

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nikola Blažević

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Nikola Blažević

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na stručnom vođenju, pruženom vremenu i savjetima u tijeku izrade ovog rada.

Ovom prilikom se želim zahvaliti i *Centru za aditivne tehnologije* na pruženoj mogućnosti izrade potrebnih dijelova na dostupnim 3D pisačima.

Zahvaljujem se i mag. ing. Mihu Klaiću i dečkima iz radione Katedre za alatne strojeve na pruženom vremenu i pomoći pri rezanju aluminijskih profila za 3D pisač.

Želim se zahvaliti svim prijateljima i kolegama koji su mi pomogli svojim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i djevojci, sestri i roditeljima na strpljenju i što su bili uz mene prilikom izrade ovog rada bez kojih ne bi mogao biti ni ostvaren.

Posebno se zahvaljujem ocu koji me svakodnevno slušao s problemima prilikom izrade te pomogao pri uspješnoj realizaciji stroja.

Nikola Blažević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nikola Blažević** Mat. br.: 0035158869

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada modularnog 3D pisaa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of a modular 3D printer**

Opis zadatka:

Suvremeni zahtjevi tržišta postavljaju sve strože zahtjeve pred procese razvoja i proizvodnje. Uz zahtjev za povišenje kvalitete proizvoda i razine fleksibilnosti pri razvoju i proizvodnji, istodobno se nameću zahtjevi za sniženje troškova, a posebice za skraćanje vremena razvoja i proizvodnje. Dodatni trend koji je sve uočljiviji u pojedinim segmentima tržišta je napuštanje masovne proizvodnje u korist maloserijske, a vrlo često i pojedinačne (personalizirane) proizvodnje. Kako bi se udovoljilo takvim zahtjevima na tržištu, od druge polovine 80-ih godina prošlog stoljeća razvijaju se i primjenjuju suvremeni postupci aditivne proizvodnje. Glavna je značajka tih postupaka dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade cijelog proizvoda. Takvo načelo proizvodnje omogućuje pravljenje vrlo komplicirane geometrije proizvoda koju bi drugim, klasičnim postupcima proizvodnje bilo vrlo teško ili nemoguće načiniti. Dodatna je značajka aditivnih postupaka, da se u načelu proizvodi izravno na opremi za aditivne postupke na osnovi 3D računalnog modela proizvoda, bez potrebe za dodatnim alatima.

Mnogi sustavi, pogotovo oni koji kombiniraju u jednom stroju aditivni postupak i strojnu obradu su relativno skupi. Pojava jeftinijih sustava za aditivne postupke koji se temelje na postupku taložnog očvršćivanja povećavaju dostupnost tih postupaka širem krugu, pa se može očekivati da će aditivni postupci i njihova primjena u budućnosti promijeniti način razmišljanja od konstruiranja, izrade do primjene tiskanih tvorevina u raznim područjima.

U radu je potrebno opisati postupak taložnog očvršćivanja, navesti njegove prednosti i nedostatke, te trenutno stanje na tržištu niskobudžetnih 3D pisaa. Također je potrebno načiniti razradu koncepta, dizajna, izradu tehničke dokumentacije nestandardnih dijelova modularnog 3D pisaa koji ima mogućnost mijenjanja glave ekstrudera s alatom za strojnu obradu.

Zadatak zadan: Rok predaje rada: Predviđeni datum obrane:
5. svibnja 2016. 7. srpnja 2016. 13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Ana Pilipović
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

U. Z. Franjo Cajner
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNI POSTUPCI I PROIZVODNJA	3
2.1. Povijest aditivnih postupaka	3
2.2. Aditivni postupci.....	4
2.2.1. Taložno očvršćivanje (FDM).....	5
2.2.2. Vrste materijala za upotrebu kod postupka FDM	8
2.2.2.1. Polilaktid - PLA	9
2.2.2.2. Akrlonitril/Butadien/Stiren - ABS	10
2.2.2.3. Poli(etilen-tereftalat) – PET	11
2.2.2.4. Poliamid – PA.....	11
2.2.2.5. Polikarbonat - PC.....	12
2.2.2.6. Poli(vinil-alkohol) - PVAL.....	13
2.2.2.7. Polistiren visoke žilavosti – PS-HI.....	14
2.2.2.8. Ostali tipovi polimernih materijala za FDM.....	14
2.3. Usporedba niskobudžetnih s profesionalnim 3D pisačima	15
2.4. Izvedbe niskobudžetnih 3D pisača većeg radnog volumena	18
2.4.1. <i>Ultimaker 2 Extended+</i>	19
2.4.2. <i>Makerbot Replicator Z18</i>	20
2.4.3. <i>Type A Machines Series 1</i>	21
2.4.4. <i>gMax 1.5 XT +</i>	22
2.4.5. <i>DeltaWASP 20 40</i>	23
2.5. Kombinacija aditivnih i konvencionalnih postupaka.....	24
2.6. Izvedbe niskobudžetnih strojeva s kombinacijom aditivnih i konvencionalnih postupaka	26
2.6.1. <i>ZMorph 2.0 SX</i>	26
2.6.2. <i>BoXZY</i>	27
3. IZVEDBA NISKOBUĐŽETNOG 3D PISAČA	29
3.1. Konstrukcijska izvedba niskobudžetnog 3D pisača.....	29
3.2. Mehanički sustavi niskobudžetnog 3D pisača	31
3.2.1. Remenski prijenos.....	33
3.2.2. Prijenos navojnim vretenom	36
3.2.3. Pogonski sustav vođenja	38
3.2.4. Radna podloga za tiskanje.....	39
3.2.5. Sklop ekstrudera.....	41

3.3. Elektronički sustav upravljanja niskobudžetnog 3D pisača.....	46
3.3.1. Regulacija elektromotora	47
3.3.1.1. Koračni elektromotori	47
3.3.1.2. Upravljačka pločica koračnog elektromotora	49
3.3.1.3. Mikroprekidač.....	49
3.3.2. Regulacija temperature	51
3.3.2.1. Grijač ekstrudera.....	51
3.3.2.2. Grijač radne podloge.....	51
3.3.2.3. Temperaturni senzori	52
3.3.3. Upravljačka jedinica	55
4. UPRAVLJANJE I POSTAVKE NISKOBUDŽETNOG 3D PISAČA.....	58
4.1. Upravljački softver (e. <i>Firmware</i>)	58
4.2. Programi za kontrolu i pripremu 3D ispisa.....	61
5. MODULARNOST IZVEDBE NISKOBUDŽETNOG 3D PISAČA.....	63
6. TESTIRANJE IZRAĐENOG NISKOBUDŽETNOG 3D PISAČA.....	67
7. ZAKLJUČAK.....	69
LITERATURA.....	71
PRILOZI.....	74

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Prva verzija <i>Reprap</i> stroja – <i>Darwin</i>	4
Slika 2.2.	Opravdanost primjene postupaka aditivne proizvodnje	4
Slika 2.3.	Postupak taložnog očvršćivanja – FDM.....	6
Slika 2.4.	Primjer strukture sloja kod postupka FDM	7
Slika 2.5.	Tvorevina izrađena od polilaktida – PLA	9
Slika 2.6.	Tvorevina izrađena od akrilonitril/butadien/stirena – ABS	10
Slika 2.7.	Tvorevina izrađena od poli(etilen-tereftalata) – PET	11
Slika 2.8.	Tvorevine izrađene od poliamida – PA.....	12
Slika 2.9.	Tvorevina izrađena od polikarbonata – PC	13
Slika 2.10.	Tvorevina s potpornom strukturom od poli(vinil-alkohola) – PVAL.....	13
Slika 2.11.	Tvorevina s potpornom strukturom od polistirena visoke žilavosti – PS-HI.....	14
Slika 2.12.	Tvorevine izrađene od kompozitnih materijala: a) kompozit PLA/drvo, b) kompozit PLA/metal	15
Slika 2.13.	Tvorevina izrađena od elastičnih materijala.....	15
Slika 2.14.	Zastupljenost proizvođača 3D pisaača na tržištu	17
Slika 2.15.	Zastupljenost niskobudžetnih 3D pisaača prema modelu uređaja	18
Slika 2.16.	<i>Ultimaker 2 Extended+</i>	19
Slika 2.17.	<i>Makerbot Replicator Z18</i>	20
Slika 2.18.	<i>Type A Machines Series 1</i>	21
Slika 2.19.	<i>gCreate gMax 1.5 XT+</i>	22
Slika 2.20.	<i>DeltaWASP 20 40</i>	23
Slika 2.21.	<i>DMG MORI LASERTEC 65 3D</i>	25
Slika 2.22.	Postupak izravnog taloženja metala tvrtke <i>DMG MORI</i>	25
Slika 2.23.	<i>ZMorph 2.0 SX</i>	27
Slika 2.24.	<i>BoXZY</i>	28
Slika 3.1.	Izvedba niskobudžetnog 3D pisaača: a) 3D model izvedbe, b) izrađeni stroj	29
Slika 3.2.	Pogonska remenica: a) 3D model pogonske remenice, b) prikaz montaže na stroju	34
Slika 3.3.	Gonjena remenica za pogon po x osi: a) 3D model gonjene remenice, b) prikaz montaže na stroju.....	34
Slika 3.4.	Gonjena remenica za pogon po y osi: a) 3D model gonjene remenice, b) prikaz montaže na stroju.....	35
Slika 3.5.	Prikaz remenskog zatvarača	35
Slika 3.6.	Elastična spojka za prijenos gibanja navojnim vretenom: a) 3D model spojke, b) prikaz montaže na stroju	37
Slika 3.7.	Matica navojnog vretena: a) 3D model matice, b) prikaz montaže na stroju.....	37
Slika 3.8.	Kotačić za vođenje: a) 3D model kotačića, b) prikaz montaže na stroju	38
Slika 3.9.	Ekscentrični odstojnik: a) 3D model ekscentričnog odstojnika, b) prikaz montaže na stroju.....	39
Slika 3.10.	Donja ploča radne podloge: a) 3D model donje ploče, b) prikaz montaže na stroj	40
Slika 3.11.	Gornja ploča radne podloge s oprugom i vijkom za namještanje visine.....	41
Slika 3.12.	<i>Bowden</i> izvedba ekstrudera - mehanički sustav provlačenja žice.....	42
Slika 3.13.	Sklop ekstrudera: a) presjek 3D modela sklopa ekstrudera, b) gotovi sklop ekstrudera s montažom na stroju	43

Slika 3.14. Presjek 3D modela <i>E3D-v6</i> sustava	44
Slika 3.15. Primjer montaže koračnih elektromotora: a) za ostvarivanje gibanja po x osi, b) za dobavljanje žice u ekstruder	48
Slika 3.16. Shema upravljačke pločice koračnog elektromotora.....	49
Slika 3.17. Mehanički mikroprekidač postavljen na y osi.....	50
Slika 3.18. Montaža grijača <i>E3D-v6</i> sustava.....	51
Slika 3.19. Donja strana grijane radne podloge.....	52
Slika 3.20. Montaža termistora <i>E3D-v6</i> sustava.....	53
Slika 3.21. Montaža termistora na grijanoj radnoj podlozi	54
Slika 3.22. Mikroupravljački sklop <i>Taurino Power</i>	55
Slika 3.23. Upravljačka jedinica povezana s elektroničkim komponentama	56
Slika 3.24. Dijagram spajanja upravljačke ploče <i>RAMPS 1.4</i>	57
Slika 4.1. Dijagram softverskih alata.....	58
Slika 4.2. Prikaz sučelja <i>Arduino IDE</i> programa.....	59
Slika 4.3. Prikaz sučelja programa <i>Cura</i>	61
Slika 4.4. Prikaz sučelja programa <i>Pronterface</i>	62
Slika 5.1. Mlaznica izrađena od alatnog čelika	63
Slika 5.2. Model stroja s postavljenim alatom za obradu odvajanjem	64
Slika 5.3. Prikaz montaže cijelog sustava za gibanje u smjeru y osi.....	65
Slika 5.4. Izvedba ekstrudera za materijale u obliku granulata	66
Slika 6.1. Izrađena tvorevina prilikom testnog ispisa.....	67
Slika 6.2. Prvi sloj izrađene tvorevine	68

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Značajke <i>Ultimaker 2 Extended+</i> 3D pisača.....	19
Tablica 2.2. Značajke <i>Makerbot Replicator Z18</i> 3D pisača.....	20
Tablica 2.3. Značajke <i>Type A Machines Series 1</i> 3D pisača.....	21
Tablica 2.4. Značajke <i>gCreate gMax 1.5 XT+</i> 3D pisača.....	22
Tablica 2.5. Značajke <i>DeltaWASP 20 40</i> 3D pisača.....	23
Tablica 2.6. Značajke <i>ZMorph 2.0 SX</i> hibridnog uređaja.....	27
Tablica 2.7. Značajke <i>BoXZY</i> hibridnog uređaja.....	28
Tablica 3.1. Osnovne značajke izrađenog 3D pisača.....	31
Tablica 3.2. Mehanički dijelovi potrebni za izradu 3D pisača.....	31
Tablica 3.3. Ostali spojni elementi niskobudžetnog 3D pisača.....	33
Tablica 3.4. Parametri izrade dijelova ekstrudera.....	43
Tablica 3.5. Dijelovi potrebni za izradu sklopa ekstrudera.....	45
Tablica 3.6. Popis potrebnih dijelova elektroničkog sustava upravljanja.....	46
Tablica 3.7. Parametri izrade nosača mikroprekidača.....	50

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 001 Stroj bez postavljenog alata
 - 001-001 Nosač mikroprekidača
- 002 Ekstruder
 - 002-001 Kućište ekstrudera
 - 002-002 Strelasti zupčanik pogonski
 - 002-003 Strelasti zupčanik gonjeni
 - 002-004 Potisnik za žicu

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	trodimenzionalno
3DP	trodimenzionalno tiskanje (e. <i>3D Printing</i>)
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
A/D	analogno/digitalni
AM	aditivna proizvodnja, aditivni postupci (e. <i>Additive Manufacturing</i>)
CAD	konstruiranje pomoću računala (e. <i>Computer Aided Design</i>)
CAM	proizvodnja podržana računalom (e. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
COM	serijski komunikacijski priključak (e. <i>Communication Port</i>)
DLP	digitalno obrađen svjetlosni signal (e. <i>Digital Light Processing</i>)
FDA	američka agencija za hranu i lijekove (e. <i>Food and Drug Administration</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
GT2	komercijalna oznaka za vrstu remena (e. <i>Gates Tooth</i>)
LOM	proizvodnja laminiranih objekata (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
NEMA	dimenzijska oznaka koračnih elektromotora prema US standardu (e. <i>National Electrical Manufacturers Association</i>)
NTC	termistor s negativnim toplinskim koeficijentom (e. <i>Negative Temperature Coefficient</i>)
P3DP (P3P)	osobni 3D pisac (e. <i>Personal 3D printer</i>)
PA	poliamid
PC	osobno računalo (e. <i>Personal Computer</i>)
PC	polikarbonat
PCB	tiskana ploča (e. <i>Printed Circuit Board</i>)
PLA	polilaktid
PS-HI	polistiren visoke žilavosti (e. <i>High Impact Polystyrene</i>)
PTC	termistor s pozitivnim toplinskim koeficijentom (e. <i>Positive Temperature Coefficient</i>)
PTFE	poli(tetrafluoretilen)
PVAL	poli(vinil-alkohol)
RAMPS	oznaka upravljačke ploče otvorenog tipa za 3D pisace (e. <i>RepRap Arduino Mega Pololu Shield</i>)
RP	brza proizvodnja prototipa (e. <i>Rapid Prototyping</i>)
SD	oznaka vrste memorijske kartice (e. <i>Secure Digital</i>)
SLA	stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i>)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	vrsta datoteke za prikaz 3D modela (e. <i>Standard Tessellation Language</i>)
UV	ultraljubičasto zračenje

x os koordinatna os
y os koordinatna os
z os koordinatna os

SAŽETAK

Aditivni postupci postaju sve dostupniji na tržištu razvojem niskobudžetnih 3D pisaa. U ovom segmentu tržišta trenutno se najviše primjenjuje postupak taložnog očvršćivanja – FDM. Poseban segment tržišta niskobudžetnih 3D pisaa su uređaji većeg radnog volumena posebno u smjeru osi z odnosno visinu. Budući da aditivni postupci imaju svojih prednosti, a i nedostataka naspram postupaka obrade odvajanjem čestica, interesantan dio tržišta su hibridni strojevi koji imaju mogućnost izmjene alata za obje vrste postupaka. Tržište niskobudžetnih hibridnih uređaja je još uvijek u nastajanju.

U okviru diplomskog rada je razrađen koncept i izrađen prototip niskobudžetnog 3D pisaa većeg radnog volumena u smjeru osi z. U okviru koncepta je razrađena mogućnost izmjene alata. Tako da je uz ekstruder koji je izrađen u okviru rada moguće i postaviti druge alate za rad s postupcima obrade odvajanjem čestica. Izradom koncepta i usporedbom aditivnih postupaka s postupcima obrade odvajanjem moguće je uočiti moguće prednosti i nedostatke konstrukcije ukoliko bi se vršila obrada odvajanjem. Modularnost konstrukcije ima veliku prednost budući da su nadogradnje i poboljšanja stroja moguća laganom izmjenom određenih dijelova.

Ključne riječi:

izmjena alata, modularnost, niskobudžetni 3D pisaa, taložno očvršćivanje – FDM

SUMMARY

Today additive manufacturing is becoming more available on the global market because of the development of low cost 3D printers. In the market of low cost 3D printers, the most applied process of additive manufacturing is *Fused Deposition Modeling – FDM*. Specific market segment of low cost 3D printers is a market of 3D printers with large build volume especially in the direction of z axis (height). Because additive manufacturing has its advantages and its disadvantages regarding to subtractive manufacturing, interesting share of the market is hybrid manufacturing machines that have possibilities of exchange tools for manufacturing with additive and subtractive process. The market of hybrid manufacturing machines is still emerging.

The concept and prototype of low cost 3D printer with a larger build volume in direction of z axis is elaborated within the thesis. Capability of tool exchange is elaborated within the concept design. With the extruder (that is made as a tool within the thesis), there is a possibility to mount another tools for manufacturing with subtractive methods. With a concept design and comparison of additive and subtractive manufacturing there is a possibility to note advantages and disadvantages of the machine if the subtractive tools would be mounted. Modular design of the machine has a great advantage because upgrades and improvements would be easily achieved.

Key words:

fused deposition modeling – FDM, low cost 3D printer, modular design, tool exchange

1. UVOD

Revolucija u postupku 3D ispisa raste na globalnoj razini zahvaljujući svojim brojnim prednostima i sve pristupačnijim cijenama. Pojavom niskobudžetnih 3D pisaa na tržištu aditivni postupci su postali dostupni svima, od poslovnog segmenta pri razvoju proizvoda i maloserijskoj proizvodnji do kućne primjene za osobne potrebe i kreativno stvaranje.

Glavna prednost aditivnih postupaka je mogućnost izrade tvorevine u jednom koraku izravno iz modela konstruiranog pomoću računala (CAD) s čime se bitno skraćuje vrijeme od početnog koncepta do završnog proizvoda. Razvojem novih postupaka i materijala za 3D ispis nastale tvorevine mogu zadovoljiti primjenu i kao funkcionalni i konačni proizvodi. S ovim razvojem aditivni postupci sve više nalaze mjesto u proizvodnji uz konvencionalne postupke. Mogućnosti aditivnih postupaka naspram konvencionalnih imaju i svoje prednosti i nedostatke, zato se kombinacijom tehnologija u proizvodnji može postići kompleksnost proizvoda s traženom točnošću i mehaničkim svojstvima u najkraćem mogućem vremenu.

Jedan od sve važnijih faktora u današnje vrijeme je i očuvanje okoliša. Upotrebom aditivnih postupaka u proizvodnji zajedno s konvencionalnim, uz velike mogućnosti recikliranja otpadnog materijala, može se doprinijeti i stvaranju manje otpada.

Dostupnošću niskobudžetnih 3D pisaa na tržištu i sve većoj dostupnosti 3D računalnih modela putem interneta, društvo u proizvodnom i potrošačkom smislu se uvelike mijenja. Aditivni postupci su već našli svoju primjenu u raznim industrijama kao što su automobilska, zrakoplovna i medicinska koje ulažu puno u razvoj novih postupaka. Dostupnošću niskobudžetnih 3D pisaa primjena se proširila na sve segmente društva od obrazovanja, arhitekture, arheologije, modnog dizajna, izrade nakita itd. Aditivni postupci su jedan od glavnih temelja održivog razvoja društva.

Priča o osobnom 3D pisaču se čini vrlo slična priči o osobnom računalu (PC). Obje tehnologije su na početku bile dostupne samo kao vrlo skupe, "profesionalne" i teške za primjenu (često zahtijevanje specijaliziranih tehničara za rad) a s vremenom su postale vrlo pristupačne i jednostavne za primjenu. Uz razvoj niskobudžetnih 3D pisača nastao je i razvoj uređaja koji za prihvatljivu cijenu nude mogućnost primjena različitih postupaka u istom uređaju. Takve uređaje već možemo nazivati i stolnim odnosno osobnim uređajima za proizvodnju (e. *desktop or personal fabricator*).

