

# Integracija kolaborativnog robota u sustav za robotizirano lasersko zavarivanje

---

**Kaić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:862172>

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

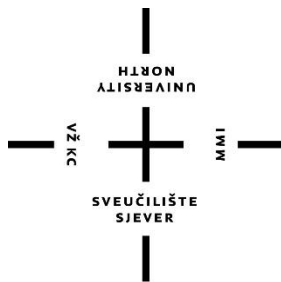
*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

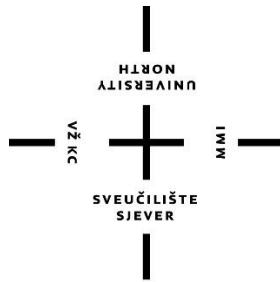
**Diplomski rad br. 124/STR/2024**

**Integracija kolaborativnog robota u sustav za robotizirano  
lasersko zavarivanje**

**Ivan Kaić, 0195036266**

Varaždin, rujan 2024. godine





# Sveučilište Sjever

Diplomski studij Strojарstva

Diplomski rad br. 124/STR/2024

## Integracija kolaborativnog robota u sustav za robotizirano lasersko zavarivanje

### Student

Ivan Kaić, 0195036266

### Mentor

Matija Bušić, doc. dr. sc.

Varaždin, rujан 2024. godine





### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Ivan Kaić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom Robotizirani sustav za lasersko zavarivanje te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(Ivan kaić)

(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Ivan Kaić

JMBAG 0195036266

DATUM 13.09.2024.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Integracija kolaborativnog robota u sustav za robotizirano lasersko zavarivanje

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Integration of a collaborative robot into a robotic laser welding system

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc. dr. sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva
- doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
- doc. dr. sc. Boris Jalušić, član povjerenstva
- doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član povjerenstva
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 124/STR/2024

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupak laserskog zavarivanja. Opisati vrste i način rada lasera koji se koriste u industriji za zavarivanje. Opisati robotizirano zavarivanje i izvedbe robota. Posebno detaljno opisati kolaborativne robote, njihov način rada te prednosti i nedostatke. Detaljnije opisati mogućnosti robotizacije postupaka zavarivanja pomoću kolaborativnih robota te definirati problematiku koja se pojavljuje u takvom zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu rada opisati izradu sustava za lasersko zavarivanje pomoću kolaborativnog robota. Definirati sve dijelove i funkcije takvog robotiziranog sustava te način izrade upravljačkog programa za rad. Provesti i opisati simulaciju rada robotskog sustava uz detaljno pojašnjenje unosa svih parametara. Na kraju rada donijeti zaljučke o izrađenom sustavu i provedenoj simulaciji rada navedenog sustava. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

17.09.2024.



POTPIS MENTORA

M. Bušić

## Sažetak

Ovaj rad bavi se razvojem i primjenom naprednog sustava za lasersko zavarivanje koji koristi kolaborativne robote u industrijskim procesima. Fokus je stavljen na integraciju fiber lasera i automatizaciju putem robota Techman TM12, čime se postiže visoka preciznost, brzina i kvaliteta zavarivanja. Rad opisuje tehničke aspekte sustava, uključujući upotrebu fotoelektričnih senzora, sigurnosnih skenera i naprednih softverskih alata kao što je Process Simulate za simulaciju i optimizaciju putanja robota.

Prednosti laserskog zavarivanja u kontekstu Industrije 4.0 uključuju povećanu produktivnost, smanjene troškove rada te mogućnost automatizacije složenih proizvodnih procesa. Zaključuje se da, unatoč visokim početnim troškovima i potrebi za specijaliziranom radnom snagom, primjena laserskog zavarivanja s robotima donosi dugoročne koristi za industrije koje zahtijevaju visoku razinu preciznosti, fleksibilnosti i sigurnosti.

Ključne riječi: automatizacija, fiber laser, industrija 4.0, kolaborativni roboti, programiranje, simulacija



## Summary

This paper deals with the development and application of an advanced system for laser welding that utilizes collaborative robots in industrial processes. The focus is placed on the integration of fiber lasers and automation through the Techman TM12 robot, achieving high precision, speed, and quality in welding. The paper describes the technical aspects of the system, including the use of photoelectric sensors, safety scanners, and advanced software tools such as Process Simulate for simulating and optimizing robot paths.

The advantages of laser welding in the context of Industry 4.0 include increased productivity, reduced labor costs, and the ability to automate complex production processes. It is concluded that, despite high initial costs and the need for specialized labor, the application of laser welding with robots brings long-term benefits to industries that require a high level of precision, flexibility, and safety.

Keywords: automation, fiber laser, Industry 4.0, collaborative robots, programming, simulation

## Popis korištenih kratica

<b>TCP</b>	Tool Center Point (Točka alata)
<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller (Programabilni logički kontroler)
<b>IF</b>	„If“ naredba (uvjetna naredba u programiranju)
<b>PTP</b>	Point to Point (Točka do točke)
<b>LIN</b>	Linear (Linearna putanja)
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design (Računalno potpomognuto projektiranje)
<b>CPS</b>	Cyber-Physical Systems (Kibernetičko-fizički sustavi)
<b>IoT</b>	Internet of Things (Internet stvari)
<b>TM</b>	Techman (Robotska tehnologija Techman)
<b>PCB</b>	Printed circuite board
<b>CO<sub>2</sub></b>	Ugljični dioksid

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Industrija 4.0.....	2
2.1. Robotika u Industriji 4.0.....	2
2.1.1. Integracija robotike u industriju 4.0 .....	2
3. Lasersko zavarivanje .....	4
3.1. Povijest i razvoj laserskog zavarivanja .....	4
3.2. Podjela lasera za zavarivanje s obzirom na aktivnu tvar.....	5
3.2.1. Plinski laseri .....	6
3.2.2. Kruti laseri.....	6
3.2.3. Diodni (disk) laseri.....	6
3.2.4. Dye laseri.....	7
3.2.5. Fiber laseri.....	7
3.3. Princip rada fiber lasera.....	7
3.3.1. Opis dijelova uređaja za lasersko zavarivanje.....	8
3.4. Prednosti i nedostaci .....	11
4. Kolaborativni roboti .....	13
4.1. Prednosti u usporedbi s industrijskim robotima.....	15
4.2. Nedostaci u usporedbi s industrijskim robotima.....	16
4.3. Robotizirano zavarivanje.....	17
5. Process Simulate .....	22
6. Eksperimentalni dio.....	23
6.1. Opis zahtjeva projekta.....	23
6.1.1. Kolaborativni robot Techman TM12 .....	24
6.1.2. Postolje za postavljanje cijevi .....	25
6.1.3. Korisničko sučelje za upravljanje cilindrima .....	27
6.2. Izrada simulacije u Process Simulateu .....	27
6.2.1. Postavljanje i kinematiziranje robota u simulaciju .....	27
6.2.2. Izrada putanja u simulaciji .....	37
6.3. Izrada programa za robota.....	40
6.3.1. Dodatni senzori .....	40
6.3.2. KEYENCE Safety Device Configurator .....	42
6.3.3. Tablica izlaznih i ulaznih signala te korištenih varijabli.....	44
6.3.4. Program .....	47
6.4. Optimizacija .....	57
7. Zaključak.....	59

8. Literatura .....	60
---------------------	----



# 1. Uvod

Lasersko zavarivanje predstavlja suvremeni tehnološki postupak koji koristi lasersku zraku visoke gustoće energije kao izvor topline za spajanje materijala, najčešće metala ili polimera (najčešće duromera). Ova metoda zavarivanja omogućava izuzetno precizne, brze i kvalitetne spojeve s minimalnim deformacijama, čime se smanjuje utjecaj toplinske obrade na okolni materijal. Lasersko zavarivanje sve je prisutnije u različitim industrijama, uključujući automobilsku industriju, zrakoplovstvo, preciznu mehaniku i medicinske tehnologije. Prednosti ove tehnike, kao što su sposobnost spajanja tankih i teško dostupnih dijelova, visoka produktivnost i mogućnost automatizacije procesa, čine je pogodnom za napredne industrijske aplikacije.

S razvojem Industrije 4.0, u kojoj se naglasak stavlja na integraciju digitalnih tehnologija i automatizaciju, lasersko zavarivanje postaje ključni proces u pametnim proizvodnim sustavima. Robotika, umjetna inteligencija (AI), Internet stvari (IoT) i cyber-fizički sustavi (CPS) igraju ključnu ulogu u modernizaciji proizvodnje. Integracija robota i naprednih laserskih sustava omogućava povećanu fleksibilnost, efikasnost i dosljednost proizvodnih operacija. Roboti koji se koriste u laserskom zavarivanju ne samo da mogu raditi precizno i s visokom brzinom, već su sposobni autonomno prilagođavati svoje operacije temeljem podataka dobivenih od senzora, čime se postiže optimalna kvaliteta zavara.

Ovaj rad istražuje tehnološke aspekte i postupke laserskog zavarivanja, s naglaskom na primjenu kolaborativnih robota i modernih softverskih alata za simulaciju i kontrolu procesa. Posebna pažnja posvećena je opisu implementacije fiber lasera, koji omogućava visoku kvalitetu i energetska efikasnost, u sustav zavarivanja. Također, razmatrane su koristi i izazovi integracije ovih naprednih tehnologija u proizvodne procese, uključujući potrebu za specijaliziranom opremom, sigurnosnim sustavima te kontinuiranim nadzorom i optimizacijom.

## **2. Industrija 4.0**

Industrija 4.0, poznata i kao četvrta industrijska revolucija, označava značajnu transformaciju u proizvodnim i poslovnim procesima kroz integraciju naprednih digitalnih tehnologija koje povezuju fizičke i digitalne sustave u inteligentne, tzv. pametne tvornice. Koncept Industrije 4.0, koja je prvi put predstavljena 2011. godine na sajmu u Hannoveru u Njemačkoj kao nacionalna strategija za promicanje digitalne transformacije, temelji se na ključnim tehnologijama poput Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), velikih podataka, robotike i cyber-fizičkih sustava, koji omogućuju povećanu učinkovitost, produktivnost i fleksibilnost u proizvodnji. IoT omogućava povezivanje uređaja i strojeva u stvarnom vremenu, AI i strojno učenje omogućavaju analizu podataka i prediktivno održavanje, dok robotika i CPS uvode visok stupanj automatizacije i samoregulacije. Iako Industrija 4.0 donosi mnoge prednosti poput smanjenja troškova i poboljšane kvalitete proizvoda, suočava se s izazovima poput sigurnosti podataka, potrebe za specijaliziranom radnom snagom i visokih početnih troškova implementacije. Ova industrijska revolucija predstavlja stratešku potrebu za tvrtke koje žele ostati konkurentne u digitaliziranom globalnom gospodarstvu, a njena će se uloga nastaviti razvijati s tehnološkim napretkom, pružajući nove mogućnosti za inovacije i rast.[1]

Od svog uvođenja, koncept Industrije 4.0 postao je ključan za industrijske strategije diljem svijeta. Primjerice, Sjedinjene Američke Države promoviraju slične inicijative pod nazivom *Advanced Manufacturing Partnership*, dok Kina implementira strategiju poznatu kao *Made in China 2025* s ciljem modernizacije svojih proizvodnih kapaciteta. Europska unija također aktivno potiče digitalizaciju kroz program *Digital Europe*. [1]

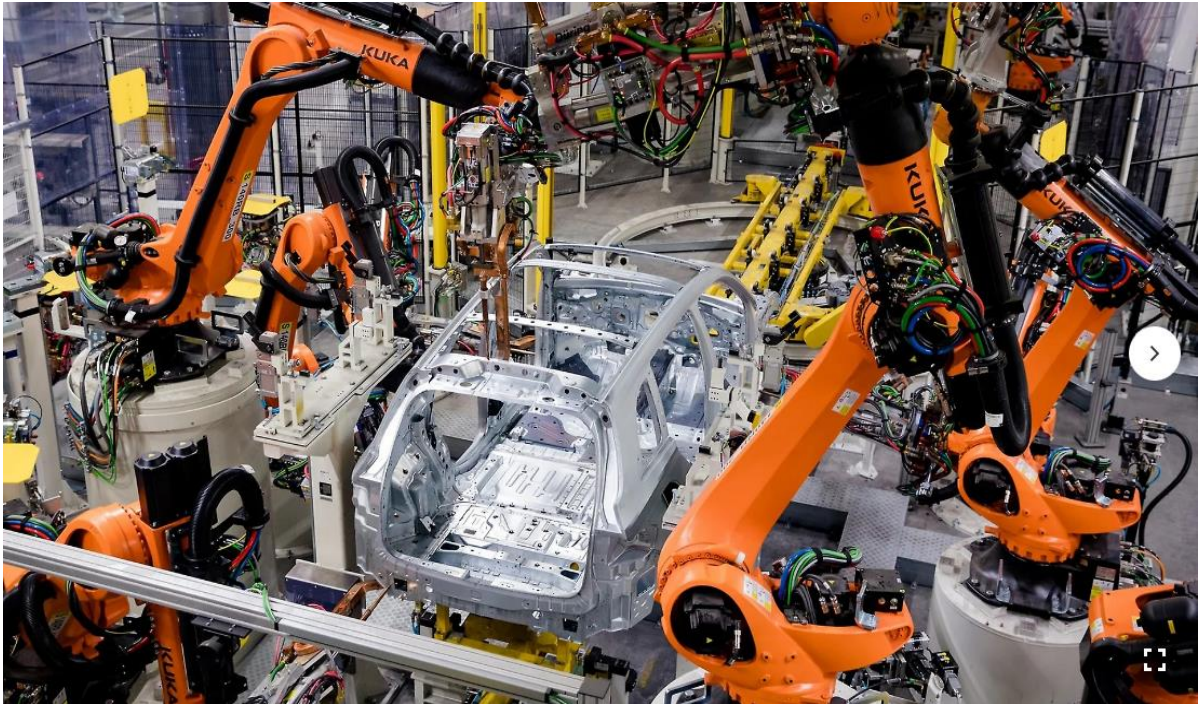
### **2.1. Robotika u Industriji 4.0**

Robotika igra ključnu ulogu u konceptu Industrije 4.0, temeljene na integraciji naprednih digitalnih tehnologija s ciljem stvaranja inteligentnih proizvodnih sustava. Industrija 4.0 predstavlja paradigmatički pomak u proizvodnim procesima, omogućavajući visoki stupanj automatizacije, fleksibilnosti i prilagodljivosti putem primjene napredne robotike, IoT-a, AI-a i CPS-a. [1]

#### **2.1.1. Integracija robotike u industriju 4.0**

Robotika omogućava visok stupanj automatizacije u proizvodnim procesima, smanjujući potrebu za ljudskom intervencijom u repetitivnim i zahtjevnim zadacima. Robotski sustavi sposobni su raditi kontinuirano s visokom preciznošću, što značajno povećava produktivnost i

smanjuje troškove proizvodnje. Jedan je od najčešćih primjera integracije robotike u automobilskoj industriji, gdje se proizvodi veliki broj serija proizvoda. Slika 2.1 prikazuje spajanje krovne konstrukcije automobila s karoserijom u tvornici Daimler u Mađarskoj. Primjenom umjetne inteligencije i strojnog učenja roboti postaju sposobni učiti iz podataka i optimizirati svoje performanse. Ova sposobnost omogućava prilagodbu različitim proizvodnim scenarijima i autonomno donošenje odluka u stvarnom vremenu. Inteligentni roboti mogu analizirati podatke iz senzora, predviđati kvarove i optimizirati proizvodne procese, čime se poboljšava učinkovitost i smanjuje vrijeme zastoja. [1]



*Slika 2.1 Primjer integracije robotike u autoindustriji (Daimler tvornica u Kecskemetu) [2]*

Kolaborativni roboti ili „coboti“, predstavljaju važan aspekt robotike u Industriji 4.0. Dizajnirani za siguran rad uz ljude, *coboti* mogu preuzeti zadatke koji su previše opasni, teški ili monotoni za ljude, čime se poboljšava sigurnost i ergonomija radnog mjesta. Fleksibilnost i jednostavnost programiranja *cobota* omogućavaju brzu prilagodbu različitim proizvodnim potrebama. Više o kolaborativnim robotima bit će izneseno u daljnjem poglavlju ovog rada.

Implementacija robotike u Industriji 4.0 suočava se s nekoliko izazova, uključujući visoke početne troškove, potrebu za specijaliziranom radnom snagom te pitanja sigurnosti podataka. Integracija novih tehnologija s postojećim sustavima može biti tehnički složena i zahtijeva pažljivo planiranje i upravljanje. [1]



### 3. Lasersko zavarivanje

Tehnika laserskog zavarivanja može se koristiti u različitim modalitetima, uključujući zavarivanje taljenjem i zavarivanje ključanicom (engl. *keyhole welding*), ovisno o snazi lasera i vrsti obradaka. Prednosti ovog postupka uključuju visoku brzinu zavarivanja, sposobnost zavarivanja na teško dostupnim mjestima te mogućnost automatizacije procesa. Osim toga, lasersko zavarivanje omogućava zavarivanje različitih materijala, uključujući kombinacije metala koji se teško zavaruju tradicionalnim metodama.[3]

#### 3.1. Povijest i razvoj laserskog zavarivanja

Američki fizičar i izumitelj Theodore H. Maiman izumio je 1960. prvi funkcionalni laser, rubinski laser, što je postavilo temelje za razvoj laserskih tehnologija. Rubinski laser koristio je kristal rubina kao aktivni medij i bio je sposoban proizvesti pulsirajuću crvenu svjetlost. Ovaj izum bio je ključan za daljnja istraživanja u primjeni lasera u industriji, uključujući lasersko zavarivanje.

Početni eksperimenti s laserima u industrijskim aplikacijama uključivali su korištenje lasera za rezanje i zavarivanje materijala. Ova su istraživanja pokazala potencijal lasera za precizno i efikasno spajanje materijala, što je dovelo do razvoja prvih prototipova laserskih zavarivačkih strojeva. [3]



Slika 3.1 Theodore H. Maiman s prototipom rubinskog lasera [4]

Uvođenje CO<sub>2</sub> lasera i Nd:YAG lasera 1970-ih omogućilo je širu primjenu laserskog zavarivanja u industriji. Ovi laseri nudili su veću snagu i fleksibilnost u obradi različitih materijala. Industrijska primjena, posebno u automobilske i zrakoplovnoj industriji, doživjela je značajan rast zahvaljujući ovim tehnološkim inovacijama. Nadalje, razvoj fiber lasera (slika 3.2) pružio je dodatna poboljšanja u pogledu učinkovitosti i kvalitete zrake. Fiber laseri, koji koriste optička vlakna obogaćena rijetkim zemnim elementima, omogućili su preciznije i kontroliranije lasersko zavarivanje, otvarajući nove mogućnosti za precizne i zahtjevne aplikacije. [5]

Tehnike laserskog zavarivanja diverzificirale su se uvođenjem hibridnog laserskog zavarivanja i integracijom robotike, što je značajno povećalo produktivnost i preciznost u automatiziranim proizvodnim linijama. Digitalizacija i napredak u upravljačkim sustavima unaprijedili su lasersko zavarivanje čineći ga još fleksibilnijim i sposobnim za složene zavarivačke operacije. Plavi su laseri proširili spektar materijala koji se mogu efikasno zavarivati.[5]



*Slika 3.2 Elias Snitzer, izumitelj prvog fiber lasera [6]*

### **3.2. Podjela lasera za zavarivanje s obzirom na aktivnu tvar**

Laserski izvori mogu biti različiti, ovisno o aktivnoj tvari (mediju) koja se koristi za generaciju svjetlosti. Generalna je podjela lasera s obzirom na aktivnu tvar na plinske lasere, krute lasere, fiber lasere, diodne (disk) lasere te dye lasere.

### **3.2.1. Plinski laseri**

Plinski laseri predstavljaju jednu od najranijih klasa laserskih izvora, razvijenih tijekom sredine 20. stoljeća. Temelje se na principu pobuđivanja plinske smjese kako bi se generirala koherentna svjetlost. Koriste atomski ili molekularni plin kao aktivni medij. Kada se plin pobudi, odnosno kada se energija, obično u obliku električnog pražnjenja, unese u plinsku smjesu, dolazi do emisije fotona pa pobuđeni atomi ili molekule prelaze natrag u niže energetske stanje.

CO<sub>2</sub> laseri, koji su vrsta plinskih lasera, koriste smjesu ugljikovog dioksida, dušika i helija. Ugljikov dioksid služi kao aktivni medij, a dušik i helij pomažu u prijenosu energije i odvođenju topline. CO<sub>2</sub> laseri emitiraju svjetlost u infracrvenom dijelu spektra, najčešće na valnoj duljini od 10060 nanometara. Maksimalna snaga takvih lasera je do 50 kW s ukupnom efikasnosti od 10 do 13 %. CO<sub>2</sub> laseri imaju širok spektar primjena zahvaljujući visokim snagama koje mogu dostići i mogućnosti obrade raznih materijala, uključujući metale, polimere, tekstil i druge. Zbog svoje učinkovitosti i sposobnosti dubokog prodiranja u materijal, CO<sub>2</sub> laseri su posebno cijenjeni u industrijskom rezanju i zavarivanju. [7]

### **3.2.2. Kruti laseri**

Kruti laseri predstavljaju značajnu kategoriju laserskih izvora čiji je aktivni medij kruta tvar, tipično kristal ili staklo obogaćeno atomima nekog rijetkog zemnog elementa. Ovi laseri imaju ključnu ulogu u zavarivačkoj industriji zbog svoje sposobnosti da proizvedu visokoenergetske snopove u kompaktnim veličinama.

Nd:YAG laseri koriste itrij-aluminij-granat (YAG) kristal obogaćen neodimijevim ionima kao aktivni medij. Oni su jedni od najčešće korištenih krutih lasera u industrijskom zavarivanju zbog njihove sposobnosti da rade u kontinuiranom ili pulsnom modu i da proizvode svjetlost na valnoj duljini od oko 1064 nm. Ova je valna duljina efikasna za prodiranje u širok spektar materijala. Primjenu također pronalaze i u mikromehanici.[3]

### **3.2.3. Diodni (disk) laseri**

Diodni laseri, poznati i kao poluvodički laseri, predstavljaju kategoriju laserskih uređaja koji koriste poluvodičku diodu kao aktivni medij za generiranje lasera. Oni funkcioniraju na principu elektroluminiscencije, gdje se električna energija direktno pretvara u svjetlosnu energiju. Ova je tehnologija značajna u zavarivanju zbog svoje kompaktne veličine, visoke efikasnosti i sposobnosti generiranja visokih snaga. Diodni laseri izuzetno su efikasni, s efikasnošću pretvorbe

energije koja može doseći do 50 %. Oni su sposobni raditi na širokom rasponu valnih duljina, od vidljivog spektra do infracrvenog, što ih čini pogodnim za različite primjene, uključujući zavarivanje, rezanje. [3]

### **3.2.4. Dye laseri**

Dye laseri su specijalizirana kategorija laserskih uređaja koji koriste organske boje, rastvorene u tekućem otapalu, kao aktivni medij. Karakterizira ih velika fleksibilnost u pogledu podešavanja valne duljine, što je omogućeno promjenjivim energetske razinama koje pružaju organske molekule boje. Ovo svojstvo čini dye lasere posebno vrijednima u znanstvenim istraživanjima i preciznim aplikacijama gdje je potrebna specifična valna duljina.

Princip rada dye lasera temelji se na procesu stimulirane emisije iz organskih molekula boje koje se uzbuđuju pomoću vanjskog izvora svjetlosti, često drugog lasera. Kada se molekula boje uzbuđuje, ona može emitirati svjetlost na širokom rasponu valnih duljina, omogućavajući time generiranje različitih boja lasera. [7]

### **3.2.5. Fiber laseri**

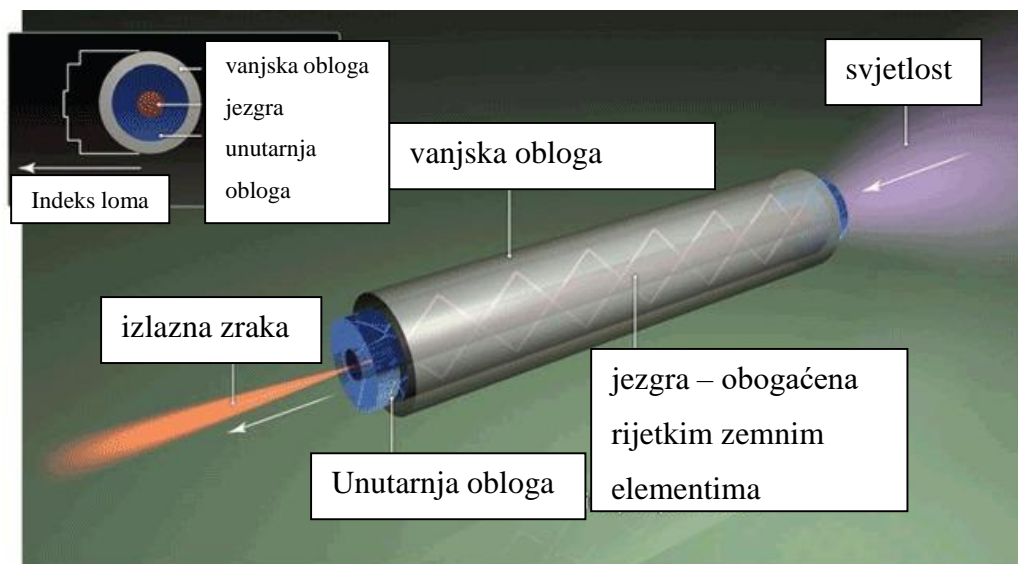
Fiber laseri koriste obogaćena optička vlakna kao aktivni medij i sposobni su proizvesti visokokvalitetne snopove s visokom efikasnošću. Ovi su laseri postali sve popularniji u zavarivačkim aplikacijama zbog svoje preciznosti i energetske učinkovitosti. U nadolazećem poglavlju detaljnije će se istražiti tematika fiber lasera, razotkrivajući slojeve njihove sofisticiranosti i primjenu u suvremenim tehnološkim procesima.

## **3.3. Princip rada fiber lasera**

Fiber laseri predstavljaju posebnu vrstu krutih lasera, često s atraktivnim karakteristikama poput visoke izlazne snage u kombinaciji s visokom kvalitetom snopa. Obično se smatraju laserima koji imaju aktivno optičko vlakno kao medij za pojačavanje lasera. U većini slučajeva to vlakno za pojačavanje obogaćeno je rijetkim zemnim ionima.

