

# Analiza i oblikovanje mekih robotskih sustava

---

**Roban, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:325354>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Josip Roban**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Petar Čurković, dipl. ing.

Student:

Josip Roban

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Petru Ćurkoviću na pruženoj prilici i savršenoj suradnji, te svojim prijateljima koji su ustupili 3D printer i svoje vrijeme da bi se ovaj rad uspješno izradio.

Također, zahvaljujem svojoj obitelji koja je bila konstantna potpora tijekom studiranja i koja je razlog ovog uspjeha.

Josip Roban



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne 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:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Roban**

Mat. br.: 0035202265

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza i oblikovanje mekih robotskih sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and analysis of soft robotic systems**

Opis zadatka:

Meki robotski sustavi - *MRS* (eng. *soft robotic systems*) pripadaju domeni robotskih sustava izrađenih od mekih i deformabilnih materijala poput silikona, plastike, gume te elastičnih metalnih dijelova poput opruga. Za razliku od konvencionalnih robotskih sustava, meki roboti mogu biti podvrgnuti iznimno velikim strukturnim deformacijama, sigurni su za rad u neposrednoj ljudskoj okolini, otporni su na mehanička oštećenja i jeftiniji su za izradu. Napose se ističe njihova prednost u mogućnosti hvatanja objekata čija geometrija i položaj nisu unaprijed poznati.

Sve navedeno rezultiralo je recentnim interesom istraživača u području robotike za mekim robotima i njihovoj primjeni u različitim djelatnostima, između ostalih: industrijskim, medicinskim, edukacijskim, i vojnim.

U okviru ovog rada potrebno je:

- istražiti dostupnu literaturu i opisati principe rada mekih robota,
- ispitati mogućnost primjene softverskog paketa VoxCAD za oblikovanje i analizu MRS-a, i to stacionarnih i mobilnih
- odabrati materijal pogodan za izradu mekog robota,
- oblikovati meki robotski sustav i izraditi ga na uređaju za brzu izradu prototipova.

Zadatak zadan:  
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 22. veljače 2019.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2019.  
**3. rok:** 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 25.2. - 1.3. 2019.  
**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2019.  
**3. rok:** 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Petar Ćurković

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

1. Uvod .....	1
2. Korištena oprema i programi .....	3
3. Proces izrade meke prihvatnice .....	7
4. Testiranje prihvatnice na robotskoj ruci UR5.....	23
5. Zaključak .....	26

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Čovjekoliki robot na natjecanju robotike u SAD-u [1] .....	1
Slika 2.	Meki robot [2] .....	2
Slika 3.	VoxCAD logo [3] .....	3
Slika 4.	SolidWorks logo [4] .....	3
Slika 5.	Modeliranje u programskom paketu SolidWorks .....	4
Slika 6.	Prusa logo [5] .....	4
Slika 7.	3D printer Prusa i3 MK-3 .....	5
Slika 8.	Robotska ruka UR5 [6] .....	6
Slika 9.	Privjesak za učenje [7] .....	6
Slika 10.	Prihvatnica u programskom paketu VoxCAD .....	7
Slika 11.	Pomak prihvatnice u programskom paketu VoxCAD .....	8
Slika 12.	Prikaz slojeva kraka u programskom paketu VoxCAD .....	8
Slika 13.	Krak u programskom paketu VoxCAD .....	9
Slika 14.	Savijanje kraka u programskom paketu VoxCAD .....	9
Slika 15.	Prvi model u programskom paketu SolidWorks .....	10
Slika 16.	Presjek prvog modela u programskom paketu SolidWorks .....	11
Slika 17.	Prvi STL model kraka .....	11
Slika 18.	Prvi krak u programu Slic3r PE .....	12
Slika 19.	Prvi testni primjerak .....	12
Slika 20.	Drugi testni primjerak .....	13
Slika 21.	Treći testni primjerak .....	13
Slika 22.	Prvi isprintani krak .....	14
Slika 23.	Test prvog kraka .....	14
Slika 24.	Drugi model kraka u programskom paketu SolidWorks .....	15
Slika 25.	Testiranje drugog kraka .....	15
Slika 26.	Izmijenjeni model drugog kraka u programskom paketu SolidWorks .....	16
Slika 27.	Razvodnik u programskom paketu SolidWorks .....	16
Slika 28.	Prva prihvatnica .....	17
Slika 29.	Loctite EA3423 .....	17

---

Slika 30.	Druga prihvatnica .....	18
Slika 31.	Treća prihvatnica u programskom paketu <i>SolidWorks</i> .....	18
Slika 32.	Treća prihvatnica .....	19
Slika 33.	Testiranje treće prihvatnice .....	19
Slika 34.	Robotska prihvatnica u programskom paketu <i>SolidWorks</i> .....	20
Slika 35.	Robotska prihvatnica .....	20
Slika 36.	Greška u printanju nastala nepovezivanjem slojeva.....	21
Slika 37.	Greška na kraku nastala preskakanjem slojeva .....	21
Slika 38.	Greška u printanju nastala zaštopavanjem mlaznice .....	21
Slika 39.	Greška u printeru nastala pregrijavanjem mlaznice .....	22
Slika 40.	Greška u printanju razvodnika .....	22
Slika 41.	Prihvatnica na robotskoj ruci UR5 .....	23
Slika 42.	Prenošenje telefona pomoću meke prihvatnice .....	23
Slika 43.	Prenošenje kivića pomoću meke prihvatnice .....	24
Slika 44.	Prenošenje jabuke pomoću meke prihvatnice .....	24
Slika 45.	Prenošenje banane pomoću meke prihvatnice.....	24
Slika 46.	Prenošenje vrećice slatkiša pomoću meke prihvatnice .....	25



## SAŽETAK

Robotski sustavi imaju vrlo važnu ulogu u modernom svijetu. Postali su standard u industriji u kojoj se koriste za poslove koji zahtijevaju izrazitu preciznost i ponovljivost. Uspješno zamjenjuju ljudski rad na poslovima koji su monotoni, zahtijevaju prijenos velikih masa te za poslove koji se rade u okolini opasnoj po ljudsko zdravlje. Jedna karakteristika tih robotskih sustava je njihova krutost koja može savršeno funkcionirati u strogo definiranim uvjetima, no problem nastaje kad se robot nađe u nekoj novoj okolini. Da bi taj problem bio riješen javlja se potreba za razvijanjem novih sustava koji bi svojim oblikom i funkcijom mogli savladati razne prepreke koje u sustavu nisu definirane. Meki robotski sustavi (eng. *soft robotic systems*) razvijeni su upravo s tim ciljem. Njihova zadaća je omogućavanje kretanja po nepoznatoj okolini, hvatanje različitih predmeta i savladavanje problema koji se s krutim robotskim sustavima ne mogu riješiti. Ovaj završni rad prikazat će postupak razvoja i izrade meke robotske prihvatnice koja će služiti za prijenos predmeta različitih veličina i oblika. Prikazani postupak obuhvaća modeliranje oblika pomoću programa otvorenog koda *Voxcad*, odabir prikladne tehnologije za izradu prihvatnice, odabir materijala te na kraju izrada i implementacija prihvatnice.

Ključne riječi: robotika, meki robotski sustavi, meka robotska prihvatnica

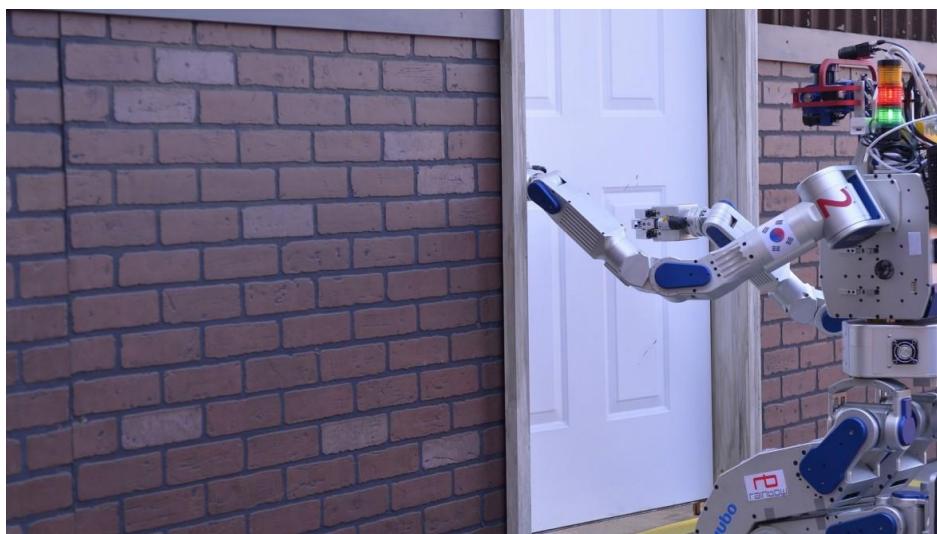
## **SUMMARY**

Robotics systems have very important role in modern world. They became standard in industry in which they're used for work that require precision and repeatability. They successfully replacing humans in jobs that are monotonous, require transfer of heavy objects and for jobs which are set in environment dangerous for men. One characteristic of that robotics system is their rigidity which perfectly performs in highly defined environments, but problem occurs when robot enters a new undefined environment. Because of that problem need for new kind of systems arise, a systems which could solve all kind of problems which are not defined in the system. Soft robotics systems are developed to address that problem. Their goal is to enable moving through unknown environment, grabbing all kind of various objects and solving problems that rigid robotics system can't. This paper will demonstrate procedure of design and production of soft gripper which will serve to translate object of various sizes and shapes. This paper will show modeling with open source program *VoxCAD*, choosing appropriate technology for making gripper, choosing material, and in the end implementation of gripper on the robotic arm.