2. ADITIVNI POSTUPCI I PROIZVODNJA

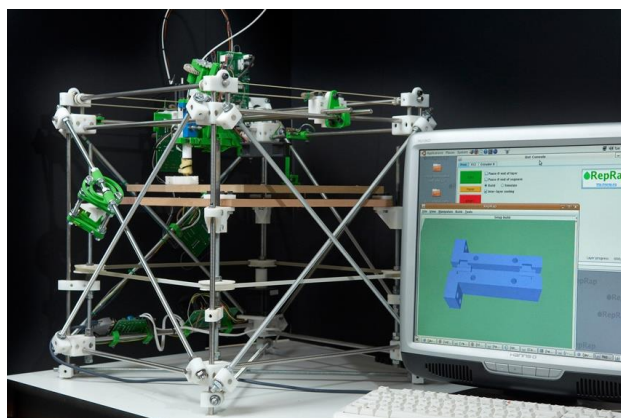
2.1. Povijest aditivnih postupaka

O proizvodnji putem aditivnih postupaka, odnosno dodavanju materijala sloj po sloj govorilo se još i prije osamdesetih godina prošlog stoljeća. Prvi objavljen rad na temu brze proizvodnje prototipa (e. *Rapid Prototyping* - RP) primjenom fotopolimera je objavio 1981. godine dr. Hideo Kodama. U rasponu od 1984. – 1986. godine Charles Hull, osnivač tvrtke *3D Systems* razvija postupak stereolitografije (e. *Stereolithography* – SLA) te 1987. godine patentiran je pod istim nazivom. U slično vrijeme se radilo i na razvoju postupka selektivnog laserskog srašćivanja (e. *Selective Laser Sintering* – SLS) koji je patentiran 1989. godine od strane Carl Deckarda sa Sveučilišta u Teksasu. Nešto kasnije patent je licenciran na tvrtku *DTM Inc.* [1, 2]

Postupak taložnog očvršćivanja (e. *Fused Deposition Modeling* - FDM) razvili su S. Scott Crump i Lisa Crump, osnivači tvrtke *Stratasys*, 1989. godine. Postupak je komercijaliziran 1991. godine proizvodnjom prvog stroja koji primjenjuje ovu tehnologiju. Termin *Fused Deposition Modeling* i njegova kratica FDM su zaštićeni od strane tvrtke *Stratasys Inc.* [2, 3]

Sljedećih godina dolazi do proizvodnje prvih komercijaliziranih strojeva koji primjenjuju postupke stereolitografije i selektivnog laserskog srašćivanja. Kroz iduće desetljeće dolazi i do razvoja drugih postupaka od kojih su značajniji proizvodnja laminiranih objekata (e. *Laminated Object Manufacturing* - LOM), 3D tiskanje (e. *3D Printing* – 3DP), postupak ispisivanja mlazom fotopolimera (e. *PolyJet*) i očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. *Digital Light Processing* - DLP) [1]

Za tržište niskobudžetnih 3D pisaača važno je spomenuti rad Adriana Bowyera, akademika sa Sveučilišta *Bath* u Velikoj Britaniji koji je 2004. godine pokrenuo *RepRap* projekt te tako omogućio temelje za razvoj niskobudžetnih 3D pisaača. 2007. godine su konstruirali svoju prvu verziju samoreplicirajućih strojeva nazvanu *Darwin* koji je prikazan na slici 2.1. Uz istek patenta za FDM postupak 2009. godine dolazi do ubrzanog rasta tržišta niskobudžetnih 3D pisaača s prvim modelima od tvrtke *Makerbot.* [1]

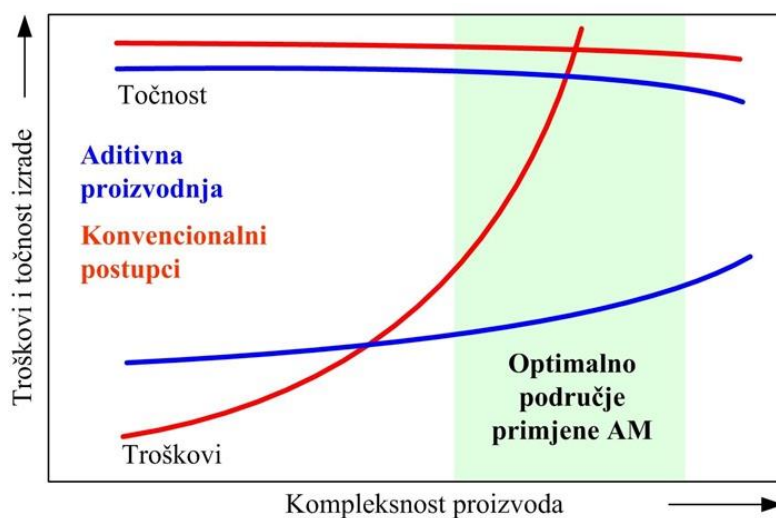


Slika 2.1. Prva verzija *Reprap* stroja – *Darwin* [4]

Paralelno raste zajednica *RepRap* s kojom su se počeli razvijati uređaji otvorenog dizajna i softverskog koda čiji 3D pisari rade na principu postupka FDM. To je dovelo do velikog pada cijena uređaja od početka samog razvoja postupka, te doprinijelo razvoju i dostupnosti niskobudžetnih uređaja na tržištu.

2.2. Aditivni postupci

Aditivnim postupcima proizvodnje moguće je izraditi fizičke modele, prototipove, dijelove kalupa i alata i funkcionalne dijelove iz 3D modela konstruiranih s pomoću računala (CAD) jako komplicirane geometrije. Aditivnim postupcima je moguće izraditi tvorevine koje je teško ili uopće nije moguće napraviti nekim drugim postupcima. Opravdanost primjene aditivnih postupaka u proizvodnji je prikazan na slici 2.2. [5]



Slika 2.2. Opravdanost primjene postupaka aditivne proizvodnje [6]

Načelo rada svih aditivnih postupaka je proizvodnja tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. AM postupci mogu se općenito podijeliti na postupke koji primjenjuju materijal na bazi krutine (npr. žica, folija, laminat), kapljevine i praha. Najznačajniji postupak koji primjenjuje materijal na bazi krutine je taložno očvršćivanje (FDM). Najznačajniji postupci koji primjenjuju kapljevite materijale u obliku fotopolimera su stereolitografija (SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP) i postupak ispisivanja mlazom fotopolimera (e. *PolyJet*), dok su najznačajniji postupci koji primjenjuju prah selektivno lasersko srašćivanje (SLS) i 3D tiskanje (3DP). [5]

Nabrojani postupci su najzastupljeniji na današnjem tržištu što se tiče proizvodnih strojeva koji rade na principu aditivnih postupaka. Postoji još postupaka koji su tek u razvoju ili primjenjuju materijale koji nisu na bazi polimera.

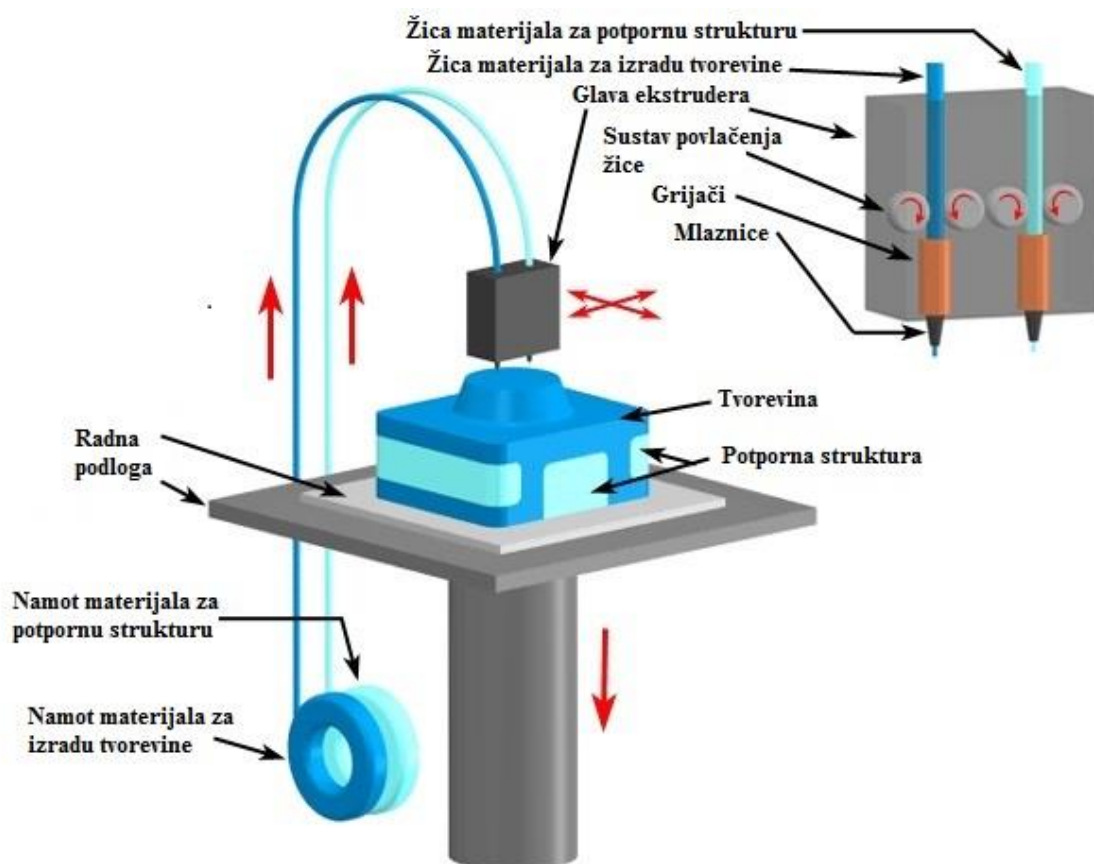
2.2.1. Taložno očvršćivanje (FDM)

Iako postoje mnogi aditivni postupci koji se upotrebljavaju za 3D ispis, taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling* - FDM), spada u vrlo jednostavne postupke. Složene tvorevine se stvaraju iz omekšanog polimernog materijala koji se ekstrudira kroz mlaznicu. Materijal u obliku polimerne žice dodaje se u mlaznicu ekstrudera, dok se mlaznica ili radna podloga (ili oboje) pomiču u smjeru tri osi pomoću računalno upravljano mehanizma, a materijal očvršćuje odmah nakon istiskivanja kroz mlaznicu. Koračni motori ili servo motori se obično primjenjuju kod svih ovih gibanja, kao i za guranje žice kroz ekstruder. [7]

Ekstrudirani materijal napušta mlaznicu u omekšanom stanju i pri sobnoj temperaturi vrlo brzo očvršćuje, te je zbog toga vrlo bitno održavati temperaturu materijala pri ekstrudiranju malo iznad temperature očvršćivanja. [9]

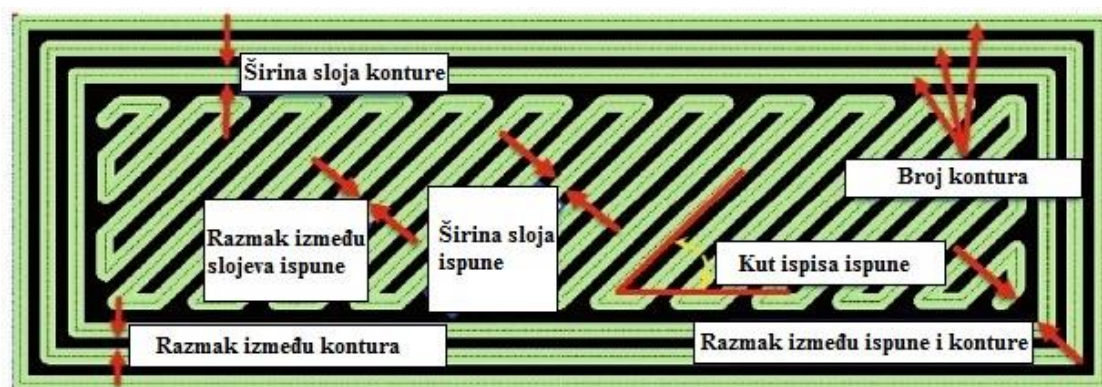
Poželjno je da se cijeli sustav nalazi u temperiranoj okolini neposredno ispod tališta materijala čime se smanjuje potrošnja energije. Tijekom izrade tvorevine kreće se izradom prvog sloja na radnu podlogu. Izradom prvog sloja ili se spušta radna podloga ili podiže ekstruder za debljinu novog sloja i kreće se s izradom tog novog sloja. Temeljem ovog principa ide se sloj po sloj dok se ne izradi cijela tvorevina. [9]

Kod složenije geometrije tvorevine, gdje određeni slojevi nemaju potporu sloja ispod, može se upotrijebiti potporna struktura izrađena od istog materijala ili različitog specijalnog materijala za potporna strukturu s primjenom dvije glave ekstrudera. Na slici 2.3 prikazan je postupak taložnog očvršćivanja s dvije mlaznice i mogućnošću izrade tvorevine s potpornom strukturom od drugog materijala. [9]



Slika 2.3. Postupak taložnog očvršćivanja – FDM [8]

Tijek izrade slojeva kreće prvo izradom vanjske konture te se zatim radi unutrašnjost različitim strukturama ispuna (puna struktura, mrežasta struktura, struktura pčelinjih saća itd.) Može se definirati i količina ispune te s određenom vrstom strukture se može uštedjeti na materijalu i masi tvorevine zadržavajući mehanička svojstva. Na slici 2.4 prikazan je primjer jedne strukture ispune. [9]



Slika 2.4. Primjer strukture sloja kod postupka FDM [10]

Kvaliteta tvorevine ovisi o više faktora budući se pomak vrši u smjeru 3 osi. Horizontalna točnost ovisi o mogućnosti što manjih pomaka glave ekstrudera u smjeru horizontalnih osi (x os i y os). Što je manja vrijednost mogućih pomaka to je kvaliteta tvorevine bolja. Debljina sloja odnosno moguća kvaliteta u smjeru z osi ovisi o otvoru mlaznice i doziranju materijala. Tipične vrijednosti moguće debljine sloja koje navode proizvođači niskobudžetnih 3D pisaa se kreću od 0,1 mm do 0,3 mm. Određeni proizvođači, kao npr. *Ultimaker* sa svojom serijom *Ultimaker 2* uređaja, navode mogućnosti debljine sloja i od 0,02 mm. Dodatni faktor koji utječe na kvalitetu tvorevine je i vezivna sila između slojeva zbog koje može doći do raznih grešaka prilikom izrade tvorevina. [11]

Glavne prednosti FDM postupka su: [9, 12, 13]

- raznolikost i cijena materijala koji se upotrebljavaju,
- brzina i sigurnost rada strojeva koji ne primjenjuju otrovne materijale,
- potrošnja energije (budući nije potreban laser za rad),
- lagano uklanjanje tvorevine s radne podloge (lakše nego kod SLA postupka),
- tvorevine je moguće dodatno obrađivati (pjeskariti, bušiti, bojati, galvanizirati itd.),
- moguće je primijeniti različite vrste ispuna kao i količinu što pridonosi uštedi materijala.

Glavni nedostaci FDM postupka su: [9, 12, 13]

- niska dimenzijska točnost izrađene tvorevine,
- vidljive linije između slojeva (potrebna naknadna obrada),
- vrlo često nužna potporna struktura,
- nepredvidljivo skupljanje materijala,
- mogućnost pojave grešaka prilikom izrade (vitoperenje na krajevima, raslojavanje),
- nemogućnost izrade oštih rubova (mlaznica kružnog presjeka),
- čvrstoća proizvoda je snižena u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva

2.2.2. Vrste materijala za upotrebu kod postupka FDM

Trenutno postoje dvije različite vrste polimernih materijala koji se ponajviše primjenjuju kod postupka FDM, te još nekoliko njih koji se rjeđe upotrebljavaju. Zanimljivo je da se sve više materijala razvija i testira koji će se moći primijeniti u obliku žice kao sirovine, te koji će ponuditi puno širi spektar fizičkih, kemijskih i mehaničkih svojstava. Budući je postupak FDM daleko najzastupljeniji u segmentu niskobudžetnih 3D pisaača, razvojem i dostupnošću novih materijala za 3D ispis može se ubrzanim tempom promijeniti tržište primjene niskobudžetnih 3D pisaača. [7]

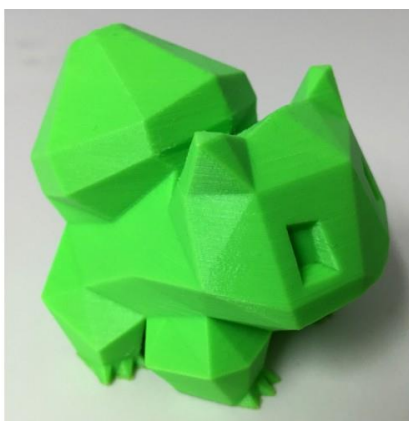
Polimerne žice trenutno se proizvode u dvije standardne veličine promjera 1,75 mm i 3 mm. Žica debljine 3 mm, koja je uglavnom bila standard, polako se zamjenjuje debljinom od 1,75 mm koja se može istisnuti malo lakše i kontrolirati malo bolje. Budući se za žicu od 1,75 mm mogu upotrijebiti i mlaznice manjih promjera moguće je dobiti tvorevinu bolje površinske točnosti tj. s manje vidljivim slojevima na površini tvorevine. Mnogi 3D pisaači i danas primjenjuju žicu debljine 3 mm, najviše u segmentu strojeva većeg radnog volumena jer se za izradu tvorevina većih dimenzija znaju primijeniti mlaznice nešto većih promjera kako bi se vrijeme izrade moglo skratiti. Cijena po 1 kg materijala za žicu promjera 3 mm zna biti malo niža nego od žice debljine 1,75 mm. [7]

2.2.2.1. Polilaktid - PLA

Najčešće upotrebljavana polimerna žica je izrađena od polilaktične kiseline (e. *polyactide* - PLA), biorazgradiv i ne štetan za okoliš polimerni materijal dobiven iz škroba. Njegova temperatura taljenja je u rasponu od 180 do 230 °C. Nema neugodnih mirisa prilikom istiskivanja, stoga se ne zahtijevaju posebne sigurnosne mjere ili ventilacija. Dobro prijanja za podlogu prilikom tiskanja i pri sobnoj temperaturi (ne zahtijeva skuplju izvedbu s grijanom radnom podlogom), ali samo ako je podloga prekrivena trakom od odgovarajućeg materijala (također jeftin proizvod, koji bi trebalo zamijeniti s vremena na vrijeme, uglavnom zato što ponekad bude oštećenja prilikom uklanjanja tvorevine s podloge). [7]

Tvorevina izrađena od PLA materijala je robusna, ali relativno krhka, i ne može se primijeniti kada je potrebna postojanost pri visokim temperaturama (kao za neke dijelove samog 3D pisača). Žica izrađena od PLA je relativno jeftina, u prosjeku oko 30 \$ za 1 kg i obično se prodaje u namotima od 0,5, 1 ili 2,3 kilograma (ali neki proizvođači ih prodaju i po metru). Dostupan je u osnovnoj prozirnoj bijeloj boji, ili u mnogim drugim nijansama boja. Tiskane tvorevine imaju lijepu glatku površinu. Posebna varijanta PLA je mekani ili fleksibilni PLA, koji se prerađuje pri nižim temperaturama i s vrlo malom brzinom, a može se primijeniti za ispis fleksibilnih zglobova, remena, guma, itd. [7]

Na slici 2.5 prikazana je izrađena tvorevina od PLA materijala.



Slika 2.5. Tvorevina izrađena od polilaktida – PLA [14]

2.2.2.2. Akrilonitril/Butadien/Stiren - ABS

Drugi najčešći materijal za izradu žice je napravljen od akrilonitril/butadien/stirena (ABS), ukratko polimer na bazi nafte koji se upotrebljava za mnoge svrhe, a najpoznatija primjena su LEGO™ kockice i kućišta kućanskih aparata. Pare koje se otpuštaju pri taljenju imaju miris pa se preporuča primjena ventilacije za odvođenje para prilikom ispisa s ABS-om na dulje vrijeme. Temperatura taljenja ABS-a je od 210 do 260 °C. [7]

Cijena žice izrađene od ABS-a je približno jednaka izrađenim od PLA, te je također prilično uobičajen materijal koji se primjenjuje za 3D ispis, unatoč zahtjevnijim uvjetima za rad. Tvorovina od ABS-a se obično tiska na grijanoj radnoj podlozi (oko 100 °C) prekrivenoj *Kapton* trakom kako bi bolje prijanjao na podlogu, dodajući troškove i složenost izrade samog pisaa (iz tog razloga nemaju svi pisaa dostupni na tržištu opciju s grijanom podlogom).

Moguće rješenje je tiskati s ABS materijalom na negrijanu podlogu prekrivenu s nekoliko slojeva ljepila: cijanoakrilat, sprej za kosu ili ljepila na bazi vode kao što je *Vinavil®57*. Primjena grijane radne podloge snižava mogućnost deformiranja tvorevina velikih dimenzija prilikom tiskanja. Prednost ABS materijala naspram PLA je da su nastale tvorevine više robusne i manje krhke, te postoje pri višim temperaturama. [7]

Žice od ABS-a su obično dostupne u više boja, uključujući i sjajne, fluorescentne, zlatne i srebrne, pa čak i materijale kojima se boja mijenja s temperaturom (primjerice, plavo/zeleno ispod 30 °C, a žuto/zeleno iznad 30 °C), čineći tvorevine tiskane s takvim materijalom osjetljive na temperaturu tijela). [7]

Na slici 2.6 prikazani su proizvodi izrađeni od ABS materijala.



Slika 2.6. Tvorovina izrađena od akrilonitril/butadien/stirena – ABS [14]

2.2.2.3. Poli(etilen-tereftalat) – PET

PET kao materijal za FDM postupak se pokazao kao alternativa za PLA i ABS. Glavna svojstva ovog materijala su čvrstoća i žilavost koje su i bolje od ABS-a s tim da pri radu nema neugodnih mirisa. Zahtjevi za rad su slični kao i kod PLA i ne zahtjeva rad s grijanom platformom. Temperatura taljenja se kreće od 220 do 250 °C. Jedna od prednosti PET-a je što je vrlo pogodan za recikliranje. [14]

Na slici 2.7 prikazana je tvorevina izrađena od PET materijala.



Slika 2.7. Tvorevina izrađena od poli(etilen-tereftalata) – PET [14]

2.2.2.4. Poliamid – PA

Polimerna žica od poliamida ima nekoliko zanimljivih svojstava među kojima su savitljivost, mala masa i kemijska postojanost. Rad s ovim materijalom bi se trebao odvijati pri višim temperaturama u odnosu na PLA, te čak i ABS (oko 245 °C). Nema nastajanja štetnih para pri proizvodnji i neugodnih mirisa, i dobro prijanja na podlogu. [7]

Upotrebljava se za tiskanje mehaničkih dijelova kojima je potrebna visoka otpornost na lom i vrlo nisko površinsko trenje. Upotrebljava se i kod prilagođenih proteza i dijelova vezanih za medicinu s obzirom da je inertan prema ljudskom tijelu ali još nije službeno odobren od strane FDA. Iz istog razloga se može upotrebljavati i pri izradi tvorevina koje mogu biti u dodiru s hranom, ali za navedenu primjenu bi se najprije trebalo obratiti proizvođaču za provjeru. [14]

Troškovi tiskanja s ovim materijalom su viši nego kod tiskanja s PLA ili ABS materijalom i jedan od rijetkih proizvođača je tvrtka *Taulman* s više vrsta poliamidnih materijala poput PA 618, PA 645, PA 680. [15]

Najčešće dostupna boja je bijela (prirodna), ali je moguće upotrijebiti industrijske boje za tkanine kako bi se mogle dobiti druge nijanse žice od PA. Slika 2.8. prikazuje tvorevine izrađene od poliamida u raznim nijansama boja. [16]



Slika 2.8. Tvorevine izrađene od poliamida – PA [14]

2.2.2.5. Polikarbonat - PC

Polikarbonat (PC) je vrlo čvrst i izdržljiv polimerni materijal s visokom optičkom prozirnošću i visokom temperaturom taljenja (oko 270 do 300 °C). Unatoč tome što se primjenjuje za mnoge industrijske proizvode (primjerice CD i DVD su izrađeni od polikarbonata) prvi testovi s niskobudžetnim 3D pisačima su započeli tek 2012. godine. Postoji samo nekoliko proizvođača žice izrađene od polikarbonata, a prodaje se po prilično skupoj cijeni. [7]

Na slici 2.9. prikazana je tvorevina izrađena od polikarbonata.