Fiber laser započinje svoj rad izvorom pobuđivanja, najčešće diodnim laserom, koji emitira svjetlost na određenoj valnoj duljini. Ova se generirana svjetlost uvodi u jezgru optičkog vlakna, gdje se apsorbira od strane obogaćenih rijetkih zemnih iona. Apsorpcija svjetlosti podiže elektrone u ionima na višu energetske razinu, stvarajući uvjete za stimuliranu emisiju. Kada se elektroni u ionima vrte na nižu energetske razinu, emitiraju fotone na karakterističnoj valnoj duljini. Ovi

fotoni, u prisutnosti reflektirajućih površina ili Braggovih rešetki, uzrokuju daljnju stimuliranu emisiju, pri čemu se svaki foton multiplicira generirajući koherentan i monokromatski svjetlosni snop. Optičko vlakno pojačava ovaj snop putem višestrukih refleksija unutar jezgre vlakna, dok efekt vođenja svjetla unutar vlakna osigurava minimalne gubitke i visoku efikasnost pojačanja.[8]

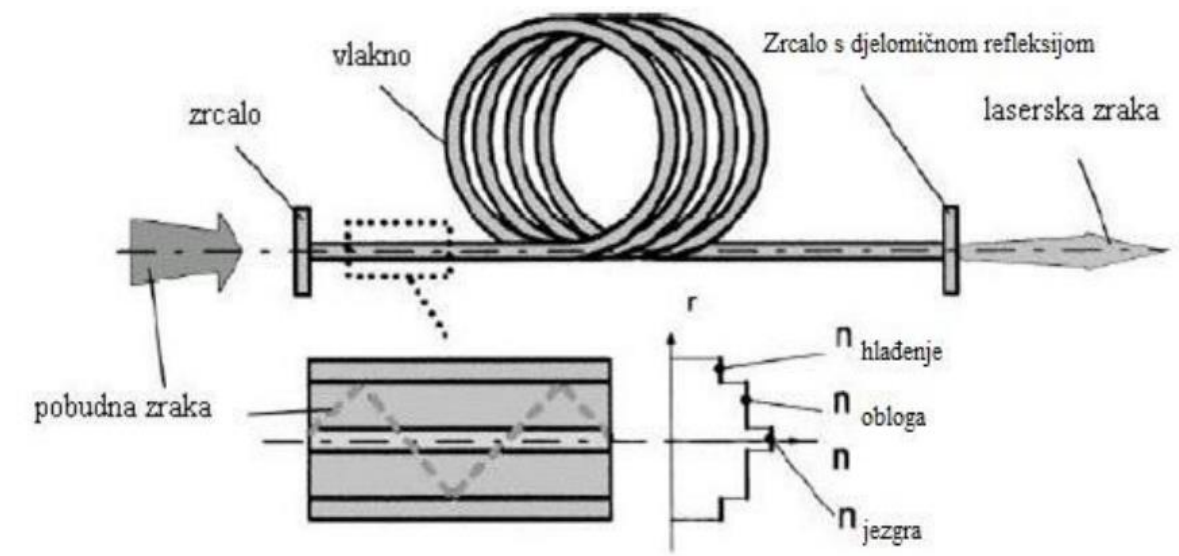


Slika 3.3. Prikaz prolaska svjetlosti kroz optička vlakna [9]

### 3.3.1. Opis dijelova uređaja za lasersko zavarivanje

Fiber laseri odlikuju se kompaktnom veličinom, dugovječnim radom diode, jednostavnim održavanjem, velikim iskorištenjem električne energije i kvalitetnom laserskom zrakom bez obzira na to o kojim se snagama lasera radilo. Fiber laseri dostupni su u rasponu od 500 W do 50 kW s iskorištenjem energije većim od 30 %. [3]

Svaki fiber laser obično se sastoji od sljedećih ključnih dijelova: izvora lasera, optičkog vlakna, laserske glave ili pištolja, optičkog sustava, sustava zaštitnog plina, kontrolnog sustava, sustava za rashlađivanje, napajanja te upravljačke jedinice. [3]

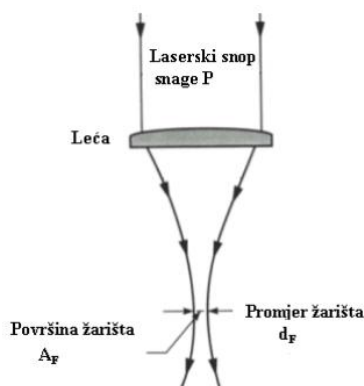


Slika 3.4 Shematski prikaz dijelova fiber lasera [3]

Izvor lasera kod fiber lasera najčešće je laserska dioda koja emitira svjetlost odnosno zrake. Izvor lasera određuje izlaznu snagu, valnu duljinu i kvalitetu snopa, što izravno utječe na kvalitetu i preciznost zavarivanja. [3]

Optičko vlakno je vodič za svjetlost, kroz koji se laserski snop prenosi od izvora do krajnjeg djelovatelja (*end-effector*). Vlakno je obogaćeno rijetkim zemnim elementima kako bi omogućilo pojačanje snopa tijekom njegova prolaska. [3]

Krajnji djelovatelj, također poznat kao „laserska glava“ ili „laserski pištolj“, dio je uređaja koji fokusira i usmjerava laserski snop na radni komad. Često sadrži optički sustav za fokusiranje i prilagodbu snopa te mlaznicu za zaštitni plin. Za postizanje gustoće snage potrebne za obradu materijala laserski snop koji dolazi iz rezonatora mora se fokusirati pomoću leća ili zrcala na kružnu površinu žarišta, promjera od 0,2 do 1 mm. Tek tada laserski snop služi kao alat. [3]



Slika 3.5 Shematski prikaz fokusiranja svjetlosti pomoću leća u laserskom pištolju [3]

Formula za proračun gustoće snage fiber lasera:

$$q = \frac{P}{A_F} \left[ \frac{W}{cm^2} \right]$$

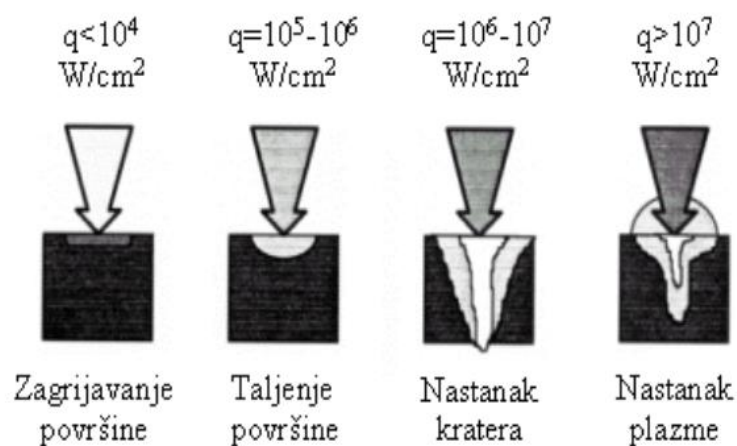
Gdje su:

$q$  – gustoća snage lasera

$P$  – snaga izlaznog laserskog snopa iz rezonatora

$A_F$  – površina žarišta

Gustoća snage na površini radnog komada  $q$  ( $W/cm^2$ ) jednaka je omjeru snage lasera  $P$  i površine presjeka snopa  $A$  na površini materijala i predstavlja najvažniji čimbenik kod obrade materijala laserom. Najveća gustoća snage postiže se u žarištu, gdje je promjer laserskog snopa najmanji. Ovisno o namještenoj gustoći snage na površini materijala, postiže se zagrijavanje, taljenje i isparavanje materijala. [3]



Slika 3.6 Ovisnost gustoće snage lasera o utjecaju laserske zrake na materijal [3]



Slika 3.7 Prikaz pištolja za ručno lasersko zavarivanje [10]

Optički sustav uključuje leće, zrcala i druge optičke komponente unutar krajnjeg djelovatelja. Ove komponente oblikuju, usmjeravaju i fokusiraju laserski snop na površinu materijala koji se zavaruje. [3]

Sustav zaštitnog plina koristi plin (najčešće argon ili helij) koji se pušta kroz mlaznicu krajnjeg djelovatelja kako bi zaštitio zavar od oksidacije i kontaminacije. [5]

Kontrolni sustav je „mozak“ uređaja za fiber zavarivanje, koji upravlja radom lasera, postavkama snage, brzine zavarivanja.[5]

Laserski sustav tijekom rada generira značajnu količinu topline koja se mora učinkovito odvoditi kako bi se spriječilo pregrijavanje i osigurao stabilan rad. Hladnjak može biti zračni ili vodeni. [5]

Upravljačka jedinica je sučelje koje omogućava operaterima kontrolu nad parametrima zavarivanja, praćenje procesa i unos potrebnih prilagodbi tijekom rada. [3]

### **3.4. Prednosti i nedostaci**

Zavarivanje fiber laserom, kao napredna tehnika zavarivanja, donosi brojne prednosti, ali i neke nedostatke. U nastavku su navedene glavne prednosti i nedostaci zavarivanja fiber laserom.

#### **Prednosti zavarivanja fiber laserom**

- 1.** Visoka preciznost i kvaliteta zavarivanja: fiber laseri omogućavaju vrlo precizno usmjeravanje laserskog snopa, što rezultira izuzetno preciznim i visokokvalitetnim zavarima. Zbog visoke fokusiranosti snopa mogu se postići vrlo uski i duboki zavari s minimalnim toplinskim utjecajem na okolni materijal. [3,5]
- 2.** Brzina i efikasnost: zavarivanje fiber laserom može biti značajno brže u usporedbi s tradicionalnim tehnikama zavarivanja. Brza primjena energije omogućava postizanje visokih brzina zavarivanja, što povećava produktivnost i smanjuje troškove rada. [3,5]
- 3.** Nizak toplinski utjecaj: fiber laseri generiraju vrlo koncentriranu toplinu, što minimizira deformacije i unutarnje naprezanje u zavarenom materijalu. To rezultira boljim strukturnim integritetom zavarene komponente i smanjuje potrebu za dodatnom obradom. [3,5]
- 4.** Mogućnost zavarivanja različitih materijala: fiber laseri pogodni su za zavarivanje širokog spektra materijala, uključujući visoko reflektivne materijale poput aluminija, bakra i zlata. Također omogućuju zavarivanje različitih kombinacija materijala, što nije uvijek moguće kod drugih metoda zavarivanja. [3,5]



5. Automatizacija i integracija: fiber laseri su lako integrirani u automatizirane sustave zavarivanja, uključujući robotske sustave. To omogućava visoku ponovljivost i konzistentnost zavarivačkih operacija, što je ključno za industrijsku proizvodnju. [3,5]
6. Niska potrošnja energije: fiber laseri imaju visoku učinkovitost pretvorbe električne energije u svjetlosnu energiju, što rezultira nižim operativnim troškovima u usporedbi s drugim tipovima lasera. [3,5]

### **Nedostatci zavarivanja fiber laserom**

1. Visoki početni troškovi: nabava i instalacija fiber laserskog sustava može biti značajno skuplja u usporedbi s tradicionalnim tehnikama zavarivanja. Visoki početni troškovi mogu biti prepreka za manje tvrtke ili aplikacije s ograničenim proračunom. [5]
2. Složenost održavanja: iako su fiber laseri poznati po svojoj dugotrajnosti i pouzdanosti, zahtijevaju specijalizirano održavanje. Nedostatak stručnog osoblja za održavanje može dovesti do duljih zastoja i većih troškova popravaka. [5]
3. Ograničenja kod debljih materijala: fiber laseri, iako učinkoviti za tanje materijale, mogu imati ograničenja u učinkovitom zavarivanju vrlo debelih materijala. U takvim slučajevima potrebne su višestruke prolazne ili dodatne tehnike kao što su: prethodno zagrijavanje koje smanjuje termalni šok materijala te se samim time omogućava bolje taljenje debljih materijala, oscilirajuće zavarivanje kod kojeg laserska zraka oscilira, čime se povećava širina zavara i omogućava bolje pokrivanje šire površine, zavarivanje u segmentima gdje se laserska zraka fokusira na određene dijelove zavara u različitim vremenskim intervalima, što omogućava ravnomjernije hlađenje i smanjuje unutarnja naprezanja kod debljih materijala. [5]
4. Odraz svjetla i refleksija: kod zavarivanja visoko reflektivnih materijala postoji rizik od refleksije laserskog snopa, što može oštetiti opremu ili uzrokovati sigurnosne probleme. Potrebne su posebne mjere opreza i dodatna oprema za sigurnost. [5]
5. Specifičnost primjene: iako fiber laseri imaju širok raspon primjena, postoje određene zavarivačke situacije u kojima druge metode zavarivanja mogu biti učinkovitije ili praktičnije, ovisno o specifičnim zahtjevima materijala i dizajna. [5]

## 4. Kolaborativni roboti

Kolaborativni su roboti takvi roboti koji su dizajnirani za rad u neposrednoj blizini ljudi bez potrebe za sigurnosnim barijerama. Oni posjeduju napredne senzore, softver za prepoznavanje i reakciju na okolinu te algoritme za sigurno zaustavljanje u slučaju kontakta s ljudima. Njihova sposobnost interakcije s ljudima čini ih izuzetno vrijednima u proizvodnim linijama koje zahtijevaju visoku fleksibilnost i prilagodljivost. Na slici 4.1 možemo vidjeti rad kolaborativnog robota proizvođača Kuka s čovjekom u neposrednoj blizini bez potrebe za dodatnim sigurnosnim barijerama.



*Slika 4.1 Primjer kolaborativnog robota u radu s čovjekom [11]*

Sigurnost u radu s robotima, posebno u kontekstu kolaborativnih robota (*cobota*) i njihove interakcije s ljudima, regulirana je raznim međunarodnim standardima i normama. Ovi standardi imaju za cilj osigurati sigurno radno okruženje, minimizirati rizike od ozljeda i osigurati pravilno korištenje robotskih sustava. Najznačajniji standardi i norme za sigurnost u radu s robotima jesu:

- ISO 10218 – međunarodni standard koji se odnosi na sigurnost industrijskih robota. Ovaj standard sastoji se od dva dijela:

- ISO 10218-1:2011: Robotska sigurnost – Dio 1: Zahtjevi za dizajn. Ovaj dio standarda specificira zahtjeve za dizajn, konstrukciju i integraciju industrijskih robota.
- ISO 10218-2:2011: Robotska sigurnost – Dio 2: Integracija robota i sustava. Ovaj dio pokriva sigurnosne zahtjeve za integraciju robota u sustave, uključujući sigurnosne funkcije, zaštitne mjere i upute za sigurnu uporabu.
- ISO/TS 15066 – tehnička je specifikacija koja se nadovezuje na ISO 10218 i posebno se odnosi na kolaborativne robote. Ova specifikacija daje smjernice za sigurno projektiranje i primjenu *cobota* koji dijele radni prostor s ljudima. Ključni aspekti uključuju:
  - ograničenja snage i sile: definiranje maksimalnih dopuštenih sila i pritisaka koje *coboti* smiju primijeniti tijekom interakcije s ljudima.
  - procjena rizika: detaljne smjernice za procjenu rizika i primjenu odgovarajućih zaštitnih mjera.
  - testiranje: preporuke za testiranje sigurnosnih sustava i funkcija *cobota* kako bi se osigurala njihova sigurnost u stvarnim radnim uvjetima.

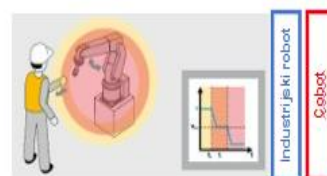
#### Metoda 1:

Monitoring zaustavljanja



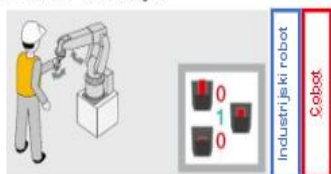
#### Metoda 3:

Monitoring brzine i udaljenosti



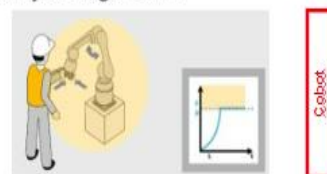
#### Metoda 2:

Ručno vođenje



#### Metoda 4:

Ograničavanje snage i sile



Slika 4.2 4 Sigurnosne metode interakcije čovjeka s robotom (ISO/TS 15066) [12]

- ISO/TR 20218-1: Roboti i robotski uređaji – Sigurnosni dizajn za sustave industrijskih robota – Dio 1: Krajnji izvršitelji – fokusira se na sigurnosne aspekte dizajna i korištenja krajnjih izvršitelja (*end-effectors*) koji se koriste u kolaborativnim robotskim sustavima. Krajnji su izvršitelji uređaji koji su pričvršćeni na kraj robotske ruke i koji obavljaju specifične zadatke, poput hvatanja, zavarivanja, rezanja ili mjerenja. [13]

## 4.1. Prednosti u usporedbi s industrijskim robotima

Kolaborativni roboti (*coboti*) i industrijski roboti predstavljaju dvije različite kategorije robotskih sustava, svaka sa svojim specifičnim prednostima i nedostacima. Dok industrijski roboti tradicionalno dominiraju u automatskim proizvodnim linijama zbog svoje snage i brzine, kolaborativni su roboti razvijeni za rad u blizini ljudi, omogućavajući sigurnu i fleksibilnu suradnju.

	Kolaborativni roboti	Industrijski roboti
Sigurnost	<i>Coboti</i> su dizajnirani za siguran rad uz ljude. Opremljeni su naprednim sensorima i softverom koji omogućavaju detekciju prisutnosti ljudi te smanjenje brzine ili zaustavljanje u slučaju kontakta, čime se značajno smanjuje rizik od ozljeda.	Industrijski roboti često zahtijevaju fizičke barijere ili zaštitne zone kako bi osigurali sigurnost, što može povećati troškove i prostor potreban za instalaciju.
Fleksibilnost i jednostavnost korištenja	<i>Coboti</i> su obično lakši za programiranje i prilagodbu različitim zadacima bez potrebe za specijaliziranim znanjem. To omogućava brzu i jednostavnu reprogramaciju i implementaciju u različite proizvodne procese.	Industrijski roboti često zahtijevaju složenije programiranje i specijalizirane inženjere za prilagodbu novih zadataka, što može povećati troškove i vrijeme implementacije.
Integracija u postojeće proizvodne procese	<i>Coboti</i> se mogu lako integrirati u postojeće proizvodne linije bez potrebe za značajnim promjenama u infrastrukturi. Njihova sposobnost za rad uz ljude omogućava njihovu primjenu u mješovitim radnim okruženjima.	Industrijski roboti često zahtijevaju posebne instalacije i promjene u proizvodnim procesima kako bi se osigurala njihova optimalna učinkovitost.

Tablica 4.1 Prednosti cobota u usporedbi s industrijskim robotima [14]

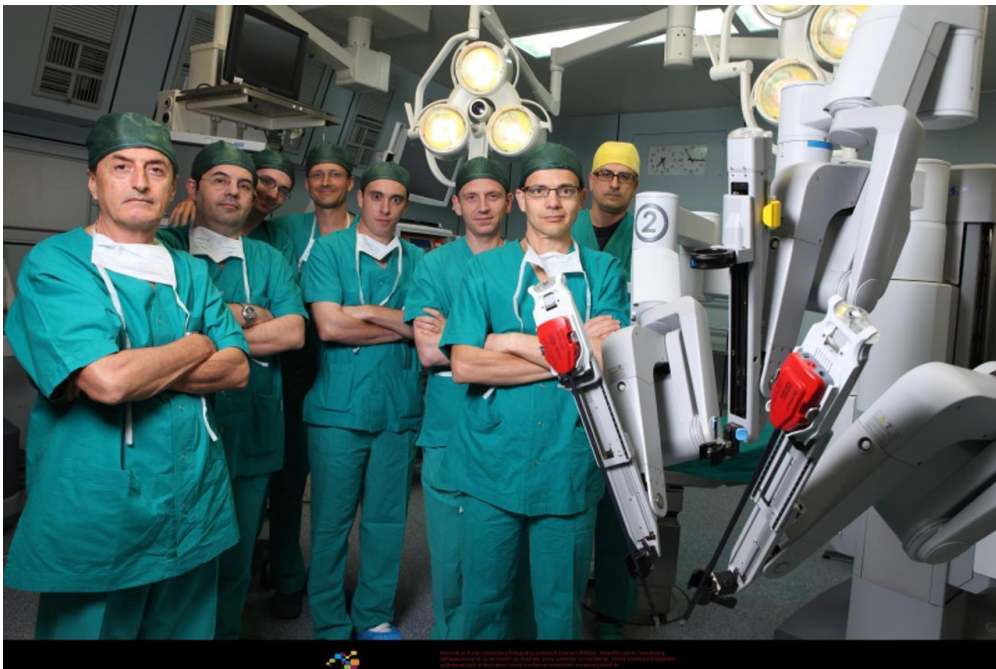
## 4.2. Nedostatci u usporedbi s industrijskim robotima

	Kolaborativni roboti	Industrijski roboti
Snaga i brzina	<p><i>Coboti</i>, zbog sigurnosnih razloga, obično rade sporije i s manjom snagom kako bi osigurali siguran rad uz ljude. To može smanjiti njihovu učinkovitost u zadacima koji zahtijevaju visoke performanse.</p>	<p>Industrijski roboti obično imaju veću snagu i brzinu, što ih čini idealnim za zadatke koji zahtijevaju visoki kapacitet i brzinu obrade, kao što su teški radovi, zavarivanje i brzo pakiranje.</p>
Troškovna efikasnost	<p>Iako početna investicija u <i>cobote</i> može biti niža, njihova sporija obrada i manja snaga mogu povećati operativne troškove u usporedbi s industrijskim robotima u aplikacijama koje zahtijevaju velike brzine i kapacitete.</p>	<p>Industrijski roboti, iako skuplji za instalaciju, često nude bolju troškovnu učinkovitost u visokoproduktivnim okruženjima zbog svoje brzine i snage.</p>
Specijalizacija	<p><i>Coboti</i> su dizajnirani za široku primjenu i fleksibilnost, što može značiti da nisu uvijek optimalni za vrlo specifične ili teške zadatke.</p>	<p>Industrijski roboti često su specijalizirani za određene zadatke i mogu se optimizirati za specifične aplikacije, što povećava njihovu učinkovitost i pouzdanost.</p>

Tablica 4.2 Nedostatci cobota u usporedbi s industrijskim robotima [14]



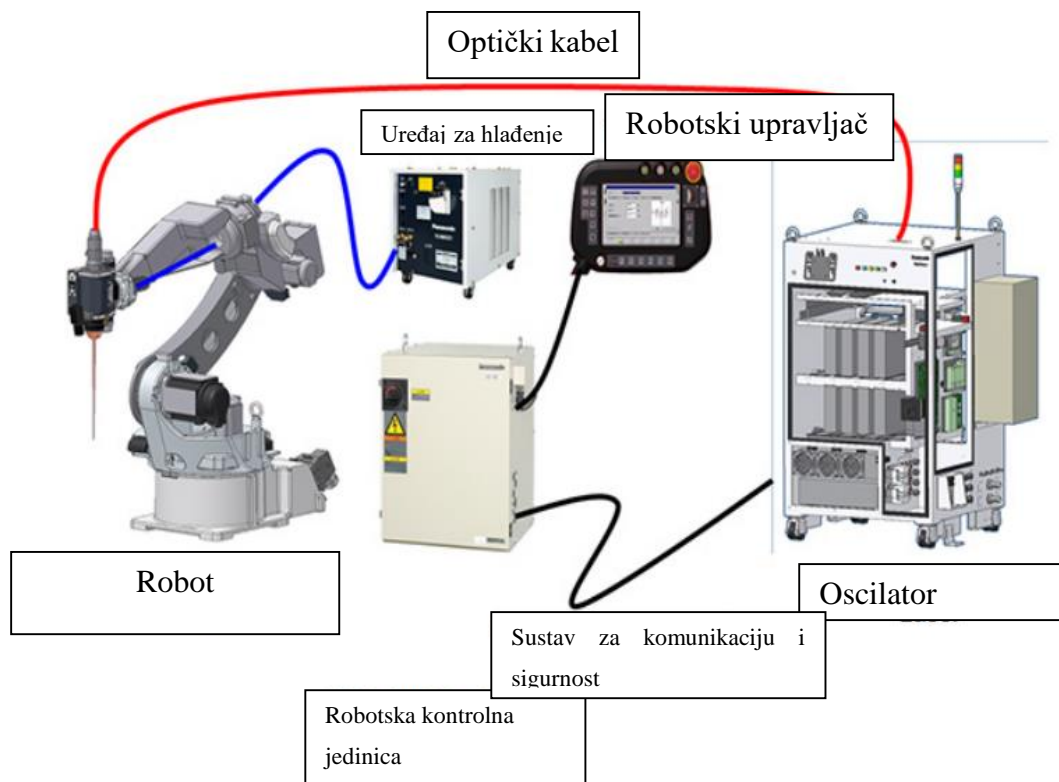
Kolaborativni su roboti (*coboti*) idealni za zadatke koji zahtijevaju fleksibilnost, sigurnost i blisku suradnju s ljudima, zahvaljujući svojoj prilagodljivosti, jednostavnosti programiranja i mogućnosti rada bez sigurnosnih barijera, čime se povećava sigurnost i ergonomija radnog mjesta. Oni su prikladni za manje proizvodne prostore, brzu implementaciju i zadatke male do srednje nosivosti. Kolaborativni roboti (*coboti*) nalaze široku primjenu u raznim industrijskim sektorima, pa ih tako možemo pronaći i u gotovo svim velikim multinacionalnim kompanijama kao što su BMW, Amazon, Pfizer, Da Vinci Surgical System (u Republici Hrvatskoj dva su kirurška *cobota*: Da Vinci i Mona Lisa, koji se nalaze u bolnici KBC (klinički bolnički centar) Zagreb te se koriste za transplantaciju bubrega, prikazani na slici 4.3). [14]



Slika 4.3 Kolaborativni robot Da Vinci s kirurškim timom KBC-a Zagreb [15]

### 4.3. Robotizirano zavarivanje

Robotizirano zavarivanje odnosi se na primjenu industrijskih robota u procesu zavarivanja, čime se postiže visoka razina automatizacije, preciznosti i ponovljivosti u proizvodnim procesima. Ova tehnologija igra ključnu ulogu u modernoj industriji, posebno u sektorima kao što su automobilska, zrakoplovna i brodograđevna industrija, gdje su kvaliteta zavarivanja i brzina proizvodnje od iznimne važnosti.



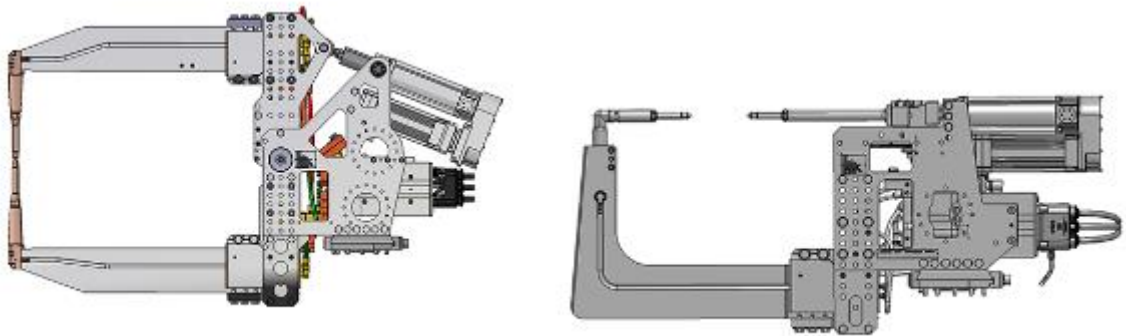
Slika 4.4 Sustav robotskog zavarivanja fiber laserom [3]

Industrijski roboti, koji se koriste u zavarivanju, opremljeni su različitim vrstama senzora i alatima za izvođenje preciznih zavarivačkih operacija. Robotska ruka obično ima više stupnjeva slobode, što omogućava fleksibilnost u izvođenju složenih zavarivačkih zadataka. Ovi roboti mogu biti programirani za različite vrste zavarivanja, uključujući elektrolučno zavarivanje, točkasto zavarivanje i lasersko zavarivanje. Lasersko zavarivanje, posebice u kombinaciji s robotikom, omogućava zavarivanje teško dostupnih mjesta s minimalnim termalnim utjecajem na okolni materijal, što rezultira visokom kvalitetom zavara.[14]

Robotizirano zavarivanje donosi mnoge prednosti, uključujući:

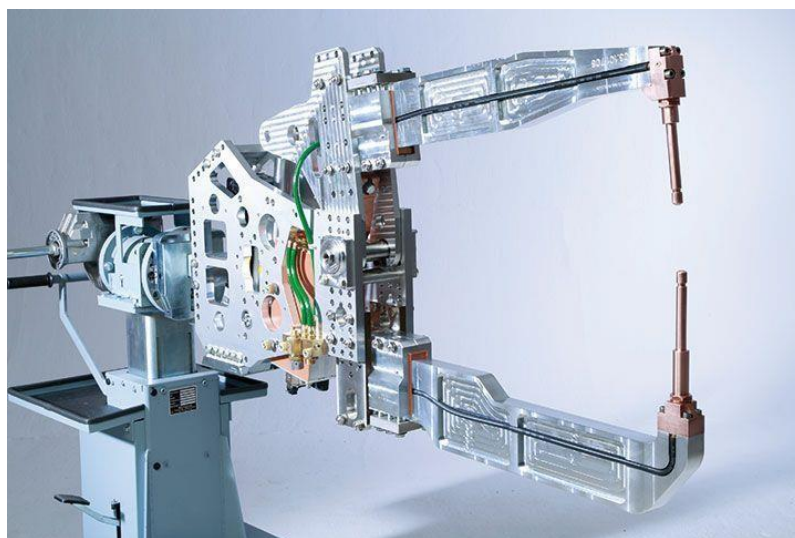
- povećanu produktivnost – roboti mogu raditi 24/7 bez potrebe za odmorom, čime se znatno povećava proizvodni kapacitet u usporedbi s ručnim zavarivanjem.[14]
- poboljšanu kvalitetu zavara – roboti izvode zavarivanje s visokom preciznošću i dosljednošću, smanjujući mogućnost pogrešaka. To rezultira kvalitetnijim zavarima i manjom potrebom za naknadnom obradom. [14]
- smanjenje troškova – iako su početni troškovi za implementaciju robotskog sustava visoki, dugoročno se smanjuju operativni troškovi zbog povećane učinkovitosti, smanjenja otpada i manjeg broja popravaka. [14]
- poboljšanu sigurnost – zavarivanje je radno intenzivan proces s visokim rizikom od ozljeda zbog izloženosti visokim temperaturama i opasnim materijalima. Roboti preuzimaju ove opasne zadatke, čime se poboljšava sigurnost radnika. [14]

Najčešća je i najjednostavnija tehnologija zavarivanja koja se automatizira točkasto zavarivanje. Alat za točkasto zavarivanje proizvodi se u nekoliko različitih modela, pri čemu su najzastupljeniji modeli tzv. X i C kliješta, nazvana prema svom karakterističnom obliku (slika 4.5). Osim samog alata za točkasto zavarivanje, svaki robotski sustav mora biti opremljen upravljačkom jedinicom za zavarivanje. Ova jedinica omogućava precizno podešavanje različitih parametara zavarivanja, kao što su napon, jačina struje i sila pritiska, čime se optimizira kvaliteta zavara i prilagođava specifičnim zahtjevima procesa.



*Slika 4.5 X kliješta (lijevo) i C kliješta (desno)[16]*

Postoji i mogućnost da se kliješta montiraju na fiksnu poziciju unutar radnog prostora robota, umjesto na robotsku ruku. U tom slučaju robot, koristeći hvataljku, prinosi radni komad kliještima gdje se izvodi proces zavarivanja. Ovakav alat naziva se stacionarna kliješta. Stacionarna kliješta mogu biti izrađena u X ili C izvedbi, ovisno o specifičnim zahtjevima proizvodnog procesa i karakteristikama zavara. Jedan je od najpoznatijih proizvođača kliješta za točkasto zavarivanje Nimak, dok je za upravljačke jedinice to Bosch.



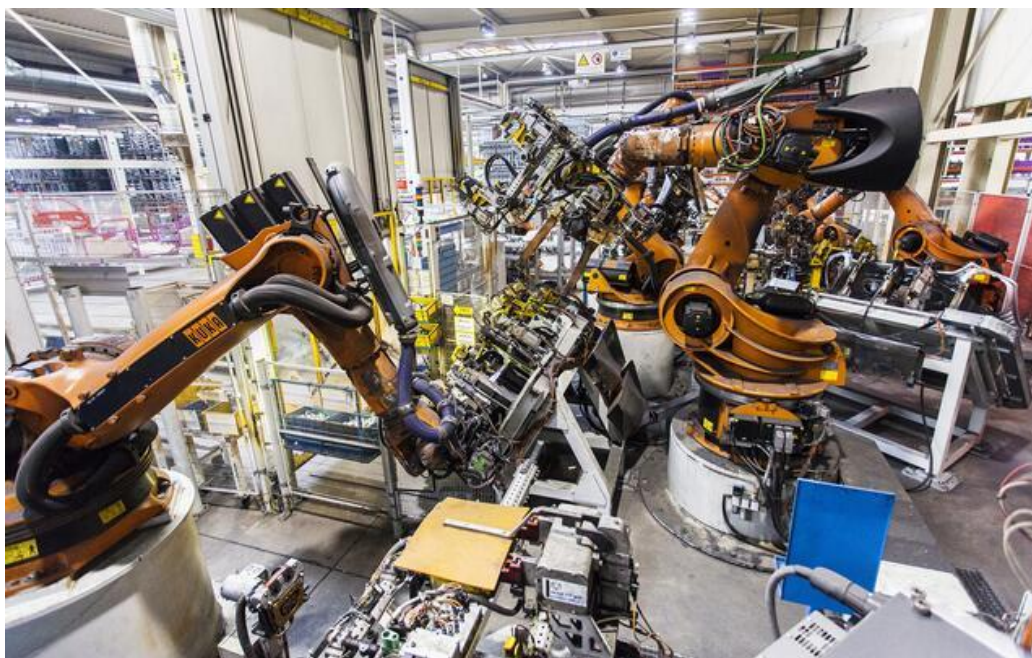
*Slika 4.6 Stacionarna kliješta za točkasto zavarivanje proizvođača Nimak [16]*



Danas se u svim velikim industrijama, uključujući automobilsku, zrakoplovnu i vojnu industriju, koristi robotizirano zavarivanje. Na sljedećim slikama prikazano je nekoliko primjera korištenja robotiziranog zavarivanja.



