

# Konstrukcija pneumatskog aktuatora s kutnim pomakom

---

**Vuković, Tonia**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:636505>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG AKTUATORA S KUTNIM  
POMAKOM**

Rijeka, svibanj 2023.

Tonia Vuković  
0069080690

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG AKTUATORA S KUTNIM  
POMAKOM**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Goran Gregov

Rijeka, svibanj 2023.

Tonia Vuković  
0069080690

Rijeka, 4. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**  
Predmet: **Modeliranje hidrauličkih i pneumatskih sustava**  
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

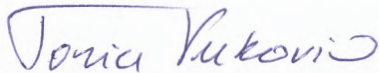
Pristupnik: **Tonia Vuković (0069080690)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Konstrukcija pneumatskog aktuatora s kutnim pomakom / Design of a pneumatic actuator for angular displacement**

### Opis zadatka:


Potrebno je konstruirati i izraditi pneumatski aktuator s kutnim pomakom koji mora ostvariti koristan rad pri djelovanju podtlaka. Potrebno je predložiti nekoliko konstrukcijskih rješenja te za odabrano rješenje provesti laboratorijska ispitivanja pri promjenjivom podtlaku i opterećenju.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



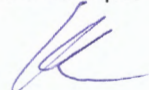
Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Goran Gregov

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Sukladno Članku 11. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradila samostalno prema zadatku Povjerenstva za diplomske ispite, iz predmeta Modeliranje hidrauličkih i pneumatskih sustava, pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Gorana Gregova.

---

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Goranu Gregovu na pruženom znanju tokom studija, kao i na kvalitetnim savjetima, potpori i motivaciji pri izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, dečku, kolegama i prijateljima zbog njihove izvanredne podrške tokom studiranja i pisanja diplomskog rada.

Tonia Vuković

# SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Umjetni pneumatski mišići.....	3
2.1 McKibben pneumatski mišić.....	4
2.2 Naborani pneumatski mišić.....	5
2.3 GRACE pneumatski aktuator.....	6
2.4 Pneumatski mišić s mijehom.....	7
3. Dosadašnja konstrukcijska rješenja pneumatskih mišića s kutnim pomakom.....	14
3.1 Pneumatski mišići koji rade koristeći pretlak.....	14
3.2 Pneumatski mišići koji rade koristeći podtlak.....	18
4. Konstrukcijsko rješenje pneumatskog mišića s kutnim pomakom.....	23
5. Laboratorijska oprema.....	31
5.1 Pneumatska oprema.....	31
5.2 Oprema za mjerenje sile.....	33
5.3 Izrada programa za upravljanje i prikupljanje podataka.....	37
6. Laboratorijska ispitivanja.....	40
6.1 Ispitivanje ostvarive blokirajuće sile.....	40
6.2 Ispitivanje ovisnosti kutnog pomaka o brzini.....	46
7. Zaključak.....	56
Literatura.....	58
Popis slika.....	60
Popis tablica.....	63
Sažetak i ključne riječi.....	64
Abstract and keywords.....	65

# 1. UVOD

Aktuatori su uređaji koji pretvaraju određenu vrstu energije u mehanički rad, odnosno gibanje. Gibanje može biti rotacijsko ili linearno. Linearni aktuatori se mogu kretati naprijed ili natrag na postavljenoj linearnoj ravnini i ograničeni su određenom putanjom, a rotacijski aktuatori proizvode rotacijsko gibanje što znači da se aktuator okreće u kružnoj ravnini. Za razliku od linearnih aktuatora, rotacijski nisu ograničeni određenom putanjom što ujedno znači da se mogu neograničeno vrtjeti u istom smjeru. Dalje se aktuatori mogu klasificirati prema izvoru energije, odnosno pogonu, a to su: hidraulički, pneumatski i električni aktuatori [1].

Pneumatski aktuator koristi komprimirani zrak za ostvarivanje korisnog rada. Najveća prednost, u odnosu na ostale vrste aktuatora, im je u tome što ostvaruju velike brzine te mogu izdržati nagla zaustavljanja bez oštećenja i to sve u malom prostoru. Prednost korištenja pneumatskih aktuatora je u pouzdanosti uređaja, sigurnosti i ekološkoj prihvatljivosti. Pneumatski aktuatori obavljaju koristan rad bez opasnosti od požara. Također, iznimno su izdržljivi te smanjuju troškove održavanja, što ujedno znači duži životni ciklus uređaja, a time i veći učinak. Za razliku od ostalih pogona, poput hidrauličkih i električnih, pneumatski aktuatori su složeniji za upravljanje zbog nelinearnosti do koje dolazi prilikom rada sa zrakom, odnosno kompresije. Pneumatski aktuatori imaju široki raspon primjene te se koriste u različitim industrijskim područjima. Neke od primjena uključuju: motori s unutarnjim izgaranjem, strojevi za pakiranje i proizvodnju, primjena na željeznici, zrakoplovstvu itd. Zbog prijašnje opisanih prednosti, pneumatski aktuatori se danas sve više koriste u robotici, kao i u automatizaciji i fizioterapiji, odnosno općenito u medicini [2, 3].

Postoje dvije vrste linearnih pneumatskih aktuatora, cilindar i umjetni pneumatski mišić. Cilindar, zbog jednostavne konstrukcije, niske cijene i lakog održavanja, ima široku primjenu u industrijskoj automatizaciji. Budući da se gibanje ostvaruje gibanjem klipa unutar košuljice cilindra, omjer izvlačenja je ograničen. Također, ovdje postoje problemi s propuštanjem zraka, kao i s trenjem. Za razliku od cilindra, umjetni pneumatski mišići se mogu elastično deformirati. Zbog svoje konstrukcije i sastava materijala njima je moguće replicirati pomake i gibanja iz svakodnevnog ljudskog ili životinjskog života, dok zbog svoje jednostavnosti, sigurnosti i podatljivosti konstrukcije, često se primjenjuju u području gdje je predviđena interakcija s ljudima [3].

Cilj ovog rada je napraviti novu konstrukciju pneumatskog aktuatora koji bi ostvario kutni pomak. U tom slučaju koristiti će se umjetni pneumatski mišić čiji dizajn, odnosno konstrukcija



omogućuje kutni pomak. Zbog toga je potrebno detaljno proučiti umjetne pneumatske mišiće, njihovu konstrukciju i način gibanja koji ovisi o korištenju pretlaka ili podtlaka kao i o samoj konstrukciji mišića. Nakon toga, potrebno je analizirati glavne radne parametre, a to su blokirajuća sila, brzina i kutni pomak.

U drugom poglavlju rada opisani su umjetni pneumatski mišići te je dan pregled dosadašnje izvedenih pneumatskih mišića dostupnih na tržištu.

U trećem poglavlju opisana su dosadašnja konstrukcijska rješenja umjetnih pneumatskih mišića koji ostvaruju kutni pomak te su podijeljena na one koji ostvaruju kutni pomak pri djelovanju pretlaka i pri djelovanju podtlaka.

U četvrtom poglavlju opisan je proces konstruiranja novog rješenja umjetnog pneumatskog mišića koji ostvaruje kutni pomak.

Kroz peto poglavlje dan je popis i opis korištene laboratorijske opreme koja je potrebna za ispitivanje pneumatskog mišića, poput pneumatske opreme, opreme za mjerenje sile i programske opreme koja se sastoji od korištenja programa LabVIEW.

U zadnjem, šestom poglavlju izvedeno je laboratorijsko ispitivanje na konstruiranom pneumatskom mišiću gdje su prikazani eksperimentalni rezultati, dobiveni korištenjem laboratorijske opreme, koji pokazuju odnos kutnog pomaka, dobivene sile i izmjerene brzine za različite vrijednosti korištenog tlaka.

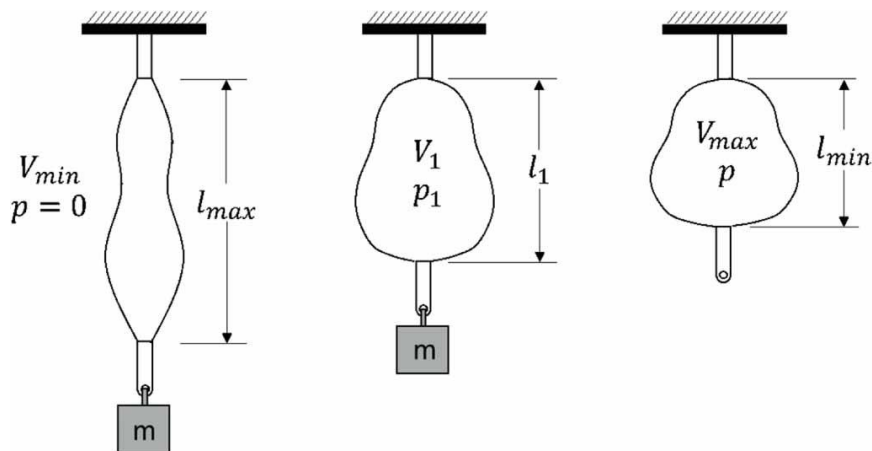
## 2. UMJETNI PNEUMATSKI MIŠIĆI

Umjetni pneumatski mišić ili skraćeno pneumatski mišić (eng. „*Pneumatic artificial muscle*“, PAM) je fleksibilan i mekan linearni aktuator napravljen od umjetnih materijala koji omogućuje repliciranje ljudskih mišića. Nastao je interdisciplinarnim istraživanjem na području bioloških sustava, tehničkih tvorevina, robotike i pneumatskog prijenosa. Zbog svoje podatljivosti, našao je primjenu u bionici, znanstvenoj disciplini koja kombinira tehniku i biologiju. Danas je jedno od glavnih područja primjene umjetnih pneumatskih mišića u mekoj robotici (eng. „*soft robotics*“), gdje je u potpunosti omogućen rad bez sustava krutih tijela i čije se komponente mogu prilagoditi promjenjivim uvjetima okoline i kretanja [4, 5].

Pneumatski mišići koriste komprimirani zrak kao izvor energije, zbog čega ne uzrokuju nikakvo zagađenje okoliša. Sam pneumatski mišić je po principu rada analogan biološkom mišiću. Stezanjem i opuštanjem pojedinih dijelova mišića postižu se različiti položaji i pomaci pomoću kojih se obavlja rad. Zbog korištenja umjetnih materijala, glavne prednosti uporabe tih mišića su mala masa i dimenzija, povoljan odnos mase i sile, lako održavanje i dugi vijek trajanja. Još jedna od prednosti im je da su veoma sigurni za korištenje jer se samo kontrolira protok zraka u mišiću i zato jer su sastavljeni od mekih materijala. Prvobitno su zamišljeni kao ortopedski pomagala, no, kao što je već prije spomenuto, danas se sve češće koriste u robotici kao aktuatori ili dijelovi robotskih ruku. Umjetni pneumatski mišići u mekoj robotici imaju potencijala u primjeni kod industrijskih robota i ostalih oprema u proizvodnji i sortiranju koji rade u bliskom kontaktu s ljudima, kao i mogućnost zamjene bioloških (prirodnih) mišića u živom organizmu [4].

Pneumatski mišić se većinom sastoji od posebno oblikovane elastične strukture, tj. membrane koja ne propušta zrak te koja može imati unutarne šupljine različitih oblika kako bi se postigao odgovarajući pomak. Kako bi mišić obavio neki rad, u ovom slučaju pomak, potrebno je u njega propustiti stlačeni zrak koji ulazi u šupljine mišića, koje se u ovisnosti o dizajnu zatim šire te mišić kontrahira. Ostvareni pomaci su u potpunosti definirani oblikom i sastavom tzv. kosturom mišića. Time je moguće ostvariti savijanje, produženje, stezanje ili rotaciju mišića. Način rada mišića ovisi o korištenju stlačenog zraka pneumatskog sustava, odnosno hoće li se koristiti pretlak (pozitivni tlak) ili podtlak (negativni tlak). Korištenjem pretlaka mišić se giba na način da se membrana ispunjava zrakom te se počinje širiti, a podtlakom se kontrolira pomicanje i deformacija mišića na način da se zrak izvlači iz membrane što uzrokuje skupljanje. Na slici 2.1 prikazan je mehanički rad koji se ostvaruje prilikom pomicanja utega pričvršćenog na mišić koji radi s pretlakom. Vidljivo je kako se mišić zbog opterećenosti izdužuje dok nije pod tlakom. Čim je

mišić pod utjecajem pretlaka  $p_1$ , mijenja mu se struktura te se u ovom slučaju krene širiti i skupljati te ostvarivati vučnu silu koja podiže teret mase  $m$  do točke ravnoteže u kojoj će generirana sila biti jednaka težini mase [4, 6].



Slika 2.1 Princip rada umjetnog pneumatskog mišića (PAM) [6]

U nastavku su navedene različite konstrukcije pneumatskih mišića koje su dostupne na tržištu ili su u fazi istraživanja.

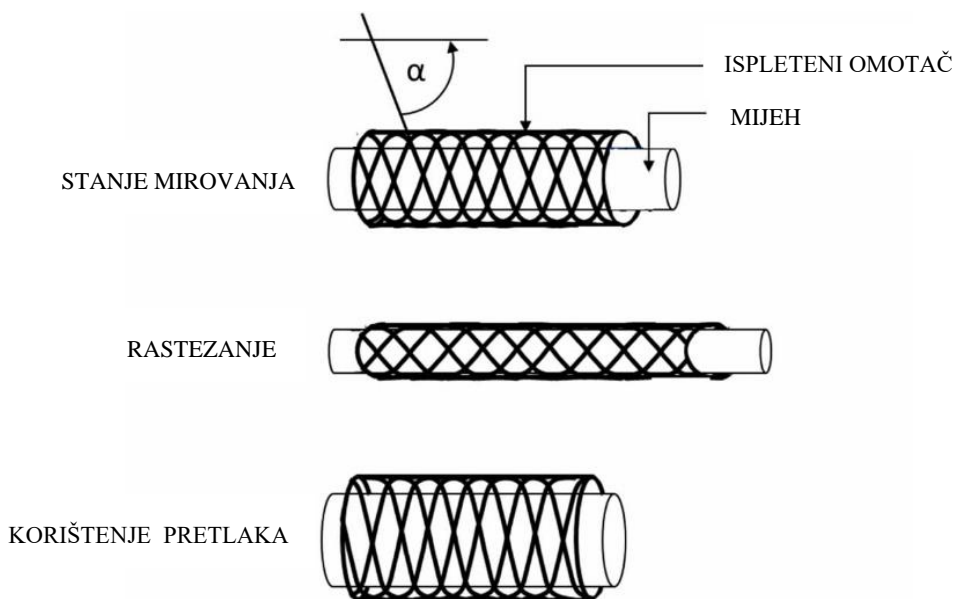
## 2.1 McKibben pneumatski mišić

McKibben pneumatski mišić se sastoji od unutarnjeg elastičnog mijeha okruženog omotačem od ispletenih nerastezljivih najlonskih vlakana, kao što je prikazano na slici 2.2. Zbog toga je sveukupna struktura promjenjiva oblika. Postoje različite inačice McKibben mišića i to sa već spomenutim ispletenim navlakama koje se mogu nalaziti s vanjske strane te okružuju mijeh ili koje su ugrađene unutar njega [4,6].

Prilikom djelovanja pretlaka unutarnji mijeh se rasteže, vlakna omotača se pomiču jedna prema drugima čime dolazi do širenja mišića u obodnom smjeru, odnosno do skraćivanja ili skupljanja po duljini. Kao rezultat toga, takav mišić može generirati vlačnu silu do nekoliko stotina N i kontrakcijsko gibanje u uzdužnom smjeru od 25 do 37% svoje izvorne duljine [7].

Prestankom djelovanja komprimiranog zraka, elastični mijeh se opušta te se vlakna pomiču jedna naspram drugoga, čime se postiže približno vraćanje mišića u svoje originalno stanje, tj. mišić poprima svoju početnu geometriju. Početni oblik mišića se ne može u potpunosti vratiti zbog histereznog ponašanja materijala te trenja između elastičnog mijeha i vanjske navlake.

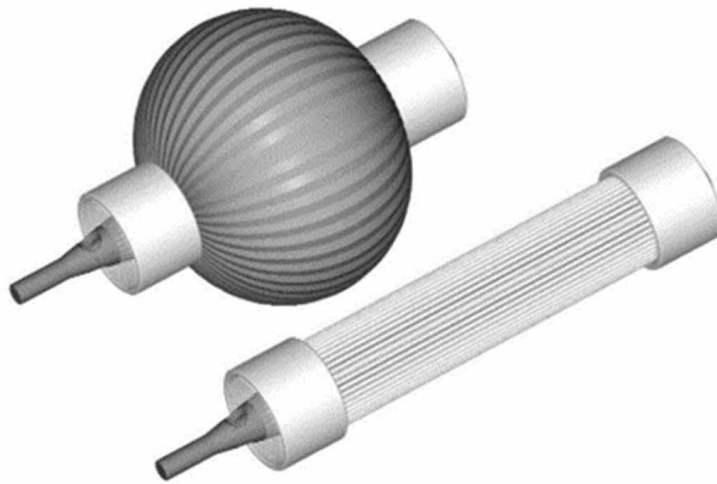
Prednost McKibben mišića je u tome što je lagan, lak za izradu, ima maksimalnu kontrakciju te odnos dužine i sile slične ljudskim mišićima [4, 6, 7].



Slika 2.2 Princip rada McKibben mišića [6]

## 2.2 Naborani pneumatski mišić

Sljedeći primjer su naborani pneumatski mišići (eng. „*pleated pneumatic artificial muscle*“, PPAM) koji su sastavljeni od membrane velike vlačne krutosti i velike fleksibilnosti. Membrana se sastoji od većeg broja nabora duž aksijalne osi te je presavijena duž svoje središnje osi i čvrsto stegnuta na krajevima gdje se nalaze vodovi za dovod zraka. Pošto membrana ima veliku vlačnu krutost, ekspanzija je najveća u sredini membrane, a postupno se smanjuje prema krajevima gdje ne može doći do ekspanzije. Zbog toga se mišić djelovanjem pretlaka napuhuje, tj. istovremeno skraćuje i izbočuje te membrana poprima oblik sfere kao što je prikazano na slici 2.3 [4, 6].