Slika 2.9. Tvorevina izrađena od polikarbonata – PC [14]

2.2.2.6. Poli(vinil-alkohol) - PVAL

Poli(vinil-alkohol) (PVAL) je polimerni materijal kojem je glavno svojstvo što je topljiv u vodi. Najčešće se primjenjuje za tiskanje potporne strukture kod tvorevina izrađenih od PLA i ABS materijala koja je lako topiva u toploj vodi, ostavljajući savršenu površinu tvorevine i pojednostavljuje (obično prilično zahtjevan) postupak uklanjanja potporne strukture. Na slici 2.10 prikazana je tvorevina s potpornom strukturom od PVAL. Temperatura tiskanja je oko 170 °C i nikada ne bi trebala prelaziti 230 °C. Preporučljivo je da se u radu s PVAL-om primjenjuje grijana platforma. Žica izrađena od PVAL materijala je također prilično skupa. [14]



Slika 2.10. Tvorevina s potpornom strukturom od poli(vinil-alkohola) – PVAL [14]

2.2.2.7. Polistiren visoke žilavosti – PS-HI

Polistiren visoke žilavosti – PS-HI (e. *High Impact Polystyrene*) je polimerni materijal topiv u *limonenu* (prirodno otapalo izvučeno iz kore limuna i ostalih agruma). Najčešća primjena ovog materijala je u industriji za ambalažu hrane. U obliku žice za FDM ispis se primjenjuje kod izrade potporne strukture (posebno za ABS) koja se može lako ukloniti bez mehaničkog rada. Ispis s PS-HI materijalom zahtijeva temperaturu od oko 230 °C. Na slici 2.11 je prikazana primjena PS-HI kao potporne strukture. [14]



Slika 2.11. Tvorevina s potpornom strukturom od polistirena visoke žilavosti – PS-HI [14]

2.2.2.8. Ostali tipovi polimernih materijala za FDM

Kao materijal u obliku žice za FDM postoje i razni kompoziti s vezivnom bazom PLA polimera. Razlikujemo kompozite koji u određenim postotcima sadrže vlakna od raznih drvenih materijala, metalni prah, kameni prah i ugljična vlakna. Na tržištu postoje i kompozitni materijali koji posjeduju i neka specifična svojstva kao što su magnetičnost i električna vodljivost te materijali koji su vrlo savitljivi. Na slikama 2.12 i 2.13 su prikazani primjeri proizvoda izrađenih od kompozita i elastičnih materijala. [14]

Razvojem novih materijala i padom cijena postojećih, postupak FDM postaje sve zanimljiviji za primjenu.



a)

b)

Slika 2.12. Tvorevine izrađene od kompozitnih materijala: a) kompozit PLA/drvo, b) kompozit PLA/metal [14]



Slika 2.13. Tvorevina izrađena od elastičnih materijala [14]

2.3. Usporedba niskobudžetnih s profesionalnim 3D pisačima

Ideja kako je moguće da se od profesionalnog 3D pisača uradi nešto novo, manjih dimenzija i više pristupačno je prvi put iznesena 2004. godine u radu koji je napisao Adrian Bowyer, u to vrijeme akademik sa Sveučilišta *Bath* u Velikoj Britaniji. U radu je zamišljen koncept samoreplicirajućih strojeva, koji bi bili u mogućnosti izraditi dio potrebnih dijelova za rad samog stroja, tako jednostavnih da bi ih bilo tko bio u stanju sam izraditi. [7]

Polazeći od ove jednostavne ideje, a uz pomoć velike virtualne zajednice okupljene na internetu rođen je pokret entuzijastičnih "kreatora" (e. *makers*) nazvan *RepRap* projekt. Zbog ciljeva *RepRap* projekta prema otvorenosti konstrukcijskih rješenja i softverskog koda potrebnog za rad 3D pisača, mnogi povezani projekti su upotrijebili njihovu konstrukciju za inspiraciju stvarajući ekosustav srodnih ili izvedenih 3D pisača, od kojih su većina isto otvorenog dizajna. Dostupnost tih projekata znači da se i razne varijante 3D pisača daju lako izvesti i osmisлити. Kvaliteta i složenost dizajna 3D pisača, međutim, kao i kvaliteta već sastavljenih uređaja, uvelike se razlikuje od projekta do projekta. Od 2008. godine postoji nekoliko projekata i tvrtki koje čine napore pri razvoju pristupačnih 3D pisača za kućnu upotrebu. [7]

Dok se profesionalni 3D pisači mogu snabdijevati samo s posebno izrađenim (i skupim) polimernim materijalima u obliku praha, kapljevine ili žice dopuštenih od strane proizvođača, osobni 3D pisači mogu primijeniti jeftinije polimerne materijale uglavnom u obliku žice (ABS, PLA, itd.) od bilo kojeg dobavljača (s promjerom od 3 mm ili 1,75 mm, ovisno o vrsti ekstrudera kod pisača). Profesionalni strojevi imaju čvrsto i masivno kućište obično izrađeno od metala (ili ponekad od plastike), dok je okvir niskobudžetnih 3D pisača često izrađen od tiskanih plastičnih dijelova, rjeđe od aluminijske ili čelike. [7]

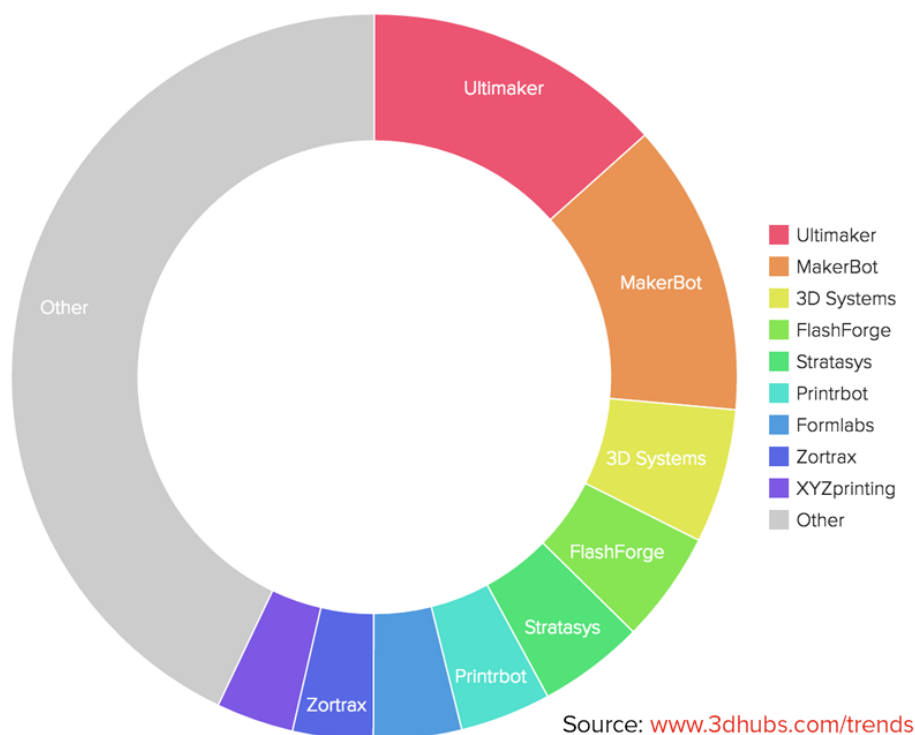
Softver potreban za rad profesionalnog uređaja je u vlasništvu proizvođača (zatvoreni kod) za kojeg proizvođači mogu organizirati specijalizirane treninge za operatore. Softver koji se upotrebljava za rad na niskobudžetnim 3D pisačima je uglavnom besplatan i otvorenog koda (ne nužno uvijek bogat opcijama, ali često vrlo prilagodljiv i podložan brzom razvoju). [7]

Profesionalni strojevi su kontrolirani računalima industrijskog tipa proizvedenih isključivo za navedene strojeve, dok se za niskobudžetne uređaje uvelike upotrebljava hardver otvorenog tipa poput *Arduino*, *Pololu*, *Sanguinololu*, itd. (male i vrlo jeftine računalne ploče koje su pogonjene s operativnim sustavom otvorenog koda). [7]

Više razlika može biti dodano ovoj usporedbi, a sve vodi prema istom smjeru: profesionalni 3D pisači će uvijek jamčiti bolje performanse i više mogućnosti nasuprot mnogo manjoj slobodi rada s hardverom i softverom za eksperimentiranje, te naravno, po znatno višoj cijeni.

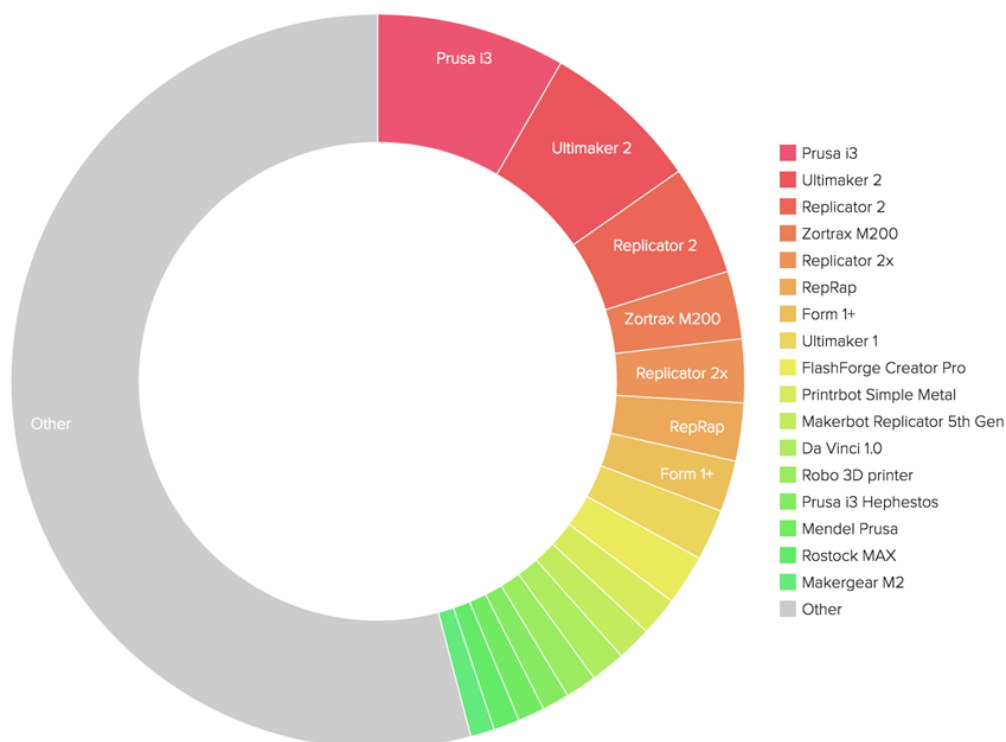
Niskobudžetni 3D pisači, naprotiv, su rijetko prikladni za profesionalnu uporabu, ali mogu postati vrijedan i snažan osobni alat. Možda se može, slično kao kod osobnih računala (PC), početi zvati ove uređaje, osobni 3D pisači ili samo P3DP ili P3P. [7]

Na slici 2.14 vidljiva je raspodjela tržišta 3D pisača prema proizvođaču.



Slika 2.14. Zastupljenost proizvođača 3D pisača na tržištu [17]

Na slici 2.15 vidljiva je zastupljenost modela određenih proizvođača na tržištu niskobudžetnih 3D pisača, gdje je prema slici vidljivo kako dosta veliki udio čine ostali proizvođači. Prema ovim podacima je jasno kako tržište niskobudžetnih 3D pisača nije centralizirano oko malog broja proizvođača nego da puno ljudi i tvrtki radi na razvoju novih uređaja u segmentu niskobudžetnih uređaja.



Source: www.3dhubs.com/trends

Slika 2.15. Zastupljenost niskobudžetnih 3D pisača prema modelu uređaja [17]

2.4. Izvedbe niskobudžetnih 3D pisača većeg radnog volumena

Poseban segment tržišta niskobudžetnih 3D pisača su uređaji koji imaju veći radni volumen od standardnih dimenzija većine uređaja na tržištu (približno 200 x 200 x 200 mm). Svaki od uređaja na tržištu karakteriziraju različiti radni volumeni, tako određeni imaju nešto veću radnu podlogu u smjeru jedne od horizontalnih osi (x ili y os), dok većina uređaja imaju sličan radni volumen u smjeru osi z odnosno visinu. U segmentu uređaja većeg radnog volumena ističu se uređaji koji imaju mogućnost izrade tvorevina većeg volumena u smjeru osi z.

2.4.1. *Ultimaker 2 Extended+*

Tvrtka *Ultimaker* je jedna od renomiranih tvrtki na tržištu niskobudžetnih 3D pisaa. Uređaj *Ultimaker 2 Extended+* je uređaj većeg radnog volumena iz njihove serije *Ultimaker 2+*. Karakterizira ih visoka preciznost i pouzdanost. Na slici 2.16 vidljiv je navedeni uređaj sa svojim najvažnijim značajkama u tablici 2.1.



Slika 2.16. *Ultimaker 2 Extended+* [18]

Tablica 2.1. Značajke *Ultimaker 2 Extended+* 3D pisaa [18]

Vanjske dimenzije:	357 x 342 x 488 mm
Radni prostor:	223 x 223 x 305 mm
Promjer mlaznice:	0,25 - 0,8 mm (izmjenjiva)
Preporučeni promjer žice:	2,85 mm
Radna podloga:	Temperirano staklo
Debljina sloja:	0,02 - 0,6 mm
Brzina 3D ispisa:	30 - 300 mm/s
Brzina slobodnog kretanja:	30 - 300 mm/s
Max. temp. ekstrudiranja:	260 °C
Max. temp. radne podloge:	100 °C
Masa:	12,3 kg
Softver:	Cura
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB
Cijena:	2 495,00 €

2.4.2. *Makerbot Replicator Z18*

Makerbot je vrlo značajna tvrtka u segmentu niskobudžetnih 3D pisaa. Uređaj *Makerbot Replicator Z18* prikazan na slici 2.17 karakterizira vrlo veliki radni volumen, modularnost izvedbe (lagana izmjena ekstrudera), senzor za potrošnju žice, kamera za nadgledanje procesa izrade s udaljene lokacije. [19]

U tablici 2.2 dane su najvažnije značajke uređaja.



Slika 2.17. *Makerbot Replicator Z18* [19]

Tablica 2.2. Značajke *Makerbot Replicator Z18* 3D pisaa [19]

Vanjske dimenzije:	493 x 565 x 861 mm
Radni prostor:	300 x 305 x 457 mm
Promjer mlaznice:	0,4 mm
Preporučeni promjer žice:	1,75 mm
Radna podloga:	PC-ABS
Debljina sloja:	0,1 - 0,2 mm
Brzina 3D ispisa:	/
Brzina slobodnog kretanja:	/
Max. temp. ekstrudiranja:	/
Max. temp. radne podloge:	/
Masa:	41 kg
Softver:	Makerbot Desktop Software
Prijenos podataka:	USB, Ethernet, Wi-Fi
Cijena:	6 499,00 \$

2.4.3. Type A Machines Series 1

Tvrtka *Type A Machines* sa sjedištem u SAD-u bavi se proizvodnjom niskobudžetnih 3D pisača od 2012. godine. Njihov *Series 1* uređaj prikazan na slici 2.18 karakterizira kvalitetno izrađeno metalno kućište i napredna tehnologija ekstrudera koji mogu raditi s velikim brojem različitih materijala dostupnih na tržištu, sve od standardnog PLA do PC-a i raznih kompozita. [20]

U tablici 2.3 prikazane su najvažnije značajke navedenog uređaja.



Slika 2.18. *Type A Machines Series 1* [20]

Tablica 2.3. Značajke *Type A Machines Series 1* 3D pisača [20]

Vanjske dimenzije:	765,75 x 571,80 x 458,67 mm
Radni prostor:	305 x 305 x 305 mm
Promjer mlaznice:	0,4 mm
Preporučeni promjer žice:	1,75 mm
Radna podloga:	Borosilikatno staklo
Debljina sloja:	0,05 - 0,3 mm
Brzina 3D ispisa:	15 - 120 mm/s
Brzina slobodnog kretanja:	30 - 250 mm/s
Max. temp. ekstrudiranja:	300 °C
Max. temp. radne podloge:	120 °C
Masa:	15,87 kg
Softver:	Cura za Type A Machines
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB, Ethernet, Wi-Fi
Cijena:	3 595,00 \$

2.4.4. gMax 1.5 XT +

gCreate je mala startup tvrtka iz SAD-a koja se bavi izradom niskobudžetnih 3D pisaa većeg radnog volumena. Karakterizira ih konstrukcija od preciznih aluminijskih profila, dvozonka grijana platforma, senzor blizine za aktivno prednamještanje z osi prilikom tiskanja uz vrlo pristupačnu cijenu. [21]

Na slici 2.19 prikazan je *gMax 1.5 XT+* sa svojim najvažnijim značajkama u tablici 2.4.



Slika 2.19. *gCreate gMax 1.5 XT+* [21]

Tablica 2.4. Značajke *gCreate gMax 1.5 XT+* 3D pisaa [21]

Vanjske dimenzije:	724 x 610 x 775 mm
Radni prostor:	406 x 406 x 533 mm
Promjer mlaznice:	0,5 mm
Preporučeni promjer žice:	2,85 mm
Radna podloga:	Borosilikatno staklo
Debljina sloja:	0,08 - 0,4 mm
Brzina 3D ispisa:	/
Brzina slobodnog kretanja:	/
Max. temp. ekstrudiranja:	do 300 °C
Max. temp. radne podloge:	120 °C (u dvije površinske zone)
Masa:	15,9 kg
Softver:	Ne isporučuje se uz uređaj
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB
Cijena:	2 995,00 \$

2.4.5. *DeltaWASP 20 40*

DeltaWASP 20 40 je niskobudžetni 3D pisac većeg radnog volumena s konstrukcijskom izvedbom i gibanjem kao kod delta robota. Karakterizira ih visoka preciznost i pouzdanost. S obzirom na konstrukcijsku izvedbu moguće je lakše i kompaktnije izvesti 3D pisac s većim radnim volumenom u smjeru osi z. Posjeduje mogućnost zatvorene komore i izmjenu ekstrudera za rad s materijalima poput gline ili keramike. [22]

3D pisac *DeltaWASP 20 40* prikazan je na slici 2.20 s najvažnijim značajkama u tablici 2.5.



Slika 2.20. *DeltaWASP 20 40* [22]

Tablica 2.5. Značajke *DeltaWASP 20 40* 3D pisaca [22]

Vanjske dimenzije:	490 x 440 x 870 mm
Radni prostor:	Ø200 x 400 mm
Promjer mlaznice:	0,4 - 0,9 mm (izmjenjiva)
Preporučeni promjer žice:	1,75 mm
Radna podloga:	Čelična ploča + temperirano staklo
Debljina sloja:	0,05 mm
Brzina 3D ispisa:	do 300 mm/s
Brzina slobodnog kretanja:	do 300 mm/s
Max. temp. ekstrudiranja:	260 °C
Max. temp. radne podloge:	100 °C
Masa:	20 kg
Softver:	ne isporučuje se uz uređaj
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB
Cijena:	2 370,00 €

2.5. Kombinacija aditivnih i konvencionalnih postupaka

Posljednjih godina dolazi do velikog napretka u aditivnoj proizvodnji kako u profesionalnom tako i u segmentu niskobudžetnih strojeva. Uslijed razvoja i mogućnosti rada ne samo s polimernim već i s metalnim materijalima, u profesionalnom segmentu dolazi do razvoja strojeva koji kombiniraju postupke odvajanja čestica materijala s aditivnim postupcima. Tako nastaju hibridni uređaji na kojima se može primijeniti i jedna i druga vrsta postupaka na istom stroju. [23]

Kako su se razvijali strojevi s aditivnim postupcima tako su se u isto vrijeme razvijali i strojevi s postupcima odvajanja čestica materijala. Glavna razlika između ovih dvaju vrsta postupaka je u zahtjevima pozicioniranja. Kod aditivnih postupaka zahtjevi su za što većim brzinama naspram točnosti dok kod postupaka odvajanja zahtjeva se velika preciznost obrade uz moguće manje brzine. Uz navedene usporedbe najvažnije je što kod aditivnih postupaka nisu prisutne sile koje se javljaju prilikom obrade odvajanjem čestica materijala, samim time i zahtjevnost konstrukcije i snage motora su manji kod aditivnih nego kod postupaka odvajanjem čestica materijala. Zbog navedenih zahtjeva vrste prijenosa koje najčešće vidimo kod strojeva s aditivnim postupcima su remenski prijenosi dok kod strojeva za obradu odvajanjem čestica materijala najčešće su navojna vretena i matice prisutni kao vrste prijenosa gibanja. [23]

Ono što današnji strojevi, kako za aditivne postupke tako i za postupke odvajanja, imaju zajedničko je programski jezik odnosno G kod. Temelj za razvoj hibridnih strojeva je taj što se upotrebljava isti programski jezik i slični načini prijenosa rotacijskog u linearno gibanje kod obje vrste postupaka. [23]

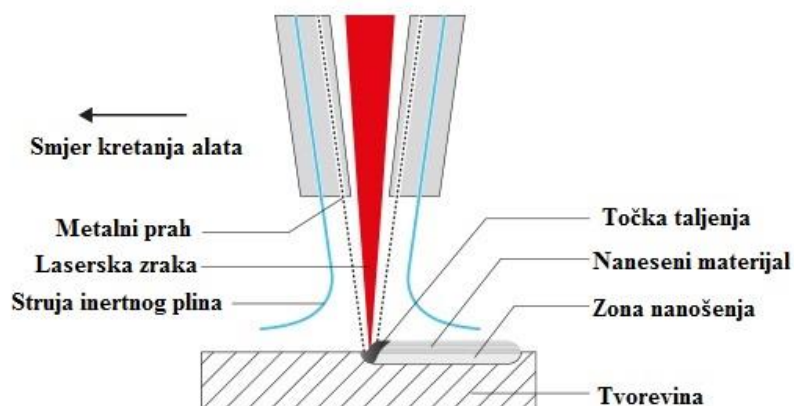
U profesionalnom segmentu tržišta proizvodnih strojeva, koji kombiniraju aditivne i postupke odvajanjem čestica materijala, jedan od značajnijih je *LASERTEC 65 3D* od tvrtke *DMG MORI* prikazan na slici 2.21.