*Slika 4.7 Robotizirano lasersko zavarivanje krova u Daimler tvornici. [17]*



*Slika 4.8 Točkasto zavarivanje bočne stranice automobila u tvornici Magna Steyer[18]*

Uz osnovne stupnjeve slobode robotske ruke (najčešće šest stupnjeva slobode), u procesima poput MIG/MAG (engl. *metal inert gas / metal active gas*) zavarivanja često se koriste rotacijski stolovi koji dodaju jedan, dva ili više dodatnih stupnjeva slobode. Time se omogućava preciznije pozicioniranje i manipulacija radnim komadom, što rezultira povećanom preciznošću zavarivanja i kvalitetom zavara. Na sljedećoj je slici prikazan jedan takav sustav gdje se pozicije nalaze na okretnom stolu kako bi robot lakše dohvatio sve točke zavarivanja.



*Slika 4.9 Mig zavarivanje pozicija s rotacijskim stolom [19]*

## 5. Process Simulate

Process Simulate je softverski alat za simulaciju proizvodnih procesa koji se koristi za planiranje, optimizaciju i validaciju proizvodnih linija i sustava. Razvijen od strane Siemens PLM Software, Process Simulate omogućava korisnicima da kreiraju virtualne modele proizvodnih procesa, analiziraju ih i optimiziraju prije nego što se implementiraju u stvarnom svijetu. Ovaj je alat posebno koristan za industrije koje zahtijevaju visok stupanj prilagodljivosti i preciznosti, poput automobilske, zrakoplovne, elektronike i drugih sektora.[20]

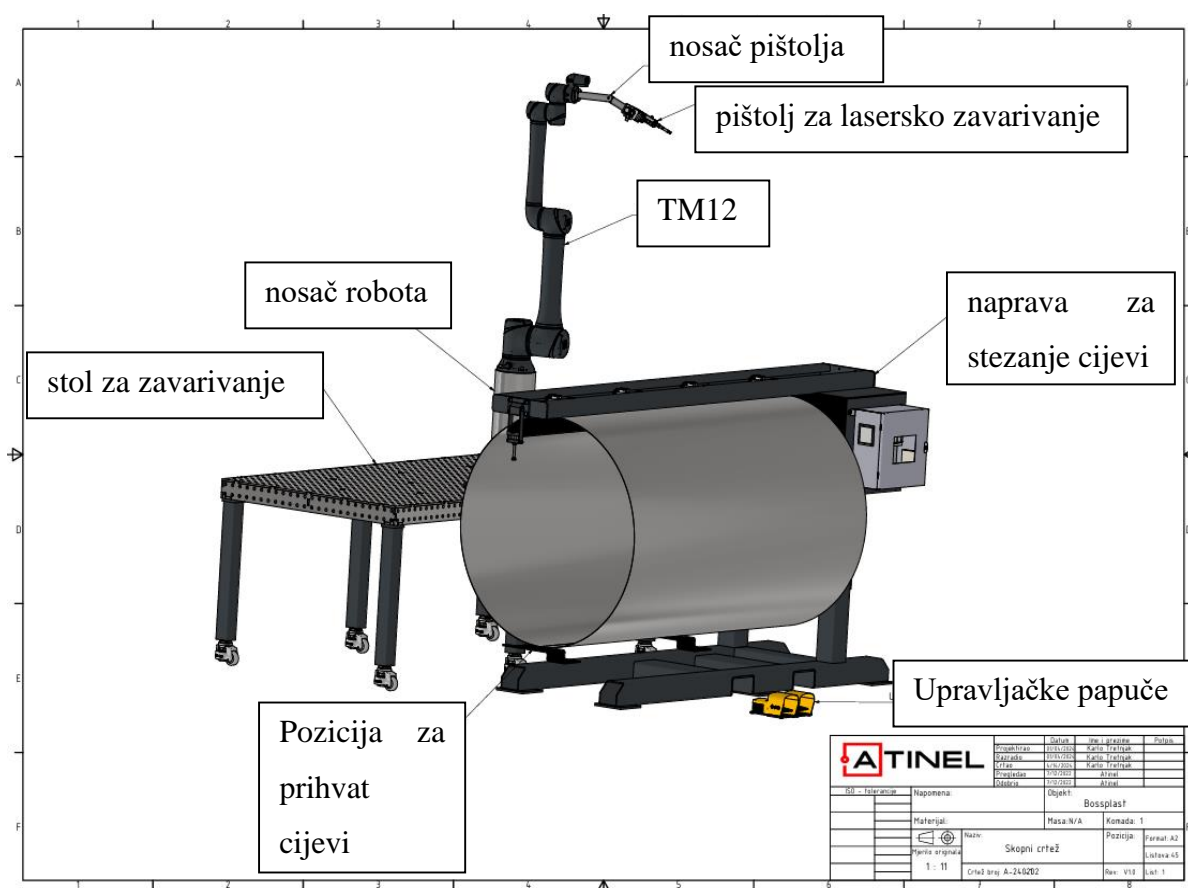
U automobilskoj industriji koristi se za simulaciju i optimizaciju montažnih linija, uključujući robotske operacije za zavarivanje, lakiranje, montažu i inspekciju vozila. U zrakoplovnoj industriji omogućava simulaciju složenih proizvodnih procesa, uključujući montažu zrakoplova, integraciju sustava i testiranje. U elektroničkoj industriji koristi se za optimizaciju proizvodnih linija za montažu elektroničkih komponenti i uređaja, kao što je montaža PCB-a (engl. *Printed circuit board*) i testiranje. Osim toga, primjenjiv je u generalnoj proizvodnji za simulaciju montažnih procesa, logističkih operacija i analizu radnih stanica, čime pomaže tvrtkama u unapređenju učinkovitosti, smanjenju troškova i poboljšanju kvalitete proizvoda. [20]

## 6. Eksperimentalni dio

U ovom dijelu diplomskog rada bit će detaljno opisan i analiziran postupak razvoja robotskog sustava za fiber lasersko zavarivanje s primjenom kolaborativnog robota proizvođača Techman. Poseban naglasak stavit će se na izradu simulacije u softverskom alatu Process Simulate, izradu programa za upravljanje robotom, postupak integracije pištolja za lasersko zavarivanje s robotskim sustavom te na proces puštanja sustava u rad.

### 6.1. Opis zahtjeva projekta

U eksperimentalnom dijelu određen je zahtjev za osmišljavanjem sustava laserskog zavarivanja pomoću robota. Sustav treba biti dizajniran za zavarivanje šava aluminijskih cijevi debljine do 3 milimetra i duljine do 2 metra. Također, jedan je od zahtjeva da se robot može prilagoditi za zavarivanje drugih profila na istom radnom stolu. Kako bi se ispunili svi zahtjevi u eksperimentalnom dijelu, osmišljen je stol za zavarivanje na koji je postavljen kolaborativni robot Techman. Uz robot je povezano dodatno postolje na koje će se postavljati cijevi koje se zavaruju. Na slici 6.1 može se vidjeti tehnički crtež cijelog sustava koji je osmišljen kao rješenje za navedene zahtjeve.



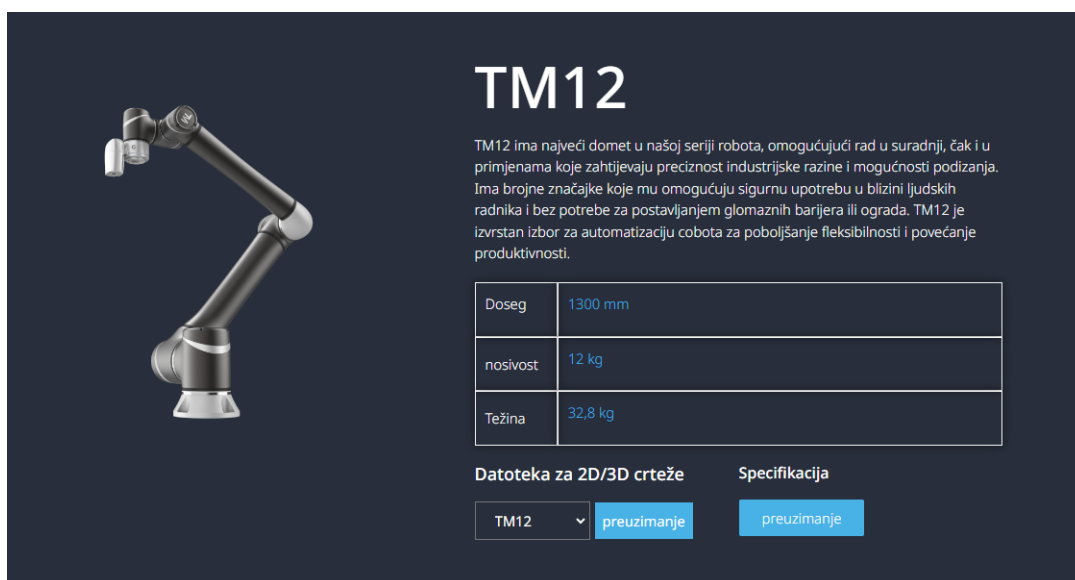
Slika 6.1 Nacrt sustava za lasersko zavarivanje [21]



### 6.1.1. Kolaborativni robot Techman TM12

Techman Robot je inovativna tvrtka specijalizirana za razvoj i proizvodnju kolaborativnih robota (*cobota*) koji su dizajnirani za siguran rad u blizini ljudi u industrijskim okruženjima. Osnovana 2015. godine kao podružnica tajvanskog industrijskog diva Quanta Computer Inc., Techman Robot brzo je postala jedan od vodećih svjetskih proizvođača kolaborativnih robota. Tvrtka je prepoznata po svojim naprednim tehnološkim rješenjima koja integriraju vizualnu tehnologiju i umjetnu inteligenciju, čime omogućuju jednostavno programiranje, fleksibilnost i sigurnost u primjeni. [22]

Kolaborativni robot TM12 odabran je iz nekoliko ključnih razloga. Prvo, njegova je cijena niža u usporedbi s konkurentskim rješenjima renomiranih proizvođača kao što su ABB, KUKA i Universal Robots, što ga čini ekonomski isplativijom opcijom. Drugo, TM12 nudi značajan radni doseg od 1,3 metra, što je od presudne važnosti za ovaj projekt, s obzirom na potrebu zavarivanja cijevi velikih duljina, do 2 metra. Treće, robot se odlikuje jednostavnim softverom za korištenje, što olakšava integraciju i upravljanje unutar proizvodnog procesa. Dodatna prednost je blizina servisnog centra u Sloveniji, što osigurava brzu i efikasnu podršku u slučaju potrebe za održavanjem ili tehničkom podrškom.



**TM12**

TM12 ima najveći doseg u našoj seriji robota, omogućujući rad u suradnji, čak i u primjenama koje zahtijevaju preciznost industrijske razine i mogućnosti podizanja. Ima brojne značajke koje mu omogućuju sigurnu upotrebu u blizini ljudskih radnika i bez potrebe za postavljanjem glomaznih barijera ili ograda. TM12 je izvrstan izbor za automatizaciju cobota za poboljšanje fleksibilnosti i povećanje produktivnosti.

Doseg	1300 mm
nosivost	12 kg
Težina	32,8 kg

Datoteka za 2D/3D crteže      Specifikacija

TM12 ▼    preuzimanje    preuzimanje

Slika 6.2 Osnovne specifikacije TM12 robota [22]

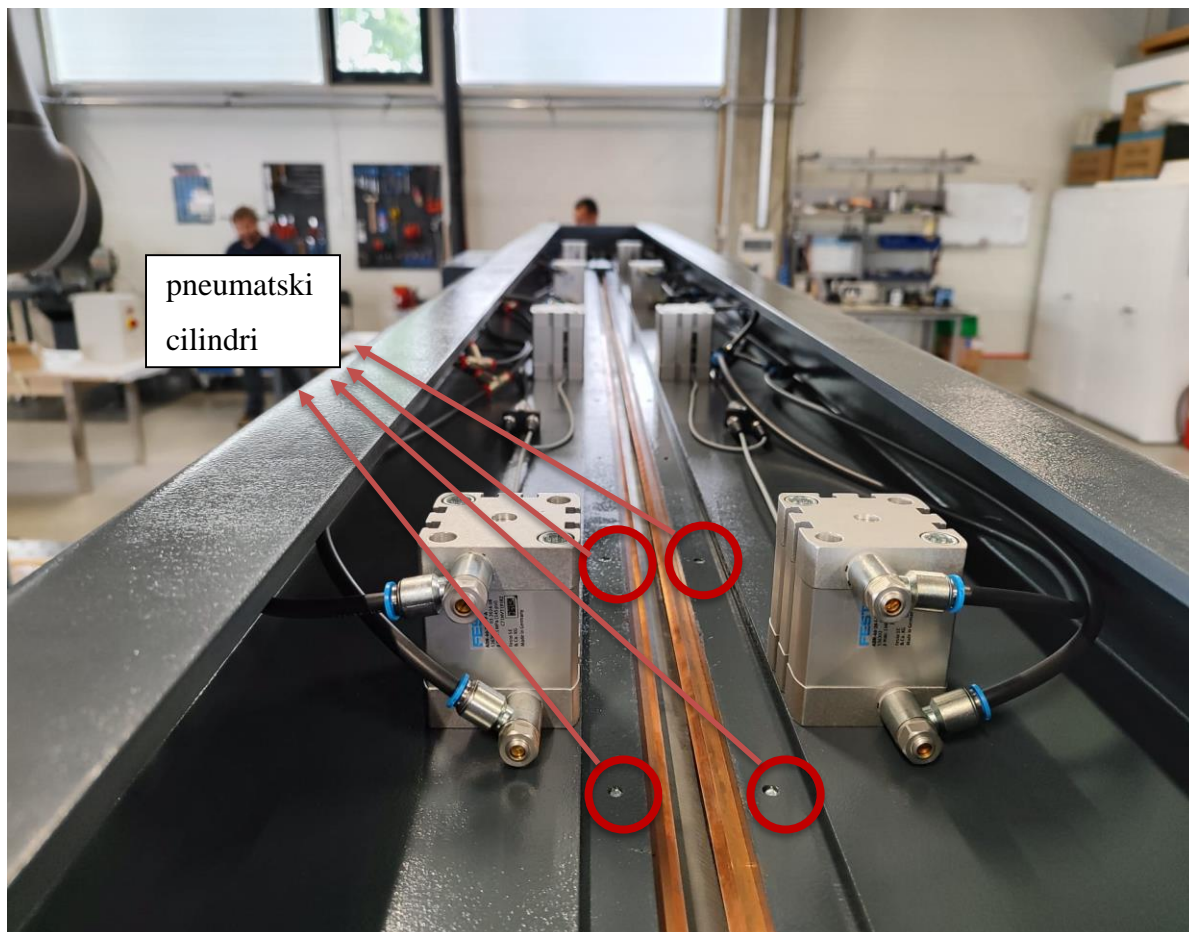
### 6.1.2. Postolje za postavljanje cijevi

Postolje za postavljanje cijevi (slika 6.3) dizajnirano je kako bi osiguralo precizno pozicioniranje i učvršćivanje cijevi, omogućavajući time izvođenje ravnog i kvalitetnog zavarivanja. Sastoji se od pneumatskih cilindara koji su upravljani pomoću PLC (engl. *Programmable Logic Controller*) sustava proizvođača Mitsubishi, čime se osigurava stabilno i pouzdano učvršćenje cijevi na željenom mjestu tijekom cijelog zavarivačkog procesa.



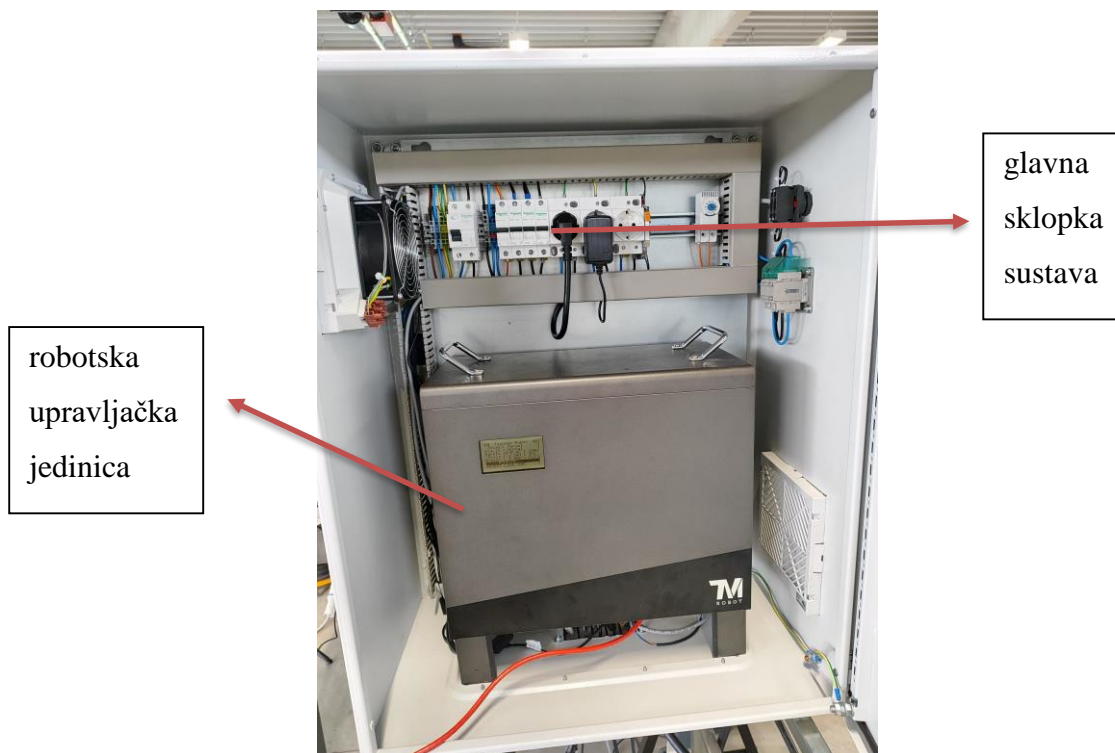
Slika 6.3 Postolje za učvršćivanje cijevi [21]

Na slici 6.4 crvenom bojom označeni su cilindri koji se odabirom na korisničkom sučelju izvlače u poziciju kako bi operator lakše mogao namjestiti cijev na držač. Također, na samom postolju nalazi se i kućište u kojem je smještena robotska upravljačka jedinica te glavna sklopka sustava.



pneumatski cilindri

Slika 6.4 Pneumatski cilindri [21]



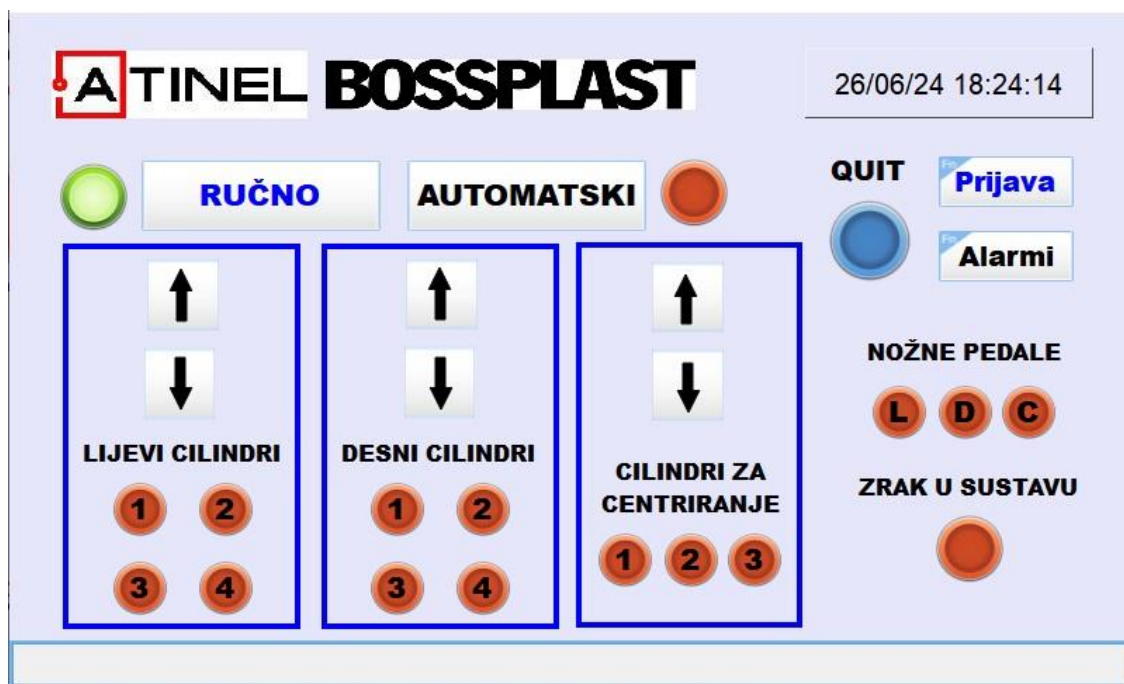
robotna upravljačka jedinica

glavna sklopka sustava

Slika 6.5 Kućište za robotsku upravljačku jedinicu i glavnu sklopku sustava [21]

### 6.1.3. Korisničko sučelje za upravljanje cilindrima

Korisničko sučelje izrađeno je softverskim alatom „Easy Builder Pro“ te omogućava kontrolu nad pneumatskim cilindrima, uključujući njihovo otvaranje i zatvaranje. Ovo sučelje implementirano je na tablet uređaju koji je montiran na samu konstrukciju, čime se operaterima omogućava intuitivno i efikasno upravljanje sustavom.



Slika 6.6 prikaz korisničkog sučelja [21]

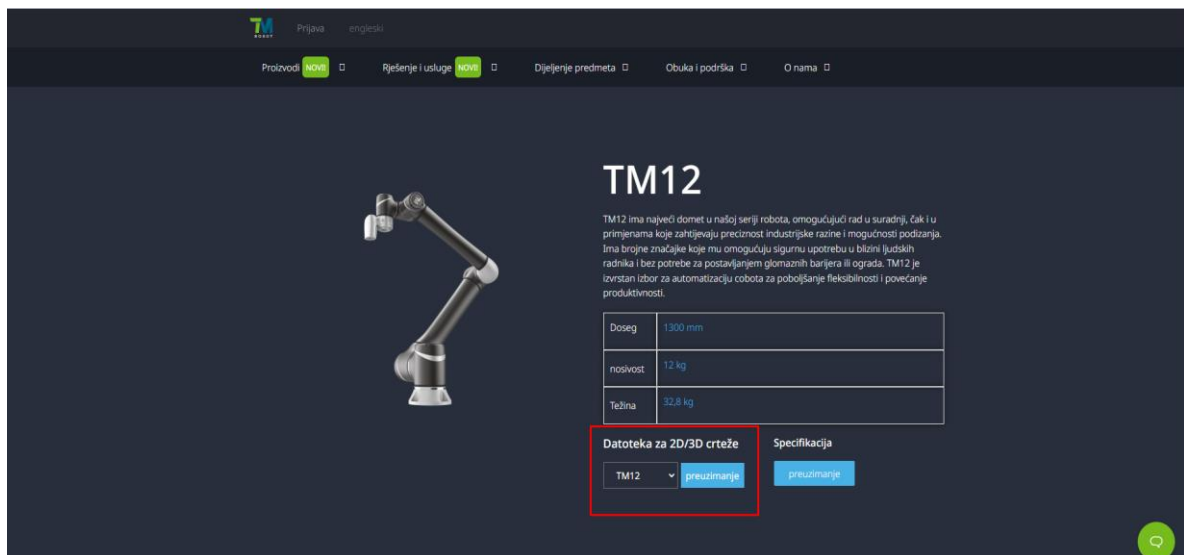
## 6.2. Izrada simulacije u Process Simulateu

Prije početka izrade projekta nužno je provesti simulaciju radi provjere pozicije i dosega robota. Simulacija, osim što omogućava inicijalnu evaluaciju funkcionalnosti robota unutar predviđenog radnog prostora, također služi kao početni prikaz samog projekta, pružajući temelj za daljnje planiranje i razvoj. Simulacija je izrađena u programu Process Simulate, a postupak izrade simulacije detaljno je objašnjen u sljedećem dijelu diplomskog rada.

### 6.2.1. Postavljanje i kinematiziranje robota u simulaciju

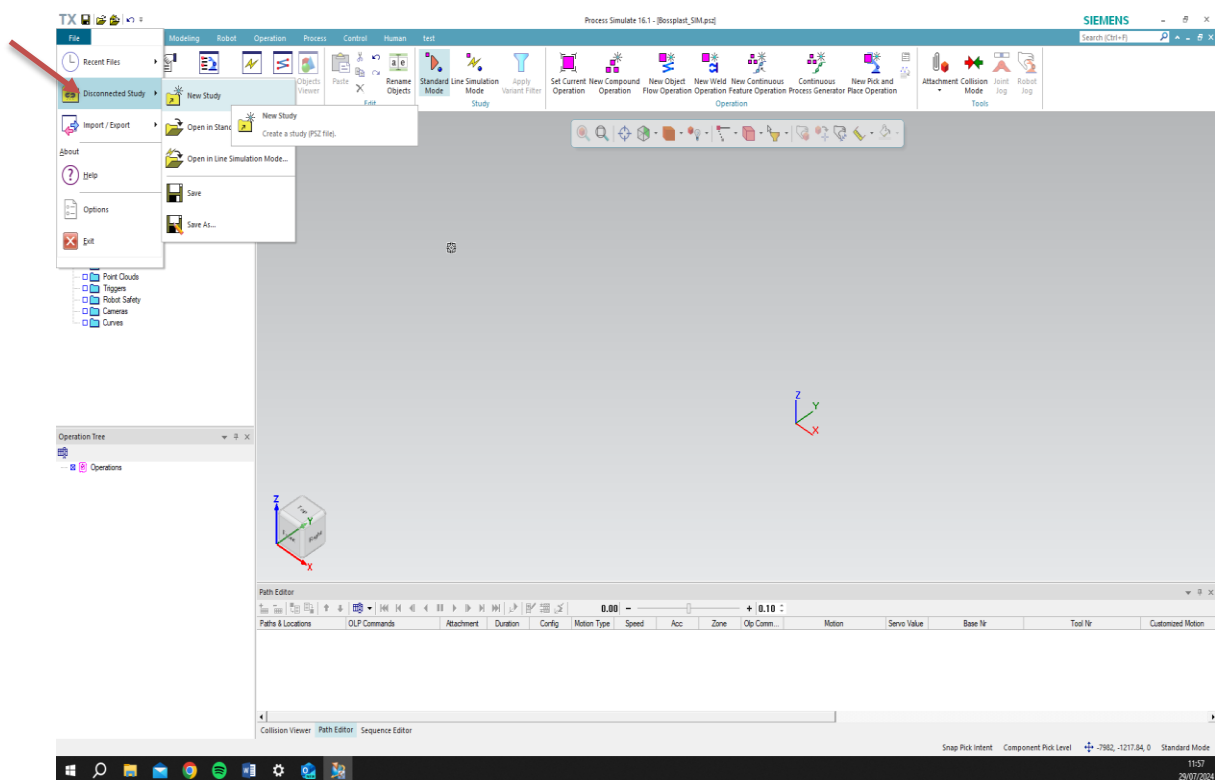
Kao i svaki drugi program za simulacije, Process Simulate podržava unos datoteka iz AutoCAD-a ili SolidWorks-a. Datoteka robota može se pronaći na *web*-stranici proizvođača, odakle se može preuzeti za daljnju upotrebu u simulacijskom procesu.





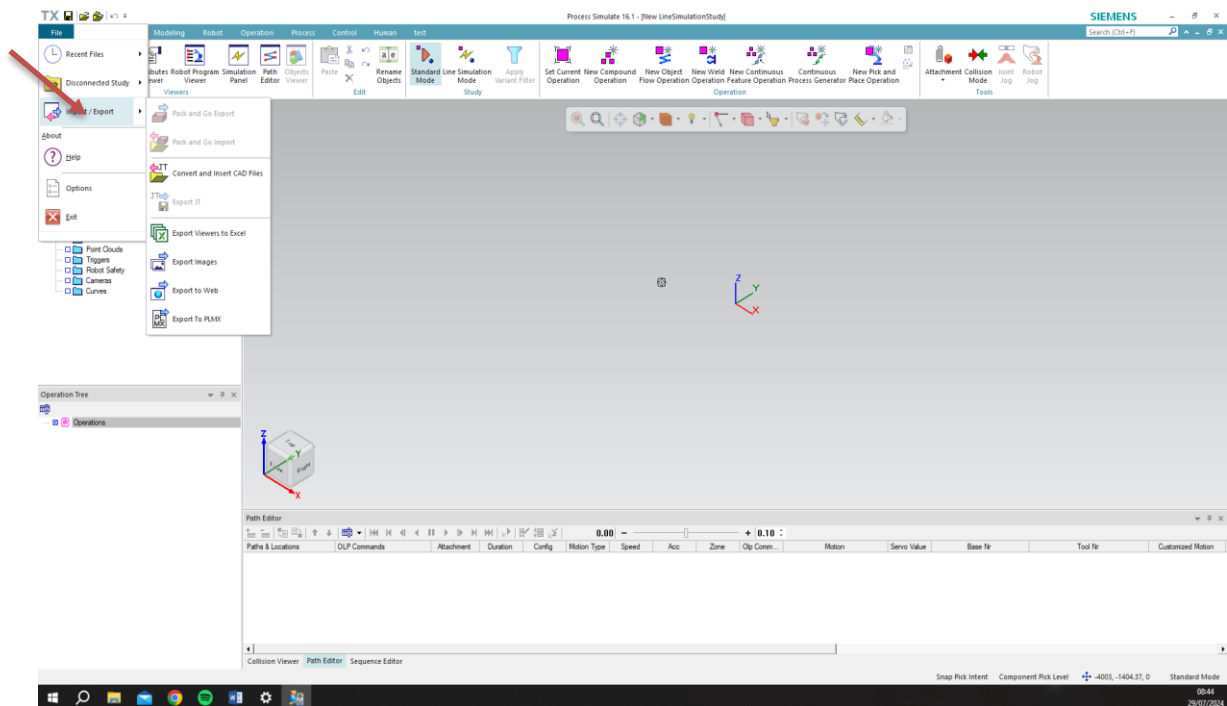
Slika 6.7 Prikaz stranice proizvođača robota [22]

Prilikom kreiranja nove simulacije u programu Process Simulate potrebno je izraditi novi projekt, što se postiže odabirom na „File“, zatim „Disconnected Study“, te konačno odabirom opcije „New Study“.