Key words: robotics, soft robotic systems, soft gripper

## 1. Uvod

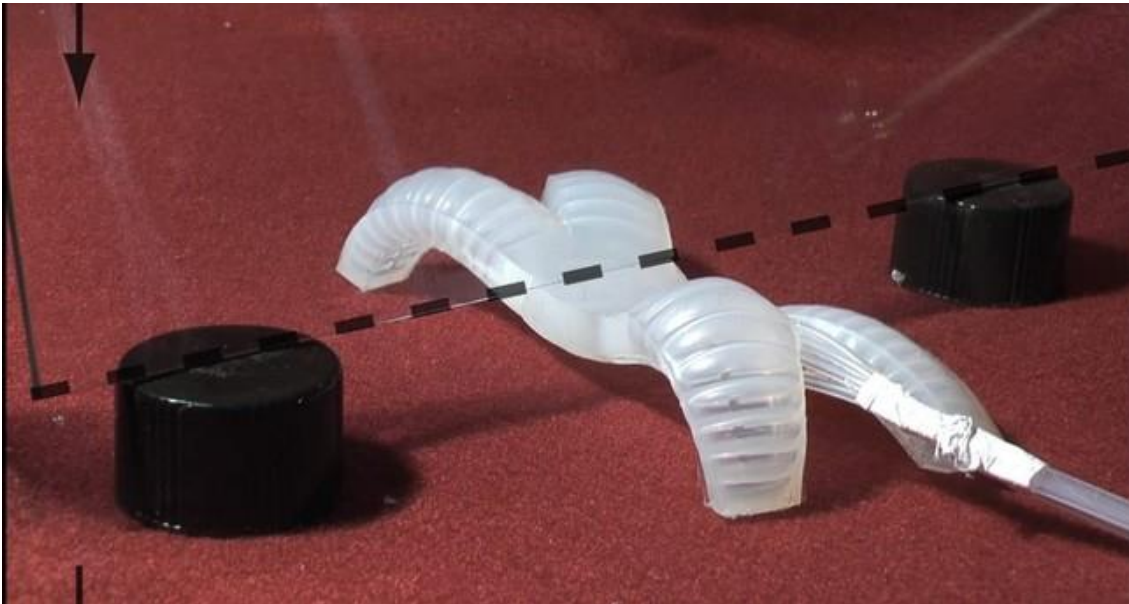
Robotski sustavi danas imaju izrazito velik utjecaj u industriji i u svakodnevnom životu. Roboti zamjenjuju ljudski rad u zadacima koji su čovjeku vrlo naporni, dosadni, otežani ili čak nemogući. Kao jedan od mnogih primjera može se navesti autoindustrija u kojoj roboti obavljaju razne zadaće s velikom efikasnošću. Njihova nosivost omogućuje im da bez problema prenose dijelove karoserije automobila te da ih pozicioniraju na točno određeno mjesto koje omogućuje daljnje slaganje automobila. Za tako preciznu radnju okolina robota mora biti strogo definirana. Za tu primjenu roboti su savršeni, no problem nastaje kada su takvi kruti robotski sustavi stavljeni u rad u svakodnevnom nestrukturiranom svijetu. 2015. godine agencija Ministarstva obrane SAD-a održala je natjecanje u kojem je bio cilj napraviti čovjekolikog robota koji bi trebao savladati radnje iz svakodnevnog života (vožnja auta, otvaranje vrata, rezanje ubodnom pilom, hod preko neravne podloge, itd.) Na tom natjecanju pokazalo se da roboti vrlo teško savladavaju prepreke jer nisu dovoljno fleksibilni te nemaju mogućnost prilagodbe.



**Slika 1.** Čovjekoliki robot na natjecanju robotike u SAD-u [1]

Zbog toga počinje razvoj novih mekih robotskih sustava (eng. *soft robotic systems*) koji imaju mogućnost savladavanja nedefiniranih prepreka. Ideja sustava mogla bi se pronaći u prirodi, tj. na primjeru hobotnice koja je vrlo mekana, no bez obzira na to može prenositi vrlo teške predmete i obavljati vrlo kompleksne pokrete. Meki roboti imaju nekoliko prednosti u odnosu na krute robote, a jedna od njih je cijena jer se sustavi proizvode od jeftinih materijala kao što

su guma i plastika. Također i cijena izrade je mnogo manja jer je postupak jednostavniji (najčešće lijevanje). Velika prednost je i mogućnost hvatanja predmeta čija geometrija i orijentacija nisu poznate. Cilj ovog rada je konstruiranje i izrada jednog takvog sustava, tj. meke prihvatnice koja bi mogla hvatati široki spektar različitih predmeta. Da bi se ta ideja mogla ostvariti potrebno je osmisliti izgled tog sustava i način njegovog rada. Za rješavanje tog problema koristit će se program otvorenog koda *VoxCad* u kojem će se nacrtati sustav i simulirati njegovo gibanje. Također bilo je potrebno odabrati tehnologiju kojom bi se ta prihvatnica mogla izraditi te je odabran FDM (eng. *fused deposition modeling*), konkretno 3D printer Prusa MK-3. Za izradu 3D modela koristit će se programski paket *SolidWorks*, a prihvatnica će biti aktuirana pneumatski.



Slika 2. Meki robot [2]

### 1.1. Tijek rada

U okviru ovog završnog rada potrebno je riješiti niz zadataka kako bi se izradila prihvatnica koja bi uspješno mogla hvatati predmete:

1. Izrada 3D modela u programu otvorenog koda *VoxCad* te simuliranje njene kretnje,
2. Izrada 3D modela u programskom paketu *SolidWorks*,
3. 3D printanje modela,
4. Testiranje i implementacija prihvatnice na robotsku ruku.

## 2. Korištena oprema i programi

### 2.1. Program otvorenog koda *VoxCAD*

*VoxCAD* je programski paket za simuliranje mekih materijala s velikim deformacijama. *VoxCAD* je grafičko korisničko sučelje koje omogućuje konstrukciju, uređivanje i simuliranje objekata napravljenih od *voxel*-a (volumenskih točaka). Program je proizvod Creative Machines Lab-a koji je osnovan 2001. godine na Cornell sveučilištu u Ithaci, New York. 2015. godine laboratorij se prebacio na sveučilište Columbia u New York. Laboratorij istražuje autonomne sustave koji mogu konstruirati i napraviti nove strojeve automatski. Njihov rad je inspiriran biologijom te traže nove biološke koncepte u inženjstvu. Unutar programa mogu se provoditi 3D statičke i dinamičke analize, detekcije kolizije, analiza velikih deformacija te unos nelinearnih modela materijala koja uključuje plastičnu deformaciju.



Slika 3. *VoxCAD* logo [3]

### 2.2. Programski paket *SolidWorks*

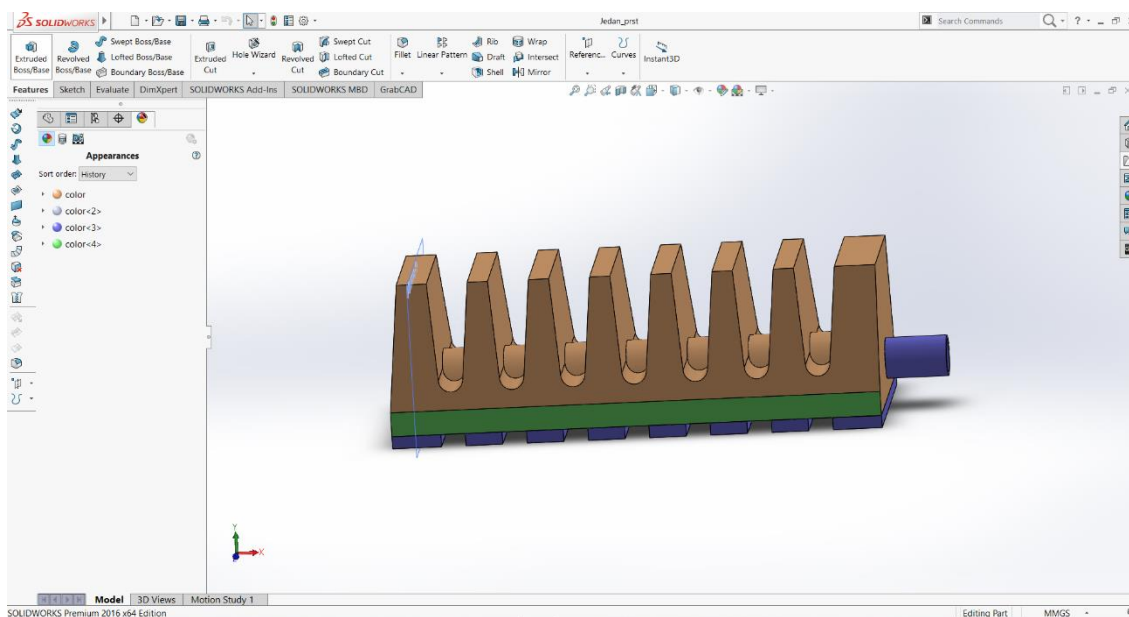
*SolidWorks* je CAD računalni program za čvrsto modeliranje koji se pokreće na Microsoft Windowsu, a izdaje ga *Dassault Systemes*.



Slika 4. *SolidWorks* logo [4]

Programski paket koristi preko dva milijuna inženjera i konstruktora u više od 165 000 tvrtki. *SolidWorks* poduzeće je osnovao u prosincu 1993. Jon Hirschtick sa MIT-a. Hirschtick je okupio grupu inženjera s ciljem dizajniranja 3D CAD programa koji je jednostavan za korištenje te koji se može koristiti na Microsoft Windows platformi. Prvi program *SolidWorks 95* je izašao 1995. godine, a od onda je izašlo ukupno 27 verzija od kojih je *Solidworks 2019* najnovija. DS

SolidWorks poduzeće je do sad prodalo preko 3,5 milijuna licenci diljem svijeta. Na slici 5. prikazano je programsko sučelje programa *SolidWorks*.



Slika 5. Modeliranje u programskom paketu SolidWorks

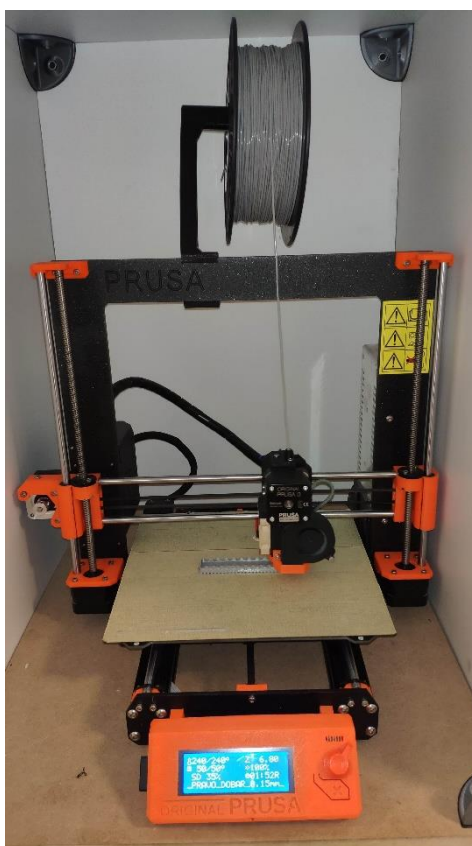
### 2.3. 3D printer Prusa i3 MK-3

*Prusa i3* je FDM (eng. *fused deposition modeling*) 3D printer koji ima programsku podršku otvorenog koda. 3D printer proizvod je češkog poduzeća *Prusa Istraživanja* te je dio *RepRap* projekta kojemu je cilj razviti jeftini 3D printer koji može sam sebi isprintati većinu dijelova.