Slika 2.21. DMG MORI LASERTEC 65 3D [24]

Radi se o hibridnom uređaju koji kombinira vrstu aditivnog postupka izravnog taloženja metala (e. *Laser Deposition Welding*), kojim se u struji plina pomoću lasera direktno nanosi i očvršćuje metalni prah, s konvencionalnim postupkom odvajanja materijala - glodanjem. [24]

Na slici 2.22. prikazana je vrsta postupka izravnog taloženja metala koju upotrebljava ovaj stroj.



Slika 2.22. Postupak izravnog taloženja metala tvrtke DMG MORI [24]

Stroj posjeduje rotacijski stol s kojim je moguće vršiti 5-osno glodanje i aditivni postupak nanošenja metala bez potrebe za potpornom strukturom. Glavna prednost hibridnog uređaja ovih karakteristika je mogućnost izrade velikih komada koji bi inače imali veliku količinu otpadnog materijala ukoliko bi se radilo samo s postupkom odvajanja. [24, 25]

Velika prednost je što je moguće nanošenje materijala na postojeći metalni proizvod te uz dodatno vršenje obrade nakon postupka nanošenja je moguće postizanje traženih točnosti i kvalitete površine. Stroj posjeduje mogućnost rada s puno različitih metalnih materijala kao što su nehrđajući čelici, alatni čelici, aluminijske legure, bakrene legure i legure plemenitih metala. [24, 25]

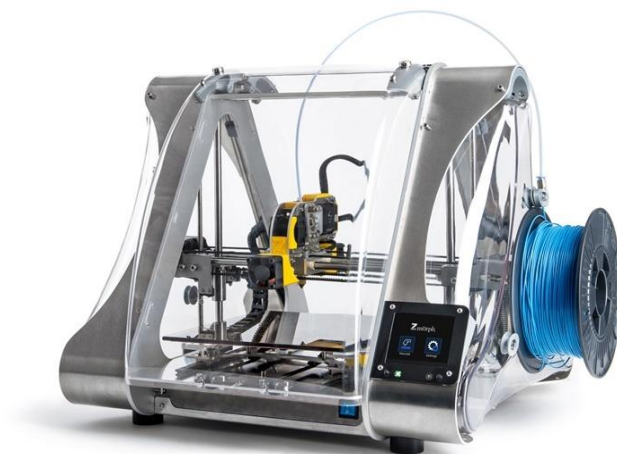
U niskobudžetnom segmentu tržišta postoje strojevi koji imaju mogućnost uz aditivne postupke koristiti alate za obradu odvajanjem materijala. Materijali koji se upotrebljavaju kod aditivnog postupka su polimerni materijali, a postupak je taložno očvršćivanje – FDM. Kako se radi o niskobudžetnim uređajima materijali s kojima se može raditi obrada odvajanjem su uglavnom polimerni materijali i drvo. Moguća je i obrada metalnih legura manje čvrstoće, ali uglavnom s manjim dubinama rezanja, odnosno postupak graviranja. [23]

2.6. Izvedbe niskobudžetnih strojeva s kombinacijom aditivnih i konvencionalnih postupaka

2.6.1. ZMorph 2.0 SX

ZMorph 2.0 SX je niskobudžetni hibridni uređaj prikazan na slici 2.23, koji osim 3D ispisa je u mogućnosti glodati i gravirati pomoću lasera. Karakterizira ga jednostavna mogućnost izmjene alata i radne podloge. Uz standardni ekstruder s jednom mlaznicom moguće je izvršiti zamjenu alata s dvostrukim ekstruderom za istovremeni rad s dva materijala, motorvretenom snage 300 W s prihvatom za alate za obradu odvajanjem, laserskom diodom snage 2 W za lasersko graviranje, te ekstruderom za materijale poput čokoladne paste, silikona ili keramike. [26]

U tablici 2.6 su prikazane najvažnije značajke 3D ispisa navedenog uređaja.



Slika 2.23. ZMorph 2.0 SX [26]

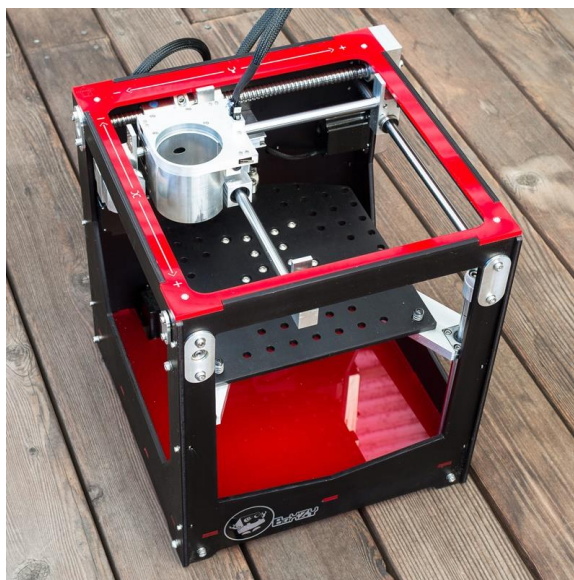
Tablica 2.6. Značajke ZMorph 2.0 SX hibridnog uređaja [26]

Vanjske dimenzije:	530 x 555 x 480 mm
Radni prostor:	250 x 235 x 165 mm
Promjer mlaznice:	0,2 - 0,4 (izmjenjiva)
Preporučeni promjer žice:	1,75 mm
Radna podloga:	Temperirano staklo (izmjenjiva)
Debljina sloja:	0,05 - 0,4 mm
Brzina 3D ispisa:	60 - 150 mm/s
Brzina slobodnog kretanja:	500 mm/s
Max. temp. ekstrudiranja:	do 300 °C
Max. temp. radne podloge:	120 °C
Masa:	20 Kg
Softver:	Voxelizer
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB, Ethernet
Cijena:	2 390,00 – 3 390,00 € (ovisno o broju alata)

2.6.2. BoXZY

BoXZY je niskobudžetni hibridni uređaj prikazan na slici 2.24. Uz 3D ispis moguće je primijeniti i druge alate kao što je motorvreteno snage 938 W s prihvatom alata za obradu odvajanjem ili laser snage 2 W za graviranje. Glavna karakteristika navedenog stroja je čvrsta konstrukcija kućišta, vrlo precizan prijenos gibanja pomoću kugličnih navojnih vretena i koračni elektromotori veće snage. [27]

S obzirom na navedene karakteristike moguće je glodati i materijale poput aluminijskih i bakrenih legura. Način izmjene alata je vrlo jednostavan i brz. U tablici 2.7 prikazane su najvažnije značajke navedenog uređaja. [27]



Slika 2.24. BoXZY [28]

Tablica 2.7. Značajke BoXZY hibridnog uređaja [27]

Vanjske dimenzije:	388 x 339 x 357 mm
Radni prostor:	165 x 165 x 165 mm
Promjer mlaznice:	0,4 mm
Preporučeni promjer žice:	1,75 mm
Radna podloga:	/
Debljina sloja:	0,1 - 0,2 mm
Brzina 3D ispisa:	/
Brzina slobodnog kretanja:	/
Max. temp. ekstrudiranja:	/
Max. temp. radne podloge:	/
Snaga motora za glodanje:	938 W
Broj okretaja motora za glodanje:	10 000 – 30 000 okr./min.
Snaga lasera:	2 000 mW
Spektar svjetlosti lasera:	445 nm
Masa:	20 kg
Softver:	BoXZY interface
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB
Cijena:	3 599,00 \$

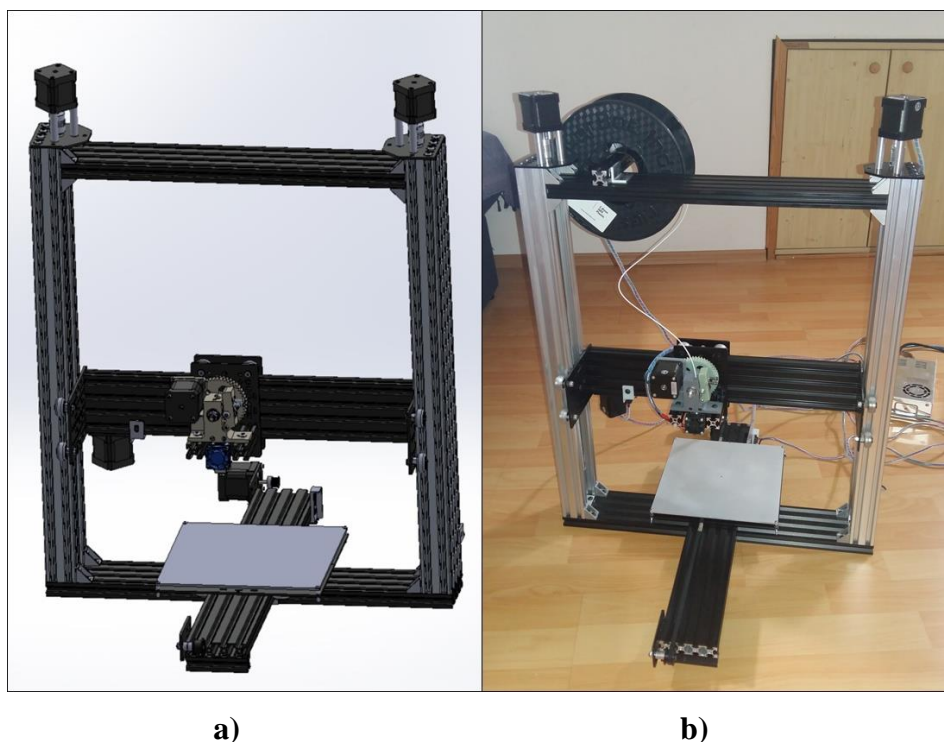
3. IZVEDBA NISKOBUDŽETNOG 3D PISAČA

3.1. Konstrukcijska izvedba niskobudžetnog 3D pisača

Niskobudžetni 3D pisači uglavnom se sastoje od ekstrudera postavljenog na računalno upravljanoj kartezijskoj konstrukciji. Postoji više izvedba gibanja u smjeru sve tri osi, ali dvije najčešće izvedbe strojeva kartezijske konstrukcije su: [29, 30]

- izvedba gibanja alata (ekstrudera) po x i y osi uz gibanje radne podloge u smjeru z osi,
- izvedba gibanja alata (ekstrudera) po x i z osi uz gibanje platforme u smjeru y osi.

Kad se stoji gledajući prema samom uređaju, pokret u smjeru x osi je s jedne strane u drugu, odnosno s lijeva na desno, pokret u smjeru y osi je pokret naprijed/nazad i pokret u smjeru z osi su pokreti prema gore i dolje po vertikalnoj ravnini. Na slici 3.1 vidljiv je model izvedbe niskobudžetnog 3D pisača uz fotografiju izrađenog stroja kao eksperimentalnog dijela ovog rada. Na navedenom 3D pisaču alat (ekstruder) se giba u smjeru x i z osi dok se radna podloga giba u smjeru y osi.



Slika 3.1. Izvedba niskobudžetnog 3D pisača: a) 3D model izvedbe, b) izrađeni stroj

Translacija rotacijskog u linearno gibanje se općenito postiže primjenom jednog od dva različita načina: [31]

- pogonski sustav izveden kombinacijom remen / remenica,
- pogonski sustav izveden s navojnim vretenom i maticom.

Rotacijsko gibanje za sve tri osi se vrši koračnim elektromotorima. U smjeru x i y osi se translacija rotacijskog u linearno gibanje uglavnom vrši preko zupčastog remena, a u smjeru z osi najčešće po navojnom vretenu. Remenje i remenice su dobri za brza i neopterećena gibanja dok su navojna vretena dobra za spora, ali opterećena gibanja. [31]

Uz translaciju gibanja iz rotacijskog u linearno važan dio pogonskog sustava je sustav vođenja u smjeru sve tri osi. Pogonski sustav vođenja je najčešće izrađen od čeličnih šipki s linearnim ležajevima povezanih tiskanim plastičnim dijelovima s kućištem i alatom (ekstruderom). [30]

Preciznija izvedba pogonskog sustava vođenja je sa sustavom kotačića s kugličnim ležajevima koji se kreću uzduž žlijebova precizno izrađenih aluminijskih profila.

Osim najčešćih izvedbi kartezijske konstrukcije postoji sustav ne-kartezijske konstrukcije temeljen na izvedbi delta robota. Princip kretanja je takav da je glava ekstrudera pričvršćena na prihvat s kojim se kontrolira pomoću tri "ruke" raspoređene u piramidalnoj konfiguraciji pričvršćenoj na vertikalne stupove, gdje je radna podloga fiksna. Jedan ovakav stroj je *DeltaWASP 20 40* prikazan na slici 2.20.

3D pisač opisan u ovom radu je samostalne izrade od dijelom naručenih specijaliziranih komponenti za sastavljanje CNC strojeva, a dijelom samostalno konstruiranih i tiskanih dijelova na 3D pisačima dostupnim na *Fakultetu Strojарstva i brodogradnje*. Uređaj spada u niskobudžetni razred s obzirom na cijenu i izvedbu konstrukcije, ali s primjenom mehaničkih komponenti koje se upotrebljavaju i u strojevima u profesionalnom segmentu. Karakteristično za ovu izvedbu je mogućnost jednostavne izmjene ekstrudera i moguće postavljanje nekog drugog alata tipa motorvretena s prihvatom za alate za obradu odvajanjem. U tablici 3.1 prikazane su osnovne značajke konstruiranog uređaja. Dimenzije uređaja su nešto veće u smjeru osi z tako da navedeni uređaj spada u kategoriju uređaja većeg radnog volumena.

Tablica 3.1. Osnovne značajke izrađenog 3D pisača

Vanjske dimenzije:	530 x 610 x 710 mm
Radni prostor:	200 x 200 x 330 mm
Promjer mlaznice:	0,4 mm (izmjenjiva)
Preporučeni promjer žice:	1,75 mm
Radna podloga:	Aluminijska ploča
Debljina sloja:	trenutno nepoznato
Brzina 3D ispisa:	trenutno nepoznato
Brzina slobodnog kretanja:	trenutno nepoznato
Max. temp. ekstrudiranja:	300 °C
Max. temp. radne podloge:	120 °C
Masa:	12 kg
Softver:	svi softveri na slobodnom tržištu
Prijenos podataka:	SD memorijska kartica, USB
Cijena:	15 000,00 kn

3.2. Mehanički sustavi niskobudžetnog 3D pisača

Niskobudžetni 3D pisac opisan u ovom radu sastoji se od nekoliko karakterističnih mehaničkih sustava. U tablicama 3.2 i 3.3 nalazi se popis svih mehaničkih komponenti koje su potrebne za sastavljanje navedenog uređaja uz osnovne karakteristike.

Tablica 3.2. Mehanički dijelovi potrebni za izradu 3D pisača

Naziv	Broj komada	Napomena
Ležaj F695ZZ	2	dimenzije: 5x13/15x4 mm
Komplet za koloturu (gonjena remenica)	1	komplet se sastoji od: 1x kolotura, 2x ležaj 625 2RS, 1x odstojnik 10x5x1 mm, 1x poliamidni odstojnik 1/8", 1x M5 vijak s plitkom glavom 25 mm, 1x M5 samokočna matica
Komplet kotačića za vođenje	16	komplet se sastoji od: 1x kotačić za vođenje, 2x ležaj 625 2RS, 2x odstojnik 10x5x1 mm, 1x M5 samokočna matica
Ležaj 688ZZ	2	dimenzije: 8x16x5 mm
Kutni nosač	12	dimenzije: 20x20x17 mm, promjer provrta za M5 vijak
V profil C oblika	2	izrezan na potrebnu duljinu: 600 mm
Elastična spojka	2	dimenzije provrta: 5 x 8 mm
L nosač dvostruki	9	dimenzije: 20x20x38 mm, promjer provrta za M5 vijak

Tablica 3.2. Mehanički dijelovi potrebni za izradu 3D pisača (nastavak)

Naziv	Broj komada	Napomena
L nosač jednostruki	2	dimenzije: 20x20x14,5 mm, promjer provrta za M5 vijak
Navojno vreteno	2	duljina: 540 mm, Tr 8 mm, 2 mm korak, 4-vojno
Pritisni stezač za blokiranje	2	za navojno vreteno $\varnothing 8$ mm
M5 profilirana matica	65	
M5 ugradna profilna matica	5	
M5 profilirana matica s oprugom	3	
Matica za navojno vreteno (s vijkom za poništavanje zračnosti)	2	za navojno vreteno $\varnothing 8$ mm, dimenzije: 34x33x12 mm
Remenica GT2 20 zubi (pogonska remenica)	2	izvedba remena: GT2, broj zubi: 20, max. širina remena: 7 mm, provrt: $\varnothing 5$ mm
Zupčasti remen (otvoreni prijenos)	1	širina remena: 6 mm, potrebna duljina remena: 2 m
Zatvarač zupčastog remena	4	
Opruga za zatezanje zupčastog remena	2	
Odstojnik	2	za navojno vreteno $\varnothing 8$ mm
Aluminijski odstojnik duljine 1/4"	16	unutarnji provrt za M5 vijak
Poliamidni odstojnik duljine 1/4"	4	unutarnji provrt za M5 vijak
Aluminijski odstojnik duljine 40 mm	6	unutarnji provrt za M5 vijak
Ekscentrični odstojnik duljine 1/4"	10	unutarnji provrt za M5 vijak
Predbušena aluminijska ploča za radnu podlogu	1	dimenzije: 216 x 216 mm
Predbušena aluminijska ploča za pokretni sustav	4	dimenzije: 127 x 88 mm
Predbušena aluminijska ploča za montažu gonjene remenice	1	dimenzije: 67 x 39,5 mm
V profil dimenzija 20x20 mm	1	dimenzije: 1 000 mm profil (izrezan na potrebne mjere)
V profil dimenzija 20x80 mm	2	dimenzije: 1 000 mm profil (izrezan na potrebne mjere)
Predbušena aluminijska ploča za montažu NEMA 17 koračnog motora	1	dimenzije: 82 x 39,5 mm
Predbušena aluminijska ploča za montažu NEMA 17 koračnog motora	1	dimenzije: 60 x 53 mm
Predbušena aluminijska ploča za montažu NEMA 23/NEMA 17 koračnog motora	2	dimenzije: 72,5 x 80 mm
Nosač mikroprekidača	3	konstruiran i izrađen na 3D pisaču
Ukupno:	190	

Tablica 3.3. Ostali spojni elementi niskobudžetnog 3D pisača

Naziv	Broj komada	Napomena
M3 glavati imbus vijak 6 mm	4	za montažu motora na y osi
M3 glavati imbus vijak 8 mm	3	za montažu motora na x osi
M3 glavati imbus vijak 45 mm	6	za montažu motora na z osi
M5 vijak s zaobljenom glavom 8 mm	72	
M5 vijak s zaobljenom glavom 10 mm	2	za pričvrstiti ekstruder na okvir
M5 vijak s zaobljenom glavom 45 mm	1	za montažu gonjene remenice na x osi
M5 vijak s plitkom glavom 10 mm	2	
M5 vijak s plitkom glavom 20 mm	4	za montažu matice za navojno vreteno
M5 vijak s plitkom glavom 25 mm	12	
M5 vijak s plitkom glavom 35 mm	5	
M5 samokočna matica	5	
M3 vijak s zaobljenom glavom 20 mm	4	za montažu grijane radne podloge
M3 krilna matica	4	za montažu grijane radne podloge
Polimerna podloška za M3 maticu	16	za montažu grijane radne podloge
Tlačna opruga za grijanu radnu podlogu	4	unutarnjeg promjera za M3 vijak, duljina opuštene opruge 10 mm

Ukupno:	116
---------	-----

3.2.1. Remenski prijenos

Kad je u pitanju točnost, najvažniji dio 3D pisača je remenski prijenos. Trenutno najbolji dostupni remen na tržištu za niskobudžetne 3D pisače je GT2 (e. *Gates Tooth*) remen, uz izrađenu remenicu koja odgovara točnom promjeru vratila koračnih elektromotora (najčešće je to 5 mm). [31]

Na slici 3.2 prikazan je 3D model pogonske remenice uz prikaz montaže na vratilu elektromotora. Montaža pogonske remenice na vratilo elektromotora se vrši pomoću svornih vijaka vidljivih na slici 3.2.b.