Slika 2.3 Princip rada naboranog mišića [6]

### 2.3 GRACE pneumatski aktuator

Godine 2022. uz pomoć 3D tehnologije proizvedeni su umjetni pneumatski aktuatori zvani GRACE (eng. „*GeometRy-based Actuators able to Contract and Elongate*“) te su prikazani na slici 2.4. Vidljivo je kako svaki aktuator ima oblik fleksibilne šuplje plastične loptice s naborima duž stranica. Na slici 2.5 prikazan je sustav korištenja navedenih aktuatora u obliku pneumatske ruke. Cijeli sustav je isprintan u jednom procesu ispisa pomoću komercijalnog 3D printera koristeći meku i fleksibilnu smolu. Ruka je sastavljena od osamnaest GRACE aktuatora različitih veličina i oblika geometrije čime je omogućeno savijanje prstiju, rotiranje i uvijanje zgloba, korištenjem pretlaka i podtlaka. Kada u mišić ulazi zrak dolazi do uzdužnog skupljanja mišića, a radijalno se širi, odnosno postaje kraći i deblji. Prestankom dovoda zraka i korištenjem podtlaka, mišić postaje duži i tanji. S takvim principom rada omogućeno je zatvaranje prsta kada se koristi pretlak te otvaranje prsta korištenjem podtlaka [8].

Takav aktuator ima mogućnost podizanja objekta koji je tisuću puta teži od njega samog, odnosno jedan aktuator od 8 g može podignuti teret težak 8 kg, a sve je to moguće ovisno o materijalu koji se koristi za izradu aktuatora i o debljini materijala. Pneumatska ruka teži oko 100 g, a po veličini je usporediva s ljudskom šakom [8].



*Slika 2.4 GRACE pneumatski aktuator [8]*

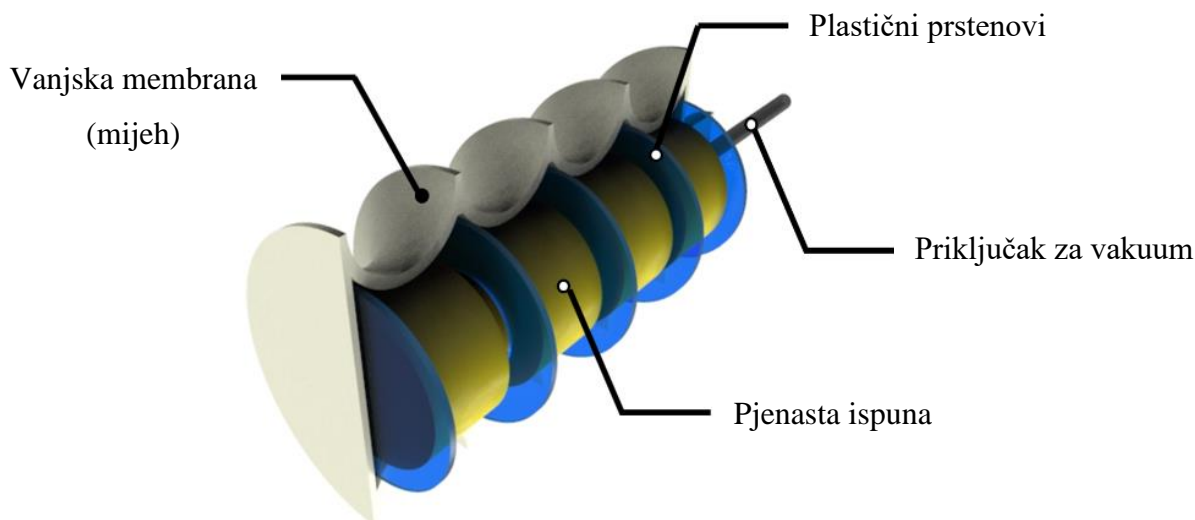


*Slika 2.5 Sustav GRACE aktuatora u obliku ljudske šake [8]*

## **2.4 Pneumatski mišić s mijehom**

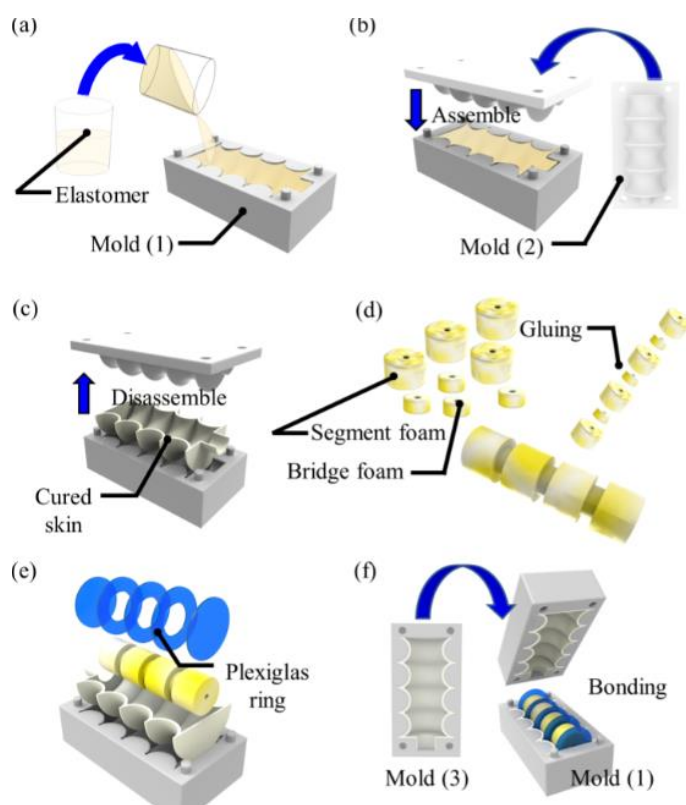
Sljedeći pneumatski mišić nije komercijalno dostupan, već je ispitan i razvijen u sklopu znanstvenog rada [9], a radi se o mišiću u obliku mijeha koji radi s podtlakom.

Sastoji se od hiperelastične vanjske membrane (mijeha) koja obavija cilindrične segmente pjenaste ispune i plastične prstenove kao što je prikazano na slici 2.6. Takva konstrukcija omogućuje postizanje velikog omjera kontrakcije i sile blokiranja, dok pjenasta ispuna pruža mehaničku potporu vanjskom opterećenju ili težini, čime se jamči stabilnost strukture tijekom aktiviranja. Također, plastični prstenovi sprječavaju neželjenu strukturnu deformaciju, tj. izvijanje, jačanjem krutosti duž uzdužne osi [9].



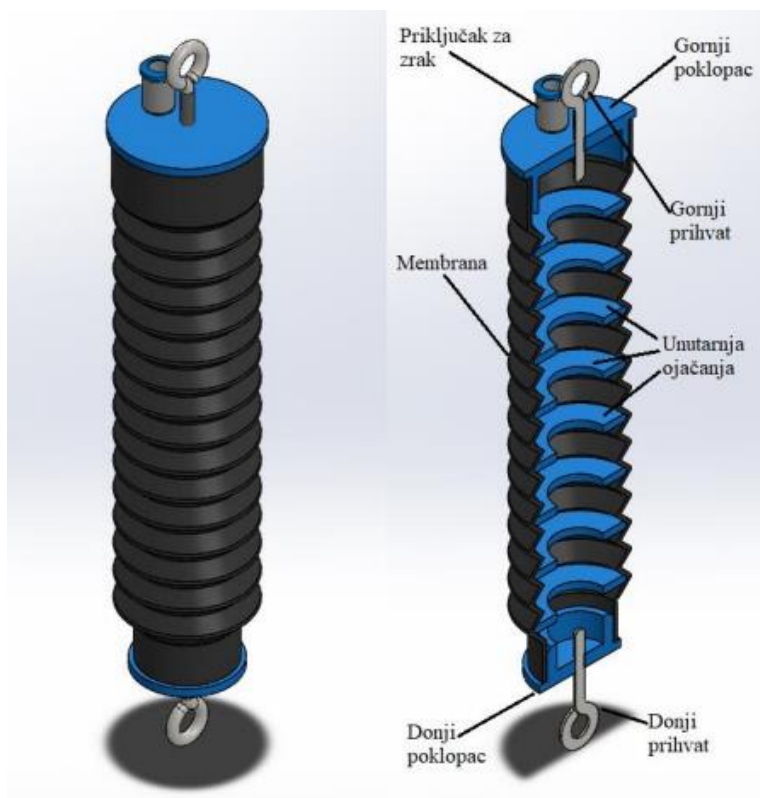
Slika 2.6 Konstrukcija pneumatskog mišića s mijehom [9]

Proces izrade takvog mišića prikazan je na slici 2.7. Za izradu dvije polovice mijeha koristio se 3D printani kalup u koji se izljevaju specifični elastomer (a) koji je odabran na temelju FEM analize gdje se utvrdilo da različiti elastomeri postižu različite deformacije, odnosno pomake, pri istom podtlaku. Zatim se sastavlja poklopac kalupa (b). Nakon stvrdnjavanja, mijeh se odvaja od kalupa (c), a pjenasti elementi se spajaju pomoću ljepila na bazi silikona (d). Pjenasti segmenti i prstenovi od pleksiglasa se ugrađuju u jednu polovicu mijeha pomoću kalupa (e) te na kraju se kalup koristi za smještaj druge polovice mijeha i za spajanje sa sastavljenom strukturom (f) [9].



Slika 2.7 Proces izrade pneumatskog mišića s mijehom [9]

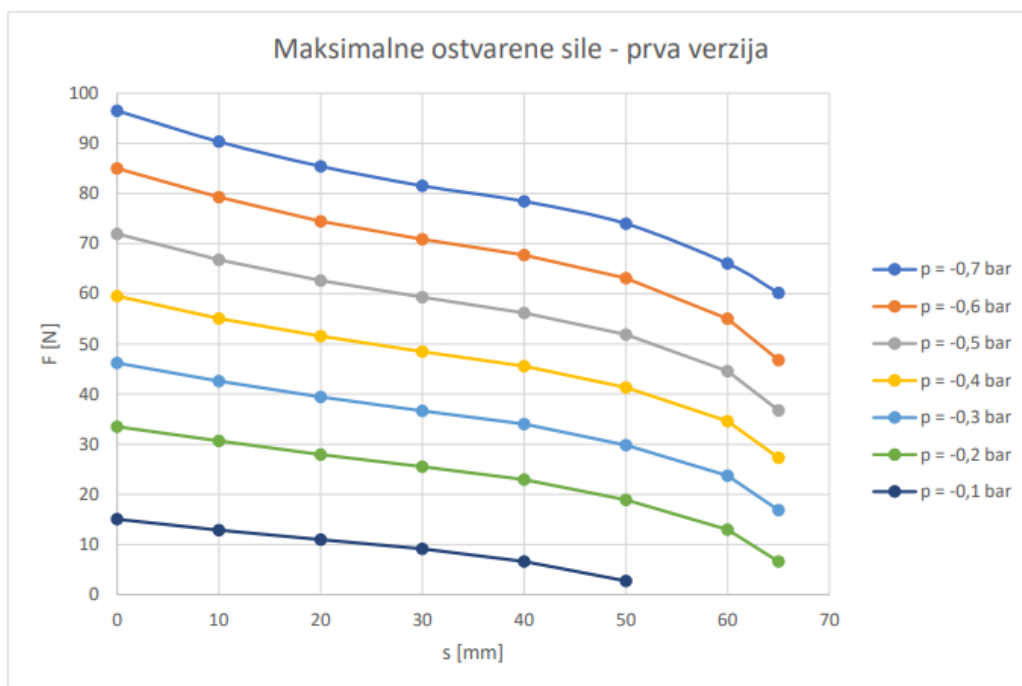
Sljedeći primjer mišića s mijehom [10, 11] je prikazan na slici 2.8. Ovdje se za vanjsku membranu koristio mijeh koji je komercijalno dostupan te ima svrhu zaštite prednjih amortizera motocikala. Svi dodatni elementi poput poklopaca i unutarnjih ojačanja su izrađeni pomoću 3D printa. Ovaj mišić radi na bazi podtlaka čijim djelovanjem dolazi do izvlačenja zraka iz mijeha i kontrakcije mišića koja ovisi o vrijednosti podtlaka. Unutarnja ojačanja su postavljena u svako drugo udubljenje kako bi se smanjila ukupna masa mišića, povećao omjer kontrakcije i spriječila radijalna deformacija.



*Slika 2.8 3D model pneumatskog mišića s pripadajućim dijelovima [10, 11]*

Ovisnost maksimalne sile o pomaku koje ostvaruje mišić pri različitim vrijednostima podtlaka prikazane su u grafu na slici 2.9. Mjerenja su vršena za svaki pomak od 10 mm, gdje je prvo ispitivanje napravljeno za referentnu duljinu mišića od 200 mm, odnosno za pomak od 0 mm gdje je mišić u potpuno izvučenom položaju. U tom slučaju maksimalna sila pri podtlaku od -0,7 bar iznosi oko 97 N. Svakim sljedećim mjerenjem gdje se mišić skraćuje vidljivo je kako sila pada. Tako za posljednje mjerenje gdje se izvršio pomak od 65 mm (duljina mišića je 135 mm) maksimalna sila iznosi 48,1 N pri podtlaku od -0,7 bar. Također je vidljivo da sila pada sa povećanjem vrijednosti podtlaka, kao i povećanjem pomaka [10].



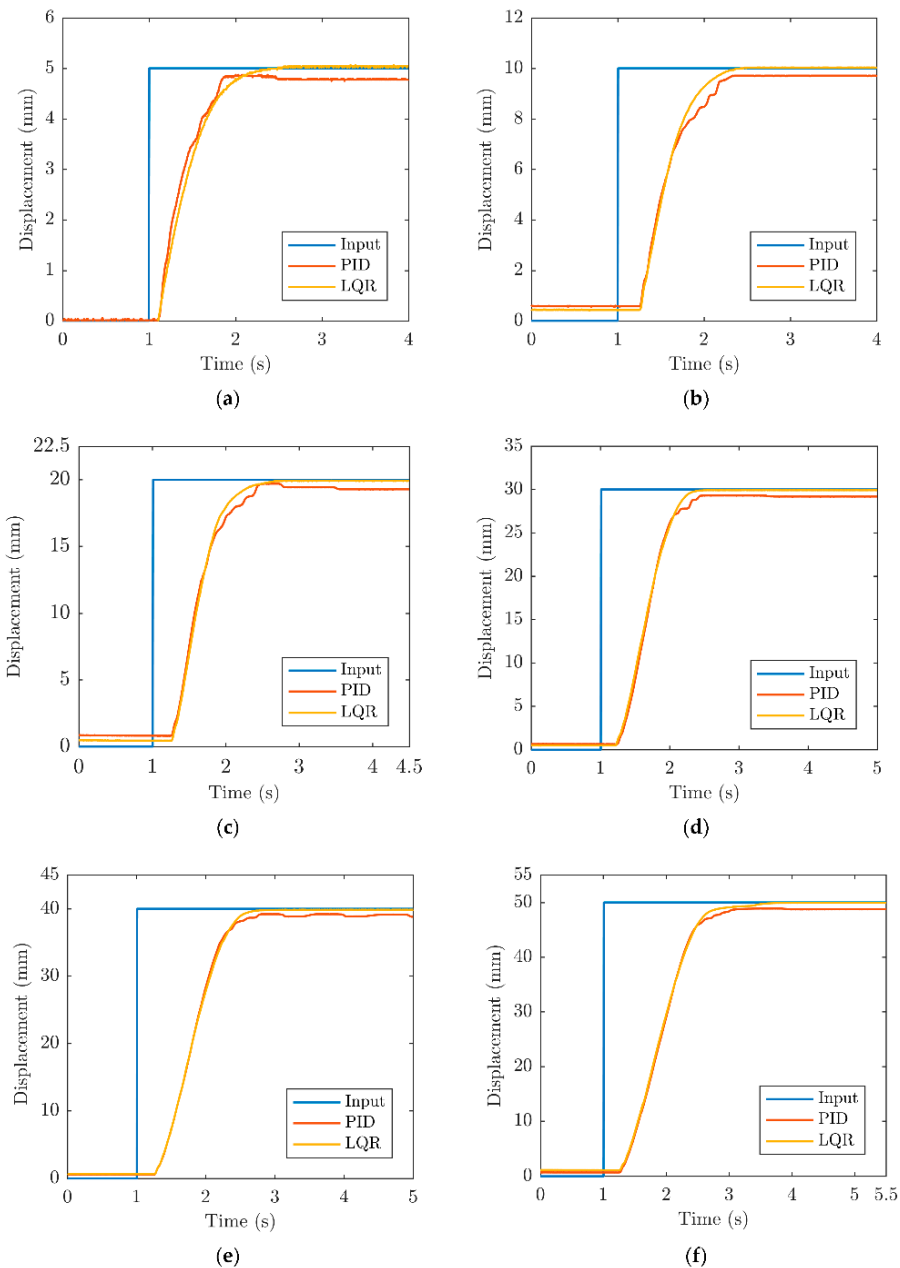


Slika 2.9 Maksimalna ostvarena sila pneumatskog mišića u ovisnosti o podtlaku i pomaku [10]

U radu [12] je implementiran sustav za regulaciju linearnog pomaka umjetnog pneumatskog mišića s mijehom pomoću PID i LQR regulacijskih metoda, čime se demonstrirala mogućnost preciznog pozicioniranja. PID i LQR regulacijski sustavi podatke s osjetnika pomaka koriste kao povratnu vezu i ulazni signal kojeg obrađuju te naposljetku daju izlazni signal na proporcionalni regulator tlaka. PID regulator se sastoji od tri osnovna djelovanja. Proporcionalno djelovanje koje sadrži sadašnju regulacijsku pogrešku, integracijsko koje sadrži prošlu i derivacijsko djelovanje koje sadrži buduću regulacijsku pogrešku. Regulacija pomoću linearnog kvadratnog regulatora ili LQR je razvijena kako bi se dobilo brže i preciznije pozicioniranje mišića. Kako bi se implementirala takva regulacija potrebno je poznavati model sustava u prostoru stanja odnosno njegovu prijenosnu funkciju. Numerički model sustava je razvijen pomoću programa MATLAB te je ondje i testiran, a za kontrolu u stvarnom vremenu korišten je program LabVIEW. Ispitane su dvije različite konfiguracije, A i B, kojima se upravlja veličinom podtlaka. Sustav A omogućuje neizravnu kontrolu podtlaka, a sustav B omogućuje izravnu kontrolu podtlaka [12].