Slika 6. Prusa logo [5]

*Prusa Istraživanja* poduzeće osnovao je Josef Prusa 2012. godine te je danas jedno od najpoznatijih tvrtki u industriji 3D printera, a 2016. godine bio je najkorišteniji 3D printer u svijetu. Poduzeće trenutno zapošljava preko 300 ljudi te je postalo najbrže tehnološko rastuće poduzeće u centralnoj Europi. *Prusa i3 MK-3* izašao je 2017. godine i imao je razna poboljšanja kao što su novi ekstruder, tiše ventilatore, kruću Y os, nadograđeno grijanje postolja, tiše koračne motore i magnetsko postolje sa zamjenskim čeličnim pločama.

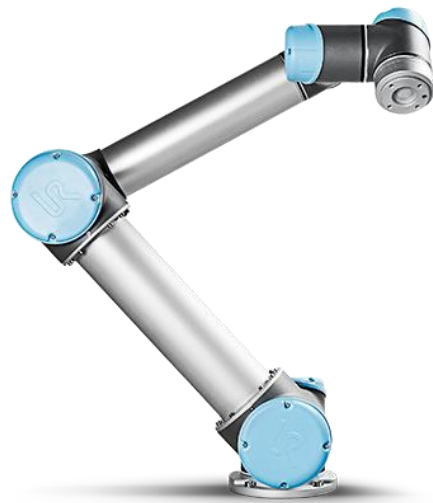


**Slika 7. 3D printer Prusa i3 MK-3**

*Prusa i3* ima mogućnost printanja širokog spektra materijala kao što su ABS, PLA, PETG, PP, najlon i različite fleksibilne materijale koji su bili ključni za ovaj završni rad. Moguće su razne nadogradnje za printer, svi printani dijelovi na njemu su javno dostupni tako da se u slučaju nužde mogu doma isprintati i zamijeniti. Jedna od mogućih nadogradnji je mehanizam za rad s više materijala koji omogućuje printanje predmeta iz više boja i različitih materijala, no ta nadogradnja nije korištena u ovom završnom radu.

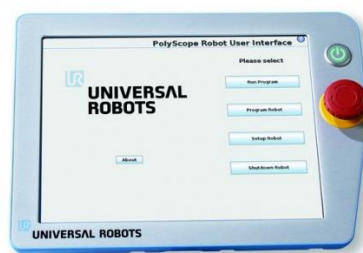
#### **2.4. Robot Universal Robots UR5**

Tvrtka Universal Robots osnovana je 2005. godine u Odenseu u Danskoj. Njeni osnivači su Esben Østergaard, Kasper Støy i Kristian Kassow. Tvrtka je specijalizirana za proizvodnju malih fleksibilnih kolaborativnih industrijskih robota. Robot UR5 uz UR3 i UR10 je glavni proizvod tvrtke, a njihova međusobna razlika je u nosivosti. Korišteni robot UR5 ima nosivost 5 kilograma te cjelokupnu masu od 18 kilograma.



**Slika 8. Robotska ruka UR5 [6]**

UR5 ima 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja, a točnost ponavljanja im iznosi  $\pm 0,1$  mm. Robot je vrlo jednostavan za upravljanje i moguće je vrlo brzo naučiti programirati. Robot se programira pomoću privjeska za učenje na kojem je operativni sustav Linux OS koji sadrži posebno sučelje *PolyScope*. Radni prostor robota je radijusa 850 mm.



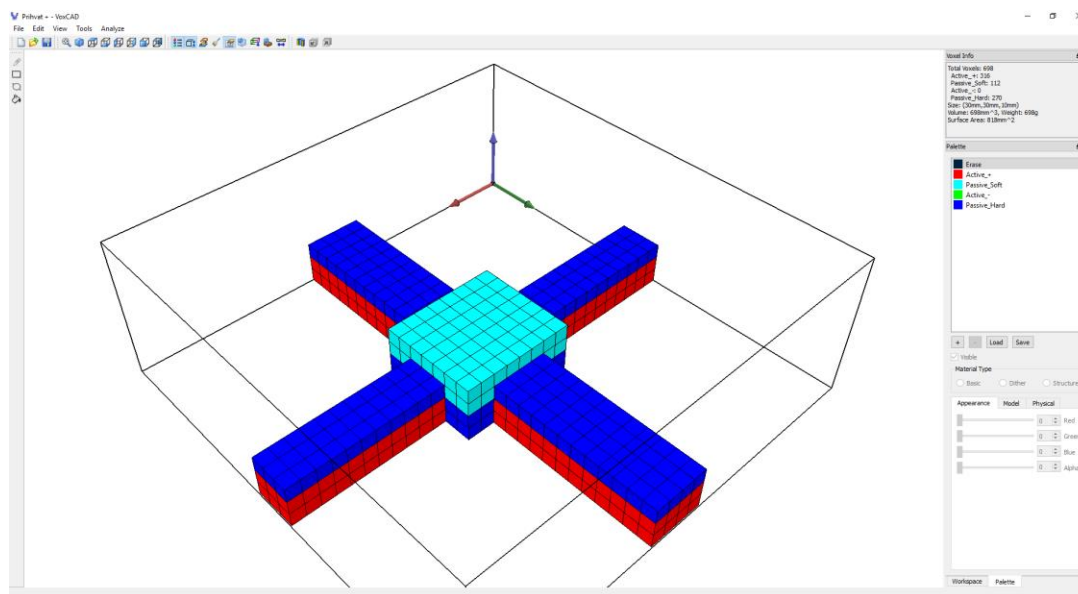
**Slika 9. Privjesak za učenje [7]**



### 3. Proces izrade meke prihvatnice

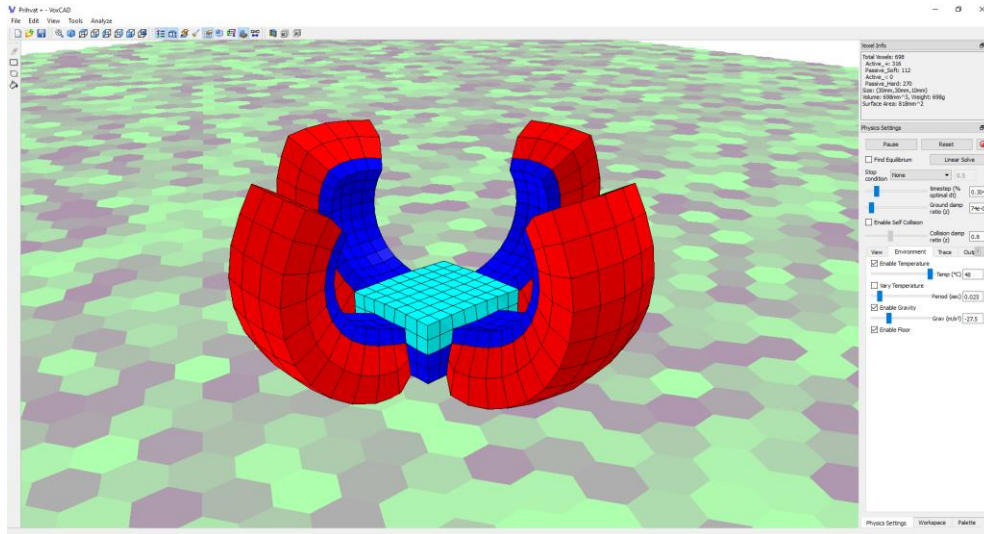
#### 3.1. Dizajniranje modela u VoxCAD-u

Prvi korak u izradi prihvatnice bio je osmišljavanje oblika kojim bi se postigla željena funkcija, a to je hvatanje predmeta. *VoxCAD* je prikladan za ovu primjenu jer može simulirati gibanje nacrtanog modela. Gibanje u programu ostvaruje se promjenom temperature, tj. u programu se može mijenjati temperatura, a u postavkama materijala unosi se koeficijent toplinskog rastezanja. Zatim se u postavke materijala unosi modul elastičnosti i tako određujemo koliko će nam predmet biti elastičan. Način rada u programu nije isti kao što će biti kod finalnog proizvoda jer će prihvatnica biti pokretana zrakom, no to nam nije bitno jer se može povući analogija između širenja zrakom i širenja promjenom temperature koja se koristi u programu. Slijedeća bitna značajka je da model u *VoxCAD*-u ne mora biti isti kao i finalni proizvod nego će poslužiti samo za osnovni oblik koji će se kasnije razvijati iterativnim postupkom. Na slici 10. je prikazan jedan potencijalni oblik prihvatnice. Na njemu se nalaze 3 vrste materijala, svijetlo plavi je meki materijal koji ne reagira na temperaturne promjene, tamno plavi je malo tvrdi materijal koji također ne reagira na promjenu temperature, a ključnu ulogu ima crveni materijal koji se povećanjem temperature širi.



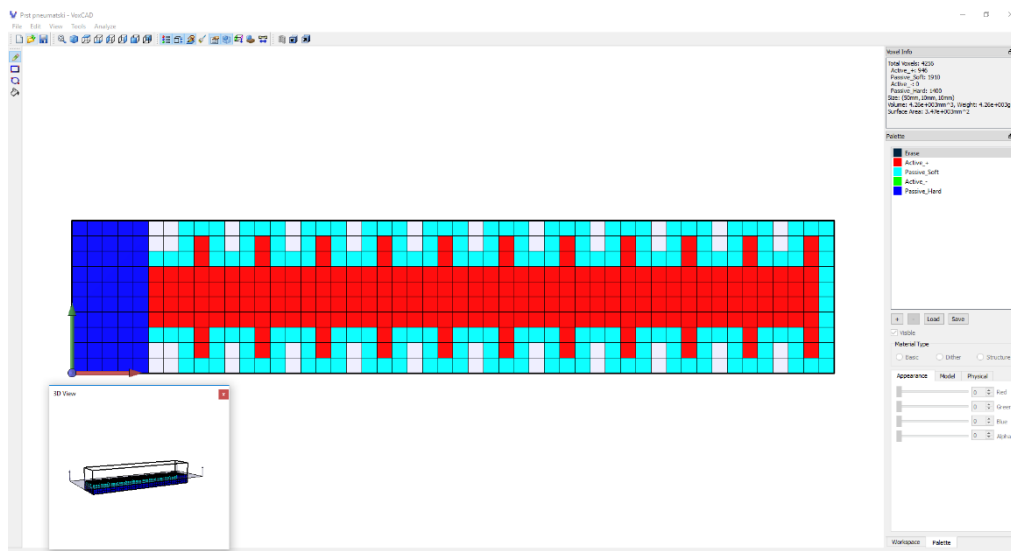
Slika 10. Prihvatnica u programskom paketu *VoxCAD*

Na slici 11. prikazan je pomak prihvatnice koji je uzrokovan promjenom temperature.