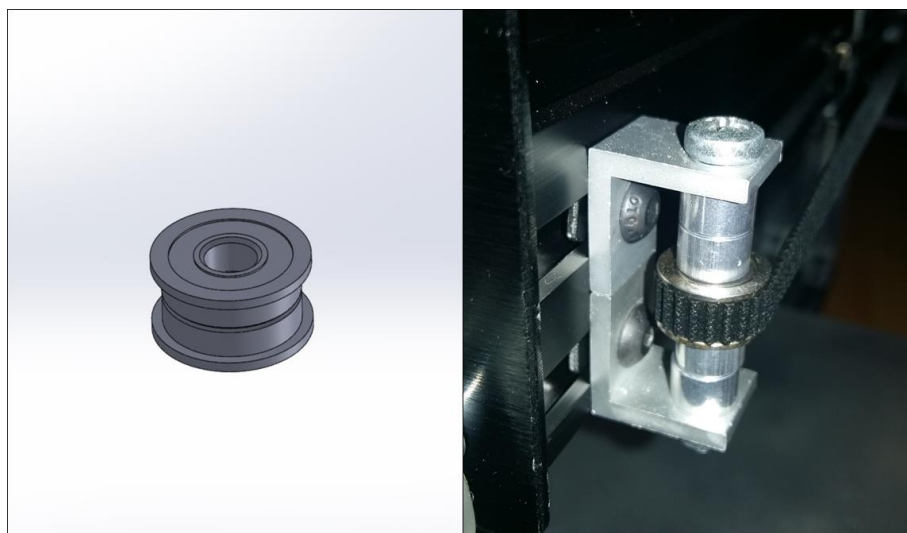


a)

b)

Slika 3.2. Pogonska remenica: a) 3D model pogonske remenice, b) prikaz montaže na stroju

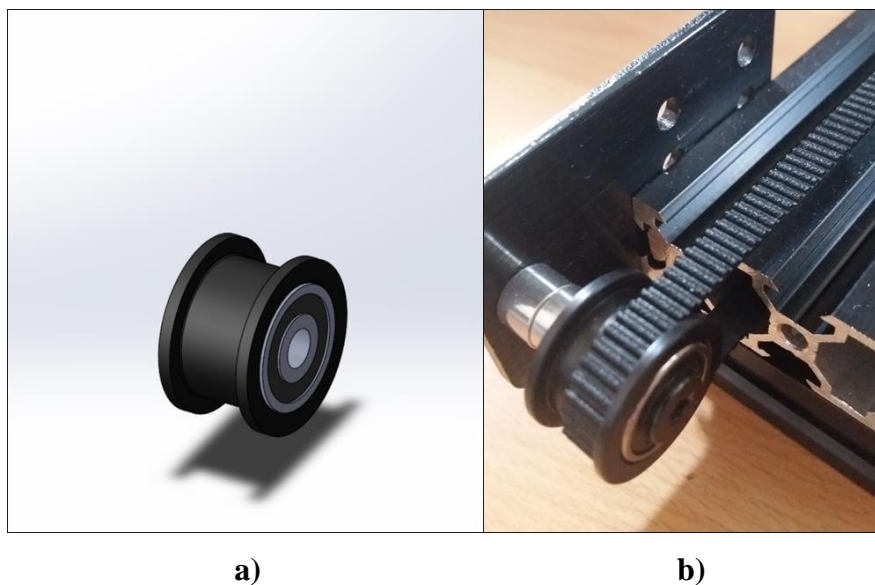
U izrađenoj izvedbi 3D pisaa remenski prijenos se upotrebljava za translaciju gibanja iz rotacijskog u linearno u smjeru x osi koju vrši alat i u smjeru y osi koju vrši radna podloga. Na slici 3.3 i slici 3.4 vidljivi su modeli izvedbe gonjenih remenica za x i y os uz prikaze montaže na stroju.



a)

b)

Slika 3.3. Gonjena remenica za pogon po x osi: a) 3D model gonjene remenice, b) prikaz montaže na stroju



Slika 3.4. Gonjena remenica za pogon po y osi: a) 3D model gonjene remenice, b) prikaz montaže na stroju

Prijenos se vrši otvorenim remenskim prijenosom uz primjenu zatvarača remena (slika 3.5).



Slika 3.5. Prikaz remenskog zatvarača

Broj potrebnih dijelova i glavne karakteristike za ostvarenje remenskog prijenosa se nalaze u tablici 3.2.

Za najbolju izvedbu je poželjno imati najmanje 6 zuba u kontaktu s remenicom u bilo kojem trenutku. To smanjuje šanse za proklizavanjem remena, i pomaže smanjiti prazan hod čak i više. U praksi to znači da je poželjno imati remenicu s minimalno 12 zuba. [32]

Iznad tog minimuma, manje zubi je općenito bolje nego više zubi, zato što remenica manjeg promjera daje i više okretnog momenta i veću rezoluciju. Veća rezolucija se ostvaruje s manjom remenicom budući koračni elektromotori imaju zadan broj koraka po punom okretaju, a manja remenica radi manji linearni pomak po koraku. [32]

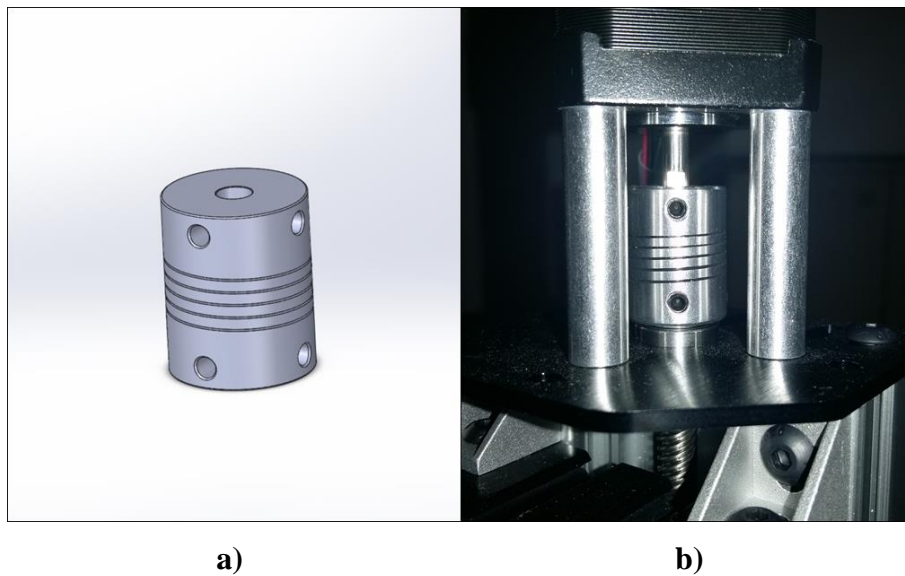
3.2.2. Prijenos navojnim vretenom

Većina niskobudžetnih 3D pisaa upotrebljava navojno vreteno za gibanje po z osi. Kod 3D pisaa za gibanje po z osi nisu potrebni brzi pomaci (iako je bolje ako se može kretati brže), zato što su u pravilu potrebni pomaci od samo desetinki mm u vremenu prelaska na sljedeći sloj. Navojno vreteno je dobar izbor za točnost i podnošenje opterećenja u isto vrijeme. [31]

Niskobudžetni uređaji nemaju zahtjeve za velike sile, iako CNC strojevi za postupke odvajanjem čestica materijala upotrebljavaju navojna vretena za gibanja u sve tri osi. Budući navojno vreteno u smjeru z osi podupire određenu masu alata (glavu ekstrudera) ili radnu podlogu s tvorevinom, ovisno o izvedbi gibanja, preporučeno je primijeniti navojno vreteno s maticom kao pogon za translaciju rotacijskog u linearno gibanje u smjeru z osi. [31]

Kod stroja obrađenog u ovom radu za translaciju gibanja u smjeru z osi se upotrebljavaju dva navojna vretena s pripadajućim maticama, koje su vezane vijcima za platformu kako bi se sustav za gibanje po x osi zajedno s alatom (ekstruderom) podizao u smjeru osi z. U tablici 3.2 prikazan je broj potrebnih dijelova, uz glavne karakteristike, za izvedbu ovog prijenosa.

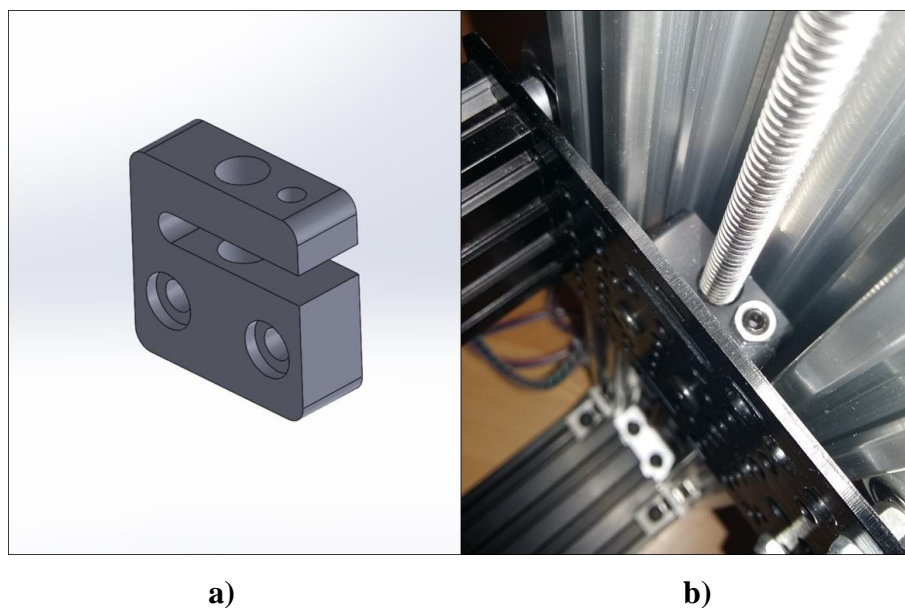
Rotaciju izvode dva koračna elektromotora koji su putem elastične spojke vezani s navojnim vretenom (slika 3.6). Spojka je pomoću svornih vijaka pričvršćena i na vratilo elektromotra i na navojno vreteno. Navojno vreteno je uležišteno na jednom kraju kako bi gibanje moglo biti precizno s manje vibracija. Uležištenje je vidljivo na slici 3.6.b ispod spojke.



Slika 3.6. Elastična spojka za prijenos gibanja navojnim vretenom: a) 3D model spojke, b) prikaz montaže na stroju

Matica za navojno vreteno (slika 3.7) konstruirana je na način da se pomoću svornog vijka može poništavati zračnost navojnog vretena.

Mogući nedostatak ove izvedbe je nedostatak dodatnog uležištenja na drugom kraju navojnog vretena, iako zbog brzine kretanja prilikom 3D tiskanja nije presudno, ali prilikom obrade odvajanjem bi uslijed vibracija moglo doći do neželjenih grešaka.

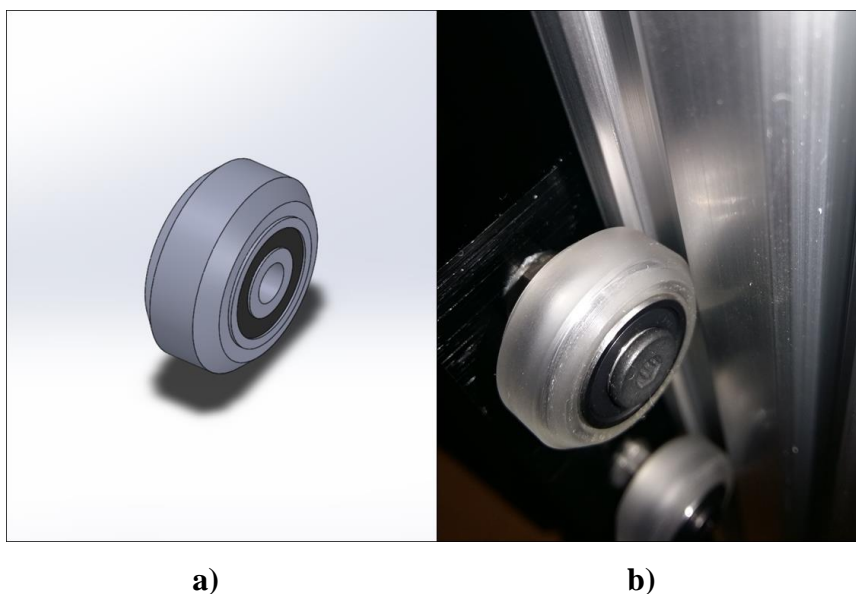


Slika 3.7. Matica navojnog vretena: a) 3D model matice, b) prikaz montaže na stroju

3.2.3. Pogonski sustav vođenja

U kartezijanskoj izvedbi gibanja 3D pisača uz pogon za translaciju rotacijskog gibanja u linearno najvažniji je pogonski sustav vođenja. Kao pogonski sustav vođenja se najčešće upotrebljavaju okrugle čelične šipke preko kojih se pomoću linearnih ležajeva, koji se nalaze u kućištu najčešće od tiskanih plastičnih materijala, povezuje ostatak konstrukcije poput kućišta i nosača alata (ekstrudera). Ovaj sustav je vrlo bitan kako bi se ostvarilo precizno linearno gibanje u smjeru sve tri osi.

U izvedbi 3D pisača u sklopu ovog rada primjenjuje se nešto drugačiji način prijenosa. Sustav vođenja linearnog gibanja se izvodi pomoću kotačića s kugličnim ležajevima koji na svom obodu imaju skošenja pomoću kojih se, uz pomoć precizno izrađenih aluminijskih profila s V utorom predviđenim za ovakvu vrstu kotačića, izvodi vrlo precizno vođenje linearnog gibanja. Na slici 3.8 prikazan je model jednog ovakvog kotačića uz njegov prikaz montaže na stroju.

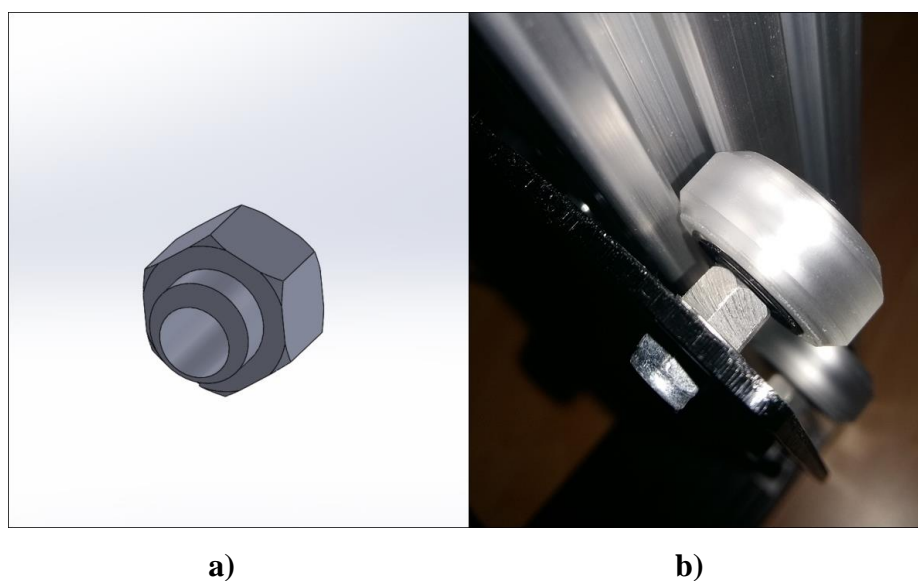


Slika 3.8. Kotačić za vođenje: a) 3D model kotačića, b) prikaz montaže na stroju

Prednost ovakvog načina vođenja je puno veća nosivost od izvedbe sa linearnim ležajevima i šipkama koje su podložne savijanju. Iz navedenog razloga ovakav se način vođenja može pronaći kod puno niskobudžetnih CNC strojeva za obradu odvajanjem te čak i u profesionalnom segmentu.

Kako bi se ostvario konstantni kontakt oboda kotačića s utorom aluminijskog profila upotrebljavaju se ekscentrični odstoynici, pomoću kojih je moguće podesiti potreban pritisak kotačića na profil i time se potpuno uklonila moguća zračnost. Na slici 3.9 prikazan je ekscentrični odstoynik te primjer montaže na stroju.

U tablici 3.2 nalazi se broj komada i karakteristike potrebnih dijelova i za ovaj sustav.



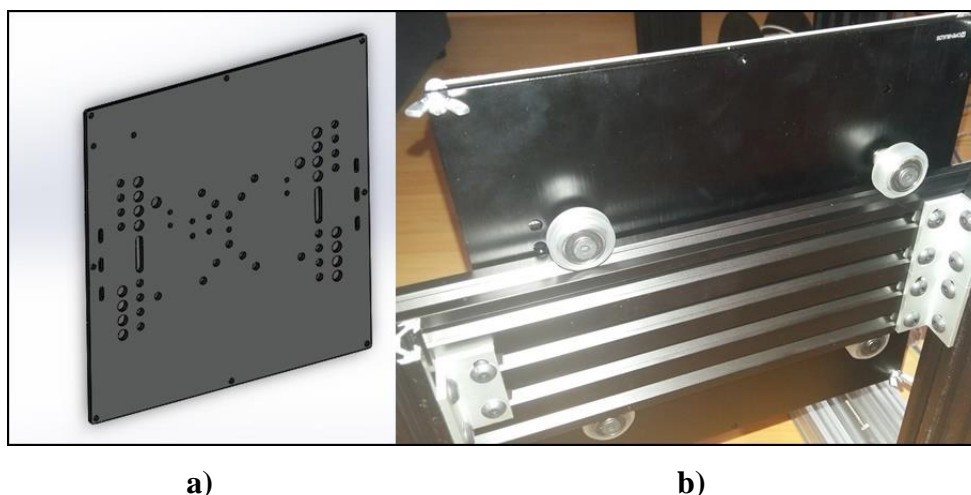
Slika 3.9. Ekscentrični odstoynik: a) 3D model ekscentričnog odstoynika, b) prikaz montaže na stroju

3.2.4. Radna podloga za tiskanje

Radna podloga je dio 3D pisača na kojem nastaju tiskane tvorevine. Radna podloga za tiskanje može biti nepomična, kao i kod originalne *RepRap* izvedbe, ili se može kretati uz jednu od tri osi. Većina niskobudžetnih 3D pisača imaju platformu koja se kreće duž y ili z osi. Radna podloga se obično sastoji od dvije ploče: donje ploče i gornje ploče. [31]

Donja ploča daje čvrst temelj kako bi se gornja ploča mogla dobro povezati s ostatkom konstrukcije. Ako se radna podloga giba duž jedne osi onda je donja ploča izravno povezana s mehanizmom koji pokreće radnu podlogu. Ukoliko se giba u smjeru y osi onda se uglavnom radi o remenskom prijenosu, odnosno ukoliko je gibanje u smjeru z osi najčešće se radi o navojnom vretenu s maticom. [31]

U izvedbi 3D pisača obrađenog u ovom radu radna podloga se giba u smjeru y osi i prijenos gibanja se vrši putem remenskog prijenosa. Donja ploča je izrađena kao predbušena aluminijska ploča na koju je direktno vezan otvoreni remenski prijenos pomoću remenskih zatvarača, te je vijcima i samokočnim maticama vezana za pogonski sustav vođenja. Na slici 3.10 vidi se 3D model predbušene ploče i pogled na montažu ploče na stroj. U tablici 3.2 se nalaze potrebni dijelovi za sastavljanje donje ploče na stroj sa svojim karakteristikama.



Slika 3.10. Donja ploča radne podloge: a) 3D model donje ploče, b) prikaz montaže na stroj

Gornja ploča se uglavnom ugrađuje na donju ploču na oprugama. Opruge dopuštaju da se gornja ploča može namještati pomoću vijaka za podešavanje. Također opruge služe, ukoliko slučajno dođe do sudara glave ekstrudera s pločom, kako bi se ublažio udar. Gornja ploča može i ne mora biti zagrijavana. [31]

Obično je izrađena od tiskane ploče (PCB) ili metala. Ako je ploča zagrijavana, obično će imati komad stakla pričvršćen na vrhu ploče. Dodatno se primjenjuju razne vrste traka na gornju ploču kako bi ekstrudirani polimer lakše prijanjao za radnu podlogu te također olakšava uklanjanje tvorevine nakon što je postupak izrade završio. Najčešće vrste traka koje se primjenjuju su *Kapton* trake odnosno trake izrađene od poliamida. [31]

U izvedbi 3D pisača obrađenog u ovom radu gornja ploča je fino obrađena aluminijska ploča vezana s vijcima i leptir maticama na donju ploču između kojih se nalaze opruge pomoću kojih se može fino namještati visina gornje ploče u četiri točke.

Na slici 3.11 vidljiva je gornja ploča, koja služi kao podloga za izradu tvorevina, s primjerom sustava namještanja s oprugom. Gornja ploča se može zagrijavati s grijačima koji se nalaze ispod ploče.



Slika 3.11. Gornja ploča radne podloge s oprugom i vijkom za namještanje visine

3.2.5. Sklop ekstrudera

Ekstruder je odgovoran za povlačenje žice, provlačenje i omekšavanje kroz mlaznicu te polaganje materijala na radnu podlogu i izradu tvorevine.

Sklop ekstrudera se sastoji iz dva dijela: [31]

- mehanički sustav za povlačenje žice (hladni dio ekstrudera),
- sustav za vođenje i omekšavanje žice (vrući dio ekstrudera).

Sustav za povlačenje žice može biti povezan sa sustavom vođenja i omekšavanja žice na dva različita načina: [31]

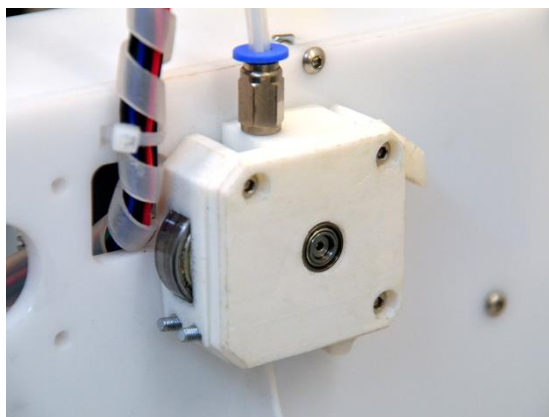
- direktni spoj,
- *Bowden* način izvedbe.

Kod uređaja izrađenog u sklopu ovog rada upotrebljava se direktni način spoja dva sustava ekstrudera. Ova veza mora biti čvrsta i dovoljno precizna kako bi žica mogla nesmetano prolaziti do mlaznice, ali u isto vrijeme spriječiti veći dio prijenosa topline. Materijal koji se upotrebljava za nesmetani prolazak žice je polimerna košuljica izrađena od poli(tetrafluoretilena) - PTFE.

Kod *Bowden* načina izvedbe mehanički dio povlačenja žice je odvojen od sustava vođenja i omekšavanja pomoću duge cijevi izrađene od PTFE materijala. [31]

Prednost *Bowden* ekstrudera je što se puno manja masa kreće pri radu stroja jer je mehanički dio odvojen i pričvršćen na kućištu što omogućuje više brzine rada. Nedostatak je što se određeni elastičniji materijali teže mogu precizno voditi do sustava omekšavanja. [31]

Na slici 3.12 prikazana je *Bowden* izvedba ekstrudera pričvršćena na kućište.

