto pro-a .....	56
Tablica 5.1 Usporedba značajki Makerbot Replicatora 2x i Ultimaker Originala .....	59
Tablica 5.2 Postavke za 3D printanje referentnih prototipova.....	69
Tablica 5.3 Vrijeme printanja pojedinih referentnih prototipova.....	71
Tablica 5.4 Mjerenje unutarnjeg promjera zupčanika.....	76
Tablica 5.5 Mjerenje promjera držača osovine (SHF 16) .....	77
Tablica 5.6 Mjerenje debljine držača osovine (SHF 16).....	78
Tablica 5.7 Skupljanje prilikom 3D printanja.....	79

## POPIS KRATICA I OZNAKA

<b>Kratice</b>	<b>Značenje</b>
ABS	Akilonitril butadien stiren
PA	Poliamidi
PC	Polikarbonat
PEEK	Poli(eter-eter-keton)
PET	Poli(etilen-tereftalat)
PLA	Polilaktid
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PS-HI	Polistiren visoke žilavosti
PTFE	Poli(tetrafluoretilen)
PVA	Polivinil amid
PVC	Poli(vinil-klorid)
TPE	Elastoplastomer
TPU	Elastoplastomerni uretan
RP	Brza proizvodnja prototipova (e. Rapid Prototyping)
RT	Brza izrada alata (e. Rapid Tooling)
RM	Brza proizvodnja (e. Rapid Manufacturing)
AM	Aditivna proizvodnja (e. Additive Manufacturing)
SLA, SL	Stereolitografija (e. Stereolithography)
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje (e. Selective Laser Sintering)
FDM	Taložno srašćivanje (e. Fused Deposition Modeling)
LOM	Laminiranje (e. Laminated Object Manufacturing)
3DP	3D tiskanje (e. 3D Printing)
DLP	Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. Digital Light Processing)

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$R_{max}$	$\mu\text{m}$	Najveća visina jednog profila na duljini
$R_z$	$\mu\text{m}$	Prosječna visina neravnina
$R_a$	$\mu\text{m}$	Srednje aritmetičko odstupanje profila
$R_p$	$\mu\text{m}$	Najveća visina izbočina profil
$R_{pm}$	$\mu\text{m}$	Prosječna visina izbočina profia
$W_t$	$\mu\text{m}$	Visina valovitosti
$R_t$	$\mu\text{m}$	Razlika najviših i najnižih točki efektivnog profila na duljini
$P_t$	$\mu\text{m}$	Najveća visina profila na ukupnoj duljini
$R_{sm}$	$\mu\text{m}$	Srednja veličina jednog koraka
$R_q$	$\mu\text{m}$	Srednje kvadratno odstupanje profila
$D_{uz}$	mm	Unutarnji promjer zupčanika
$D_o$	mm	Promjer držača osovine (SHF 16)
$H_d$	mm	Debljina držača osovina (SHF 16)
$s$		Mjera rasipanja rezultata

## SAŽETAK

Aditivne tehnologije počele su se razvijati i primjenjivati drugom polovicom 80-ih godina prošlog stoljeća. Glavni uzrok je bilo zadovoljavanje tržišta koje zahtijeva sve veću kvalitetu proizvoda, fleksibilnost, manje troškove, kraća vremena razvoja i proizvodnje, te maloserijsku i pojedinačnu proizvodnju. U sklopu aditivnih tehnologija su se razvili i niskobudžetni 3D printeri, koji su danas postali vrlo dostupni i omogućuju značajnu ekspanziju primjene aditivnih tehnologija za razvoj i proizvodnju. Veliki broj niskobudžetnih 3D printera se počeo javljati na tržištu, što otežava izbor potencijalnom investitoru. U okviru ovoga rada obrađeni su niskobudžetni 3D printeri, njihova načela rada, izvedba uređaja, materijali koje mogu prerađivati te greške i problemi same tehnologije, kako bi se oni razumjeli za daljnje uspoređivanje. Navedeni su na tržištu najzastupljeniji i najpopularniji niskobudžetni 3D printeri sa svojim značajkama za međusobnu usporedbu, te su od njih zbog vlastite dostupnosti odabrani Ultimaker Original i MakerBot Replicator 2X. Oni su detaljno uspoređeni, a njihove performanse pri izvedbi referentnih prototipova su uspoređene kroz provedena mjerenja. MakerBot Replicator 2X je ponudio bolje rezultate i ocijenjen je kao bolji 3D printer, a ponuđeni pristup nudi primjer na što sve treba obratiti pozornost pri odluci kupovine.

Ključne riječi: aditivne tehnologije, niskobudžetni 3D printeri, 3D printanje

## **SUMMARY**

Additive technologies have begun its development and application since the second half of the 1980s. The main reason behind that was to fulfil the market demands of increased product quality, flexibility, lower costs, shorter development time and production, as well as small series and individual production. As part of additive technologies, low-budget 3D printers have been developed and are widely available now, and also allow a significant expansion of the application of additive technologies for development and production. A large number of low-budget 3D printers on the market make it difficult for the potential investor to choose from. The working principle of low-budget 3D printers, their construction, materials that they can process and the errors and problems of their technology, were all explained and described to understand further comparisons. The most common and popular low-budget 3D printers were described along with their features for mutual comparison. Two of them, the MakerBot Replicator 2X and Ultimaker Original, were chosen due to their availability for a detailed comparison. Their performances in making the referent prototypes were also compared through conducted measurements. MakerBot Replicator 2X gave better results and was chosen as a better 3D printer while the offered approach gives an example on what to pay attention when buying a low-budget 3D printer.

Key words: additive technologies, low-budget 3D printers, 3D printing

# 1. UVOD

Niskobudžetni 3D printeri su danas zbog svoje relativno niske cijene veoma dostupni svima koji su za njih zainteresirani, bilo da se radi o proizvodnim poduzećima i poduzećima čija djelatnost nije proizvodnja ili pojedincima koji imaju afinitet prema toj aditivnoj tehnologiji. S tim svojim iskorakom na tržištu i značajnim povećanjem prodaje, oni su aditivnu proizvodnju približili svima.

Počeci aditivne proizvodnje su iz druge polovice 80-ih godina prošlog stoljeća i iz nje su proizašli niskobudžetni 3D printeri. Aditivna tehnologija se može smatrati jednim značajnim iskorakom u svijetu tehnologija, a njena nagla ekspanzija primjene u svim segmentima razvoja i proizvodnje samo to potvrđuje. Danas je općenito vijek trajanja proizvoda na tržištu sve kraći kao i želja za sve većim varijantama pojedinih proizvoda i tu se aditivne tehnologije savršeno uklapaju, jer omogućuju da ono što zatreba, ili se osmisli bude realizirano i ostvareno u vrlo kratkom razdoblju.

Niskobudžetni 3D printeri su početak i prvi korak upoznavanja sa mogućnostima koje nude aditivne tehnologije i koje će biti dostupne sve više u skoroj budućnosti. Oni već pružaju velike mogućnosti printanja najrazličitijih predmeta i njihov razvoj, kao i razvoj materijala, kako bi se zadovoljio sve veći broj korisnika je neupitan. Na tržištu niskobudžetnih 3D printera se trenutno nalazi širok spektar različitih 3D printera i potencijalnom investitoru se donekle otežava izbor. Svaki niskobudžetni 3D printer posjeduje svoje značajke koje deklarira proizvođač (dimenzija uređaja, dimenzija radne komore, načelo rada, brzina printanja, debljina slojeva, materijali koji se mogu prerađivati kao i promjer materijala koji se koristi...), a svatko uvijek želi odabrati najbolje i najkvalitetnije.

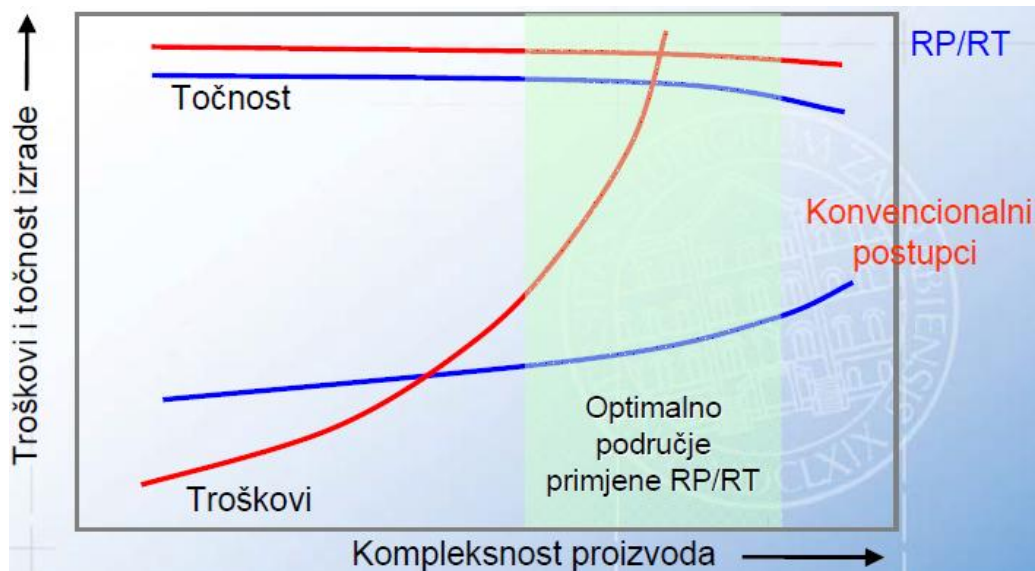
Značajke niskobudžetnog 3D printera mogu poslužiti pri odabiru, ali ono glavno su performanse uređaja, kao i kvaliteta realizacije traženih predmeta. Kako bi stekli cjelokupni uvid u niskobudžetne 3D printere, u ovom radu su objašnjene aditivne tehnologije i kojoj od njih pripadaju, kakvo je njihovo načelo rada i izvedba uređaja, koji se materijali sve mogu prerađivati te koje su greške i problemi koji ih prate. Uz pregled najpopularnijih i najprodavanijih niskobudžetnih 3D printera na tržištu sa značajkama koje ih definiraju, u praktičnom dijelu su odabrana dva uređaja koja dolaze iz grupe najpopularnijih i njihovom detaljnom usporedbom i usporedbom performansi pri izvođenju referentnih prototipova, dan je primjer za odabir niskobudžetnog 3D printera.



## 2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Brza proizvodnja prototipova (e. Rapid Prototyping, RP) počela se razvijati 1980-ih godina i tada se upotrebljavala samo za izradu prototipova. Usporedno se razvijala i brza proizvodnja kalupa odnosno alata (e. Rapid Tooling, RT), koja je zajedno s brzom proizvodnjom prototipova činila brzu proizvodnju (e. Rapid Manufacturing, RM). Od 2009. prema normi ASTM F42, rabi se izraz aditivna proizvodnja (e. Additive Manufacturing, AM). [1]

Postupcima aditivne proizvodnje mogu se izraditi dijelovi relativno komplicirane geometrije na temelju računalnog 3D modela tvorevine u relativno kratkom vremenu. Razlika takvih tvorevina u odnosu na tvorevine načinjene nekim klasičnim postupcima prerade polimera (npr. injekcijskim prešanjem ili ekstrudiranjem) je u svojstvima tvorevina (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije itd.) koja se dosta razlikuju. Visoki zahtjevi tržišta koji se orijentiraju na izradu komplicirane tvorevine u što kraćem vremenu postavili su pred aditivne postupke nove ciljeve u pogledu svojstava materijala, strojeva i računalne podrške. Tako se na slici 2.1 može vidjeti usporedba točnosti i troškova između konvencionalnih postupaka i aditivnih u ovisnosti o kompleksnosti izrade tvorevine. [1]



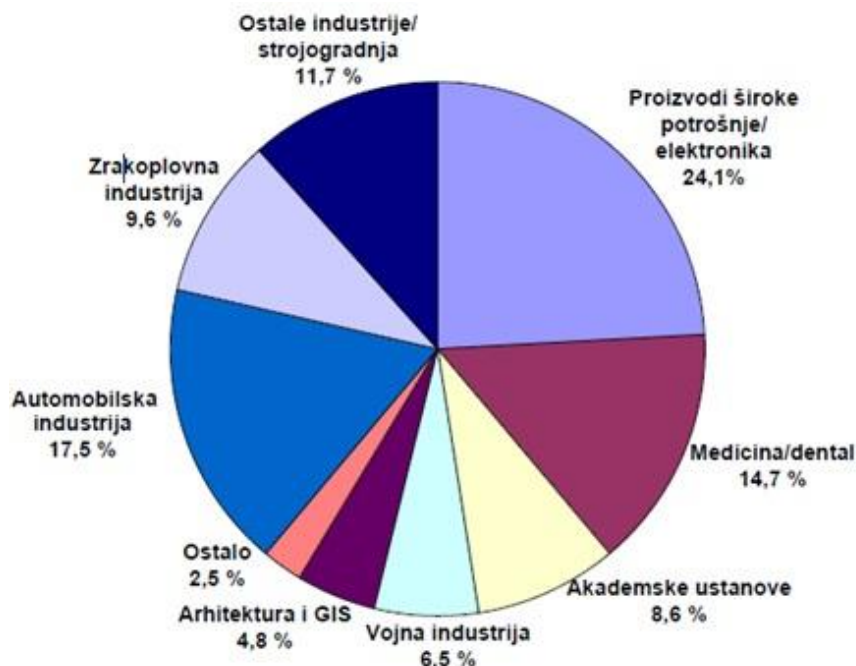
Slika 2.1 Usporedba aditivnih postupaka s konvencionalnim postupcima [2]

## 2.1 Značajke aditivne proizvodnje

Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi izrađuju tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. Glavna je prednost aditivnih postupaka to što izrađuju tvorevinu u jednom koraku, izravno iz modela. Aditivni postupci ne zahtijevaju planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad s materijalima, transport između radnih mjesta itd. Glavni nedostatak, trenutačno, je ograničenje samo na određene materijale. No kako se sami aditivni postupci sve više nastoje poboljšati, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti kao funkcionalne gotove tvorevine. [1]

Postupci aditivne proizvodnje mogu se podijeliti prema četiri glavna čimbenika: vrsti materijala za potrebnu tvorevinu, izvoru energije, postupku oblikovanja sloja i obliku gotove tvorevine. Ti čimbenici utječu na kvalitetu završne površine, dimenzijsku preciznost, mehanička svojstva, vrijeme i cijenu proizvodnje. [1]

Mnogo je područja gdje se sve koriste aditivni postupci izrade, a to su: automobilska industrija, strojogradnja, zrakoplovna industrija, vojna industrija, medicina, elektronika... Kolika je zastupljenost pojedinih područja u ukupnoj primjeni aditivnih postupak, prikazana je na slici 2.2.



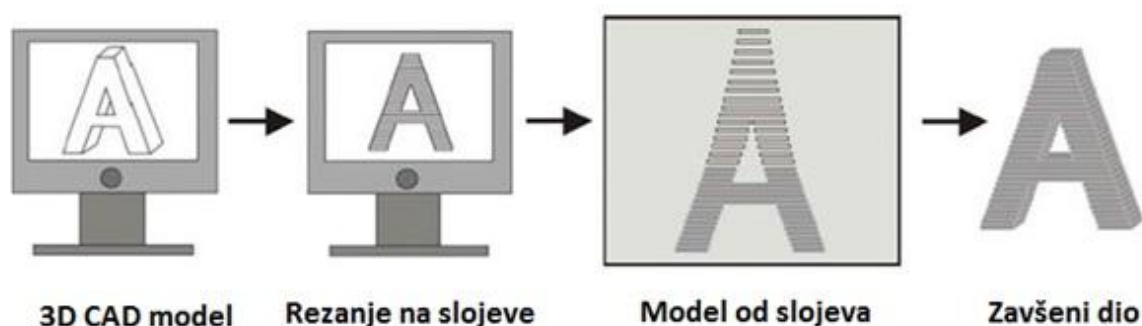
Slika 2.2 Područja primjene aditivnih postupaka u 2012. godini [4]

Aditivna proizvodnja može skratiti vrijeme i sniziti troškove potrebne da se napravi nova tvorevina od početnoga koncepta do proizvodnje. Aditivni postupci mogu pomoći u prepoznavanju osnovnih pogrešaka na tvorevinama koje su u kasnijim fazama njihove proizvodnje skupe za ispravljanje. Međutim, dijelovi nastali aditivnom proizvodnjom nisu jeftini (na njihovu cijenu utječe: vrijeme izrade, cijena potrebne opreme i poslije održavanje, rad operatera – tijekom izrade, naknadne obrade i čišćenja, cijena osnovnog materijala i cijena materijala za potpurnu strukturu). Katkad je teško odlučiti koliko tvorevina treba načiniti da se dobije maksimalna korist od njih. [1]

Polimerni materijali koji se kod aditivnih postupaka najčešće upotrebljavaju su: akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani, epoksidne smole, uz njih mogu se upotrebljavati i čelik, aluminij, titan i druge lake legure. Pri izboru materijala najvažniji su čimbenici: mehanička svojstva i pogodnost za korištenje kao završne tvorevine, jednostavnost završne obrade, niža cijena materijala i olakšano rukovanje te skladištenje materijala. [1]

## 2.2 Načelo izrade tvorevina u aditivnoj proizvodnji [1]

Načelo izrade tvorevine u aditivnoj proizvodnji temelji se na generativnom (generičkom) načelu gradnje tvorevina sloj po sloj. 3D model konstruiran računalom izreže se na dvodimenzionalne slojeve jednakih debljina, koji se slažu jedan na drugi. Tako se postiže trodimenzionalni oblik, sa stepenastim izgledom površine, upravo zbog načela slaganja sloj po sloj. Na slici 2.3 je prikazan načelo izrade i kako zbog rezanja na tanke slojeve dolazi do stepenaste površine modela.



Slika 2.3 Proces izrade sloj po sloj [5]

Načelo aditivne proizvodnje tvorevina uvijek je isti, neovisno kojim postupkom ga izvodili, a može se podijeliti u slijedeće faze izrade a to su:

1. izrada CAD modela
2. pretvaranja CAD modela u STL datoteku
3. prebacivanja STL datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju
4. podešavanja parametara stroja
5. pravljenja prototipa
6. vađenja prototipa
7. naknadne obrade, ako je potrebna
8. uporaba.

Prvi korak svih postupaka aditivne proizvodnje je izrada trodimenzionalnoga geometrijskog modela u nekom CAD programu. Takav model sprema se u različitim formatima, no već od 1987. tvrtka 3D Systems uvodi STL datoteku (e. Standard Tessellation Language), koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta. STL datoteka nema boje, pa je 2009. uvedena AMF datoteka (e. Additive Manufacturing File), koja uz STL postaje standard za postupke aditivne proizvodnje i čini osnovu za rezanje u slojeve, na čemu se temelje svi postupci aditivne proizvodnje. AMF datoteka predstavlja jedan ili više objekata raspoređenih u vektore. Svaki je objekt opisan kao skupina ne preklapljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koja povezuje skupinu točaka. Te se točke mogu podijeliti između volumena. AMF datoteka može opisati materijal i boje pojedinog volumena te boju svakog trokuta u mreži.

Nakon podešavanja parametara stroja (debljina sloja, snaga, brzina itd.) slijedi pravljenje prototipa te, nakon završetka zadnjeg sloja, vađenje gotovog prototipa. Prilikom vađenja treba paziti da je temperatura u radnom prostoru stroja dovoljno niska za sigurno rukovanje tvorevinama. U nekim postupcima (npr. stereolitografija) potrebno je naknadno umrežavanje da bi se završio proces polimerizacije i poboljšala mehanička svojstva, jer unutarnji dijelovi slojeva možda nisu potpuno očvrtnuti. Slijedi naknadna obrada (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, bojenje itd.).

### 2.3 Brza proizvodnja prototipova (e. Rapid Prototyping, RP)

Brza proizvodnja prototipova (RP) označava postupke s pomoću kojih se izrađuju trodimenzionalni prototipovi izravno iz CAD podataka. Koristi se kao sredstvo za vizualizaciju, predmeti se mogu koristiti za različita testiranja ili kao modeli za oblikovanje alata odnosno kalupa, a ponekada se mogu koristiti kao završni dijelovi ako ispunjavaju sva tražena svojstva. U slučaju proizvodnja jednog ili manje serije proizvoda postupcima RP-a tada je riječ o brzom (izravnoj) proizvodnji. [2,3]

Razlozi zašto koristiti brzu izradu prototipova: [3]

- povećanje učinkovitosti veze između razvoja i proizvodnje
- smanjenje vremena razvoja
- smanjenje skupih pogrešaka
- smanjenje potrebe održavanja
- produljenje vijeka trajanja proizvoda dodavanjem potrebnih značajki i uklanjanjem suvišnih značajki u ranoj fazi konstruiranja.

RP smanjuje vrijeme razvoja proizvoda dopuštajući korekcije na proizvodu u ranoj fazi njegovog razvoja. Omogućuje inženjerski, proizvodni i marketinški pogled, kao i pogled kupca na proizvod u ranoj fazi njegovog razvoja, gdje se greške mogu ispravljati dok još nisu preskupe. Trendovi u proizvodnji pokazuju:

- povećanje broja varijanti proizvoda
- sve veća složenost proizvoda
- smanjenje vremena trajanja proizvoda
- sve manje vrijeme isporuke proizvoda.

U svemu tome RP značajno može doprinijeti, jer generalno poboljšava razvoj proizvoda i omogućuje bolju komunikaciju između različitih inženjerskih okruženja. [3]

Niskobudžetni 3D printeri se koriste upravo za brzu izradu prototipova, oni predstavljaju najpovoljniju varijantu izrade različitih prototipova, uz solidnu kvalitetu. Omogućuju vizualizaciju, korištenje modela za neka ispitivanja ili ako mogu ispuniti tražena svojstva da budu primijenjeni kao gotovi dijelovi. Također predstavljaju i mogućnost stjecanja iskustva u radu i upoznavanju s RP postupcima općenito, zbog svoje široke dostupnosti i povoljnosti oni su početak učenja o aditivnoj proizvodnji.

## 2.4 Postupci brze proizvodnje prototipova (RP postupci)

Najvažniji postupci brze izrade prototipova su: [2]

- 1) stereolitografija (e. Stereolithography) – SLA, SL
- 2) selektivno lasersko srašćivanje (e. Selective Laser Sintering) - SLS
- 3) taložno srašćivanje (e. Fused Deposition Modeling) – FDM
- 4) laminiranje (e. Laminated Object Manufacturing) – LOM
- 5) 3D tiskanje (e. 3D Printing) – 3DP
- 6) PolyJet postupak (e. PolyJet)
- 7) očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. Digital Light Processing) – DLP

Postupci brze proizvodnje prototipova mogu se općenito podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevinu i prah. Neki od važnijih postupaka kod kojih se rabi čvrsti materijal su taložno očvršćivanje (e. Fused Deposition Modeling, FDM) i proizvodnja laminiranih objekata (e. Laminated Object Manufacturing, LOM), postupci koji upotrebljavaju kapljevite materijale su stereolitografija (e. Stereolithography, SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. Digital Light Processing, DLP) i PolyJet, dok su postupci koji rabe prah selektivno lasersko srašćivanje (e. Selective Laser Sintering, SLS) i 3D tiskanje (e. 3D Printing, 3DP). [1]

U ovome radu riječ je o niskobudžetnim 3D printerima, oni svoje tvorevine izrađuju postupkom taložnog srašćivanja (FDM), te će taj postupak biti detaljno opisan i prikazao načelo rada te potrebne komponente za uspješnu izradu tvorevina.

### **3. NISKOBUDŽETNI 3D PRINTER**

Niskobudžetni 3D printeri, kao dio aditivne proizvodnje, zbog svojih mogućnosti i stalnim razvojem u posljednje vrijeme sve su više dostupni na tržištu. Treba napomenuti kako su to relativno povoljni strojevi, koje si čovjek lako može priuštiti, bilo da želi učiti o njima, istraživati ili printati predmete za nekakvu primjenu, vlastite potrebe ili zabavu. Slijedi predstavljanje tehnologije tiskanja niskobudžetnim 3D printerom, njegovo načelo rada, kako izgleda i od čega se sastoji jedan niskobudžetni 3D printer, od kakvih materijala se mogu izrađivati predmeti, te koji se problemi mogu pojaviti.

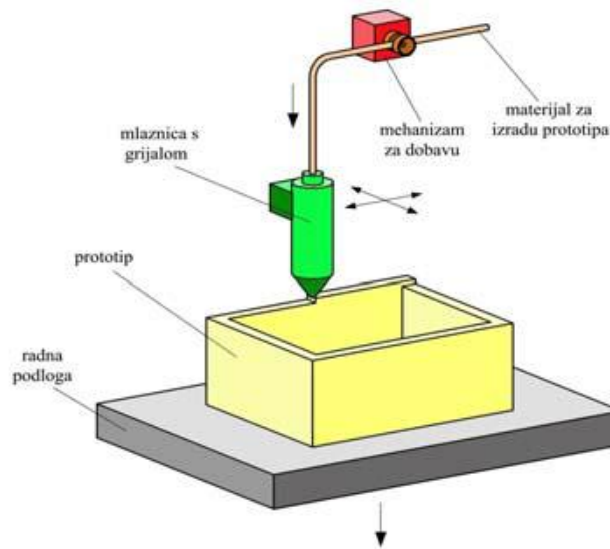
#### **3.1 Načelo rada [6]**

Niskobudžetni 3D printeri predmete izrađuju postupkom taložnog srašćivanja (e. Fused Deposition Modeling - FDM). FDM se slikovito može shvatiti kao crtanje s vrlo preciznim vrućim pištoljem. Načelo rada je da se rastaljen materijal kontinuirano istiskuje kroz mlaznicu i u vertikalnom smjeru slaže sloj po sloj.

Kao i za sve procese aditivne proizvodnje, tako je i za FDM prvo potreban CAD model prebačen u STL datoteku. Za niskobudžetne 3D printere ta se datoteka učitava u prilagođeni softver instaliran na računalu, koji određuje putanju gibanja ekstrudera prilikom slaganja slojeva za izradu tvorevine. Generiranje putanje i načina printanja rezultira posebnom datotekom koja se prenosi procesoru printera izravnom vezom s računalom ili putem SD memorijske kartice, a njenim pokretanjem nastaje 3D tiskani predmet. Neki printeri imaju dva ili više ekstrudera koji mogu tiskati više različitih boja istog materijala ili različite materijale, gdje neki služe samo kao potporne strukture. Istovremeno ne može raditi više ekstrudera već samo jedan.

Materijal za printanje se stalno dovodi u mlaznicu pomoću motora i mehanizma za dobavu, a mlaznica u sebi sadrži grijače čija se temperatura kreće između 170 - 240 °C , ovisno o vrsti materijala koji se koristi. Grijači omogućuju da se materijal grije do temperature na kojoj se topi, a po izlasku iz mlaznice rastaljeni materijal se slaže i lijepi na podlogu ili prethodno isprintani sloj te se ohladi i stvrdne. Ovisno o izvedbi uređaja može biti da se glava ekstrudera pomiče lijevo-desno, naprijed-nazad (smjer x i y) ili da se podloga tako giba. Po završetku jednog sloja slijedi vertikalno gibanje u z-smjer. To je kontinuirani proces, sloj po sloj od dna

prema vrhu, koji traje sve dok ne nastane traženi predmet. Na slici 3.1 je shematski prikaz FDM postupka i načela rada niskobudžetnih 3D printera.



Slika 3.1 Načelo rada niskobudžetnih 3D printera (FDM) [2]

Kvaliteta 3D tiskanih predmeta ovisi o visini sloja, ako se radi s tanjim slojevima, prijelazi između slojeva su slabije uočljivi, stepeničasta struktura manje dolazi do izražaja a predmeti imaju finiju površinu. Debljina jednog sloja najčešće se kreće u vrijednosti između 75 mikrometara, što je nešto tanje od lista papira.

Materijal za printanje (e. filament) je u obliku plastičnog vlakna, žice i namotan na kolut. U upotrebi su najčešće plastomeri ili mješavine plastomera i organskih materijala. Najzastupljeniji polimerni materijali su ABS i PLA, a iza njih PC, PA, uz još neke poput PVA i PS-HI. Materijali za FDM su poprilično jeftini u usporedbi s ostalim aditivnim postupcima, a provode se mnoga istraživanja i razvoj novih materijala.