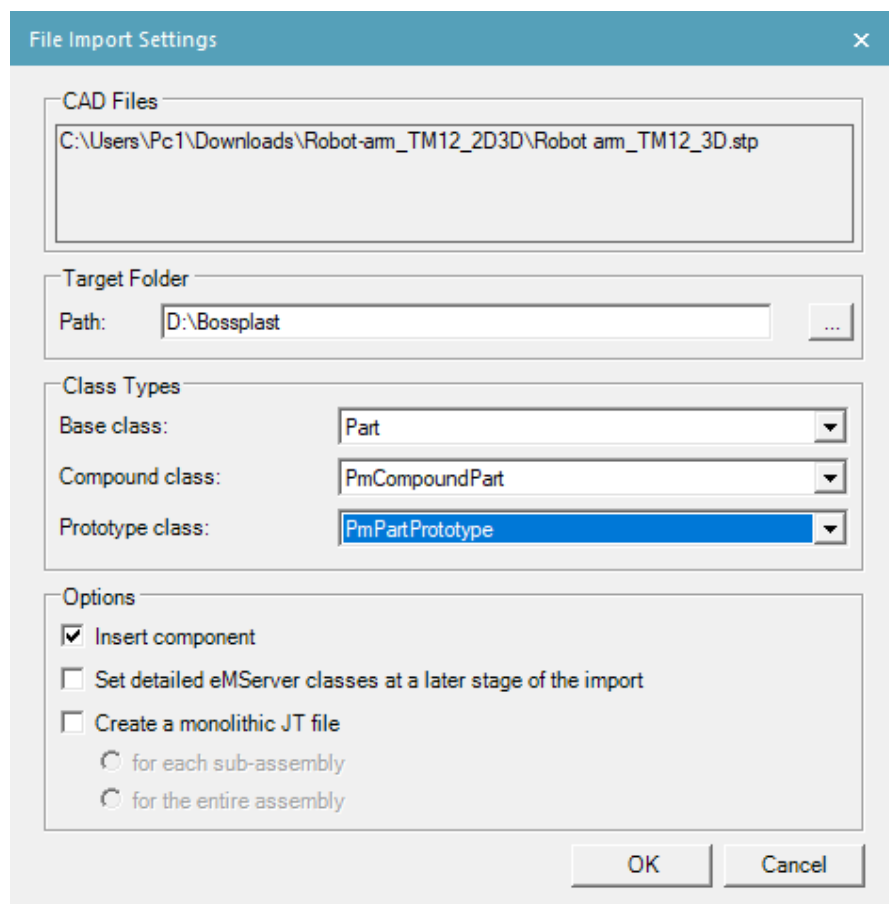
Slika 6.8 Prikaz izrade novog projekta [21]

Nadalje, potrebno je unijeti preuzetu datoteku robota, što se postiže odabirom opcija „File“, zatim „Import/Export“ i na kraju „Convert and Insert CAD Files“.

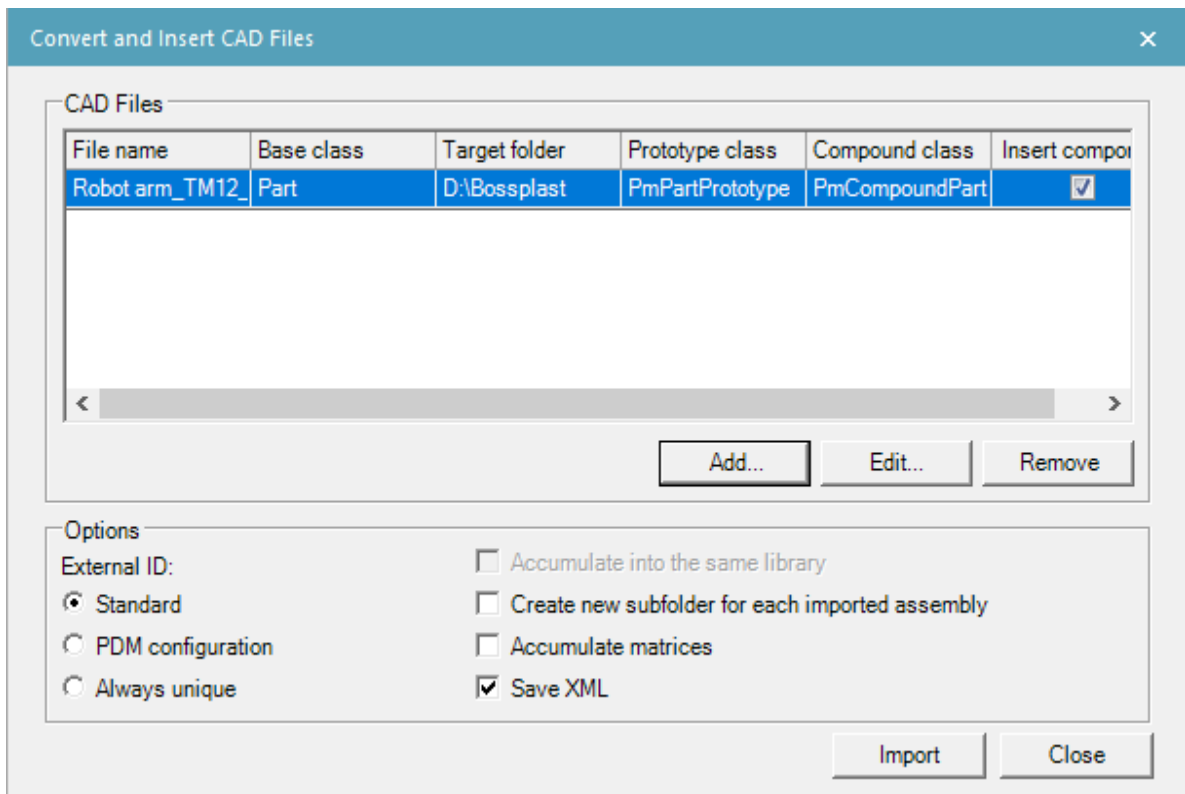


Slika 6.9 Prikaz unošenja datoteke [21]

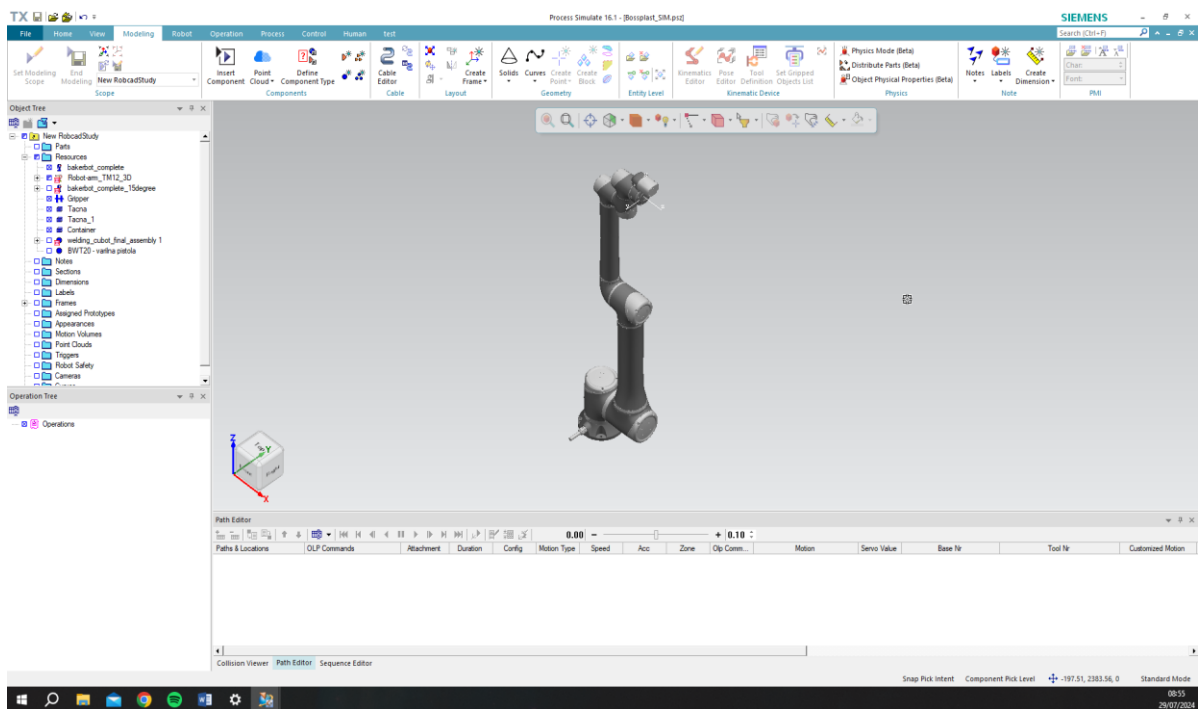
Na prikazanom prozoru (slika 6.10) odabire se mjesto gdje se nalazi datoteka robota, ciljano mjesto gdje se nalazi sam projekt, te se odabire vrsta objekta (u ovom slučaju „Part“). Na kraju se odabire opcija „Insert Component“. Kako bi se unio robot, pritišće se „Import“.



Slika 6.10 Prikaz prozora s opcijama za „Import“ [21]



Slika 6.11 Prikaz prozora za „Import“ [21]



Slika 6.12 Prikaz robota TM12 u simulaciji [21]

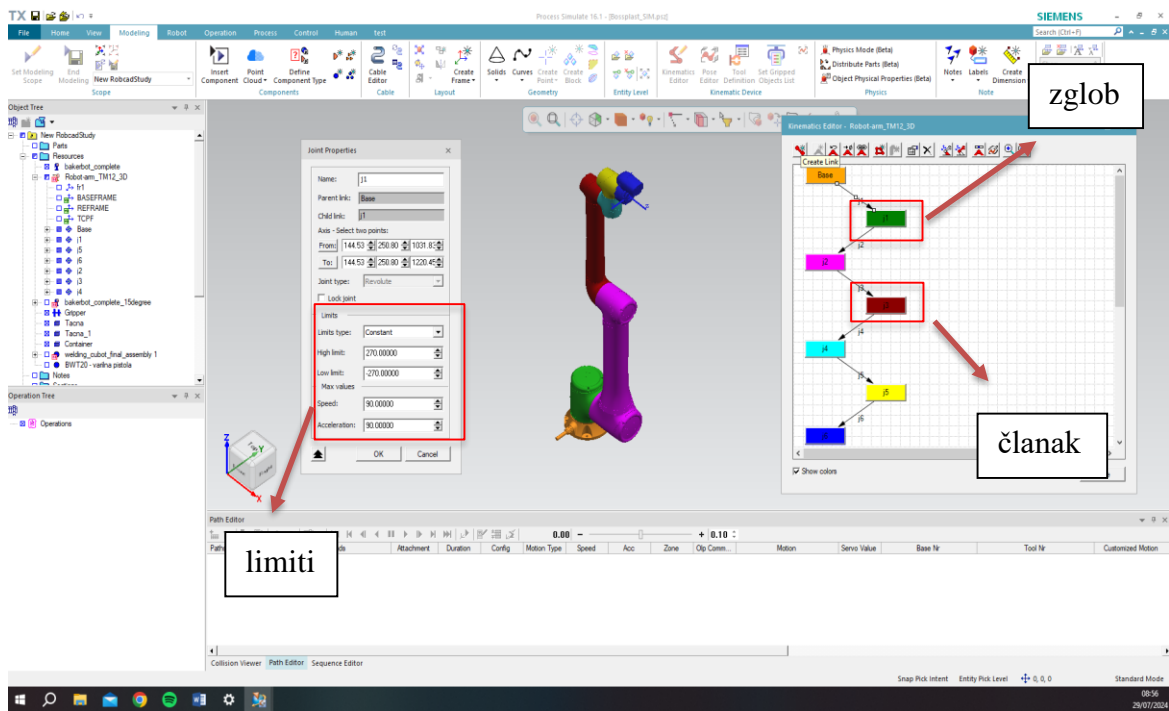
Kada se neki objekt unese ovim putem u Process Simulate, potrebno je i kinematizirati taj objekt, odnosno odrediti gdje se nalaze zglobovi robota i kakvog su tipa (zglobovi kod robota

moгу biti: prizmatični ili revolutni). Također, potrebno je definirati granice pomaka zglobova. U slučaju robota Techman TM12, svi potrebni podatci mogu se pronaći na stranicama proizvođača.

Specification						Specification												
Model	TMS-700	TMS-900	TMSM-700	TMSM-900	TMSX-700	TMSX-900	TM12	TM14	TM16	TM20	TM12M	TM14M	TM16M	TM20M	TM12X	TM14X	TM16X	TM20X
Weight	22.1kg	22.5kg	22.1kg	22.5kg	21.8kg	22.3kg	32.8kg	32.5kg	32kg	32.8kg	32.5kg	32kg	32.8kg	32.5kg	32.2kg	31.7kg	31.7kg	32.5kg
Maximum Payload	6kg	4kg	6kg	4kg	6kg	4kg	12kg	14kg	16kg	20kg	12kg	14kg	16kg	20kg	12kg	14kg	16kg	20kg
Reach	746mm	946mm	746mm	946mm	746mm	946mm	1300mm	1100mm	917mm	1300mm	1300mm	1100mm	917mm	1300mm	1300mm	1100mm	917mm	1300mm
Joint ranges	J1,J6	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 360°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 270°	+/- 360°	+/- 360°	+/- 360°	+/- 360°
	J2,J4,J5	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 360°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 180°	+/- 360°	+/- 360°	+/- 360°	+/- 360°
	J3				+/- 155°		+/- 166°	+/- 163°	+/- 155°	+/- 166°	+/- 163°	+/- 155°	+/- 166°	+/- 163°	+/- 155°	+/- 166°	+/- 163°	+/- 155°
Speed	J1,J2				180°/s		180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s
	J3				225°/s		180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s
	J4				225°/s		180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s
	J5				225°/s		180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s
	J6				225°/s		180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s	180°/s
Max. Speed				4 m/s		4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s	4 m/s
Repeatability				+/- 0.05 mm		+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1 mm
Degree Of Freedom				6 rotating joints		6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints	6 rotating joints
I/O	Control box			Digital In: 16 / Digital Out: 16		Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16	Digital In: 16 / Digital Out: 16
	Tool Conn.			Analog In: 2 / Analog Out: 1		Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1	Analog In: 2 / Analog Out: 1
I/O Power Supply				24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool		24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	24V 2.0A for control box; 24V 1.5A for tool	
IP Classification				IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)		IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)	IP54 (Robot Arm); IP32 (Control Box)
Typical Power Consumption				220 watts		300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts	300 watts
Temperature				0-50°C		0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C	0-50°C
Cleanliness				ISO Class 3		ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3	ISO Class 3
Power Supply	100-240 VAC, 50-60 Hz		22-60 VDC		100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz
I/O Interface				3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0		3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0	3 X COM • 1 X HDMI • 3 X LAN • 4 X USB2.0 • 2 X USB3.0
Communication				RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)		RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)	RS-232, Ethernet, Modbus TCP/RTU (master & slave)
Programming Environment				PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)		PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)	PROFINET (optional), EtherNet/IP (optional)
Certification				TMlow (flowchart/script based)		TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)	TMlow (flowchart/script based)
				CE, SEMI S2 (optional)		CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)	CE, SEMI S2 (optional)
AI & Robot Vision						AI & Robot Vision												
AI Function	Classification, Object Detection, Segmentation, Anomaly Detection, AI OCR					Classification, Object Detection, Segmentation, Anomaly Detection, AI OCR												
Application	Positioning, 1D/2D Barcode Reading, OCR, Defect Detection, Measurement, Assembly Check					Positioning, 1D/2D Barcode Reading, OCR, Defect Detection, Measurement, Assembly Check												
Positioning Accuracy	2D Positioning: 0.1 mm <sup>(1)</sup>					2D Positioning: 0.1 mm <sup>(1)</sup>												
Eye in Hand (Built in)	Auto-focused color camera with 5M resolution, Working distance 100 mm - ∞					Auto-focused color camera with 5M resolution, Working distance 100 mm - ∞												
Eye to Hand (Optional)	Support Maximum 2 X GigE 2D cameras or 1 X GigE 2D Camera + 1 X 3D Camera <sup>(2)</sup>					Support Maximum 2 X GigE 2D cameras or 1 X GigE 2D Camera + 1 X 3D Camera <sup>(2)</sup>												
<sup>(1)</sup> The data in this table are measured by TM laboratory and the working distance is 100mm. It should be noted that in practical applications, the relevant values may be different due to factors such as the on-site ambient light source, object characteristics, and vision programming methods that will affect the change in accuracy.						<sup>(1)</sup> The data in this table are measured by TM laboratory and the working distance is 100mm. It should be noted that in practical applications, the relevant values may be different due to factors such as the on-site ambient light source, object characteristics, and vision programming methods that will affect the change in accuracy.												
<sup>(2)</sup> Refer to the official website of TM Plug&Play for camera models compatible to TM Robot.						<sup>(2)</sup> Refer to the official website of TM Plug&Play for camera models compatible to TM Robot.												

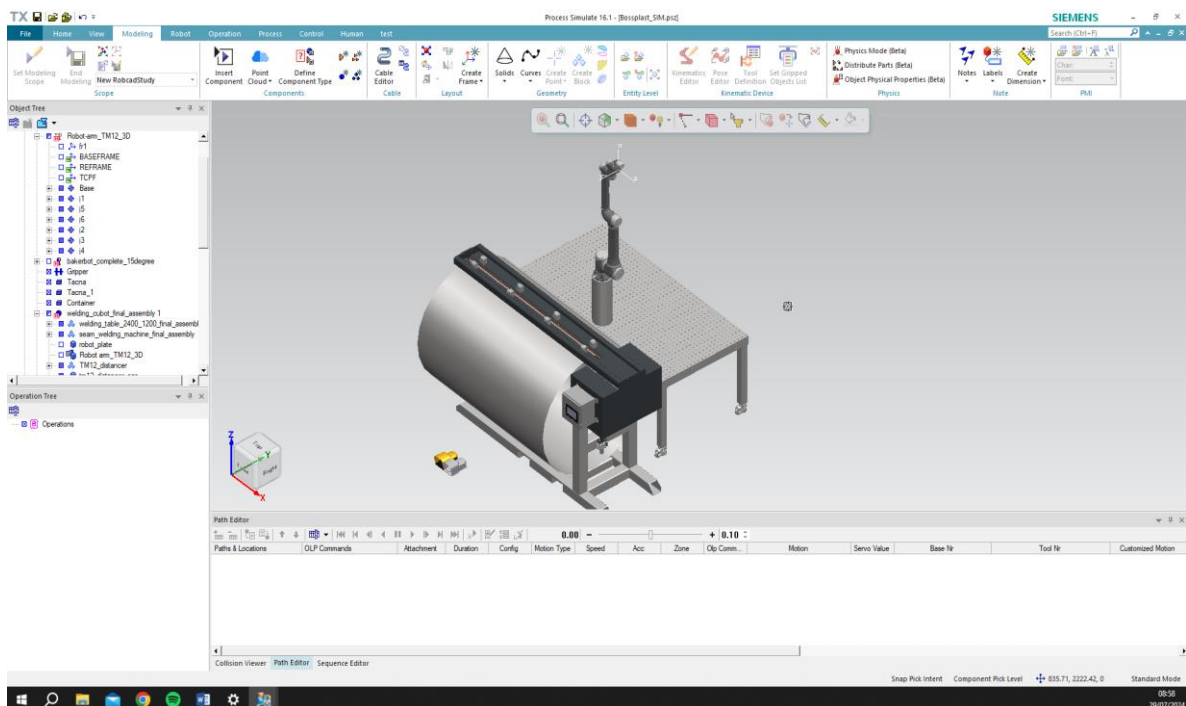
Slika 6.13 Specifikacije robota TM12 [21]

Prilikom kinematizacije odabire se opcija „Kinematics Editor“, pri čemu se otvara novi prozor u kojem se pomoću „Object Tree“ odabiru zglobovi i dijelovi koji su zajedno kinematizirani te ih međusobno povezujemo pomoću članka. Svaki zglob može se uređivati, odnosno opisivati zglobove (tip, limiti, brzine). U ovom slučaju podatci se upisuju iz tablice specifikacija proizvođača. Na primjer, zglob 1 (j1) revolutnog je tipa, s limitom od +270 do -270 stupnjeva.



Slika 6.14 Prikaz kinematizacije robota u programu Process Simulate [21]

Nakon što je robot unesen i kinematiziran, potrebno je unijeti ostatak objekata koji su potrebni za ovaj projekt. Svi se ostali objekti unose na isti način kao i robot. Na kraju je potrebno postaviti robota na odgovarajuću poziciju.



Slika 6.15 Prikaz robota u random okruženju [21]

Prije kreiranja same putanje robota, potrebno je unijeti i postaviti *end-effector* ili „krajnji djelovatelj“. *End-effector* je ugrađen na ručnom zglobu robota i omogućava mu izvođenje posebnih zadataka. Različite izvedbe *end-effectora* namijenjene su za isti robot, čime ga čine prilagodljivijim. *End-effectori* se dijele na dvije osnovne vrste: hvataljke i alate. Hvataljke se obično upotrebljavaju za dohvata i držanje objekta te njegov smještaj na određeno mjesto. Postoji nekoliko vrsta hvataljki:

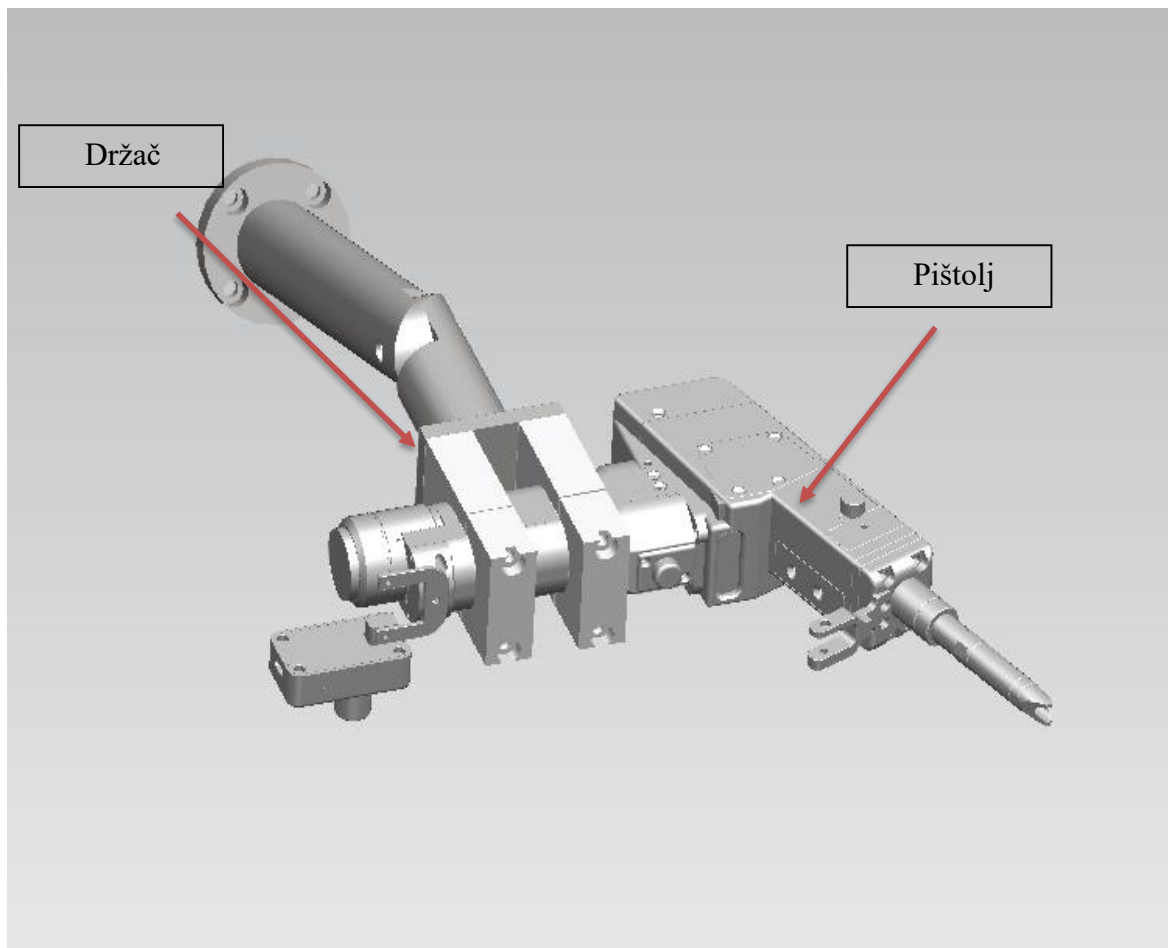
- Mehanička hvataljka: koristi se za čvrsto držanje objekata pomoću mehaničkih čeljusti ili prstiju. [23]
- Vakuumska ili sisna šalica: koristi se za podizanje i premještanje objekata pomoću vakuuma koji se stvara unutar šalice. [23]
- Magnetska hvataljka: koristi se za podizanje metalnih objekata pomoću magnetske sile.
- Prianjajuća (adhezivna) hvataljka: koristi se za držanje objekata pomoću adhezivnih materijala. [23]
- Kuke, lopatice i slično: koriste se za specifične zadatke gdje su potrebni posebni oblici za hvatanje i premještanje objekata. [23]

S vremenom su razvijeni roboti koji mogu koristiti alate za rad na različitim radnim komadima. U takvim primjenama *end-effector* je alat sam po sebi. Primjeri takvih alata uključuju:

- Alat za bradavičasto zavarivanje: koristi se za precizno varenje pomoću bradavičastih elektroda. [23]
- Alat za elektrolučno zavarivanje: koristi se za zavarivanje pomoću električnog luka. [23]
- Mlaznica za premazivanje špricanjem: koristi se za nanos premaznih materijala prskanjem. [23]
- Obrtajno vreteno za bušenje: koristi se za bušenje rupa u materijalima. [23]
- Obrtajno vreteno za brušenje: koristi se za brušenje i poliranje površina. [23]

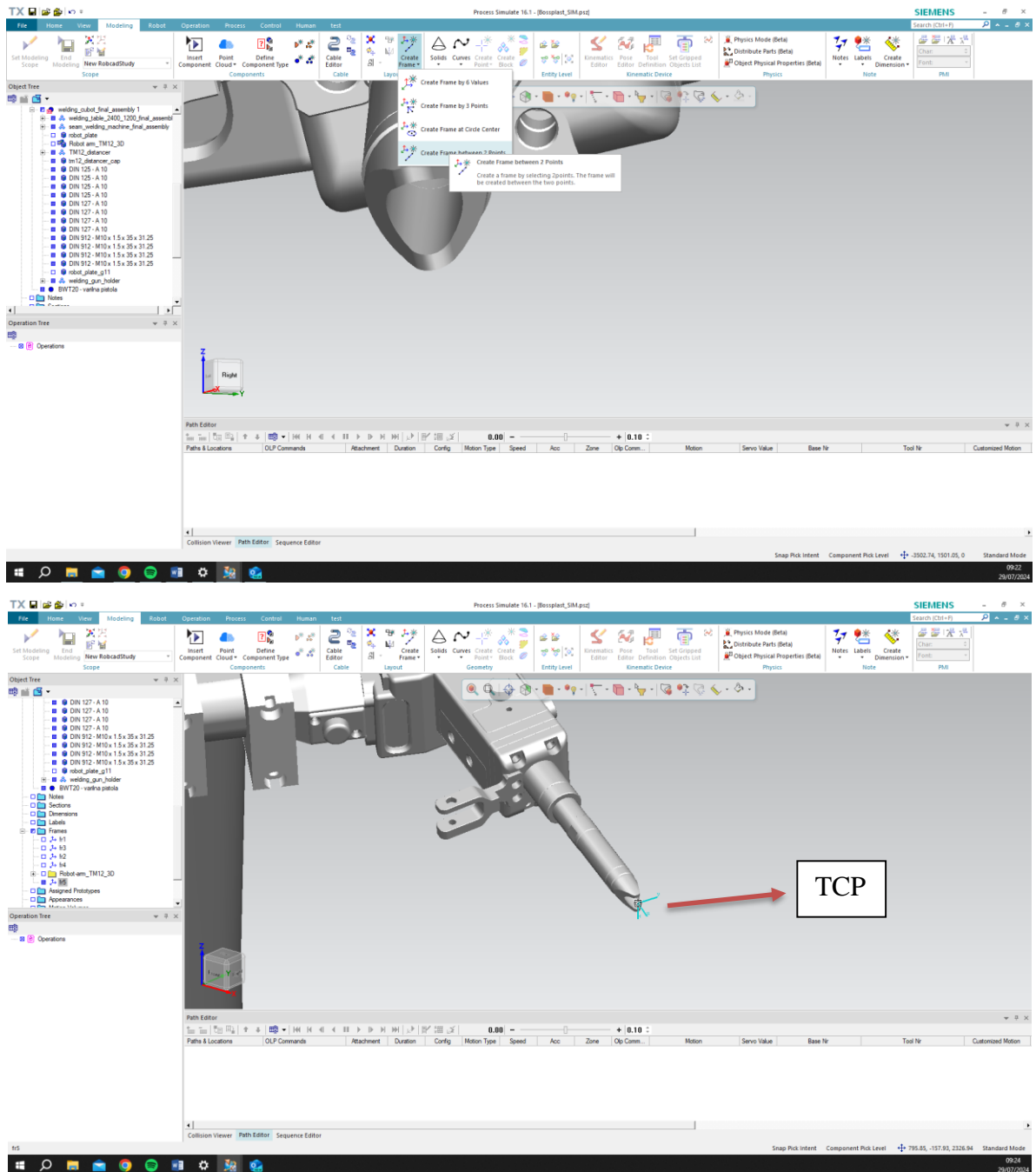
Ovi alati omogućavaju robotima izvođenje složenih zadataka i povećavaju njihovu svestranost u različitim industrijskim primjenama. [23]

U ovom slučaju *end-effector* se sastoji od držača koji se pomoću vijaka spaja na robota te od pištolja za lasersko zavarivanje. Držač osigurava stabilno pričvršćivanje pištolja na ručni zglob robota, omogućavajući precizno izvođenje zadataka laserskog zavarivanja. Ova konfiguracija omogućava robotu da pouzdano i precizno upravlja pištoljem, osiguravajući kvalitetne i ponovljive zavarivačke spojeve na radnim komadima.