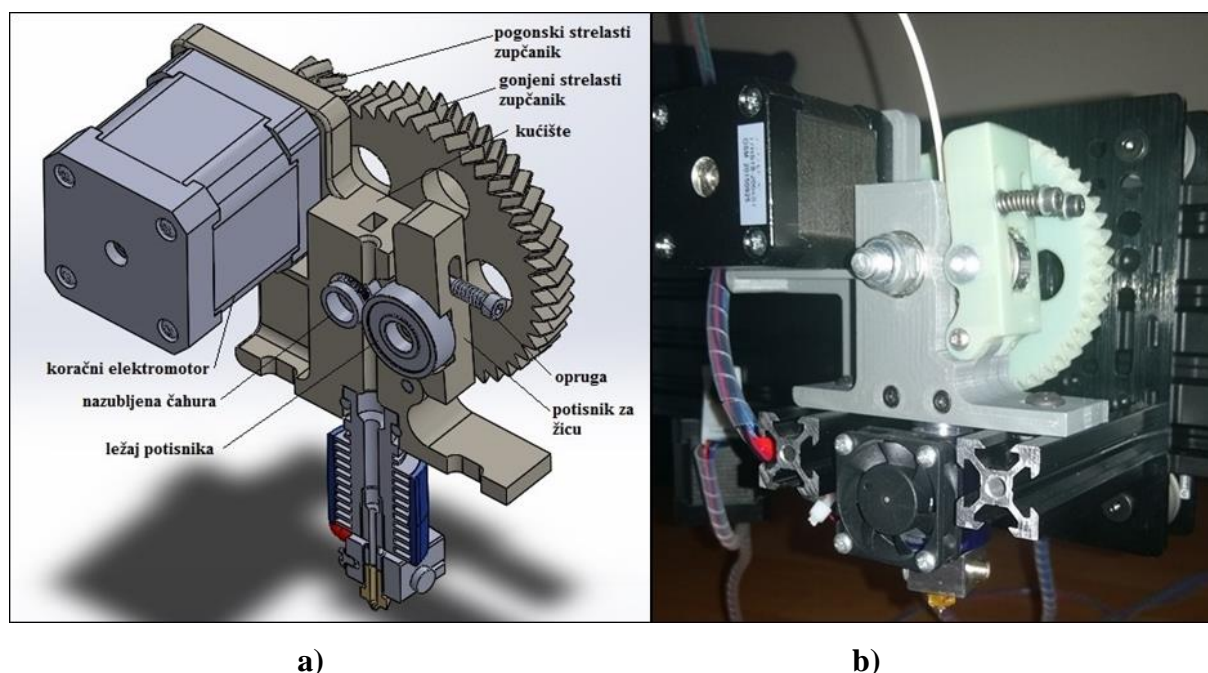


Slika 3.12. *Bowden* izvedba ekstrudera - mehanički sustav provlačenja žice [33]

Kod uređaja izrađenog u sklopu ovog rada je konstruiran mehanički sustav za povlačenje žice prema izvedbi *Greg's Wade* ekstrudera, koji je prilagođen za vlastitu izvedbu povlačenja žice i montaže na stroj.

Sustav se sastoji od koračnog elektromotora na čijem je vratilu pričvršćen svornim vijkom manji strelasti zupčanik. Preko zupčanog prijenosa prenosi se moment na vijak na kojem je pričvršćen veći strelasti zupčanik. Na vijku se nalazi pričvršćena nazubljena čahura pomoću koje se povlači žica. Vijak s nazubljenom čahurom se nalazi unutar kućišta te je uležišten u dva kraja kugličnim ležajevima. Kako bi se nesmetano povlačila žica pomoću nazubljene čahure, na kućište je pričvršćen potisnik za žicu koji se sastoji od kugličnog ležaja većeg promjera i vijaka s oprugama pomoću kojih se ostvaruje konstantan pritisak žice na nazubljenu čahuru.

Na slici 3.13.a se vidi presjek 3D modela mehaničkog sustava s već izvršenom montažom sustava za vođenje i omekšavanje žice. Na slici 3.13.b se vidi gotovi sklop ekstrudera s montažom na stroju.



Slika 3.13. Sklop ekstrudera: a) presjek 3D modela sklopa ekstrudera, b) gotovi sklop ekstrudera s montažom na stroju

Određeni dijelovi mehaničkog sustava za povlačenje žice su izrađeni na 3D pisačima dostupnima na *Fakultetu Strojarstva i brodogradnje*. U tablici 3.4 nalazi se pregled dijelova koji su izrađeni te kojim postupkom i parametrima izrade.

Tablica 3.4. Parametri izrade dijelova ekstrudera

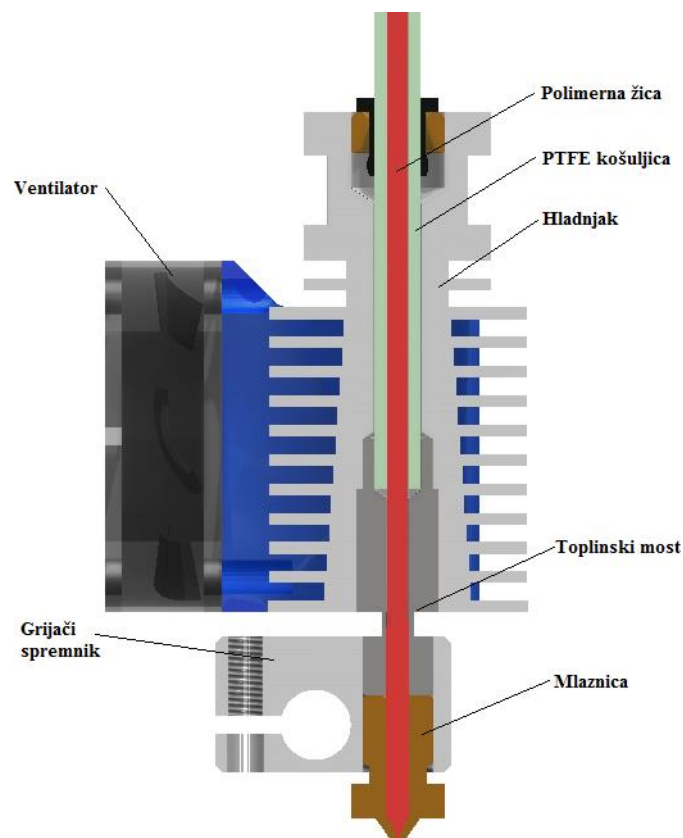
	Kućište mehaničkog sustava ekstrudera	Zupčanci i potisnik mehaničkog sustava ekstrudera
Postupak:	Taložno očvršćivanje - FDM	Ispisivanje mlazom fotopolimera - Polyjet Matrix
Materijal:	ABS	ABS Like RGD5160-DM
Vrijeme izrade:	4 h i 22 min	3 h 10 min
Utrošak materijala:	70 g + 1 g na potpornu strukturu	80 g + 45 g na potpornu strukturu
Debljina sloja:	0,2 mm	16 μ m
Količina ispune:	100 %	
Broj kontura ispune:	5 konturnih linija	
Temp. prerade:	230 °C	
Temp. radne podloge:	110 °C	
Brzina izrade ispune:	80 mm/s	
Cijena:	890,84 kn + PDV	1 743,93 kn + PDV

Sustav za vođenje i omekšavanje žice je najsloženiji dio mehanizma 3D pisaa koji obavlja najvažniji i najzahtjevniji dio posla, od omekšavanja do istiskivanja žice kroz mlaznicu.

Sustav za vođenje i omekšavanje žice se sastoji od: [31]

- grijanog dijela (grijači spremnik s mlaznicom koji se zagrijava, te tako omekšava polimerni materijal),
- hlađenog dijela (hladnjaka s ventilatorom koji zadržava temperaturu ispod temperature omekšavanja kako bi se žica nesmetano kretala do grijanog spremnika).

Kod izvedbe stroja u ovom radu upotrebljen je gotovi proizvod naziva *E3D-v6* od tvrtke *E3D* koji je bilo potrebno sastaviti od dostavljenih dijelova. Sustav je namijenjen isključivo za žice promjera 1,75 mm. Na slici 3.14 se vidi presjek 3D modela sustava za vođenje i omekšavanje žice s naznačenim dijelovima sustava.



Slika 3.14. Presjek 3D modela *E3D-v6* sustava [34]

U tablici 3.5 nalazi se popis potrebnih dijelova s glavnim karakteristikama za sastavljanje cijelog sklopa ekstrudera.

Tablica 3.5. Dijelovi potrebni za izradu sklopa ekstrudera

Naziv	Broj komada	Napomena
Mlaznica (vrući dio ekstrudera)	1	promjer žice: 1,75 mm, za napajanje od 24 V, univerzalni
Ležaj 608ZZ	1	dimenzije: 8x22x7 mm, potisni ležaj za žicu
Umetak od poliamida	1	za potisni ležaj, s Ø8 mm na Ø5 mm unutarnji promjer
Ležaj 688ZZ	2	dimenzije: 8x16x5 mm, za M8 vijak
Nazubljena čahura za povlačenje žice	1	dimenzije: 8x11x13 mm
Pritisni stezač za blokiranje	1	za M8 vijak
M3 vijak s zaobljenom glavom 20 mm	1	
M3 matica	6	
M3 glavati vijak 8 mm	4	
M3 glavati vijak 25 mm	2	
M5 vijak s zaobljenom glavom 20 mm	1	
M5 matica	1	
M8 matični vijak	1	duljina 60 mm (bez navoja 37 mm, s navojem 23 mm)
M8 samokočna matica	1	za M8 vijak
Odstojnik	2	za M8 vijak
Tlačna opruga za potisnik	2	unutarnjeg promjera za M3 vijak, duljina opuštene opruge 15 mm
M3 glavati vijak 40 mm	2	
Podloška za oprugu	4	
M3 svorni vijak 6 mm	1	
Strelasti zupčanik gonjeni	1	konstruiran i izrađen na 3D pisaču
Kućište ekstrudera	1	konstruiran i izrađen na 3D pisaču
Potisnik za žicu	1	konstruiran i izrađen na 3D pisaču
Strelasti zupčanik pogonski	1	konstruiran i izrađen na 3D pisaču

Ukupno:	33
---------	----

3.3. Elektronički sustav upravljanja niskobudžetnog 3D pisača

Kako bi mehanički sustav mogao funkcionirati i vršiti potrebna gibanja i zadatke svakom 3D pisaču je potreban elektronički sustav upravljanja.

Kod profesionalnih strojeva elektronički sustav upravljanja je industrijskog tipa izrađen isključivo za svaki zasebni stroj, dok se kod većine niskobudžetnih strojeva upotrebljava elektronički sustav otvorenog tipa kojeg je moguće upotrebljavati za razne namjene, pa tako i za 3D pisače. [7]

U izvedbi stroja izrađenog u sklopu ovog rada elektronički sustav upravljanja se sastoji od više dijelova koji su potrebni za rad jednog 3D pisača. U tablici 3.6 nalazi se popis dijelova potrebnih za sastavljanje elektroničkog sustava upravljanja niskobudžetnog 3D pisača.

Tablica 3.6. Popis potrebnih dijelova elektroničkog sustava upravljanja

Naziv	Broj komada	Napomena
Upravljačka ploča RAMPS 1.4 Premium	1	
Mikroupravljački sklop Taurino Power	1	
Upravljačka pločica koračnog elektromotora DRV8825	4	
Pribor za ožičenje	1	
Grijana aluminijska radna podloga MK2B	1	dimenzije: 214 x 214 mm, 24 V, 8 A
Mehanički mikroprekidač	3	
Upravljačka pločica s utorom za SD karticu	1	
Koračni motor NEMA 17	5	moment držanja: 59 Ncm, deklarirano struja/faza: 2 A
Napajanje 24V 400W	1	snaga: 400 W, izlazni napon: 24 V, izlazna struja: 16,7 A
Induktivni senzor blizine	1	moguća opcija: senzor za automatsko prednamještanje udaljenosti od platforme

Ukupno:	19
---------	----

3.3.1. Regulacija elektromotora

Najčešće upotrebljavani elektromotori pri konstrukciji niskobudžetnih 3D pisaa su koračni elektromotori, zbog jednostavnosti izvedbe i upravljanja.

Za regulaciju koračnih elektromotora i gibanja koja obavljaju je potrebno nekoliko elektroničkih komponenti.

3.3.1.1. Koračni elektromotori

Koračni elektromotori su pretvornici električne energije u mehaničku koji omogućavaju pretvorbu digitalnog podatka u proporcionalni mehanički pomak.

Koračni elektromotori pulsnu električnu pobudu pretvaraju u korak, te omogućavaju potreban diskretni pomak, što je nužno u sklopovima i sustavima gdje se zahtijeva kontrolirano upravljanje preciznim pomacima mehaničkih dijelova. [35]

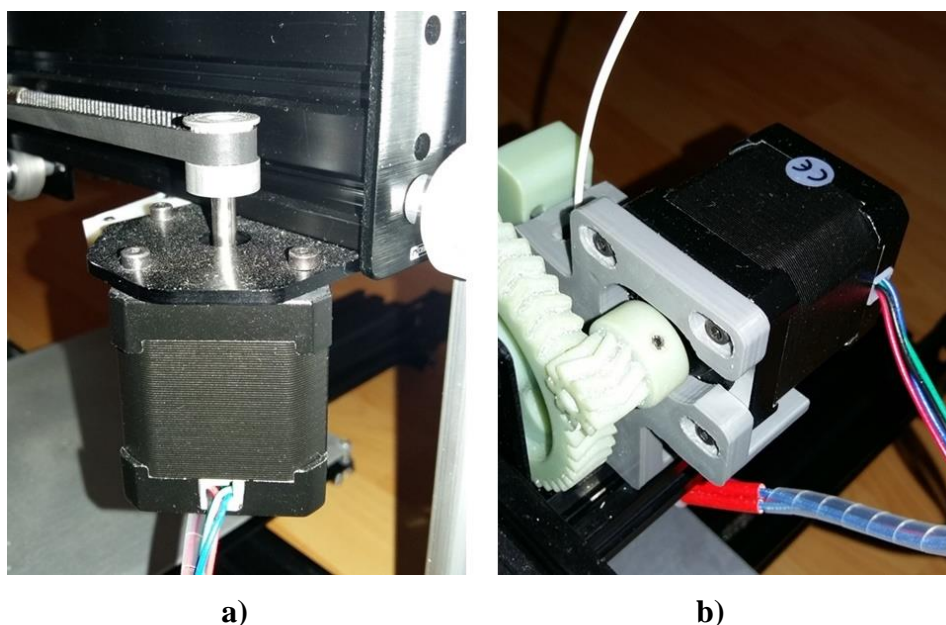
Rotor koračnog elektromotora sinhrono prati kretanje statorskog polja zbog sila nastalih međudjelovanjem s poljem rotorskih magneta ili reluktantnih sila tako da se magnetske osi rotora nastoje podudarati s osima statorskog polja. Pozicija rotora mijenja se u koracima jer statorsko polje stvaraju svici napajani strujnim impulsima potrebnog rasporeda i polariteta upravljanim s pomoću binarnih signala. Postoje tri glavne vrste koračnih motora: s promjenljivom reluktancijom (magnetskim otporom), s trajnim magnetom i hibridni (sa svojstvima prethodnih). Smjer vrtnje može se mijenjati promjenom impulsnog slijeda, brzina rotacije promjenom frekvencije impulsa, a prijeđeni broj koraka (kut) ovisi o ukupno pristiglom broju impulsa. Rotor se može i držati u željenoj kutnoj poziciji. Kut pogreške po koraku vrlo je malen i ne akumulira se. Statorski namot je višefazni, a jednu fazu čine svi vodiči namota spojeni u cjelinu. [36]

Koračni motori su nezaobilazni elementi za precizno upravljanje i pozicioniranje pokretnih mehanizama u praktičnim uređajima i sustavima (CD/DVD uređaji, pisaači, skeneri, kamere, roboti, elektromotorni ventili, protočne pumpe, CNC strojevi...). [36]

Najveća prednost koračnih motora je što u sustavu upravljanja nije potreban enkoder jer se za koračni motor prema danom impulsu za jedan korak zna koliki je točan zakret kuta. Upravljanje koračnim motorom se izvodi u otvorenom krugu, što znači da pri pozicioniranju ne zahtijeva povratnu vezu. [36]

Kod niskobudžetnih 3D pisaa koračni elektromotori se upotrebljavaju za ostvarivanje linearnih pomaka po osima gibanja i pri dobavljanju polimernog materijala u obliku žice u ekstruder.

U izvedbi stroja izrađenog u sklopu ovog rada primjenjuju se NEMA 17 koračni elektromotori. NEMA 17 je standardizirana oznaka kojom se određuje izbor koračnih elektromotora po njihovoj vanjskoj mjeri podnožja. Na slici 3.15 vidljivi su postavljeni koračni elektromotori na 3D pisaa. Na slici 3.15.a vidljiv je koračni elektromotor zadužen za ostvarivanje gibanja po x osi, dok je na slici 3.15.b vidljiv koračni elektromotor zadužen za dobavljanje žice u ekstruder. U tablici 3.6 nalazi se potreban broj i osnovne karakteristike koračnih elektromotora primjenjenih na izrađenom 3D pisaa.

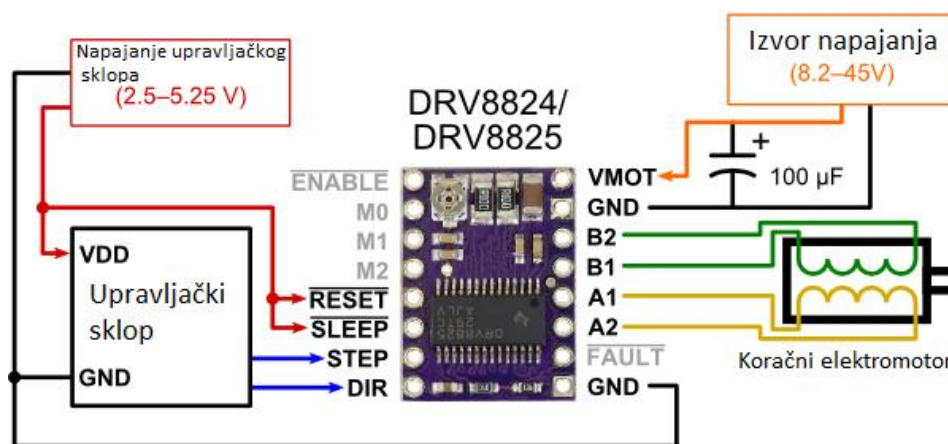


Slika 3.15. Primjer montaže koračnih elektromotora: a) za ostvarivanje gibanja po x osi, b) za dobavljanje žice u ekstruder

3.3.1.2. Upravljačka pločica koračnog elektromotora

Za kontrolirano napajanje koračnih elektromotora se upotrebljavaju posebne upravljačke pločice (e. *Motor Driver*) koje osiguravaju potrebne naponske i strujne vrijednosti iz odgovarajućeg izvora napajanja, a na pobudu upravljačkih impulsa iz upravljačkog sklopa. [35]

Za koračne elektromotore se zna tipična vrijednost koraka, što znači da u specifikacijama određenog motora jedan korak predstavlja zakret za određeni stupanj. Kod elektromotora upotrebljenih za 3D pisac u ovom radu je za jedan korak ostvaren zakret od $1,8^\circ$. Dodatna mogućnost upravljačke pločice je što može povećati rezoluciju rada koračnog elektromotora takozvanim međukoracima (e. *Microstepping*). Upravljačka pločica prikazana na slici 3.16 se upotrebljava za kontroliranje elektromotora opisanog 3D pisca, i s njom je moguće postići i 1/32 međukoraka.



Slika 3.16. Shema upravljačke pločice koračnog elektromotora

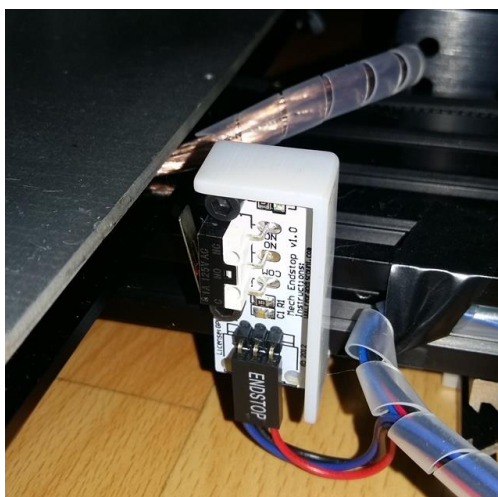
3.3.1.3. Mikroprekidač

Mikroprekidači (e. *Endstops*) su senzori za mjerenje položaja s kojima se detektira dolazak u određeni položaj. Razlikujemo više vrsta mikroprekidača prema principu rada: mehanički, induktivni, kapacitivni i optički. [37]

Kod niskobudžetnih 3D pisača se upotrebljavaju pri određivanju položaja na linearnim osima. Mikroprekidači se postavljaju na nultom položaju 3D pisača u smjeru gibanja za sve tri osi kako bi pri mehaničkim pomacima elektromotora upravljački sklop mogao znati početnu točku za svaku zasebnu os. [37]

Najčešće upotrebljavani kod niskobudžetnih 3D pisača su mehanički mikroprekidači s obzirom na jednostavnost izvedbe.

Na slici 3.17 vidljiv je postavljeni mehanički mikroprekidač na y osi 3D pisača. Za okvir 3D pisača pričvršćen je pomoću nosača koji je izrađen na 3D pisaču *Fakulteta Strojarsstva i brodogradnje*. U tablici 3.7 vidi se vrsta postupka kojim je izrađen s parametrima izrade.



Slika 3.17. Mehanički mikroprekidač postavljen na y osi

Tablica 3.7. Parametri izrade nosača mikroprekidača

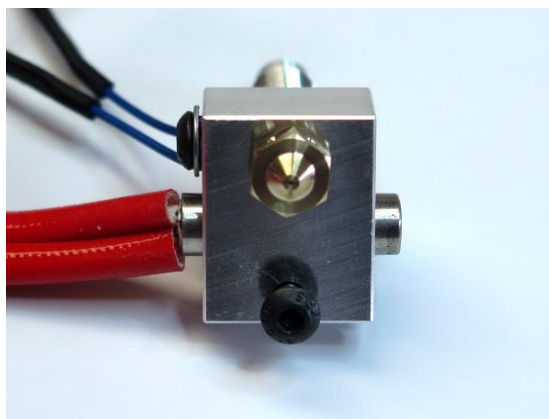
	Nosač mikroprekidača (3 komada)
Postupak:	Ispisivanje mlazom fotopolimera - Polyjet Matrix
Materijal:	kombinacija VeroWhitePlus i TangoBlackPlus - DM 8505 Grey 20
Vrijeme izrade:	1 h 40 min
Utrošak materijala:	35 g + 15 g na potpornu strukturu
Debljina sloja:	16 μ m
Cijena:	990,88 kn + PDV

3.3.2. Regulacija temperature

Mjerenje i regulacija temperature je najčešći oblik u regulaciji nekoga procesa. U sustavu regulacije temperature niskobudžetnog 3D pisača postoji nekoliko elemenata s kojima se regulacija ostvaruje. Za ostvarivanje zagrijavanja upotrebljavaju se električni grijači, a za mjerenje temperature se upotrebljavaju temperaturni senzori. Regulacija temperature se ostvaruje pomoću upravljačke jedinice mikroupravljačkog sklopa.