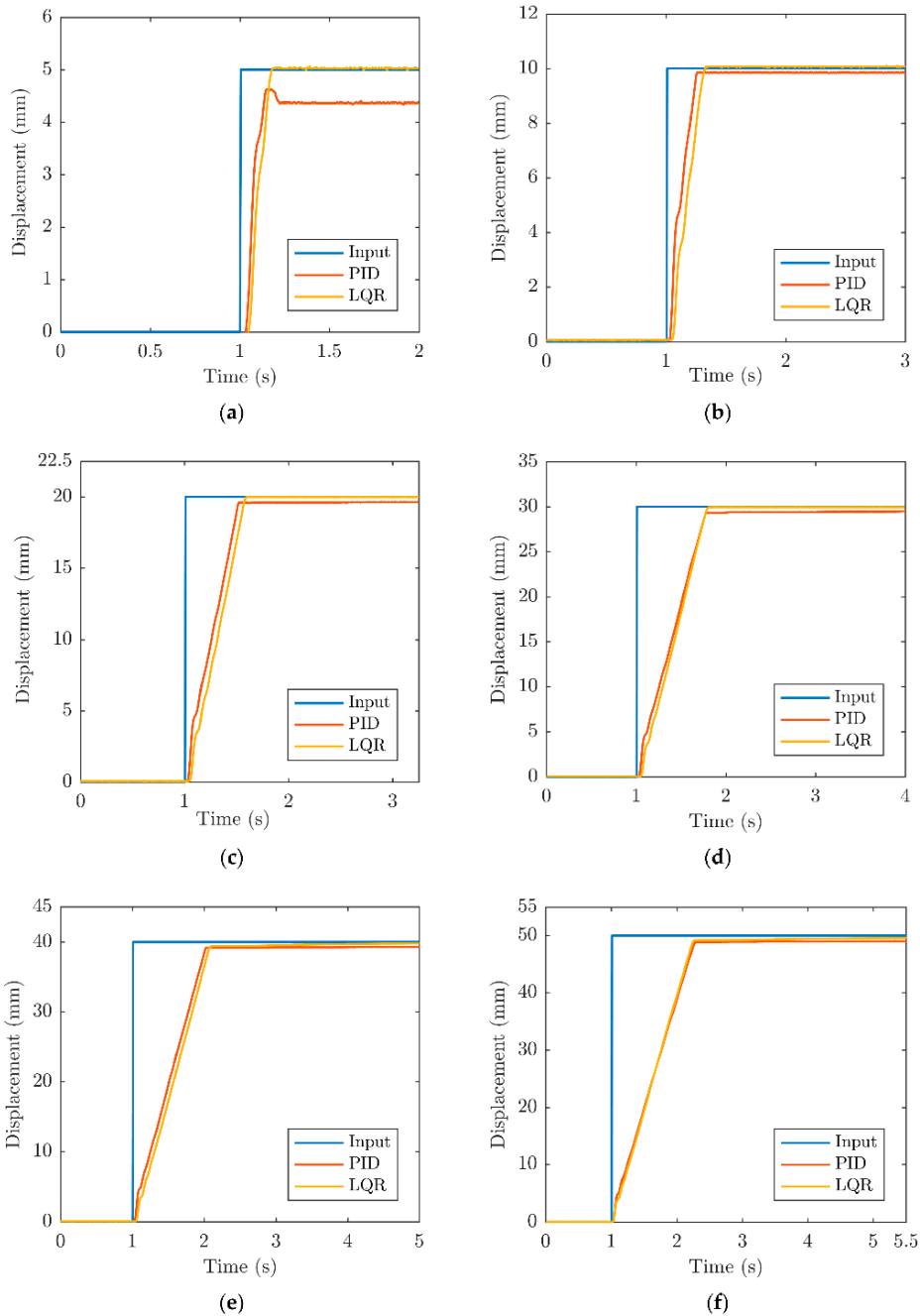
Na slici 2.10 prikazan je graf usporedbe regulacije pomaka mišića s PID i LQR metodama za sustav A gdje proporcionalni regulator mijenja izlazni tlak na ulazu u vakuumsku sapnicu (ejektor), stvarajući podtlak na izlazu sapnice. Vidljivo je vrlo slično dinamičko ponašanje pneumatskog mišića i za PID i za LQR, iako PID ima brži odziv za pomake od 5, 20 i 40 mm.

Obje regulacije daju rezultate bez prebačaja, ali kod PID regulacije su vidljive oscilacije pomaka [12].



Slika 2.10 Rezultati pozicioniranja pneumatskog mišića s PID i LQR za sustav A s pomakom: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 30 mm, e) 40 mm, f) 50 mm [12]

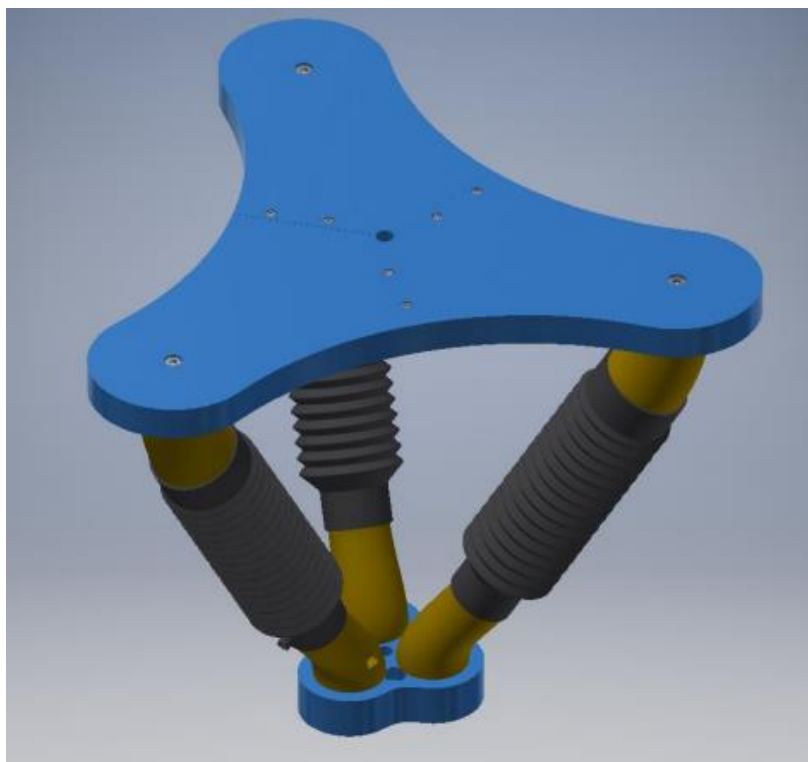
Sljedeće su izvršena ispitivanja pomoću sustava B koji omogućuje izravnu kontrolu podtlaka na izlazu iz vakuumske sapnice. Na slici 2.11 je prikazan graf usporedbe regulacije pomaka mišića s PID i LQR metodama za sustav B. Iz grafova je vidljivo kako ne dolazi do prebačaja korištenjem LQR regulacije, dok za najnižu referentnu vrijednost pomaka, PID regulator izaziva prebačaj od oko 6%. Za razliku od sustava A, kod sustava B gdje se koristi izravna kontrola podtlaka dolazi do puno bržeg odziva sustava [12].



Slika 2.11 Rezultati pozicioniranja pneumatskog mišića s PID i LQR za sustav B s pomakom: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 30 mm, e) 40 mm, f) 50 mm [12]

Na temelju dobivenog procesa provedbe i rezultata istraživanja [12] razvijena je sva potrebna programska podrška za upravljanje i regulaciju Stewartove platforme koja na sebi sadrži tri umjetna pneumatska mišića slične izvedbe [13] čiji je 3D model prikazan na slici 2.12. Također, kako bi se omogućila povratna veza za regulaciju gibanja gornje ploče platforme u sve tri prostorne koordinate korišteni su posebni senzori i to akcelerometar i žiroskop. Oba senzora su priključena na upravljački hardver čime je omogućen prijenos signala i komunikacija.

Pomicanje platforme je omogućeno pomoću tri zasebna pneumatska mišića kojima upravlja veličina podtlaka kojom se aktira pojedini mišić. Vrijednost podtlaka se mijenja na način da se u upravljačkom sučelju može zadati vrijednost prostornog pomaka točke platforme te se na taj način daju signali za pokretanje regulatora tlaka. Svaki mišić ima svoj zasebni regulator tlaka. Mjerenje točke na platformi je omogućeno korištenjem posebne kamere preko čijeg softvera je omogućeno očitavanje koordinata odabranih točaka u 3D prostoru. Time se postigao sustav preciznog pozicioniranja Stewartove platforme s pneumatskim mišićima s mijehom [13].



*Slika 2.12 3D model Stewartove platforme [13]*

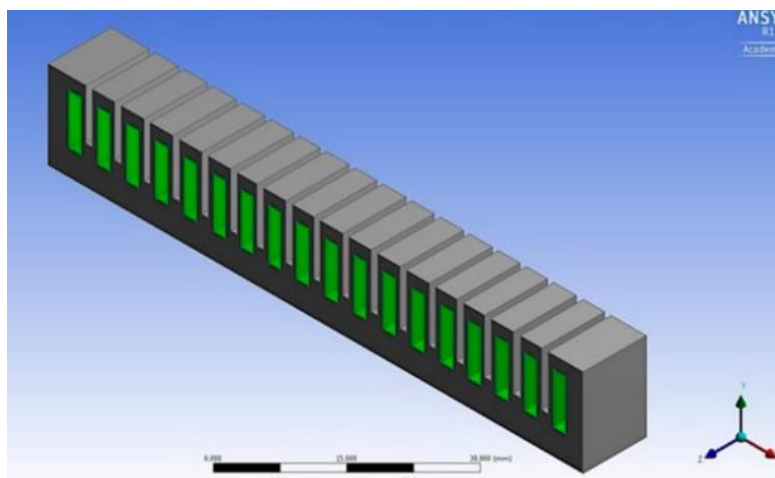
### 3. DOSADAŠNJA KONSTRUKCIJSKA RJEŠENJA PNEUMATSKIH MIŠIĆA S KUTNIM POMAKOM

Već je prije rečeno da način rada mišića ovisi o korištenju pretlaka ili podtlaka, no također je potrebno posebno oblikovati mišić kako bi se ostvario kutni pomak. To je moguće ostvariti oblikovanjem mišića tako da vanjska membrana usmjerava zrak u određenom smjeru ili da postoji posebno oblikovani unutarnji kostur za kutno gibanje. U nastavku su navedeni i opisani pojedini pneumatski mišići koji su do sada konstruirani za svrhu znanstvenih istraživanja, a ostvaruju kutni pomak pomoću pretlaka ili podtlaka.

#### 3.1 Pneumatski mišići koji rade koristeći pretlak

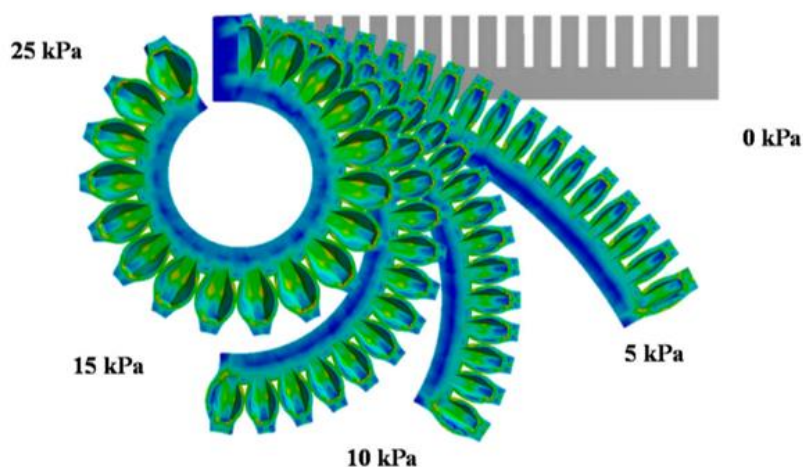
Najčešće se koristi pretlak kako bi se ostvarila sila i gibanje mišića zbog jednostavne proizvodnje stlačenog zraka i regulacije tlaka, kao i zbog velikog radnog područja. Bez obzira na njegove prednosti, postoji jedan veliki nedostatak, a to je sigurnost u radu, odnosno mogućnost eksplozije mišića.

Kod korištenja pretlaka, većinom se koristi konstrukcija pneumatskog mišića koja ima šuplje komore povezane s ostatkom mišića na donjoj strani, kao što je prikazano na slici 3.1. Ovakva struktura mišića se naziva pneumatska mreža (eng. „*pneumatic network*“). U ovom slučaju struktura te mreže se dijeli u dva sloja, gornji sloj koji je rastezljiv i donji sloj koji nije. Gornji sloj se sastoji od linearnog niza zračnih komora koje su međusobno povezane zračnim kanalom [14].



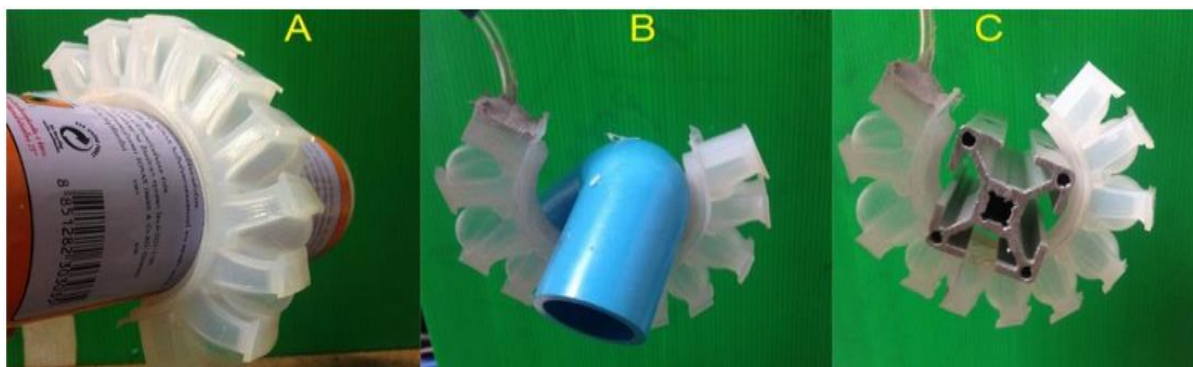
Slika 3.1 Uzdužni presjek pneumatskog mišića sa šupljim komorama [14]

Na slici 3.2 je vidljivo kako prilikom ulaska stlačenog zraka u mišić šuplje komore se pune, odnosno međusobno se šire i stiskaju, dok donji sloj ograničava istežanje u smjeru duljine mišića čime dolazi do toga da se cjelokupni pneumatski mišić zakreće za određenu vrijednost kutnog pomaka koji je proporcionalan tlaku zraka. Savijanje mišića se ostvaruje prema strani graničnog donjeg sloja. Ovakav tip pneumatskog mišića se obično izrađuje od silikona ili sličnih elastičnih materijala, pošto se šuplje komore proširuju pod utjecajem zraka. Prestankom dotoka zraka, komore se prazne i mišić se vraća u prvobitni položaj. Glavni nedostatak ovakvog mišića je u relativno maloj proizvedenoj sili, što ovisi o tipu materijala. Razlog korištenja silikona je zbog toga što se može oblikovati na različite oblike u različitim varijantama [14].



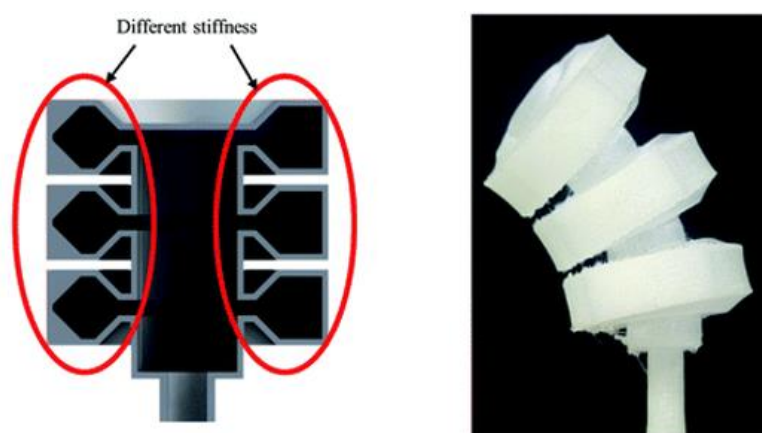
Slika 3.2 Kut savijanja pneumatskog mišića pod različitim ulaznim pritiskom zraka [14]

Sljedeći primjer je silikonski pneumatski mišić sličan prijašnjem opisanom koji radi na bazi pretlaka koje je izrađen u znanstvenom radu [15]. Njegova primjena u ovom slučaju bi bila za podizanje raznih objekata puno većih i težih od njega samoga, kao i objekata različitih oblika, zbog mogućnosti savijanja mišića, kao što je vidljivo na slici 3.3.



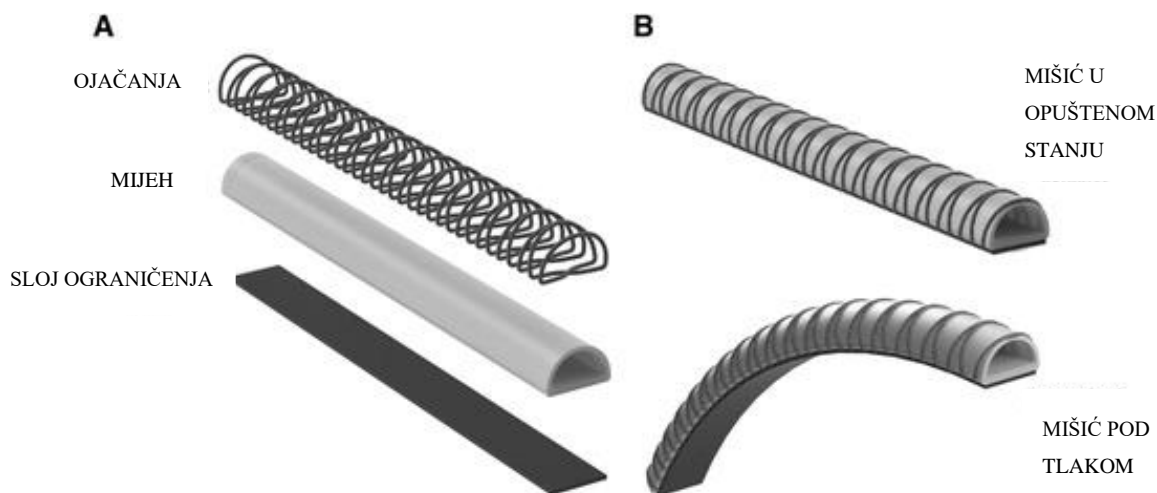
Slika 3.3 Hvatanje i podizanje različitih objekata pomoću pneumatskog mišića [15]

Još jedan primjer mišića koji radi na principu pretlaka je umjetni pneumatski mišić visokog omjera kontrakcije ili HRCPAM (eng. „*high-contraction ratio pneumatic artificial muscle*“), prikazan na slici 3.4. Mišić se sastoji od centralne komore na koju se nadovezuju vanjske komore u koje ulazi stlačen zrak. Vanjske komore s jedne strane mišića su izvedene s debljom stjenkom, a s druge strane tanjom stjenkom što je vidljivo na slici 3.4 lijevo. Kako bi se postigla razlika u debljini vanjskih stjenka, centralne komore su izvedene sa različitim oblikom s jedne i druge strane. Pod utjecajem stlačenog zraka vanjske komore se šire, a one s debljom stjenkom se pritišću jedna na drugu, što omogućuje kutno gibanje mišića, dok s druge strane mišića komore se pune zrakom sve dok se ne napune ili dok mišić ne stigne u krajnji položaj kao što se vidi na slici 3.4 desno [16].