Slika 11. Pomak prihvatnice u programskom paketu *VoxCAD*

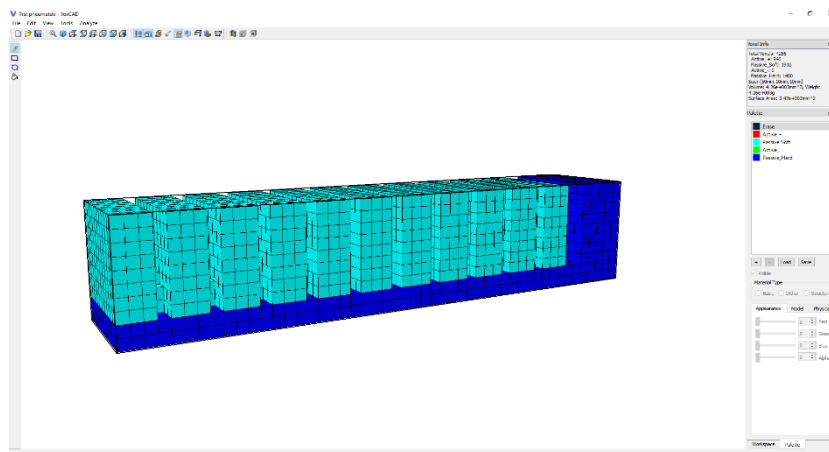
Na ovom primjeru se može vidjeti okvirni oblik prihвата koji ostvaruje željeni pomak, no treba se ipak naći neko realnije rješenje. U slijedećem primjeru je prikazan realniji oblik samo jednog kraka prihvatnice. Na slici 12. se vidi konstrukcija kraka i svi materijali od kojih se sastoji.



Slika 12. Prikaz slojeva kraka u programskom paketu *VoxCAD*

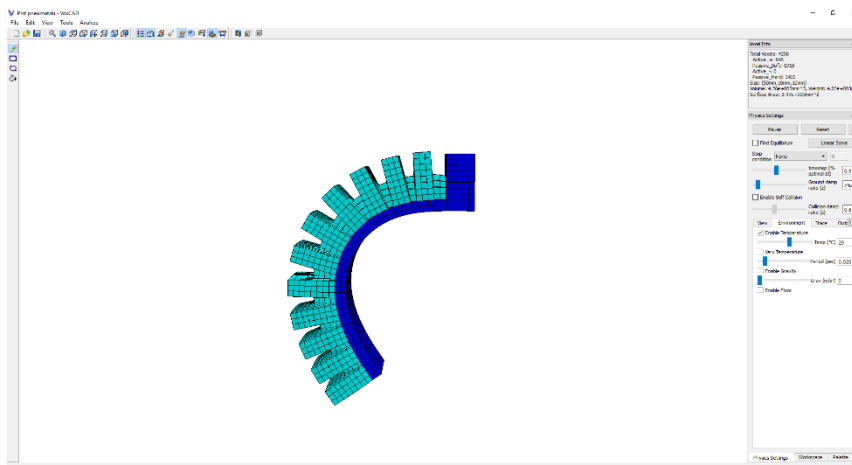
Tamno plavom bojom je označen tvrdi pasivni materijal koji se ne mijenja promjenom temperature i on će eventualno služiti za spajanje kraka sa središtom prihvatnice. Svijetlo

plavom bojom je označen meki pasivni materijal koji se također ne mijenja promjenom temperature i koji će u realnom slučaju biti stijenka koja će se deformirati pod tlakom. Crveni materijal je meki aktivni koji se širi povećanjem temperature te će nam služiti kao zrak u realnom slučaju. Crveni materijal će se širiti stijenku povećanjem temperature isto kao što će u realnom slučaju zrak povećanjem tlaka. Na slici 13. je prikazan 3D oblik kraka.



**Slika 13. Krak u programskom paketu VoxCAD**

Ovaj oblik ima mnogo više fizikalnog smisla nego onaj na slici 10. Na slici 14. prikazana je simulacija pomaka kraka i može se zaključiti da bi se takav 3D model mogao izraditi i potencijalno biti funkcionalan.

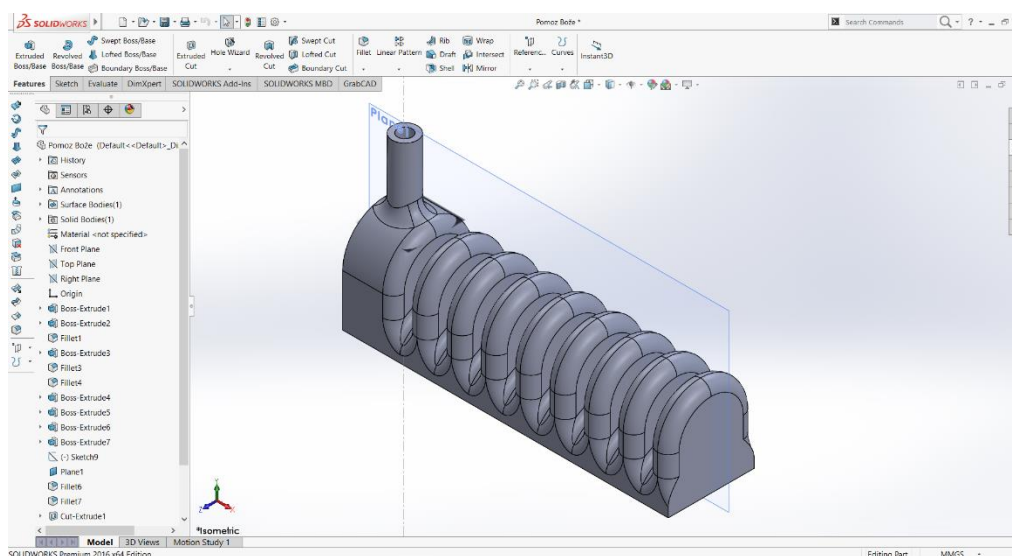


**Slika 14. Savijanje kraka u programskom paketu VoxCAD**

Nakon što je završena simulacija kraka u programu VoxCAD potrebno je nacrtati 3D model u programskom paketu SolidWorks.

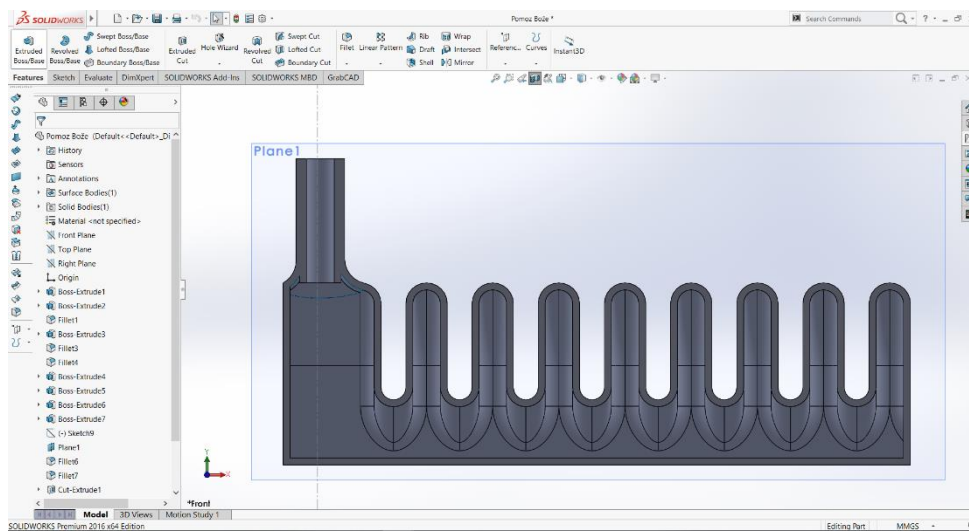
### 3.2. Konstrukcija 3D modela u programskom paketu *SolidWorks*

Nakon što je razvijena osnovna ideja kako bi krak trebao izgledati da se dobije željeni pomak, potrebno je bilo konstruirati taj krak tako da ga je moguće izraditi na 3D printeru. Jedan od osnovnih parametara bila je debljina jednog sloja materijala i ona je iznosila 0,42 mm. Za prvi model izabrana je debljina stijenke od 0,84 mm, što znači da će krak biti napravljen od 2 sloja materijala. Također bitno je bilo napraviti takav model kojeg je moguće isprintati bez korištenja potpornog materijala jer je unutrašnjost modela mora ostati šuplja. Na slici 15. prikazan je prvi model kraka.



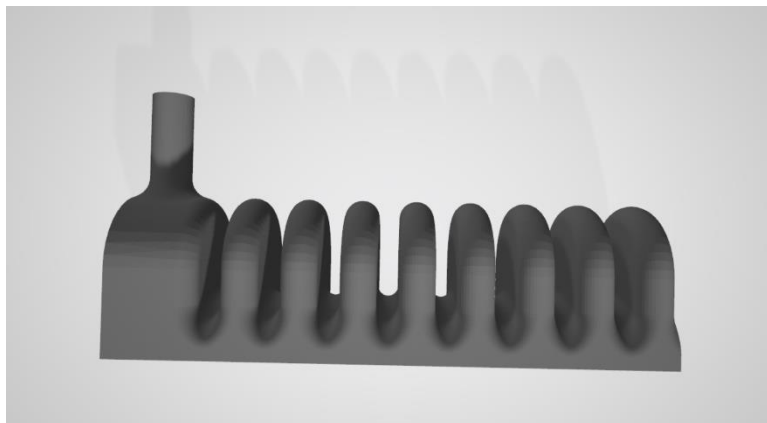
Slika 15. Prvi model u programskom paketu *SolidWorks*

Na gornjem dijelu modela napravljen je jedan otvor promjera 5,88 mm koji služi da bi se isprintani model mogao jednostavno spojiti na bilo koju standardnu pumpu i da bi se vidjelo jel model obavlja željenu funkciju. Oblik je napravljen nizom jednostavnih naredbi kao što su *Extduded boss*, *Extruded cut*, *Fillet* i naredba koja omogućuje stvaranje potrebne šupljine *Shell*. Na slici 16. prikazan je presjek nacrtanog modela.