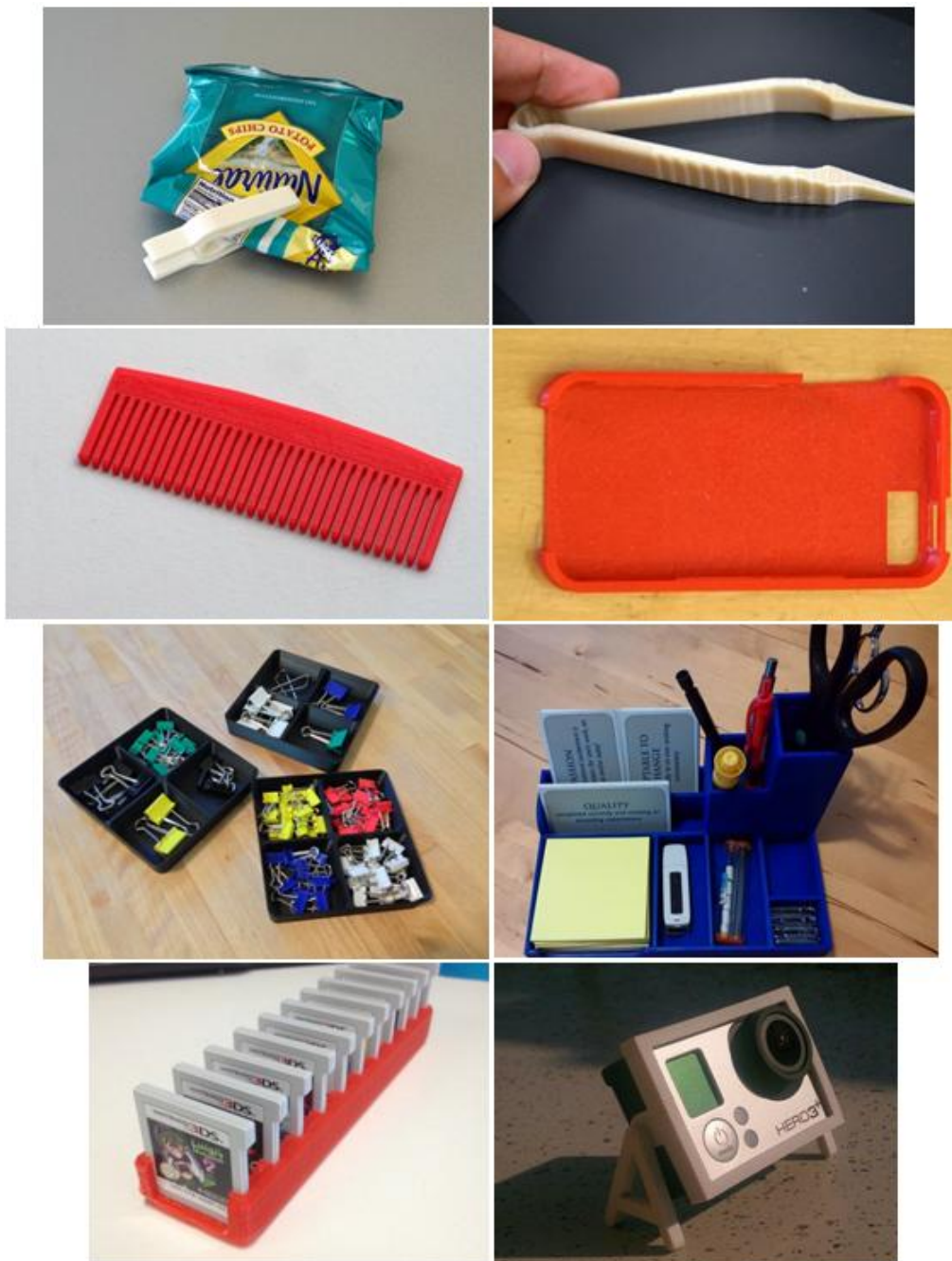
Kod niskobudžetnih 3D printera materijal može imati dvije uloge, kao glavni materijal od kojeg se radi predmet ili kao pomoćni za potporne strukture. Iako se ovim postupkom mogu izraditi različiti predmeti, potrebno je voditi računa kako je orijentiran predmet za izradu na podlozi jer ponekad oštri kutovi ili izbačeni elementi se neće moći isprintati.

Ako se printaju predmeti s pomoćnim materijalima, potrebno ih je po završetku odstraniti na način da se odlome ili otope u nekoj otopini, ovisno o materijalu. Naknadna obrada značajno može poboljšati kvalitetu površine čak i kod predmeta isprintanih s debljim slojevima gdje je veća izraženost slojevitosti. Brušenje je čest način kojim se dobivaju fine površine isprintanih predmeta. Ponekada brušenje može trajati dugo i biti zahtjevno ili ne izvedivo na nekim



površinama zbog kompleksnosti predmeta. Za neke materijale brušenje nije učinkovito i jedna je od mogućnosti acetona. Grijanjem acetona, u kojem se nalazi predmet, on isparava i zaglađuje površine smanjujući izraženost slojeva i dajući sjaj predmetu.

Niskobudžetni 3D printeri se mogu koristiti u fazama razvoja proizvoda, za izradu prototipova ili čak za proizvodnju nekih dijelova. Riječ je o tehnologiji koja ima još prostora za razvoj i napredak. Neki zanimljivi primjeri 3D tiskanja su na slici 3.2, poput štipaljke, pincete, češlja za kosu, maske za mobitel iPhone 5S, posude za uredske stvari, stalak za fotoaparata i držač igrice Nintendo 3DS konzole.



Slika 3.2 Primjeri 3D tiskanih predmeta [7]

## 3.2 Izvedba niskobudžetnih 3D printera

Ovisno o proizvođaču, postoje različite izvedbe niskobudžetni 3D printera. Svi posjeduju osnovne komponente bez kojih rad uređaja ne bi bio moguć. Tu spadaju mlaznica koja ekstrudira materijal, mehanizam za dostavu materijala, radna podloga, vrsta pogona s prijenosom gibanja i elektromotorima, elektroničke komponente te kućište uređaja odnosno njegov okvir.

### 3.2.1 Ekstruder (mlaznica)

Ekstruder 3D printera je glavni funkcionalni element printera. Materijal se dovodi do ekstrudera, koji u sebi sadrži grijač preko kojega se rastali materijal te izlazi kroz mlaznicu umjerenom brzinom. Materijal dolazi na podlogu na koju se lijepi i hladi, te sloj po sloj nastane predmet. [8]

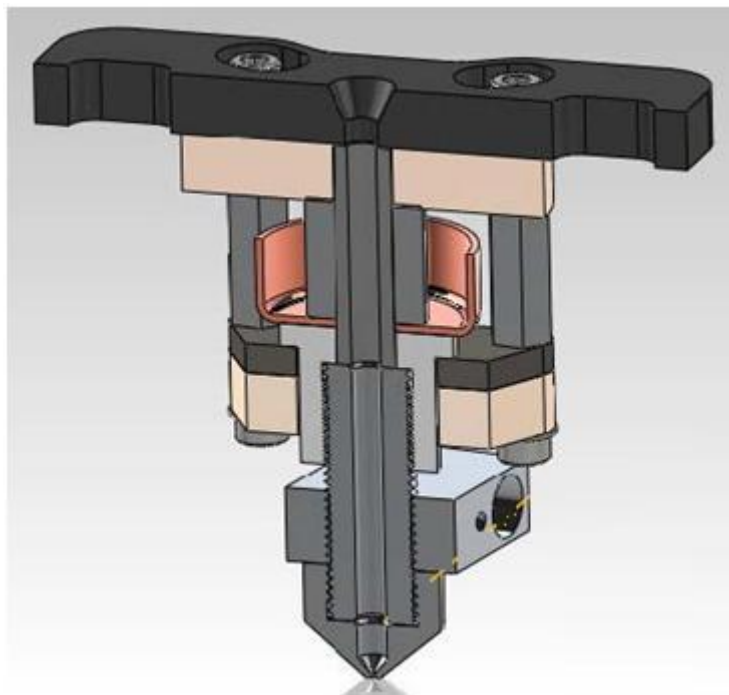
Može se smatrati kako se svaki ekstruder sastoji od dva dijela, hladnog dijela i grijaćeg dijela. Hladni dio čini veći dio ekstrudera, i on obično omogućuje gibanje i nosi ostatak dijelova. Ovisno o izvedbi dio njega može biti i mehanizam za dostavu materijala s elektromotorom. Glavni zadatak mu je da pruži nekakav oblik hlađenja i da se ne zagrijava kako se toplina ne bi dalje širila. Kako je u blizini grijanog dijela i često u zatvorenom prostoru s grijanom podlogom, ponekada je potreban nekakav oblik aktivnog ili pasivnog hlađenja, poput ventilatora ili hladnjaka. Na slici 3.3 je prikaz izgleda jednog tipičnog ekstrudera. [8]



Slika 3.3 Ekstruder [9]

Hladni i grijaći dio su povezani preko toplinskog mosta ili izolatora. Ta veza mora biti čvrsta i precizna, a prolaznost materijala pouzdana i bez velikoga prijenosa topline. To je najčešće cjevčica kroz koju materijal prolazi, a načinjena je od: PEEK-a s PTFE košuljicom izvana, PTFE-a s mehaničkom potporom od nehrđajućeg čelika ili kombinacija svega navedenoga. Na nju se veže grijaći dio putem utora ili navoja. [8]

Grijaći dio je aktivni dio 3D printera koji tali materijal. Rastaljeni materijal napušta mlaznicu i slaže se po podlozi. Grijaći dio je najčešće napravljen od bakra, a može biti i aluminijski, stakleni. Sastoji se od zone za taljenje i komore s dvije rupe. Kroz jednu rupu dolazi materijal koji se grije u zoni taljenja, a nakon toga izlazi kroz drugu rupu, koja je zapravo mlaznica. Promjer izlaza mlaznice je od 0,3 mm do 1,0 mm, a najčešće oko 0,4 mm. Toplina u grijaći dio dolazi preko žice ili standardnog otpornika. Za razvoj temperatura od 150 - 250 °C potrebno je oko 20 W snage. Za povratnu informaciju i kontrolu temperature koriste se temperaturno ovisni otpornici, termistori, koji su u blizini mlaznice. Na slici 3.4 je presjek ekstrudera, a kao takvi ekstruderi se montiraju na ostatak uređaja za 3D pritanje. [8]



Slika 3.4 Presjek ekstrudera [10]

### 3.2.2 Mehanizam za dostavu materijala

Materijal (e. filament), u obliku plastične niti ili žice, standardnog je promjera 1,75 mm ili 3 mm. Kod niskobudžetnih 3D printera nalazi se namotan na kolutu s kojeg se polako odmotava i dovodi putem mehanizma za dostavu materijala do mjesta gdje se grije, tali i na kraju izlazi kroz mlaznicu. Na slici 3.5 je prikaz izgleda standardnog koluta s materijalom koji se koristi kod niskobudžetnih 3D printera.



Slika 3.5 Materijal namotan na kolutu [11]

S obzirom na to gdje se nalazi motor koji pokreće mehanizam za dostavu materijala postoje dva načina dostave materijala: [12]

1. Mehanizam kao dio ekstrudera: motor i mehanizam su dio hladnog dijela ekstrudera i nalaze se neposredno prije grijaćeg dijela. Ovo olakšava potiskivanje krutih i krhkih materijala, ali je mehanizam dio ekstrudera, što povećava njegovu težinu (slika 3.6 a).
2. Zasebni mehanizam za dostavu materijala: motor i mehanizam se nalaze na položaju udaljenom od ekstrudera i potiskuju materijala kroz savitljivu cijev. Ovako se smanjuje težina ekstrudera koji se mora pomicati, ali se vrlo kruti materijali neće moći printati, te su potrebni skuplji i jači motori, kao i jači prijenos (slika 3.6 b).



a)

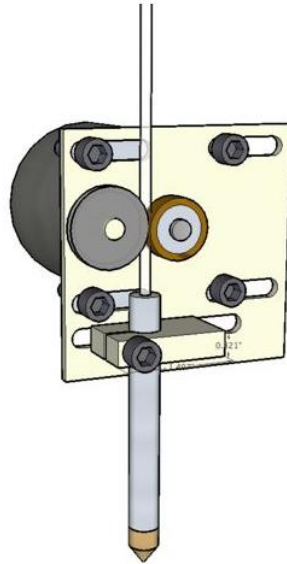


b)

Slika 3.6 Mehanizmi ovisno o položaju motora [13,14]

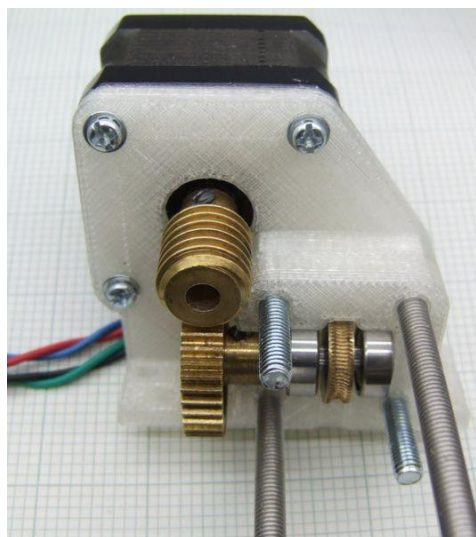
Najčešći mehanizmi dostave materijala do grijaćeg dijela su mehanizam kotača i pužni prijenosnik. Postoji i mehanizam izravnog upravljanja, ali on se baš i ne primjenjuje, zbog svojih nedostataka i puno je lošiji od prethodna dva. [12]

1.) Mehanizam kotača: na osi motora se nalazi žljeb ili jako mali zupčanik koji čvrsto drži materijal. Primarna prednost ovoga mehanizma je njegova jednostavnost, ali zahtijeva da se motor okreće sporo i da moment motora izravno djeluje na materijal (slika 3.7). [12]



Slika 3.7 Mehanizam kotača [12]

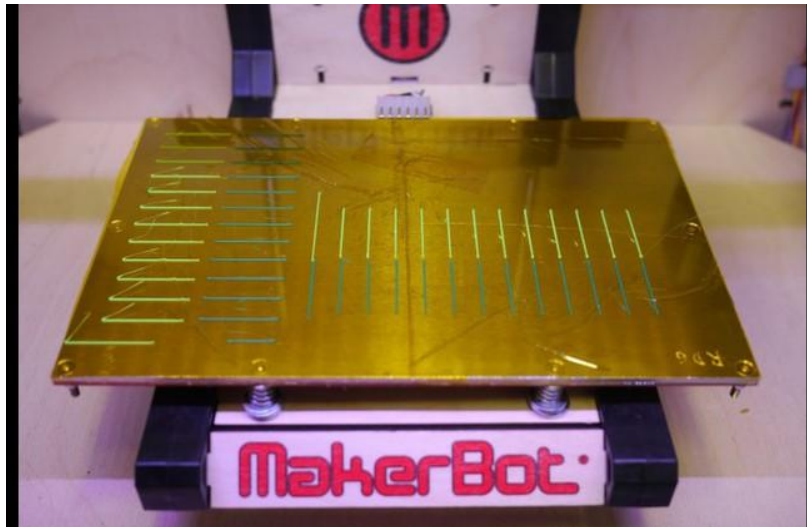
2.) Pužni prijenosnik: nadilazi većinu nedostataka mehanizma kotača, zbog načina prijenosa motor se može okretati većim brzinom, a potreban je manji okretni moment. Nedostatak ovoga mehanizma je da zahtijeva više određenih dijelova za ostvarivanje (slika 3.8). [12]



Slika 3.8 Mehanizam pužnog prijenosnika [12]

### 3.2.3 Radna podloga

Radna podloga je podloga na koju dolazi materijal iz mlaznice tijekom printanja i na njoj nastaje predmet. Njom su definirane dimenzije predmeta koji može nastati 3D tiskanjem. Uglavnom je zagrijana na određenu temperaturu, koja je niža od temperature grijanja materijala. Ponekada se koristi i ne zagrijana, a tada je riječ o posebnim materijalima. Podloga se nalazi prikazana na slici 3.9.



Slika 3.9 Podloga niskobudžetnog 3D printera [15]

Grijana podloga se koristi zato što značajno poboljšava kvalitetu printanja, tako što sprječava savijanje predmeta dok se materijal hladi, na način da ga drži i nakon izlaska iz mlaznice lagano ugrijanim. Kada se ekstrudirani materijal hladi malo se skuplja, a ako se to ne događa ravnomjerno kroz cijeli predmet dolazi do savijanja. Savijanje se očituje kroz podignute rubove što uzrokuje deformacije 3D tiskanog predmeta. S grijanom podlogom se održava temperatura predmetu do završetka procesa, te osigurava hlađenje i skupljanje cijelog predmeta istovremeno pa ne dolazi do savijanja i podizanja rubova. Za najčešće materijale u uporabi, ABS i PLA, preporučene temperature grijane podloge su; ABS: 100 - 100 °C , a PLA: 50 - 60 °C. [16, 17]

Kako je podloga zagrijana, treba biti toplinski izolirana od postolja na koje se montira, a to se postiže s pomoću izolacijskih materijala poput kartona, vune, pamučne tkanine, drveta. Za dovođenje topline na podlogu potrebna je struja jakosti 6 A (12 V i 2  $\Omega$ ) i zatvaranje strujnog kruga s podlogom, koja predstavlja otpornik i zagrijava se. Povratna informacija se ostvaruje s temperaturno ovisnim otpornikom, temperaturnim senzorom i omogućuje kontrolu temperature podloge. [16]

Podloga se sastoji od dva dijela: grijane ploče od nekog električno vodljivog materijala i površinskog materijala ili površinske ploče koja se na nju stavlja. Grijana ploča je najčešće od metalnog materijala, zbog dobre toplinske vodljivosti, toplina se kroz metal širi ravnomjerno. Najčešće se radi o aluminiju koji se vrlo brzo grije i hladi, za razliku od bakra ili čelika kojima treba znatno više vremena. Na slici 3.9 je aluminijska podloga preko koje je nanosena poliamidna traka. [16]

Površinski materijal podloge ima ulogu da pokrije grijaću ploču i da se na njega nanosi ekstrudirani materijal, koji puno bolje prianja na tu površinu. Rješenja koja se primjenjuju su sljedeća: [16]

- Poliamidna traka: rastaljena plastika jako dobro prianja na nju, a po završetku hlađenja lako se i skida s nje, bez oštećenja podloge ili predmeta.
- Plava vinil traka: jeftinija varijanta poliamidne trake, njena površina s malo voska omogućuje rastaljenoj plastici dobro prianjanje, ali ohlađen predmet se teže skida s podloge što može dovesti do oštećenja.
- Čiste površinske ploče od bakra, aluminijske ili stakla: na njima se ipak zbog prianjanja preporuča nanijeti malo laka za kosu ili nekog sličnog sredstva.
- Ljepila i premazi: različite vrste ljepila i ljepljivih premaza se nanose na površinu radi boljeg prianjanja.

### ***3.2.4 Pogon (prijenos gibanja, elektromotori)***

Pogon je skupni naziv za sve mehanizme i mehaničke sustave kojima se mehaničko kretanje motora pretvara u precizno linearno gibanje. Glavni pokretač je električna energija, a pogon može pokretati samo ekstruder, samo radnu podlogu ili oboje. Generalno, električni motor rotira i ta rotacija se koristi izravno za pokretanje ili se pretvara u linearno gibanje. Najčešći slučaj kod niskobudžetnih 3D printera je da se podloga giba vertikalno (z-smjer), a ekstruder u smjeru x i y.

#### ***3.2.4.1 Prijenosi gibanja***

1.) Remenski prijenos gibanja: ovaj prijenos je najviše u uporabi kod niskobudžetnih 3D printera, a sastoji se od nazubljene remenice koja se veže za pokretni dio. Na vratilu motora se nalazi odgovarajući zupčanik, te rotacijom motora rotira i zupčanik koji pokreće remen u

smjeru u kojem treba ići. Prednosti ovog prijenosa su: jeftinija varijanta projektiranja i realizacije, pogodnija za veće duljine pomicanja, nisko održavanje (nema potrebe za podmazivanjem), kompaktan dizajn i jednostavna integracija u cjelinu. Jedini rizik je da se remenice mogu istegnute tijekom vremena zbog gumenog materijala, što dovodi do poteškoća postizanja uskih tolerancija. Zbog ovoga treba paziti da brzina i ubrzanje ne preoptereće remenicu. [18]

2. Prijenos preko vretena: ovaj način prijenosa je precizniji i bolji, a u ovome slučaju je vreteno izravno povezano s motorom. Kako se motor okreće, matica vezana za vreteno i kruto fiksirana za pokretni dio, giba se prema ili od motora, ovisno o smjeru rotacije. Dva osnovna vretena koja se koriste su navojno vreteno i kuglično vreteno: [18]

- Navojno vreteno: vrlo jeftina vrsta prijenosa. Neefikasan je jer posjeduje samokočnost. Ovo znači da postoje situacije gdje se troši snaga, a pokretni dio se ne pomiče. Prednost mu je veličina, te može podnijeti puno veću aksijalnu silu u odnosu na remenski prienos zbog mehaničkih prednosti navojnog vretena u odnosu na zupčanik. Nedostaci su mu rizik nepravilnog poravnanja i montiranja, te trošenje na površini vretena i matice što izaziva klimavost. [18]
- Kuglično vreteno: slično je navojnom vretenu, samo što mu je u maticu integriran kuglični ležaj što značajno povećava efikasnost i smanjuje potrošnju snage. Mnogo je robusniji jer nema klizajuće elemente koji zahtijevaju povremeno podmazivanje, te je i otporniji na udarce. [18]

3. Linearni motori: ovaj dizajn eliminira potrebu za mehaničkim pogonom i izravno povezuje motor s pokretnim dijelom. Koriste se posebno oblikovani servo-motori s puno većim brzinama odziva i bez mehaničkih ograničenja poput trošenja. Rezultira boljim i preciznijim rezultatima printanja. Najveći nedostatak ovog prijenosa je cijena zbog koje je vrlo rijetko u uporabi. [18]

#### *3.2.4.2 Elektromotori*

Motori koji pokreću sve vrste prijenosa kod niskobudžetnih 3D printera su električni koračni motori. To su motori koji poznati interval prelaze u koracima, a svaki korak predstavlja jedan impuls snage. Za svaki korak motora se zna koliku udaljenost on predstavlja, što omogućuje ponovljivost pozicioniranja. Najvažnije njihove karakteristike su: držeći moment, napon, promjer vratila, kut koraka i duljina motora. Standardni koračni motori koji se koriste su



NEMA 14 i NEMA 17, a oznake predstavljaju dimenzije njihovog kvadratnog presjeka te su prikazani na slici 3.10. [19]

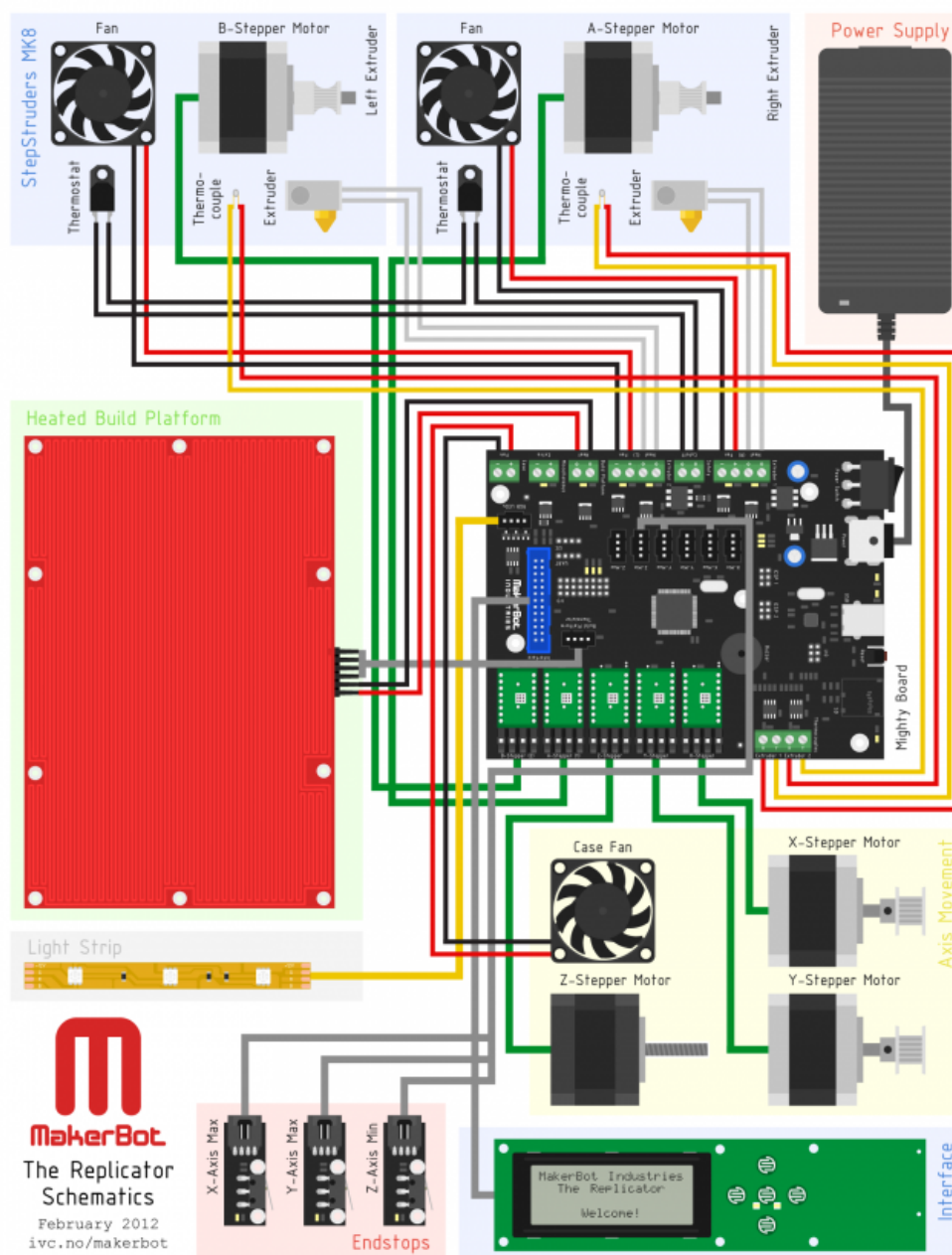


Slika 3.10 NEMA 14 i NEMA 17 [20,21]

### ***3.2.5 Elektronika***

Elektronika je onaj dio uređaja koji omogućuje njegov kontinuirani rad kada mu se dovodi električna energija. Elektronika svakog uređaja se sastoji od elektroničkih elemenata koji to omogućavaju. Elektronika niskobudžetnih 3D printera se sastoji od: napajanja, matične ploče s driverima za elektromotore, mikroprekidača, grijača, termistora odnosno temperturno ovisnih otpornika za mjerenje temperature, ventilatora i već spomenutih elektromotora, a svi elementi su povezani žicom.

Napajanje je element koji osigurava električnu energiju svim komponentama, ono pretvara izmjeničnu struju mreže u istosmjernu tažene jakosti struje i napona. Matična ploča je temelj elektronike, napajanje se povezuje na nju, a ona dalje koordinira svim ostalim elementima. U memoriji matične ploče se nalaze podatci koje procesira njen procesor i tako upravlja svim elementima. Također na ploču su postavljeni i driveri elektromotora s čipovima koji procesuirane podatke prilagođavaju i dalje šalju signale za rad elektromotora. Grijači mlaznica i grijana podloga su također povezani s pločom, koja im osigurava struju za postizanje željenih temperatura. Mikroprekidači svoje signale, koji nastaju po dolasku u određeni položaj, šalju kao povratnu informaciju matičnoj ploči, a povratna informaciju ploči šalju i termistori za mjerenje temperature koji pokazuju odstupanje od zadane vrijednosti. Tu je još i ventilator kojemu se dovodi potrebna struja za rad, kao i zaslon s upravljačkim tipkama. Na slici 3.11 se može vidjeti izgled sheme elektronike niskobudžetnog 3D printera.

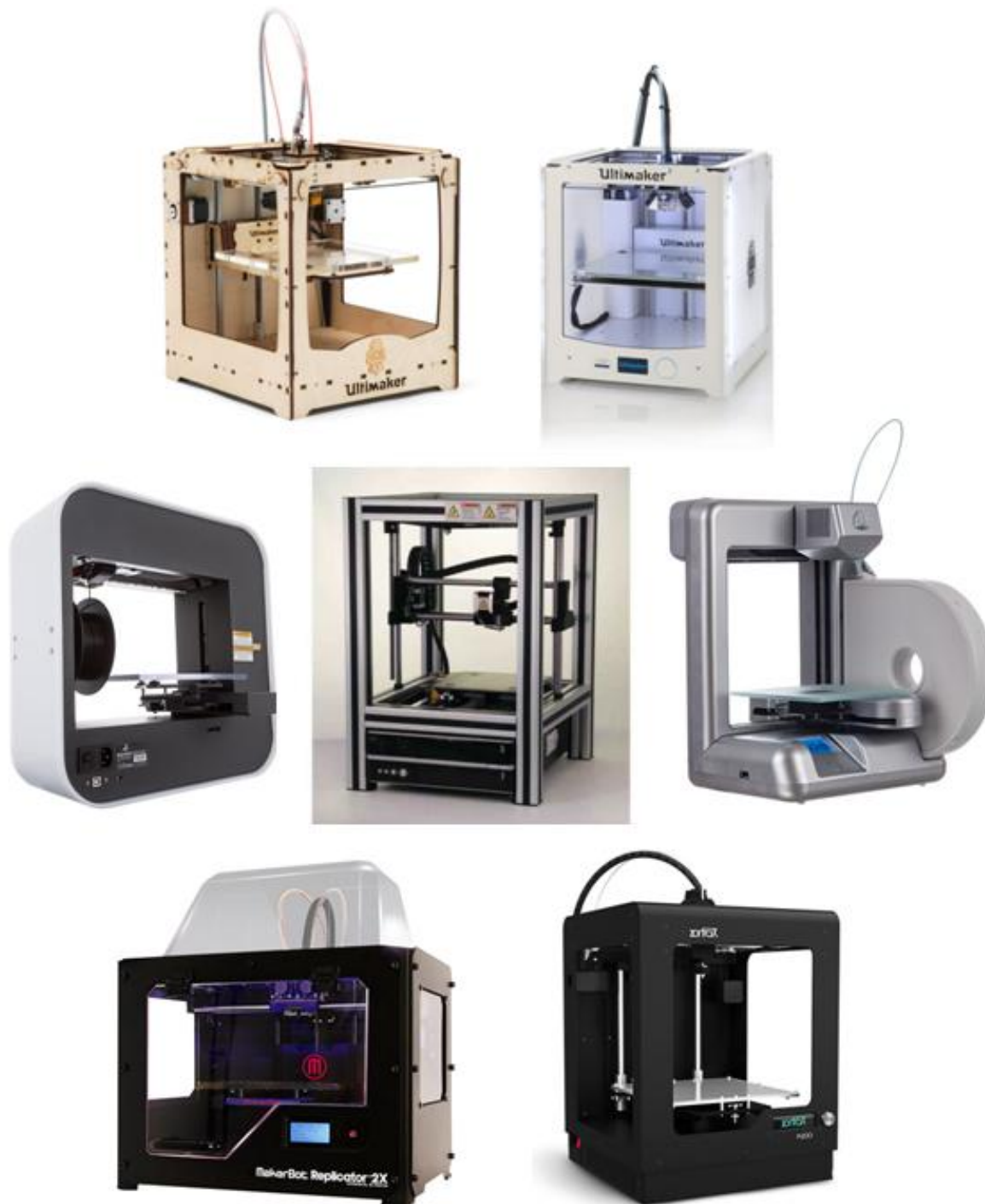


Slika 3.11 Elektronika niskobudžetnih 3D printera [22]

### 3.2.6 Kućište (okvir)

Kućište niskobudžetnih 3D printera definira oblik uređaja i predstavlja njegov vizualni identitet. Unutar njega ili na njega se slažu sve komponente 3D printera. Različite su izvedbe kućišta, ovisno o proizvođaču, kao i materijali koji se koriste. Može biti zatvoreno kućište ili otvoreni okvir. Kada je zatvoreno omogućuje bolje čuvanje topline prilikom rada, što pogoduje boljoj kvaliteti tiskanja predmeta. Za kućište, odnosno okvir koristi se širok spektar

materijala: čelik, aluminij, staklo, plastika, drvo itd., a oni mogu biti u obliku ploča, limova, šipki, nosača, kao i različitih dodatnih elemenata. Mogućnosti su raznovrsne, a na proizvođaču je da odabere vizualni identitet svog 3D printera kojim osvaja tržište, jer i izgled ima značajnu ulogu kod kupaca unatoč tehničkim karakteristikama. Na slici 3.12 se mogu vidjeti različite vrste niskobudžetnih 3D printera, kao i različite izvedbe njihovih kućišta.