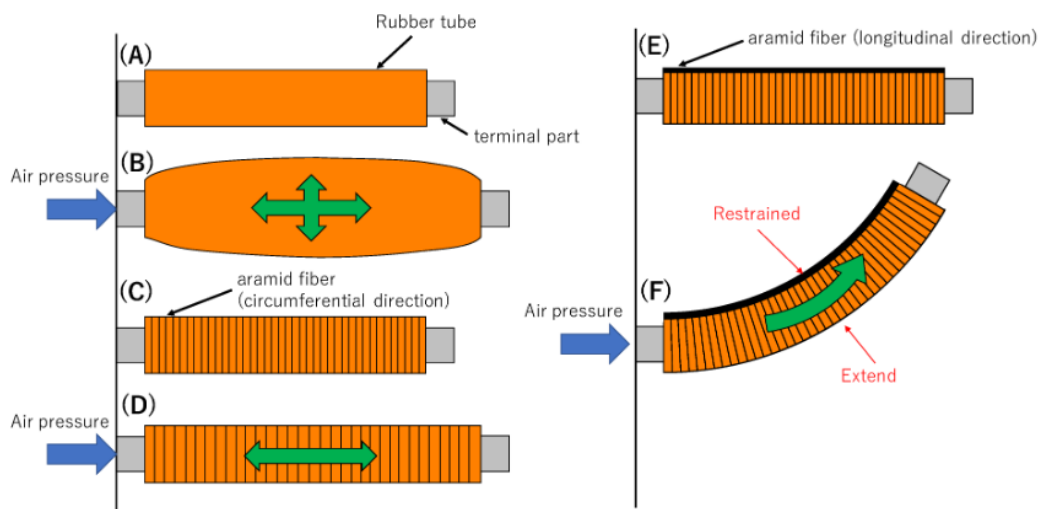
Slika 3.4 HRCPAM umjetni pneumatski mišić [16]

Sljedeći primjer je meki savitljivi mišić ojačan vlaknima (eng. „*fiber-reinforced actuator*“), prikazan na slici 3.5. Konstrukcija se sastoji od elastomernog mijeha omotanog ojačanjima koja ne dozvoljavaju rastezanje. Kada u mijeh uđe stlačen zrak, on se napuhuje te se pokušava proširiti na sve strane. Kako bi se ograničilo proširivanje, odnosno spriječilo radijalno širenje te omogućilo širenje samo u aksijalnom smjeru, mijeh se omata nerastezljivim vlaknima. Kako bi došlo do savijanja aktuatora, potrebno je dodati jednu pločicu nerastezljivog materijala čime se sprječava širenje mišića u području te pločice. U ovom slučaju, položaj ojačanja definira vrstu kretanja koje se postiže kada je mijeh napuhan. Odabirom odgovarajućeg položaja moguće je postići kombinacije savijanja, istezanja i uvijanja [17].



Slika 3.5 Meki savitljivi mišić ojačan vlaknima [17]

Korištenje ograničenja kako bi se dobilo savijanje aktuatora primijenjeno je i na sljedećem primjeru kod umjetnog pneumatskog mišića na tipu savijanja ili BPAM aktuator (eng. „*bending-type pneumatic artificial muscle*“) čiji je princip rada prikazan na slici 3.6. Aktuator se sastoji od gumene cijevi i aramidnog vlakna. U slučaju kada se aramidno vlakno ne bi koristilo u izvedbi, gumena cijev (A) prilikom korištenja pretlaka bi se širila u svim smjerovima (B). Kako bi se to izbjeglo, guma se omota aramidnim vlaknom koje se širi u radijalnom smjeru (C). Zbog aramidnog vlakna guma se širi samo u aksijalnom smjeru primjenom tlaka zraka (D). Kako bi se ograničilo aksijalno istežanje gume koristi se aramidno vlakno širine 8 mm postavljeno na jednu stranu mišića po njegovoj dužini (E). Zbog svega navedenog, odnosno zbog razlike u rastezanju gume nakon primjene tlaka zraka, dolazi do savijanja mišića u smjeru u kojem je aksijalna duljina ograničena (F) [18].



Slika 3.6 Shema rada BPAM mišića [18]

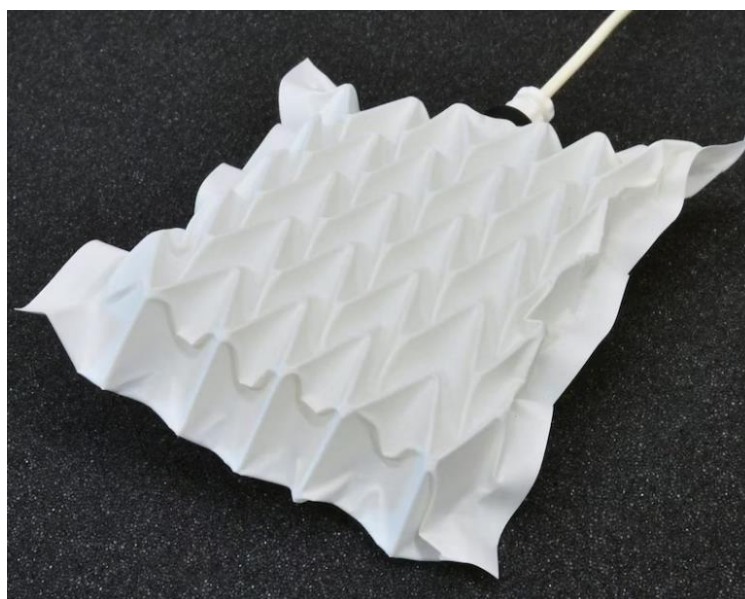


### 3.2 Pneumatski mišići koji rade koristeći podtlak

Drugi tip pneumatskog mišića s kutnim pomakom je onaj koji ostvaruje kutni pomak pod utjecajem podtlaka. Mišići koji rade na podtlaku imaju prednost u većoj sigurnosti u radu zbog maksimalne vrijednosti podtlaka od  $p = -1$  bar, što je vrijednost apsolutnog vakuuma. Zbog negativne vrijednosti tlaka ne postoji mogućnost eksplozije prilikom rada. Danas su takvi mišići još uvijek u fazi istraživanja i razvoja.

Kako bi se konstruirao mišić na bazi podtlaka koji ostvaruje kutni pomak, gibanje se može postići konstrukcijom vanjske membrane mišića, no češće se postiže točno određenim oblikom unutarnjeg kostura. Unutarnji kostur služi kao potporanj oko kojeg se membrana savija i deformira pod utjecajem podtlaka te tako ostvaruje kutni pomak. Ovakvi mišići se često koriste za prihvat i podizanje tereta puno veće mase od samog mišića. U nastavku su opisani neki od umjetnih pneumatskih mišića koji ostvaruju kutni pomak na bazi podtlaka koji su još u fazi istraživanja i razvijanja.

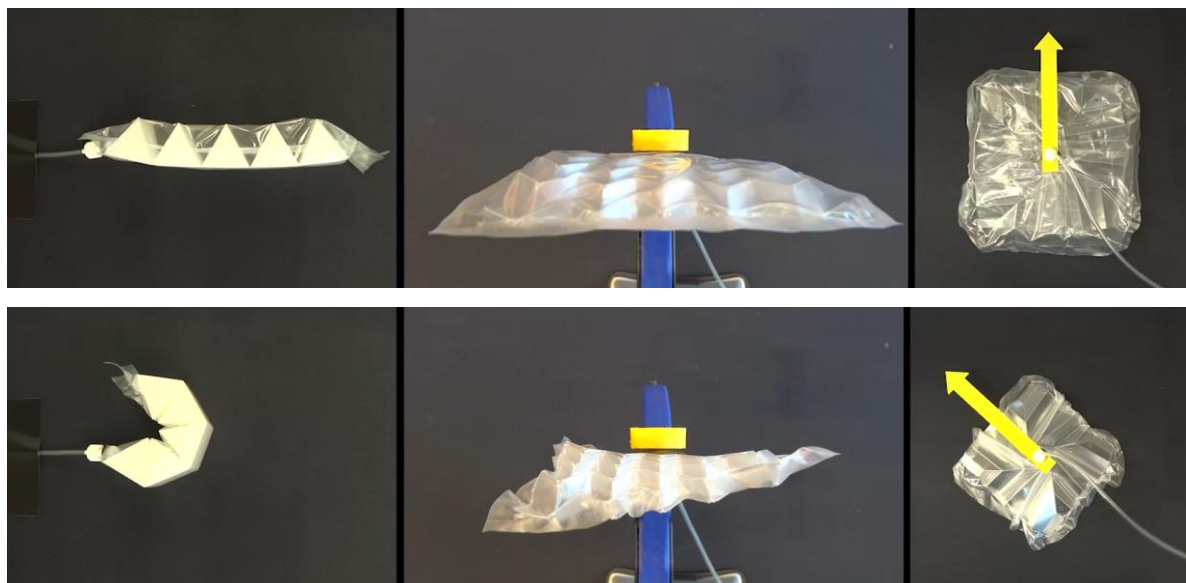
Prvi primjer su FOAM mišići (eng. „*Fluid-driven origami-inspired artificial muscles*“), odnosno umjetni mišići nadahnuti origamijem. Njima je moguće postići podizanje objekata koji su do 1000 puta teži od njihove vlastite težine. Sastavljeni su od tri osnovne komponente unutarnjeg mehaničkog okvira koji definira interakciju stlačivog kostura i fleksibilnog omotača ili membrane. Kostur je moguće izraditi u različitim oblicima korištenjem različitih materijala poput metalne zavojnice ili tanke plastične pločice prethodno presavijene u određeni uzorak. Na slici 3.7 vidljiva je strukturna geometrija kostura čime se određuje kretanje mišića [19].



Slika 3.7 Strukturna geometrija kostura FOAM mišića [19]

Poput origamija koji se savija duž određenog oblika, korištenje vakuuma reverzibilno namješta kostur mišića u svoj konačni oblik, čime su dopušteni pokreti duž višestrukih osi, poput kontrakcije, savijanja i uvijanja, kao što je prikazano na slici 3.8 [19].

Ovakvi mišići mogu kontrahirati preko 90% svoje početne duljine. Zbog svoje strukture izuzetno su lagani, jeftini i kao što je već prije spomenuto imaju veliki omjer kontrakcije. FOAM mišići se mogu primijeniti u medicini kao minijaturni medicinski uređaji za operacije i određene terapije, ali isto tako i kao velike sklopive strukture za istraživanje oceana i svemira [19].

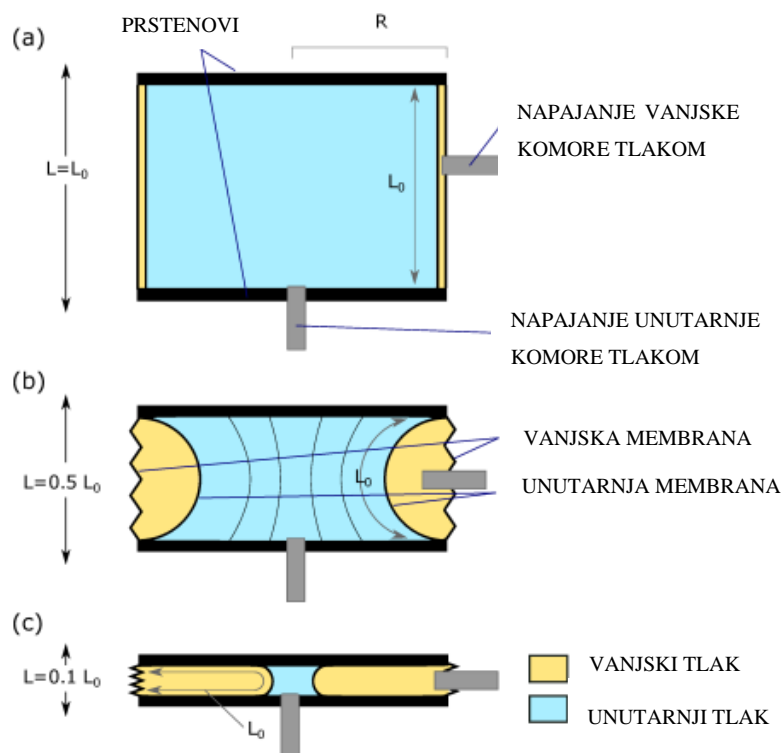


Slika 3.8 Različite vrste FOAM mišića koji ostvaruju različite vrste gibanja [19]

Sljedeći primjer je APAM mišić (eng. „*Antagonistic Pneumatic Artificial Muscle*“), odnosno antagonistički umjetni pneumatski mišić. Za njegovo pokretanje se ne koristi samo podtlak već kombinacija pretlaka i podtlaka. Sastoji se od dvije cijevi, jedne unutar druge, koje su izrađene od tankog, minimalno rastezljivog materijala. Ovako postavljenim cijevima, dobivaju se dvije zračne komore, unutarnja koja se nalazi unutar unutarnje cijevi i vanjska koja se nalazi između unutarnje i vanjske cijevi. Time je moguće kontrolirati različiti tlak, jedan unutar jedne komore i drugi unutar druge komore. Kruti prstenovi su postavljeni duž cijevi kako bi se osigurao konstantan promjer unutarnje postavljene cijevi. Sve te komponente tako postavljene čine jednu ćeliju mišića te ih je moguće slagati jedne na druge kako bi se produžila visina mišića [20].

Na slici 3.9 moguće je vidjeti poprečni presjek jedne ćelije mišića za tri različite dužine prilikom istezanja. Ako je ukupna duljina mišića ( $L$ ) manja od duljine membrane ( $L_0$ ) te ako je tlak u vanjskoj komori veći od tlaka u unutarnjoj komori, vanjska membrana će se nabrati duž aksijalnog smjera (označeno žutom bojom), dok će promjer ostati konstantan. Unutarnja membrana će se izbočiti prema unutra (označeno plavom bojom), stvarajući oblik pješčanog sata.

Ta unutarnja membrana će se nabrati duž obodnog smjera. Pošto je moguće mijenjati tlakove i u unutarnjoj i u vanjskoj zračnoj komori dolazi do stvaranja antagonističkih sila koje djeluju na istom tijelu sa istim intenzitetom, ali u suprotnim smjerovima. U slučaju unutarnje komore, ako se koristi pretlak dolazi do stvaranja sile produživanja, a ako se koristi podtlak dolazi do stvaranja sile uvlačenja. Kod vanjske komore to nije slučaj, gdje produživanje ili uvlačenje ovisi isključivo o visini mišića [20].



Slika 3.9 Princip rada APAM mišića [20]

Za pokretanje većine pneumatskih mišića kojima se želi postići savijanje koristi se ili pretlak ili podtlak te se na temelju toga prilagođava dizajn mišića. No u slučaju APAM mišića koristi se i pretlak i podtlak kako bi se ostvarilo savijanje. Na slici 3.10 vidljiv je APAM mišić koji je sastavljen od tri ćelije, odnosno ima tri odvojene vanjske zračne komore koje čine ukupnu duljinu mišića. Jedna od tih tri vanjskih komora je priključena na pretlak. Na lijevoj slici tlak u unutarnjoj komori je pozitivan, odnosno koristi se pretlak, dok je tlak na desnoj slici u unutarnjoj komori negativan, odnosno koristi se podtlak te dolazi do savijanja mišića zbog razlike u tlakovima unutarnje i vanjske komore. Kada je mišić dugačak, vanjska komora pod tlakom djeluje kontraktno, a kada je mišić kratak, napuhana vanjska komora vrši potisnu silu, čime se mijenja zakrivljenost [20].

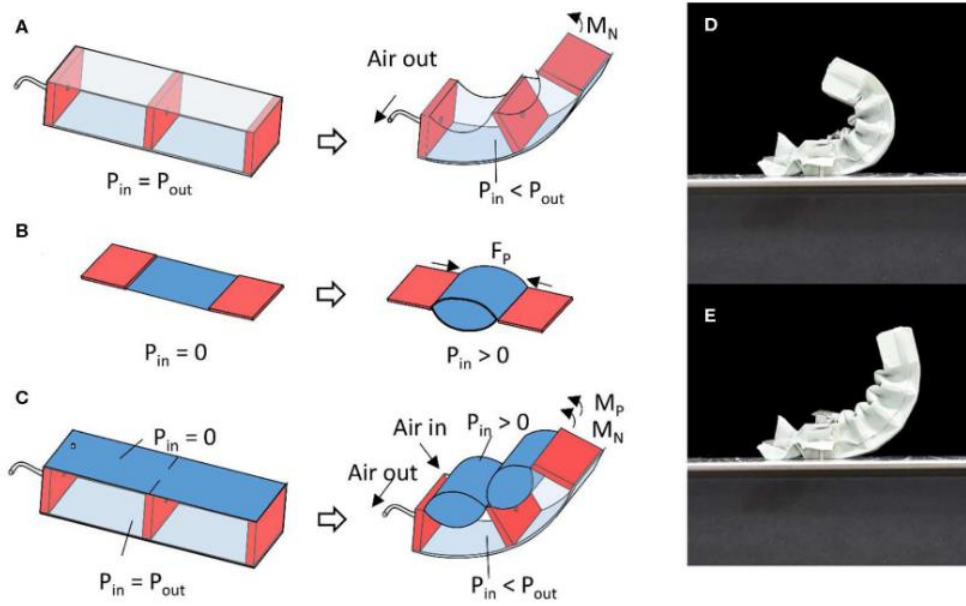
Ovakvim dizajnom mišića omogućeno je drastično mijenjanje dužine mišića, odnosno njegovo skraćivanje i produživanje, kao i primjena antagonističkih sila pošto su zračne komore zasebno kontrolirane [20].