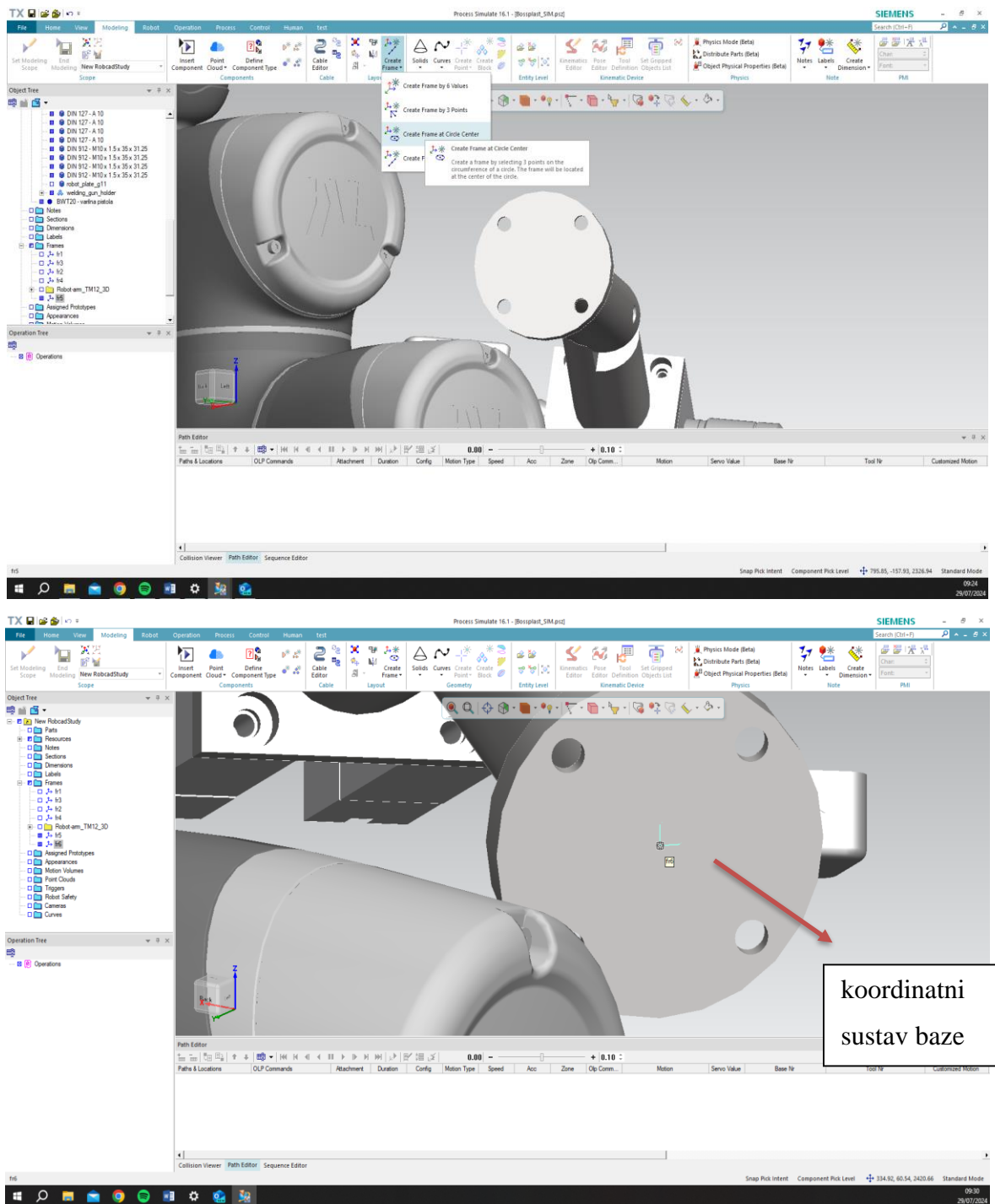
Slika 6.16 Prikaz end-effectora (*držać i pištolj za lasersko zavarivanje*) [21]

Kako bi sam program mogao prepoznati da je to *end-effector*, koristi se opcija „Mount tool“. Prije nego što se postavi *end-effector* na robota, potrebno je na njemu postaviti dva koordinatna sustava. Prvo, TCP (engl. *tool center point*) koordinatni je sustav koji se obično nalazi na vrhu *end-effectora* i služi kako bi se lakše moglo upravljati i pozicionirati robota tijekom nekog procesa. Drugo, baza, odnosno koordinatni sustav koji se nalazi u bazi samog *end-effectora*, omogućava lakše i preciznije postavljanje na sam robot. TCP se izrađuje opcijom „Create frame between two points“, dok se baza postavlja opcijom „Create frame at circle center“. Ovi postupci omogućavaju precizno definiranje ključnih točaka koordinatnih sustava na *end-effectoru*, olakšavajući upravljanje i postavljanje *end-effectora* na robot tijekom simulacije i stvarnog rada.

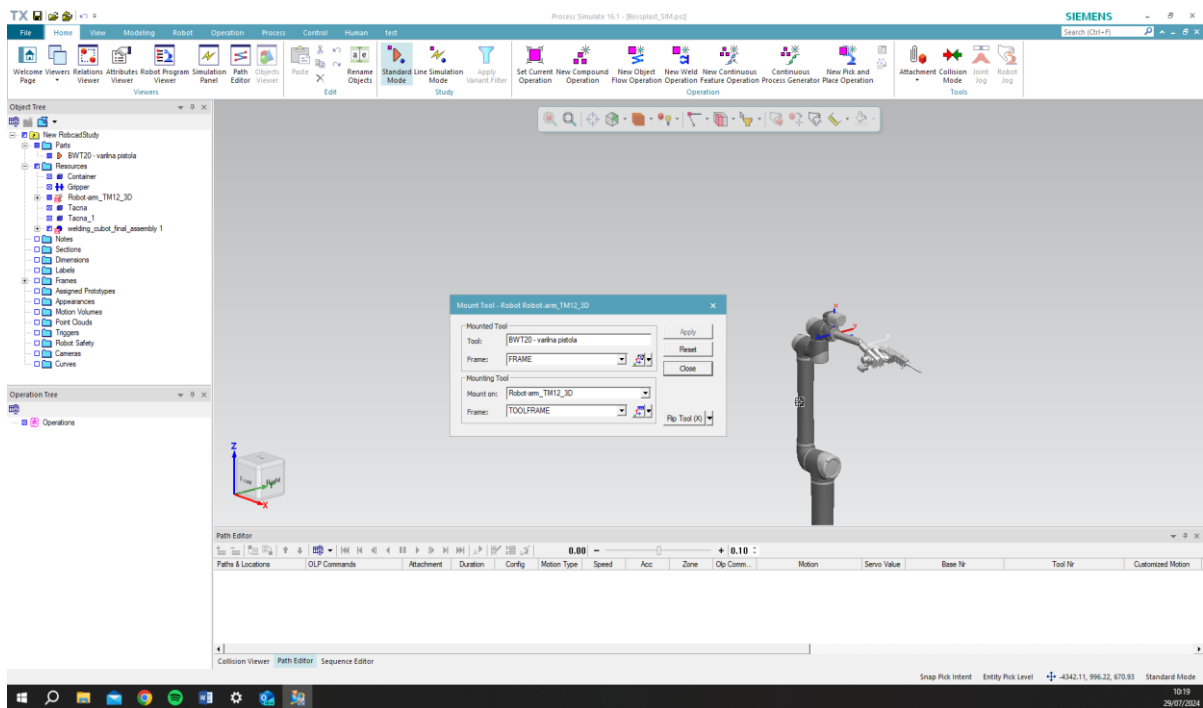


Slika 6.17 izrada TCP-a [21]





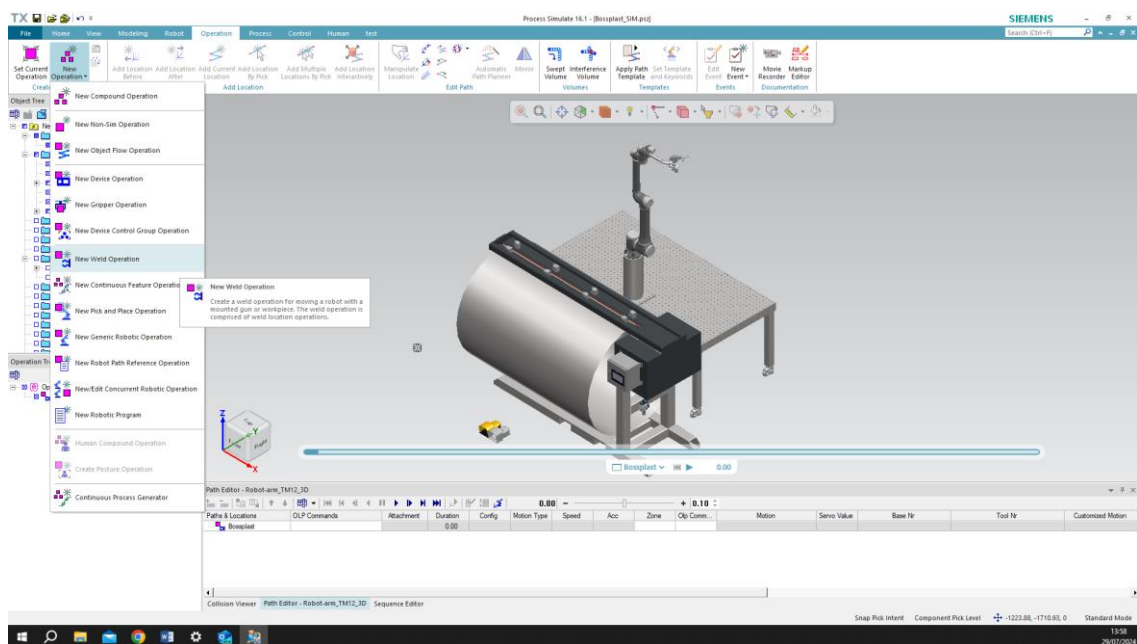
Slika 6.18 izrada baze [21]



Slika 6.19 postavljanje end-effektora na robot pomoću opcije „Mount Tool“ [21]

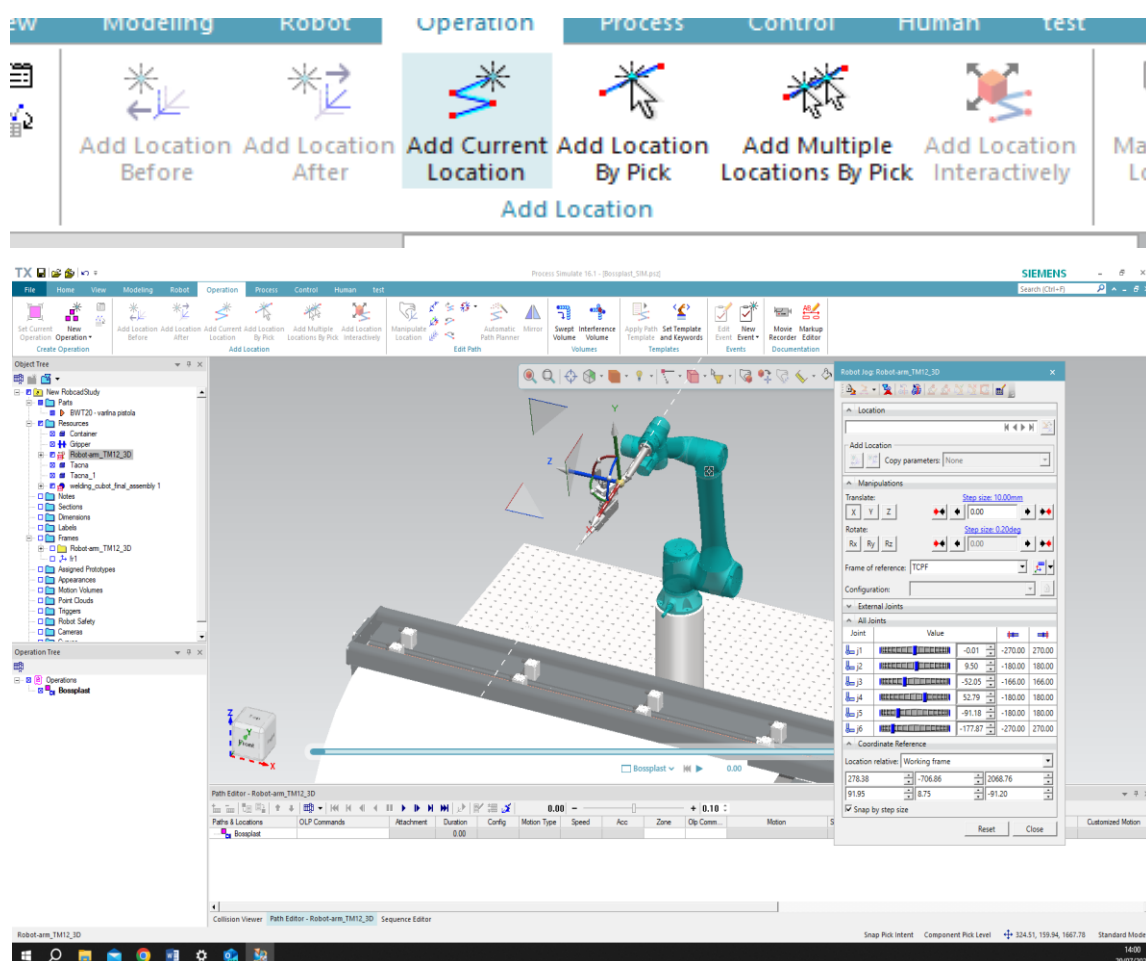
## 6.2.2. Izrada putanja u simulaciji

Za izradu putanja u programu Process Simulate koristi se opcija „New Operation“, a u padajućem izborniku odabire se „New Weld Operation“. Sve operacije mogu se pronaći na stablu operacija. Ovaj postupak omogućava korisnicima definiranje i upravljanje zavarivačkim operacijama unutar simulacijskog okruženja.



Slika 6.20 Izrada putanje u programu Process Simulate [21]

Desnim klikom miša na robota odabire se opcija „Robot jog“ ili se pomoću opcija na kartici operacije odabire jedna od šest različitih opcija za izradu točaka u putanji. Ove opcije omogućavaju precizno definiranje i prilagodbu putanja robota kako bi se osigurala optimalna izvedba zadanih operacija.

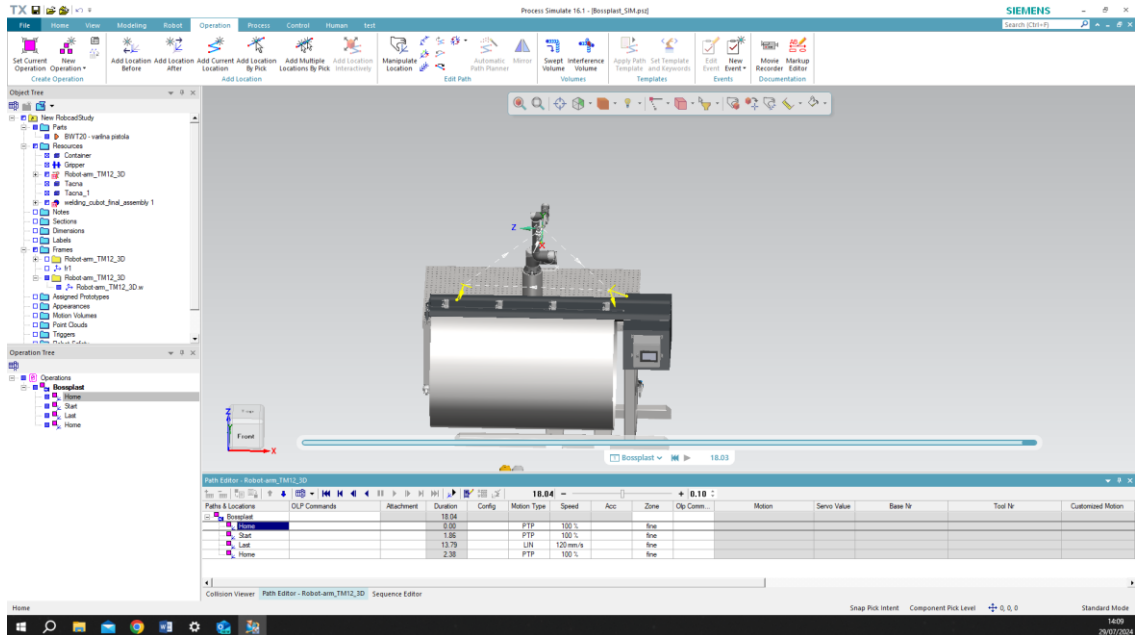


Slika 6.21 Opcije za izradu točaka [21]

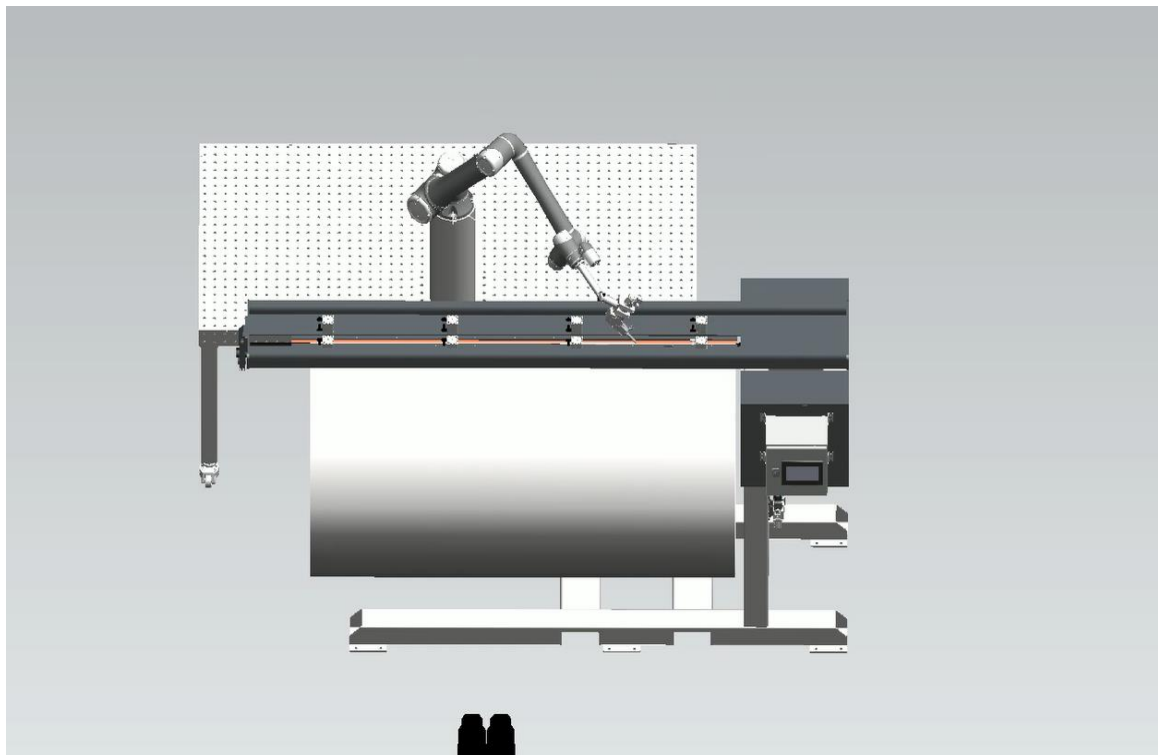
- Add location Before – dodaje točku prije odabrane točke
- Add location After – dodaje točku poslije odabrane točke
- Add Current Location – dodaje trenutnu točku u kojoj se robot nalazi
- Add Multiple Locations By Pick – dodaje više točaka pritiskom na miš.

Pomoću „Robot jog“ opcije te „Add current Location“ napravljene su točke putanje *Home* (točka iz koje robot počinje i u koju se vraća nakon izvršetka procesa), *Start* (početna točka u kojoj robot počinje zavarivanje) te *Stop* (krajnja točka u kojoj robot završava zavarivanje). Točke *Home* i *Start* su tipa PTP (engl. *point to point*) te brzine 100 %, dok je *Stop* točka tipa LIN (engl. *linear*) jer sama putanja zavarivanja mora biti linerna, odnosno po pravcu, te brzine od 120 mm/s. Sama brzina u ovoj simulaciji nije toliko važna, budući da simulacija nije izrađena za mjerenja vremena

ciklusa, već za provjeru konstrukcije i doseg robot. Fokus je na osiguravanju da robot može pravilno dosegnuti sve potrebne točke i izvršiti zadatke unutar zadanog radnog prostora.



Slika 6.22 Uređivanje točaka u putanji [21]



Slika 6.23 izrada videa za prikaz [21]

### 6.3. Izrada programa za robota

Tvrtka Techman razvila je vlastiti softver za programiranje robota, pod nazivom TM-Flow. Za potrebe ovog projekta cjelokupni program izrađen je u navedenom softveru TM-Flow, čime je osigurana optimalna integracija i upravljanje robotom u skladu sa specifičnim zahtjevima zadanog sustava.

#### 6.3.1. Dodatni senzori

Uz sam robot, u sustavu su korišteni i dodatni senzori, uključujući fotoelektrični senzor proizvođača Baumer i sigurnosni skener proizvođača Keyence. Fotoelektrični senzor, postavljen na držač pištolja, omogućava prepoznavanje kraja cijevi jer se na stanici mogu zavarivati cijevi raznih duljina (do 2 metra), čime omogućava robotu da precizno zaustavi rad na kraju cijevi. Sigurnosni skener, smješten ispod stola, služi za povećanje sigurnosti rada, tako što usporava rad robota kada je osoba u blizini ili potpuno zaustavlja rad ako netko dođe preblizu radne stanice.

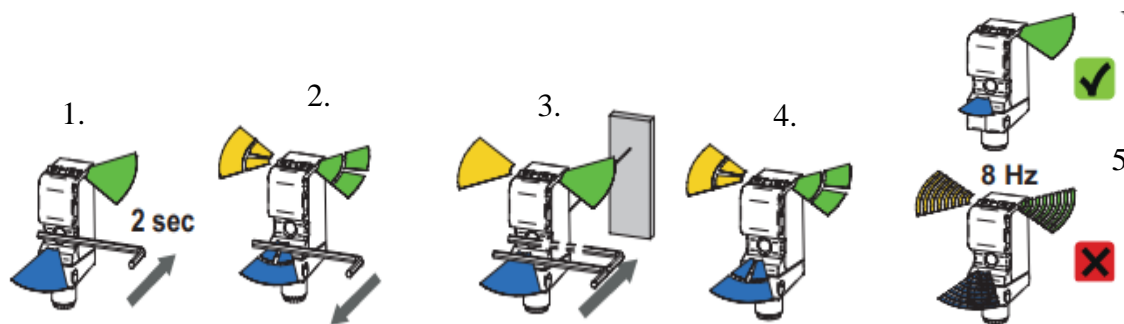


Slika 6.24 Fotoelektrični senzor Baumer [24]



Slika 6.25 Sigurnosni skener Keyence [25]

Postavljanje fotoelektričnog senzora jednostavno je i odvija se prema metodi opisanoj u uputama proizvođača, pri čemu se podešava željena udaljenost na kojoj se senzor aktivira. Postupak postavljanja fotoelektričnog senzora odvija se na sljedeći način:



Slika 6.26 postupak postavljanje fotoelektričnog senzora [26]

1. Prisloni se metalni predmet na senzor s prednje strane; kada se on detektira, zasvijetlit će plavo svjetlo.
2. Odmakne se metalni predmet, tada će svjetlo na senzoru početi treperiti, što znači da je senzor spreman za kalibraciju.
3. Postavi se ravni predmet ispred senzora na željenu udaljenost te se metalni predmet ponovno prisloni.
4. Svjetlo na senzoru ponovno će početi treperiti.

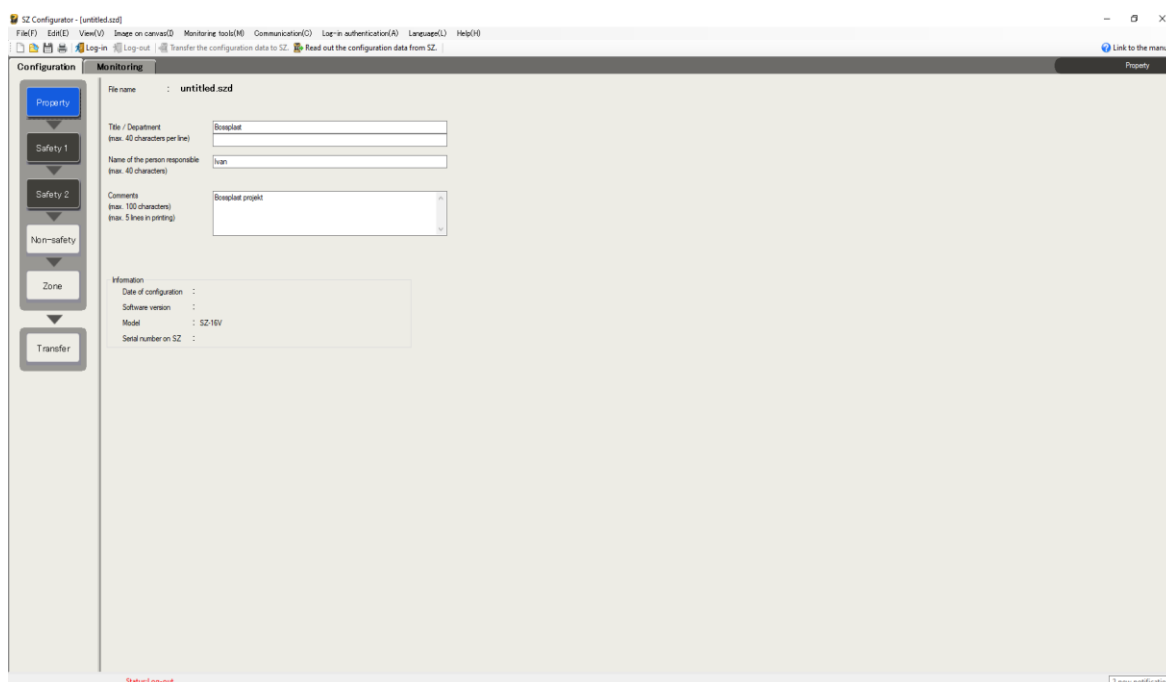
5. Nakon 4 sekunde, ako je kalibracija uspješna, svjetla će prestati treperiti; u slučaju da kalibracija nije uspješna, svjetla će treperiti većom frekvencijom. [26]

S druge strane, za sigurnosni skener bilo je potrebno konfigurirati njegove izlazne signale i definirati sigurnosne zone. Konfiguracija sigurnosnog skenera provodi se pomoću softvera proizvođača Keyence pod nazivom KEYENCE Safety Device Configurator.

### 6.3.2. KEYENCE Safety Device Configurator

KEYENCE Safety Device Configurator je softverski alat koji omogućava konfiguraciju i upravljanje sigurnosnim uređajima proizvođača Keyence, kao što su sigurnosni skeneri, svjetlosne zavjese i drugi sigurnosni senzori. Pomoću ovog softvera korisnici mogu definirati sigurnosne zone, postaviti parametre za otkrivanje prisutnosti objekata ili osoba te konfigurirati izlazne signale uređaja. Softver nudi intuitivno sučelje za prilagodbu sigurnosnih postavki, omogućavajući preciznu kontrolu i prilagodbu sigurnosnih funkcija prema specifičnim zahtjevima radnog okruženja. Korištenjem KEYENCE Safety Device Configuratora osigurava se učinkovito upravljanje sigurnosnim sustavima, što je ključno za zaštitu operatera i optimalan rad automatiziranih sustava. [27]

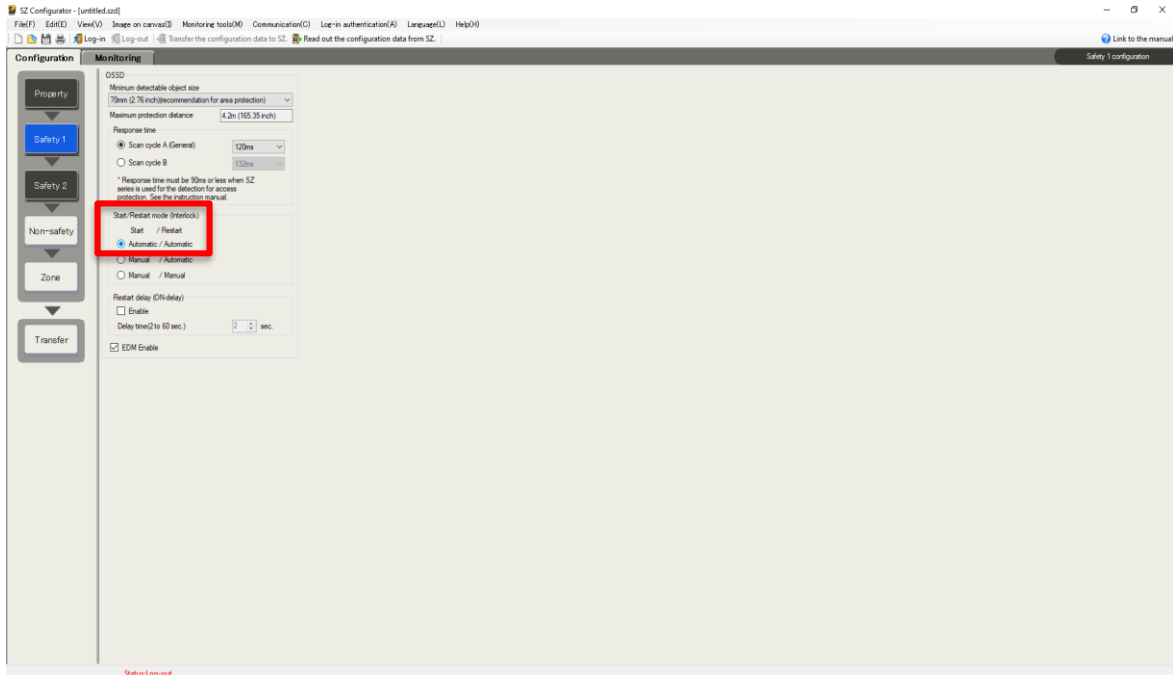
Prilikom pokretanja softvera potrebno je odabrati odgovarajući model senzora, u ovom slučaju Keyence SZ-16V. Na početnoj stranici softvera unose se osnovni podatci kao što su ime projekta, odgovorna osoba te eventualni dodatni komentari.