Slika 3.12 Različiti oblici niskobudžetnih 3D printera i njihovih kućišta [23]

### **3.3 Materijali za 3D ispis niskobudžetnih 3D printera**

Mnogo je različitih materijala koji se mogu koristiti za niskobudžetne printere. Uglavnom se radi o polimernim materijalima, ali zbog sve većih zahtjeva tržišta posljednja istraživanja i razvoj dovode do nekih novih i drugačijih materijala poput keramike, različitih kompozita drva i plastike, nekih lakih metala i legura, te hranjivih materijala.

Dva osnovna polimerna materijala koja prevladavaju i čine većinu potrošnog materijala niskobudžetnih 3D printera su akrilonitril butadien stiren (ABS) i polilaktid (PLA) i svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke. Tu su još i neki ostali materijali koji se koriste, ali nisu toliko zastupljeni kao ABS i PLA.

#### ***3.3.1 Akrilonitril butadien stiren (ABS)***

ABS je amorfni polimer koji nastaje polimerizacijom emulzije ili mase akrilonitrila i stirena u prisustvu polibutadiena. Najvažnija svojstva ABS-a su otpornost na udar i tvrdoća. Stiren monomer daje ABS-u dobru mogućnost prerade, akrilonitril mu daje krutost, otpornost na toplinu i kemikalije, dok butadien čini proizvod tvrdim i otpornijim čak i pri niskim temperaturama. Promjene u proporcijama komponenata ABS-a i dodavanje pojedinih aditiva može dovesti do različitih tipova sa specifičnim svojstvima. ABS ima slabu otpornost na vremenske uvjete pa se stoga preporučuje samo za primjenu u enterijeru, a može se koristiti u temperaturnom opsegu između -20 °C i +80 °C. [24]

Može se prerađivati procesima injekcijskog prešanja ili ekstrudiranja, a koristi se za mnoge različite primjene: proizvodnja cijevi, dijelovi automobila, elektroničkih sklopova, telefoni, zaštitnih kaciga, kućišta kuhinjskih aparata, glazbenih instrumenata, igračke, posebno najpoznatije LEGO kockice. [24, 25]

ABS je najzastupljeniji materijal niskobudžetnih 3D printera. Uz dosada nabrojane karakteristike od značaja je i njegova cijena, njegova pogodnost primjene u različite svrhe, kao i jednostavna završna obrada brušenjem, radi postizanja glatkih površina i uklanjanja nazubljenih rubova i bojanje. Ako je potrebno sastavljanje isprintanih ili puknutih dijelova, ABS se vrlo lako lijepi ABS ljepilom koje je i vrlo lako otopivo s acetonom. Materijal za printanje može biti u različitim bojama (bijela, crna, crvena, plava, žuta, zelena, prozirna,

svjetleća u mraku...) mat izgleda. Na slici 3.13 je primjer predmeta nastalih 3D tiskanjem od ABS-a. [25]



Slika 3.13 Predmeti od ABS-a [26]

Nedostatci ABS-a su da nastaje na bazi nafte koja nije biorazgradiva, ali se može reciklirati. Također, ABS prilikom printanja stvara blagi dim koji može smetati osjetljivijim osobama, pa treba voditi računa da je prilikom printanja dobra ventilacija prostora, a ako je predugo izložen suncu svojstva mu se mogu pogoršati. [25]

Niskobudžetni 3D printeri koji rade s ABS-om moraju ga zagrijati na temperaturu od 210 - 250 °C, kako bi ga rastalili. Isto tako kada se koristi ABS potrebno je imati zagrijanu podlogu kako ne bi dolazilo do savijanja i pucanja tiskanog predmeta. Temperatura podloge za ABS bi trebala biti ~100 °C. U tablici 3.1 se nalaze karakteristike ABS-a za 3D ispis. [25, 27]

Tablica 3.1 Karakteristike ABS-a za 3D ispis [27]

MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
ABS	210 - 250 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• temperatura podloge ~100 °C, nakon prvih par slojeva preporuča se malo smanjivanje</li> <li>• dobro prianja na podlogu poliamidne trake (Kapton), PET trake, plave vinil trake.</li> <li>• prianja dobro ako se na čistu podlogu nanese jaki lak za kosu</li> <li>• dobro prianjanje ako se na podlogu nanese smjesa čestica ABS-a otopljenih u acetonu</li> </ul>

### 3.3.2 Polilaktid (PLA)

PLA je biorazgradivi plastomer koji se dobiva iz obnovljivih izvora, kao što su kukuruzni škrob, šećerna trska, korijen tapioke ili čak krumpirov škrob. Zbog toga je ekološki najprihvatljiviji materijal za 3D printanje u usporedbi sa svim ostalim polimernim materijalima na bazi nafte, poput ABS-a. [25]

Svoju primjenu PLA nalazi u medicini kod šavova, kao i kirurških implantata zbog svoje sposobnosti da se razgradi u mliječne kiseline u organizmu koje su bezopasne. Kirurški vijci, igle, šipke ili mrežice jednostavno nestanu u tijelu nakon šest mjeseci do dvije godine. Koristi se kao ambalaža prehrambenih proizvoda, za vrećice, jednokratno posuđe, presvlake, jednokratnu odjeću, higijenske proizvode. PLA se smatra poprilično sigurnim materijalom. Napomena za one koji bi mogli printati predmete od PLA, poput čaša za piće ili drugog pribora za hranu ili piće, treba voditi računa kako često puta boja PLA materijala nije bezopasna kao i sami materijal. [25]

PLA kao materijal za 3D printanje je vrlo popularan, na drugom mjestu iza ABS-a. Razlog tome je njegova niska toksičnost i ekološka prihvatljivost u odnosu na ostale. Općenito ga se smatra najlakšim materijalom za rad, materijalom za početnike. Njegova dostupnost je sve veća i prognoze su kako će uskoro preteći ABS kao preferirani izbor. Dostupan je u većini različitih boja, bilo punih ili transparentnih. Vrlo je jednostavan za naknadnu obradu brušenjem i premazivanje akrilnim bojama ili premazima. Lijepljenje mu nije jednostavno i potrebno je koristiti super ljepljiva, što ima nedostatke poput korištenja zaštitnih naočala, rukavica, ekstremna ljepljivost za prste i druge dijelove tijela. Na slici 3.14 je primjer 3D isprintanog vijka i matice od PLA. [25]



Slika 3.14 Vijak i matica od PLA-a [28]

Glavni nedostatak je da ne može podnijeti puno topline, jer već pri temperaturi od 50 °C omekša. Ovo je za neke i prednost jer se predmet lako može ponovno zagrijati i popravljati greške, savijati ili spajati dijelove. [25]

Riječ je o tvrdom materijalu, pomalo krhkom nakon što se ohladi. Njemu su potrebne niže temperature za rad, obično oko 160 °C - 220 °C. Grijana podloga i nije toliko potrebna ali može biti korisna za kvalitetu 3D ispisa na temperaturi od oko 50 - 60 °C. Jako se sporo hladi pa se preporuča ventilator za hlađenje, kako bi se ubrzao proces. Kada je zagrijan PLA ispušta blagi miris, poput kukuruza ili palačinki, ali ne ispušta nikakve plinove koji mogu smetati, pa je siguran za printanje čak i domovima. U tablici 3.2 je prikaz karakteristika PLA-a za 3D ispis. [25]

Tablica 3.2 Karakteristike PLA-a za 3D ispis [27]

MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
PLA	185 - 230 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• može i bez grijane podloge, ali ako se koristi onda temperatura podloge treba biti ~60 °C</li> <li>• nakon prvih par slojeva smanjiti temperaturu podloge za 5 - 10 °C</li> <li>• dobro prianja na podlogu plave vinil trake</li> <li>• prianja dobro ako se na čistu podlogu nanese jaki lak za kosu</li> <li>• dobro prianjanje na podlogu ako je nanesena smjesa čestica ABS-a otopljenih u acetonu</li> </ul>

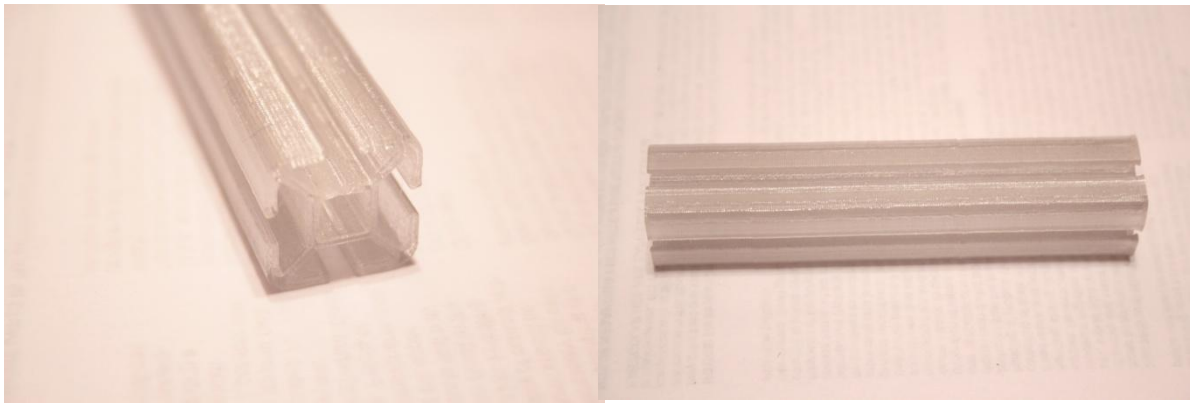
### 3.3.3 Polikarbonat (PC)

Polikarbonat spada u plastomere, visoke čvrstoće, optičke prozirnosti i visoke temperature taljenja. Za razliku od PLA-a koji vrlo brzo prelazi iz čvrstog u mekano stanje, PC polako omekšava s povećanjem temperature i time omogućuje uspješno, iako usporeno ekstrudiranje pri nižim temperaturama nego što je propisano. Ovo je korisno prilikom mijenjanja materijala i omogućuje čišćenje mlaznice prije postizanja visokih radnih temperatura. [29]

PC se značajno koristi u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, medicini i u mnogim drugim mjestima. On nudi preciznost, izdržljivost i stabilnost, a dijelovi od PC-a su čvrsti i omogućuju različita funkcionalna ispitivanja. Mehanička svojstva su mu bolja od ABS-a i

mnogih drugih plastomera. Posjeduje neobičnu kombinaciju čvrstoće, krutosti i žilavosti koje materijal čine pouzdanim i dobrim za primjenu. [29]

PC je noviji materijal za 3D printanje i njegovo vrijeme dolazi, pogotovo zbog svojih dobrih svojstava. Kada se printa potrebne su mu nešto više temperature 250 °C - 320 °C, a po završetku ga se treba dobro ohladiti. Treba voditi računa da se materijal prije uporabe ne nalazi na otvorenom ili vlažnom prostoru jer će dijelovi biti isprintani s mjehurićima i bijeli umjesto prozirni s nešto slabijim svojstvima. Kada se printaju veći dijelovi, imaju tendenciju odvajanja od podloge, te treba obratiti pozornost na vrstu podloge, a i temperatura podloge treba biti nešto veća 120 °C - 130 °C. Primjer isprintanog profila od PC-a je na slici 3.15, a u tablici 3.3 su karakteristike PC-a za 3D ispis. [27,29]



Slika 3.15 3D tiskan profil od PC-a [29]

Tablica 3.3 Karakteristike PC-a za 3D ispis [27]

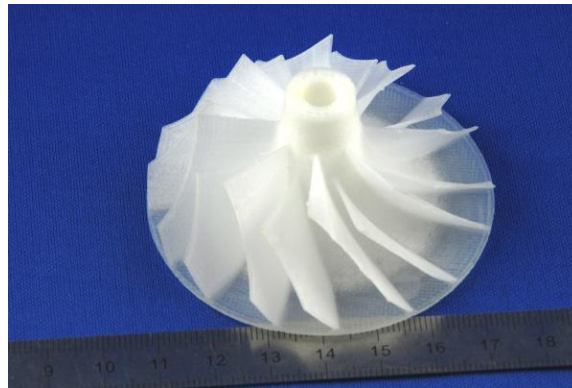
MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
PC	250 - 320 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ako je ostavljen na otvorenom ili vlažnom prostoru, treba ga se osušiti prije printanja</li> <li>• temperatura podloge: 120 °C - 130 °C</li> <li>• ako se želi printati brže, s većim protokom materijala, potrebne su i veće temperature</li> <li>• dobro prianja na podlogu poliamidne trake</li> <li>• dobro prianjanje i ako je na podlogu nanescena smjesa čestica ABS-a otopljenih u acetonu</li> <li>• nanesceno super ljepilo prije grijanja podloge, također pospješuje prianjanje</li> </ul>



### 3.3.4 PA (Poliamid)

Poliamid je polimer koji sadrži monomere amida povezanih peptidnim vezama. Dobiva se od nafte i spada u alifatske poliamide umjetno stvorene polimerizacijom s krutom fazom. Jako je fleksibilan materijal i iznimno robustan, a cijenom vrlo povoljan. Posjeduje jako zanimljiva svojstva koja se mogu uspoređivati s ABS-om. [30]

Kada se koristi za 3D printanje prednosti su mu: vrlo niska cijena, duplo manja od ostalih konvencionalnih materijala, laka dostupnost jer postoji u traženom obliku, a isprintani predmeti su fleksibilni i otporni na trošenje, manje krhki u odnosu na ABS ili PLA, pa time i čvršći. Nedostatci su mu: veća ljepljivost od ABS-a i PLA-a pa bude gnjecav, mnogo se lakše iskrivljuje prilikom printanja, potrebna je dobra priprema podloge i treba biti osušen prije printanja. Kako izgleda 3D tiskan predmet od PA-a prikazano je slikom 3.16. [30]



Slika 3.16 3D tiskanje PA-a [31]

Temperature za rad PA-a su nešto veće i trebaju biti 240 °C - 280 °C, podloga mora biti dobro pripremljena i od kartonskog materijala, dok temperatura podloge treba iznositi ~120 °C. Te i neke ostale karakteristike za 3D ispis PA-a nalaze se u tablici 3.4. [27]

Tablica 3.4 Karakteristike PA-a za 3D ispis [27]

MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
PA	240 - 280 °C	<ul style="list-style-type: none"><li>• ne može se printati na staklenu podlogu</li><li>• koristiti kartonsku podlogu zbog sprječavanja savijanja prilikom printanja</li><li>• temperatura ovisno o vrsti podloge ~120 °C</li><li>• ako se javlja pjena, materijal se mora osušiti</li><li>• gnjecavost u slučaju većih količina materijala</li></ul>

### 3.3.5 Savitljivi materijali - Elastoplastomerni uretan (TPU)

Elastoplastomeri (TPE) su polimeri koji u svojim lancima sadrže tvrde i mekane segmente. Njihovo glavno svojstvo je izuzetna elastičnost, koja ih čini zanimljivima za 3D printanje, pa se javljaju na tržištu u različitim varijantama. Tu spada i TPU, materijal koji posjeduje druga dobra i zanimljiva svojstva uz ono izuzetne elastičnosti, poput smične čvrstoće, postojanosti pri nižim temperaturama, otpornosti na ulja, masti i abraziju. [32]

Za niskobudžetne 3D printere ovi materijali se još uvijek razvijaju, a njihova je pogodnost da se mogu koristiti za remenja, brtve, proizvode za napuhivanje, kao jastučići i za apsorpiranje udaraca. Njihova svojstva omogućuju da budu korišteni kao materijali za printanje potplata cipela i tenisica te i u ostalim dijelovima modne industrije. [33]

TPU je primjer izuzetno savitljivog materijala, radna temperatura printanja mu je 210 °C - 225 °C, a temperatura podloge treba biti 20 °C - 50 °C. Problem prevelike savitljivosti je zahtijevanje malo drugačijeg ekstrudera i drugačijih postavki. Kako izgleda 3D tiskan predmet prikazano je slikom 3.17, a ostale karakteristike za 3D ispis su u tablici 3.5. [27]



Slika 3.17 3D tiskane uzice od TPU-a [33]

Tablica 3.5 Karakteristike TPU-a za 3D ispis [27]

MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
TPU	210 - 225 °C	<ul style="list-style-type: none"><li>• temperatura podloge: 20 °C - 50 °C, a može i bez</li><li>• za ispravno dodavanje, potreban poseban opružni mehanizam s valjnim ležajem, kao i na ekstruderu</li><li>• prianja na sve podloge</li><li>• kod printanja visokih tankih predmeta, potrebno je podržavanje kako ne bi došlo do savijanja</li><li>• niske brzine printanja, do 30 mm/s</li><li>• prije pristupanja printanju potrebno je da sve bude jako čisto, bez tragova zaostalog materijala</li></ul>

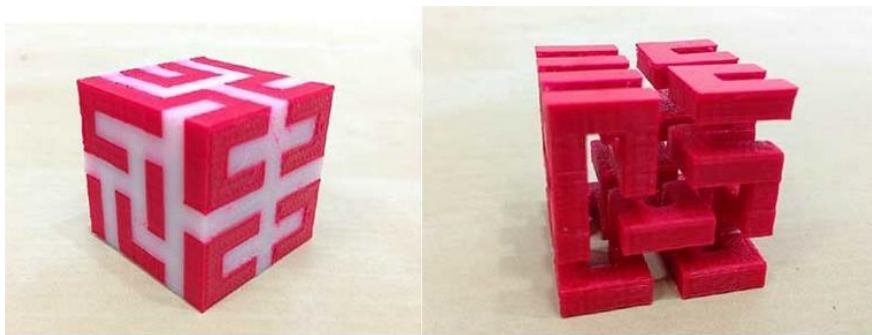
### 3.3.6 Topljivi materijali - polivinil amid (PVA), polistiren visoke žilavosti (PS-HI)

Riječ je o vrlo neobičnim materijalima, ali svoju primjenu kod 3D printanja pronalaze najčešće kao potporne strukture, kod printera koji posjeduju dva ekstrudera za istovremeno nanošenje dva materijala. Nakon završetka izrade uklanjaju se vrlo jednostavno zbog svoje lake topljivosti.

#### 3.3.6.1 Polivinil amid (PVA)

PVA je poseban polimerni materijal koji se otapa u vodi. Najčešće se koristi kao ljepljivo za papir, kao zgušnjivač, kao film za pakiranje, za zaštitu higijenskih proizvoda... Vrlo je rasprostranjen u ribolovu, gdje se vrećice od PVA-a pune mamcem i takve bacaju u vodu, PVA se zatim razgrađuje a mamac privlači ribu. [25]

Kod 3D printera koristi se u slučajevima s dva ili više ekstrudera, kao jedan od materijala koji pruža strukturnu potporu pri 3D tiskanju predmeta. Obično su to neki kompleksni predmeti za 3D printanje koji se mogu realizirati samo s pomoću potpornih struktura. Da ga nema, predmet bi propao ili bi se iskrivio. Po završetku predmet je dovoljno staviti u vodu i držati sve dok PVA nestane. Zbog jakog privlačenja vode nije jednostavno upotrebljiv, vlažnost zraka može utjecati brzo i potrebno ga je čuvati u zatvorenim kutijama ili spremnicima, a nedostatak mu je i visoka cijena. Na slici 3.18 je primjer predmeta s otopivim PVA, a karakteristike za 3D printanje su u tablici 3.6. [25]



Slika 3.18 3D isprintan predmet s otopivim PVA [34]

Tablica 3.6 Karakteristike PVA-a za 3D ispis [27]

MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
PVA	190 - 220 °C	<ul style="list-style-type: none"><li>• otapa se u običnoj vodi iz slavine</li><li>• Iznad 200 °C je podložan brzom raspadanju</li><li>• temperatura podloge: 50 °C - 60 °C</li></ul>

### 3.3.6.2 Polistiren visoke žilavosti (PS-HI)

PS-HI je također materijal koji se otapa, samo za razliku od PVA on je otporan na vodu, pa se otapa u tekućini (Limonene), bezbojna tekućina okusa limunske kore. Riječ je o materijalu koji se lako printa i lijepi, vrlo je lagan, izuzetne dimenzijske stabilnosti, svestran i pristupačan. Može se koristiti kao i PVA kod printanja kompleksnih predmeta, s dva ili više ekstrudera, gdje ima ulogu potporne strukture. Po završetku se ne otapa u vodi, već u navedenoj tekućini, što traje i do 24 sata. Na slici 3.19 je primjer 3D isprintanog predmeta, a u tablici 3.7 su karakteristike za 3D printanje. [33]



Slika 3.19 PS-HI potpora 3D isprintanog ležaja [35]

Tablica 3.7 Karakteristike PS-HI-a za 3D ispis [27]

MATERIJAL	TEMPERATURA	KARAKTERISTIKE
PS-HI	~230 °C	<ul style="list-style-type: none"><li>• temperatura podloge: ~115 °C</li><li>• ne dirati predmet dok se potpuno ne ohladi zbog savitljivosti materijala</li><li>• otapa se u roku od 8 - 24 h, kada je u potpunosti potopljen u tekućini (Limonene)</li></ul>

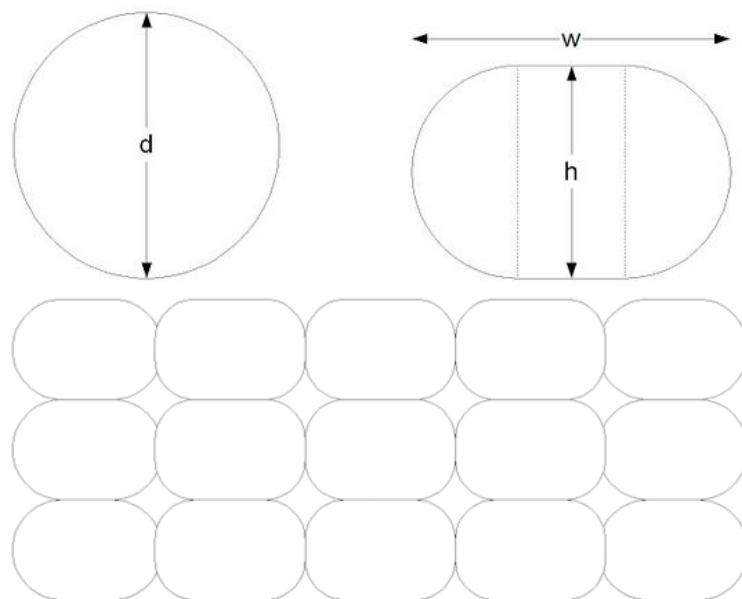
### 3.4 Najčešće greške i problemi izrade tvorevina

Kao i svaka tehnologija, tako i ova ima svoje probleme i greške koje se mogu dogoditi prilikom printanja modela. U ovome dijelu su navedene najčešće pogreške i problemi 3D printanja niskobudžetnim printerima, uz obrazloženje uzroka njihovog nastajanje te na koji način ih se može riješiti.

#### 3.4.1 Problemi materijala i njegove dostave

##### 3.4.1.1 Pretjerano dodavanje materijala [36]

Ovaj problem se očituje u stijenci predmeta koja je predebela. Rezultat je da su vanjske dimenzije modela malo prevelike u odnosu na definirane i konstruirane, dok su otvori na modelu premali. Na slici 3.20 je shematski prikazano kako treba izgledati presjek idealno dostavljenog materijala, poput spljoštene kružnice sa širinom većom od visine. Omjer širine i visine treba biti pravilan, odnosno ne prevelik, jer je tada veći protok materijala i uzrokuju se nepravilne dimenzije.



Slika 3.20 Čestice pretjerano dodanog materijala [37]

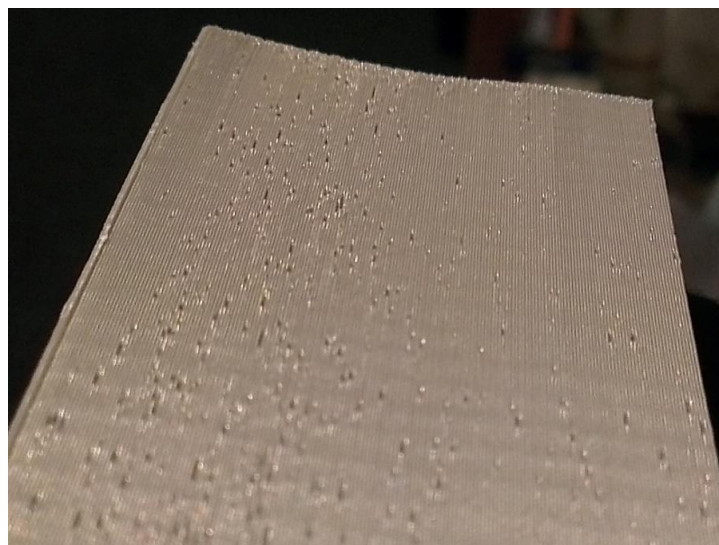
Uzrok nastajanja ovih grešaka je softverski, prilikom generiranja modela za nastajanje sloj po sloj, uzimaju se prevelike širine za materijal koji treba naslagivati.

Kako je problem softverski, potrebno je u postavkama smanjiti protok materijala, te će tako i svaki nanos materijala imati presjek poželjnog omjera širine i visine.

### 3.4.1.2 Upravljanje materijalom i kvaliteta materijala [36]

Materijal može stvoriti dosta problema kod 3D printanja, tako da o njemu treba voditi računa. On mora biti kvalitetan, jer nečistoće i strane čestice u njemu mogu uzrokovati probleme ne samo na isprintanom modelu, već i oštetiti dijelove samog printera. Također treba voditi računa i o njegovom rukovanju i upravljanju, jer i tu može doći do promjena koje će se uočiti tek prilikom printanja ili po završetku.

1.) Prvi problem koji se može javiti je da se pojavljuju male rupice na površini prilikom printanja materijala, kako je prikazano na slici 3.21.

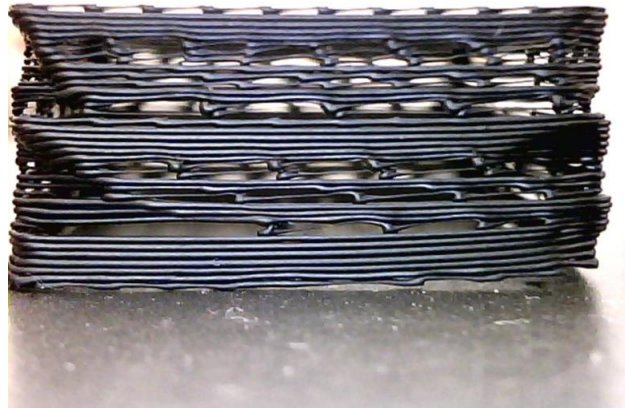


Slika 3.21 Rupice zbog nekvalitetnog materijala [38]

Uzrok problema je u isparavanju ili mjehurićima vode, apsorbiranih iz vlage u zraku prilikom skladištenja materijala, te se radi o problemu upravljanja materijalom. Treba napomenuti kako je ABS osjetljiviji na ovu pojavu zbog upijanja vlage.

Potrebno je voditi brigu o materijalu i ne dopustiti njegovu preveliku izloženost vlazi, ili ako je već došlo do apsorpcije, prije uporabe lagano grijati materijal za uklanjanje vode i paziti kako ga se ne bi deformiralo jer u protivnom više se neće moći upotrijebiti.

2.) Drugi problem je da dolazi do začepjenja ekstrudera materijala, kada neke strane čestice materijala ostaju zaglavljene u mlaznici a to izgleda kao na slici 3.22.



Slika 3.22 Printanje sa začepljenim ekstruderom [39]

Uzrok problema je da su neke strane čestice dio materijala koji se koristi, a to je često slučaj kod korištenja nekvalitetnog materijala, pa bi trebalo provjeriti dobavljača materijala.

Rješenje problema je da se koristi materijal koji je kvalitetan i da se nabavlja od pouzdanih dobavljača.

3.) Treći problem može biti ispuštanje zvukova iz mlaznice poput mjehurića zraka pod pritiskom. Ti se mjehurići raspršuju i uzrokuju rupice u plastici, slika 3.23.



Slika 3.23 Rupice uslijed apsorbirane vlage u materijalu [40]

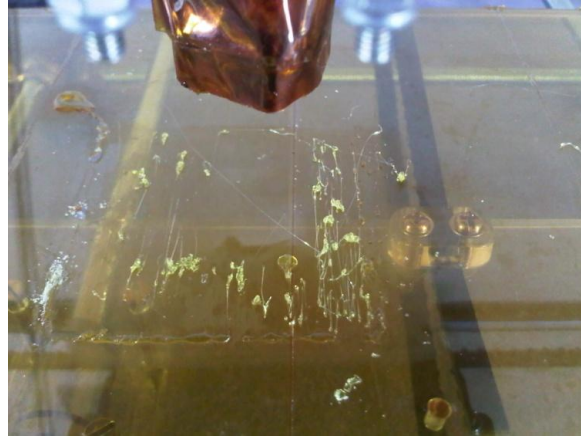
Uzrok toga je da materijal sadrži mjehuriće zraka ili rupice nastale u proizvodnom procesu, ili zbog apsorbirane vlage koja se pretvara u paru. Rješenje je da se materijal provjeri prije uporabe i da se koristi kvalitetan materijal od pouzdanih dobavljača.