**Slika 16. Presjek prvog modela u programskom paketu *SolidWorks***

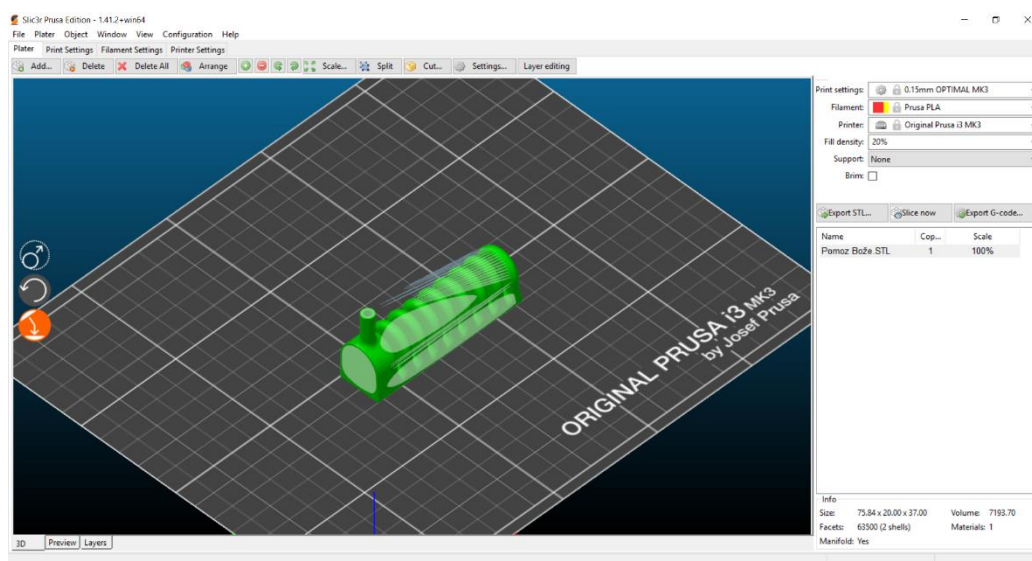
Nakon što je model dovršen, datoteku je potrebno spremiti kao STL file koji je prikazan na slici 17.



**Slika 17. Prvi STL model kraka**

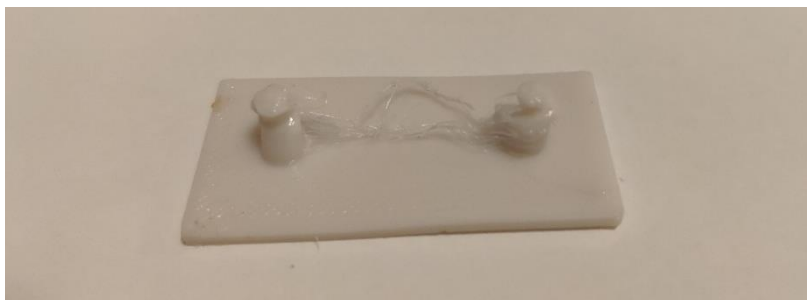
### 3.3. Izrada prvog modela

Dobiveni STL model potrebno je pripremiti za izradu, a to se radi pomoću Prusinog programa otvorenog koda *Slic3r PE*. Program učitava STL model i u njemu se stvara G-kod pomoću kojeg 3D printer izrađuje model. Na slici 18. je prikazano *Slic3r PE* programsko sučelje.



**Slika 18. Prvi krak u programu *Slic3r PE***

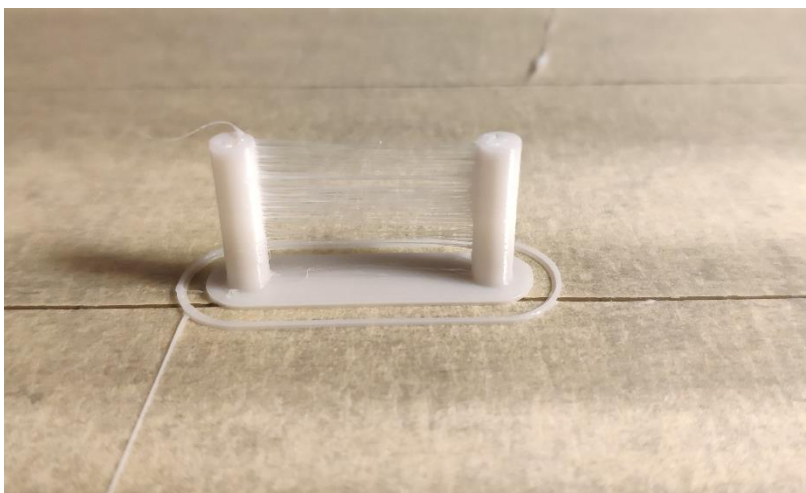
Unutar programa potrebno je odrediti parametre za printanje koji uključuju debljinu mlaznice, temperaturu mlaznice, temperaturu postolja, brzinu printanja, količinu ispune, potporni materijal i brzinu ventilatora, tj. hlađenja materijala. Pošto još nisu bili poznati svi parametri, bilo ih je potrebno otkriti. Korišteni filament bio je TPU flex (termoplastični poliuretan) koji podsjeća na gumu, ali je zapravo plastika. Izrazito je elastičan i visoke čvrstoće, a zbog svoje fleksibilnosti često se koristi za izradu maskica za mobitele. Pošto je to bio prvi doticaj s takvim materijalom, izrađeno je nekoliko probnih modela da bi se otkrili potrebni parametri za kvalitetnu izradu. Na slikama 19., 20., i 21. prikazani su testni modeli.



**Slika 19. Prvi testni primjerak**

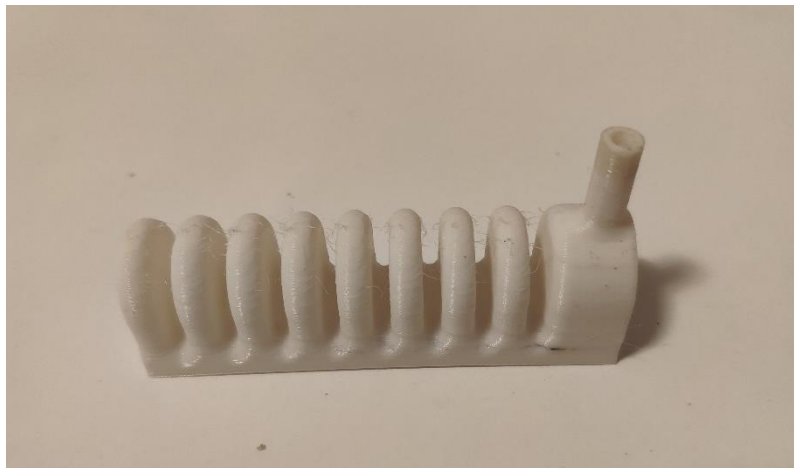


**Slika 20. Drugi testni primjerak**



**Slika 21. Treći testni primjerak**

Na slici 19. prikazan je prvi pokušaj printanja i vidi se da je model nije uspio jer se materijal sav rastalio. Na slici 20. podešeni su parametri temperature mlaznice i brzina uvlačenja filameta te je model ispao mnogo bolje. Pri kraju printanja u postavkama printera namješteno je uključivanje ventilatora za hlađenje slojeva što je rezultiralo modelom zadovoljavajuće kvalitete. Da bi potvrdili te parametre, isprintan je još jedan testni primjerak koji je prikazan na slici 21. te su parametri potvrđeni. Nakon toga stavljen je prvi model kraka na printanje koji je prikazan na slici 22.



**Slika 22. Prvi isprintani krak**

Prvi model je bio isprintan u vrlo dobroj kvaliteti što je iznenađujuće jer je printeru vrlo teško printati šuplje dijelove bez potpunog materijala. Krak se potom spojio na pumpu i testirala se njegova funkcija koja je prikazana na slici 23.



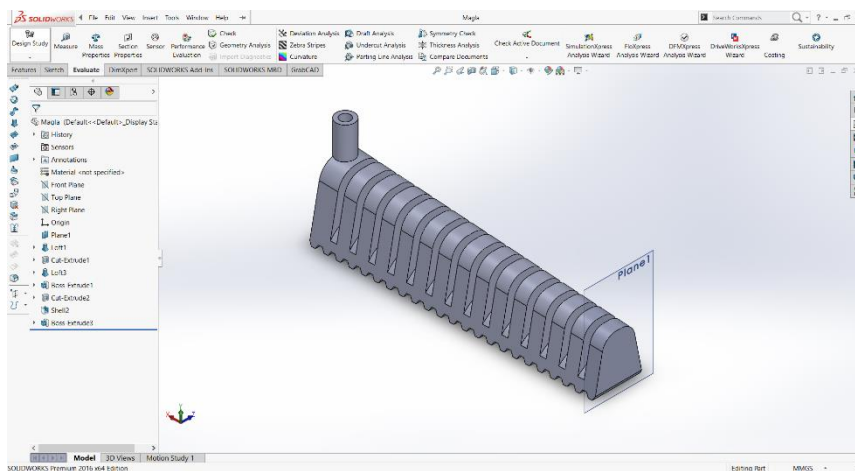
**Slika 23. Test prvog kraka**

Iako je prvi model radio, tj. savijao se pri puštanju zraka, problem je bio što je bilo rupica po cijeloj površini pa je zrak lagano curio van.



### 3.4. Izrada drugog modela

Zbog toga što je prvi model lagano curio, na slijedećem kraku je stavljena debljina stijenke 1,26 mm, što znači jedan sloj materijala više nego kod prvog modela. Oblik modela je također bio promijenjen s ciljem ravnomjernijeg savijanja. Drugi model je prikazan na slici 24.



Slika 24. Drugi model kraka u programskom paketu *SolidWorks*

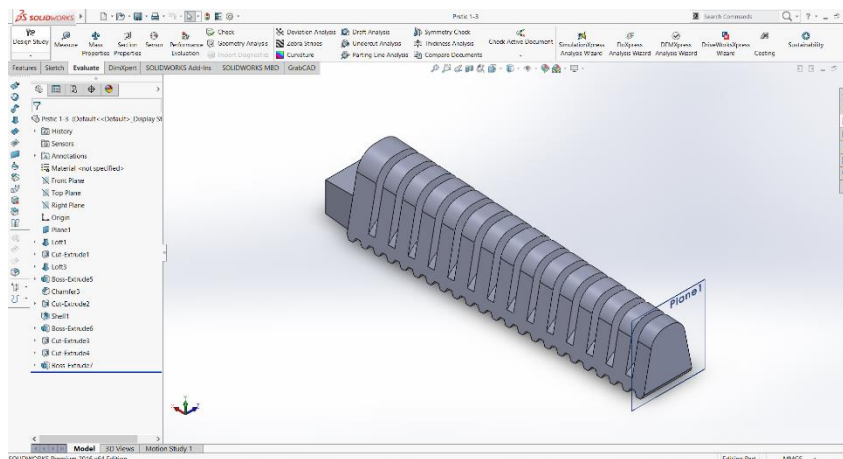
Postupak izrade bio je analogan onome u poglavlju 3.3. Nakon što je novi model bio isprintan, slijedilo je opet testiranje te se pokazalo da je model mnogo krući (bio je potreban veći tlak da se savije), ali je curenje zraka znatno smanjeno. Savijanje drugog modela prikazano je na slici 25.