3.3.2.1. Grijač ekstrudera

Grijač ekstrudera radi na principu električnog otpora koji prolaskom struje kroz grijač stvara toplinu. Montaža grijača se vrši umetanjem grijača unutar provrta grijanog spremnika i zatim se vijkom ostvaruje pritisak spremnika na grijač. Dodirom se prenosi toplina na grijači spremnik u koji se stegne mlaznica iz koje zatim izlazi omekšani materijal. Na slici 3.18 vidljiva je montaža grijača u grijači spremnik ekstrudera *E3D-v6* sustava. Snaga grijača koji se koristi u ovom sustavu je 30 W.



Slika 3.18. Montaža grijača *E3D-v6* sustava [38]

3.3.2.2. Grijač radne podloge

U 3D pisaču izrađenom u sklopu ovog rada upotrebljava se grijana aluminijska ploča kao radna podloga za izradu tvorevina. Grijač radi na istom principu kao i kod grijanog dijela ekstrudera osim što su vodiči kao fine žice raspoređeni u pravilnim razmacima ispod cijele ploče te zaštićeni tankim slojem PCB-a.

Osnovne karakteristike grijane radne podloge se nalaze u tablici 3.6. Na slici 3.19 prikazana je donja strana radne podloge na kojoj su vidljivi zaštićeni kontakti žica pomoću kojih se dovodi struja potrebna za zagrijavanje radne podloge.



Slika 3.19. Donja strana grijane radne podloge

3.3.2.3. Temperaturni senzori

Temperaturni senzori koji se upotrebljavaju kod niskobudžetnih 3D pisača su senzori koji spadaju u grupu kontaktnih senzora koji mjere svoju vlastitu temperaturu. To se odnosi i na temperaturu objekta s kojim je senzor u kontaktu, naravno pod pretpostavkom da se nalaze u toplinskoj ravnoteži. [39]

Najčešće upotrebljavani senzori za mjerenje i regulaciju temperature kod 3D pisača su termistori i termoparovi kojima se s promjenom temperature mijenja električni otpor. Temperaturni senzori koji se upotrebljavaju za mjerenje temperature kod opisanog stroja u ovom radu su termistori.

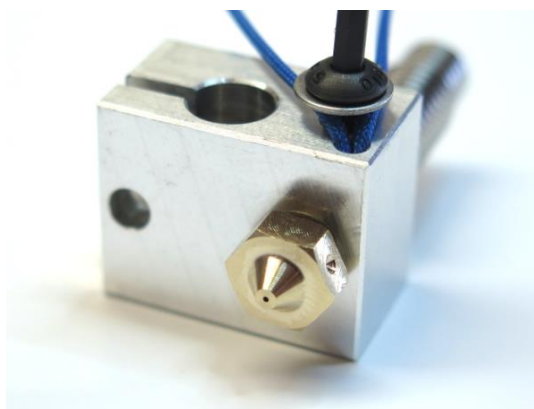
Termistori su temperaturni senzori temeljeni na poluvodičima. To su otpornici kojima se mijenja otpor s promjenom temperature. [40]

Dobra svojstva termistora su ta što se za svaku vrijednost otpora predvidljivo i točno zna vrijednost temperature u njegovom radnom području. Smanjenje, odnosno rast otpora, ovisi o vrsti termistora i računa se po stupnju Kelvina ili Celzija, te je tako određen i njegov koeficijent. Termistorima s pozitivnim toplinskim koeficijentom (PTC) će se povećati otpornost s povišenjem temperature, dok kod termistora s negativnim toplinskim koeficijentom (NTC) će se smanjiti. Formula u praksi nije linearna, pa ponekad točna tablica izmjerenih veličina je bolja od linearne formule. Te izmjerene veličine se obično mogu naći u tablici s podacima koja dolazi uz termistor. [40]

Kod niskobudžetnih 3D pisaa termistori se upotrebljavaju, ovisno o izvedbi, za mjerenje temperature na dvije različite pozicije.

Kako bi se pravilno odvijao postupak ekstrudiranja polimernog materijala kroz mlaznicu ekstrudera jedan od najbitnijih parametara je temperatura zagrijavanja materijala koji se istiskuje. Najbolja pozicija temperaturnog senzora u grijanom dijelu ekstrudera bi bila u kontaktu s grijanim spremnikom i što bliže mlaznici kako bi se dobio što točniji podatak o temperaturi na mjestu istiskivanja materijala i time mogao pravilno kontrolirati proces.

Na slici 3.20 vidljiva je montaža termistora na predviđeno mjesto u grijačem spremniku *E3D-v6* sustava.



Slika 3.20. Montaža termistora *E3D-v6* sustava [38]

U cijelom procesu kontrole temperature bitan je i ispravan način hlađenja u sustavu za vođenje i omekšavanje žice kako bi se polimerni materijal prije dolaska do grijanog spremnika i mlaznice mogao zadržati u formi žice. Hlađenje se odvija pomoću hladnjaka i ventilatora kojima je vidljiva pozicija u presjeku na slici 3.14. Cijeli proces upravljanja zadanom temperaturom se ostvaruje pomoću upravljačke jedinice mikroupravljačkog sklopa.

Druga pozicija na kojoj se mjeri temperatura je na grijanoj radnoj podlozi. Kod grijane radne podloge potrebno je znati temperaturu površine na koju prijanja istisnuti materijal jer o njoj ovisi prijanjanje materijala i stvaranje neželjenih vitoperenja na rubovima prilikom hlađenja.

Kod izvedbe opisane u ovom radu termistor za mjerenje temperature radne podloge se nalazi u kontaktu s podlogom na predviđenom mjestu u sredini ploče. Na slici 3.21 vidljiva je pozicija montaže termistora zaštićenog silikonskim ljepilom.

Očitavanje i regulacija temperature se ostvaruje pomoću upravljačke jedinice mikroupravljačkog sklopa.



Slika 3.21. Montaža termistora na grijanoj radnoj podlozi

3.3.3. Upravljačka jedinica

Za upravljanje radom niskobudžetnog 3D pisača potrebna je upravljačka jedinica pomoću koje se na naredbe zadane putem softverskog sučelja mogu kontrolirati pomaci elektromotora i zadane temperature. [31]

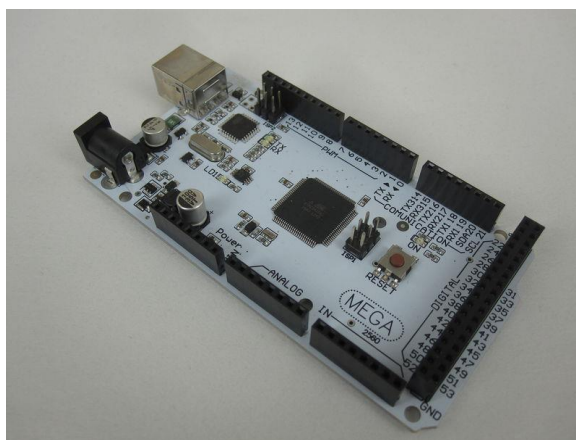
Sklop upravljačke jedinice sastoji se od dijela za upravljanje odnosno mikroupravljačkog sklopa i upravljačke ploče koja služi za spajanje potrebnih elektroničkih komponenti (senzora, elektromotora, grijača, napajanja). [31]

U većini današnjih niskobudžetnih 3D pisača upotrebljavaju se mikroupravljači otvorenog koda kako bi određeni korisnici mogli sami programirati upravljanje stroja.

Integrirani sklop mikroupravljača se sastoji od nekoliko modula od kojih su najvažniji elektronički generator impulsa, memorija, sučelje ulazno/izlaznih veličina i A/D pretvornik.

Kod 3D pisača obrađenog u ovom radu mikroupravljački sklop je *Taurino Power*, mikroupravljač otvorenog koda, koji je izvedenica popularnog mikroupravljača *Arduino Mega 2560 V3*. *Taurino Power* se može napajati direktno preko spoja upravljačke ploče s napajanjem u rasponu 12 do 35 V. [41]

Na slici 3.22 prikazan je mikroupravljački sklop *Taurino Power*.



Slika 3.22. Mikroupravljački sklop *Taurino Power* [41]

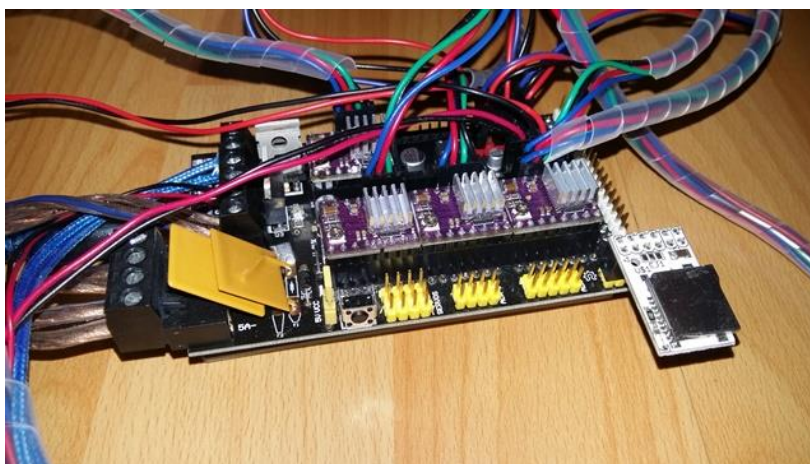
Kako bi mikroupravljač mogao vršiti komunikaciju između softverskog sučelja i kontroliranih elektroničkih komponenti potrebno je imati programiran upravljački softver (e. *Firmware*).

Komunikacija softverskog sučelja (npr. računala) s mikroupravljačem vrši se putem serijske veze i programskog jezika, odnosno G-kodom. G-kod sadrži sve potrebne informacije za izradu tvorevine kao što su: pomaci po osima, količina (brzina) dobave materijala ekstruderu, željena temperatura, itd. [31]

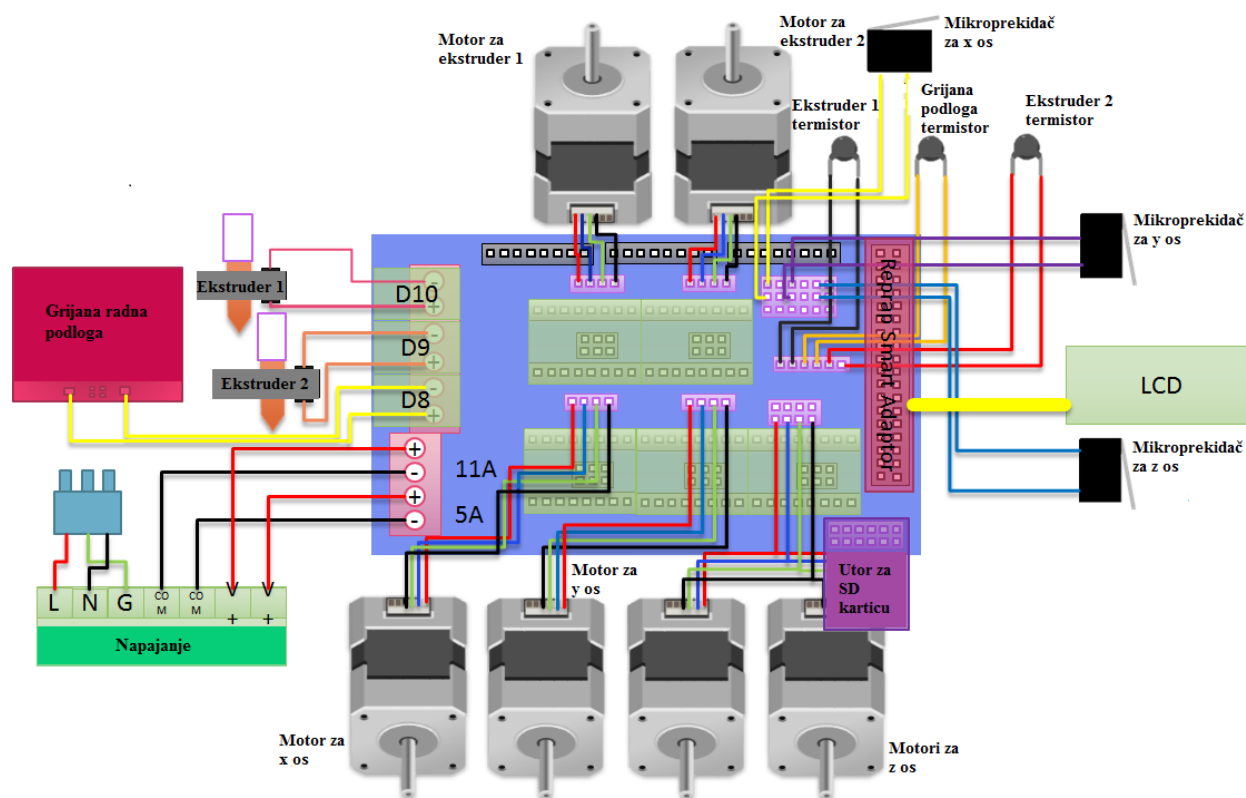
Kako bi se moglo upravljati sa svim potrebnim elektroničkim komponentama potrebna je upravljačka ploča koja služi za spajanje elektroničkih komponenti. U nekim izvedbama za niskobudžetne 3D pisace postoje integrirane ploče s mikroupravljačem i upravljačkom pločom za spajanje elektroničkih komponenti.

Kod 3D pisaca obrađenog u ovom radu upotrebljava se odvojena upravljačka ploča za spajanje komponenti koja se direktno spaja na mikroupravljač putem predviđenog sučelja. Izvedba upravljačke ploče je *RAMPS 1.4 Premium*, pouzdanija izvedba jedne od standardnih ploča koje se upotrebljavaju za niskobudžetne 3D pisace. Na slici 3.24 vidljiv je dijagram spajanja upravljačke ploče *RAMPS 1.4* s načinom povezivanja elektroničkih komponenti.

Na slici 3.23 vidi se prikaz spojenog mikroupravljača s upravljačkom pločom i upravljačkim pločicama koračnih elektromotora te povezanim svim ostalim elektroničkim komponentama.



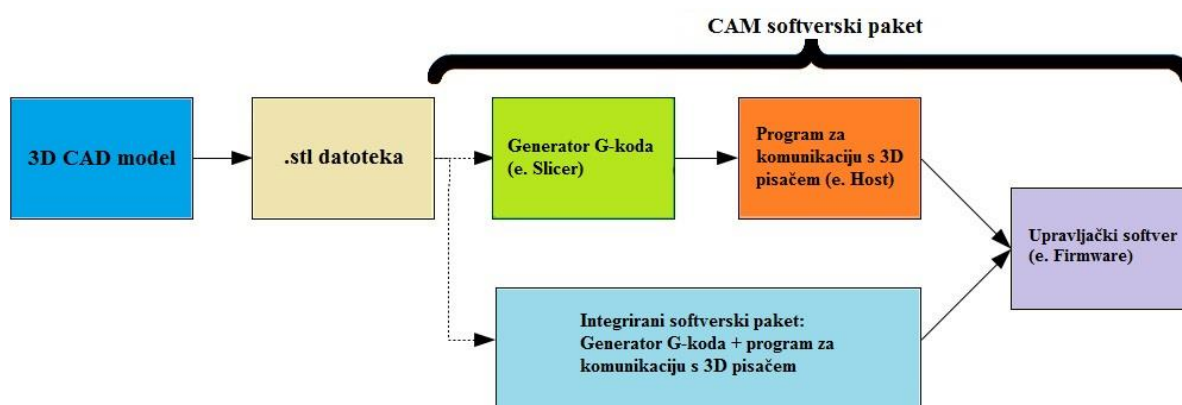
Slika 3.23. Upravljačka jedinica povezana s elektroničkim komponentama



Slika 3.24. Dijagram spajanja upravljačke ploče RAMPS 1.4 [42]

4. UPRAVLJANJE I POSTAVKE NISKOBUDŽETNOG 3D PISAČA

Kako bi se mogao upotrebljavati niskobudžetni 3D pisač potrebno je imati instaliran upravljački softver (e. *Firmware*) na mikroupravljačkom sklopu, programsko sučelje pomoću kojeg se kontrolira i prati rad 3D pisača (e. *Host Program*) i program potreban za postavljanje postupka 3D ispisa i generiranje putanje alata, odnosno G-koda (e. *Slicer*). Sofverski dio upravljanja postupkom izrade tvorevina spada u grupu softverskih alata proizvodnje podržane računalom (e. *Computer Aided Manufacturing – CAM*). Na slici 4.1 vidljiv je dijagram softverskih alata potrebnih za potpuni postupak izrade tvorevina na niskobudžetnim 3D pisačima. [43]



Slika 4.1. Dijagram softverskih alata [43]

4.1. Upravljački softver (e. *Firmware*)

Upravljački softver 3D pisača je jednostavni softverski program koji se sastoji od programiranog koda koji sadrži bitne informacije o tome kako će elektronički sustav upravljanja 3D pisača reagirati na zadane naredbe putem G-koda. [43]

Budući je dosta niskobudžetnih 3D pisača na tržištu otvorenog softverskog koda, moguće je vršiti izmjene upravljačkog softvera 3D pisača. Na internetu postoji više gotovih napisanih upravljačkih softvera namijenjenih za niskobudžetne 3D pisače koje je potrebno prilagoditi izvedbi 3D pisača za koju će se primijeniti.

Za izvedbu 3D pisača obrađenog u ovom radu upotrebljava se jedan od popularnijih upravljačkih softvera namijenjen za niskobudžetne 3D pisače, naziva *Marlin*.

Kako bi se instalirao upravljački softver na mikroupravljač 3D pisača potreban je program pomoću kojeg se mogu vršiti izmjene upravljačkog softvera i instalacija na mikroupravljač. Upotrebljeni mikroupravljač je izvedba *Arduino* mikroupravljača za koje postoji program naziva *Arduino IDE* pomoću kojeg je moguće vršiti izmjene i instalaciju upravljačkog softvera na mikroupravljač. Na slici 4.2 vidljiv je izgled sučelja programa *Arduino IDE*.



Slika 4.2. Prikaz sučelja *Arduino IDE* programa

Da bi se instalirao upravljački softver na mikroupravljač potrebno je izvršiti određene osnovne prilagodbe *Marlin* upravljačkog softvera koje određuju rad 3D pisača. Veza računala i mikroupravljača se ostvaruje USB priključkom putem serijske veze (e. *COM port*). [31]

Potrebne osnovne prilagodbe postavki upravljačkog softvera: [44]

- usklađenost brzine komunikacije mikroupravljača s računalom,
- odabir vrste mikroupravljača iz predodređenih tablica u upravljačkom softveru,
- odabir broja ekstrudera,
- odabir vrste termistora koji se upotrebljava za grijani dio ekstrudera i grijanu radnu podlogu iz predodređenih tablica koje sadrži upravljački softver,
- određivanje minimalne i maksimalne temperature zagrijavanja ekstrudera i radne podloge zbog prevencije mogućih oštećenja,

- određivanje mogućeg zaustavljanja ekstrudiranja ukoliko temperatura padne ispod određene temperature omekšavanja,
- određivanje rada mehaničkih mikroprekidača (signal uključen/isključen zaustavlja ili pokreće elektromotor),
- određivanje smjera vrtnje elektromotora za svaku zasebnu os,
- određivanje smjera kretanja prilikom zadavanja naredbe povratka u nulti položaj,
- određivanje radnog prostora 3D pisaača (uz mehaničke mikroprekidače koji označavaju nulti položaj upisuju se vrijednosti koje označavaju maksimalni položaj u smjeru sve tri osi),
- određivanje broja osi,
- određivanje brzine kretanja kod vraćanja u nulti položaj.

Uz sve navedene postavke najbitnije je odrediti koliki je broj koraka elektromotora po mm za kretanje u smjeru sve tri osi i kod vučenja žice u ekstruder.

Za svaku vrstu prijenosa se određuje prema određenoj formuli: [45]

- Za remenski prijenos:

$$\text{broj koraka/mm} = \frac{(\text{broj koraka motora/okr.} * \text{broj međukoraka})}{(\text{razmak između zuba remena} * \text{broj zubi remenice})} \quad (4.1)$$

$$\text{broj koraka/mm} = (200 * 32) / (2 * 20) = 160$$

- Za prijenos navojnim vretenom:

$$\text{broj koraka/mm} = \frac{(\text{broj koraka motora/okr.} * \text{broj međukoraka})}{\text{korak navojnog vretena}} \quad (4.2)$$

$$\text{broj koraka/mm} = (200 * 32) / (2 * 4) = 800$$

- Za prijenos zupčanicima:

$$\text{broj koraka/mm} = (\text{broj koraka motora/okr.} * \text{broj međukoraka}) * \frac{(\text{broj zubi velikog zupčanika} / \text{broj zubi malog zupčanika})}{(\text{promjer zahvata čahure za povlačenje žice} * \pi)} \quad (4.3)$$

$$\text{broj koraka/mm} = (200 * 32) * (47 / 9) / (9 * \pi) = 1182,07$$

4.2. Programi za kontrolu i pripremu 3D ispisa

Programi za kontrolu i pripremu 3D ispisa se mogu podijeliti u dvije različite grupe: Na programe pomoću kojih se kontrolira i prati rad 3D pisača i programe pomoću kojih se mijenjaju postavke 3D ispisa i generira putanja alata odnosno generatore G-koda.