Slika 3.10 Rad APAM mišića [20]

Još jedan primjer mišića kod kojeg se koristi pretlak i podtlak, odnosno pozitivni i negativni tlak (eng. „*positive and negative pressure*“, PNP), da bi se ostvarilo savijanje je opisan u znanstvenom radu [21]. Pneumatski mišić se u ovom slučaju sastoji od jedne strukture koja sadrži dva aktuatora gdje jedan radi na pretlak, a drugi na podtlak te se na taj način ostvaruju savijanje.

Na slici 3.11 prikazan je princip rada mišića. Aktuator koji radi na podtlak se sastoji od zatvorene tekstilne komore koja sadrži polukrutu polikarbonatnu ploču na koju su pričvršćene krute stjenke izrađene tehnologijom 3D printa. Uključivanjem podtlaka uzrokuje se guranje tekstila oko krutih stjenki i savijanje polukrute ploče (slika 3.11 A). Aktuator koji radi na pretlak je izrađen od termoplastične najlonske tkanine obložene poliuretanom koja izgleda poput vrećice te se nalazi između krajeva krutih stjenki prijašnje opisanog aktuatora koji radi na podtlak. Napuhivanjem vrećice dolazi do stvaranja kontrakcije, odnosno povlačenja slobodnih krajeva krutih stjenki (slika 3.11 B). Istodobnim aktiviranjem komora s pretlakom i podtlakom dolazi do stvaranja savijanja cjelokupne strukture (slika 3.11 C). Na istoj slici desno je prikazana razlika u maksimalnom kutu savijanja koje ostvaruje mišić gdje je aktiviran samo aktuator koji radi na podtlak (D) i savijanje koje ostvaruje mišić kada su aktivirana oba aktuatora sa pretlakom i podtlakom (E). U slučaju ako se želi postići veliki kut savijanja dovoljno je koristiti samo aktuator koji radi na podtlak (D), no ako se želi postići velika sila savijanja pri različitim kutovima koji su manji od prijašnjeg, prednost ima mišić koji radi s pozitivnim i s negativnim tlakom (E) [21].



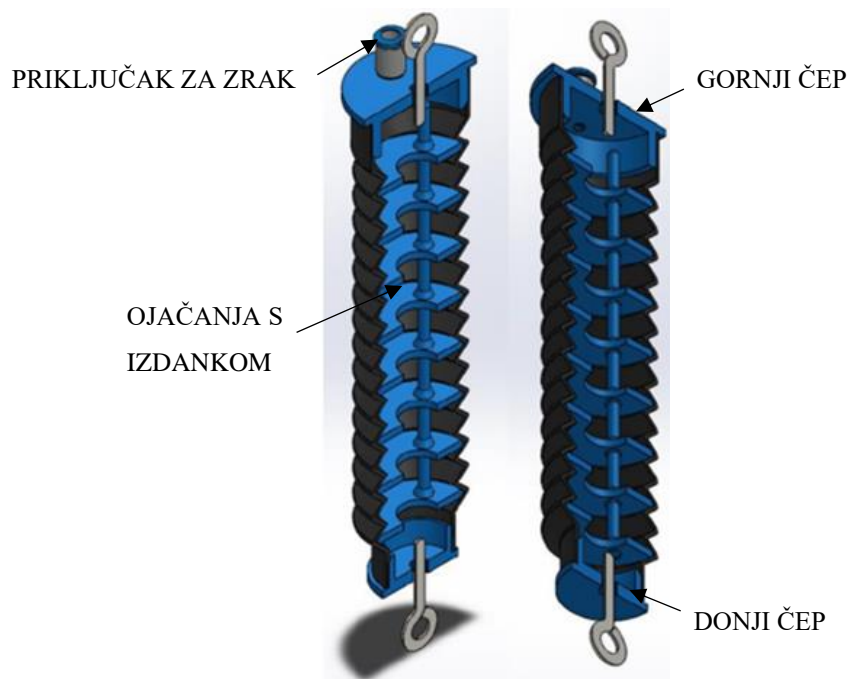
Slika 3.11 Princip rada mišića s pozitivnim i negativnim tlakom [21]

## 4. KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE PNEUMATSKOG MIŠIĆA S KUTNIM POMAKOM

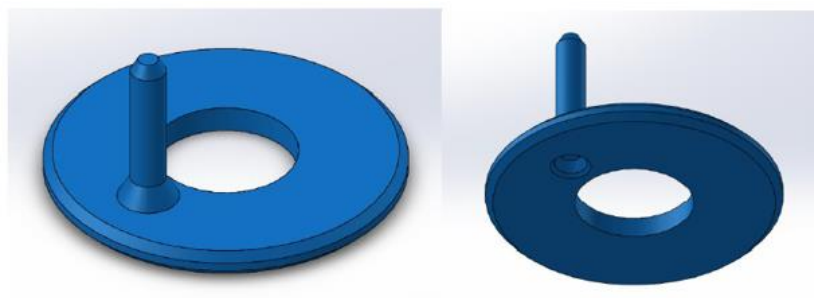
Nakon proučavanja različitih vrsta pneumatskih mišića, odabrano konstrukcijsko rješenje pneumatskog mišića je umjetni pneumatski mišić s mijehom (eng. „*bellow type PMA*“). Stjenka pneumatskog mišića s mijehom se sastoji od jednog homogenog materijala koji je u ovom slučaju guma. Glavna prednost ovakvog pneumatskog mišića je jednostavnost konstrukcije i niska cijena pošto se mišić sastoji od gumenog mijeha korištenog za amortizer motocikla i svih ostalih elemenata koji se mogu izraditi tehnologijom 3D printa. Također, prilikom rada mišića, razvija se velika sila u odnosu na njegovu dimenziju. Isto tako, za vraćanje mišića u prvobitni položaj nije potreban dodatni sustav, već je to omogućeno samo pri prestanku protoka stlačenog zraka ili pod težinom tereta koji ta konstrukcija podiže.

Na slici 4.1 prikazano je preliminarno konstrukcijsko rješenje umjetnog pneumatskog mišića s kutnim pomakom temeljeno na ideji iz diplomskog rada [10] koji koristi podtlak kako bi ostvario kutni pomak. Unutarnja strana mišića sastoji se od žljebova koje je potrebno ispuniti. Ispunjavaju se sa izrađenim ojačanjima u obliku prstenova. Time se dobiva krutost konstrukcije. U ovom slučaju potrebno je osmisliti način kako ostvariti kutni pomak. Na kraju su izrađeni prstenovi s izdancima na jednoj strani, dok je na stražnjoj strani prstena udubljenje kako bi s tim izdancima prstenovi nalijegali jedni na druge sa sigurnošću da se konstrukcija neće izvijati. Na slici 4.2 su prikazani izrađeni prstenovi pomoću 3D printa. Svi ti prstenovi postavljeni unutar mijeha čine kostur pneumatskog mišića. Također, svi prstenovi moraju biti okrenuti jednako kako bi se izdanci podudarali i stvarali kut uz pomoć otpora i njihovog međusobnog dodira kada se mišić aktira.

Gornju i donju stranu mišića potrebno je dobro zatvoriti, odnosno ostvariti brtvljenje kako zrak ne bi izlazio, a to je omogućeno izradom čepova. Čepovi su isprintani pomoću 3D tehnologije sa provrtima koji idu kroz njihovu sredinu kako bi se mogli staviti vijci koji služe za učvršćivanje konstrukcije na plohu za ispitivanje. Također, potreban je dodatan provrt na jednom od čepova kako bi se spojila cjevčica za dotok zraka, odnosno za spajanje na podtlak.



*Slika 4.1 Preliminarno konstrukcijsko rješenje umjetnog pneumatskog mišića sa kutnim pomakom [10]*



*Slika 4.2 3D printani prstenovi s izdankom [10]*

Pneumatski mišić se zatim učvrsti na radni stol, a preko priključka na poklopcu mišića se spaja s komprimiranim zrakom. Stvaranjem podtlaka u sustavu, pneumatski mišić se uvlači, a kako su prstenovi poduprti jedan na drugog pomoću izdanaka, oni stvaraju kutno gibanje mišića. Prekidom podtlaka unutar mišića, on se vraća u prvobitni položaj zbog elastičnosti gumenog mijeha.

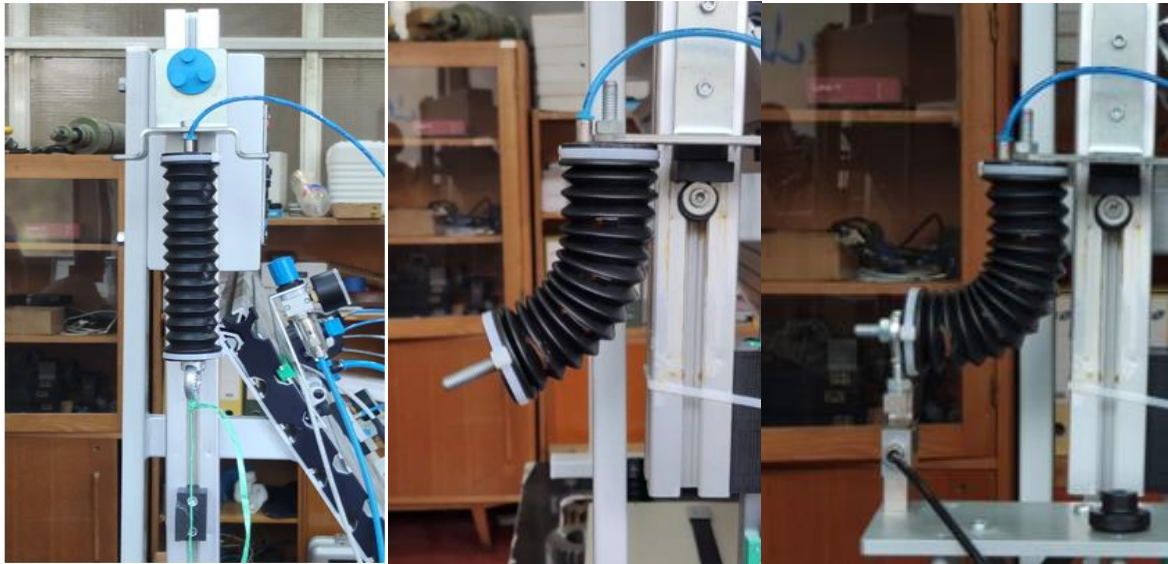
Pneumatski mišić direktno je na gornjem kraju učvršćen za ispitni uređaj na laboratorijskom stolu dok mu je donji kraj u potpunosti slobodan te se na njemu vrši mjerenje sile, kao što je prikazano na slici 4.3. Senzor sile je na jednom kraju pričvršćen za aluminijski nosač na laboratorijskom stolu, a na drugom kraju je preko užeta spojen na donji dio pneumatskog mišića.



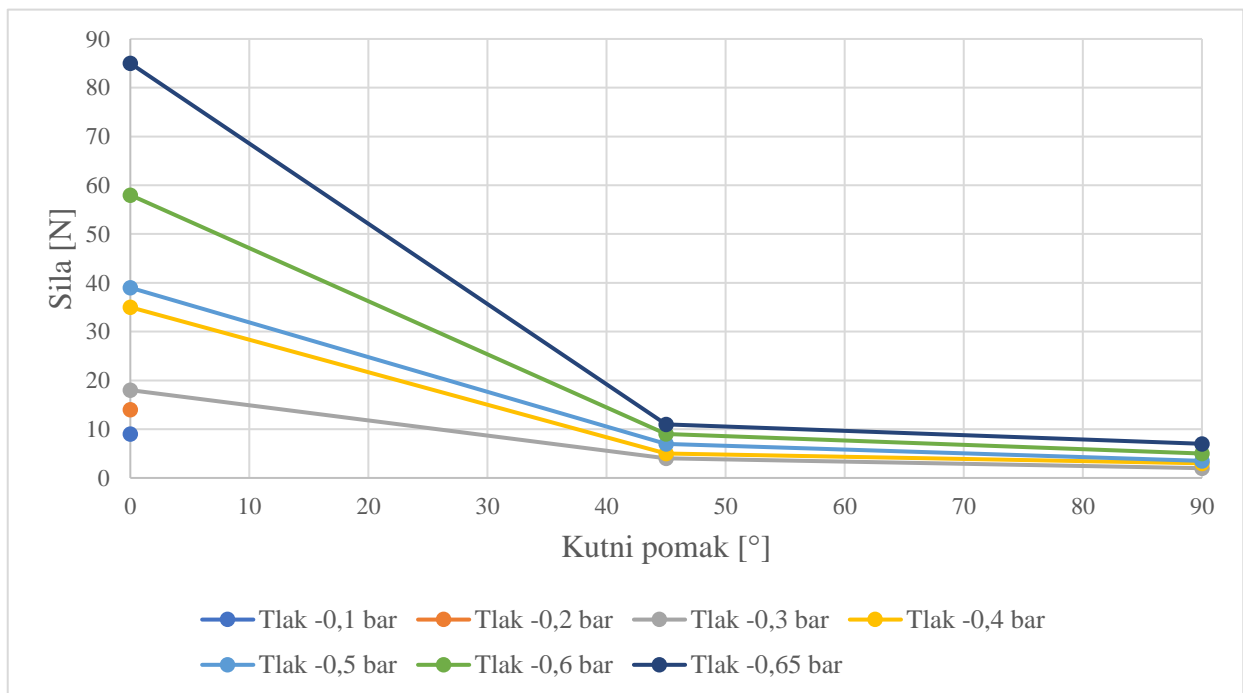
*Slika 4.3 Prikaz montaže mišića i povezanosti sa senzorom*

Provedena su preliminarna mjerenja kako bi se isprobao mišić i njegovo kutno djelovanje. Prvo je izmjerena blokirajuća sila koju mišić ostvaruje prilikom svoga rada za različite kutne pomake. Kao što je već prije rečeno, za pokretanje mišića koristila se pneumatska oprema, a za mjerenje sile senzor i špaga. U petom poglavlju detaljno je objašnjena korištena pneumatska i ostala oprema koja je potrebna za upravljanje mišićem. Sile koje ostvaruje mišić ispitane su za kutove od  $0^\circ$ , odnosno za ispruženo stanje mišića, kao i za  $45^\circ$  i  $90^\circ$  pri različitim vrijednostima podtlaka. Kutovi za koje je izvedeno mjerenje prikazani su na slici 4.4, dok je na slici 4.5 prikazan graf koji prikazuje dobivene sile u ovisnosti o korištenoj vrijednosti podtlaka i kutnog pomaka mišića. Sa grafa je vidljivo da je kutne pomake od  $45^\circ$  i  $90^\circ$  moguće postići tek pri podtlaku od - 0,3 bar. Također, vidljivo je kako se pri porastu podtlaka maksimalne ostvarive sile drastično smanjuju.





Slika 4.4 Mjerenje sile pneumatskog mišića za kutove od 0° (lijevo), 45° (sredina) i 90° (desno)

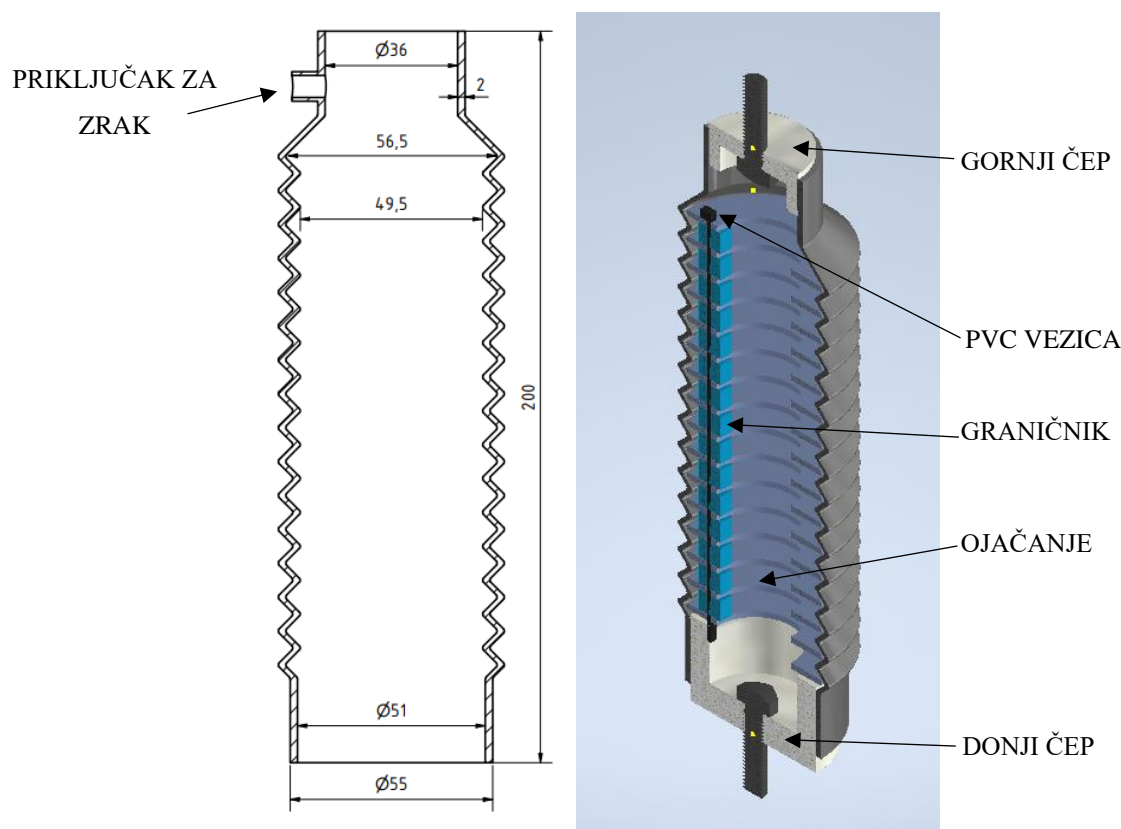


Slika 4.5 Odnos sile i kutnog pomaka mišića pri različitim podtlacima

Sa grafa na slici 4.5 je vidljivo kako je najveći ostvarivi podtlak koji služi za pokretanje mišića u ovom slučaju bio -0,65 bar jer je prilikom rada mišića pri većim vrijednostima podtlaka dolazilo do izvrtanja mišića, kao i do pucanja izdanka na prstenovima unutar mišića zbog toga što izdanci nisu dovoljno podatljivi. Također, nakon samo nekoliko ispitivanja došlo bi do izljetanja izdanka iz udubine na drugom ojačanju i čak do pucanja i oštećenja izdanci. Prilikom

izvrtanja mišića, ojačanja sa izdancima više nisu bila poravnata te bi ih se zbog toga moralo ponovno izvaditi iz mišića i poravnati jednog po jednog, čime se gubilo na vremenu.