Slika 6.27 Unos osnovnih podataka u Keyence konfiguraciju [21]

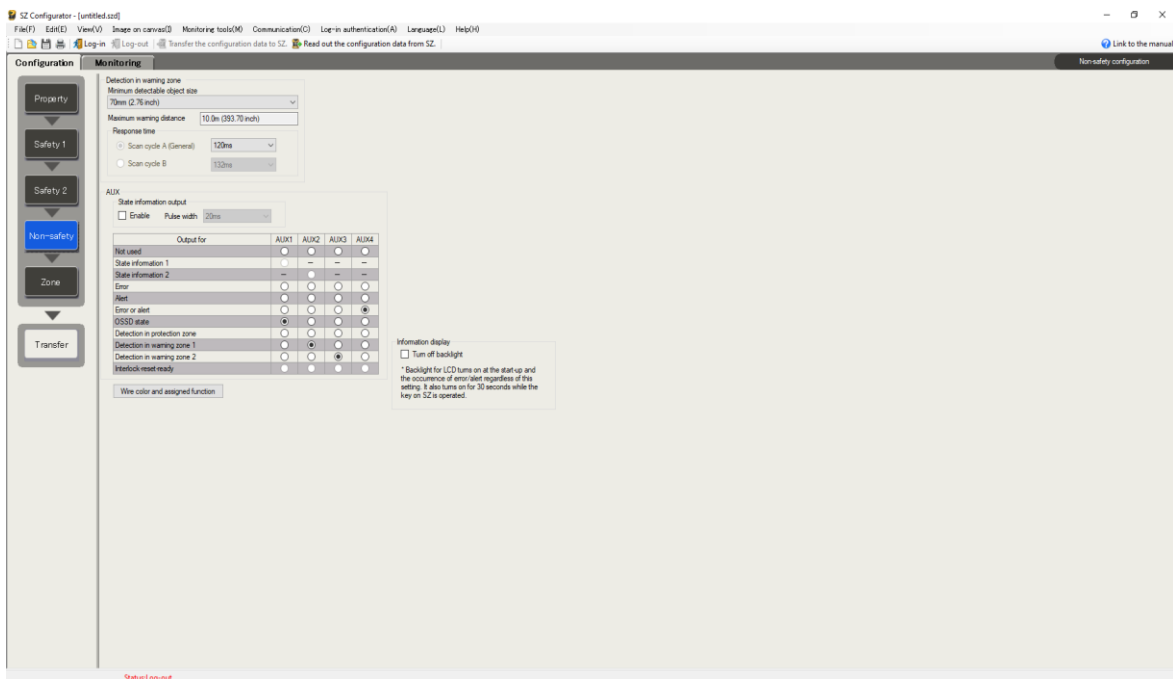


Nakon toga, potrebno je postaviti način rada „Start/Restart mode“ na „Automatic / Automatic“ kako bi se senzor automatski resetirao čim osoba napusti sigurnosnu zonu.



Slika 6.28 Postavljanje „Start/Restart mode“ na „Automatic/ Automatic“ [21]

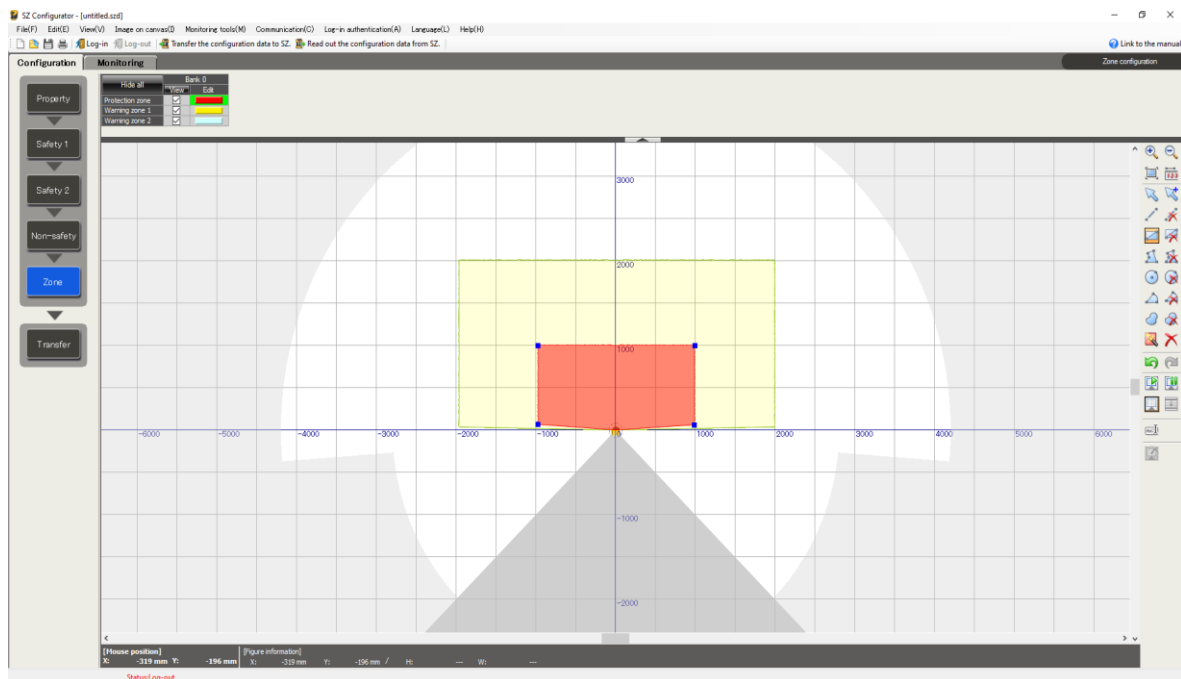
Sljedeći korak je konfiguracija izlaznih signala za pojedine sigurnosne zone.



Slika 6.29 konfiguracija izlaznih signala [21]



Zatim je potrebno definirati odgovarajuće sigurnosne zone. U ovom slučaju, postavljene su dvije zone: prva zona (crveno označena na slici 6.30) jest zona u kojoj se robot automatski zaustavlja, dok u drugoj zoni (žuto označenoj na slici 6.30) robot usporava svoj rad, osim u slučajevima kada je robot u fazi zavarivanja jer tada nije dopušteno mijenjati brzinu zavarivanja. Na kraju, konfiguracija se prenosi u sam skener putem USB kabela.



Slika 6.30 Postavljanje sigurnosnih zona [21]

### 6.3.3. Tablica izlaznih i ulaznih signala te korištenih varijabli

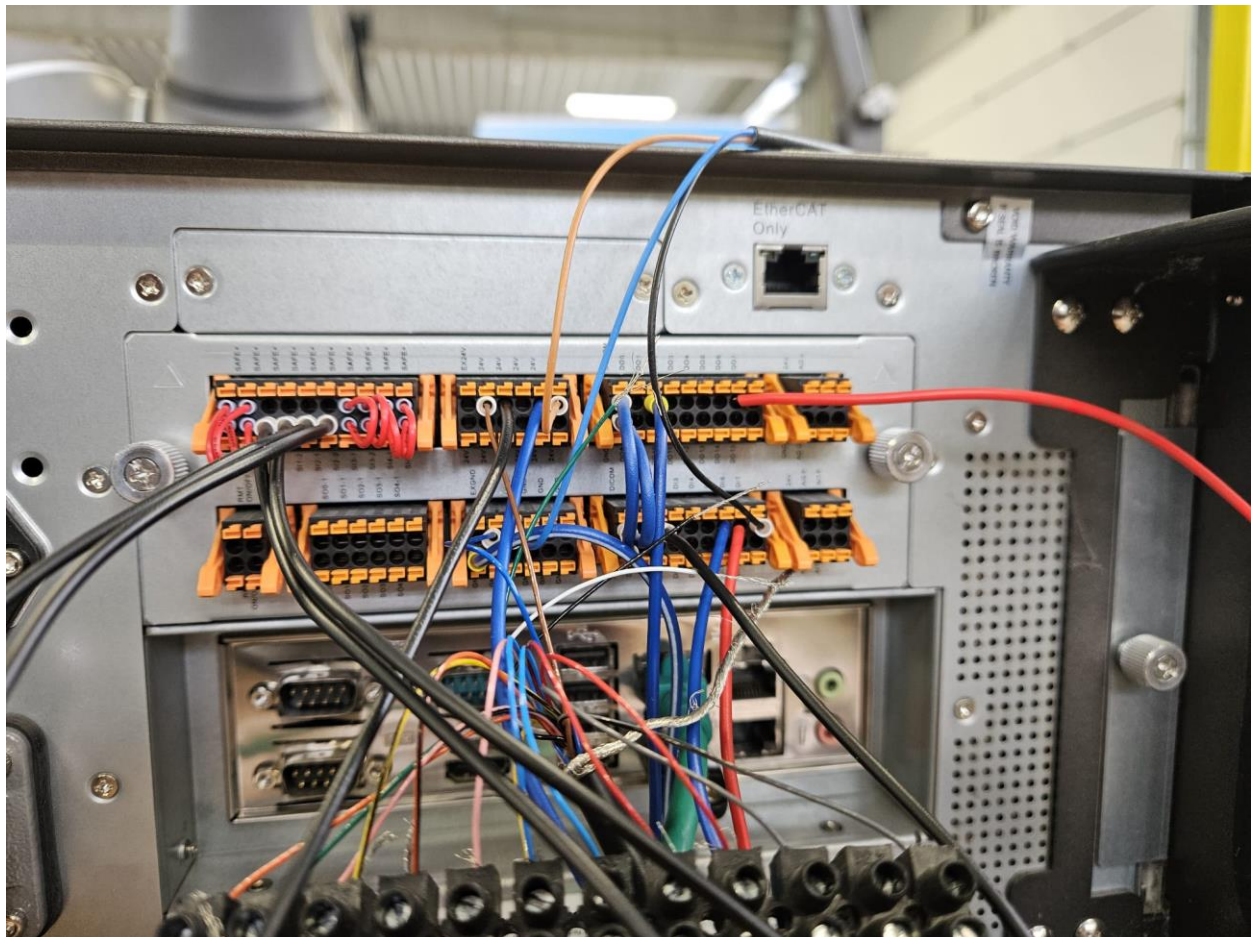
Radi lakšeg snalaženja tijekom izrade programa, izrađena je tablica u kojoj su detaljno opisani izlazni i ulazni signali te varijable. Ova tablica služi kao referentni alat koji omogućava brzu identifikaciju i razumijevanje različitih signala i varijabli unutar programskog koda, čime se olakšava razvoj, testiranje i održavanje sustava.

<b>Ulazni signali</b>	<b>Aktuator</b>	<b>Opis</b>
Ulaz 0	Tipkalo	Omogućava pokretanje programa pritiskom na tipkalo
Ulaz 2	Fotoelektrični senzor	Kada je signal aktivan (H), senzor prepoznaje cijev, a kada nije aktivan (L), ili je kraj cijevi ili je robot u putanji između zavarivanja.
Sigurnosni ulaz 3	Sigurnosni skener	Aktivira se kada netko dođe u prvu zonu, rad robota se zaustavlja.
Sigurnosni ulaz 4	Sigurnosni skener	Aktivira se kada netko dođe u drugu zonu, rad robota se uspori.
Ulaz 4	Robot	Robot aktivira kako bi zaustavio zavarivanje.
<b>Izlazni signali</b>	<b>Aktuator</b>	<b>Opis</b>
Izlaz 0	Robot	Pomoću ovog signala robot aktivira ulaz 4 koji zaustavlja rad robota.
Izlaz 1	Robot	Uključivanje/Isključivanje pištolja za zavarivanje

*Tablica 6.1 Popis ulaznih i izlaznih signala [21]*

Variable	Tip	Opis
Thread_Start	Bool	Kada se stavi na true, aktivira se <i>thread</i> za senzore.
Start_Gun	Bool	Kada se stavi na true, aktivira se <i>thread</i> za upravljanje pištoljem.
Time	Double	Potrebno vrijeme zaustavljanja u sekundama
Speed	Double	Brzina zavarivanja u <i>mm/s</i>
Distance	Double	Udaljenost senzora od vrha pištolja u <i>mm</i>

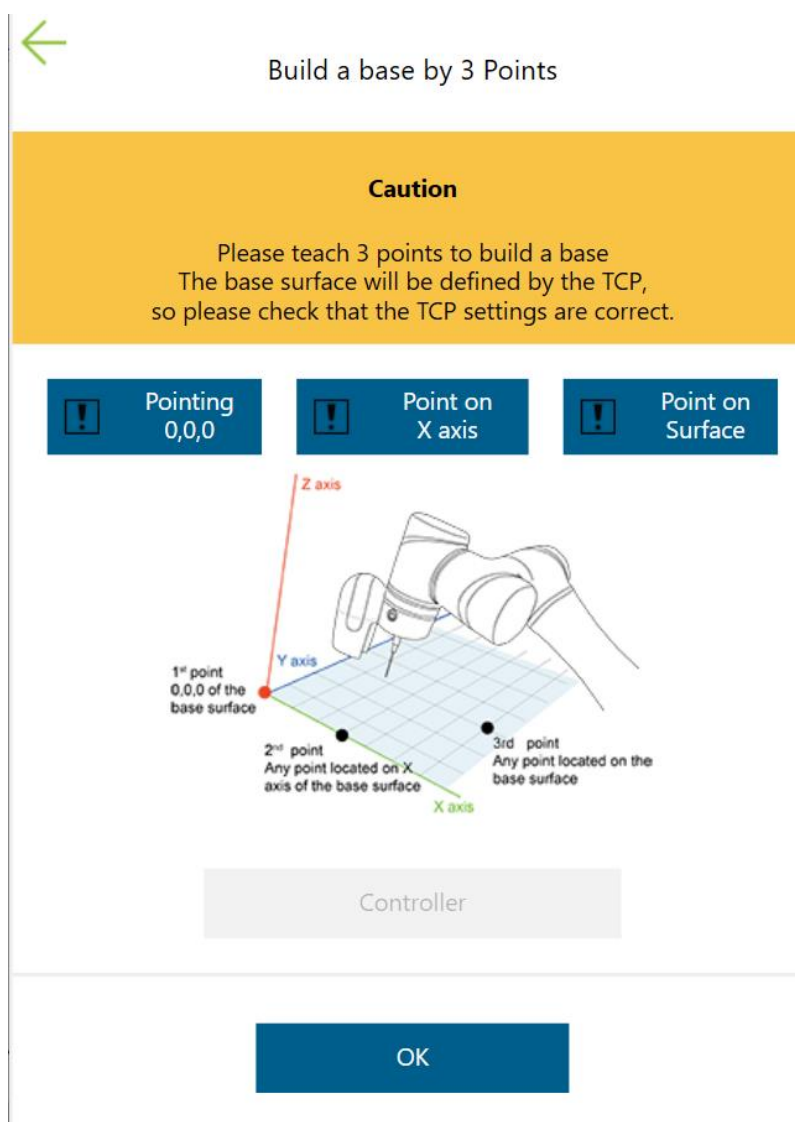
Tablica 6.2 Popis korištenih varijabla [21]



Slika 6.31 Prikaz spajanja svih izlaznih i ulaznih signala u upravljačku jedinicu robota [21]

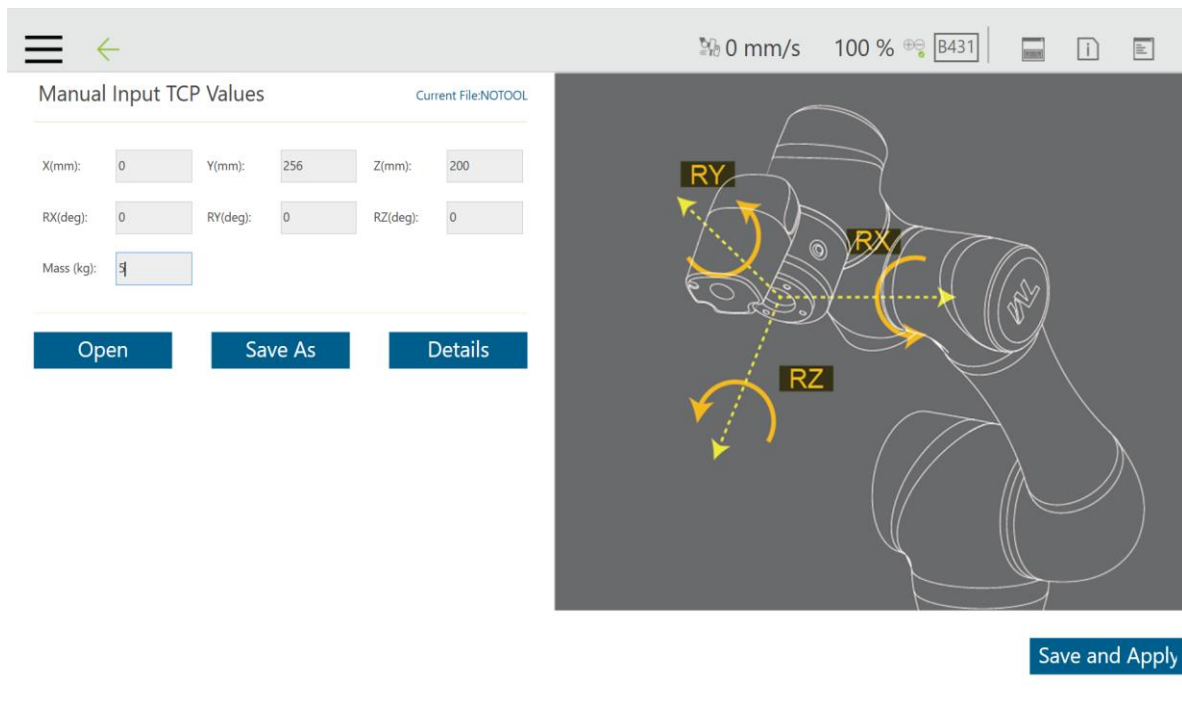
### 6.3.4. Program

Tijekom izrade novog projekta u softveru TM-Flow potrebno je postaviti nekoliko ključnih parametara. Prvi je korak umjeravanje baze radne stanice. Tvrtnka Techman nudi više metoda umjeravanja baze, ali u ovom slučaju odabrana je direktna metoda s tri točke. Prva točka postavlja se na površinu radne stanice koju želimo umjeriti. Druga točka također se postavlja na istoj površini, a smjer prema toj točki određuje smjer osi X. Treću točku potrebno je pozicionirati dalje od prve dvije, ali ona također mora biti na istoj površini. Ova metoda omogućava precizno definiranje koordinatnog sustava radne stanice, što je ključno za točno pozicioniranje i upravljanje robotom unutar radnog prostora.



Slika 6.32 Umjeravanje baze pomoću 3 točke [21]

Drugi korak uključuje postavljanje TCP-a odnosno koordinatnog sustava alata na robotu. Tvrtnica Techman također nudi nekoliko metoda za određivanje TCP-a, a u ovom slučaju korištena je metoda kojom se izmjere dimenzije samog alata, nakon čega se odgovarajuće udaljenosti po osima unose u sustav robota. Ova metoda omogućava precizno definiranje položaja alata u odnosu na krajnji zglob robota, što je ključno za točno izvođenje zadataka poput zavarivanja, montaže ili rukovanja objektima. Također, ovdje se određuje i sama masa alata koja je stavljena na 5 kilograma.



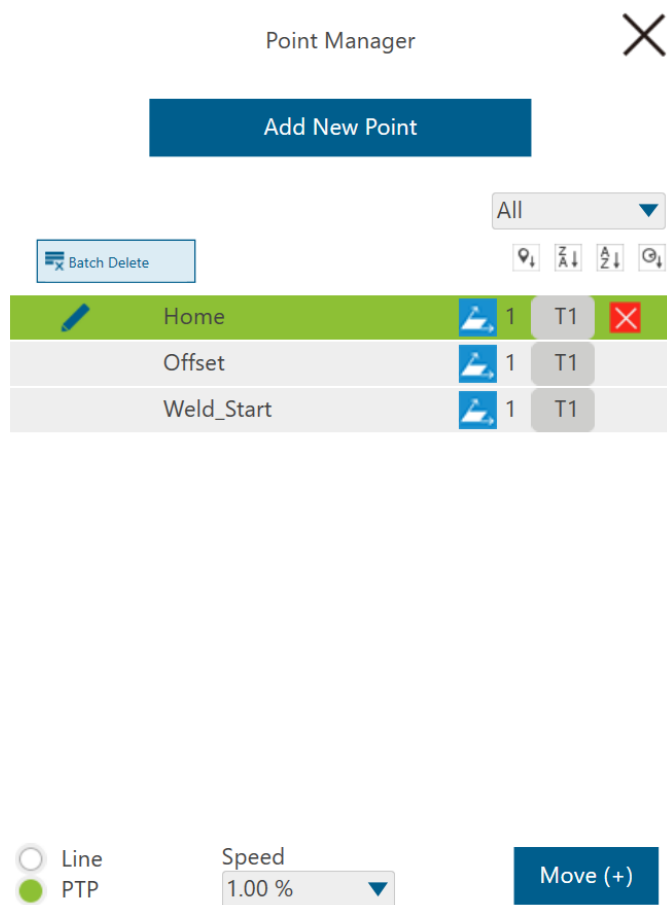
Slika 6.33 Određivanje TCP-a te mase alata [21]

Također, TCP je definiran i direktnom metodom pomoću 3 točke, gdje se vrh alata pozicionira na šiljak u tri različita položaja.



*Slika 6.34 Umjeravanje TCP-a direktnom metodom 3 točke [21]*

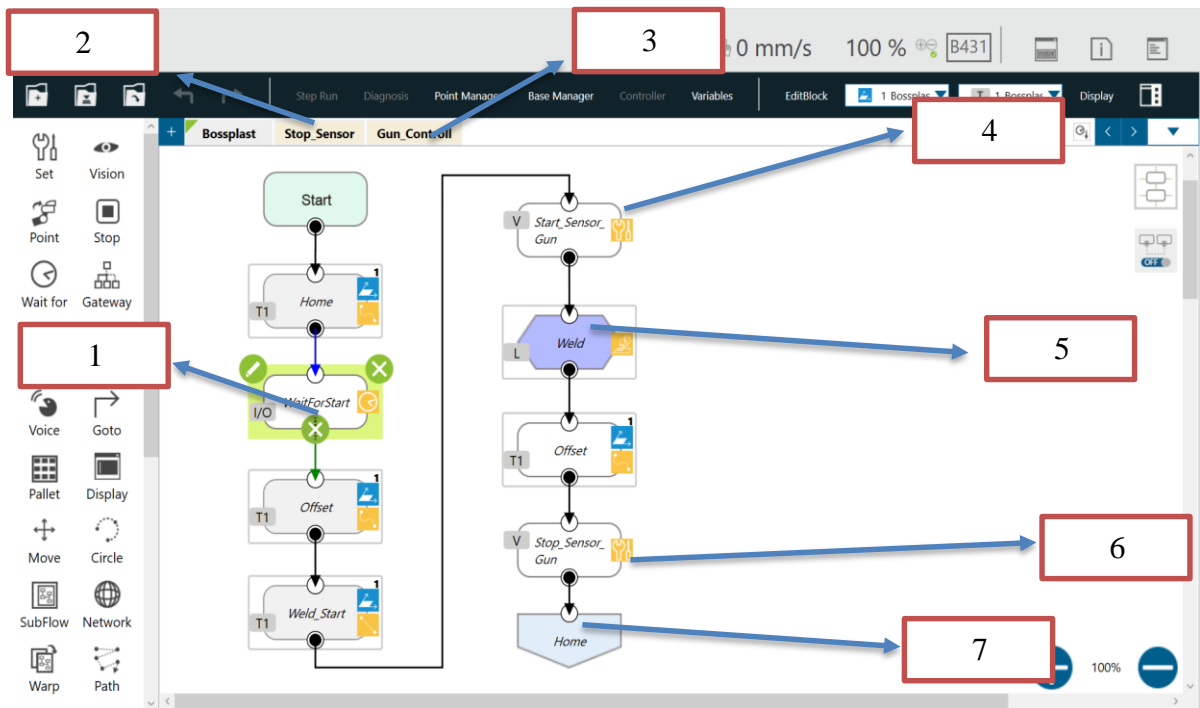
Program je izrađen na način da je prvo definirana putanja koja se sastoji od nekoliko ključnih pozicija. Prva je pozicija početna točka (*Home*), iz koje robot može sigurno započeti i završiti svoju radnju. Zatim je postavljena pozicija malo iznad putanje zavarivanja (*Offset*), koja služi kao prijelazna točka kako bi robot mogao pravilno ući u putanju zavarivanja i napustiti je nakon završetka operacije. Konačno, određena je početna točka zavarivanja (*Weld\_Start*), odakle započinje stvarni proces zavarivanja. Ova struktura omogućava robotu da precizno i sigurno izvršava zavarivačke operacije, minimizirajući rizik od pogrešaka ili oštećenja opreme. Sve su navedene točke PTP tipa te su promjenjive brzine, odnosno tijekom samog procesa mogu se ubrzavati i usporavati.



Slika 6.35 Točke putanje robota [21]

Nadalje, na putanju robota dodaje se logika.



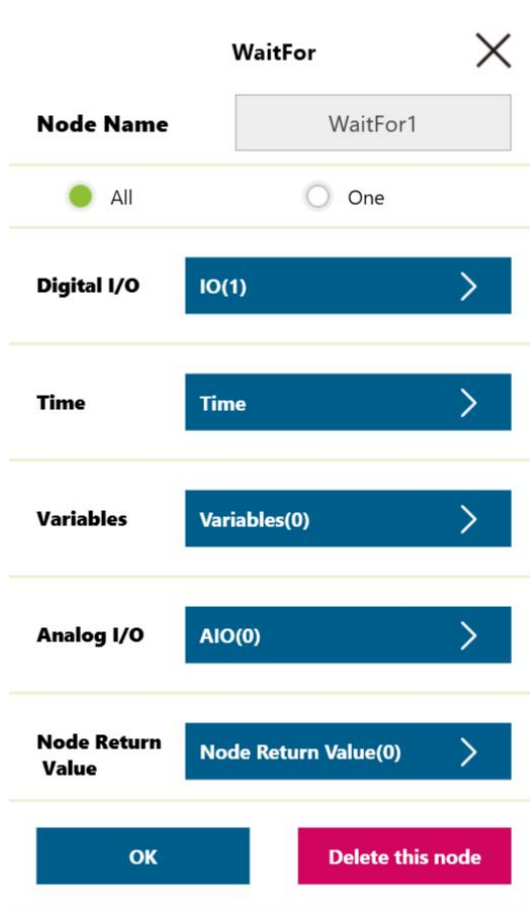


Slika 6.36 Izgled programa s logikom [21]

1. – Naredba „Wait For“
2. – *Thread* za kontrolu fotoelektričnog senzora
3. – *Thread* za kontrolu uključivanja i isključivanja pištolja
4. – Naredba „Set“
5. – Linearna putanja zavarivanja
6. – Naredba „Set“
7. – Naredba „Go To“

Svaki program u TM-Flow softveru započinje naredbom „Start“, kojom se inicijaliziraju parametri robota i priprema sustav za izvršenje zadatka. Nakon naredbe „Start“, robot se postavlja u početnu poziciju „Home“, koja predstavlja sigurno mjesto s kojeg započinju i završavaju svi programi. Sljedeća naredba je „Wait For“, koja omogućava čekanje na određene uvjete prije nastavka izvršenja programa. U ovoj naredbi mogu se definirati različiti parametri, poput digitalnih i analognih signala, vremena, varijabli, te se može odrediti čekanje na ispunjenje jednog ili više uvjeta. U ovom slučaju, postavljeno je čekanje na digitalni ulaz 0, što znači da robot čeka da radnik pritisne tipkalo kako bi potvrdio da je sve spremno za pokretanje jednog ciklusa zavarivanja.



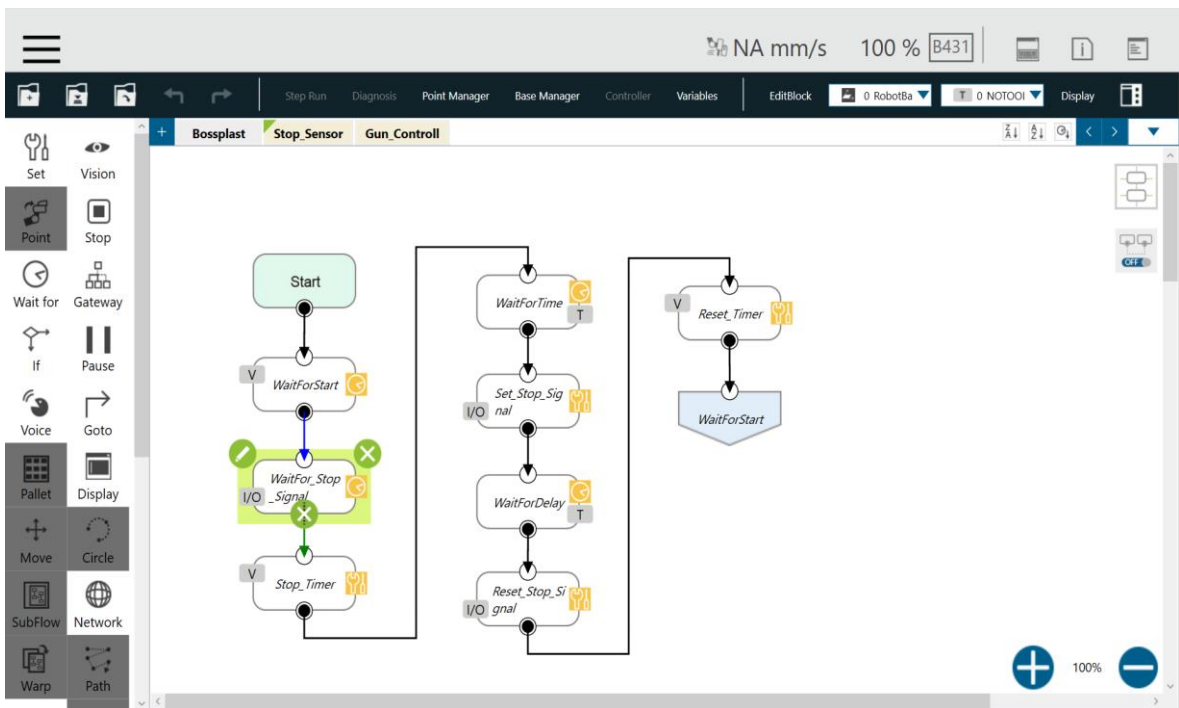


Slika 6.37 TM-Flow Wait For naredba [21]

Nakon što radnik aktivira tipkalo, robot se pomiče prema točki koja se nalazi iznad početne točke zavarivanja kako bi se omogućilo pravilno spuštanje u početnu točku zavarivanja bez rizika od kolizije. Dolaskom u početnu točku zavarivanja, poziva se naredba „Set“ kojom se omogućava postavljanje i promjena određenih parametara, poput digitalnih izlaza i varijabli. U ovom slučaju, varijable za pokretanje *threadova* postavljaju se na „True“, čime se aktiviraju *threadovi* za praćenje signala fotoelektričnog senzora i za uključivanje te isključivanje pištolja.