Od ostalih problema s materijalom još se može dogoditi nedovoljno dodavanje materijala i isprekidano dodavanje materijala, ali oni su rijetki i nisu toliko značajni u odnosu na navedene.

### 3.4.2 Problemi prijanjanja na podlogu

#### 3.4.2.1 Nedovoljno prijanjanje na podlogu [36]

Problem prijanjanja na podlogu kada ne dolazi do adhezije materijala na podlogu, te se ne može ostvariti printanje predmeta, a što nastaje vidi se na slici 3.24.



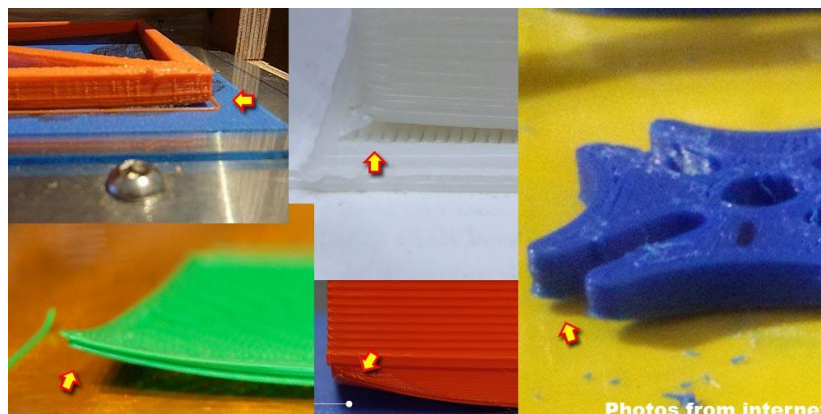
Slika 3.24 Problem prijanjanja materijala na podlogu [41]

Više je razloga nastajanja ovog problema, može biti da je vrh mlaznice malo previsok u odnosu na podlogu te se ne ostvaruje prijanjanje, da podloga nije čista, da je preniska temperatura podloge ili da je temperatura mlaznice na vrhu nedovoljna za dobru adheziju.

Potrebno je da vrh mlaznice ne bude udaljen od podloge za više od promjera mlaznice, da je podloga čista, a to se može ostvariti alkoholom, acetonom ili amonijakom, da se poveća temperatura podloge ili temperatura mlaznice pri vrhu.

#### 3.4.2.2 Podizanje rubova [36]

Vanjski rubovi se podižu od površine s napredovanjem printanja, a na slici 3.25 su primjeri.



Slika 3.25 Podizanje rubova [42]

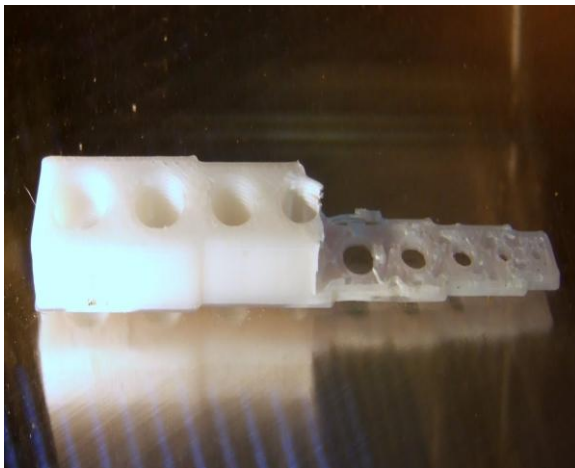


Ovo je problem povezan s nedovoljnim prijanjanjem na podlogu, a nastaje zbog različitog hlađenja dijelova predmeta, kao i razloga što je predmet na rubovima izložen nižim temperaturama za razliku od sredine.

Printanjem tankog okvira, koji se naknadno skine održava se toplina na rubovima i smanjuje podizanje rubova, kao i dodavanje prilagođenih kutnih dijelova malo odmaknutih, ili nekih drugih dodataka koji štite od prebrzog hlađenja i podizanja rubova.

#### *3.4.2.3 Pretjerano prijanjanje na podlogu [36]*

Pretjerano prijanjanje se dogodi kada je materijal preagresivan podlozi na koju se tiska te se "zalijepi" za podlogu i ne može ga se ukloniti bez lomljenja (slika 3.7 a) ili bez oštećenja podloge (slika 3.26 b).



a)



b)

Slika 3.26 Pretjerano prijanjanje na podlogu [43, 44]

Ovo se dogodi, kada materijal koji se nanosi, nije kompatibilan s materijalom podloge.

Potrebno je da materijali budu kompatibilni, da ne dolazi do prejakoga prijanjanja, kao i da budu kompatibilni na svim temperaturama ne kojima se koriste.

#### **3.4.3 Problemi pogona i kalibracije**

##### *3.4.3.1 Prevelika brzina printanja [36]*

Prije nego se pristupa printanju, zadaje se brzina kojom se želi printati, pa se radi želje da printanje bude što prije gotovo, zadaje prevelika brzina. Zbog prevelike brzine se sloj po sloj ne slaže ispravno te predmet izgleda kao na slici 3.27.



Slika 3.27 Rezultat prevelike brzine printanja [45]

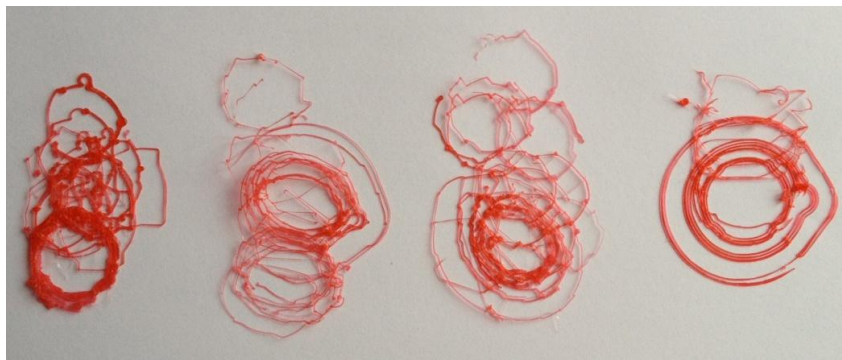
Potreban je samo pažljiv pristup kod odabira brzine printanja, i ne zadati veću vrijednost od one koja je preporučena, najčešće od strane proizvođača niskobudžetnih 3D printera.

#### 3.4.3.2 Preskakanje koraka kod motora [36]

Preskakanje koraka kod koračnih elektromotora, koji se koriste kod niskobudžetnih printera se događa, a gubitkom koraka gubi se pozicija što dovodi do nepravilnog printanja. Razlog preskakanja može biti različit, a neki od njih su navedeni.

##### 1.) Preskakanje koraka zbog prevelike ili premale snage na pogonu motora

Događa se da glava printera ne uspijeva zadržati ispravnu poziciju te se slojevi printaju s pomakom jedan u odnosu na drugoga, kako je prikazano na slici 3.28.

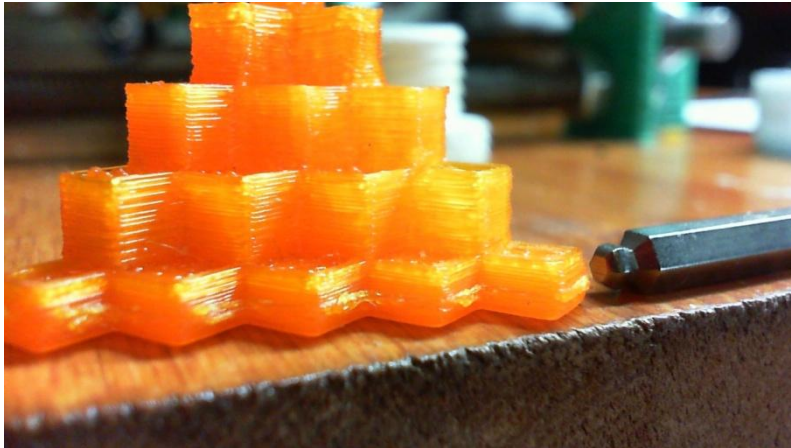


Slika 3.28 Preskakanje koraka [46]

Razlog preskakanje je prevelika ili preslaba snaga koju motor dobiva. Ako je prejako postavljena dolazi do njihovog pregrijavanja i malih zastoja koji rezultiraju gubitkom koraka, a ako je preslabo postavljena motori su hladni i nemaju snagu za svaki korak. Potrebno je podesiti snagu pogona na optimalnu razinu, kako ne bi dolazilo do zagrijavanja zbog prevelike struje ili da bude premalo struje pa motor nema snage za svaki korak.

## 2.) Preskakanje koraka uslijed nepravilne konfiguracije softvera

Događa se da je prvih nekoliko slojeva isprintano deformirano i malo prignječeno, kako se vidi na slici 3.29.



Slika 3.29 Preskakanje u smjeru z-osi [47]

Svi slojevi su isprintani, ali je u prvih nekoliko slojeva pomak u vertikalnoj z-osi zanemariv te se javlja i čudan zvuk. Razlog mu je najčešće pogrešna interpretacija u G kodu, a uzrok je pogrešna konfiguracija u programskom dijelu.

## 3.) Preskakanje koraka zbog mehaničkih problema

I ovdje dolazi do problema pomaka jednog sloja u odnosu na drugi, a problemi su mehaničke prirode i mogu biti različiti.

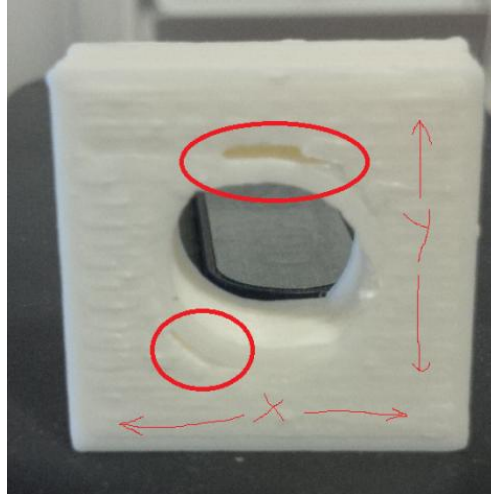
Uzrok može biti pretjerano trenje na dijelovima zaduženim za pomicanje u x, y ili z smjeru, što dovodi to prevelikog opterećenja kojeg motor ne može savladati. Preveliko trenje se provjerava na način da se, dok su motori ugašeni ili isključeni, dijelovi pomiču u svim smjerovima, i nigdje ne smije biti zapinjanja.

Može se dogoditi da je problem u pogonskom sustavu, odnosno da se javlja proklizivanje remena ili zupčanika preko osovina na koje su pričvršćeni. Pomicanje se lako provjeri s označavanjem pozicija pojedinih dijelova, te je potrebno bolje zatezanje remena ili pričvršćenje osovina i zupčanika.

Još se dogodi i da neki dijelovi poput zupčanika ili osovina nisu centrični kako bi trebali biti te uzrokuju različite napetosti remena. U ovom slučaju najbolje je zamijeniti neispravne dijelove.

### 3.4.3.3 Kalibracija [36]

Problem kalibracije je da otvori koji se printaju na dijelovima budu spljošteni u jednom smjeru, kako se vidi na slici 3.30 u smjeru naznačene y-osi.



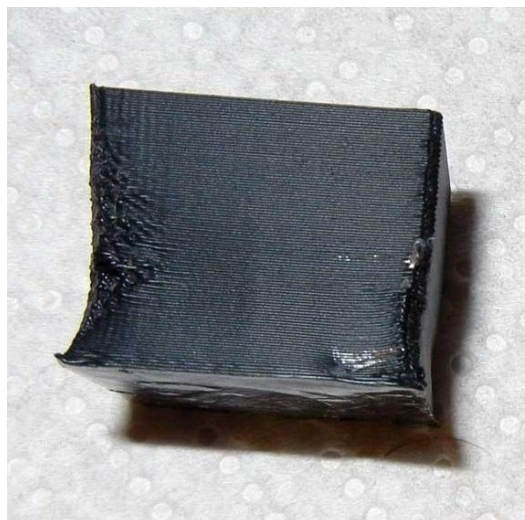
Slika 3.30 Spljošteni otvori u smjeru y-osi [48]

Pogonski sustav je labav, a najčešće je riječ o remenu koji zahtijeva zatezanje. Potrebno je provjeriti prijenosni sustav u smjeru u kojem se događa deformacija otvora, te obaviti njegovo kalibriranje.

### 3.4.4 Problemi temperature

#### 3.4.4.1 Temperatura predmeta previsoka [36]

Kada je temperatura predmeta koji se printa previsoka, dolazi do izobličenja rubova modela, kako je prikazano na slici 3.31.



Slika 3.31 Izobličenje rubova zbog prevelike temperature [49]

Zbog previsoke temperature koja prevladava, materijal koji se slaže ne uspijeva očvrnuti te se izobličuje, pogotovo na rubovima.

Ovo se može riješiti jednim od načina: sniženjem temperature podloge na kojoj se printa, obratiti pozornost da uzrok nije prevelika brzina koja onemogućuje hlađenje, uvođenje malih zastoja između svakog idućeg sloja, te uključivanje ili pojačanje ventilatora za hlađenje.

#### 3.4.4.2 Temperatura predmeta preniska [36]

Kada predmet koji se printa nije dovoljno zagrijan, dolazi do njegovog savijanja i raslojavanja kako vidimo na slici 3.32.



Slika 3.32 Raslojavanje modela zbog preniske temperature [50]

Prilikom hlađenja uvijek dolazi do skupljanja materijala, što uzrokuje ovakve greške, a ovome je pogotovo podložan ABS zbog svoje visoke temperature staklišta od  $\sim 140$  °C.

Ovo se rješava printanjem modela s dodatnim okvirom, koji sprječava gubitak topline, ili je printer, odnosno radna površina dobro zatvorena sa svih strana, pa nema gubitaka topline.

#### 3.4.4.3 Temperatura ekstrudiranja materijala previsoka, preniska [36]

Ponekad može doći do zadavanja previsoke temperature materijala i tada se prilikom printanja može primijetiti malo dima koji ukazuje da materijal izgara, te nastaju plinovi koji mogu biti štetni po zdravlje. U slučaju preniske temperature očito se može primijetiti kako materijal slabo izlazi iz mlaznice ili uopće ne izlazi.

Svaki materijal koji se koristi, ima propisanu temperaturu za ekstrudiranje, koja je zadana. O temperaturi ekstrudiranja samo treba voditi računa i postaviti je na preporučene vrijednosti.

### 3.4.5 Greške izrađenih modela

Osnovne i najčešće greške izrađenih modela su površinske nepravilnosti i netočnosti dimenzija, odnosno odstupanja od zadanih dimenzija. Već su navedeni neki od problema koji mogu dovesti do grešaka na isprintanim predmetima, uz još neke greške koje će se navesti.

#### 3.4.5.1 Površinske nepravilnosti

Površinske nepravilnosti su vrlo lako uočljive na predmetima koji su isprintani, pogotovo smetaju one koje se primijete golim okom. Mnogo je različitih nepravilnosti koje se mogu dogoditi, a one koje toliko ne smetaju su različite rupice, istaknute niti materijala na površini, mrljice ili finoća nekih zahtjevnijih detalja na predmetima.

Neki od navedenih problema uzrokuju površinske nepravilnosti, tako se može dogoditi da se radi o lošem materijalu ili se loše upravljalo s materijalom (vidi 3.4.1.2 *Upravljanje materijalom i kvaliteta materijala*), koji su rezultirali isprintanim predmetom s greškama na površini poput različitih oblika i veličina rupica.

Jedna od površinskih nepravilnosti koja se može dogoditi, su nazubljeni rubovi na nekim mjestima. Nazubljeni rubovi su rezultat vibracija koje je potrebno smanjiti, a to se izvodi sa smanjenjem brzine ili ubrzanja. [36]

Ponekada se događa da nisu zatvoreni s materijalom do kraja kako je prikazano slikom 3.33. Ovo je problem softvera koji reže model na slojeve, te bi trebalo provjeriti postavke, ili ga nadograditi. [36]



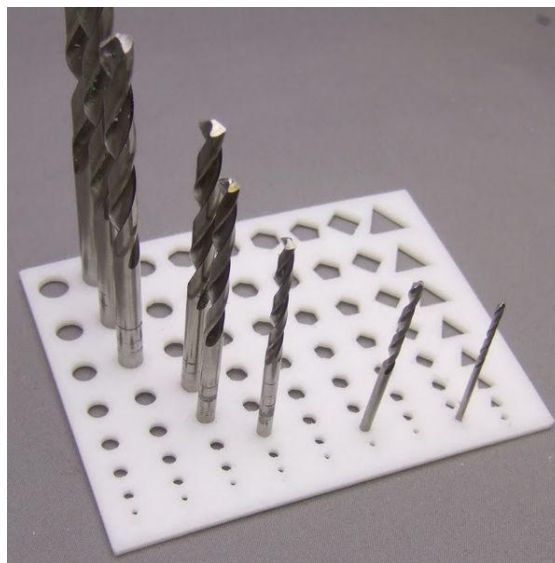
Slika 3.33 Neispunjavanje materijalom do kraja [51]

### 3.4.5.2 Netočnosti dimenzija

CAD model koji je napravljen uvijek je zadanih i željenih dimenzija koje savršeno odgovaraju konačnom modelu. Kada se taj model 3D tiska, njegove dimenzije će uvijek malo odstupati od onih definiranih. Ta mala odstupanja su zanemariva, jer predmet ispunjava svoju funkciju. Veći problem su netočnosti dimenzija koje uzrokuju značajne greške i odstupanja.

Dosada je navedeno nekoliko problema koji uzrokuju netočnost dimenzija, poput temperature (vidi 3.4.4 *Problemi temperature*) koja može uzrokovati savijanja i izobličenja, različita raslojavanja te nepravilan oblik printanja u visinu. Problemi pogona i kalibracije (vidi 3.4.3 *Problemi pogona i kalibracije*) uzrokuju različite stepeničaste strukture i odmake slojeva, kao i nepravilne oblike poput spljoštenih otvori. Tako isprintani predmeti su neupotrebljivi.

Često puta se dogodi i da otvori isprintanih predmeta budu premali u odnosu na definirane u CAD modelu. Razloga je više, od skupljanja materijala, rastavljanja na segmente, kao i rezanja rubova. Ako je važan točan promjer, o ovome se treba voditi računa. Čak je i dokazano da je nekada bolje uzeti trokut ili četverokut za manju rupu nego okrugli otvor (slika 3.34). [36]



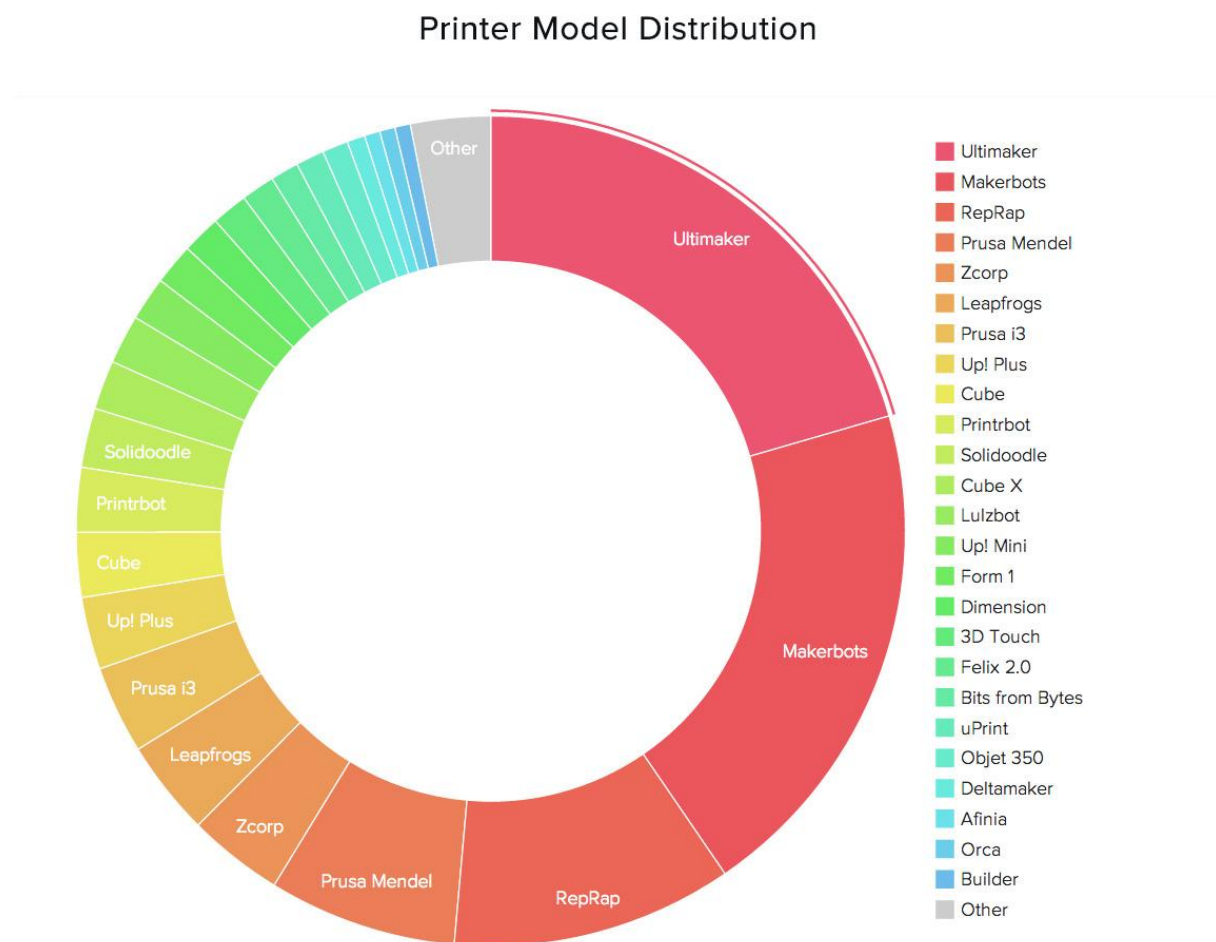
Slika 3.34. Poligon s manje vrhova za rupe [52]

Netočnost dimenzija je najčešći problem kod isprintanih, gotovih predmeta. Neki problemi onemogućuju da se predmet isprinta, ali kada se isprinta želja je da on bude odgovarajući. Površinske greške i nedostaci se često naknadnom obradom mogu ukloniti, ali ako oblik ne odgovara, tada se ne može učiniti ništa. Zato je težnja da ove greške budu što manje, kako bi predmet mogao ispuniti svrhu za koju je namijenjen.

#### 4. NISKOBUDŽETNI 3D PRINTERI NA TRŽIŠTU

Na tržištu niskobudžetnih 3D printera vlada velika konkurencija, koja sve više raste u posljednje vrijeme. Sve je veća popularnost tehnologije 3D printanja, a niskobudžetni printeri predstavljaju prvi korak u tome, te su svojom cijenom prihvatljivi i dostupni. Među proizvođačima uređaja se uz velike svjetske tvrtke poput Stratasys-a, koji su i utemeljitelji FDM načela aditivne tehnologije, nalaze i uređaji nastali od samostalnih projekata koji su zbog svoje kvalitete stekli popularnost i tržišni uspjeh. Različiti uređaji se razlikuju i po različitim karakteristikama kao što je veličina radnog prostora, debljina tiskanih slojeva, kvaliteta 3D tiskanih modela, brzina printanja i one će biti predstavljene i uspoređene.

Slika 4.1 preuzeta sa web stranice 3D Hubs, [53] i pokazuje zastupljenost pojedinih modela niskobudžetnih 3D printera od strane korisnika u svijetu. Na toj web stranici registrirani korisnici imaju izbor različitih modela, mogu tražiti usluge 3D printanja ili pružati usluge 3D printanja. Uočljivo je kako su Ultimaker i Makerbot najzastupljeniji uređaji.

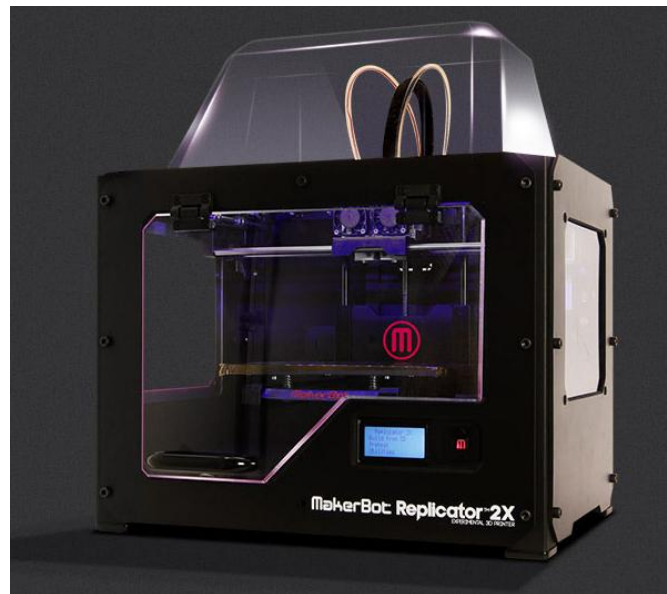


Slika 4.1 Zastupljenost pojedinih niskobudžetnih 3D printera [53]



#### 4.1 MakerBot Replicator 2x [54]

Niskobudžetni printer od Makerbot-a, izuzetno popularan i kvalitetan prikazan je slikom 4.2. Posjeduje dvije glave, tj. mlaznice te može istovremeno printati dijelove od dva različita materijala ili od istog materijala samo različite boje. Također može biti cijeli zatvoren čime se sprječava gubitak topline što pogoduje 3D printanju predmeta, a zbog toga je i izuzetno pogodan za ABS. Može raditi i s materijalom PLA, PS-HI te TPE. Njegove karakteristike su u tablici 4.1.



Slika 4.2 Makerbot Replicator 2X [54]

Tablica 4.1 Značajke Makerbot Replicatora 2X-a [54]

Radni prostor	246 × 152 × 155 mm
Brzina printanja	Standard 80 mm/s, može više
Debljina slojeva	100 mikrometara (0,1mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,04 mm
Dimenzije printera	490 × 320 × 531 mm
Masa	12,6 kg
Softver	Makerbot Makerware
Prijenos podataka	SD memorisjka kartica, USB
Cijena	~ 2200 €

## 4.2 Makerbot Replicator [55]

Makerbot Replicator printer pete generacije prikazan je slikom 4.3. Ovaj printer predstavlja neke nove standarde u svijetu niskobudžetnih 3D printera. Peta generacija predstavlja jednostavnost uporabe, kvalitetu kao i pouzdanost. Uređaj se može povezati putem Wi-Fi-a, USB-a ili etherneteta. Posjeduje ekstruder koji registrira nedostatak materijala i integriranu kameru za praćenje procesa 3D printanja čak i u odsutnosti. Sadrži mnogo zanimljivih inovacija i zasada optimiran za rad s PLA materijalom, a značajke se nalaze u tablici 4.2.



Slika 4.3 Makerbot Replicator [55]

Tablica 4.2 Značajke Makerbot Replicatora-a [55]

Radni prostor	252 × 199 × 150 mm
Brzina printanja	Standard 80 mm/s
Debljina slojeva	100 mikrometara (0,1 mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	520 × 441 × 410 mm
Masa	16 kg
Softver	Makerbot desktop
Prijenos podataka	Wi-Fi, USB, Ethernet
Rezolucija integrirane kamere	640×480
Cijena	~2200 €

### 4.3 Makerbot replicator mini [56]

Još jedna u nizu niskobudžetnih 3D printera od strane Makerbota (slika 4.4). Također spada u niskobudžetne 3D printere pete generacije, sa jednostavnom uporabom, kvalitetom i pouzdanošću, uz integriranu kameru za praćenje procesa i povezivanje putem Wi-Fi-a i USB-a. Ovo je model manjih dimenzija za praktičnu uporabu i vrlo jednostavan za prijenos, zasada također optimiran za PLA, a karakteristike su u tablici 4.3.



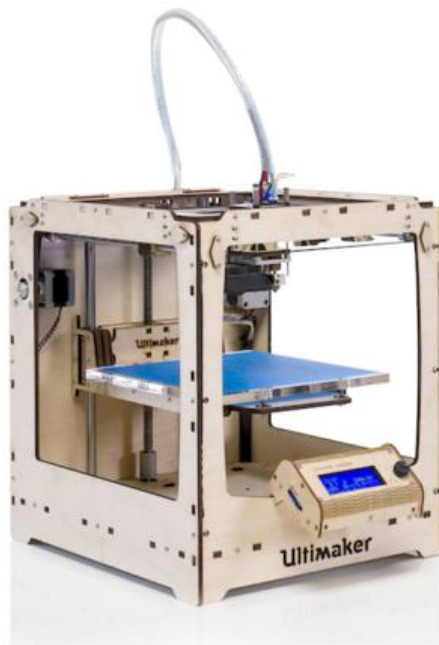
Slika 4.4 Makerbot Replicator mini [56]

Tablica 4.3 Značajke Makerbot Replicator Mini-a [56]

Radni prostor	100 × 100 × 125 mm
Debljina slojeva	200 mikrometara (0,2mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	295 × 310 × 381 mm
Masa	10 kg
Softver	Makerbot desktop
Prijenos podataka	Wi-Fi, USB
Rezolucija integrirane kamere	320 × 240
Cijena	~1100 €

#### 4.4 Ultimaker original [57]

Prvi niskobudžetni ultimakerov 3D printer, prikazan je slikom 4.5. Riječ je o vrlo popularnom modelu koji se može nadograđivati, izuzetne je brzine printanja, jednostavno se održava, a kompletna dokumentacija je dostupna svima. Može se kupiti kompletno sastavljen ili u dijelovima za samostalno sastavljanje i bolje upoznavanje funkcije svih njegovih komponenti. Podržava PLA i ABS ako posjeduje nadograđenu grijaću podlogu. Njegove značajke nalaze se u tablici 4.4.