Pošto su ojačanja sa izdankom bila lomljiva i nisu podnijela veće sile, bilo je potrebno osmisliti novo konstrukcijsko rješenje. Prvo je odlučeno promijeniti korišteni gumeni mijeh sa novim mijehom većih dimenzija, kao što je prikazano na slici 4.6. Na istoj slici s desne strane prikazan je zamišljeni novi 3D model konstrukcijskog rješenja izrađen u programu Inventor sa svim dodanim elementima kako bi se dobilo zadovoljavajuće rješenje u ovisnosti o radu mišića.

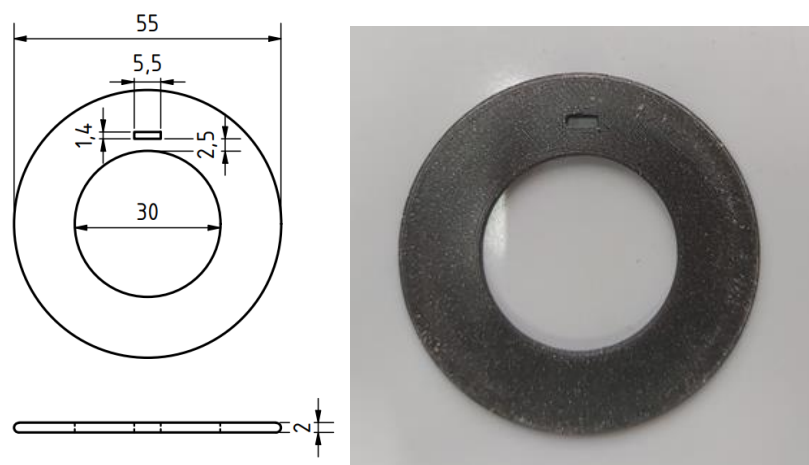


Slika 4.6 Dimenzije (lijevo) nove konstrukcije i 3D prikaz (desno) umjetnog pneumatskog mišića sa kutnim pomakom

Prvo se započelo sa izmjenom ojačanja i odabirom PVC vezice za postizanje kutnog pomaka na način da su nova prstenasta ojačanja isprintana kao prstenovi bez izdanka, već samo sa pravokutnim provrtom dimenzija 5,5 x 1,4 mm na gornjem kraju kako bi se kroz njih mogla provući korištena PVC vezica. Na ovakav način vezica zamjenjuje izdanke na ojačanjima koja su također služila za postizanje kutnog pomaka. Vezicom se onemogućilo izvrtanje mišića zbog svoje krutosti i ograničenom podatljivosti. Na sličan način se postizalo savijanje mišića u prije opisanom BPAM mišiću [18] u trećem poglavlju gdje je za postizanje kutnog pomaka potrebno ograničiti jednu stranu aktuatora. Razlika između ovog mišića gdje se koristi PVC vezica i prije opisanog

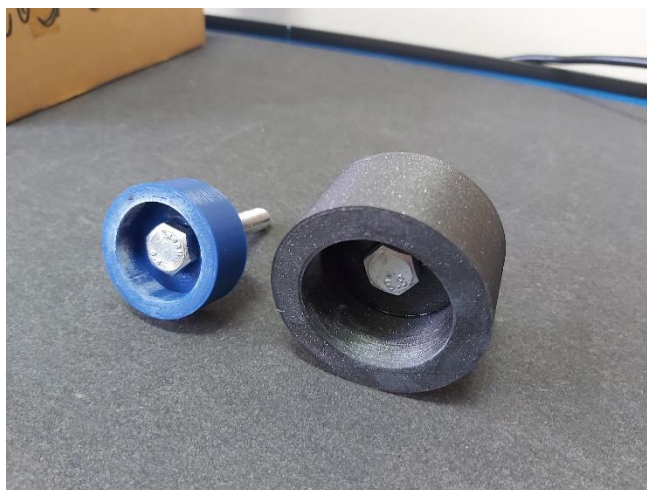
BPAM mišića je u korištenju komprimiranog zraka. Kod BPAM mišića koristio se pretlak te je dolazilo do savijanja u smjeru ograničenja. Ovdje kod pneumatskog mišića s mijehom koristi se podtlak, te dolazi do savijanja u suprotnom smjeru od ograničenja jer vezica svojom krutošću i djelomičnom podatljivošću ne dozvoljava savijanje u svojem smjeru. Također je razlika i u smještaju ograničenja. Kod BPAM mišića ograničenje je zbog konstrukcije bilo postavljeno s vanjske strane mišića, dok kod ovakvog mišića koji ima žljebove je potrebno postaviti ograničenje s unutarnje strane.

Ojačanje, zamišljeno kao prsten, prikazano je na slici 4.7 sa konačnim dimenzijama koje odgovaraju unutarnjim dimenzijama mijeha. Na gornjem i donjem kraju mišića, vezica je učvršćena pomoću ljepila za zadnje prstenove, a višak vezice je odrezan.



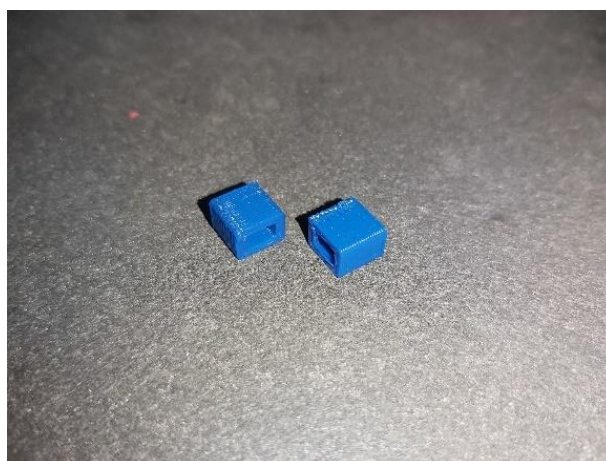
Slika 4.7 Skica prstenastog ojačanja sa dimenzijama (lijevo) i izrađeni prsten (desno)

Kod novih ojačanja sa vezicom, bilo je potrebno samo prvi put poravnati, odnosno centrirati pravokutne provrte, kako bi vezica mogla s lakoćom proći kroz njih, odnosno kako bi se vezica s lakoćom mogla provući kroz provrte. Nakon početnog poravnanja provrta, provlačenja i učvršćivanja vezice, više se nije događalo izvrtanje mišića. Također, isprintani su novi čepovi sa provrtima za vijke, prikazani na slici 4.8, ali bez dodatnog provrta za cjevčicu. Razlog tomu je to što je novi mijeh već imao sa strane utor za tu svrhu. U taj utor umetnula se cjevčica za zrak te osigurala sa ljepilom kako ne bi došlo do propuštanja, odnosno curenja zraka.



*Slika 4.8 Izrađeni čepovi za brtvljenje mišića sa umetnutim vijcima*

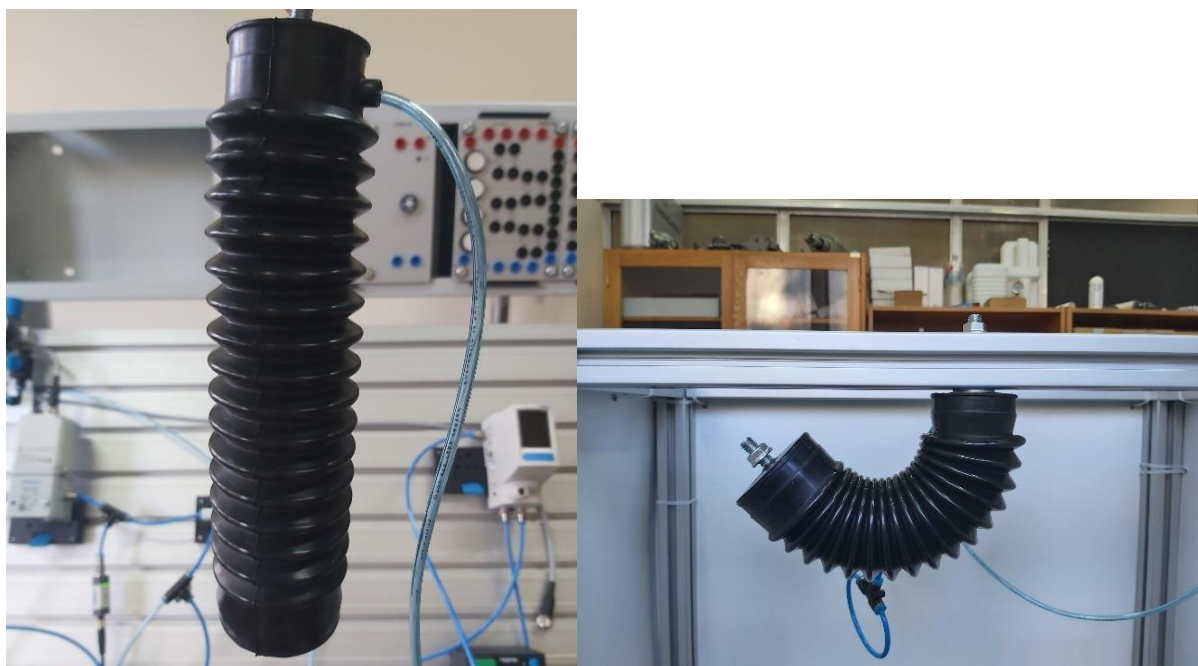
Tijekom prvog ispitivanja nove konstrukcije, došlo je do pucanja prstenova koji se nalaze na krajevima mišića zbog prevelike sile između PVC vezice na mjestu gdje je učvršćena za prsten i to pri vrlo niskom podtlaku od samo -0,2 bar. Zbog toga su isprintani graničnici u obliku kvadra sa provrtom kroz koje bi vezica prolazila te su postavljeni tako da točno sjedaju između prstenova. Izrađeni graničnici prikazani su na slici 4.9. Time se ostvarilo da je vezica između dva prstenasta ojačanja još prolazila i kroz kvadratni graničnik čime se osigurala dodatna stabilnost i čvrstoća konstrukcije.



*Slika 4.9 Izrađeni kvadratni graničnik s provrtom*

Izgled konačne konstrukcije umjetnog pneumatskog mišića sa mijehom koji ostvaruje kutni pomak prikazan je na slici 4.10. Sa novom konstrukcijom omogućilo se ostvarivanje kutnog pomaka od  $0^\circ$  do  $135^\circ$  što je puno više nego početna verzija mišića gdje je kutni pomak bio ograničen zbog izdanaka na prstenastim ojačanjima. Na donjoj slici lijevo prikazan je mišić u svom

opuštenom (početnom) položaju, odnosno pri  $0^\circ$ , a na istoj slici desno pri konačnom kutnom pomaku od  $135^\circ$ .



*Slika 4.10 Konačni izrađeni umjetni pneumatski mišić s kutnim pomakom u opuštenom položaju (lijevo) i potpuno savijenom položaju (desno)*

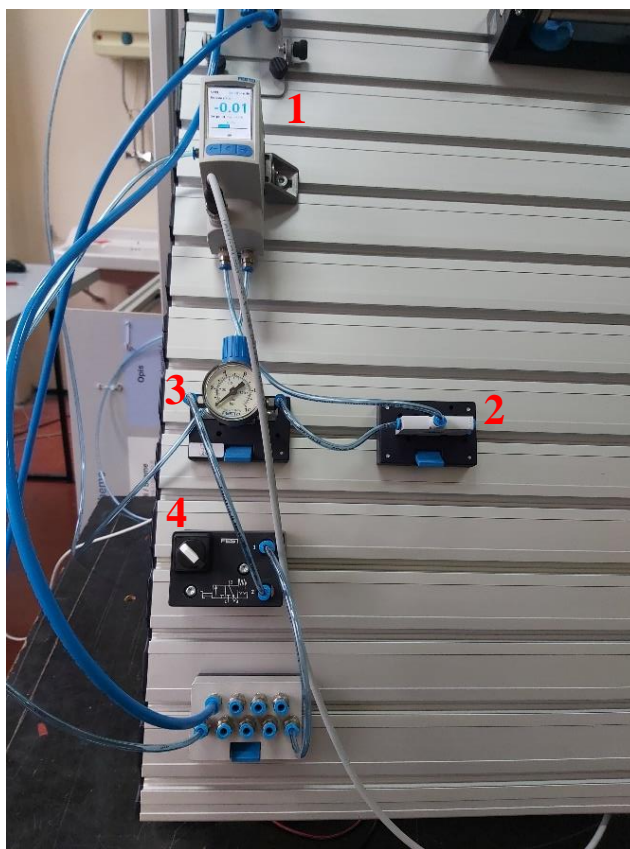
Nakon zadovoljavajuće konstrukcije i početnih ispitivanja mišića kreće se s mjerenjem i analizom radnih parametara mišića, koji se sastoje od mjerenja blokirajuće sile koju mišić postigne za određeni kutni pomak pri različitim vrijednostima podtlaka, kao i brzine koju mišić ostvaruje od svoje početne (opuštene) pozicije do maksimalne pozicije koja iznosi  $135^\circ$ .

## 5. LABORATORIJSKA OPREMA

Za ispitivanje djelovanja pneumatskog mišića iskoristila se laboratorijska oprema koja se sastoji od pneumatske opreme, opreme za mjerenje sile te programske opreme. Pomoću pneumatske opreme omogućeno je pokretanje mišića, odnosno obavljanje rada mišića, dok se pomoću opreme za mjerenje sile mjeri blokirajuća sila tijekom obavljanja rada mišića. U konačnici je potrebna programska oprema kako bi se vizualno prikazali rezultati mjerenja tlaka, sile i pomaka mišića. Sva korištena laboratorijska oprema nalazi se na Tehničkom fakultetu u Rijeci u Laboratoriju za hidrauliku i pneumatiku na Zavodu za konstruiranje u strojarstvu.

### 5.1 Pneumatska oprema

Korištena pneumatska oprema je prikazana na slici 5.1. Komprimiranje zraka se vrši korištenjem vijčanog kompresora Planet Air L-S50-25, čiji je protok 50 - 60 l/min te maksimalni tlak 8 bar.



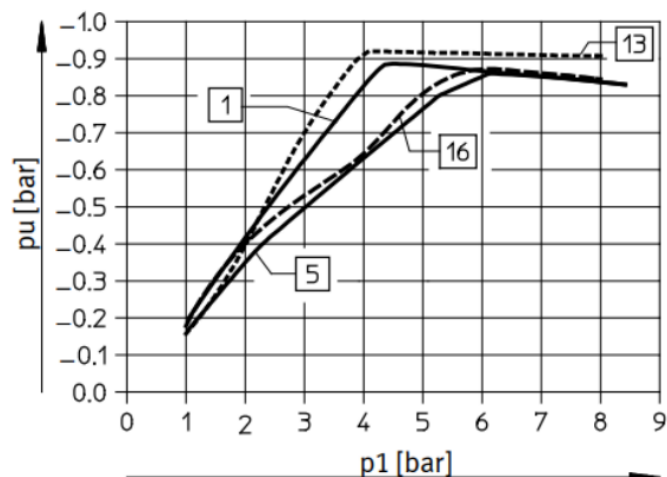
*Slika 5.1 Pneumatska oprema*

Sljedeća pneumatska komponenta, označena brojem 1, je proporcionalni regulator tlaka Festo VPPI-5L-3-G18-1V1H-V1-S1D koji ima integrirani zaslon na kojem je moguće odmah očitati tlak, kao što je prikazano na slici 5.2. Kod proporcionalnog regulatora tlaka su ulazni i izlazni signali proporcionalni, što ujedno znači da se za određeni omjer promjene napona regulatora dobije isti omjer promjene tlaka. To je osobito bitno kod postavljanja LabVIEW programa kako bi se unijeli točni podaci. Ovakav proporcionalni regulator ima mogućnost regulacije tlaka od -1 do 1 bar. U ovom slučaju će se koristiti za direktnu regulaciju podtlaka.



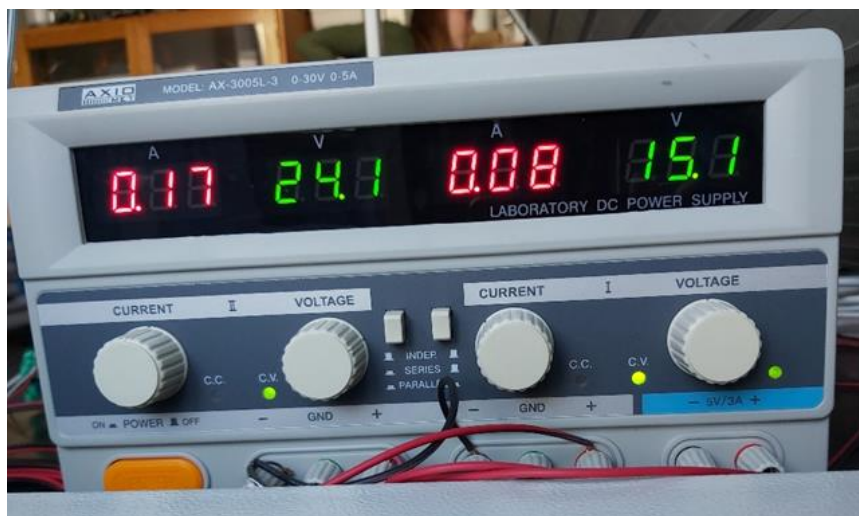
*Slika 5.2 Proporcionalni regulator tlaka VPPI-5L-3-G18-1V1H-V1-S1D*

Brojem 2 je označena vakuumska sapnica (ejektor) Festo VN-05-H-T2-PQ1-VQ1-RQ1 koja se koristi za generiranje podtlaka. Pogonski tlak ove vakuumske sapnice se kreće od 1 do 8 bar te se pomoću njega može ostvariti podtlak do maksimalnih -0,88 bar. Na slici 5.3 moguće je očitati ovisnost generiranog podtlaka o ulaznom pretlaku što je moguće naći u katalogu proizvođača Festo za istu vakuumsku sapnicu [22]. Ovdje se uzima pretlak od 4,5 bara kako bi se mogao ostvariti maksimalni podtlak. Kako bi se ograničio ulazni tlak u vakuumsku sapnicu na 4,5 bara, potrebno je to učiniti na ručnom regulatoru tlaka koji je označen brojem 3. Brojem 4 prikazan je *on/off* ventil kojeg je potrebno otvoriti kako bi se tlak propustio kroz cijeli pneumatski sustav. Povezivanje svih komponenata omogućeno je korištenjem fleksibilnih Festo cijevi promjera 4 mm.