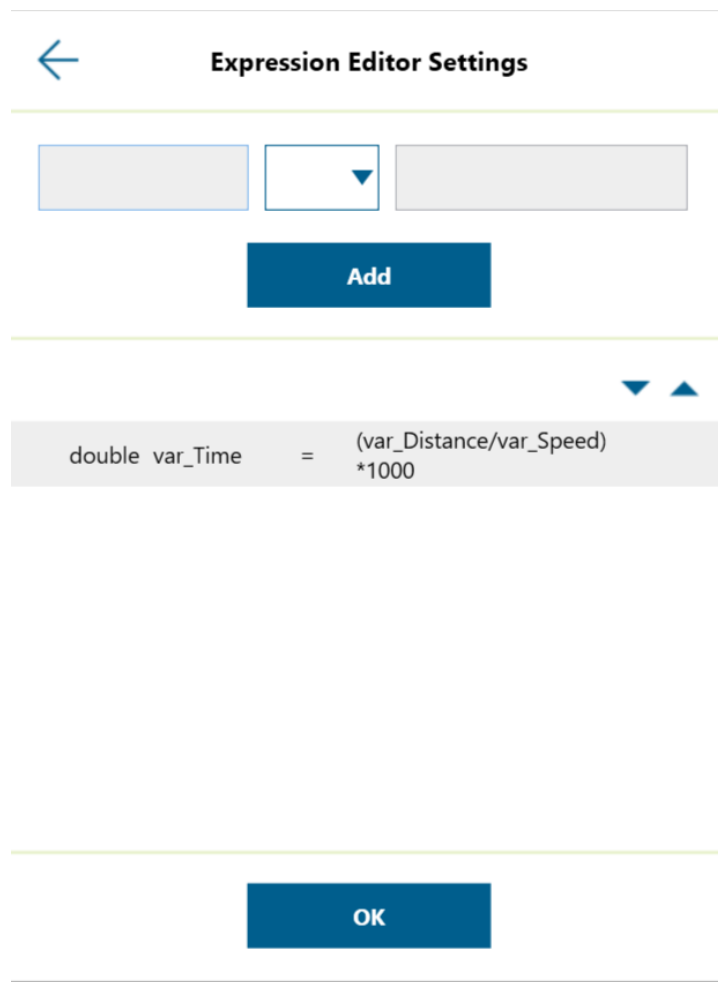
*Thread* (ili nit) u programiranju predstavlja osnovnu jedinicu izvršavanja unutar procesa. *Thread* omogućava paralelno izvršavanje dijelova koda unutar istog programa, što može povećati učinkovitost i performanse aplikacije. U ovom slučaju koristi se *thread* zato što on omogućava stalnu kontrolu ulaznih signala te se samim time može pravovremeno zaustaviti robot na kraju cijevi i isključiti pištolj.

*Thread* za nadzor fotoelektričnog senzora prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 6.38 TM-Flow prikaz Threada za nadzor fotoelektričnog senzora [21]

Kada se aktivira ovaj *thread* putem varijable, on ostaje u stanju čekanja sve dok robot ne dođe do kraja cijevi i dok se fotoelektrični senzor ne isključi. U trenutku kada se to dogodi, varijabla koja služi kao brojač postavlja se na odgovarajuću vrijednost pomoću formule za izračunavanje prijednog puta. Ta vrijednost određuje dodatnu udaljenost koju robot mora prijeći kako bi stigao do kraja cijevi i dovršio cijeli zavar, budući da je senzor postavljen na određenoj udaljenosti ispred mjesta zavarivanja (15 milimetara). Senzor je pozicioniran na ovaj način jer se na mjestu zavarivanja javlja iskrenje, što bi moglo ometati ispravno očitavanje prisutnosti cijevi. Brzina zavarivanja varira ovisno o debljini cijevi koja se zavaruje, te je za potrebe testiranja namještena na 110 mm/s. Ova varijabla množi se sa 1000 zato što sam softver sve preračunava u milisekunde.

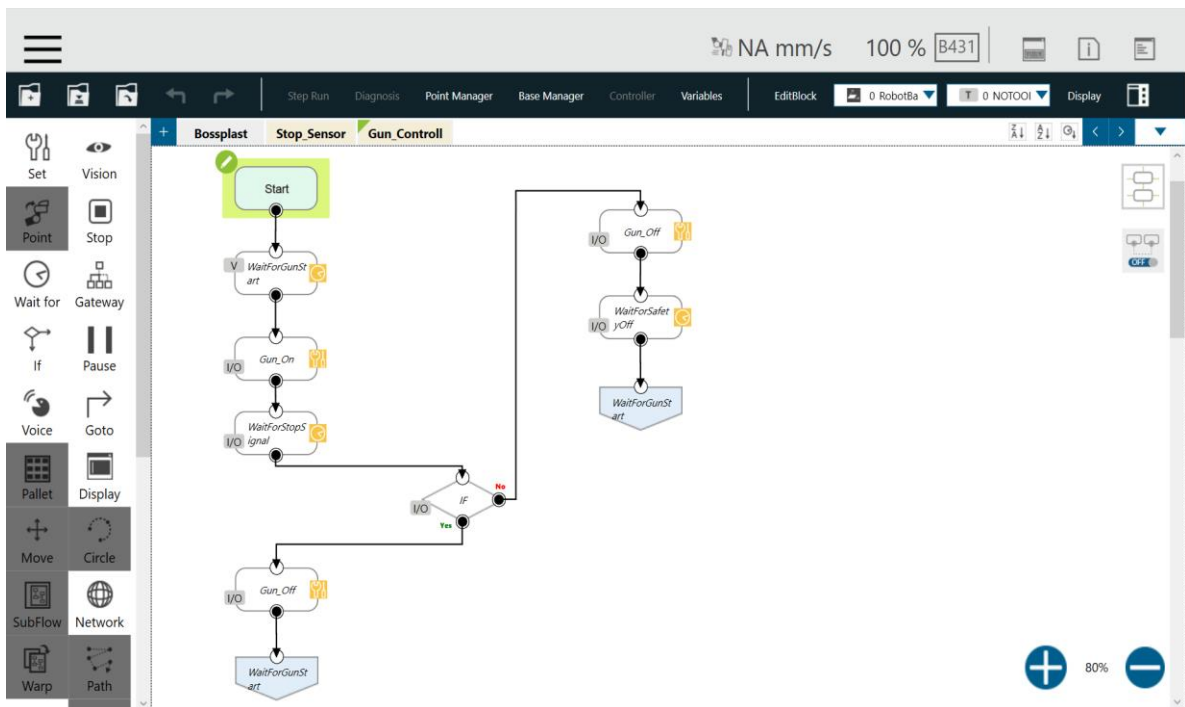


Slika 6.39 Tm-Flow varijabla brojač [21]

Nadalje, koristeći naredbu „Wait For“, koja je konfigurirana da čeka određeno vrijeme izračunato pomoću prethodno spomenute varijable, robot nastavlja s kretanjem i izvođenjem zavarivanja. Kada istekne zadano vrijeme čekanja, naredbom „Set“ aktivira se digitalni izlaz 0, koji je povezan tako da prilikom aktivacije također aktivira digitalni ulaz 4. Aktivacija ovog ulaza zaustavlja proces zavarivanja. Nakon toga, naredbom „Wait For“ postavljeno je kratko vrijeme čekanja od 100 milisekundi jer bi kontroler, bez ovog vremenskog odmaka, jednostavno preskočio sljedeće naredbe i ne bi ih izvršio. Nakon isteka tih 100 milisekundi naredbama se ponovno vraćaju signal za zaustavljanje i varijable za vrijeme čekanja na početno stanje kako bi sustav bio spreman za sljedeći ciklus. Na kraju, naredbom „Go To“ vraćamo se na početak *threada*, gdje sustav ponovno čeka pokretanje *threada* za novi ciklus rada.

*Thread* za kontrolu pištolja također započinje naredbom „Wait For“, kojom se, putem varijable na početku zavarivanja, pokreće. Nakon pokretanja, naredbom „Set“ aktivira se digitalni izlaz 1, koji je povezan s fiber laserom i uključuje ga. Zatim *thread* ponovno čeka signal za zaustavljanje, ali u ovom slučaju može čekati jedan od dva signala: aktivaciju fotoelektričnog senzora na kraju cijevi ili aktivaciju Keyence skenera u slučaju kada netko priđe sustavu za zavarivanje. U ovom dijelu koda nalazi se i „IF“ petlja koja provjerava koji se ulaz aktivirao. Ako se aktivirao

fotoelektrični senzor (ulaz 4), to znači da je robot stigao do kraja cijevi i pištolj se mora isključiti, nakon čega se *thread* vraća na početak, gdje čeka ponovno pokretanje. Ako se aktivira skener (ulaz 3), to signalizira da je netko prišao sustavu, pa se robot automatski zaustavlja, a pištolj se isključuje. U tom slučaju, sustav čeka sve dok se ulaz 3 ne isključi, odnosno dok radnik ne napusti sigurnosnu zonu. Sam Keyence skener je povezan na sigurnosne ulaze robota koji mogu konfigurirati kako će se robot ponašati, u ovom slučaju ako se priđe u 1. zonu, robot se zaustavlja, a dok netko priđe u 2. zonu, robot usporava na 50 mm/s.



Slika 6.40 Tm-Flow Thread za kontrolu pištolja [21]

Putanja zavarivanja izrađena je pomoću naredbe „Touch Stop“, koja nudi dodatne opcije prekida putanje pomoću digitalnih ulaza ili varijabli. Ova putanja je linearna, a brzina kretanja fiksna i postavljena na 110 mm/s, no može se prilagoditi ovisno o zahtjevima zavarivanja. Tijekom izvođenja programa brzina ostaje konstantna i neće biti pod utjecajem vanjskih faktora, što znači da radnik neće moći ubrzati ili usporiti proces. Također, brzina se neće smanjivati ni ako radnik uđe u zonu 2.

Touch Stop ✕

**Node Name** Weld

---

**Function Type**

Compliance

Line

Force Sensor

---

**Choose Base**

Tool

Current Base

---

**Setting**

Single Axis

Teach

Advanced

---

**Stop Criteria**

Variable

Variables(0)
>

Digital Input

Control Box ▾

4 ▾

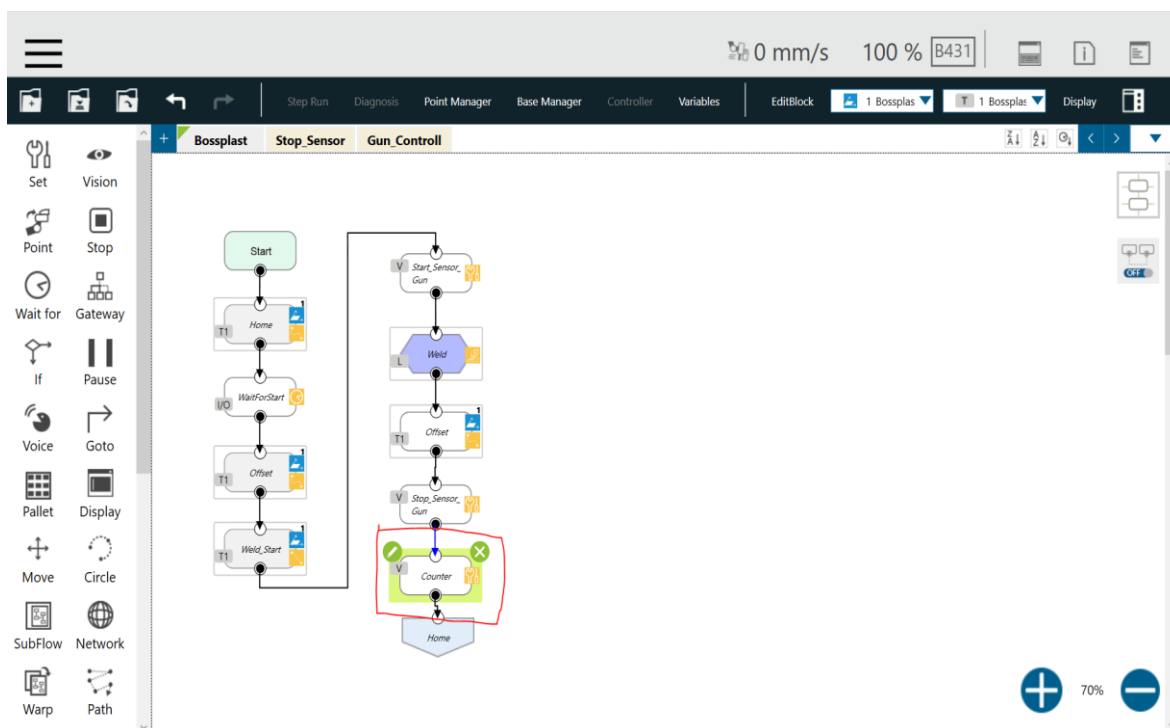
H ▾

Slika 6.41 Tm-Flow naredba Touch Stop [21]

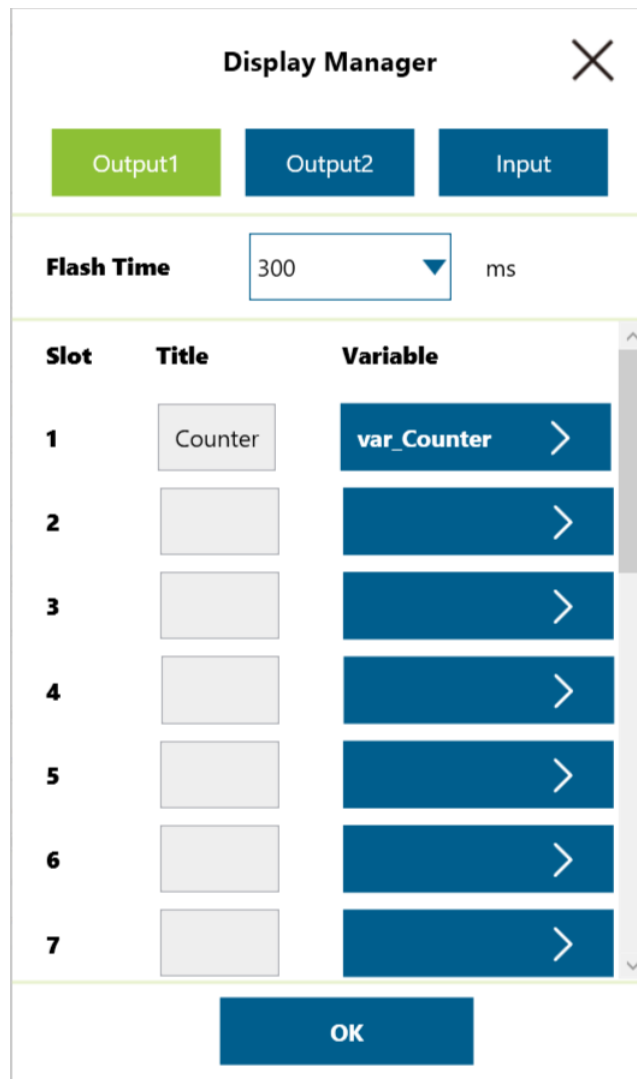
Kada zavarivanje završi, robot se vraća u početnu poziciju te isključuje *threadove* kako bi bili aktivni samo kada je to potrebno, odnosno tijekom izvođenja zavarivanja. Na taj način osigurava se optimalno korištenje resursa te sprečava nepotrebno pokretanje i rad *threadova* izvan procesa zavarivanja.

## 6.4. Optimizacija

Nakon što je cijeli sustav transportiran na konačnu lokaciju, utvrđena je potreba za nekim preinakama na samom sustavu. Većina ovih izmjena je mehaničke prirode, kao što je postavljanje dodatnih pneumatskih cilindara koji bi omogućili preciznije pozicioniranje cijevi. Također, predložena je promjena senzora za očitavanje promjene boje, budući da su većina cijevi debljine do 3 milimetra, a s dosadašnjim senzorom teško je raspoznati takve male udaljenosti. Ove su prilagodbe usmjerene na poboljšanje efikasnosti i preciznosti radnog procesa, čime se osigurava bolja kontrola i kvaliteta završnog proizvoda. Također, postoji mogućnost postavljanja brojača u sam robotski program koji će ispisati koliko su ciklusa izvršili u jednoj smijeni. Jednostavno rješenje za brojač je postavljanje nove varijable koja će se na kraju ciklusa povećavati za 1 te se pomoću opcije „Display“ može prikazati na korisničkom sučelju vrijednost varijable.



Slika 6.42 TM-Flow Dodavanje brojača [21]



Slika 6.43 TM-Flow „Display Manager“ [21]



## 7. Zaključak

Lasersko zavarivanje, kao jedna od najnaprednijih metoda zavarivanja, značajno pridonosi modernizaciji i automatizaciji proizvodnih procesa, posebno u okviru Industrije 4.0. Korištenje robota i naprednih laserskih sustava omogućava dosljednost, preciznost i visoku kvalitetu zavara, što je od ključne važnosti u industrijama koje zahtijevaju visoku razinu točnosti i ponovljivosti, poput automobilske i zrakoplovne industrije. Osim toga, primjena fiber lasera donosi prednosti poput niske potrošnje energije, minimalnog toplinskog utjecaja i mogućnosti zavarivanja različitih vrsta materijala, uključujući visoko reflektivne metale kao što su aluminij i bakar.

Odabir između industrijskog i kolaborativnog robota ovisi o nizu faktora, pri čemu je ekonomska isplativost jedan od ključnih. Naime, iako su industrijski roboti inicijalno povoljniji u usporedbi s kolaborativnim, njihova isplativost u velikoj mjeri ovisi o veličini serija te o raznolikosti proizvoda koje će proizvoditi. Što su serije veće i manje raznolike, industrijski roboti postaju isplativiji, budući da su značajno brži i precizniji od kolaborativnih robota. Osim toga, krajnji izvršitelji (*end-effectori*) za industrijske robote općenito su jeftiniji od onih namijenjenih za kolaborativne robote. Industrijski roboti također nude mogućnost rada s većim nosivostima. Primjerice, robot KUKA Titan KR 1300 može podnijeti maksimalnu masu od 1300 kilograma, dok su trenutni kolaborativni roboti ograničeni na nosivosti do maksimalno 20 – 30 kilograma. Stoga, kada proizvodnja uključuje masivnije alate i proizvode, industrijski robot predstavlja jedini izbor.

S druge strane, iako su inicijalno skuplji, kolaborativni roboti postaju isplativiji u proizvodnim scenarijima s manjim serijama i raznolikim proizvodima. Njihova isplativost raste već u početnim fazama s obzirom na to da za rad s kolaborativnim robotima nisu potrebne sigurnosne barijere i dodatni senzori, što je neophodno za industrijske robote. Dodatno, zbog jednostavnijeg programiranja kolaborativnih robota, nije potrebno specijalizirano znanje operatera kao kod industrijskih robota. Proces programiranja novih zadataka, primjerice za nove serije ili prototipove, znatno je brži i jednostavniji kod kolaborativnih robota u usporedbi s industrijskim. Tako se sustav, opisan u ovom radu, može u kraćem vremenskom roku i uz znatno niže troškove prilagoditi različitim pozicijama ili čak potpuno novim funkcijama, kao što je, primjerice, lijepljenje dijelova – proces koji je danas vrlo često primjenjivan u automobilskoj industriji.

## 8. Literatura

- [1] Schwab, K. : The Fourth Industrial Revolution. Crown Business , 2017.
- [2] <https://group.mercedes-benz.com/company/locations/production-network-kecskemert.html>, dostupno 31.08.2024.
- [3] Bušić, Matija : Lasersko zavarivanje i rezanje, skripta iz kolegija Suvremene proizvodne tehnologije, Sveučilište Sjever, 2022.
- [4] <https://www.nature.com/articles/447654a>, dostupno 31.08.2024.
- [5] Maiman, T. H. : "Stimulated Optical Radiation in Ruby". Nature, 1960.
- [6] [https://www.photonics.com/Articles/Fiber\\_Laser\\_Pioneer\\_Honored\\_with\\_IEEE\\_Milestone/a52186](https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Laser_Pioneer_Honored_with_IEEE_Milestone/a52186), dostupno 31.08.2024.
- [7] Lawrence, J., & Low, D. K. Y. : "High Power Laser Welding". Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research, and Applications, 2018.
- [8] Kannatey-Asibu, Jr., E. : Principles of Laser Materials Processing, 2009.
- [9] <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1194863>, dostupno 01.09.2024.
- [10] [https://www.rp-photonics.com/fiber\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html), dostupno 01.09.2024.
- [11] <https://www.kuka.com/>, dostupno 13.09.2024.
- [12] Vezmar, Dominik : Industrijski ili kolaborativni robot. Mitsubishi Robotics, 2024.
- [13] ISO/TR 20218-1: Roboti i robotski uređaji - Sigurnosni dizajn za sustave industrijskih robota - Dio 1: Krajnji izvršitelji
- [14] Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. : "Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications". *Mechatronics.* , 2018.
- [15] <https://www.vecernji.hr/vijesti/robot-da-vinci-bubrege-ce-transplantirati-i-u-hrvatskoj-175265>, dostupno 12.09.2024.
- [16] [https://www.nimak.de/en/weldinggunconfigurator/?no\\_cache=1](https://www.nimak.de/en/weldinggunconfigurator/?no_cache=1), dostupno 13.09.2024.
- [17] <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/on-the-beam/6525.article>, dostupno 13.09.2024.
- [18] <https://www.magna.com/company/company-information/magna-groups/magna-steyr>, dostupno 13.09.2024.
- [19] <https://www.laser-tech.cz/en/mig-mag-tig-welding/>, dostupno 13.09.2024.
- [20] <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/process-simulate-software/>, dostupno 31.08.2024.
- [21] Autor, Kaić, Ivan
- [22] <https://www.tm-robot.com/en/about-us/>, dostupno 31.08.2024.
- [23] Car, Zlatan : Uvod u robotiku, skripta iz kolegija Robotika u proizvodnji, Sveučilište Sjever, 2023.
- [24] <https://www.baumer.com/ve/en/product-overview/object-detection/photoelectric-sensors/o200/c/38296>, dostupno 03.09.2024.
- [25] <https://www.keyence.eu/products/safety/laser-scanner/sz/>, dostupno 03.09.2024.
- [26] [https://www.baumer.com/medias/\\_secure\\_/m\\_o500grgw1t72o.pdf?mediaPK=8800369508382](https://www.baumer.com/medias/_secure_/m_o500grgw1t72o.pdf?mediaPK=8800369508382), dostupno 13.09.2024.
- [27] <https://www.keyence.com/support/user/safety/software/>, dostupno 03.09.2024.

## Popis Slika

Slika 2.1 Primjer integracije robotike u autoindustriji (Daimler tvornica u Kecskemetu) .....	3
Slika 3.1 Theodore H. Maiman s prototipom rubinskog lasera .....	4
Slika 3.2 Elias Snitzer, izumitelj prvog fiber lasera .....	5
Slika 3.3. Prikaz prolaska svjetlosti kroz optička vlakna .....	8
Slika 3.4 Shematski prikaz dijelova fiber lasera [3] .....	9
Slika 3.5 Shematski prikaz fokusiranja svjetlosti pomoću leća u laserskom pištolju .....	9
Slika 3.6 Ovisnost gustoće snage lasera o utjecaju laserske zrake na materijal .....	10
Slika 3.7 Prikaz pištolja za ručno lasersko zavarivanje .....	10
Slika 4.1 Primjer kolaborativnog robota u radu s čovjekom .....	13
Slika 4.2 4 Sigurnosne metode interakcije čovjeka sa robotom (ISO/TS 15066) .....	14
Slika 4.3 Kolaborativni robot Da Vinci s kirurškim timom KBC-a Zagreb .....	17
Slika 4.4 Sustav robotskog zavarivanja fiber laserom .....	18
Slika 4.5 X kliješta (lijevo) i C kliješta (desno) .....	19
Slika 4.6 Stacionarna kliješta za točkasto zavarivanje proizvođača Nimak .....	19
Slika 4.7 Robotizirano lasersko zavarivanje krova u Daimler tvornici. ....	20
Slika 4.8 Točkasto zavarivanje bočne stranice automobila u tvornici Magna Styer .....	20
Slika 4.9 Mig zavarivanje pozicija s rotacijskim stolom .....	21
Slika 6.1 Nacrt sustava za lasersko zavarivanje .....	23
Slika 6.2 Osnovne specifikacije TM12 robota .....	24
Slika 6.3 Postolje za učvršćivanje cijevi .....	25
Slika 6.4 Pneumatski cilindri .....	26
Slika 6.5 Kućište za robotsku upravljačku jedinicu i glavnu sklopku sustava .....	26
Slika 6.6 prikaz korisničkog sučelja .....	27
Slika 6.7 Prikaz stranice proizvođača robota .....	28
Slika 6.8 Prikaz izrade novog projekta .....	28
Slika 6.9 Prikaz unošenja datoteke .....	29
Slika 6.10 Prikaz prozora s opcijama za „Import“ .....	29
Slika 6.11 Prikaz prozora za „Import“ .....	30
Slika 6.12 Prikaz robota TM12 u simulaciji .....	30
Slika 6.13 Specifikacije robota TM12 .....	31
Slika 6.14 Prikaz kinematizacije robota u programu Process Simulate .....	32
Slika 6.15 Prikaz robota u random okruženju .....	32
Slika 6.16 Prikaz <i>end-effectora</i> (držač i pištolj za lasersko zavarivanje) .....	34

Slika 6.17 izrada TCP-a .....	35
Slika 6.18 izrada baze .....	36
Slika 6.19 postavljanje <i>end-effectora</i> na robot pomoću opcije „Mount Tool“ .....	37
Slika 6.20 Izrada putanje u programu Process Simulate .....	37
Slika 6.21 Opcije za izradu točaka .....	38
Slika 6.22 Uređivanje točaka u putanji .....	39
Slika 6.23 Izrada videa za prikaz .....	39
Slika 6.24 Fotoelektrični senzor Baumer .....	40
Slika 6.25 Sigurnosni skener Keyence .....	41
Slika 6.26 Postupak postavljanje fotoelektričnog senzora .....	41
Slika 6.27 Unos osnovnih podataka u Keyence konfiguraciju .....	42
Slika 6.28 Postavljanje „Start/Restart mode“ na „Automatic/ Automatic“ .....	43
Slika 6.29 Konfiguracija izlaznih signala .....	43
Slika 6.30 Postavljanje sigurnosnih zona .....	44
Slika 6.31 Prikaz spajanja svih izlaznih i ulaznih signala u upravljačku jedinicu robota .....	46
Slika 6.32 Umjeravanje baze pomoću 3 točke .....	47
Slika 6.33 Određivanje TCP-a te mase alata .....	48
Slika 6.34 Umjeravanje TCP-a direktnom metodom 3 točke .....	49
Slika 6.35 Točke putanje robota .....	50
Slika 6.36 Izgled programa s logikom .....	51
Slika 6.37 TM-Flow <i>Wait For</i> naredba .....	52
Slika 6.38 TM-Flow prikaz <i>Thraeda</i> za nadzor fotoelektričnog senzora .....	53
Slika 6.39 Tm-Flow varijabla brojač .....	54
Slika 6.40 Tm-Flow <i>Thread</i> za kontrolu pištolja .....	55
Slika 6.41 Tm-Flow naredba <i>Touch Stop</i> .....	56
Slika 6.42 TM-Flow Dodavanje brojača .....	57
Slika 6.43 TM-Flow „Display Manager“ .....	58

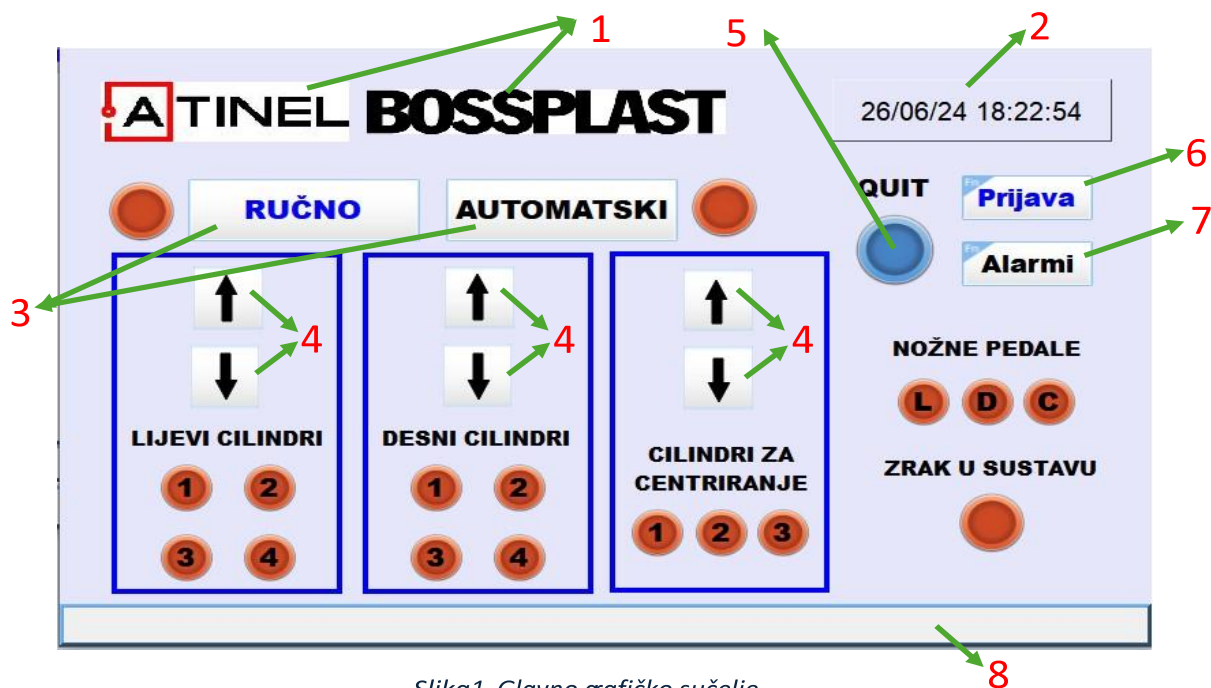
## Popis Tablica

Tablica 4.1 Prednosti <i>cobota</i> u usporedbi s industrijskim robotima .....	15
Tablica 4.2 Nedostatci <i>cobota</i> u usporedbi s industrijskim robotima .....	16
Tablica 6.1 Popis ulaznih i izlaznih signala .....	45
Tablica 6.2 Popis korištenih varijabla .....	46