Slika 4.5 Ultimaker original [57]

Tablica 4.4 Značajke Ultimaker original-a [57]

Radni prostor	210 × 210 × 205 mm
Brzina printanja	30 mm/s - 300 mm/s
Debljina slojeva	Do 20 mikrometara (0,02mm)
Preporučeni promjer materijala	3 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	357 × 342 × 388 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	Do 260 °C
Masa	21 kg
Softver	Cura (Ultimakerov službeni)
Prijenos podataka	SD memorijska kartica
Cijena	~1000 €

#### 4.5 Ultimaker 2 [58]

Ultimaker 2 je najnoviji printer od strane Ultimakera, prikazan na slici 4.6. U odnosu na prethodni, ovaj uređaj je puno moderniji. Vizualno je unaprijeđen, pojedini dijelovi su napravljeni od kvalitetnijih materijala radi izdržljivosti, a i neka manja poboljšanja u obliku povećanja radnog prostora također su istaknuta. Od materijala podržava PLA i ABS, a njegove značajke dane su u tablici 4.5.



Slika 4.6 Ultimaker 2 [58]

Tablica 4.5 Značajke Ultimaker original-a [58]

Radni prostor	230 × 225 × 205 mm
Brzina printanja	30 mm/s - 300 mm/s
Debljina slojeva	Do 20 mikrometara (0,02mm)
Preporučeni promjer materijala	3 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	357 × 342 × 388 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	Do 260 °C
Masa	11 kg
Softver	Cura (Ultimakerov službeni)
Prijenos podataka	SD memorisjka kartica, Wi-Fi
Cijena	~2000 €

#### 4.6 Cubify CubeX [59]

Proizvođač ovoga niskobudžetnog 3D printera je tvrtka 3D systems, a prikazan je na slici 4.7. Može imati do 3 ekstrudera, što znači da može printati predmete koji se sastoje od tri različita materijala, a to povećava radni prostor i cijenu. Sadrži spremnik materijala čime se on čuva od utjecaja okoline poput vlage, a od materijala podržava PLA i ABS. Njegove su karakteristike u tablici 4.6.



Slika 4.7 Cubify CubeX [59]

Tablica 4.6 Značajke Cubify CubeX-a [59]

Radni prostor (ovisno o broju ekstrudera)	185 × 265 × 240 mm
Brzina printanja	15 mm <sup>3</sup> /s
Debljina slojeva	100 mikrometara (0,1mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	515 × 515 × 598 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	Do 280 °C
Masa	37 kg
Softver	Cubify Software
Prijenos podataka	USB, Wi-Fi
Cijena	~2100 €

#### 4.7 Cubify CubePro [60]

Najbolji i najskuplji model niskobudžetnog 3D printera tvrtke 3D systems prikazan na slici 4.8. Poput CubeX-a može imati do 3 ekstrudera i printati predmete od tri različita materijala, a time ima veći radni prostor ali i cijenu. Lijepog dizajna i dimenzija radne podloge koja je među najvećima. Posjeduje spremnik materijala čime ga se štiti od okoline, a od materijala podržava PLA i ABS te PA. U tablici 4.7 su prikazane njegove značajke.



Slika 4.8 Cubify CubePro [60]

Tablica 4.7 Značajke Cubify CubePro-a [60]

Radni prostor (ovisno o broju ekstrudera)	285 × 270 × 230 mm
Brzina printanja	15 mm <sup>3</sup> /s
Debljina slojeva	70 - 300 mikrometara
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	580 × 590 × 580 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	Do 280 °C
Masa	41 kg
Softver	Cubify Software
Prijenos podataka	USB, Wi-Fi
Cijena	~2400 €

#### 4.8 Cubify Cube [61]

Niskobudžetni 3D printer tvrtke 3D systems Cubify Cube prikazan je na slici 4.9. Izuzetno je zanimljiv uređaj zbog svog neobičnog dizajna. Možda slabije kvalitete, ali zbog toga cijenom izuzetno prihvatljiv, pa je omjer uloženog i dobivenog izvrstan. Od materijala je pogodan za ABS i PLA, a njegove su karakteristike u tablici 4.8.



Slika 4.9 Cubify Cube [61]

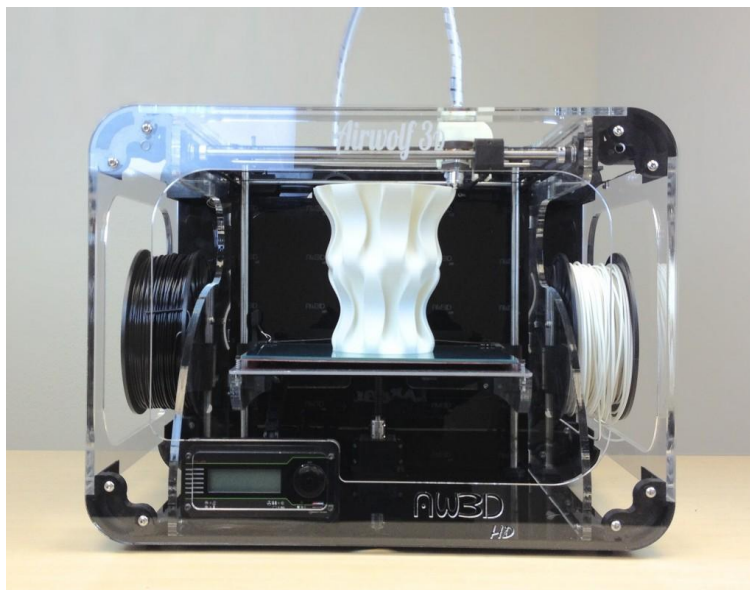
Tablica 4.8 Značajke Cubify Cube-a [61]

Radni prostor	140 × 140 × 140 mm
Brzina printanja	15 mm <sup>3</sup> /s
Debljina slojeva	200 mikrometara (0,2mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	260 × 260 × 340 mm
Masa	4,3 kg
Softver	Cube Software
Prijenos podataka	USB, Wi-Fi
Cijena	~1000 €



#### 4.9 Airwolf AW3D HD [62]

Najpopularniji printer tvrtke Airwolf 3D, prikazan je slikom 4.10, i predstavlja neobičan spoj karakteristika kod niskobudžetnih 3D printera. Brzina printanja i kvaliteta se teško usklađuju što je u slučaju ovoga uređaja postignuto na najbolji način, te zbog dobrih dimenzija radnoga prostora postiže dobar uspjeh. Uz ABS i PLA može podržavati i PC, nylon PA i polimerni kompozit s drvetom, a njegove karakteristike su u tablici 4.9.



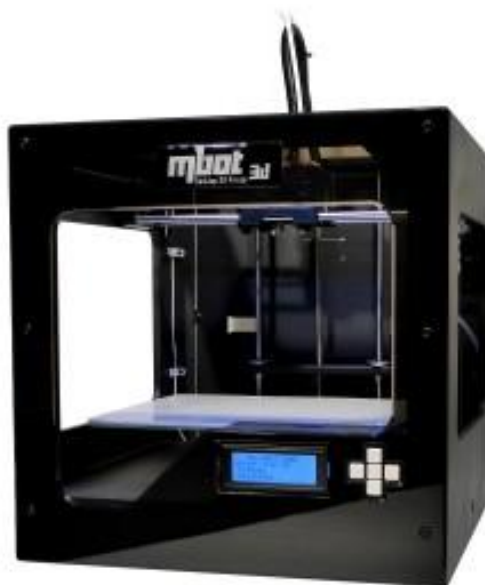
Slika 4.10 Airwolf AW3D HD [62]

Tablica 4.9 Značajke Airwolf AW3D HD-a [62]

Radni prostor	300 × 200 × 300 mm
Brzina printanja	150 - 400 mm/s
Debljina slojeva	Do 50 mikrometara (0,05mm)
Preporučeni promjer materijala	3 mm
Promjer mlaznice	0,5 mm
Dimenzije printera	600 × 440 × 450 mm
Masa	18 kg
Softver	MatterControl, Slic3r GCode generator
Prijenos podataka	USB
Cijena	~ 2200 €

#### 4.10 Mbot 3D Grid 2 [63]

Prvi kineski proizvođači niskobudžetnih 3D printera, Hangzhou Magicfirm LLC, nudi tržištu svoj Mbot 3D Grid 2 prikazan slikom 4.11. Čelična konstrukcija daje čvrstoću ovom uređaju, a posjeduje izuzetnu robusnost, što potvrđuje garancija od godinu dana koja se za njega nudi. Od materijala podržava PLA i ABS, a može biti s jednim ili dva ekstrudera te je cijenom izuzetno prihvatljiv s obzirom na karakteristike prikazane u tablici 4.10.



Slika 4.11 Mbot 3D Grid 2 [63]

Tablica 4.10 Značajke Mbot 3D Grid 2-a [63]

Radni prostor	250 × 210 × 190 mm
Brzina printanja	100 mm/s
Debljina slojeva	50 - 300 mikrometara (0,05 - 0,3mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,5 mm
Dimenzije printera	405 × 405 × 410 mm
Masa	18 kg
Softver	ReplicatorG
Prijenos podataka	SD memorijska kartica, USB
Cijena	~1000 €

#### 4.11 LulzBot TAZ 4 [64]

LulzBot niskobudžetni 3D printer neobičnog izgleda prikazan je na slici 4.12. Karakteristike ovoga printera su da je među bržima, daje dobru kvalitetu i da mu je radni prostor među najvećima te su značajke navedene u tablici 4.11. Karakteristike ovog uređaja je da može koristiti mnogo različitih materijala, standardne ABS i PLA, te PS-HI, PA, PVA, pa i polimerni kompozit s drvetom.



Slika 4.12 LulzBot TAZ 4 [64]

Tablica 4.11 Značajke LulzBot TAZ 4-a [64]

Radni prostor	290 × 275 × 250 mm
Brzina printanja	Do 200 mm/s
Debljina slojeva	75 - 350 mikrometara (0,075 - 0,35mm)
Preporučeni promjer materijala	3 mm
Promjer mlaznice	0,35 mm
Dimenzije printera	680 × 520 × 515 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	Do 240 °C
Masa	11 kg
Softver	Slic3r GCode generator
Prijenos podataka	SD memorijska kartica, USB
Cijena	~1700 €

#### 4.12 UP Plus 2 [65]

Dizajnom neobična printer (slika 4.13), manjih dimenzija, manjeg radnog prostora i nešto manje brzine printanja, ali vrlo praktičan i izrađuje predmete odlične kvalitete. Podržava standardne materijale ABS i PLA, a u tablici 4.12 se nalaze njegove značajke.



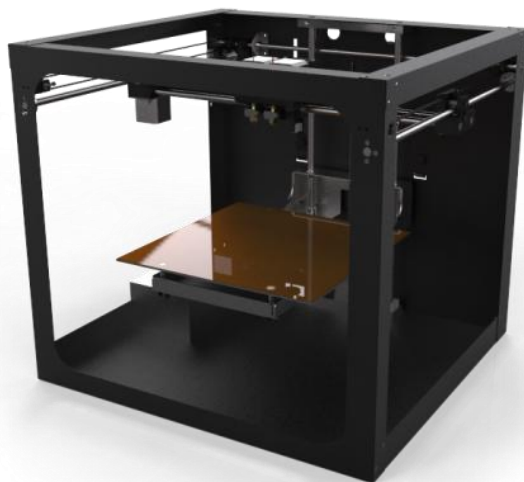
Slika 4.13 UP Plus 2 [65]

Tablica 4.12 Značajke UP Plus 2-a [65]

Radni prostor	140 × 140 × 135 mm
Brzina printanja	Do 100 mm/s
Debljina slojeva	150 - 400 mikrometara (0,15 - 0,4mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	245 × 260 × 350 mm
Masa	5 kg
Softver	UPware
Prijenos podataka	SD memorijska kartica, USB, Wi-Fi
Cijena	~1300 €

#### 4.13 Solidoodle Workbench [66]

Printer s dva ekstrudera, prikazan je na slici 4.14. Ovdje se radi o niskobudžetnom 3D printeru vrlo povoljne cijene, a kvalitetne konstrukcije i dizajna, izuzetno velikog radnog prostora i dobrih karakteristika (tablica 4.13). Od materijala podržava PLA i ABS.



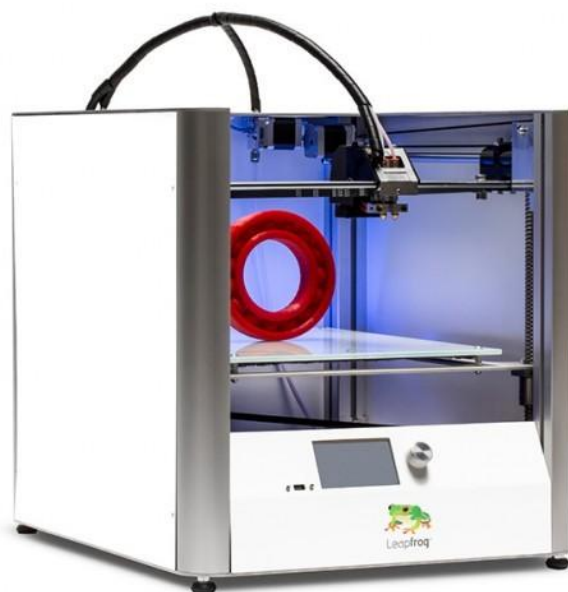
Slika 4.14 Solidoodle Workbench [66]

Tablica 4.13 Značajke Solidoodle Workbench-a [66]

Radni prostor	300 × 300 × 300 mm
Brzina printanja	Do 100 mm/s
Debljina slojeva	100 - 400 mikrometara (0,1 - 0,4 mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm
Dimenzije printera	530 × 500 × 480 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	Do 230 °C
Masa	14 kg
Softver	SoliPrint software
Prijenos podataka	USB
Cijena	~1100 €

#### 4.14 Leapfrog Creatr HS [67]

Printer Leapfrog Creatr HS prikazan na slici 4.15., jedan je od najbržih niskobudžetnih 3D printera, s brzinom printanja do čak 300 mm/s, može biti s dva ekstrudera i posjeduje veći radni prostor. Od materijala koje podržava uz ABS i PLA tu su još PVA i savitljivi PA, a njegove značajke dane su u tablici 4.14.



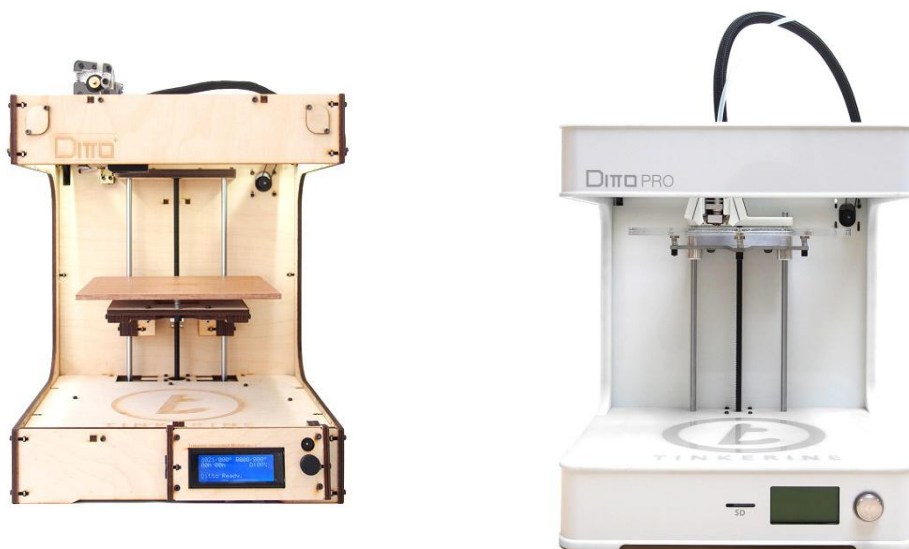
Slika 4.15 Leapfrog Creatr HS [67]

Tablica 4.14 Značajke Leapfrog Creatr HS-a [67]

Radni prostor	270 × 260 × 180 mm
Brzina printanja	30 - 300 mm/s
Debljina slojeva	50 - 350 mikrometara (0,05 - 0,35 mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,35 mm
Dimenzije printera	600 × 500 × 500 mm
Masa	30 kg
Softver	Simplify3D™ software
Prijenos podataka	USB
Cijena	~2100 €

#### 4.15 Ditto+ i Ditto pro [68, 69]

Oba niskobudžetna 3D printera su proizvodi tvrtke Tinkerine. Na slici 4.16a se nalazi Ditto+, a na slici 4.16b je Ditto pro. Radi se o sličnim uređajima, Ditto pro je naprednije i modernije izrade, dok su im karakteristike prikazane u tablici 4.15, vrlo slične. Namijenjeni su pretežno za PLA materijal i pružaju dobru kvalitetu i robusnost s obzirom na cijenu.



a) Ditto+ [68]

b) Ditto pro [69]

Slika 4.16 Niskobudžetni 3D printeri tvrtke Tinkerine

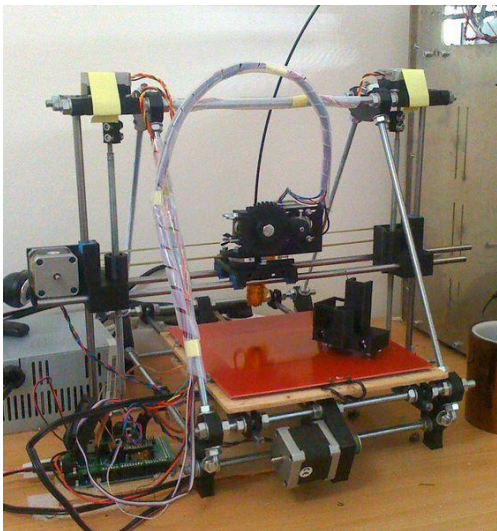
Tablica 4.15 Značajke Ditto+ i Ditto pro-a [68, 69]

	<b>Ditto+</b>	<b>Ditto pro</b>
Radni prostor	210 × 185 × 230 mm	215 × 160 × 205 mm
Brzina printanja	Do 100 mm/s	Do 200 mm/s
Debljina slojeva	0,1 - 0,3 mm	0,05 - 0,3 mm
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,35 mm	0,35 mm
Dimenzije printera	350 × 370 × 480 mm	370 × 390 × 436 mm
Masa	7 kg	7 kg
Softver	Tinkerine Suite	Tinkerine Suite
Prijenos podataka	SD mem. kartica, USB	SD mem. kartica, USB
Cijena	~1000 €	~1500 €

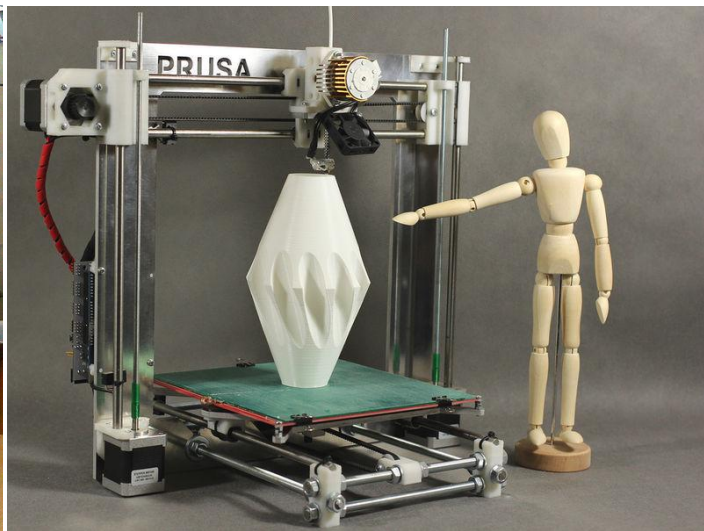
#### 4.16 Samostalni projekti (Prusa Mendel)

Ovdje je riječ o najpopularnijim niskobudžetnim 3D printerima nastalim kao vlastiti samostalni projekti, koji su zbog kvalitetne realizacije doživjeli uspjeh. Njihova je glavna prednost što su kompletna dokumentacija, potrebne komponente i načelo sastavljanja dostupni svima. Svrha toga je, da svi oni koji žele upoznati i učiti ovu tehnologiju i uređaje do najsitnijih detalja ovim putem, to mogu ostvariti. Ovakvi uređaji su redovito podvrgavaju različitim modifikacija i popravljajima u cilju postizanja što boljih značajki, a dijelovi od kojih su sastavljeni vrlo često su isprintani na nekom niskobudžetnom 3D printeru. Dijelovi nastali 3D tiskanjem na ovim uređajima kvalitetom nisu daleko od uređaja koji se nude na tržištu od strane poznatih tvrtki.

Prusa Mendel je najbolji primjer, prikazan na slici 4.17a, gdje je to bila prva realizacija, a na slici 4.17b je to posljednje izdanje, puno boljeg izgleda. Što se tiče njegovih karakteristika teško ih je izdvojiti, jer su podložne promjenama uslijed redovitih modifikacija i dorada. Može se reći, kako se sastoji od tristotinjak dijelova, od čega tridesetak 3D isprintanih, radni prostor je dimenzija  $200 \times 200 \times 270$  mm, a njegova okvirna cijena se kreće od 250 do 700 €, uz vlastiti rad sastavljanja. [70, 71]



a)Prusa Mendel i1 [70]



b)Prusa Mendel i3 [71]

Slika 4.17 Prusa Mendel



## **5. USPOREDBA 3D PRINTANJA ZA MAKERBOT REPLICATOR 2X I ULTIMAKER ORIGINAL**

Praktičan dio ovog diplomskog rada je usporedba dva niskobudžetna 3D printera, koji proizlaze iz skupine najpopularnijih i najzastupljenijih proizvođača niskobudžetnih 3D printera, a radi se o Ultimaker Originalu i Makerbot Replicatoru 2x. Sve njihove karakteristike biti će detaljno opisane, a za usporedbu njihovih performansi će poslužiti i odabrani referentni prototipovi, koji će se izraditi na oba niskobudžetna 3D printera. Usporedba njihovih performansi pokazati će nam koji od dva printera izrađuje kvalitetnije predmete, što je pretežno i najznačajnije njihovim korisnicima.

Proizvođač MakerBot Replicatora 2X je MakerBot Industries, američka tvrtka iz Brooklyna, New York, osnovana početkom 2009. godine. Veliki uspjeh u počecima dao je značajne doprinose u razvoju i unaprjeđenju njihovih proizvoda. Kupnjom 3DWorldWide-a, inovatora 3D tiskanih računalnih komponenti, 2010. godine tvrtka se nastavila širiti i povećavati fond stručnjaka. U kolovozu 2011. Foundry Group, tvrtka za ulaganje u perspektivna poduzeća, ulaže 10 milijuna dolara u MakerBot Industries. Svojim proizvodima privukli su i pozornost najvećih kompanija, te su u lipnju 2013. godine, kupljeni od Stratasys-a, jedne od svjetski najvećih i najboljih kompanija za aditivne tehnologija, za vrijednost od 400 milijuna \$ te postaju njihova podružnica. [72]

Za razliku od MakerBot Industries, Ultimaker BV je kompanija čije sjedište se nalazi u Europi, u Nizozemskoj, a osnovana je početkom 2011. godine. Temeljno sjedište tvrtke se nalazi u Utrechtu, gdje su bile radionice sklapanja samostalnih već postojećih niskobudžetnih 3D printera. Stečeno iskustvo, kao i nezadovoljstvo s postojećim printerima, rezultiralo je njihovim vlastitim proizvodima, koji su polučili značajan uspjeh kao i veliku popularnost. U početku su koristili prvi MakerBotov softver, Replicator-G, ali kasnije su se prebacili na softver Cura zbog bolje kompatibilnosti softvera s njihovim uređajima. Nakon pripajanja i zapošljavanja glavnih programera tog softvera, Cura je postao službeni softver svih njihovih niskobudžetnih 3D printera. [73]

U prethodnom poglavlju već su prikazane neke osnovne karakteristike najpopularnijih niskobudžetnih 3D printera (vidi 4.1 MakerBot Replicator 2X i 4.4 Ultimaker Original), a one se u tablici 5.1 mogu vidjeti radi međusobne usporedbe. Također su u tablici 5.1 navedene i još neke karakteristike uređaja, koje nisu toliko bitne ili su standardne. Ultimaker ima veći radni prostor, manjih je dimenzija, ali ujedno i teži. Brzina printanja je veća kod Ultimakera,

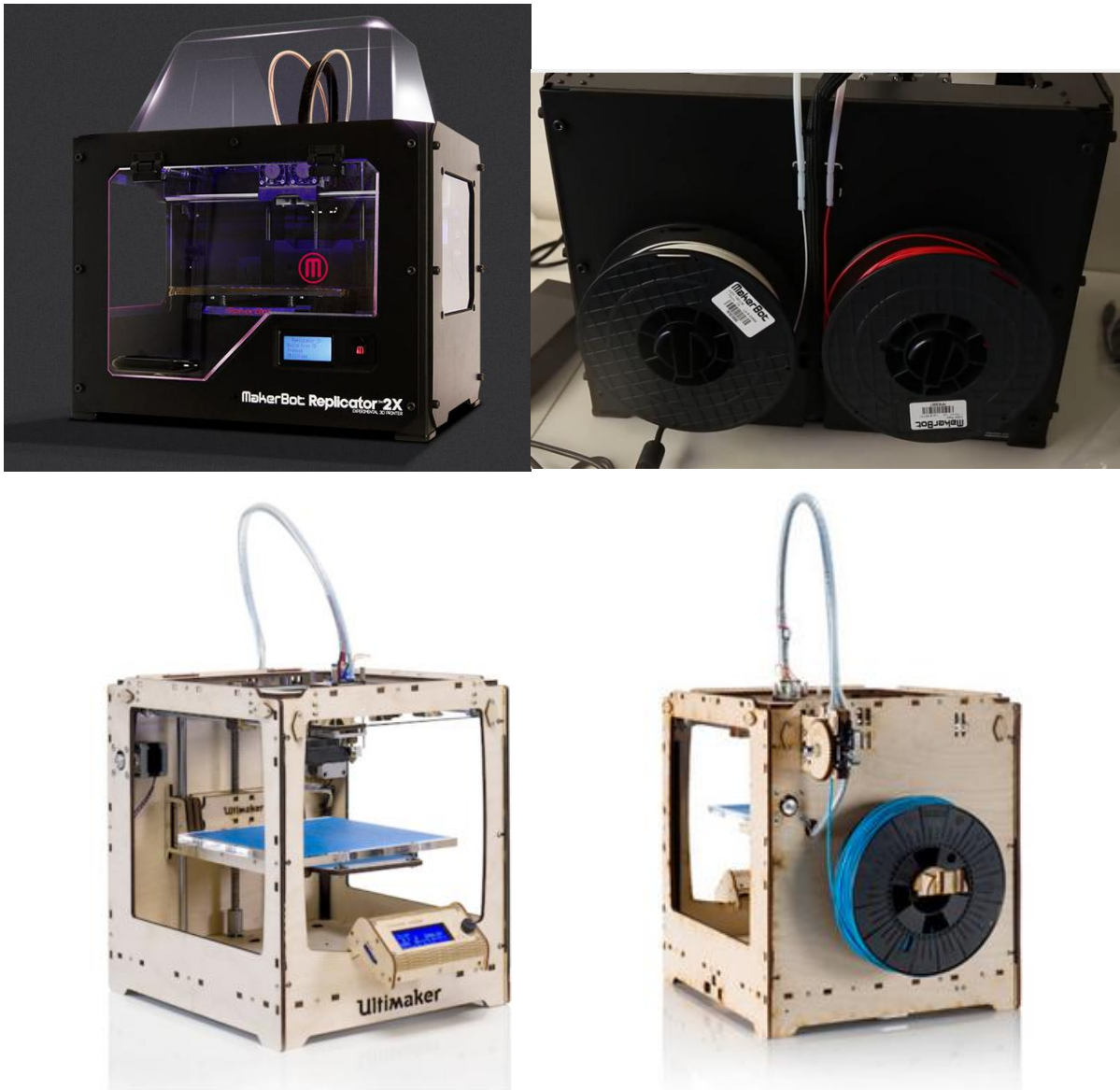
ali to nije presudno pogotovo kada su predmeti manjih dimenzija. Ultimaker postiže debljinu slojeva do 0,02 mm, ali u stvarnosti su teško ostvarive sve vrijednosti ispod 0,1mm. Mlaznice su istog promjera, ali je različiti promjer materijala (e. filament). Koriste softver svojih tvrtki Makerware i Cura, te oni podržavaju uglavnom iste standardne datoteke i namijenjeni su za iste standardne operativne sustave. Cijenom je Makerbot više nego duplo skuplji, ali je njegova velika prednost zatvorena radna komora, koja utječe na performanse i značajno poboljšava kvalitetu izrađenih predmeta. Od dodatnih značajki, oba uređaja rade na električnoj mreži od 100 – 240 V i 50 – 60 Hz, troše istu snagu, preporučena im je radna temperatura 15 - 32 °C, a temperatura skladištenja 0 - 32 °C. MakerBot ima nešto točnije pozicioniranje u sve tri osi (x,y,z).

Tablica 5.1 Usporedba značajki Makerbot Replicatora 2x i Ultimaker Originala [54, 74]

	<b>Makerbot Relicator 2x</b>	<b>Ultimaker Original</b>
Radni prostor	246 × 152 × 155 mm	210 × 210 × 205 mm
Brzina printanja	Standard 80 mm/s, i više	30 mm/s - 300 mm/s
Debljina slojeva	100 mikrometara(0,1mm)	20 mikrometara(0,02mm)
Preporučeni promjer materijala	1,75 mm	3 mm
Promjer mlaznice	0,04 mm	0,4 mm
Dimenzije printera	490 × 320 × 531 mm	357 × 342 × 388 mm
Masa	12,6 kg	21 kg
Softver	Makerbot Makerware	Cura
Prijenos podataka	SD mem. kartica, USB	SD mem. kartica, USB
Cijena	~ 2200 €	~1000 €
Ulazna električna energija	100 - 240 V, ~4 AMPS, 50 - 60 Hz	100 - 240 V, ~4 AMPS, 50 - 60 Hz
Snaga	24V DC @ 9.2 AMPS	24 V DC @ 9.2 AMPS
Točnost pozicioniranja (x,y)	11 mikrometara	12,5 mikrometara
Točnost pozicioniranja (z)	1,75 mikrometara	1,875 mikrometara
Radna temperatura okoline	15 - 32 °C	15 - 32 °C
Temperatura skladištenja	0 - 32 °C	0 - 32 °C
Vrste datoteka za softver	STL / OBJ / THING	STL / OBJ / DAE / AMF
Operativni sustav za softver	Windows, Mac OS X, Ubuntu Linux	Windows, Mac OS X, Ubuntu Linux

## 5.1 Izvedbe uređaja

Svaki od dva uređaja posjeduje neke svoje značajke definirane od strane proizvođača preko kojih se međusobno i razlikuju. Osim značajki, ona prva i najuočljivija razlika za većinu kupaca i korisnika niskobudžetnih 3D printera je njihov izgled i izvedba, prikazana slikom 5.1. Obzirom da je riječ o dva proizvoda iste namjene, ali od različitih proizvođača, razlika u vizualnom identitetu je uočljiva na prvi pogled.