Slika 5.3 Ovisnost generiranog podtlaka o ulaznom pretlaku [22]

Za pokretanje proporcionalnog regulatora tlaka se koristi napajanje Axio AX-3005L-3 koje je prikazano na slici 5.4. Za rad proporcionalnog regulatora je potreban napon od 15 do 30 V. Odabrani iznos struje i napona na izvoru napajanja objašnjeni su u sljedećem potpoglavlju vezanom za opremu za mjerenje sile.



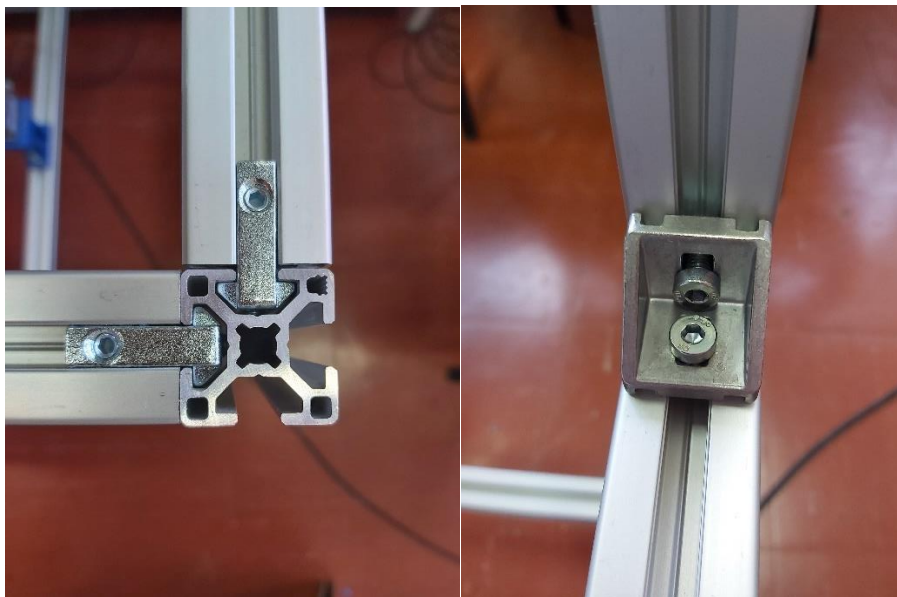
Slika 5.4 Izvor napona Axio AX-3005L-3

## 5.2 Oprema za mjerenje sile

Izrađena je ispitna naprava za ispitivanje mišića koji je sastavljen od aluminijskih profila. Za njegovu konstrukciju iskorištena su četiri velika aluminijska profila, koji su postavljeni s vanjske strane, i šest manjih koji su povezani sa velikim profilima sa gornje i donje strane. Također, iskorištena su dodatna dva manja profila koji su centrirani tako da budu točno jedan ispod



drugog. Svi profili su povezani preko vodilica koje su spojene preko odgovarajućih poveznica kao što je prikazano na slici 5.5. Na gornjem središnjem profilu izbušen je provrt na koji se mišić postavlja preko vijka na njegovom gornjem čepu. Na slici 5.6 je prikazana sastavljena konstrukcija okvira za ispitivanje mišića.



*Slika 5.5 Povezivanje aluminijskih profila*



*Slika 5.6 Konstrukcija za ispitivanje pneumatskog mišića*

Na donjem profilu postavljen je prihvat za senzor sile koji je također 3D isprintan te je prikazan na slici 5.7. Senzor sile postavljen je na gornju stranu prihvata preko vijka. Cilj korištenja laboratorijske opreme je u tome da se dobiju rezultati podtlaka i sile koju ostvaruje mišić. Zbog toga je potrebno mišić učvrstiti s jedne strane na aluminijski profil, dok je s druge strane u potpunosti slobodan te se na njemu vrši mjerenje sile.

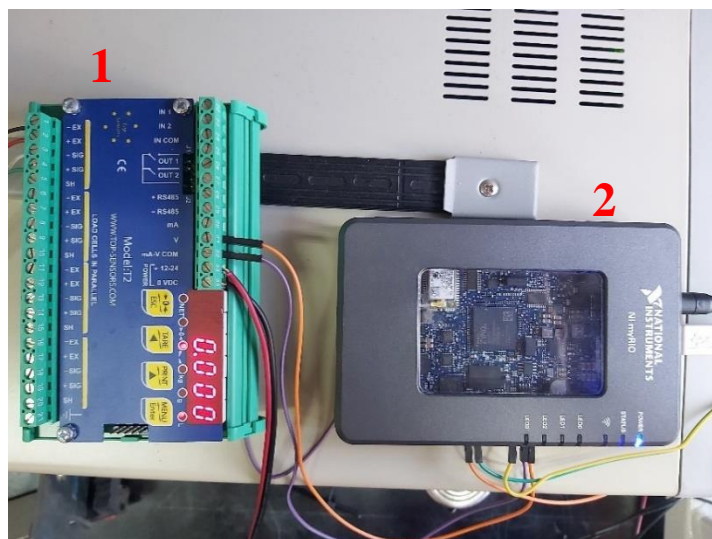
Sa slike 5.7 je vidljivo da je korišten senzor sile Zemic H3G-C3-50kg-6B kapaciteta do 50 kg. Ovakva konstrukcija senzora pripada tipu „S“ zbog svojeg oblika koje podsjeća na slovo „S“ te se koristi pri mjerenju vlačnih i tlačnih opterećenja odnosno primjenu nalazi kod ispitivanja sile ovjesnih uređaja i uređaja za vaganje. Sa bočne strane senzora nalazi se ulazni zaštićeni četverožilni kabel preko kojega se senzor spaja na mjerni uređaj. Vidljivo je kako je s gornje strane senzora postavljen prihvat za koji se veže mišić preko užeta kako bi se uopće mogla ostvariti sila na senzoru.



*Slika 5.7 Senzor sile Zemic H3G-C3-50kg-6B postavljen na njegov prihvat*

Na slici 5.8 brojem 1 je prikazan pretvarač signala Top-Sensors T2 na koji je spojen senzor sile te koji je dalje na istoj slici brojem 2 povezan sa NI myRIO 1900 akvizicijskom karticom, koja je sposobna za samostalno izvršavanje programa. Preko pretvarača se signal, koji se dobiva preko senzora, pretvara na odgovarajući način kako bi bio kompatibilan s akvizicijskom karticom NI myRIO, unutar koje se vrši daljnja obrada kako bi se dobio željeni prikaz mjerenja izražen u kg ili potrebno u N. Korištena akvizicijska kartica NI myRIO koristi se kako bi se omogućilo upravljanje

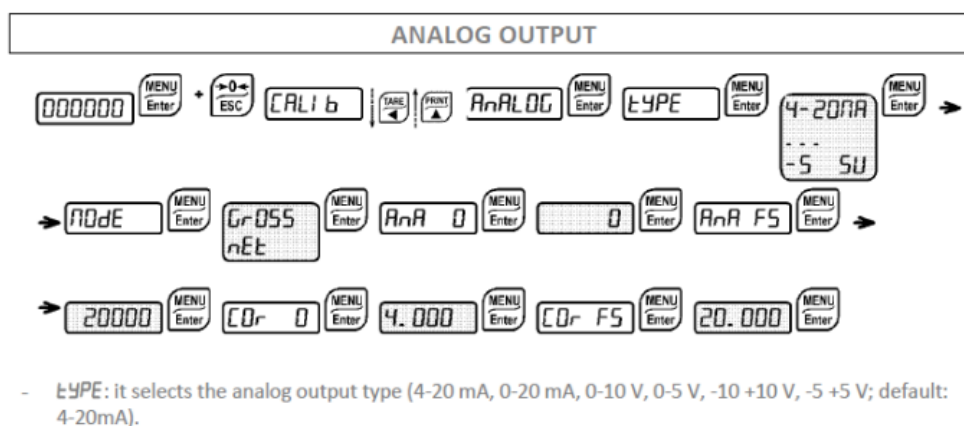
pneumatskim sustavom i konačno mjerenje pomoću senzora. Ista kartica je kompatibilna sa računalnim softverom LabVIEW te se na taj način vrši komunikacija između kartice i računala.



Slika 5.8 Pretvarač signala i NI MyRIO akvizicijska kartica

Pretvarač je potrebno spojiti na isto napajanje kao i prije spomenuti proporcionalni regulator tlaka, a to je napajanje Axio AX-3005L-3 koje je prikazano na slici 5.4. Na napajanju je vidljivo da je iznos struje namješten na 0,08 A, a iznos napona na 15,1 V. Važno je napomenuti da definirani iznos napona mora biti unutar odgovarajućeg raspona vrijednosti koji je naznačen na samom pretvaraču, a taj iznos je od 12 V do 24 V.

Kako bi se na zaslonu pretvarača mogla očitati sila, potrebno ga je programirati prema uputama proizvođača [23] kao što je prikazano na slici 5.9. Prilikom programiranja u obzir se uzima da se radi o senzoru mjernog raspona do 50 kg, odnosno do 500 N te da je na akvizicijsku karticu NI MyRIO potrebno dovesti analogni signal ( $AI \pm 10 V$ ). Na temelju toga se podešavaju parametri pretvarača.

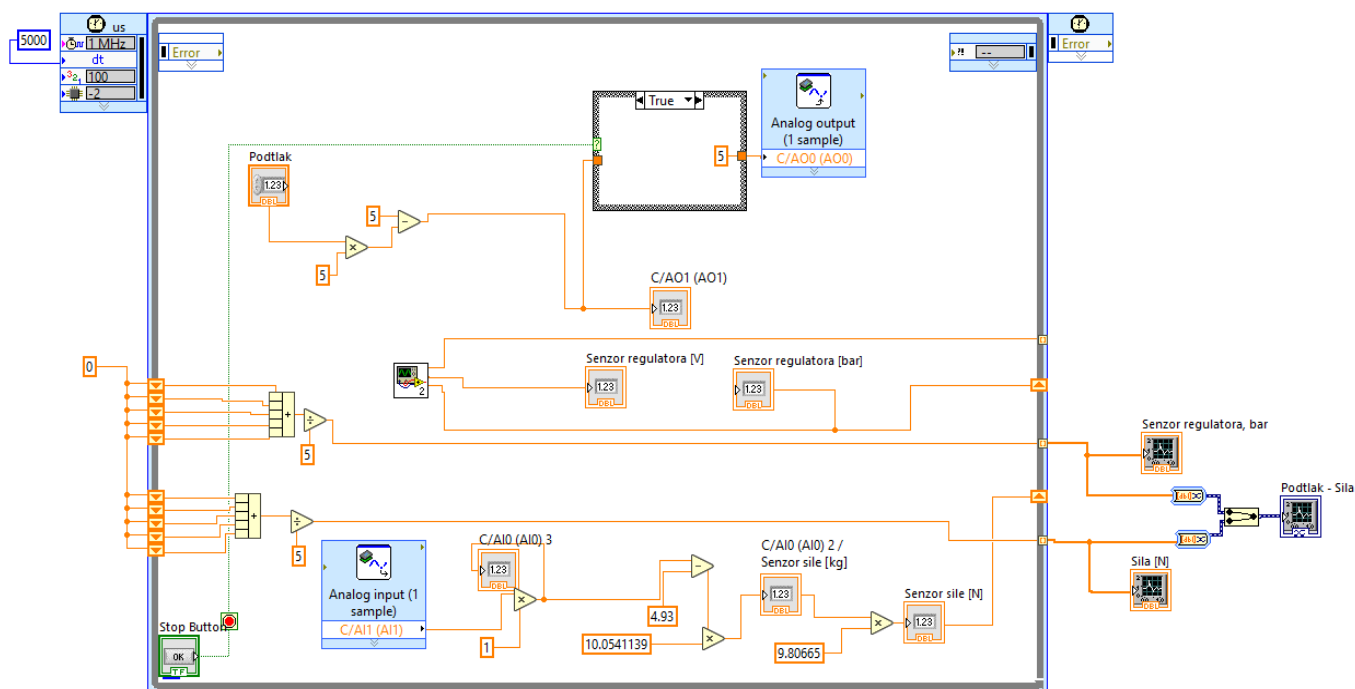


Slika 5.9 Upute za programiranje pretvarača [23]

Nakon što se riješilo programiranje pretvarača, akvizicijsku karticu NI myRIO je samo preko USB priključka potrebno spojiti na računalo, a zatim se ona očitava kroz softverski paket LabVIEW, o kojem će se više reći u sljedećem potpoglavlju.

### 5.3 Izrada programa za upravljanje i prikupljanje podataka

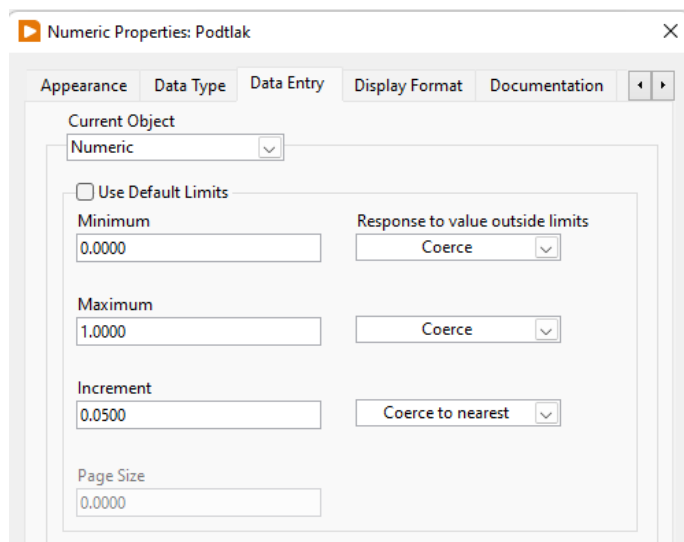
Kako bi se moglo upravljati korištenim pneumatskim sustavom, odnosno proporcionalnim regulatorom tlaka te odabirati odgovarajući podtlak i na kraju očitavati rezultate dobivene sile, potrebno je izraditi program u softveru LabVIEW, koji predstavlja grafičko programsko sučelje. Sastoji se od grafičkog korisničkog sučelja (eng. „*front panel*“), kojim je omogućena interakcija s cijelim sustavom, i blok dijagrama (eng. *block diagram*) u kojemu se izrađuje program. Prvo je potrebno izraditi blok dijagram koji je prikazan na slici 5.10. Vidljivo je kako se on sastoji od vremenske petlje kako bi se cijeli kod izvršio u točno određenim vremenskim koracima. Plavi blok s nazivom *Analog input* prikazuje ulaz signala sa hardvera u sučelje, tj. ulaz signala sa senzora sile, odnosno sa pretvarača signala, dok blok *Analog output* prikazuje izlaz signala sa hardvera na proporcionalni regulator tlaka.



Slika 5.10 Program za upravljanje podtlakom i očitavanje dobivene sile pneumatskog mišića

Regulirana veličina je veličina podtlaka. Za odabiranje veličine podtlaka postavljen je narančasti blok pod nazivom *Podtlak* kako bi se on mogao u grafičkom sučelju kontrolirati,

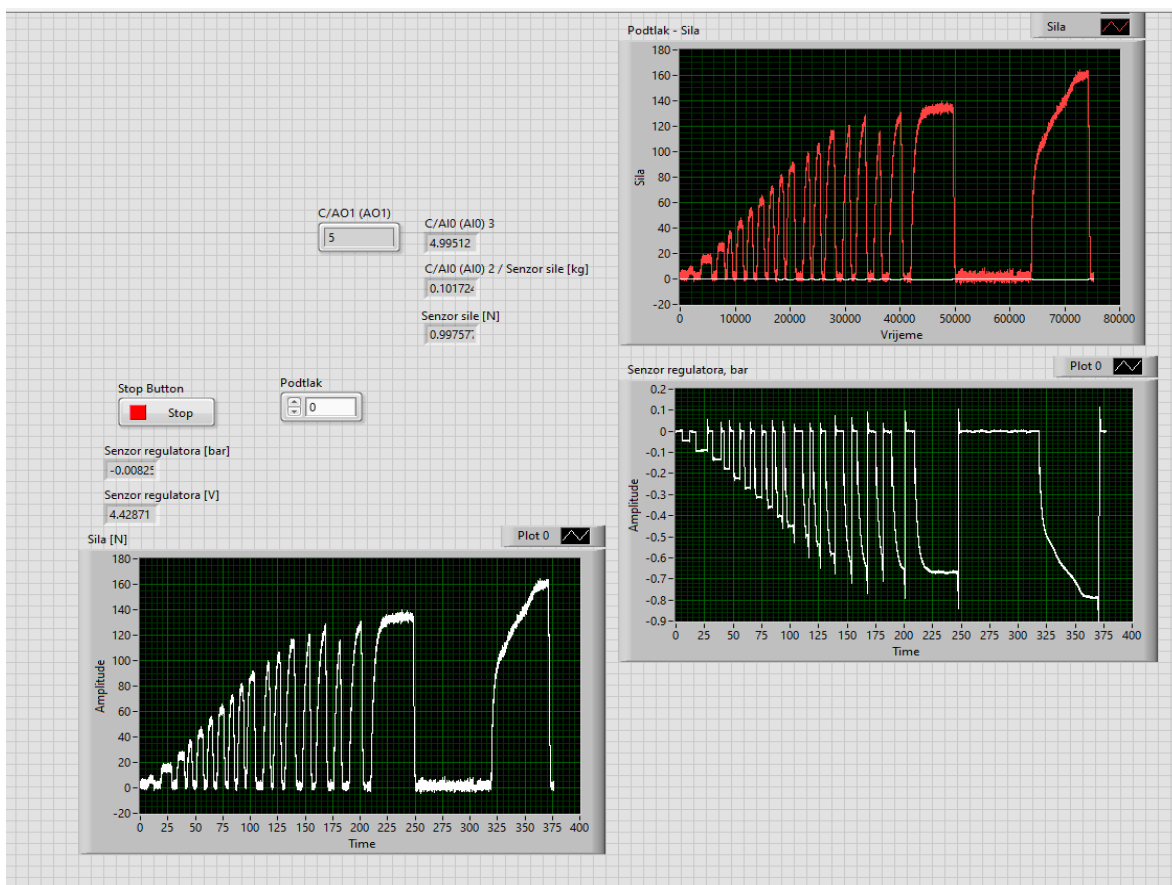
odnosno mijenjati. U korisničkom sučelju se upisuju vrijednosti podtlaka kao pozitivne vrijednosti od 0 do -0,8 bara zbog toga što je za minimum postavljena 0 koji ima povezanost sa naponom od 5 V i maksimum 1 koji ima povezanost sa naponom od 0 V, što se u programu odredilo na način prikazan na slici 5.11.