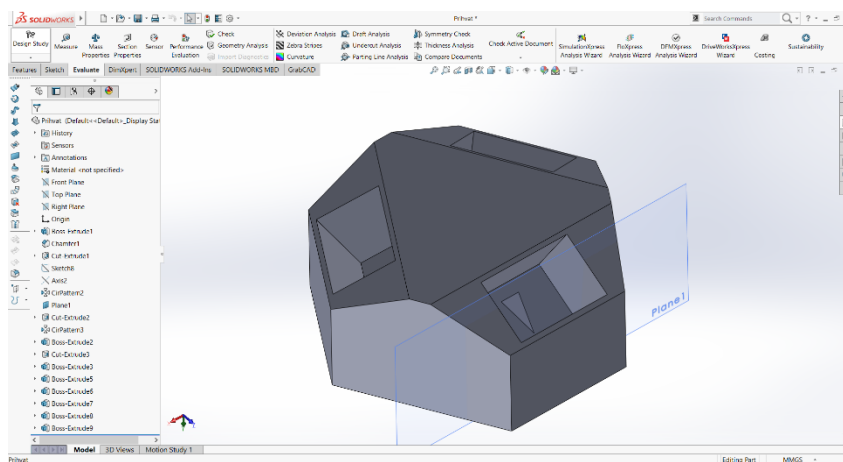
Slika 25. Testiranje drugog kraka

### 3.5. Izrada prve prihvatnice

Nakon što je testiran drugi model, odlučeno je da će se on koristiti na prihvatnici. Prihvatnica je zamišljena da sadrži 3 kraka i da se slijepe na jedan razvodnik koji će biti izrađen iz drugog materijala. Prva stvar koju je bilo potrebno osmisliti je površina na koju će se krakovi lijepiti i zbog toga su se na modelu kraka i na modelu razvodnika napravili konusni utori. Na slikama 26.i 27. prikazani su modeli kraka i razvodnika.

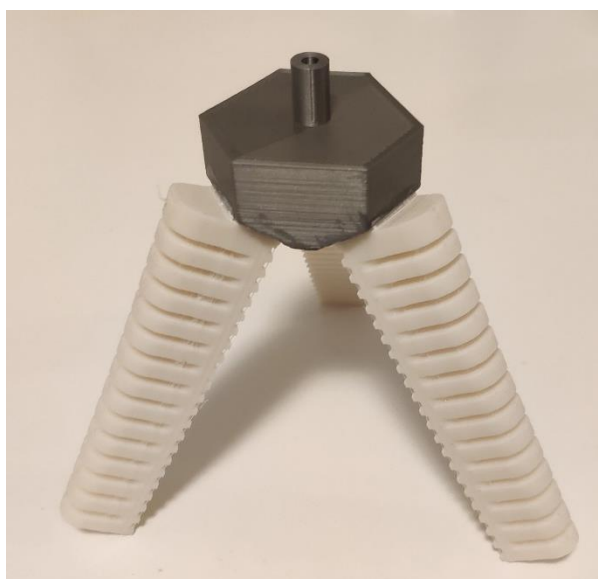


Slika 26. Izmijenjeni model drugog kraka u programskom paketu *SolidWorks*



Slika 27. Razvodnik u programskom paketu *SolidWorks*

Za materijal razvodnika (slika 27.) odabran je PLA (polilaktid) jer je lako dostupan i jednostavan za printanje. Kada su modeli bili izrađeni, za prvi pokušaj lijepljenja korišteno je momentno lijepilo. Lijepljeni spoj je dobro zabrtvio rupu i zrak nije curio na spoju, no problem je bio što je jedan od krakova imao rupu pa prihvatnica nije bila funkcionalna. Prihvatnica je prikazana na slici 28.



**Slika 28. Prva prihvatnica**

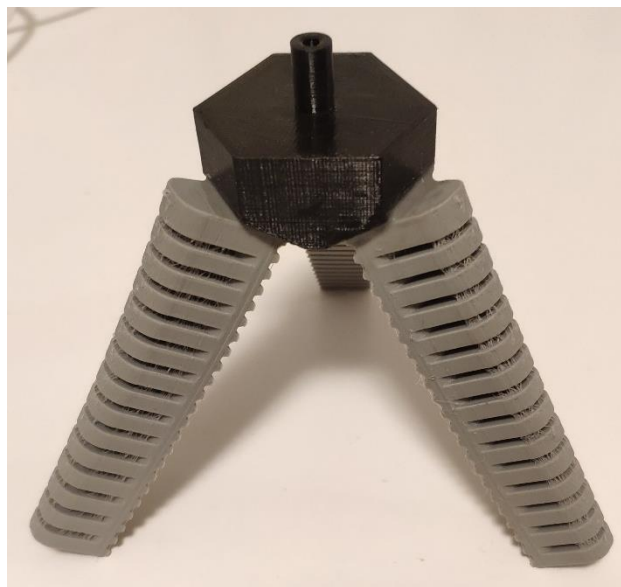
### **3.6. Izrada druge prihvatnice**

Odmah poslije testiranja prve prihvatnice, počeli su se printati dijelovi za drugu prihvatnicu. Filamenti za izradu su ostali od sitog materijala, no samo druge boje. Kod drugog modela se za lijepljenje dijelova koristilo drugo lijepilo, tj. dvokomponentni epoksid Loctite EA 3423 (slika 29.) koji je zbog svojih svojstava mnogo bolji od onog korištenog na prvoj prihvatnici jer savršeno brtvi spoj.



**Slika 29. Loctite EA3423**

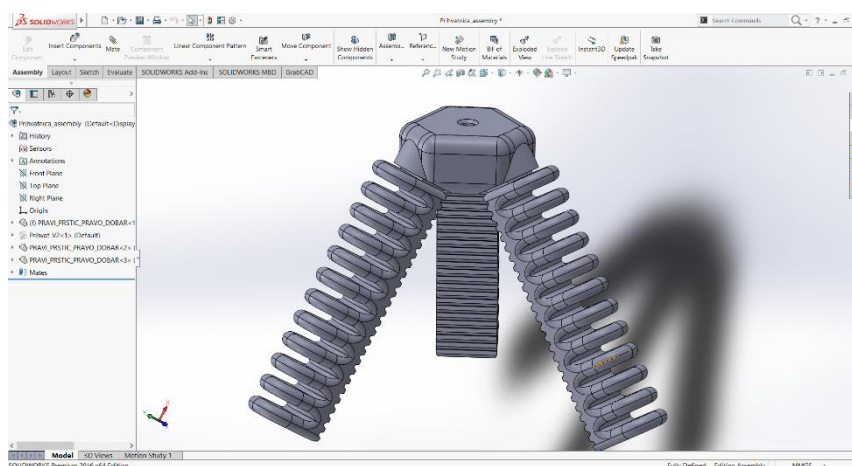
Nakon lijepljenja prihvatnica je testirana i utvrđeno je da zrak i dalje curi, uz to su uslijedili razni problemi sa printanjem koji će biti opisani u poglavlju 3.9.



Slika 30. Druga prihvatnica

### 3.7. Izrada treće prihvatnice

Nakon testiranja prethodne prihvatnice došlo je do promjene modela kraka jer bi prihvatnice curile bez obzira na broj slojeva materijala, a krakovi s dva sloja su se mnogo više savijali i bili su jednostavniji za printanje. Napravljene su i izmjene na modelu razvodnika, više se nije spajao direktno na pumpu nego je napravljena rupa za uvodnicu na koju se spaja standardno pneumatsko crijevo od 4 mm. Model prihvatnice prikazan je na slici 31.

Slika 31. Treća prihvatnica u programskom paketu *SolidWorks*

Nova prihvatnica se pokazala odličnom jer nije jako curila i s vrlo niskim tlakom su postignute velike pomaci krakova. Također je napravljen test hvatanja predmeta koji je prikazan na slici

32. Pošto su se ovi modeli pokazali najefikasnijim, još je samo bilo potrebno isprintati prihvatnicu koja će se moći spojiti na robota UR5.



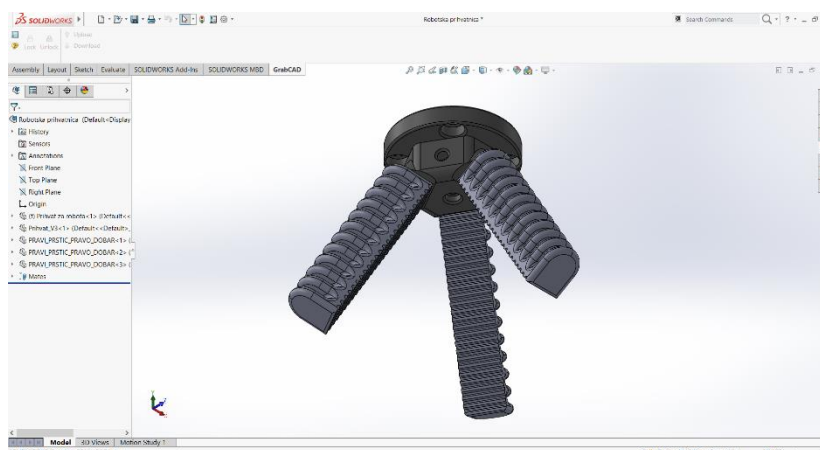
**Slika 32. Treća prihvatnica**



**Slika 33. Testiranje treće prihvatnice**

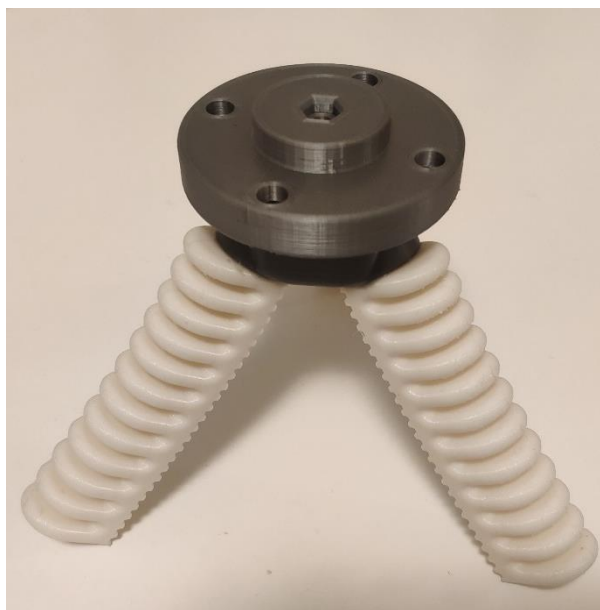
### **3.8. Robotska prihvatnica**

Za robotsku prihvatnicu koristili su se isti krakovi kao i u prošlom modelu, no napravljena je promjena na razvodniku. Razvodnik se sad sastoji od dva dijela, jedan koji služi za povezivanje krakova i drugi koji se spaja na robota. Model prihvatnice prikazan je na slici 34.