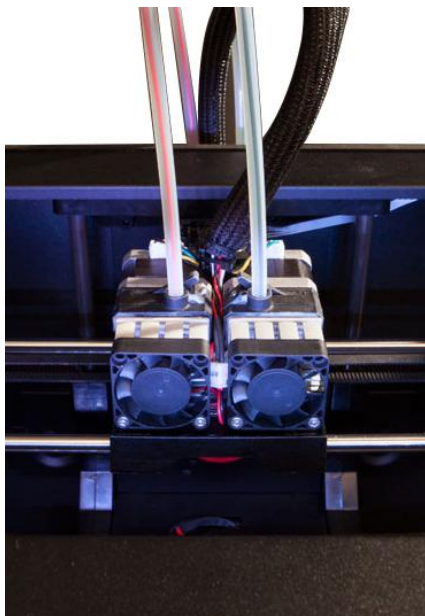


Slika 5.1 Izvedba MakerBot Replicator 2X i Ultimaker Original [54, 57]

MakerBot ima okvir, odnosno kućište napravljeno od plastificiranog čelika, dok je okvir Ultimakera napravljen od drveta. S prednje strane oba printera se nalazi upravljačka ploča, dok je materijal (e. filament) smješten sa stražnje strane i on se do ekstrudera dovodi odozgo. MakerBot ima mjesta za dva koluta s materijalom i tu se radi o printeru s dvije glave, koji

može ekstrudirati dva različita materijala, ili iste materijale samo različite boje što dovodi do većih mogućnosti printanja različitih predmeta, dok Ultimaker može ekstrudirati samo jedan materijal. Također, MakerBot je uređaj koji je prilikom printanja zatvoren sa svih strana, dok su strane Ultimakera otvorene, što je najznačajnija prednost njegove izvedbe, jer to omogućuje zadržavanje topline i doprinosi kvaliteti printanih predmeta.

MakerBot i Ultimaker se razlikuju i u izvedbi mehanizma za dostavu materijala. Kako je objašnjeno, mehanizam za dostavu materijala može biti izveden kao dio ekstrudera što je i slučaj kod MakerBota (slika 5.2a), ili kao zaseban mehanizam za dostavu materijala, što je slučaj kod Ultimakera, gdje se on nalazi sa stražnje strane malo iznad koluta s materijalom, (slika 5.2b). Obje izvedbe imaju svoje prednosti i nedostatke. Kada je mehanizam u sklopu ekstrudera, prednost je što se nalazi neposredno prije mlaznice te osigurava bolje dovođenje materijala, pogotovo ako se radi o krutim i krhkim materijalima, ali zauzvrat to povećava težinu samog ekstrudera. Elektromotori koji su dio ekstrudera zahtijevaju svoje ventilatore zbog zagrijavanja. Zasebni mehanizam za dostavu materijala je udaljen od ekstrudera i potiskuje materijal kroz savitljivu cijev, a to je nedostatak jer se ne nalazi izravno ispred mlaznice, pa može doći do grešaka prilikom dovođenja materijala. Na ovaj se način pak smanjuje težina ekstrudera, koji se može lakše i brže gibati, ali se vrlo kruti materijali teže printaju i za ovaj mehanizam su potrebni nešto jači motori.



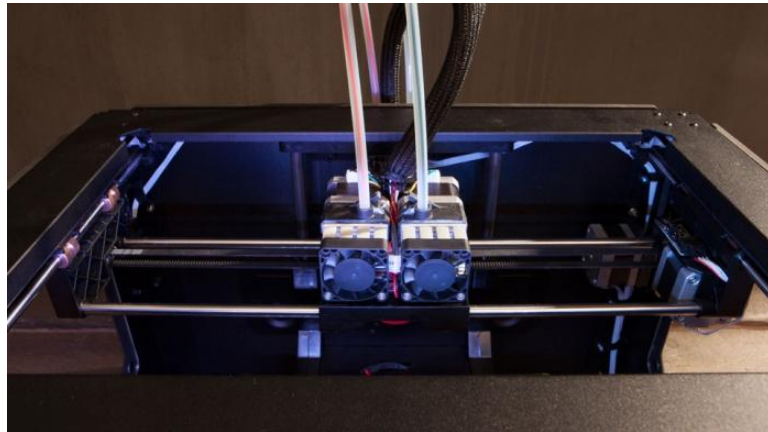
a)



b)

Slika 5.2 Izvedbe mehanizma za dostavu materijala a) MakerBota i b) Ultimakera [54, 57]

Prijenos i način ostvarenja gibanja je isti kod oba printera. MakerBot i Ultimaker imaju ekstruder koji se pomiče lijevo desno, odnosno naprijed nazad, tako da klizi preko osovine pokretan remenskim prijenosom. Ti smjerovi ekstrudera predstavljaju x i y osi gibanja. Radna podloga je postavljena na postolje, koje se giba u vertikalnom smjeru s pomoću navojnog vretena i to je gibanje u smjeru z osi. Razlikuju se u tome da ekstruder Ultimakera klizi po osovina postavjenim u križ (slika 5.3b), dok kod MakerBota ekstruder klizi preko dviju paralelno postavljenih osovina (H-oblik), prikazano slikom 5.3a.



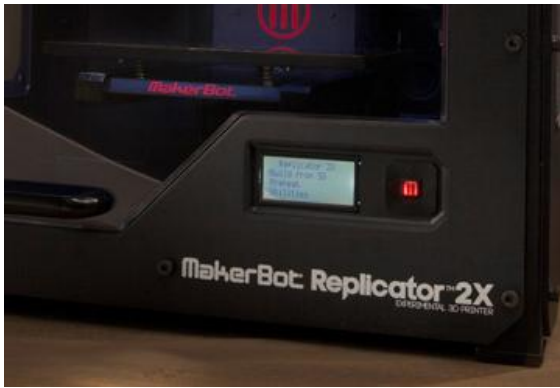
a)



b)

Slika 5.3 Prijenos i način gibanja ekstrudera a) MakerBota i b) Ultimakera [54, 57]

Upravljačka jedinica oba printera radi na sličnom načelu. Preko nje se može upravljati sa svom elektronikom, pokretati elektromotore za pomicanje ekstrudera, podloge, upravljati termoregulatorima, grijati podlogu ili mlaznicu, pokretati printanje ili zaustavljati, a na njoj se nalazi i utor za SD karticu kojom se prenose podatci za printanje predmeta, a može biti i izravno povezana s računalom. Na slici 5.4 se može vidjeti kako izgleda upravljačka ploča MakerBota i Ultimakera.



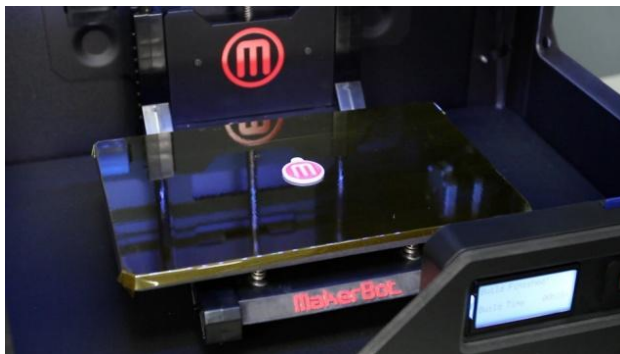
a)



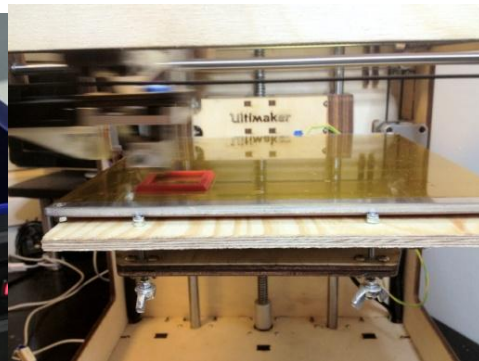
b)

Slika 5.4 Upravljačka ploča a) MakerBota i b) Ultimakera [54, 57]

Pri nabranjanju niskobudžetnih 3D printera i značajki navedeno je kako je radna površina MakerBota nešto manjih dimenzija ( $246 \times 152 \times 155$  mm) u odnosu na radnu površinu Ultimakera ( $210 \times 210 \times 205$  mm). MakerBot dolazi s radnom podlogom od aluminija koja je grijana i tako pogodna za materijale poput ABS-a, dok Ultimaker originalno dolazi sa staklenom radnom podlogom, koju je potrebno nadograditi s aluminijskom ukoliko se želi printati ABS. Kako njihove podloge izgledaju, prikazano je slikom 5.5 i također se vidi kako je na njima nalijepljena poliamidna kapton traka radi boljeg prianjanja.



a)



b)

Slika 5.5 Radne podloge a) MakerBota i b) Ultimakera [75,76]

Funkcionalnost oba uređaja je ista, printanje 3D predmeta, a prema opisanome vidi se koliko se međusobno razliku, kako je svaki proizvođač svome uređaju dao nešto, po čemu se razlikuje od drugih. Prema prikazanom ipak je najznačajnija razlika u zatvorenoj komori MakerBot Replicatora 2X što bi se trebalo očitovati u performansama printanja.

## 5.2 Softver (Makerbot Makerware i Cura)

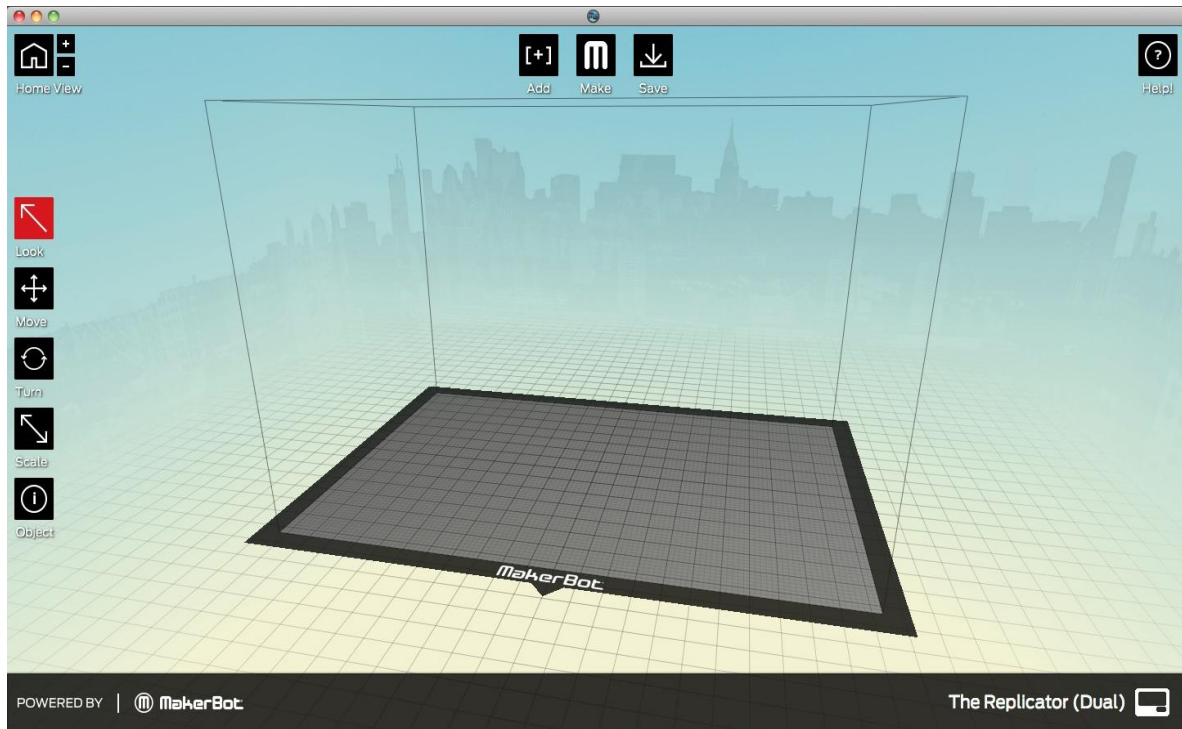
Makerbot Makerware i Cura su službeni softveri od strane MakerBota odnosno Ultimakera. To su računalni programi koji služe kao podrška u radu 3D printera. Oni olakšavaju printanje na način da sadrže sve što je potrebno za pripremu jednog 3D modela za 3D ispis, čime nastaje prototip. U načelu se vrlo lako instaliraju i jednostavni su za korištenje.

Kada se neki predmet želi 3D isprintati potrebno je njegov CAD model spremi u obliku STL datoteke, koja se najčešće koristi. Otvaranjem datoteke u softveru dobiva se prikaz kako će izgledati model na radnoj podlozi, te ga se može pomicati, rotirati i smjestiti onako kako najbolje odgovara. Programi omogućuju rezanje modela na slojeve i određivanje putanje ekstrudera, kako i na koji način će se slagati slojevi od početka do kraja. To je jedan oblik G-koda koji u sebi sadrži zapisane sve potrebne informacije za izradu predmeta.

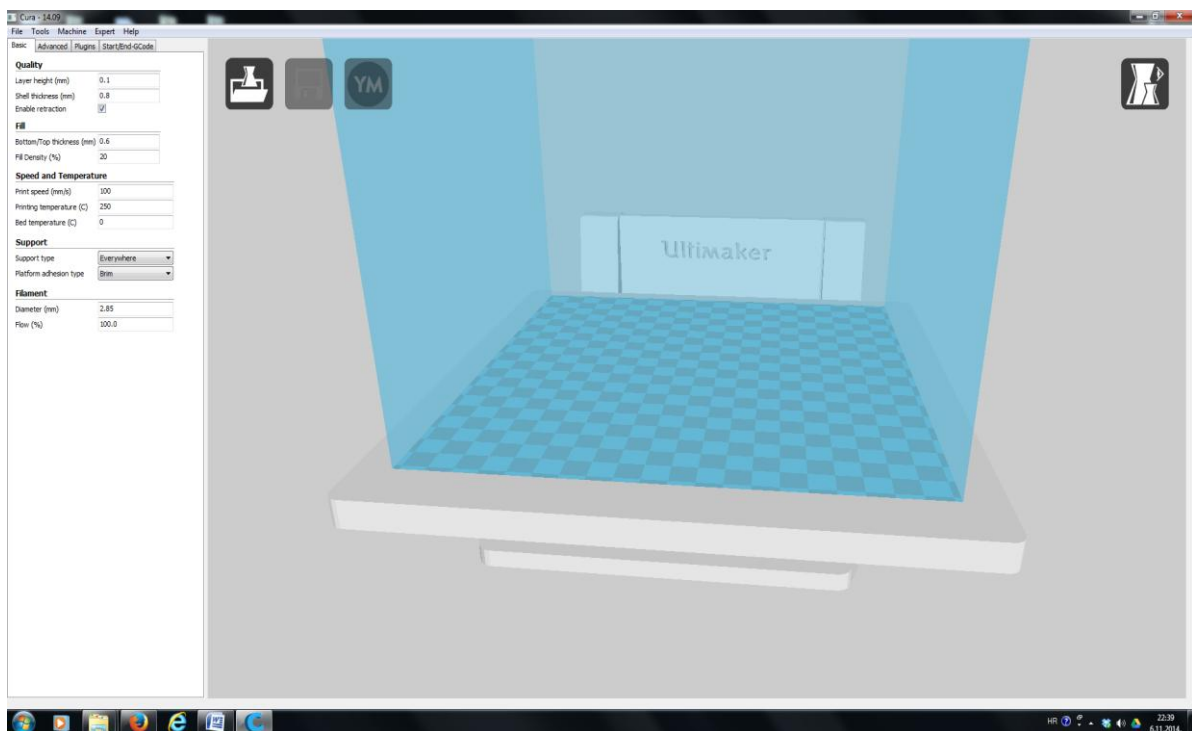
Softveri u svoj krajnjem zapisu sadrže i informacije koje su rezultat postavki zadanih u programu. Tako je u softveru definirano koliki je promjer mlaznice, koja će biti brzina printanja, rezolucija printanja, odnosna visina jednog sloja, koja će biti temperatura za taljenje materijala koji se koristi pri izradi, kolika će biti popunjenost predmeta (nema potrebe zbog uštede materijala da bude 100%), jesu li potrebne potporne strukture i kako će se one izvoditi, koliki je promjer materijala koji se koristi (e. filament), i još mnogo toga.

Kada je gotovo sa definiranjem svih postavki kreira se posebna datoteka, koji u sebi sadrži sve informacije za izvođenje 3D ispisa. Prenosjenjem i pokretanjem te datoteke na jednom niskobudžetnom 3D printeru započinje proces nastajanja željenog predmeta. Vrlo je bitno ugoditi i optimirati sve postavke u softveru, jer one imaju značajnu ulogu na izgled i izvedbu prototipa. Ponekad je za to potrebno malo traženja, metodom pokušaja i promišljanja u cilju postizanja najboljih rezultata.

Kako izgleda sučelje MakerBot Makerwarea prikazano je na slici 5.6, a kako izgleda sučelje Ultimakerove Curae prikazano je na slici 5.7. Oba su programa vrlo intuitivna i jednostavna za korištenje, a glavnu zadaću da generiranja ispravnih datoteka za 3D ispis ispunjavaju besprijekorno.



Slika 5.6 MakerBot Makerware



Slika 5.7 Cura (Ultimaker)



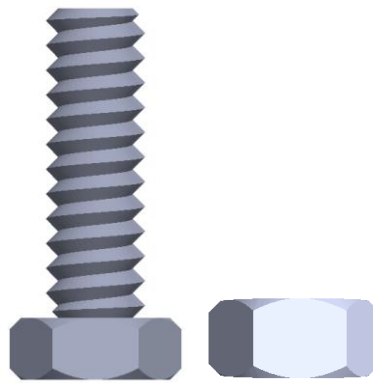
## 5.3 3D printanje referentnih prototipova

### 5.3.1 Referentni prototipovi

Referentni prototipovi su 3D modeli odabrani na temelju svojih karakterističnih značajki, koji će poslužiti u očitovanju pojedinih performansi 3D printanja. Usporedbom performansi na prototipovima, zaključeno je koji od uređaja daje bolje rezultate, MakerBot Replicator 2X ili Ultimaker Original.

#### 1. Vijak i matica

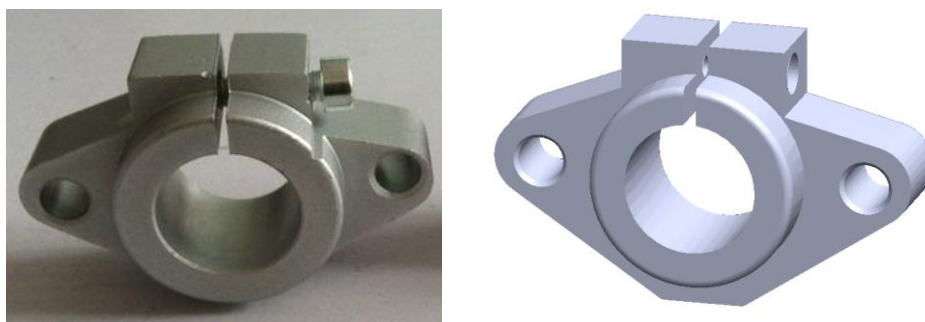
Odabrani su zbog primjera kompatibilnosti 3D printanja dvaju neovisnih predmeta u isto vrijeme na uređaju. Zračnost koja je definirana između matice i vijka u modelu iznosi 0,8 mm i treba osigurati povoljno odvijanje i zavijanje. Navoj vijaka i matice nije standardni već je generiran u 3D programu OpenSCAD, a prikaz 3D modela je na slici 5.8. [77]



Slika 5.8 Vijak i matica

#### 2. Držač osovina (SHF 16)

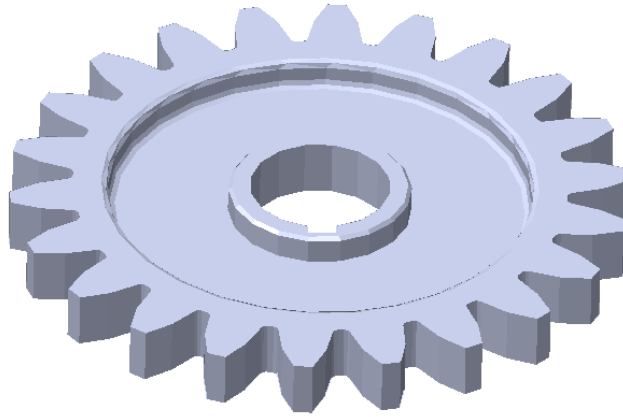
Ovaj element, trgovačkog naziva SHF 16 služi za pozicioniranje i učvršćivanje osovina. Najčešće se koristi pri izradi samostalnih CNC uređaja za osovine, koje predstavljaju osi gibanja i omogućuju da se klizni element preko njih giba. Kao 3D model je odabran zbog kružnih značajki različitih promjera u vertikalnom i horizontalnom smjeru, kao i uskog proreza. Kako izgleda stvarni element od aluminijske i 3D model prikazano je slikom 5.9.



Slika 5.9 Držač osovine (SHF 16) [78]

### 3. Zupčanik

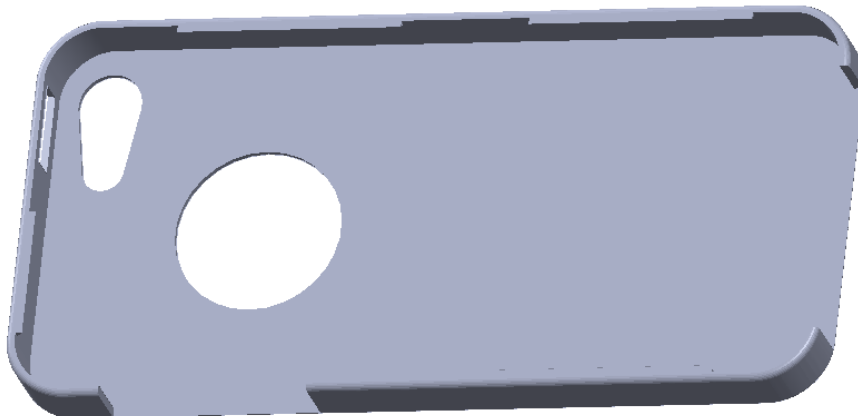
Strojni dio u obliku kotača s ravnomjerno raspoređenim zubima, a koristi za prijenos gibanja (rotacije) i snage (okretnog momenta). Zbog svoje zanimljive geometrije, kako kružnih površina, tako i profila boka zuba zupčanika u obliku evolvente, odabran je ovaj 3D model, koji se nalazi na slici 5.10. [79]



Slika 5.10 Zupčanik

### 4. Maska za mobitel

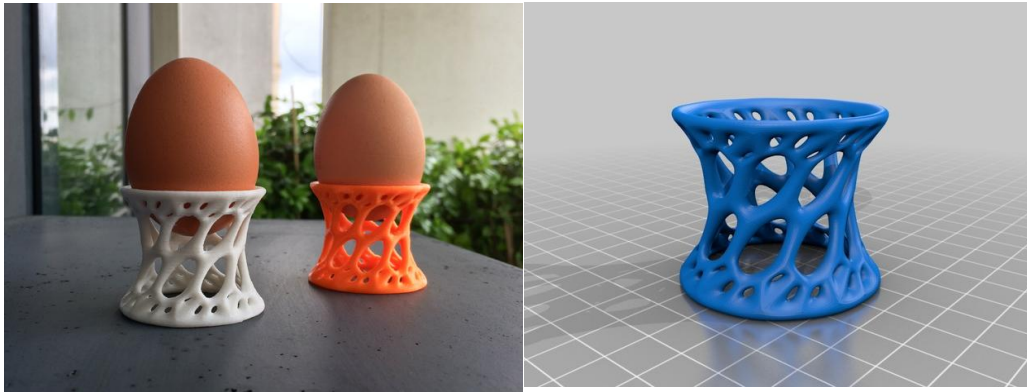
Maska za mobitel je jedan vrlo zanimljiv predmet koji se može 3D isprintati, a također je i vrlo popularan u primjeni, jer služi za zaštitu površina mobitela od ogrebotina, kao i od udara. Kao referentni 3D model je odabrana zbog zadovoljavanja standardnih dimenzija mobitela, u ovom slučaju se radi o modelu Apple iPhone 5 dimenzija  $123,8 \times 58,6 \times 7,6$  mm, a prikaz modela se nalazi na slici 5.11. [80]



Slika 5.11 Maska za mobitel (Apple iPhone 5)

## 5. Posuda (stalak)

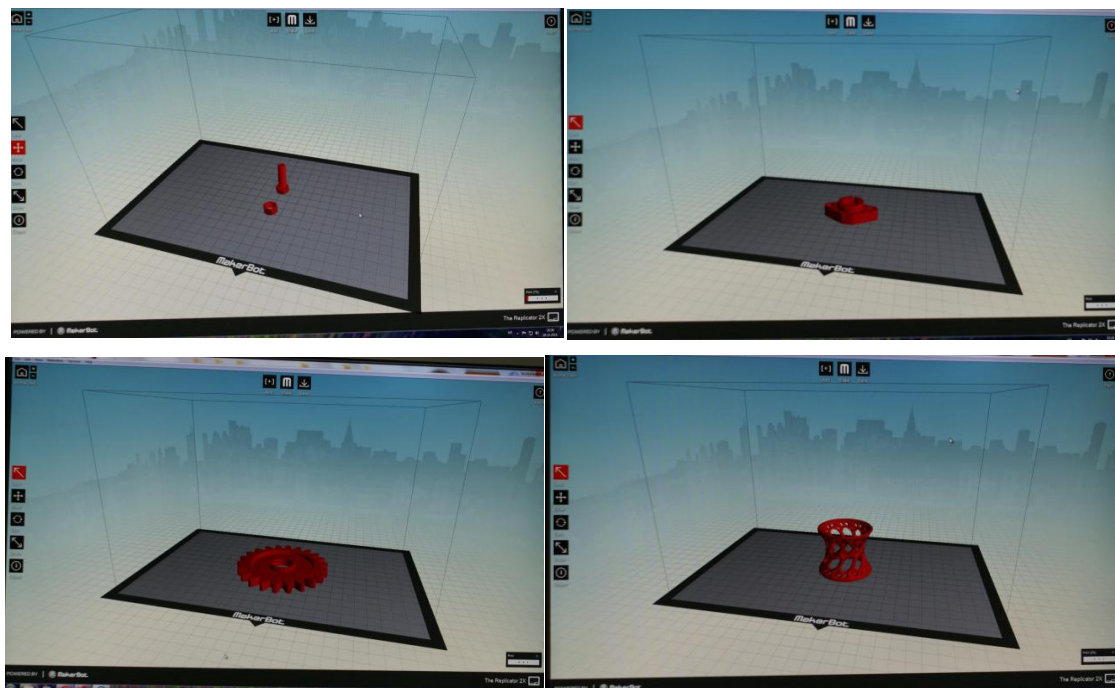
Ova predmet odabrana je zbog svoje kompleksne i zahtjevne geometrije. Predmet oblika šupljeg valjka koji se sužava prema sredini s mnoštvom rupica različitih veličina i nepravilnog oblika. Sama posuda odnosno stalak može služiti za serviranje tvrdo kuhanog jaja, a kako to izgleda kao i model prikazano je slikom 5.12. [81]



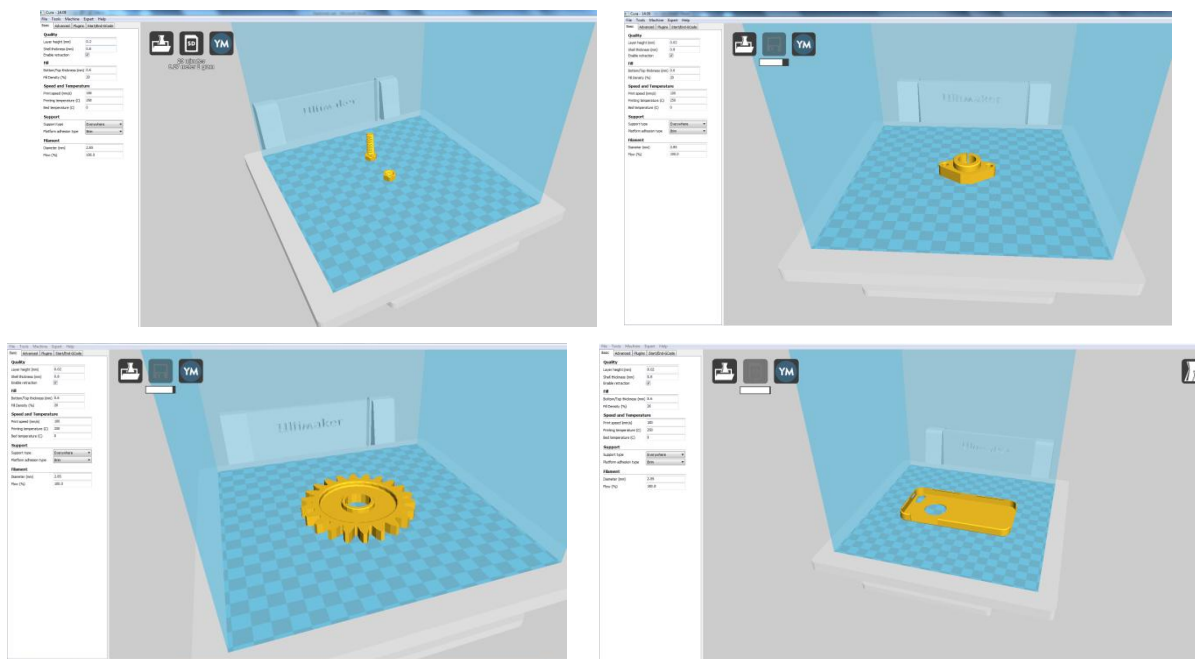
Slika 5.12 Posuda (stalak) [81]

### 5.3.2 Softverska priprema modela za 3D printanje

S definiranim referentnim prototipovima i njihovim 3D modelima pristupa se pripremi za 3D printanje u softveru. Modeli pohranjeni u obliku STL datoteka učitani su u softver pojedinog uređaja: MakerBot Makerware i Cura. Kako to izgleda za MakerBot nalazi se na slici 5.13, a na slici 5.14 za Ultimaker. U softveru se modeli pozicioniraju i orijentiraju, te im se definiraju potrebne postavke 3D printanja.