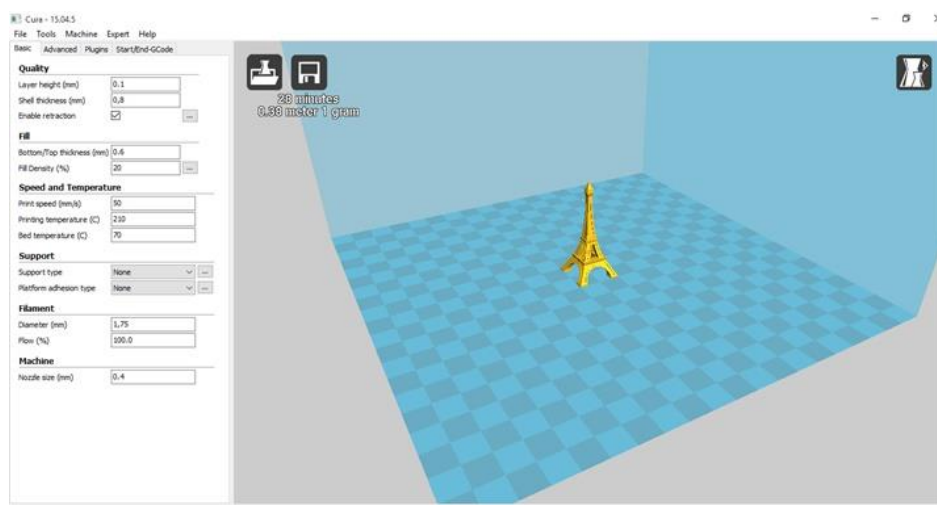
Pomoću generatora G-koda (e. *Slicer*) moguće je od 3D modela konstruiranog pomoću računala i pohranjenog u obliku koji ovakav program razumije, najčešće kao STL datoteka, dobiti skup podataka koji sadrže postavke ispisa i gibanja alata u obliku G-koda. [31]

Generatori G-koda za 3D ispis rade na principu podjele STL modela na slojeve (e. *slicing*). Za generiranje putanje alata određuju se postavke 3D ispisa kao što su: širina mlaznice, visina prvog sloja, visina ostalih slojeva, broj kontura sloja, debljina najgornjih i najdonjih slojeva tvorevine, količina ispune, vrsta ispune, brzina ispisa, temperature mlaznice, temperatura radne podloge, itd. [45]

Na tržištu postoji nekoliko programa za generiranje G-koda niskobudžetnih 3D pisača među kojima su: *Slic3r*, *Cura*, *CraftWare*, *Simplify3D*.

Nakon završenog postupka namještanja postavki i generirane putanje alata, G-kod se ili šalje direktno na mikroupravljački sklop putem USB veze ili se sprema na SD karticu i umetanjem u SD utor na upravljačkoj jedinici pokreće postupak 3D ispisa s SD kartice.

Na slici 4.3 vidi se sučelje programa *Cura* s kojim je moguće generirati G-kod za 3D ispis.

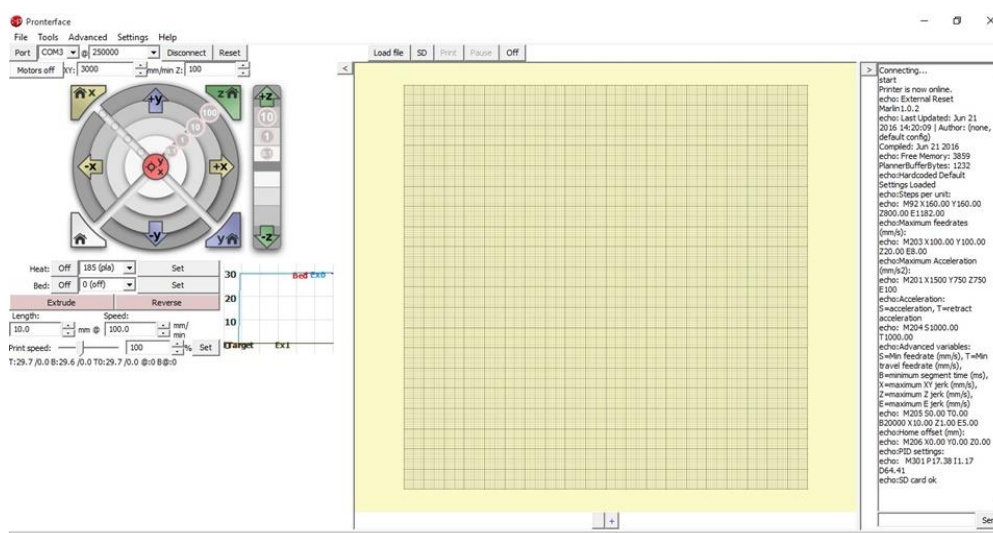


Slika 4.3. Prikaz sučelja programa *Cura*

Pomoću programa za kontrolu 3D ispisa moguće je pratiti postupak 3D ispisa. Osim praćenja postupka 3D ispisa moguće je ručno upravljati gibanjem 3D pisača. S ovom vrstom programa se kontrolira slanje G-koda na mikroupravljač te prati stanje pokrenutog 3D ispisa, poput trenutne temperature mlaznice i grijane platforme. S programom za kontrolu 3D ispisa je moguće trenutno zaustavljanje ispisa ukoliko je došlo do greške prilikom rada. [31]

Na tržištu postoji nekoliko programa za kontrolu niskobudžetnih 3D pisača među kojima su: *Pronterface*, *Repetier-Host*, *MatterControl* i *Simplify3D* koji je integrirani softverski paket koji sadrži i generator G-koda i program za kontrolu 3D pisača.

Na slici 4.4 vidi se prikaz sučelja *Pronterface* programa za kontrolu niskobudžetnih 3D pisača.



Slika 4.4. Prikaz sučelja programa *Pronterface*

Za kontrolu 3D pisača nije potreban program sa sučeljem na računalo ukoliko 3D pisac posjeduje utor za SD karticu i ekran s kontrolama direktno na samom uređaju.

5. MODULARNOST IZVEDBE NISKOBUĐŽETNOG 3D PISAČA

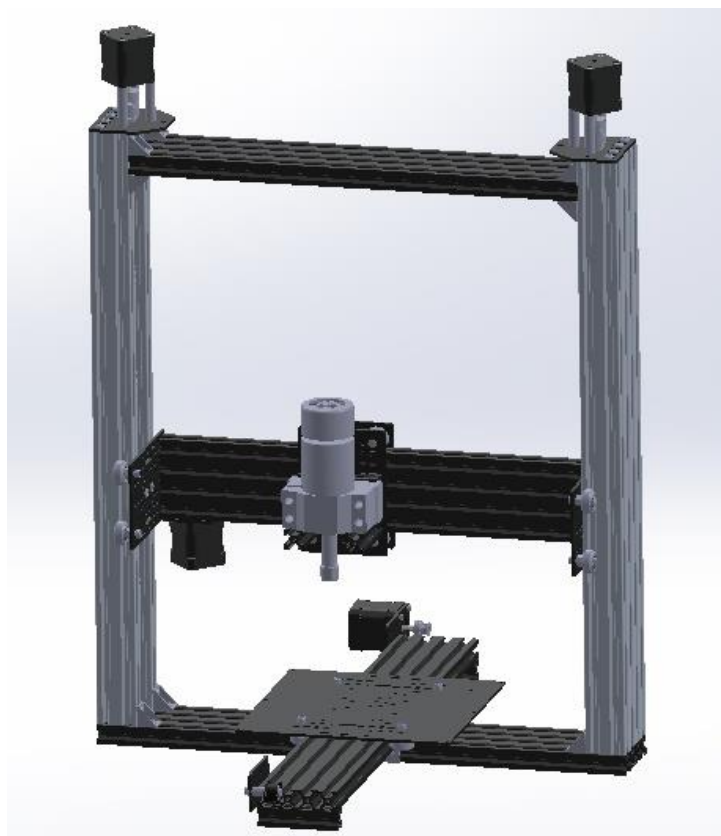
U sklopu ovog rada izrađen je 3D pisač koji spada u niskobudžetni razred s obzirom na cijenu i primjenu elektroničkog i upravljačkog sustava otvorenog koda. Izbor kvalitetnih mehaničkih komponenti i robusna izvedba konstrukcije s preciznim pogonskim sustavom vođenja čine ovaj 3D pisač mogućim za primjenu i u profesionalne svrhe. Budući je ovo prva prototipna izvedba stroja ima još puno prostora za poboljšanja.

Izradom koncepta 3D pisača radilo se na mogućoj primjeni i drugih alata osim za aditivne postupke. Izvedena je prototipno moguća izmjena alata pa je tako, osim ekstrudera s jednom mlaznicom, moguće izraditi alat koji će imati mogućnost korištenja dvije mlaznice s dva odvojena sustava dobave materijala kako bi se moglo u isto vrijeme upotrebljavati dva različita materijala za izradu tvorevina. Što se tiče izvedbe ovog ekstrudera moguće je vršiti izmjenu mlaznice. Tako je moguće postaviti i mlaznice šireg raspona promjera od 0,2 mm do 0,8 mm. Osim standardnih mlaznica moguće je postaviti mlaznicu koja je izrađena od alatnog čelika koji ima veću površinsku tvrdoću pa je moguće upotrebljavati abrazivne materijale za izradu tvorevina poput kompozita s ugljičnim vlaknima. Na slici 5.1 prikazana je mlaznica tvrtke *Performance 3-d* izrađena od alatnog čelika.



Slika 5.1. Mlaznica izrađena od alatnog čelika [46]

Kako je moguće vršiti izmjenu alata moguće je postaviti i alat za obradu odvajanjem materijala. Na slici 5.2 prikazan je model stroja s postavljenim motorvretenom snage 600 W s prihvatom za alate za obradu odvajanjem. S navedenim alatom bi bilo moguće vršiti glodanje materijala poput drva, polimera i mekših metalnih legura.



Slika 5.2. Model stroja s postavljenim alatom za obradu odvajanjem

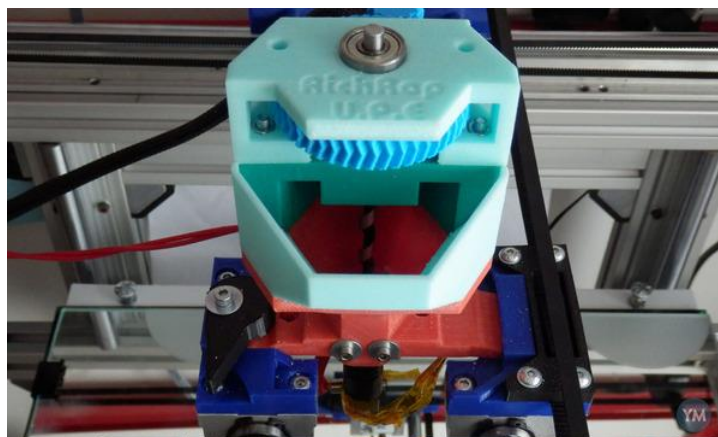
Budući su tokom obrade odvajanjem prisutne sile rezanja, konstrukcijski zahtjevi su puno veći nego kod strojeva koji rade aditivnim postupcima. Okvir i konstrukcija stroja su dovoljno robusni za vršenje obrade sa zauzimanjem manjih dubina prilikom rezanja. Glavni nedostatak bi bio remenski prijenos kod kojeg postoji mogućnost preskakanja remena prilikom većih opterećenja uslijed sila prilikom rezanja.

Ovaj način gradnje stroja je vrlo modularan tako da bi bilo moguće zamijeniti cijeli sustav remenskog prijenosa u smjeru horizontalnih osi s prijenosom navojnim vretenom i to vrlo jednostavnom izmjenom konstrukcije cijele osi s pripadajućim pogonom. Na slici 5.3 je vidljiv način spajanja y osi, s cijelim sustavom remenskog prijenosa i sustavom vođenja, za okvir stroja. Odvijanjem vijaka i mogućim postavljanjem cijele osi s novim sustavom prijenosa s navojnim vretenom bi se mogla dobiti robusnija izvedba prijenosa. Na sličan način bi se mogao izmijeniti sustav za gibanje po x osi.



Slika 5.3. Prikaz montaže cijelog sustava za gibanje u smjeru y osi

Osim alata za obradu odvajanjem moguće bi bilo postaviti, s posebno izrađenim prihvatom, i alate poput lasera za graviranje, ekstrudera za materijale u obliku paste (čokolade, silikona, keramike), te čak i eksperimentalne izvedbe ekstrudera za rad s polimernim materijalima u obliku granulata. Ovakav jedan primjer alata je vidljiv na slici 5.4.



Slika 5.4. Izvedba ekstrudera za materijale u obliku granulata [47]

Dodatna mogućnost postojećoj izvedbi bi bila prilagodba konstrukcije za dobivanje zatvorene komore kako bi se dobila kontrolirana atmosfera prilikom izrade tvorevina. Budući se za ovaj 3D pisač primjenjuje elektronički i upravljački sustav otvorenog koda vrlo lako bi se mogao prilagoditi upravljački softver drugačijim izvedbama alata i sustava gibanja.

6. TESTIRANJE IZRAĐENOG NISKOBUĐŽETNOG 3D PISAČA

Kako bi se ustanovilo da li je stroj ispravno konstruiran, montiran i podešen na njemu je izrađen jednostavni model s kojim bi se mogla ustanoviti dimenzijska točnost tvorevine.

Model je spremljen u obliku STL datoteke i pomoću programa za generiranje putanje alata *Cura* je dobiven G-kod sa potrebnom putanjom alata i postavkama 3D ispisa. Datoteka s G-kodom je spremljena na SD karticu s koje je pokrenuta izrada tvorevine. Nakon što se zagrijala radna podloga i mlaznica na potrebnu temperaturu stroj je krenuo s izradom. Nakon završene izrade pristupilo se pregledu dimenzija tvorevine.

Na slici 6.1 je vidljiva izrađena tvorevina. Na slici se vidi da je kvaliteta površine vrlo dobra i mjerenjima je utvrđeno kako dimenzijska točnost tvorevine odgovara konstruiranim dimenzijama modela. Razlika u dimenzijama je prisutna u svim mjerenim točkama do razine od 100 μm što se može uzeti kao razlika pri skupljanju ABS materijala uslijed hlađenja. Kako ne bi dolazilo ni do ovih razlika, u daljnjem radu se može uzeti koeficijent skupljanja ABS materijala prilikom hlađenja u postavkama 3D ispisa.



Slika 6.1. Izrađena tvorevina prilikom testnog ispisa

Na slici 6.2 je vidljiva donja površina izrađene tvorevine koja je bila prvi sloj na radnoj podlozi. Vidljivo je kako je kvaliteta površine dosta loša s prisutnim greškama prilikom 3D ispisa. U daljnjem radu stroja je potrebno izvršiti fino podešavanje visine radne podloge prema mlaznici i daljnjim testiranjima utvrditi koje postavke 3D ispisa je potrebno izmijeniti kako bi prvi sloj imao istu kvalitetu površine kao i ostatak tvorevine.



Slika 6.2. Prvi sloj izrađene tvorevine

7. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak taložnog očvršćivanja – FDM sa svim svojim prednostima i nedostacima. Opisano je nekoliko različitih materijala koji se mogu upotrebljavati kod FDM-a na niskobudžetnim 3D pisačima. Izvršena je usporedba značajki profesionalnih naspram niskobudžetnih 3D pisača i trenutno stanje na tržištu. Pregledom tržišta niskobudžetnih 3D pisača većeg radnog volumena predstavljen je dio tržišta na kojem bi se mogao naći uređaj izrađen kao eksperimentalni dio ovog rada.

Budući je koncept uređaja zamišljen s mogućom izmjenom ekstrudera s alatom za obradu odvajanjem napravljena je usporedba glavnih karakteristika aditivnih postupaka naspram konvencionalnih postupaka odvajanjem čestica materijala. Na tržištu postoje hibridni uređaji u profesionalnom segmentu koji kombiniraju ove dvije vrste postupaka ali su izrazito skupi. Obraden je i dio tržišta niskobudžetnih hibridnih uređaja koji imaju mogućnost izmjene alata za aditivne postupke i postupke odvajanjem čestica materijala. U niskobudžetnom dijelu tržišta je rad ovih uređaja ipak ograničen što se tiče obrade odvajanjem budući za obradu odvajanjem su puno veći zahtjevi kod konstrukcije stroja.

Ovim radom je predstavljen koncept niskobudžetnog stroja sa svim svojim mehaničkim, elektroničkim i softverskim sustavima koji su potrebni za rad niskobudžetnog 3D pisača. Detaljno su opisani mehanički pogonski sustavi te elektronički i softverski sustavi koje je moguće samostalno programirati budući je upravljački dio sustava otvorenog koda.

Uz dobavljene dijelove specijalno izrađene za modularnu gradnju CNC strojeva konstruirano je nekoliko dijelova potrebnih za rad stroja te tiskano na 3D pisačima dostupnim u *Centru za aditivne tehnologije* na *Fakultetu Strojarsva i brodogradnje*.

Prototipno je konstruiran način moguće izmjene alata s drugim alatima poput motorvretena s prihvatom alata za obradu odvajanjem.

Navedene su prednosti i nedostaci ove konstrukcijske izvedbe prilikom upotrebe za aditivni postupak odnosno prilikom upotrebe za obradu odvajanjem. Budući je ovakav tip konstrukcije stroja vrlo modularan postoji puno mogućih načina za nadogradnju i poboljšanja ove izvedbe stroja.

Modularnost i kombinacija različitih postupaka u jednom stroju je interesantan način pristupa izradi strojeva što je svakako veliki izazov za tržište niskobudžetnih strojeva.

LITERATURA

- [1] History of 3D Printing, <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>, 04.06.2016.
- [2] The History of 3D Printing, <http://www.cta.tech/Blog/Articles/2014/February/The-History-of-3D-Printing.aspx>, 28.05.2016.
- [3] 3D Printing History, <http://www.avplastics.co.uk/3d-printing-history>, 28.05.2016.
- [4] Darwin Documentation, <http://reprap.org/wiki/Darwin>, 14.06.2016.
- [5] Pilipović, A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [6] Godec, D., Šercer, M.: Značaj aditivnih postupaka proizvodnje tvorevina u suvremenom razvoju i proizvodnji, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [7] Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M.: Low-cost 3D printing for science, education & sustainable development, ICTP science dissemination unit, 2013.
- [8] Fused Deposition Modeling (FDM), <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>, 14.06.2016.
- [9] Godec, D., Šercer, M.: Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [10] Mohamed, O., Masood, S., Bhowmik, J.: Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, Advances in Manufacturing, 2015.
- [11] 3D Printer Resolution: Facts and Figures, <https://all3dp.com/3d-printer-resolution/>, 05.06.2016.
- [12] FFF vs. SLA vs. SLS: 3D printing, <http://www.sd3d.com/fff-vs-sla-vs-sls/>, 05.06.2016.
- [13] FDM vs SLA: Explained, <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>, 05.06.2016.
- [14] 17 Great 3D Printer Filament Types: A Guide, <https://all3dp.com/best-3d-printer-filament-types-pla-abs-pet-exotic-wood-metal/#amphora>, 03.06.2016.
- [15] A General Overview of taulman3D Materials, <http://www.aulman3d.com/main-features.html>, 03.06.2016.
- [16] 3D Printing with Nylon 618 filament in Tie-Dye colours, <http://richrap.blogspot.hr/2013/04/3d-printing-with-nylon-618-filament-in.html>, 03.06.2016.
- [17] 3D Printing Trends June 2016, <https://www.3dhubs.com/trends>, 15.06.2016.

- [18] Ultimaker 2+ Specifications, <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus/specifications>, 15.06.2016.
- [19] Makerbot Replicator Z18 3D printer, <http://store.makerbot.com/replicator-z18#techspecs>, 15.06.2016.
- [20] The new Series 1, <https://www.typeamachines.com/series-1>, 15.06.2016.
- [21] The 2016 gMax 1.5+, <http://www.gcreate.com/#!gmax-15-2016-series/c1jkr>, 15.06.2016.
- [22] DeltaWASP 20 40, <http://www.personalfab.it/en/products/deltawasp-20-40/>, 15.06.2016.
- [23] Will Hybrid Additive/Subtractive Fabrication Devices prove to be the Key to Unlocking an Even More Successful Manufacturing Future?, <http://3dprintingindustry.com/news/hybrid-additivesubtractive-fabrication-devices-and-manufacturing-future-3237/>, 15.06.2016.
- [24] ALL IN 1: Laser Deposition Welding & Milling - additive Manufacturing in Milling quality, <http://en.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d#Intro>, 21.06.2016.
- [25] DMG MORI Hybrid System Combines Additive and Subtractive Manufacturing <http://www.rapidreadytech.com/2014/10/dmg-mori-hybrid-system-combines-additive-and-subtractive-manufacturing/>, 21.06.2016.
- [26] ZMorph 2.0 SX, <https://zmorph3d.com/products/zmorph-2-0-sx>, 21.06.2016.
- [27] BoXZY, <http://www.boxzy.com/#!tech-specs-1/ynilh>, 22.06.2016.
- [28] BoXZY unboxed, <http://thrinter.com/boxzy-unboxed/>, 22.06.2016.
- [29] Category: Mechanical arrangement, http://reprap.org/wiki/Category:Mechanical_arrangement, 22.06.2016.
- [30] Category: DriveTrains, <http://reprap.org/wiki/Category:DriveTrains>, 22.06.2016.
- [31] RepRap Options, http://reprap.org/wiki/RepRap_Options, 22.06.2016.
- [32] Choosing Belts and Pulleys, http://reprap.org/wiki/Choosing_Belts_and_Pulleys, 23.06.2016.
- [33] 3Dator Bowden Extruder, <http://www.thingiverse.com/thing:1318849>, 24.06.2016.
- [34] v6 HotEnd Full Kit - 1.75mm Universal (Direct) http://e3d-online.com/E3D-v6/Full-Kit?product_id=380, 24.06.2016.

- [35] Simčić, M.: Upravljanje koračnim motorima putem Arduino platforme, projektna dokumentacija, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2013.
- [36] Električni strojevi - predavanja, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357750337-0-predavanje_14.pdf, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 24.06.2016.
- [37] Endstop, <http://reprap.org/wiki/Endstop>, 24.06.2016.
- [38] E3D-v6 Assembly, http://wiki.e3d-online.com/wiki/E3D-v6_Assembly, 25.06.2016.
- [39] Šarčević, I.: Senzori temperature, seminarski rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2006.
- [40] Thermistor, <http://reprap.org/wiki/Thermistor>, 25.06.2016.
- [41] Taurino, <http://reprap.org/wiki/Taurino>, 25.06.2016.
- [42] WoodMAXi3 Electronics Assembly and Wiring, https://asensar.com/docs/woodmax/0001-6_woodmax_electronics/, 25.06.2016.
- [43] CAM Toolchains, http://reprap.org/wiki/CAM_Toolchains, 26.06.2016.
- [44] Marlin firmware user guide for beginners, <http://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic/>, 26.06.2016.
- [45] Triffid Hunter's Calibration Guide, http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter's_Calibration_Guide, 26.06.2016.
- [46] Duraplat3-d™ Extruder Nozzles, <https://www.p3-d.com/collections/duraplat-3d-extruder-nozzles>, 27.06.2016.
- [47] Universal Pellet Extruder - RepRap 3D Printing, <https://www.youmagine.com/designs/universal-pellet-extruder-reprap-3d-printing>, 27.06.2016.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija:
 - 001 Stroj bez postavljenog alata
 - 001-001 Nosač mikroprekidača
 - 002 Ekstruder
 - 002-001 Kućište ekstrudera
 - 002-002 Strelasti zupčanik pogonski
 - 002-003 Strelasti zupčanik gonjeni
 - 002-004 Potisnik za žicu