**Slika 34. Robotska prihvatnica u programskom paketu *SolidWorks***

Nakon što su svi dijelovi isprintani, prihvatnica je zalijepljena i spremna za testiranje na robotu UR5.



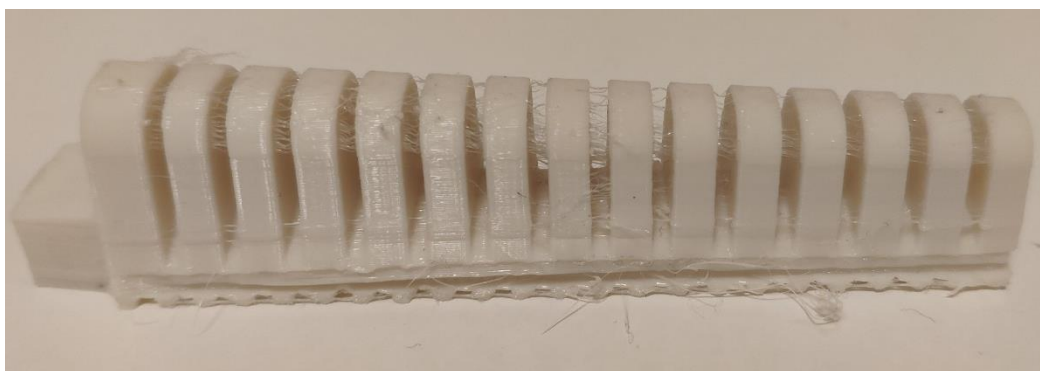
**Slika 35. Robotska prihvatnica**

### **3.9. Greške prilikom 3D printanja**

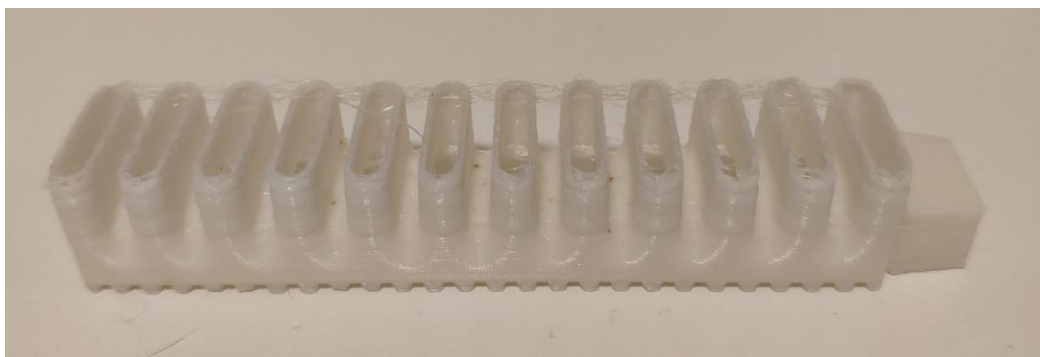
Tijekom izrade prihvatnice dolazilo je do raznih grešaka u 3D printanju kojima se ne zna uzrok. Svi modeli su printani sa istim parametrima, no svaki drugi isprintani krak je imao grešku. Nekoliko puta je rješenje problema bilo samo ponovno pokretanje 3D printera, no u većini slučajeva nije bilo adekvatnog rješenja. Na kraju je u prosjeku svaki drugi krak bio funkcionalan. Na slikama 36., 37., 38., 39. i 40. prikazane su razne greške koje su nastajale prilikom izrade prihvatnice.



**Slika 36. Greška u printanju nastala nepovezivanjem slojeva**



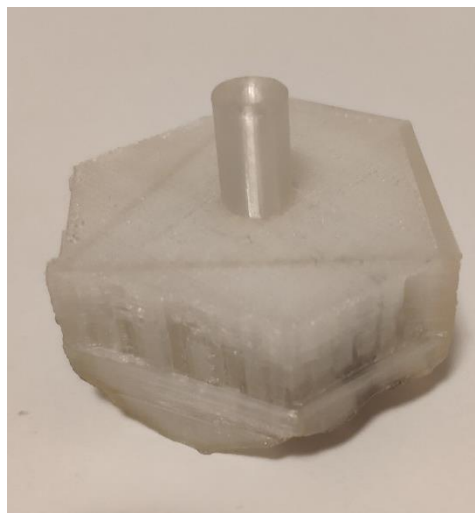
**Slika 37. Greška na kraku nastala preskakanjem slojeva**



**Slika 38. Greška u printanju nastala zaštopavanjem mlaznice**



**Slika 39. Greška u printeru nastala pregrijavanjem mlaznice**

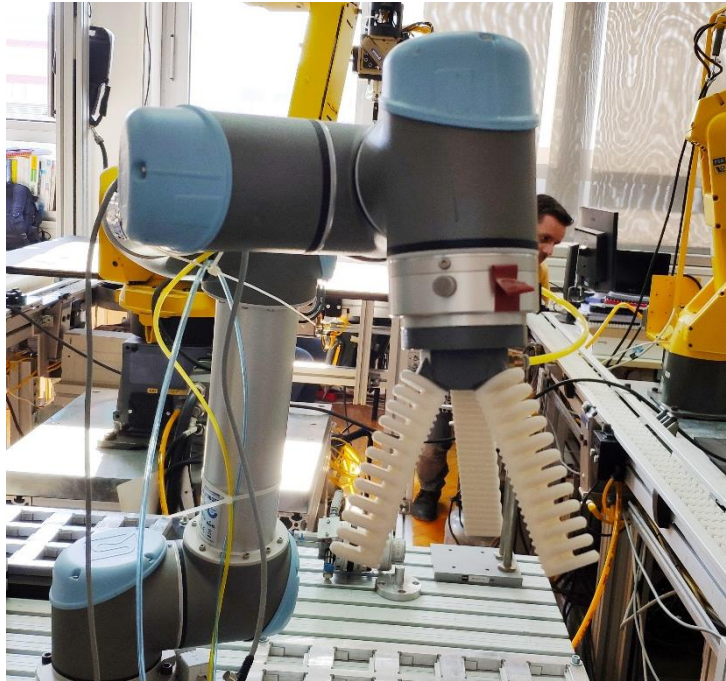


**Slika 40. Greška u printanju razvodnika**



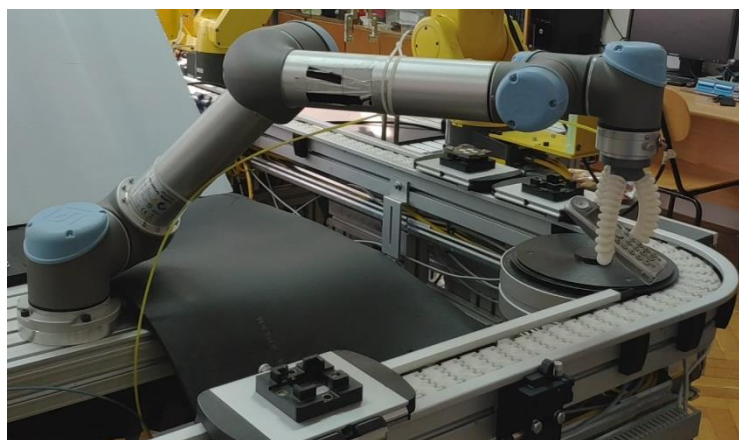
#### 4. Testiranje prihvatnice na robotskoj ruci UR5

Nakon izrade preostalo je još testirati rad prihvatnice u laboratoriju na robotskoj ruci UR5. Na slici 41. prikazana je robotska prihvatnica i na nju je spojen tlak od jednog bara.

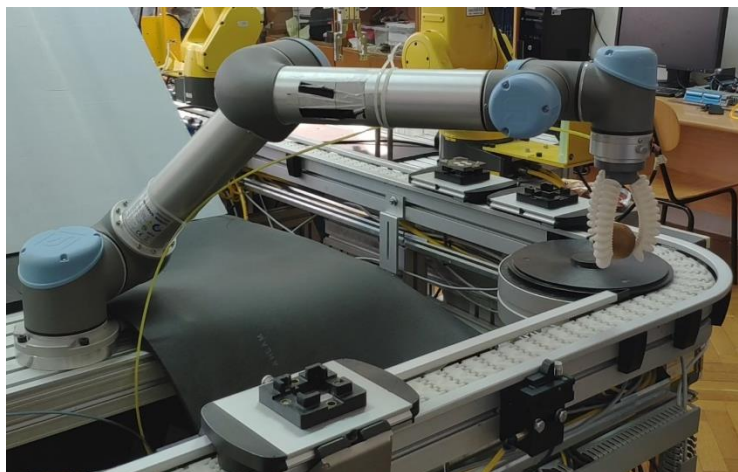


**Slika 41. Prihvatnica na robotskoj ruci UR5**

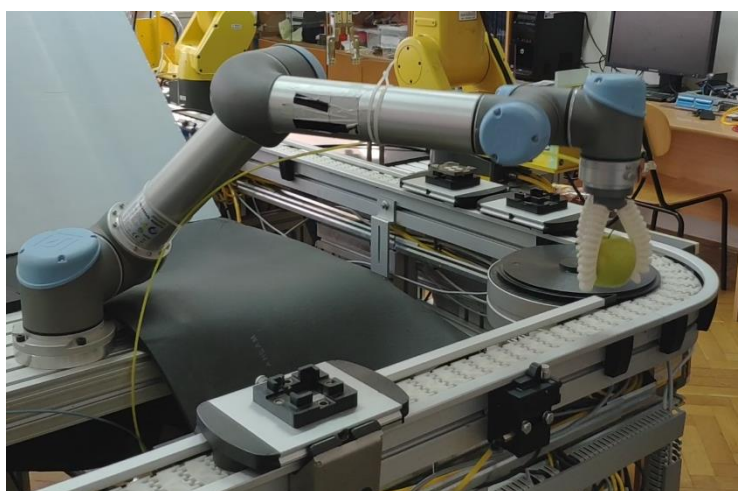
Robot je isprogramiran da obavlja jednostavnu "pick and place" funkciju pri kojoj će robot doći na željenu poziciju, pustiti zrak u prihvatnicu te odnijeti predmet na drugo mjesto i ispustiti zrak iz prihvatnice. Na slikama 42., 43., 44., 45., i 46. prikazan je robot s postavljenom prihvatnicom kako prenosi razne predmete.