Slika 5.13 Pripremanje prototipova za 3D printanje u MakerBot Makerware



Slika 5.14 Pripremanje prototipova za 3D printanje u Cura

Što se tiče osnovnih općih postavki za 3D printanje prototipova, one su prikazane u tablici 5.2. Može se istaknuti kako su prototipovi izvođeni s debljinom slojeva od 0,2 mm na oba uređaja, gustoćom ispune 20 % jer je to dovoljno za zadovoljavanje svih svojstava i radi uštede samog materijala, a temperatura mlaznice za taljenje ABS-a je iznosila 240 °C (to je standardna vrijednost za njegovo printanje). Temperatura podloge za MakerBot je bila 106 °C, dok je za Ultimaker bila 110 °C što spada u preporučene vrijednosti za ABS, a brzina printanja odnosno brzina gibanja ekstrudera je kod MakerBota iznosila 70 mm/s, dok je kod Ultimakera iznosila 100 mm/s. Također, u programima su i definirane neke značajke poput promjera mlaznice i promjera materijala i one su zapravo značajke samog niskobudžetnog 3D printera.

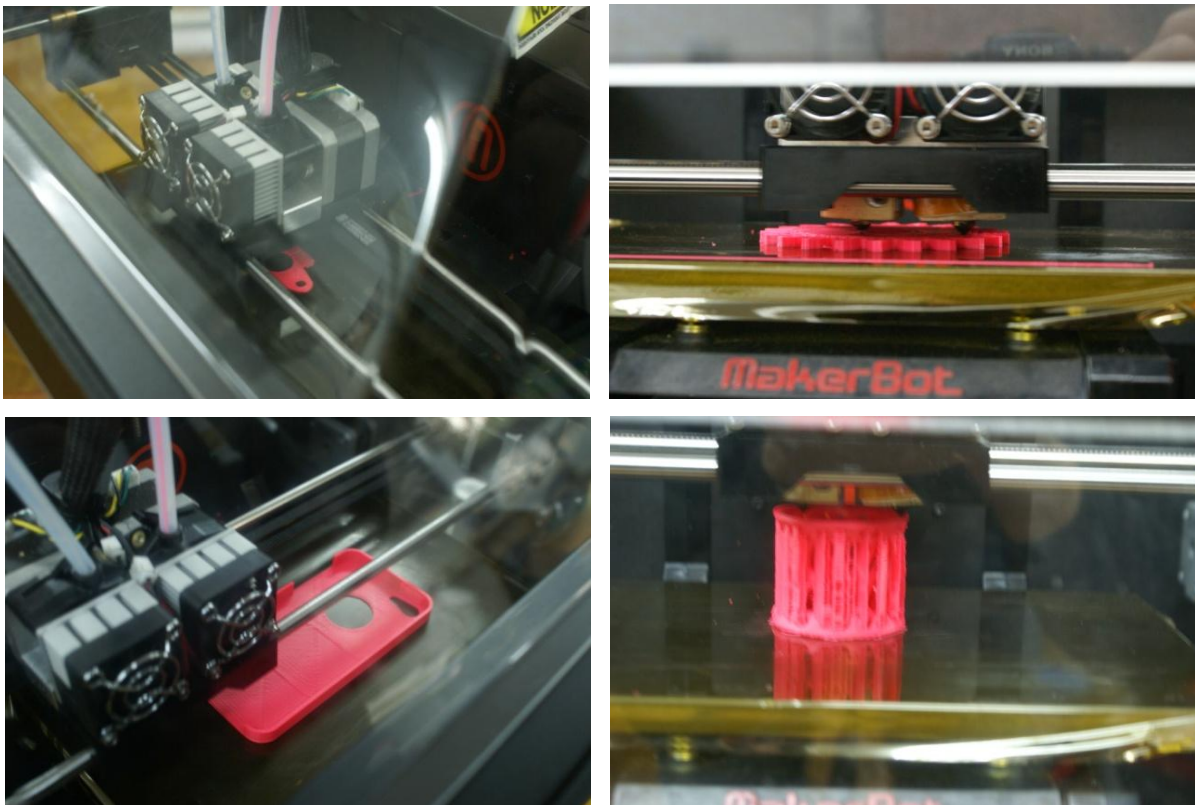
Tablica 5.2 Postavke za 3D printanje referentnih prototipova

	<b>MakerBot Makerware (MakerBot Replicator 2X)</b>	<b>Cura (Ultimaker Original)</b>
Debljina sloja	0,2 mm	0,2 mm
Temperatura materijala	240 °C	240 °C
Temperatura podloge	106 °C	110 °C
Brzina printanja	70 mm/s	100 mm/s
Gustoća ispune	20 %	20 %

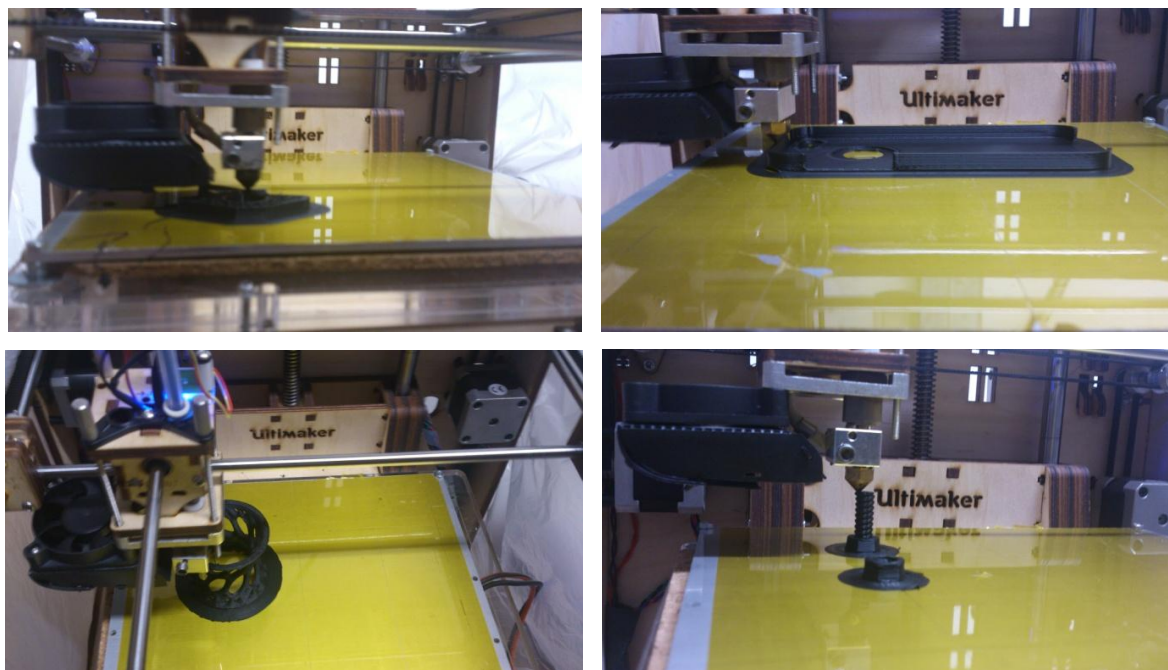
### 5.3.3 3D printanje

Proces nastajanja prototipa započinje pokretanjem printanja izravno iz softvera na računalo povezanim s 3D printerom putem USB konektora ili prenošenjem posebne datoteke za 3D printanje putem SD memorijske kartice i njenim pokretanjem preko upravljačke ploče 3D printera. Kako izgleda proces 3D printanja i nastajanja predmeta na MakerBot Replicatoru 2x prikazano je slikom 5.15, a kako to izgleda na Ultimaker Originalu slikom 5.16.

Za Ultimaker se može primijetiti kako predmeti imaju mali obrub, a on služi kako bi osigurao dovoljno dobro prianjanje predmeta za podlogu jer Ultimaker ne posjeduje zatvorenu grijanu komoru koja je i patentom zaštićena od strane Strasysa, te bi se vrlo lako moglo dogoditi da prilikom printanja dođe do odvajanja predmeta od podloge što bi rezultiralo škartom. Po završetku 3D printanja može se još izvoditi naknadna obrada, sa ciljem smanjenja hrapavosti ili skidanja dodatnog materijala koji služi kao potporna struktura.



5.15 3D printanje na MakerBot Replicatoru 2X



Slika 5.16 3D printanje na Ultimaker Originalu

Po završetku 3D printanja na upravljačkoj ploči oba uređaja ostaje podatak koliko je trajalo 3D printanje za svaki referentni prototip. Vrijeme potrebno za izradu pojedinog prototipa može se smatra kao glavna mjera brzine za niskobudžetne 3D printere. Vremena 3D printanja za svaki prototip dana su u tablici 5.3. Može uočiti kako je kod malih predmeta MakerBot nešto malo brži u odnosu na Ultimaker, što je slučaj za vijak i maticu gdje razlika iznosi 6 minuta, dok je kod ostalih predmeta, Ultimaker brži u odnosu na MakerBot, pogotovo u slučaju zupčanika, gdje razlika iznosi 18 minuta. Softverskim postavkama se može malo utjecati na vrijeme trajanja 3D printanja, ali zaključak je kako je Ultimaker brži 3D printer pogotovo su osjetne razlike kod predmeta koji su većeg volumena.

Tablica 5.3 Vrijeme printanja pojedinih referentnih prototipova

Referentni prototip	MakerBot Replicator 2X	Ultimaker Original
Vijak i matica	20 minuta	26 minuta
Držač osovine (SHF 16)	33 minute	31minuta
Zupčanik	83 minute (1h 23min)	55 minuta
Maska za mobitel (iPhone 5)	45 minuta	39 minuta
Posuda-stalak	110 minuta (1h 50min)	93 minute (1h 33min)

## 5.4 Usporedba performansi pri izvedbi referentnih prototipova

U ovome dijelu usporediti će se na temelju nastalih prototipova kakve performanse pruža pojedini niskobudžetni 3D printer. Jedna performansa je već uspoređena, vrijeme trajanja izrade pojedinog referentnog prototipa, što je glavna mjera brzine niskobudžetnih 3D printera. Još su razmatrane: izvedba samih prototipova, koliko je odstupanje od nominalnih dimenzija odnosno koliki je iznos skupljanja, jesu li zadovoljene tražene dimenzije, kakva je hrapavost završne površine te hrapavost bočne površine iz koje se očituje slojevitost i provjeravana je tvrdnja Ultimakera da mogu printati predmete s debljinom sloja u iznosu od 0,02 mm što je poprilično mala vrijednost.

### 5.4.1 Izvedba samih prototipova

Pod izvedbom samih prototipova uspoređivat će se njihov vizualni izgled, očituju li se na nastalim predmetima neke značajne greške, jesu li ostvareni svi referentni prototipovi u onome obliku kako izgledaju njihovi 3D CAD modeli.

Vijak i matica su odabrani zbog ove usporedbe, prikazuju mogućnost postizanja unutarnjeg i vanjskog navoja, a također je potrebno da ta dva predmeta budu međusobno kompatibilna, odnosno, da se matica po vijku može odvijati i zavijati bez poteškoća. Na slici 5.17 je prikaz vijka i matice nastalih na MakerBotu i radi mogućnosti rada s dva ekstrudera za primjer su printani istovremeno, ali u različitim bojama. Vijak i matica Ultimakera se nalaze na slici 5.18a printani su istovremeno, ali u jednoj boji. Kompatibilnost vijka i matice je zadovoljena na oba 3D printera i bez poteškoća se mogu odvijati i zavijati. Što se samog izgleda prototipova tiče, može se vidjeti kako glava vijka i matica Ultimakera imaju blagi nagib bočnih stranica prema donjim površinama, a trebali bi zapravo biti okomiti i to se može smatrati manjom pogreškom.

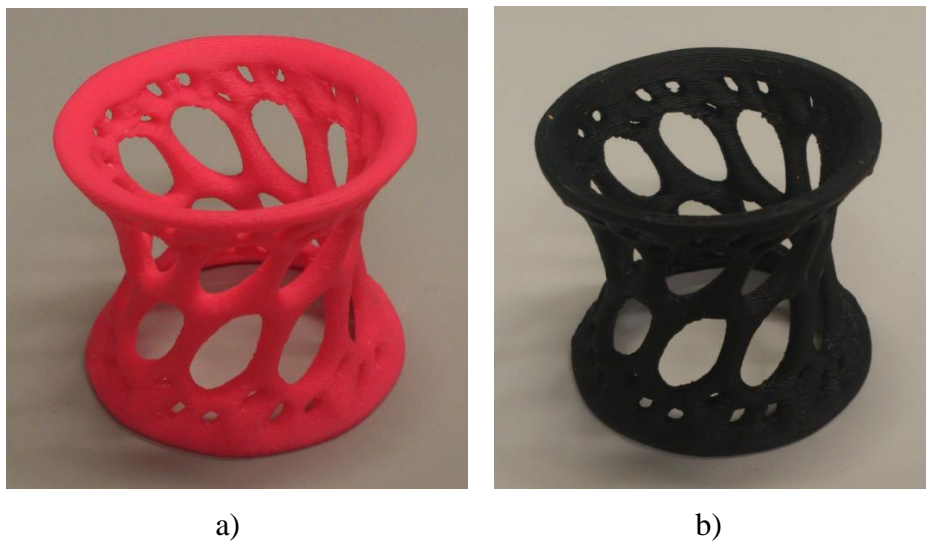


Slika 5.17 Vijak i matica MakerBota



Slika 5.18 Vijak i matica Ultimakera

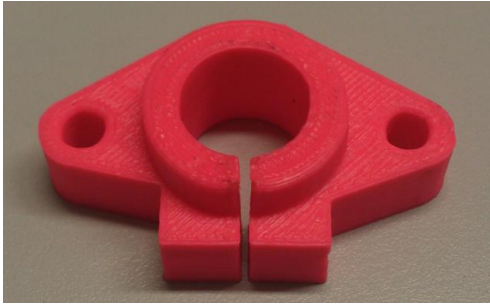
Posuda-stalak je geometrijski najzahtjevniji predmet za 3D printanje, sadrži mnoštvo rupica nepravilnog oblika i različitih veličina kroz cijeli predmet, kao i oblik šupljeg valjka koji se sužava u sredini. Ovaj prototip je odabran zbog svoje kompleksnosti i ostvaren je vrlo dobro na oba uređaja. Na nekim mjestima može se primijetiti manji zaostatak materijala zbog potpornih struktura, ili je negdje veća izraženosti pojedinih slojeva, ali oni se naknadnom obradom mogu odstraniti. Slikom 5.19a je prikazana posuda-stalak 3D isprintana na Makerbotu, a slikom 5.19b na Ultimakeru.



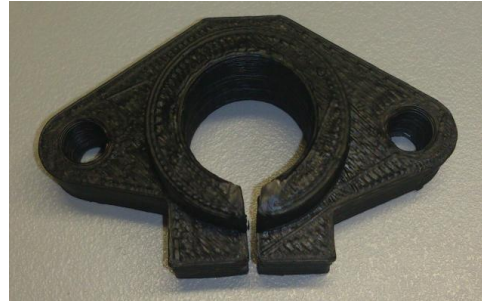
Slika 5.19 Posuda-stalak a) MakerBota i b) Ultimakera

Od ostalih predmeta, držač osovine (SHF 16), prikazan na slici 5.20, izveden relativno dobro, osim što se uski prorez u visinu malo počeo širiti, za nijansu manje kod MakerBota (slika 5.20a) u odnosu na Ultimaker (slika 5.20b). Maska za mobitel (slika 5.21) kao i zupčanik (slika 5.22) su vizualno ostvareni odlično na oba uređaja.





a)

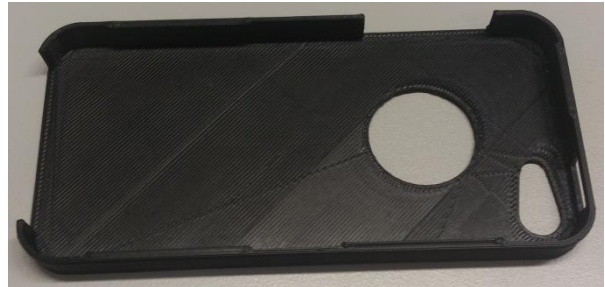


b)

Slika 5.20 Držač osovine (SHF 16) a) MakerBota i b) Ultimakera



a)



b)

Slika 5.21 Maska za mobitel (iPhone 5) a) MakerBota i b) Ultimakera



a)



b)

Slika 5.22 Zupčanik a) MakerBota i b) Ultimakera

#### 5.4.2 Odstupanje od dimenzija i skupljanje

Usporedba postizanja zadanih dimenzija koje su određene samim 3D CAD modelom. Očekivano je i manje skupljanje, pa je izračunato koliki je postotak skupljanja za dimenzije koje su mjerene, što je značajan faktor 3D printanja, pogotovo ako se žele postizati predmeti s uskim tolerancijama.

Mjerenja su izvedena na trokoordinatnom mjernom uređaju Ferranti 750, prikazan slikom 5.23. Uređaj posjeduje mjerno područje dimenzija  $750 \times 500 \times 500$  mm, rezolucija je  $0,1 \mu\text{m}$ , proširena mjerna nesigurnost  $U = 5 \mu\text{m}$  (uz  $k = 2$ ). Mjerna glava je Renishaw PH10, a mjerni sustav ticala je Renishaw TP20. Mjerenje se izvodi ticalom koje registrira svaki dodir i mjesto dodira bilježi kao jednu točku.



Slika 5.23 Trokoordinatni mjerni uređaj Ferranti 750

Za prvo mjerenje odabran je referentni prototip zupčanik, a dimenzija koja se mjerila je njegov unutarnji promjer  $D_{uz}$ . Za svaki pojedini prototip izvodilo se po pet mjerenja, a jedno mjerenje se sastojalo od dvadeset točaka. Točke su nasumice nabadane ticalom po cijelom promjeru. Na temelju očitanih točaka, softver na računalu je prepoznavao geometriju i kao krajnji rezultat izbacio bi koliko iznosi promjer očitane kružnice koja aproksimira sve točke. Dobiveni rezultati predstavljaju stvarnu vrijednost i služe za daljnju usporedbu, te koliko se

razlikuju od nominalne, definirane dimenzije. Kako je izgledao postupak mjerenja prikazano je slikom 5.24.



Slika 5.24 Mjerenje unutarnjeg promjera zupčanika

Rezultati mjerenja su očitani i zabilježeni te se nalaze prikazani u tablici 5.4. Nominalna vrijednost promjera zupčanika iznosi 20 mm i u odnosu na nju više odstupa srednja izmjerena vrijednost zupčanika Ultimakera, iako razlika u odnosu na onaj od MakerBota nije velika. Za zupčanik MakerBota razlika nominalne i srednje vrijednosti mjerenja iznosi 0,679 mm, dok za Ultimakerov 0,764 mm. U tablici je i mjera rasipanja, što se smatra pogreškom mjerenja.

Tablica 5.4 Mjerenje unutarnjeg promjera zupčanika

Unutarnji promjer zupčanika $D_{uz} = 20$ mm		
Mjerenje	MakerBot Replicator 2X	Ultimaker Original
1	19,321	19,202
2	19,309	19,353
3	19,287	19,249
4	19,388	19,184
5	19,298	19,19
$\overline{D_{uz}}$	19,321	19,236
$D_{uz} - \overline{D_{uz}}$	0,679	0,764
$s$	0,040	0,070

Za drugo mjerenje je odabran referentni prototip držač osovina (SHF 16) i njegov promjer  $D_o$ , odnosno promjer osovine koju on prihvaća. Načelo mjerenja je bilo isto kao i kod zupčanika, pet mjerenja po dvadeset točaka, koje su ticalom nabadane po cijelom promjeru. Softver na računalu je interpretirao točke i kao krajnji rezultat izbacio promjer kružnice koja aproksimira sve točke. Kako je izgledalo mjerenje na trokoordinatnom mjernom uređaju prikazano je slikom 5.25



Slika 5.25 Mjerenje promjera držača osovine (SHF 16)

Očitavanjem i zapisivanjem se došlo do rezultata prikazanih tablicom 5.5. Ovdje je vidljivo kako se radi o značajnijoj razlici u odnosu na nominalnu veličinu na držaču Ultimakeru. Srednja izmjerena vrijednost promjera na držaču 3D isprintanom na Ultimakeru se razlikuje za 1,174 mm što je poprilična razlika, dok je za MakerBot razlika 0,628 mm i razlika je slična kao i za mjerenje promjera zupčanika. U tablici su još prikazana i rasipanja rezultata.

Tablica 5.5 Mjerenje promjera držača osovine (SHF 16)

Promjer držača osovina (SHF 16) $D_o = 16$ mm		
Mjerenje	MakerBot Replicator 2X	Ultimaker Original
1	15,308	14,666
2	15,278	14,683
3	15,497	14,879
4	15,461	14,913
5	15,316	14,989
$\overline{D_o}$	15,372	14,826
$D_o - \overline{D_o}$	0,628	1,174
$s$	0,100	0,144

Treće mjerenje odrađeno na trokoordinatnom uređaju je bila debljina držača (SHF 16). Mjerenje se izvodilo na način da se uzimalo petnaest točaka jedne površine, na temelju kojih bi softver generirao ravninu i zatim petnaest točaka druge površine na temelju kojih bi softver

generirao drugu ravninu, te izračunao koliko iznosi udaljenost između dviju ravnina. Izvršeno je ukupno pet takvih mjerenja. Kako je izgledalo mjerenje prikazano je slikom 5.26, kao i izgled softvera koji je izbacivao rezultate mjerenja.



Slika 5.26 Mjerenje debljine držača osovine (SHF 16)

Očitani i zabilježeni rezultati ovog mjerenja prikazani su u tablici 5.6. Vrlo zanimljiv rezultat mjerenja, koji pokazuje kako je srednja vrijednost debljine držača 3D isprintanog na MakerBotu veća od nominalne vrijednosti za 0,145 mm, dok je srednja vrijednost Ultimakerovog držača manja od nominalne i razlika iznosi 0,220 mm. Ovdje nije došlo do skupljanja i smanjenja dimenzije što može biti od velikog značaja, jer ostavlja mogućnost za postizanje nominalne dimenzije koja iznosi 10 mm. U tablici su još prikazana i rasipanja rezultata, koja su ovdje poprilično mala.

Tablica 5.6 Mjerenje debljine držača osovine (SHF 16)

Debljina držača osovine (SHF 16) $H_d = 10$ mm		
Mjerenje	MakerBot Replicator 2X	Ultimaker Original
1	10,141	9,781
2	10,145	9,771
3	10,139	9,781
4	10,148	9,793
5	10,15	9,774
$\overline{H_d}$	10,145	9,780
$H_d - \overline{H_d}$	-0,145	0,220
$s$	0,005	0,008

Nakon provedenih mjera na trokoordinatnom mjernom uređaju, te usporedbi s nominalnim vrijednostima, za kraj se može analizirati tablica 5.7, gdje je prikazan iznos skupljanja pojedinih predmeta za svaku mjerenu dimenziju, uzimajući u obzir srednju izmjerenu vrijednost. MakerBot Replicator 2X pruža bolje rezultate u odnosu na Ultimaker Original, svi prototipovi imaju manje razlike u odnosu na nominalne vrijednosti, a to se pogotovo očituje računanjem postotka skupljanja. Vidi se i kako je u slučaju promjera držača osovine skupljanje značajno kod Ultimakera, a za debljinu držača MakerBot ne pokazuje skupljanje već postiže dimenziju veću od nominalne čime se pruža mogućnost da se nekom od naknadnih obrada postigne nominalna dimenzija.

Tablica 5.7 Skupljanje prilikom 3D printanja

Mjerena dimenzija	MakerBot Replicator 2X	Ultimaker Original
Unutarnji promjer zupčanika ( $D_{uz} = 20 \text{ mm}$ )	3,40 %	3,82 %
Promjer držača osovina (SHF 16) ( $D_o = 16 \text{ mm}$ )	3,93 %	7,34 %
Debljina držača osovina (SHF 16) ( $H_d = 16 \text{ mm}$ )	-1,45 %	2,20 %

#### 5.4.3 Zadovoljavanje traženih dimenzija

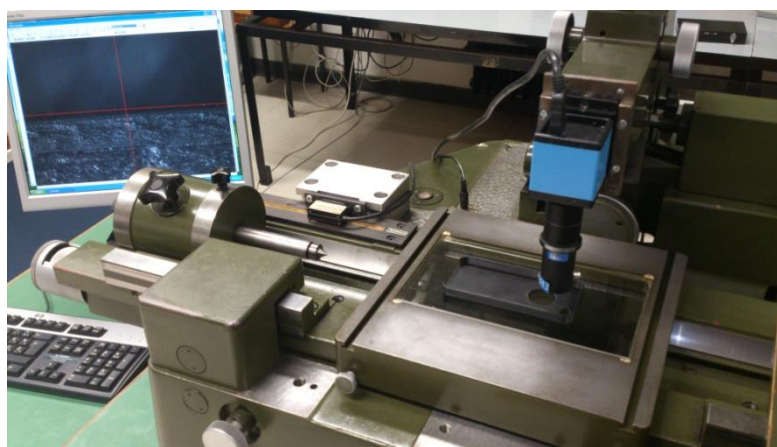
U ovome dijelu razmatrano je zadovoljavanje traženih dimenzija. Maska za mobitel je referentni prototip koji će poslužiti upravo za usporedbu u ovome slučaju. Maska je namijenjena za mobitel iPhone 5, čije su standardne dimenzije prema specifikacijama proizvođača  $123,8 \times 58,6 \times 7,6 \text{ mm}$ . Radi se o preuzetom STL modelu i koji bi nakon 3D printanja trebao pristajati na mobitel.

Mjerenja su izvođena na alatnom mikroskopu Zeiss, retrofit LFSB-a. Njegovo je mjerno područje je  $150 \times 200 \text{ mm}$ , rezolucija mu iznosi  $0,1 \mu\text{m}$ , a proširena mjerna nesigurnost  $U = (0,2 + 3,8 L) \mu\text{m}$ , za iznos  $L$  u metrima. Prilikom snimanja je korištena CCD kamera s 2 MPx i telecentrični objektiv sa varijabilnim uvećanjem. Optička razlučivost za mjerenje je iznosila  $1 \mu\text{m}$ . Kako izgleda uređaj za mjerenje prikazano je slikom 5.27.



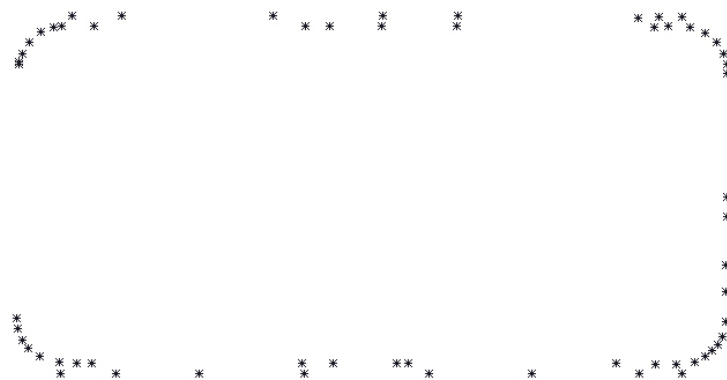
Slika 5.27 Alatni mikroskop

Načelo mjerenja na ovom uređaju je da se pozicioniranjem predmeta u odnosu na kameru uzimaju točke koje se bilježe u softveru na računalu. Uzimanjem točaka dolazi se do konture maske za mobitel, jer se po završetku mogu obraditi i na temelju njih se dobivaju linije koje približno odgovaraju profilu maske mobitela. Za svaku masku je u svrhu utvrđivanja i snimanja profila snimljeno više od šezdeset točaka. Kako je izgledalo mjerenje prikazano je slikom 5.28.

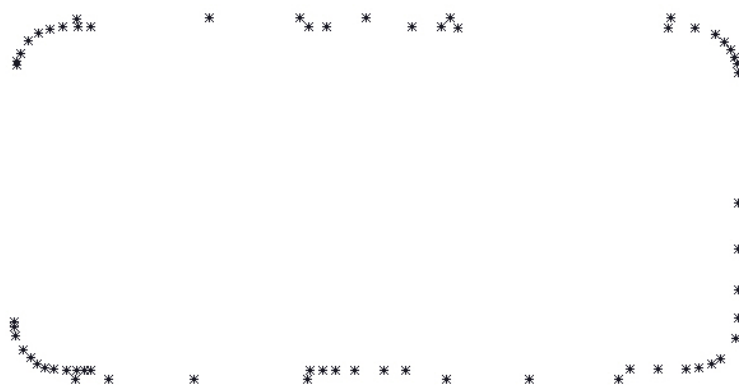


Slika 5.28 Snimanje profila maske mobitela (iPhone 5)

Po završetku snimanja točaka prelazi se na softversku obradu točaka koji prikazuje kako snimljene točke izgledaju u ravnini. Na slici 5.29 je prikaz točaka prikupljenih za masku 3D isprintanu na Makerbotu, dok je na slici 5.30 prikaz točaka prikupljenih za masku 3D isprintanu na Ultimakeru.