# Prilozi

Prilog 1 . PLC dokumentacija

<b>Sadržaj</b>	
1. Operacijsko sučelje .....	
1.1. Prijava za ručni način rada .....	65
1.2. Lista alarma .....	66
2. Nožne pedale .....	66
3. Način rada.....	67
3.1. AUTOMATSKI način rada: .....	67
3.2. RUČNI način rada: .....	68
3.3. E-stop .....	71
4. Popis alarma .....	71



Slika1. Glavno grafičko sučelje

## Operacijsko sučelje

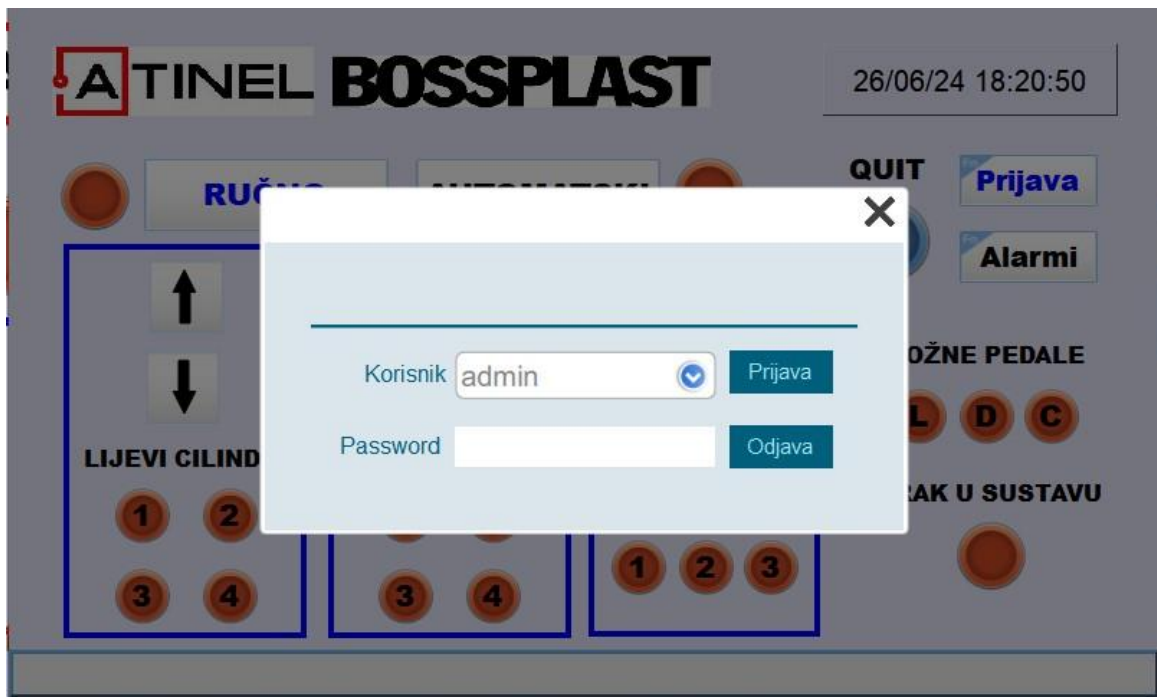
1. Logo ATINEL i BOSSPLAST
2. Datum i vrijeme
3. Načini rada
4. Tipke za ručni način upravljanja
5. Tipka za potvrdu greške (*safety reset*)
6. Prijava za ručni način rada
7. Lista alarma
8. Prikaz posljednjeg alarma
9. Lampice statusa

### 1.1. Prijava za ručni način rada

Kako bi se ušlo u ručni način upravljanja stroja, potrebno se prijaviti kao administrator (*admin*). Pritiskom na tipku prijava otvara se novi prozor (slika 2.) u kojem je potrebno upisati lozinku (*Password*). Lozinka je „1111“, a nakon njezina unošenja pritisne se tipka *Prijava* i pojavi se poruka „Succeeds“ ako je lozinka pravilno unesena.

Odjava se vrši pritiskom na tipku *Odjava*.

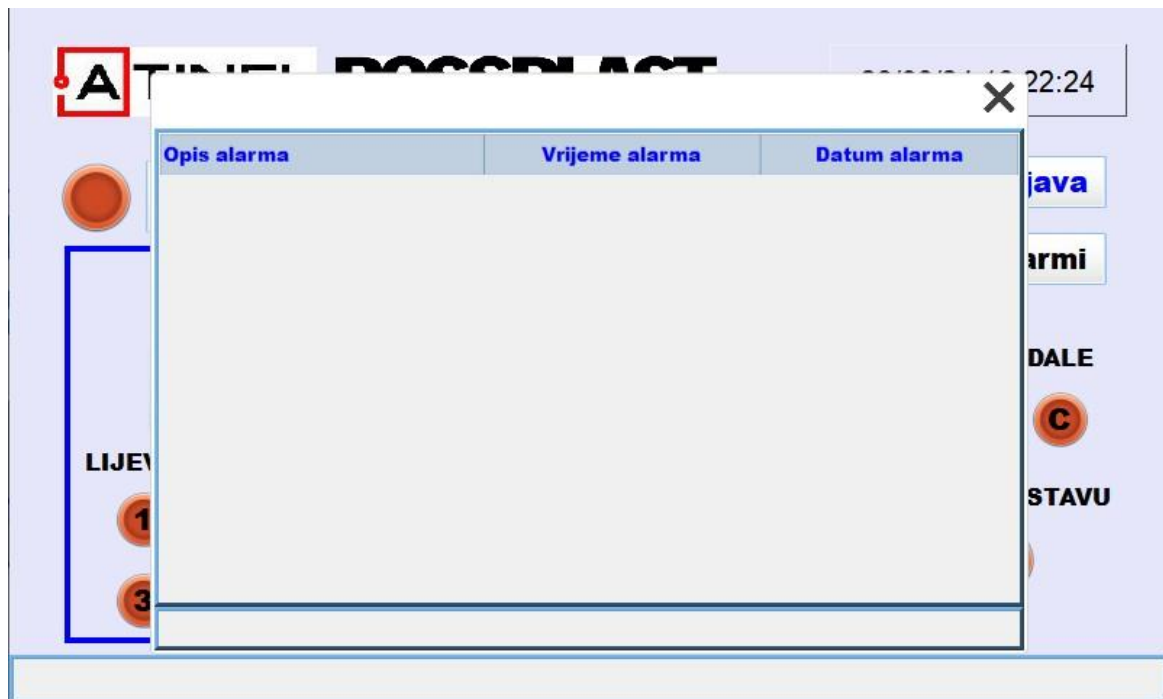




Slika 2. Sučelje za prijavu

## 1.2. Lista alarma

Za prikaz liste alarma potrebno je pritisnuti tipku *Alarmi*.



Slika 3. Popis alarma

## 2. Nožne pedale

Kako bi se mogle koristiti nožne pedale, potrebno je ući u automatski način rada pritiskom na tipku

„AUTOMATSKI”.

Sve su tri nožne pedale isključene kad nisu pritisnute. Prva pedala (lijevo) i druga pedala (u sredini) imaju kočnicu te se pritiskom na njih one uključuju te ostanu u toj poziciji. Da bi se isključile, potrebno ih je ponovno pritisnuti kako bi se kočnica otpustila.

Prilikom pritiska na treću pedalu, ona se također uključi, no ona nema mogućnost da ostane uključena ako ju radnik ne drži pritisnutom.

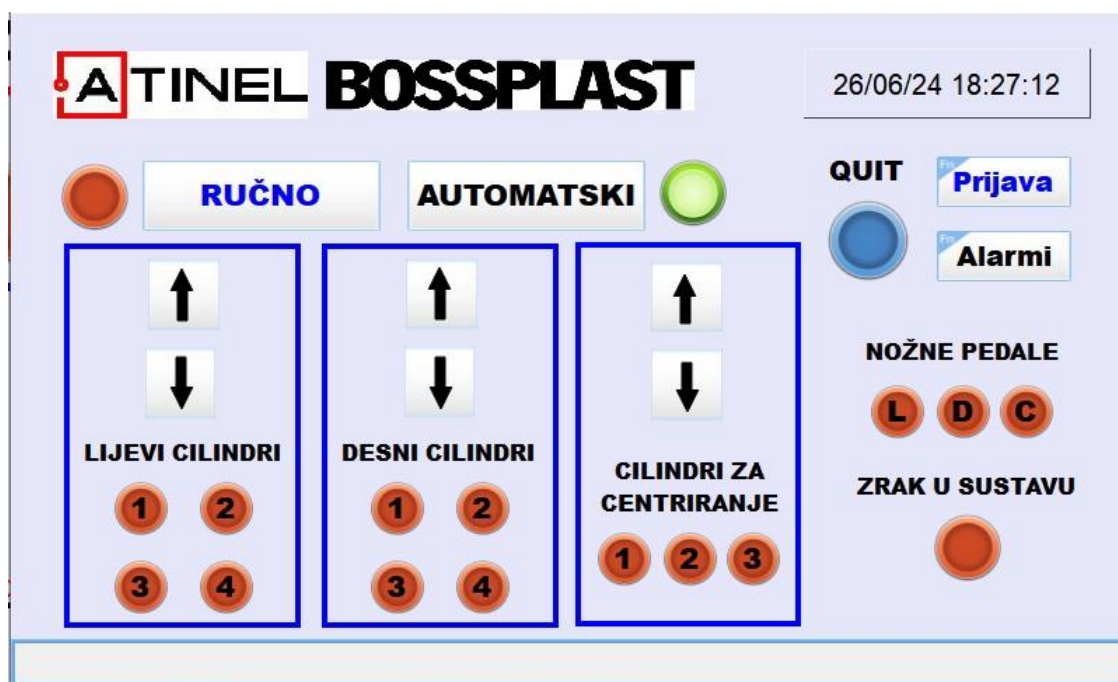
### 3. Način rada

Stroj se uključuje okretanjem glavne sklopke. Plc mora biti postavljen u run mode. Kako bi se stroj mogao koristiti, potrebno je dovesti zrak u sustav te provjeriti je li otpuštena E-stop tipka. Kada su ti uvjeti zadovoljeni, stroj je spreman za rad.

Potrebno je odabrati jedan od načina rada (RUČNO ili AUTOMATSKI).

#### 3.1. AUTOMATSKI način rada:

Ulaskom u automatski način rada uključuje se lampica pored tipke „AUTOMATSKI”.



Slika 4. Aktivan automatski način rada

Proces kreće pritiskom na treću pedalu (pedala s desne strane) pri čemu se cilindri za centriranje aktiviraju te se pinovi dignu.

Savijeni lim zatim se stavlja s lijeve strane do pinova za centriranje te se pritiskom na prvu pedalu spuste pinovi lijevih cilindara za stezanje. Lim je tada s lijeve strane stegnut i centriran. Pinovi za centriranje se spuste 3 sekunde nakon pritiska na prvu pedalu.

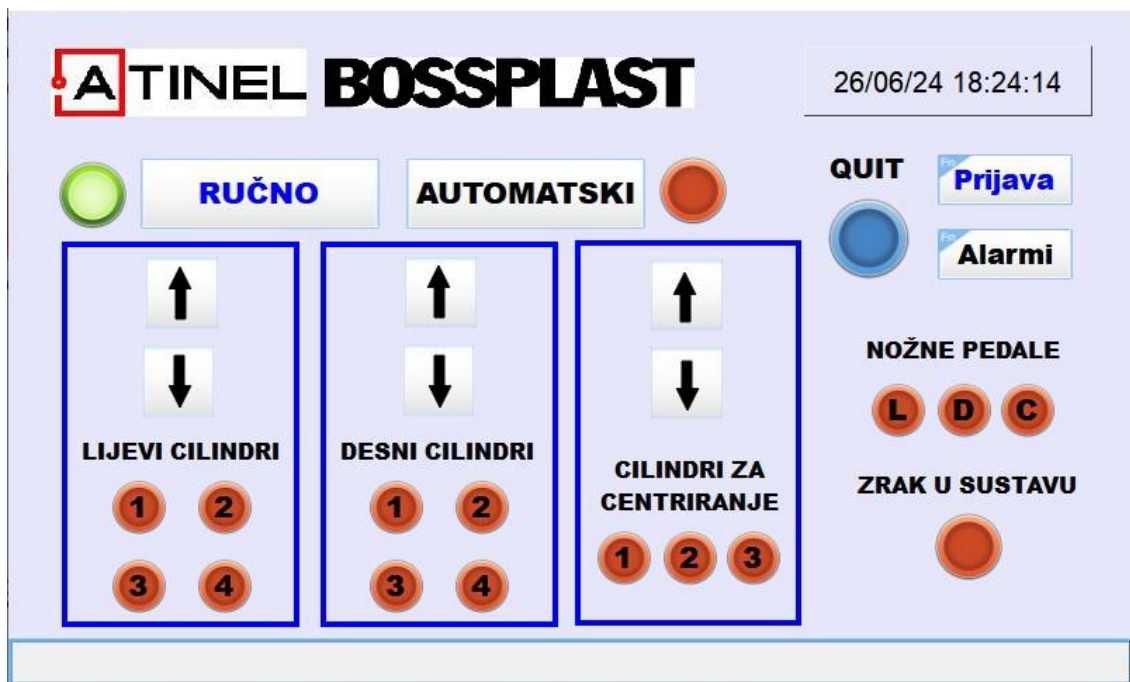
Zatim je potrebno desnu stranu lima saviti do savijenog ruba lijeve strane. Kad se lim savije, potrebno je pritisnuti drugu nožnu pedalu kako bi se spustili pinovi desnih cilindara za stezanje i lim bio spreman za varenje.

Nakon što robot zavari lim, potrebno je otpustiti prvo prvu nožnu pedalu, a zatim i drugu nožnu pedalu. Tako završava ciklus varenja i lim je potrebno ukloniti sa stroja prije početka novog ciklusa.

### 3.2. RUČNI način rada:

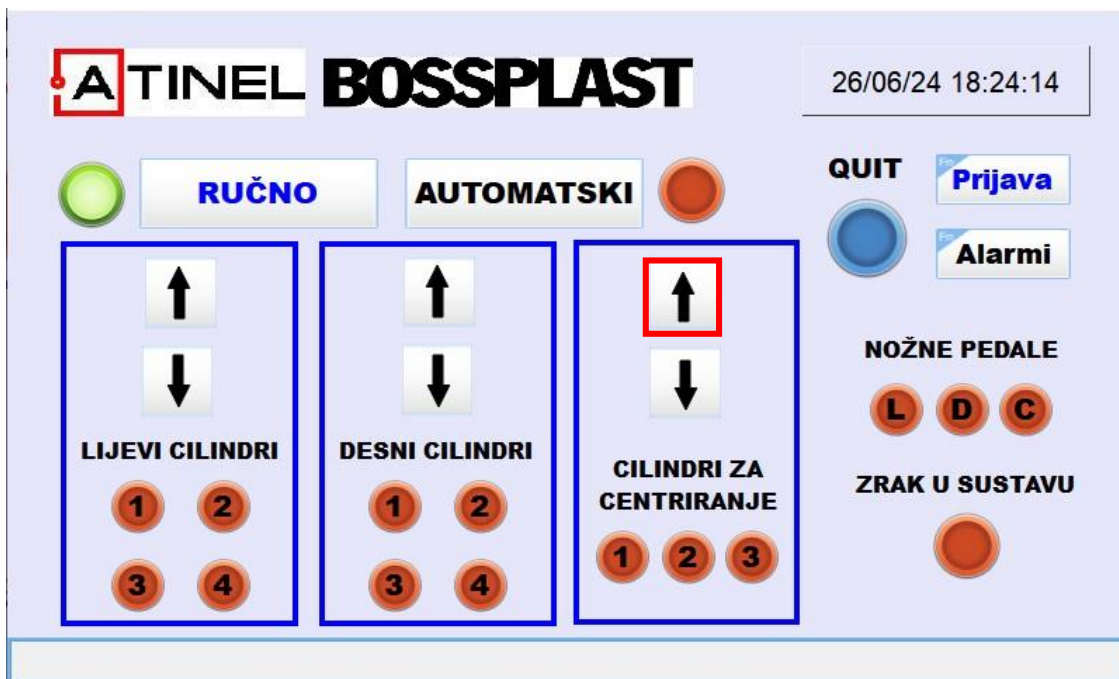
U ručnom načinu rada, cilindrima se upravlja isključivo preko ekrana (HMI).

Prije ulaska u ručni način rada potrebno je izvršiti prijavu. Nakon što se prijavi kao administrator, moguće je ući u ručni način pritiskom na tipku „RUČNI“. Kao potvrda načina rada, uključi se lampica pored tipke.



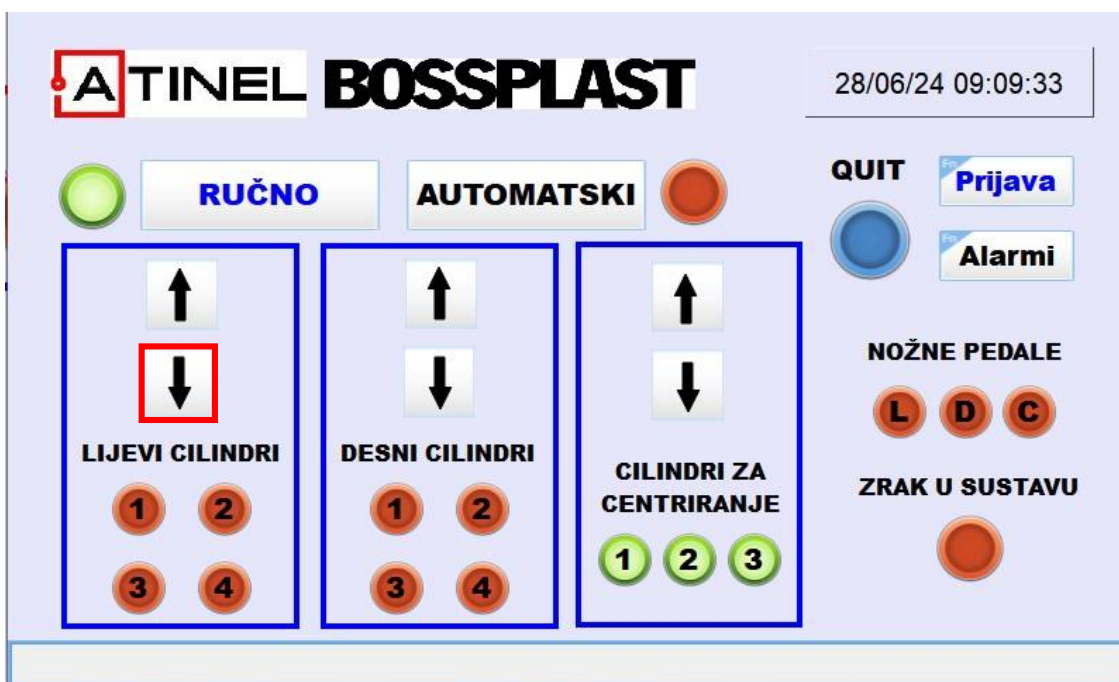
Slika 5. Ručni način aktivan

Za početak procesa potrebno je dići pinove cilindara za centriranje pritiskom na tipku „strelica gore” unutar bloka „CILINDRI ZA CENTRIRANJE” (Slika 6.).



Slika 6. Dizanje cilindara za centriranje

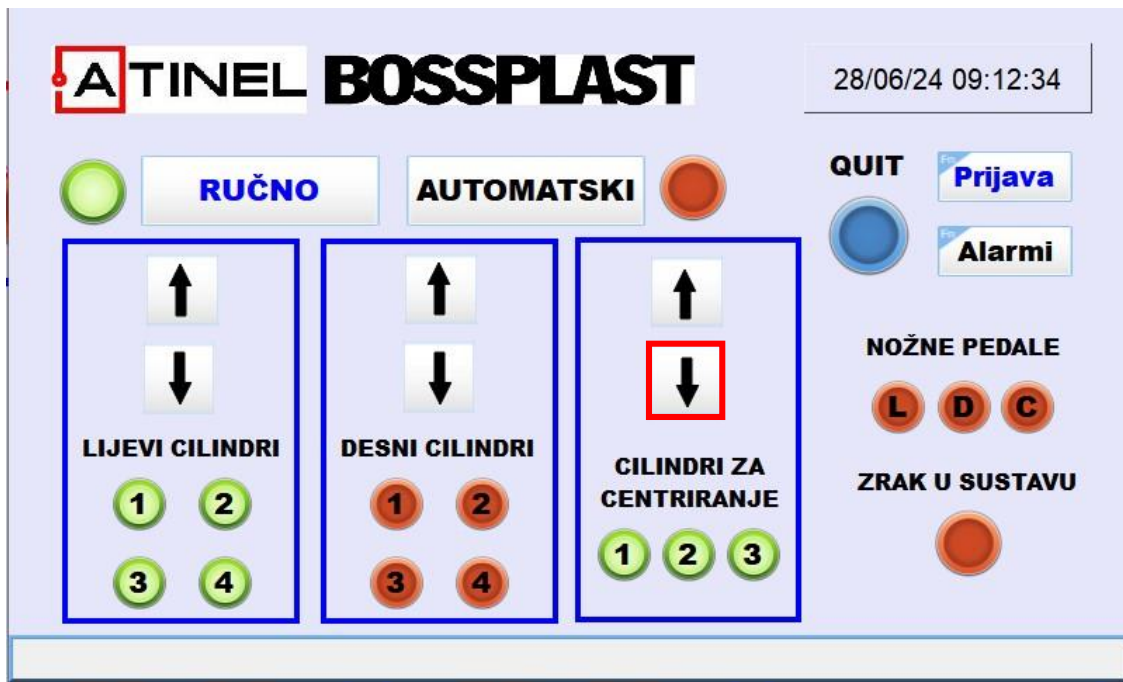
Savijeni lim zatim se stavlja s lijeve strane do pinova za centriranje te se pritiskom na tipku „strelica dolje” unutar bloka „LIJEVI CILINDRI” spuste pinovi lijevih cilindara za stezanje (Slika 7.).



Slika 7. Spuštanje lijevih cilindara za stezanje

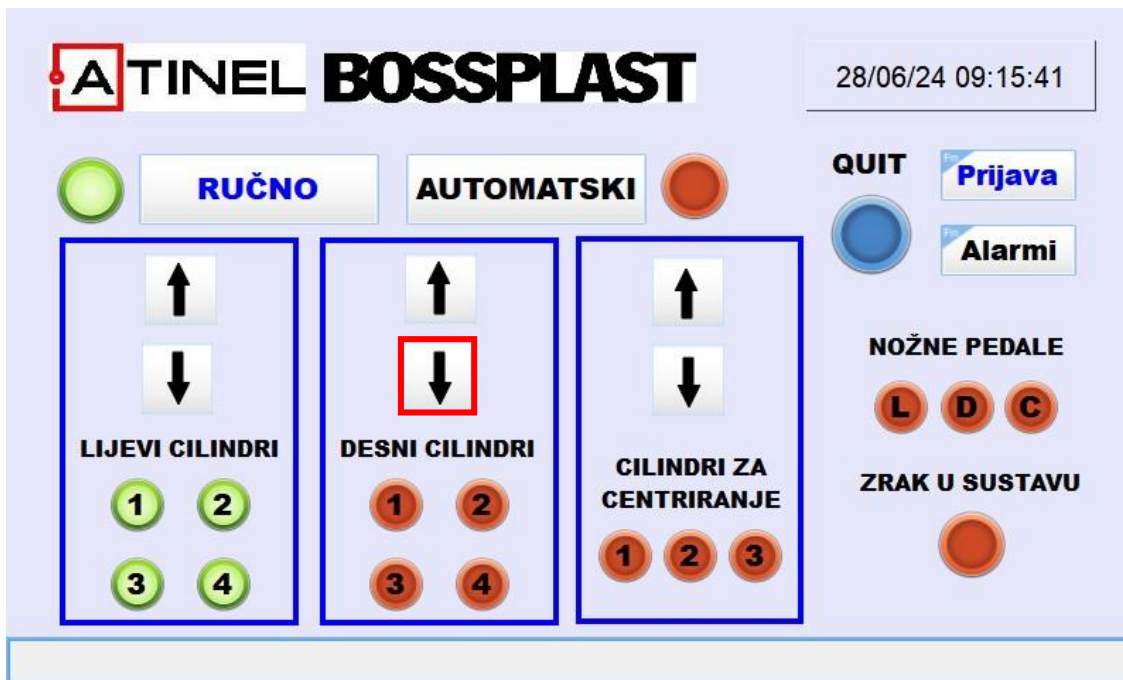
Lim je tada s lijeve strane stegnut i centriran.

Prije savijanja desne strane lima potrebno je spustiti pinove za centriranje pritiskom na tipku sa strelicom prema dolje unutar bloka „CILINDRI ZA CENTRIRANJE”.



Slika 8. Spuštanje cilindara za centriranje

Zatim je potrebno desnu stranu lima saviti do savijenog ruba lijeve strane. Kad se lim savije, potrebno je pritiskom na tipku „strelica dolje” unutar bloka „DESNi CILINDRI” spustiti pinove desnih cilindara za stezanje.

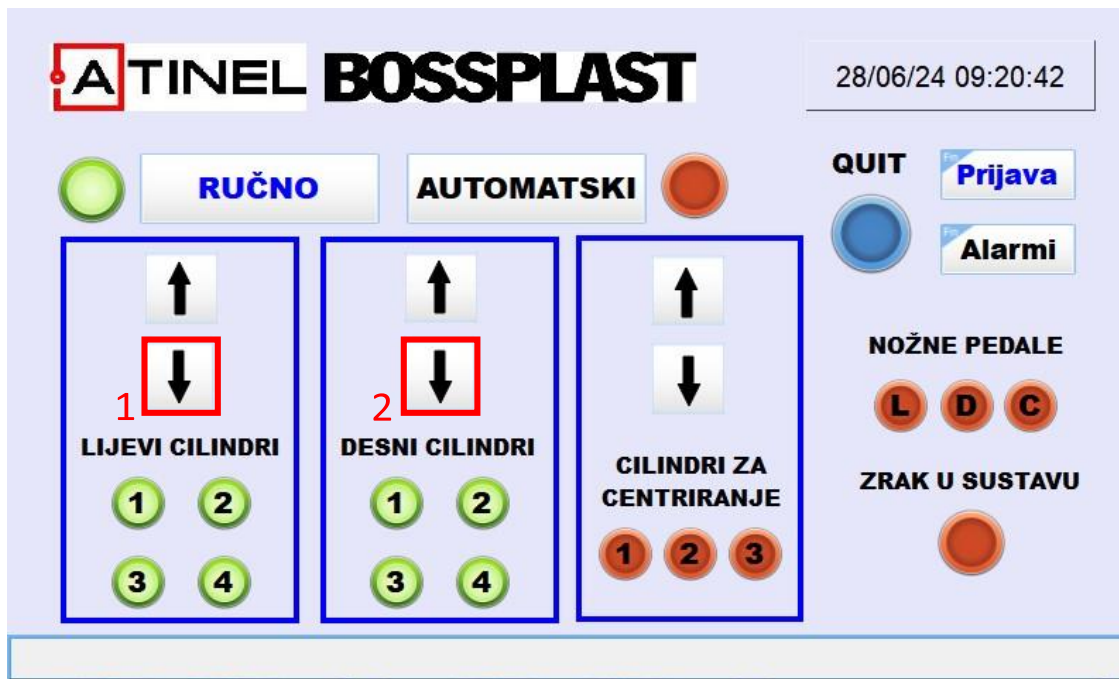


Slika 9. Spuštanje desnih cilindara za stezanje

Lim je tada i s desne strane stegnut i centriran te spreman za varenje.

Nakon što robot zavari lim, potrebno je dići lijeve i desne cilindre za stezanje pritiskom na tipku „strelica gore” gore unutar bloka „LIJEVI CILINDRI” i isti postupak unutar bloka „DESNi CILINDRI”.





Slika 10. Spuštanje cilindara za stezanje

Tako završava ciklus varenja i lim je potrebno ukloniti sa stroja prije početka novog ciklusa.

### 3.3. E-stop

U slučaju pritiska na E-stop tipku, izlazi se iz odabranog načina rada te se svi cilindri uvuku, tj. vrata u *home* poziciju.

Nije moguće koristiti stroj sve dok se E-stop ne otpusti i zatim potvrdi greška pritiskom na QUIT tipku na HMI-u.

## 4. Popis alarma

Alarm	Rješenje
Aktivan E-stop	Otkloniti grešku i potvrditi grešku pritiskom na tipku QUIT na HMI-u
Nema zraka u sustavu	Provjeriti ručni ventil na pneumatskoj pripremljivoj grupi
Greška na lijevim cilindrima	Provjeriti senzore na lijevim cilindrima
Greška na desnim cilindrima	Provjeriti cilindre na desnim cilindrima
Greška na cilindrima za centriranje	Provjeriti senzore na cilindrima za centriranje