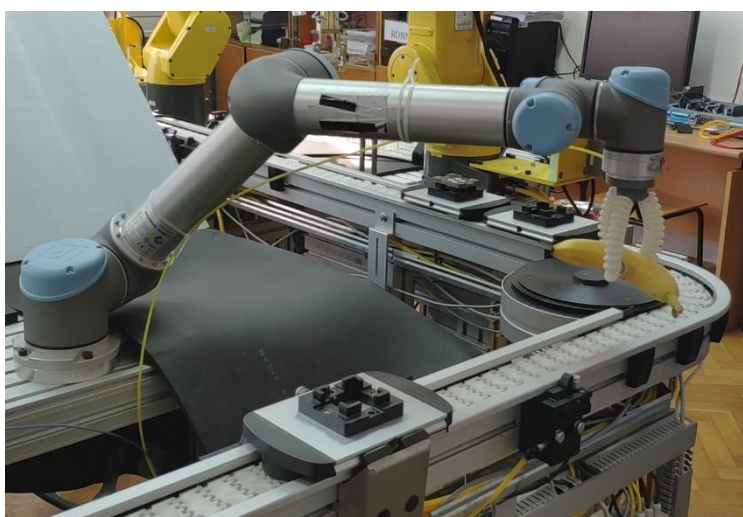
**Slika 42. Prenosjenje telefona pomoću meke prihvatnice**



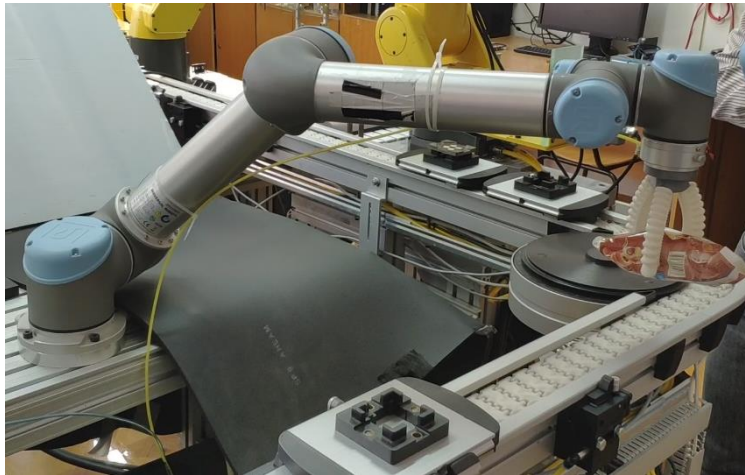
**Slika 43. Prenosnje kivija pomoću meke prihvatnice**



**Slika 44. Prenosnje jabuke pomoću meke prihvatnice**



**Slika 45. Prenosnje banane pomoću meke prihvatnice**



**Slika 46. Prenošenje vrećice slatkiša pomoću meke prihvatnice**

## 5. Zaključak

U ovom završnom radu prikazan je postupak oblikovanja i izrade mekog robotskog sustava, tj. meke robotske prihvatnice koja omogućuje prihvat različitih vrsta predmeta. U prvom poglavlju dan je uvod u rad. Također su navedeni problemi s kojima se susreću kruti robotski sustavi te je ponuđeno rješenje tog problema, a to je meki robotski sustav. Drugo poglavlje sadrži opis opreme i programskih paketa korištenih u radu. U trećem poglavlju opisan je proces oblikovanja, izrade i testiranja meke prihvatnice. Četvrto poglavlje sadrži implementaciju meke prihvatnice na robotu UR5 i prikaz njezinog rada.

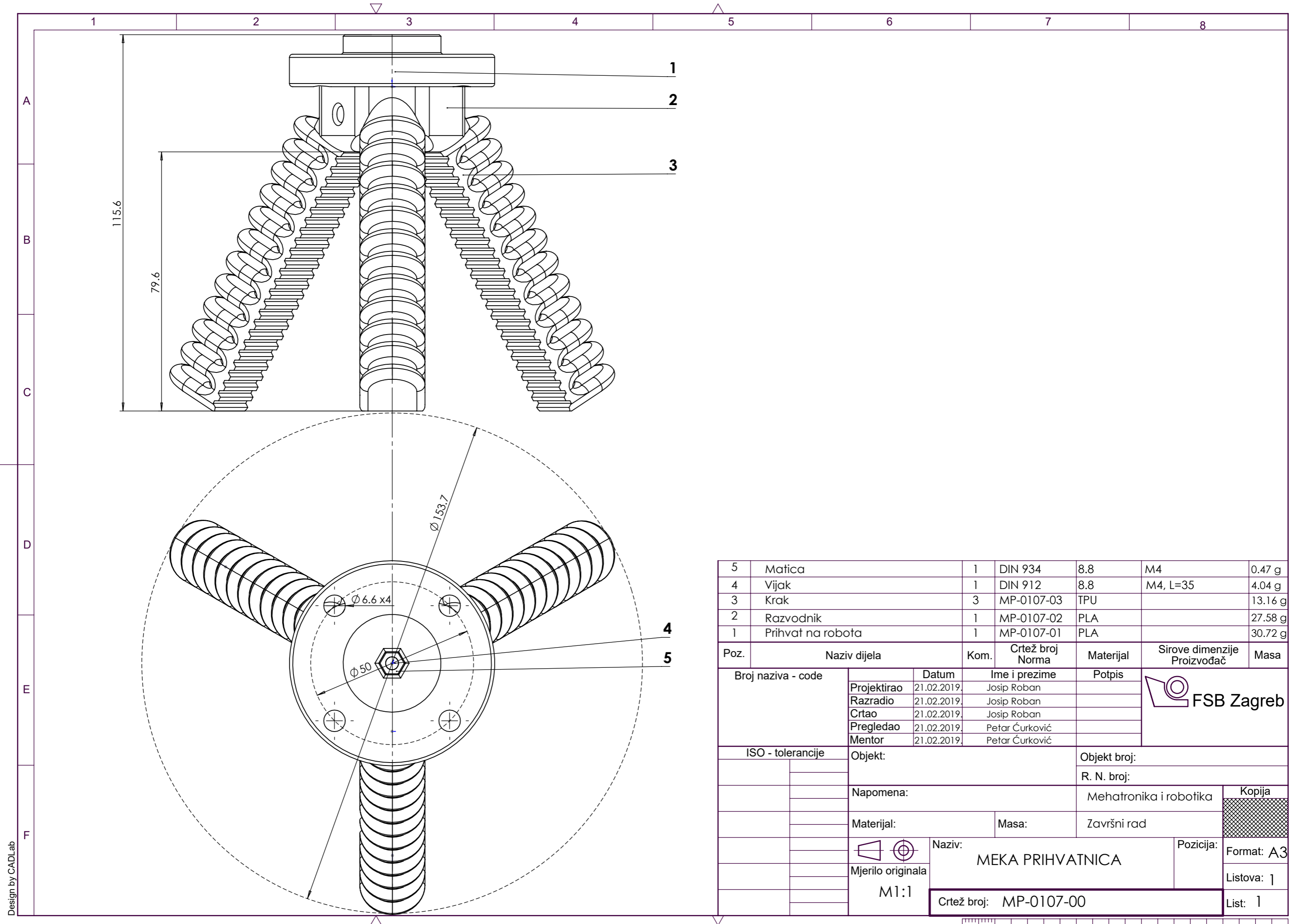
Robotske ruke su postale standard u industriji, njihova snaga, brzina i preciznost su neizostavan član svakog visoko automatiziranog industrijskog postrojenja. Oni zahtijevaju visoko organizirano postrojenje i strogo definiranu okolinu što je problem u svakodnevnom svijetu punom prepreka. Meki robotski sustavi mogli bi riješiti taj problem i vrlo važna stavka je što su sigurni za rad u neposrednoj ljudskoj blizini. Meki roboti su još u relativno ranoj fazi razvoja, no zbog svoje jednostavnosti i niske cijene proizvodnje gotovo je sigurno da će uskoro postati dio svakodnevnice. Ovaj rad prikazuje postupak izrade jednog mekog sustava koji predstavlja odlično rješenje za hvatanje predmeta različitih oblika i dimenzija. Meka prihvatnica prikazana u ovom završnom radu je jedan mali korak prema rješavanju problema definiranosti okoline, no pokazuje nam da je to ostvarivo i da se još mnogo toga u robotici može razviti i poboljšati.

## LITERATURA

- [1] <https://www.technologyreview.com/s/538136/a-transformer-wins-darpas-2-million-robotics-challenge>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [2] <https://www.dailysabah.com/technology/2018/12/04/facebook-has-been-working-onsoft-robotics-since-last-year-looking-for-hires-report>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [3] <https://sites.google.com/site/jonhiller/software/voxcad>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [4] <https://www.kisspng.com/png-dassault-systmes-logo-dassault-aviation-enovia-bracket-6239365/download-png.html>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [5] <https://www.prusa3d.com/about-us/>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [6] <https://cobots.se/produkt/ur5-robot/>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [7] <https://www.olmia-robotics.nl/shop/teach-pendant>. Pristupljeno 18. veljače 2019.
- [8] <https://www.creativemachineslab.com/>. Pristupljeno 19. veljače 2019.
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>. Pristupljeno 19. veljače 2019.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Prusa\\_i3](https://en.wikipedia.org/wiki/Prusa_i3). Pristupljeno 19. veljače 2019.
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Robots](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Robots). Pristupljeno 19. veljače 2019.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehička dokumentacija



5	Matica	1	DIN 934	8.8	M4	0.47 g
4	Vijak	1	DIN 912	8.8	M4, L=35	4.04 g
3	Krak	3	MP-0107-03	TPU		13.16 g
2	Razvodnik	1	MP-0107-02	PLA		27.58 g
1	Prihvat na robota	1	MP-0107-01	PLA		30.72 g
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao		21.02.2019.	Josip Roban			
Razradio		21.02.2019.	Josip Roban			
Crtao		21.02.2019.	Josip Roban			
Pregledao		21.02.2019.	Petar Čurković			
Mentor		21.02.2019.	Petar Čurković			
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
				R. N. broj:		
		Napomena:		Mehatronika i robotika		Kopija
		Materijal:		Masa:	Završni rad	
				Naziv:		Pozicija:
		M1:1		MEKA PRIHVATNICA		Format: A3
		Crtež broj: MP-0107-00				Listova: 1
						List: 1



Design by CADLab