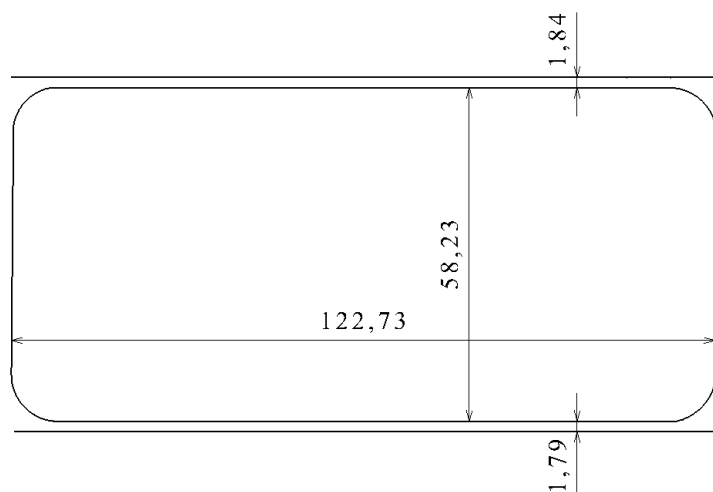


Slika 5.29 Prikupljene točke profila maske za mobitel 3D isprintane na MakerBotu



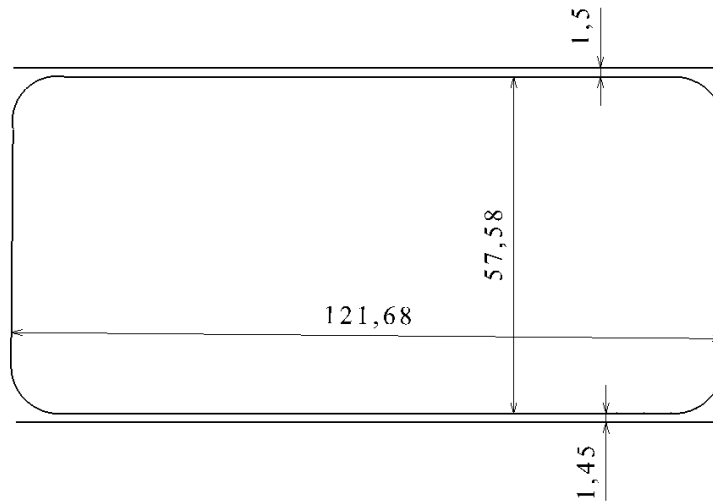
Slika 5.30 Prikupljene točke profila maske za mobitel 3D isprintane na Ultimakeru

Obradom u za to odgovarajućim softverima, točke se aproksimiraju odgovarajućom linijom čime se dolazi do profila maske za mobitel. Nakon obrade se i mogu kotirati dimenzije i uspoređivati međusobno kao i s dimenzijama koje je potrebno postići. Slika 5.31 prikazuje unutarnji profil maske za mobitel 3D isprintane na MakerBotu, a slika 5.32 masku Ultimakera. Na slikama se nalaze kote dužine i širine te debljine bočnih strana maske.



Slika 5.31 Dimenzije profila maske 3D isprintane na MakerBotu





Slika 5.32 Dimenzije profila maske 3D isprintane na Ultimakeru

Na temelju dimenzija, može se usporediti odgovaraju li maske svome mobitelu. Dimenzije dužine i širine mobitela su  $123,8 \times 58,6$  mm. MakerBot i u ovome slučaju pokazuje manje skupljanje i rezultate bliže traženim vrijednostima. Njegove su dimenzije  $122,7 \times 58,23$  mm, što je razlika za 1,1 mm u dužini i 0,37 mm u širini, dok su na Ultimakeru dimenzije za masku ispale  $121,68 \times 57,58$  mm, što je razlika od 2,02 mm u dužini i 1,02 mm u širini.

STL model maske za mobitel je imao poprilično uske tolerancije, te bi vjerojatno mobitel teško stao u ove maske, možda bi se naknadnom obradom to moglo ostvariti za masku isprintanu na MakerBotu. Inače, ukoliko se želi 3D printati ovakav tip predmeta, preporuča se da se strogo vodi računa o skupljanju i smanjenju dimenzija, jer u protivnom neće biti kompatibilni s onime za što su namijenjeni.

#### 5.4.4 Usporedba hrapavosti prototipa

U ovome dijelu je uspoređivana hrapavost površina 3D tiskanih predmeta, kako bi dobio uvid u kvalitetu površine koju svaki od uređaja može postići. Osim hrapavosti posljednje površine koju uređaj nanosi prilikom 3D printanja predmeta, promatrana je i hrapavost bočne površine kako bi se utvrdilo ostvaruju li uređaji zadane slojeve od 200 mikrometara (0,2 mm).

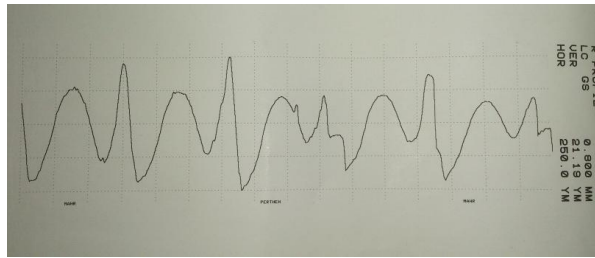
Mjerenje hrapavosti izvedeno je na uređaju MAHR Perthometer S8P laboratorija za precizna mjerenja dužina. Kako jedan takav uređaj izgleda prikazano je slikom 5.33. Radi na načelu da svojim ticalom prelazi preko površina predmeta i šalje signale mjerenja središnjoj procesorskoj jedinici, koja ih obrađuje i daje grafički prikaz karakteristika površine kao i parametara hrapavosti.



Slika 5.33 MAHR Perthometer S8P [82]

Za usporedbu mjerenja je odabran referentni prototip držač osovine (SHF 16). Zbog hrapave površine ticalu je trebao veći put nego što je imao, ali s obzirom da se radi o usporedbi istih predmeta, s istim uvjetima mjerenja, rezultati su prihvatljivi. Iz pet ponovljenih mjerenja dobiveni su rezultati grafičkog prikaza profila i parametri hrapavosti za MakerBot (slika 5.34) i Ultimaker (slika 5.35). Parametri koje uređaj daje su  $R_{max}$  (najveća visina jednog profila na duljini),  $R_z$  (prosječna visina neravnina),  $R_a$  (srednje aritmetičko odstupanje profila),  $R_p$  (najveća visina izbočina profila),  $R_{pm}$  (prosječna visina izbočina profila),  $W_t$  (visina valovitosti),  $R_t$  (razlika najviših i najnižih točki efektivnog profila na duljini) i  $P_t$  (najveća visina profila na ukupnoj duljini). Za svaki parametar je dana srednja vrijednost  $\bar{X}$ , rasipanje  $s$ , najveća vrijednost MAX i najmanja MIN te njihov raspon R. Iz rezultata se vidi, kako su svi parametri hrapavosti za Ultimaker manji,  $R_t$  kao najveća razlika najviše i najniže točke na duljini ima srednju vrijednost 45,9  $\mu\text{m}$  kod Ultimakera, dok je srednja vrijednost MakerBota 5,0  $\mu\text{m}$ , ili  $R_z$  kod Ultimakera iznosi 35,9  $\mu\text{m}$ , a kod MakerBota 59,5  $\mu\text{m}$ . Ultimaker postiže

bolju hrapavost zadnje površine, ali ako se ona zbog svoje hrapavosti želi naknadno obrađivati tada nije presudna. [83]

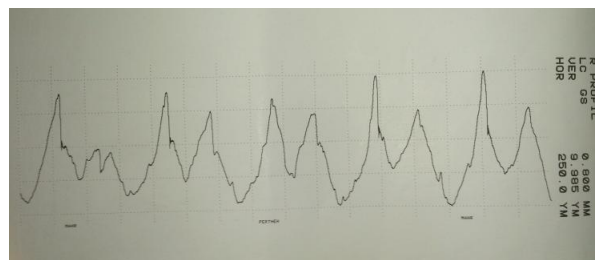


perthometer S8P 4.5

<b>Mahr</b> <b>Perthen</b>		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA	OBJEKT:UZORAK PINK ZADNJI SLOJ NR.: NAME:G.BARSIC
LT	5.600 MM	FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	MESS.-NR.: 6
LM	4.000 MM		T8 FRW-750 750 26
UB	625.0 YM		

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC	GS 0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	73.3	16.2	43.9	89.4	45.5		
2	RZ	YM	59.5	18.6	29.2	68.4	39.3		
3	RA	YM	15.2	2.5	7.7	18.5	10.8		
4	RP	YM	38.1	9.0	23.3	47.0	23.7		
5	RPM	YM	30.0	4.8	13.0	34.1	21.2		
6	WT	YM	43.3	7.3	20.6	55.9	35.3		
7	RT	YM	75.0	16.7	43.9	89.4	45.5		
8	PT	YM	101.3	17.2	43.6	127.4	83.8		

Slika 5.34 Hrapavost gornje površine za MakerBot



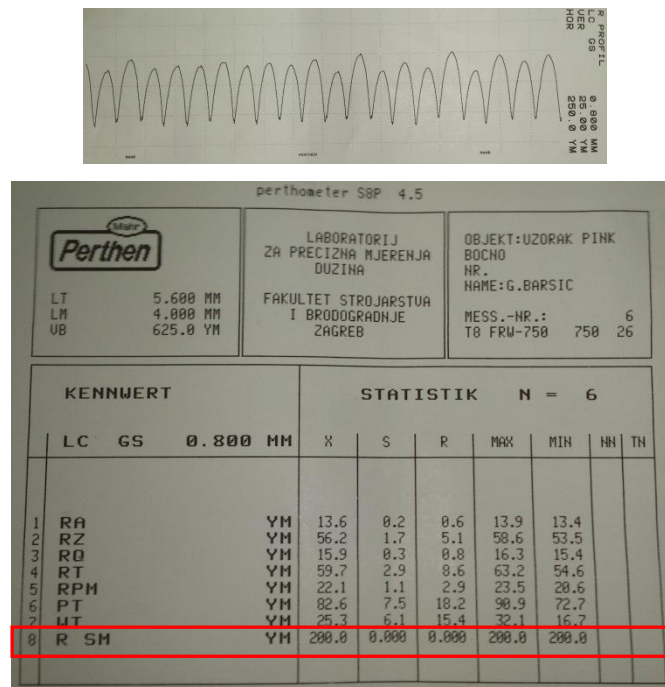
perthometer S8P 4.5

<b>Mahr</b> <b>Perthen</b>		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA	OBJEKT:UZORAK CRNI ZADNJI SLOJ NR.: NAME:G.BARSIC
LT	5.600 MM	FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	MESS.-NR.: 6
LM	4.000 MM		T8 FRW-750 750 26
UB	625.0 YM		

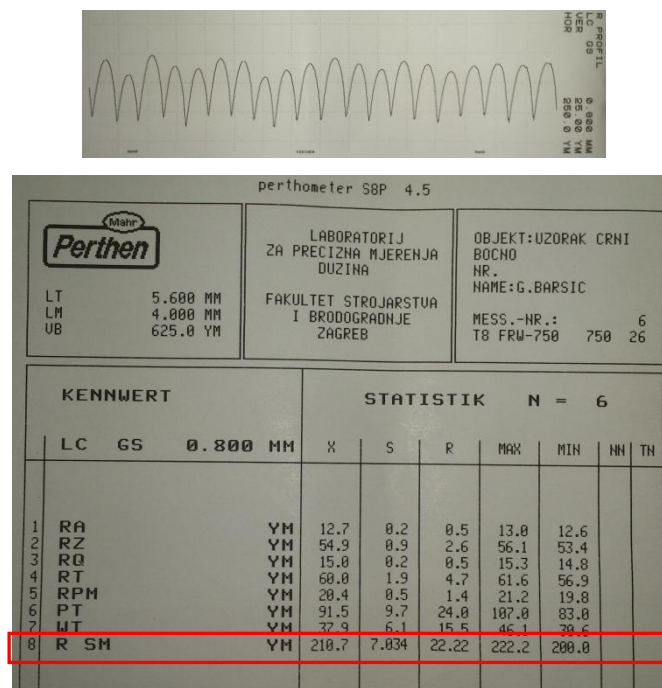
KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC	GS 0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	45.1	9.5	23.2	57.3	34.1		
2	RZ	YM	35.9	5.4	14.3	43.5	29.1		
3	RA	YM	6.9	0.6	1.7	8.0	6.3		
4	RP	YM	28.4	6.8	14.7	35.1	20.4		
5	RPM	YM	21.7	4.8	13.2	28.1	14.9		
6	WT	YM	24.7	4.3	12.7	30.4	17.8		
7	RT	YM	45.9	8.8	19.8	57.5	37.8		
8	PT	YM	50.9	6.1	16.6	69.7	53.1		

Slika 5.35 Hrapavost gornje površine za Ultimaker

Izmjerena je i hrapavost bočnih površina, gdje se očituje daju li uređaji slojeve od 200 mikrometara (0,2 mm) i na temelju pet ponovljenih mjerenja dobiveni su rezultati za MakerBot (slika 5.36) i Ultimaker (slika 5.37). Parametri hrapavosti su slični za oba uređaja, ali glavni parametar mjerenja  $R_{Sm}$  (srednja veličina jednog koraka) ima bolje rezultate na MakerBotu gdje prosječna vrijednost iznosi 200  $\mu\text{m}$  bez rasipanja, dok je na Ultimakeru ona 210,7  $\mu\text{m}$  uz rasipanje. MakerBot svaki sloj slaže savršeno sa zadanim razmakom 0,2 mm.



Slika 5.36 Hrapavost bočne površine za MakerBot

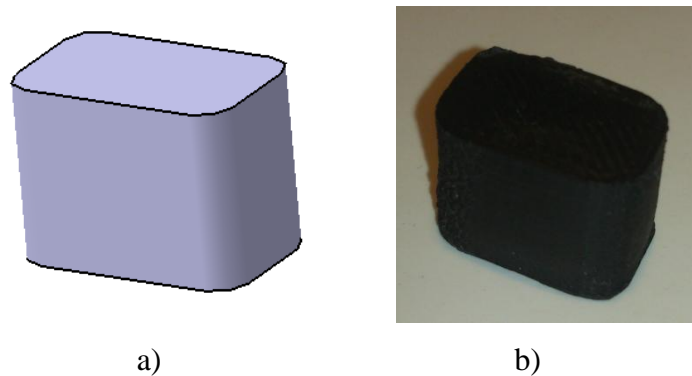


Slika 5.37 Hrapavost bočne površine za Ultimaker

#### 5.4.5 3D printanje na Ultimaker Originalu s slojem debljine 0,02 mm

Debljina sloja je vrlo značajna karakteristika prilikom izrade prototipova. Definiranjem visine sloja određuje se stepeničasta izraženost na svim bočnim stranicama prototipa koji se izrađuju aditivnim tehnologijama. Prema prikazanim značajkama najpopularnijih niskobudžetnih 3D printera Ultimaker može postići najmanju vrijednost debljine slojeva i ona iznosi 20 mikrometara (0,02 mm). Ta vrijednost za ostale 3D printere se kreće do oko 100 mikrometara (0,1 mm), a negdje i manje, do 50 mikrometara. Debljina sloja od 20 mikrometara je poprilično mala i ta se vrijednost odlučila provjeriti.

Za ovo mjerenje je definiran uzorak dimenzija  $16 \times 10 \times 12$  mm, prikazan slikom 5.38a. Uzorak je manjih dimenzija iz razloga što je njegova veličina dovoljna za provedbu mjerenja, a postupak 3D printanja predmeta sa slojevima od 20 mikrometara bi trajao deset puta duže u odnosu na slojeve od 200 mikrometara. 3D printanje uzorka je trajalo 1h i 55min, a prije toga se printanje ponavljalo nekoliko puta zbog neuspjelih pokušaja i podešavanja i optimiranja postavki. Izvoditi 3D printanje sa slojevima od 20 mikrometara zahtijevalo je puno manju brzinu printanja, veću ispunu prilikom 3D printanja, podešavanje protoka materijala. Na kraju je postignut uzorak prikazan slikom 5.38b.



Slika 5.38 Uzorak za ispitivanje 0,02 mm debljine sloja

Za provjeru visine slojeva provedeno je mjerenje kao i za hrapavost bočnih površina, gdje se tražio iznos  $R_{sm}$ , vrijednost veličine jednog koraka, koji bi trebao iznositi 20 mikrometara. Provedeno je pet ponovljenih mjerenja te su uzete dvije grafičke slike površine kao i parametri hrapavosti prikazani slikom 5.39.



perthometer S8P 4,5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: BOCHA STRAHA NR.: 21.11.2014. NAME: G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6
LT	5.600 MM		
LM	4.000 MM		
UB	250.0 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 6						
LC	GS	0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TH
1	RA	YM		3.56	0.24	0.61	3.03	3.22		
2	RZ	YM		19.90	0.67	1.80	20.89	19.01		
3	RO	YM		4.49	0.29	0.72	4.78	4.06		
4	RT	YM		25.53	1.35	3.80	27.65	23.85		
5	RPM	YM		10.13	0.52	1.46	11.08	9.61		
6	PT	YM		52.57	4.58	12.53	61.37	48.84		
7	UT	YM		39.55	3.79	8.09	43.85	35.77		
8	R SM	YM		134.9	24.53	60.82	153.8	93.02		

Slika 5.39 Profil površine uzorka

Iz prikazanih rezultata se očituje kako je srednja vrijednost koraka u ovome slučaju 134,9 mikrometara, dok je rasipanje 24,53 mikrometra, najmanja vrijednost je 93,82 mikrometra, a najveća 153,8 mikrometara. Ovi rezultati su daleko od željenih te ukazuju kako niskobudžetni 3D printer nije zadovoljio i postigao sloj visine 20 mikrometara.

Postizanje slojeva od 20 mikrometara je teško ostvarivo, iako proizvođač to navodi kao mogućnost, a njegov softver generira putanju koja slaže slojeve te debljine. Ultimaker Original s kojim se to radilo u praksi to nije bio u stanju izvesti, a mišljenje je da bi to bilo ostvarivo samo kada bi svi parametri bili savršeno optimirani, a sam uređaj i sva njegova mehanika se nalazili u savršenom stanju. Realnom granicom za sve niskobudžetne 3D printere bi se mogli smatrati slojevi od 100 mikrometara (0,1 mm), što MakerBot navodi u svojim značajkama, a sve manje od toga bi bilo pretjerivanje. Za kraj usporedbe radi, PolyJet uređaj višestruko veće vrijednosti, koji se nalazi u Centru za aditivne tehnologije pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, postiže slojeve debljine 16 mikrometara što je jedna od nižih vrijednosti svih aditivnih postupaka.

## 6. ZAKLJUČAK

Dostupnost i zanimljivost niskobudžetni 3D printera, a i s njima aditivnih tehnologija, je bio glavni motiv pisanja ovog rada. Zbog svoje sve veće popularnosti kao i rasta na tržištu, potrebno je znati odabrati pravi uređaj, kako bi bili zadovoljni samim izborom. Navođenjem na tržištu trenutno najpopularnijih niskobudžetnih 3D printera, te u praktičnom dijelu usporedbom dva printera u ovome radu se nudi pregled i pristup na što se sve treba obratiti pozornost pri njihovom razmatranju i krajnjoj odluci o kupovini.

Svaki uređaj posjeduje svoj značajke deklarirane od strane proizvođača, ali ipak su važnije performanse pri izvedbi željenih predmeta, pa je tako usporedba Ultimaker Originala i MakerBot Replicatora 2X u praktičnom dijelu dala potpunu sliku pri usporedbi dvaju uređaja. Oba uređaja su izvrsna i za preporučiti, ali bez dileme se može reći kako su performanse MakerBot Replicatora 2X pri izvedbi referentnih prototipova bolje, dok je Ultimaker malo razočarao s tvrdnjom o postizati slojeva debljine 20 mikrometara. Iako je MakerBot Replicator 2X duplo skuplji uređaj u odnosu na Ultimaker Original, njegove performanse to definitivno opravdavaju.

Općenito je 3D printanje jedna vrlo zanimljiva tehnologija i nikoga ne ostavlja ravnodušnim, a glavna je misao da ono što se želi, može biti ostvareno u kratkom roku, bez potrebe za konvencionalnim načinima obrade, majstorima i strojevima na kojima će se vršiti izrada. Vrijeme i novac koji se mogu uštedjeti su značajni faktori, kao i jednostavnost pri realizaciji od ideje do gotovog predmeta, bilo da se radi o razvoju i proizvodnji proizvoda ili vlastitim potrebama. Zbog svega toga budući razvoj i trend dovest će sigurno do još boljih, bržih i kvalitetnijih uređaja te nekih novih materijala. A budućnost, u kojoj će niskobudžetni 3D printeri biti, ne samo sastavni dio proizvodnih pogona, već i sastavni dio ureda i domova, koje će svatko imati i s njima jednostavno ostvarivati potrebe za najrazličitijim predmetima, izgleda lako ostvariva.

## POPIS LITERATURE

- [1] Ana Pilipović: Aditivna proizvodnja, Polimeri 33(2012)3-4, 134 - 135
- [2] Doc. dr. sc. Damir Godec, prof. dr.sc. Mladen Šercer: Aditivna proizvodnja tvorevina (e. Rapid Prototyping – RP, Rapid Tooling – RT, Rapid Manufacturing – RM) , 2012.
- [3] [http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/intro.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm)
- [4] <http://www.rmcenter.nl/2011/wat-kan-rm/>
- [5] [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Additive\\_Manufacturing\\_process](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Additive_Manufacturing_process)
- [6] <https://thre3d.com/how-it-works/material-extrusion/fused-deposition-modeling-fdm>
- [7] <http://www.pcmag.com/slideshow/story/312146/8-simple-practical-3d-printer-projects/1>
- [8] <http://reprap.org/wiki/Extruder>
- [9] [http://reprap.org/mediawiki/images/c/c2/MBE\\_SINGLE\\_1.75mm\\_Extruder.jpg](http://reprap.org/mediawiki/images/c/c2/MBE_SINGLE_1.75mm_Extruder.jpg)
- [10] <http://airwolf3d.com/wiki/troubleshooting-jammed-hot-end/>
- [11] <http://www.3dgeni.us/we-need-to-keep-printer-manufacturers-away-from-filament/>
- [12] [http://reprap.org/wiki/RepRap\\_project\\_FAQ#Thermoplastic\\_Extruder](http://reprap.org/wiki/RepRap_project_FAQ#Thermoplastic_Extruder)
- [13] <http://www.3ders.org/articles/20121031-german-reprap-launched-new-direct-drive-extruder-for-3d-printer.html>
- [14] <http://airtripper.com/wp-content/uploads/2012/04/3d-printer-1.75mm-filament-extruder-02.jpg>
- [15] <http://www.makerbot.com/support/replicator/troubleshooting/nozzle-align/>
- [16] [http://reprap.org/wiki/Heated\\_Bed](http://reprap.org/wiki/Heated_Bed)
- [17] <http://bootsindustries.com/portfolio-item/heat-bed-3d-printing/#pcbheatbed>
- [18] <http://blog.parker.com/select-the-right-drive-train-technology-for-3d-printing-precision-linear-motion-systems>
- [19] <http://reprap.org/wiki/StepperMotor>
- [20] <http://www.lulzbot.com/products/nema-17-stepper-motors>
- [21] [http://www.phidgets.com/products.php?product\\_id=3301](http://www.phidgets.com/products.php?product_id=3301)
- [22] <http://www.makerbot.com/support/replicator/documentation/schematics/>
- [23] [https://www.google.hr/search?q=3d+printer&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=rfMFVIL\\_J62w7AasI4CwAg&ved=0CAYQ\\_AUoAQ&biw=1920&bih=920#q=3d+printer+frame&tbn=isch](https://www.google.hr/search?q=3d+printer&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=rfMFVIL_J62w7AasI4CwAg&ved=0CAYQ_AUoAQ&biw=1920&bih=920#q=3d+printer+frame&tbn=isch)
- [24] <http://www.resinex.hr/polimer-vrste/abs.html>
- [25] <http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>



- [26] [http://www.monoprice.com/home/newsletter/newsletter\\_detail.asp?news1\\_id=266&\\_keyword=](http://www.monoprice.com/home/newsletter/newsletter_detail.asp?news1_id=266&_keyword=)
- [27] <http://filaments.ca/pages/temperature-guide>
- [28] <http://makingsociety.com/wp-content/uploads/2013/06/3D-printed-PLA-bolts-e1371257859203.jpg>
- [29] <http://www.protoparadigm.com/blog/2011/12/printing-polycarbonate>
- [30] <http://www.tridimake.com/2012/12/3d-printing-plastic-filaments-kinds-and.html>
- [31] <http://www.3ders.org/articles/20130613-new-nylon-filament-for-3d-printers-made-in-italy.html>
- [32] <http://reprap.org/wiki/TPU>
- [33] [http://www.lulzbot.com/sites/all/themes/lulzbot/images/LulzBot\\_3D\\_Printing\\_Filament\\_Guide.pdf](http://www.lulzbot.com/sites/all/themes/lulzbot/images/LulzBot_3D_Printing_Filament_Guide.pdf)
- [34] <http://images-cdn.ecwid.com/images/2442119/214999975.jpg>
- [35] <http://www.adafruit.com/blog/2013/10/03/makerbot-popularizes-hips-support-material-with-release-of-makerbot-dissolvable-filament-3dthursday-3dprinting/>
- [36] [http://reprap.org/wiki/Print\\_Troubleshooting\\_Pictorial\\_Guide#Too\\_cold](http://reprap.org/wiki/Print_Troubleshooting_Pictorial_Guide#Too_cold)
- [37] [http://hydraraptor.blogspot.com/2011\\_03\\_01\\_archive.html](http://hydraraptor.blogspot.com/2011_03_01_archive.html)
- [38] <http://reprap.org/mediawiki/images/6/60/PTPG-MH-MC01.jpg>
- [39] <http://reprap.org/mediawiki/images/c/cf/Pic03%3DPTPG-MC02d.jpg>
- [40] <http://reprap.org/mediawiki/images/8/86/PTPG-MC03a.jpg>
- [41] <http://reprap.org/mediawiki/images/5/55/PTPG-BA-I01.jpg>
- [42] [http://zavax.files.wordpress.com/2013/04/3d\\_print\\_corner\\_lifting\\_curling.jpg](http://zavax.files.wordpress.com/2013/04/3d_print_corner_lifting_curling.jpg)
- [43] <http://hydraraptor.blogspot.com/2010/07/abs-on-pc.html>
- [44] <http://reprap.org/mediawiki/images/b/b4/PTPG-BA-E02.jpg>
- [45] <http://richrap.blogspot.com/2011/10/art-of-failure-when-3d-prints-go-wrong.html>
- [46] <http://reprap.org/mediawiki/images/f/f9/PTPG-SS-OP01a.jpg>
- [47] <http://reprap.org/mediawiki/images/c/c4/SkippingStepAcceleration.jpg>
- [48] <http://reprap.org/mediawiki/images/3/3b/PTPG-C-NC-01.png>
- [49] <http://reprap.org/mediawiki/images/8/84/PTPG-PT-TH01.jpg>
- [50] <http://reprap.org/mediawiki/images/8/8f/PTPG-PT-TC02.jpg>
- [51] <http://reprap.org/mediawiki/images/1/12/PTPG-FNT-IG01.jpg>
- [52] <http://reprap.org/mediawiki/images/4/48/PTPG-HS-HU01.JPG>
- [53] <http://3dprinting.com/news/so-what-are-the-trends-in-desktop-3d-printing/>
- [54] <https://store.makerbot.com/replicator2x>

- [55] <https://store.makerbot.com/replicator>
- [56] <http://store.makerbot.com/replicator-mini>
- [57] <https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-original>
- [58] <https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-2>
- [59] <http://cubify.com/en/Products/CubeXTechSpecs>
- [60] <http://cubify.com/en/CubePro>
- [61] <http://cubify.com/en/Products/Cube2TechSpecs>
- [62] <http://airwolf3d.com/store/products/large-3d-printer-model-aw3d-hd/>
- [63] <http://www.mbot3d.com/collections/3d-printer/products/mbot-grid-ii>
- [64] <https://www.lulzbot.com/products/lulzbot-taz-4-3d-printer>
- [65] <http://www.up3dusa.com/#!mini-specs/c1tl0>
- [66] <http://www.solidoodle.com/workbench>
- [67] <http://www.lpfrg.com/creatr/>
- [68] <http://www.tinkerine.com/store/3d-printers/ditto-plus/>
- [69] <http://www.tinkerine.com/store/3d-printers/ditto-pro/>
- [70] [http://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel\\_%28iteration\\_1%29](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_%28iteration_1%29)
- [71] [http://reprap.org/wiki/Prusa\\_i3](http://reprap.org/wiki/Prusa_i3)
- [72] [http://en.wikipedia.org/wiki/MakerBot\\_Industries](http://en.wikipedia.org/wiki/MakerBot_Industries)
- [73] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultimaker>
- [74] [https://www.ultimaker.com/spree/uploads/198/original/Ultimaker\\_Original\\_User\\_Manual.pdf](https://www.ultimaker.com/spree/uploads/198/original/Ultimaker_Original_User_Manual.pdf)
- [75] <http://i.ytimg.com/vi/WX4obxyAkn0/maxresdefault.jpg>
- [76] [http://www.flashgamer.com/themes/site\\_themes/bueno/images/uploads/hbp3\\_setupB.jpg](http://www.flashgamer.com/themes/site_themes/bueno/images/uploads/hbp3_setupB.jpg)
- [77] <http://www.thingiverse.com/thing:193647>
- [78] [http://www.aliexpress.com/store/product/10PCS-SHF16-16mm-Linear-Rod-Rail-Shaft-Support-CNC-Route/708669\\_1708152977.html](http://www.aliexpress.com/store/product/10PCS-SHF16-16mm-Linear-Rod-Rail-Shaft-Support-CNC-Route/708669_1708152977.html)
- [79] <https://grabcad.com/library/spur-gear-standard-1>
- [80] <http://www.thingiverse.com/thing:30973>
- [81] <http://www.thingiverse.com/thing:400683>
- [82] <https://www.oth-regensburg.de/fakultaeten/maschinenbau/labore/fertigungstechnik-und-werkzeugmaschinen.html>
- [83] [http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/metrologija/o\\_hrapavosti\\_Mahr\\_publikacija.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/metrologija/o_hrapavosti_Mahr_publikacija.pdf)