Slika 5.11 Određivanje svojstva bloka „Podtlak“

U donjem desnom kutu, van petlje, postavljeni su blokovi kojima je omogućeno prikazivanje vrijednosti sile i podtlaka pomoću grafova. Na slici je vidljivo kako je bilo potrebno oduzeti dobivenu veličinu sile za iznos 4,93 kako bi se dobila nula za stanje neopterećenosti. Budući da se mjerni signal senzora očitava kao vrijednost napona, potrebno je pronaći koeficijent kojim je definirana linearna veza, odnosno proporcionalnost izmjerene napona i sile. Nakon više uzastopnih mjerenja, ustanovljeno je da je linearna veza napona i sile određena koeficijentom u iznosu od 10,0541139. Zbog toga se mjerni signal, tj. iznos generiranog napona, množi sa brojem 10,054113 kako bi se dobio iznos mase u kilogramima. Da bi se dobio iznos sile u N potrebno je pomnožiti vrijednost sa 9,80665.

Grafičko sučelje je prikazano na slici 5.12 te ono proizlazi iz dizajniranog blok dijagrama. Na njemu je moguće odabrati podtlak pod kojim će djelovati sustav. Nakon zaustavljanja programa u grafovima se ispisuje sila ostvarena u određenom vremenskom periodu, kao i vrijednost korištenog podtlaka.



Slika 5.12 Grafičko korisničko sučelje za upravljanje pneumatskim mišićem

Nakon izrade programa preko kojeg se upravlja pneumatskim sustavom i konačnim mišićem, moguće je krenuti s konačnim zadatkom, a to je mjerenje radnih parametara mišića.

## 6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Kako bi se dao uvid u rad mišića, potrebno ga je testirati. Prvo mjerenje je izvršeno pomoću senzora sile čime se mjeri blokirajuća sila mišića pri obavljanju rada, odnosno pri izvršavanju određenih kutnih pomaka, dok se drugim mjerenjem mjerila brzina i kutni pomak mišića.

### 6.1 Ispitivanje ostvarive blokirajuće sile

Već je prije rečeno kako na jednom kraju senzor sile ima vijak pomoću kojeg se povezuje na mišić. Ta veza se ostvaruje preko užeta koje povezuje gornji dio senzora i donji dio mišića. Pokušaj pričvršćivanja je izvršen uz pomoć obične špaga i upredenice no to nije uspjelo jer je dolazilo do klizanja napravljenih čvorova na prihvatima između mišića i na prihvatima za sam senzor, kao i do rastezanja užeta te pucanja upredenice pri većim silama. Naposljetku je postignut uspješan pokušaj montaže i mjerenja uz pomoć polipropilenske špaga koja inače služi za vezivanje u poljoprivredi te je prikazana na slici 6.1. Ova špaga nije rastezljiva te je dovoljno čvrsta da se postignu željeni rezultati eksperimenata, a da se pri tome ne odvezuje ili ne pomiču čvorovi. Prikaz potpune konstrukcije i povezanosti mišića sa senzorom za mjerenje sile prikazan je na slici 6.2.



*Slika 6.1 Polipropilenska špaga*



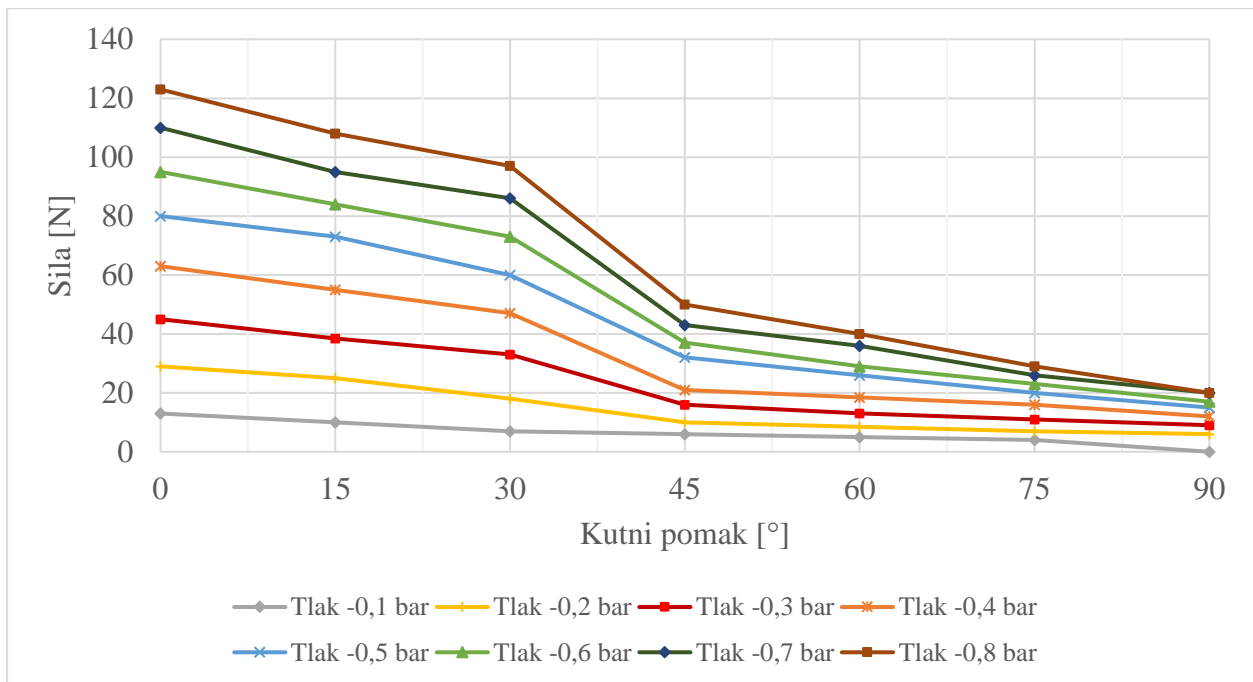
*Slika 6.2 Konačni prikaz montaže mišića i njegove povezanosti sa senzorom*

Prilikom pokretanja LabVIEW programa pali se cijeli pneumatski sustav i sustav za mjerenje sile. U korisničkom sučelju u polje *Podtlak* unose se vrijednosti podtlaka od -0,1 do -0,8.

Po zaustavljanju rada programa, vrijednosti sile pneumatskog mišića dane u svakom trenutku obavljanja rada se prikazuju u grafovima te ih je moguće spremiti u *Excel* tablicu prema kojoj se posebno crta graf ovisnosti sile o vremenu.

Nakon što su se izvršila sva mjerenja izradili su se grafovi prikazani na slici 6.3 na kojima se mogu očitati maksimalne izmjerene sile za određeni kutni pomak i određenu vrijednost podtlaka. Prvo mjerenje izvršeno je za kutni pomak od  $0^\circ$ , odnosno za mišić u opuštenom stanju ili položaju. Maksimalna ostvarena sila za kut od  $0^\circ$  prema dobivenom grafu iznosi 123 N.





Slika 6.3 Ovisnost sile o kutnom pomaku pri određenom podtlaku

Različiti kutovi se ostvare na način da se vezica, koja povezuje senzor sile i mišić, produžuje ili skraćuje za određenu duljinu, tako da uključivanjem podtlaka mišić se savije za određeni kut na kojem se izmjeri blokirajuća sila. Mjerenja su izvršena za svakih 15° te su očitane maksimalne vrijednosti sile. Za svaki mjereni kut, maksimalne sile su dobivene pri podtlaku od -0,8 bar. Tako je za kutni pomak od 15°, maksimalna sila došla do 108 N, a za kut od 30° sila od 97 N. Vidljivo je kako sa povećavanjem kuta mišića, maksimalne proizvedene sile opadaju.



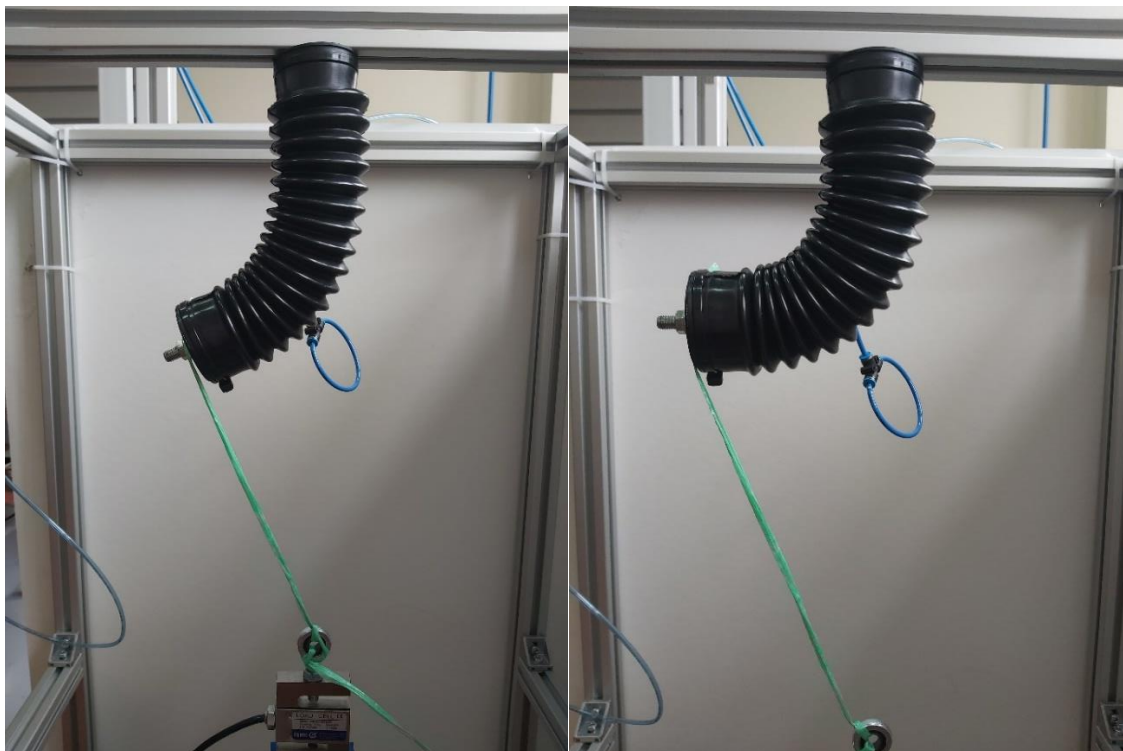
Slika 6.4 Mjerenje sile za kutni pomak od 30°

Vezica se zatim produžila kako bi se mogao ostvariti kut od  $45^\circ$ . Uočeno je da se mišić pri podtlaku od  $-0,3$  bar počeo polako izvijati, a pri  $-0,6$  bar drastično izvijati, što je vidljivo na slici 6.5. To izvijanje moguće je uočiti i u grafovima na slici 6.3 gdje je vidljivo kako između kutnih pomaka od  $30^\circ$  i  $45^\circ$  dolazi do naglog prijelaza, odnosno naglog pada izmjerene sile i to nakon korištenja podtlaka od  $-0,3$  bar, pa sve do  $-0,8$  bar. Bez obzira na njegovo izvijanje nastavilo se mjerenje jer po zaustavljanju rada, mišić se vratio u svoje prvobitno stanje bez ikakvih oštećenja. Na grafu sa slike 6.3 je vidljivo da se pri podtlaku od  $-0,8$  bar ostvarila maksimalna sila od  $50$  N.



*Slika 6.5 Prikaz izvijanja pneumatskog mišića*

Nakon prijašnjeg mjerenja zaključeno je da će se mišić pri još većim kutovima početi ranije izvijati. Pri kutnom pomaku od  $60^\circ$  izvijanje mišića se također dogodilo pri podtlaku od  $-0,3$  bar te je kao i prije nastavljeno mjerenje čime se pri podtlaku od  $-0,8$  bar ostvarila sila od  $40$  N, a za kutni pomak od  $75^\circ$  ostvarila se sila od  $29$  N. Sljedeće je postavljen kutni pomak od  $90^\circ$  gdje se također mišić počeo drastično izvijati pri podtlaku od  $-0,3$  bar. Na istom grafu je vidljivo da se za podtlak od  $-0,1$  bar ne može očitati sila koju ostvaruje mišić. Razlog tomu je to što mišić ne poprimi položaj od  $90^\circ$  pri podtlaku od  $-0,1$  bar te se vezica koja služi kako bi se mogla izmjeriti sila na senzoru ne istegne do kraja. Zbog toga započinje mjerenje tek od unošenja podtlaka od  $-0,2$  bar. Ovdje je mišić pri podtlaku od  $-0,7$  bar ostvario maksimalnu silu od  $20$  N te se ta sila nije dalje mijenjala povećanjem podtlaka. Na slici 6.6 lijevo je prikazan ograničeni kutni pomak od  $75^\circ$ , a desno od  $90^\circ$



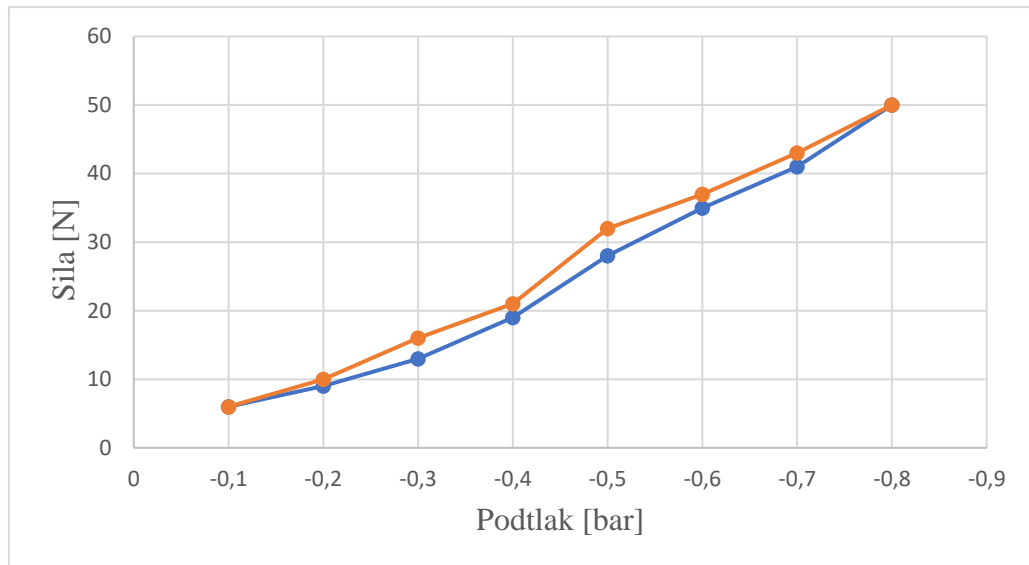
*Slika 6.6 Mjerenje sile za kutni pomak od 75° (lijevo) i od 90° (desno)*

Kao što je moguće vidjeti prema priloženim podacima i kao što je prije već rečeno, sila drastično opada sa povećanjem kuta mišića. Pri 0° i podtlaku od -0,8 bar maksimalna sila koju ostvaruje mišić iznosi 123 N, dok pri 90° maksimalna sila iznosi 20 N pri podtlaku od -0,8 bar. No pri kutovima većim od 30° dolazi do izvijanja mišića. Ovime se zaključuje da dok je mišić u svom prirodnom položaju, odnosno u potpuno ispruženom položaju ostvaruje najvišu silu te je moguće napraviti potpunu skalu kretanja sile za podtlak od -0,1 do -0,8 bar bez događanja izvijanja. Čim je veći kut, dolazi do sve većih gubitaka. Do problema se dolazi kada krene izvijanje mišića, odnosno kada dolazi do prevelikog savijanja rebara mijeha mišića, ali se nakon djelovanja podtlaka mišić vraća u svoje početno stanje. Do izvijanja, koje je prikazano na slici 6.5, dolazi jer se mjeri blokirajuća sila koja nastaje zbog ograničavanja kutnog pomaka preko vezice.

Nakon toga mjerenja i uočavanja izvijanja zbog vezice koja djeluje pod kutom pokušalo se izvesti mjerenje pomicanjem senzora za mjerenje sile točno ispod osi na kraju mišića kada poprimi svoj kutni pomak koji je potrebno izmjeriti. Ovime se pokušava izbjeći izvijanje zbog kojeg bi moglo doći do neželjenih posljedica, kao što je na primjer pucanje unutarnjih ojačanja što je bio početni problem konstrukcije opisan u četvrtom poglavlju te koji je riješen izradom dodatnih kvadratnih ojačanja.

Prvo se izvelo mjerenje za kut od 45° te je na grafu na slici 6.7 narančasto prikazano prijašnje mjerenje sile pomoću senzora bez njegova pomicanja, a plavom bojom novo mjerenje sa

pomicanjem senzora ispod osi, kao što je prikazano na slici 6.8. U ovom slučaju gdje se pomaknuo senzor točno ispod djelovanja kuta kako bi vezica ostala vertikalna nije došlo do izvijanja mišića. Također, uočeno je da su mjerenja ispala skoro pa identična kao bez pomicanja senzora. Odnosno maksimalna ostvarena sila pri podtlaku od -0,8 bar iznosi 50 N kao i kod prijašnjeg mjerenja.

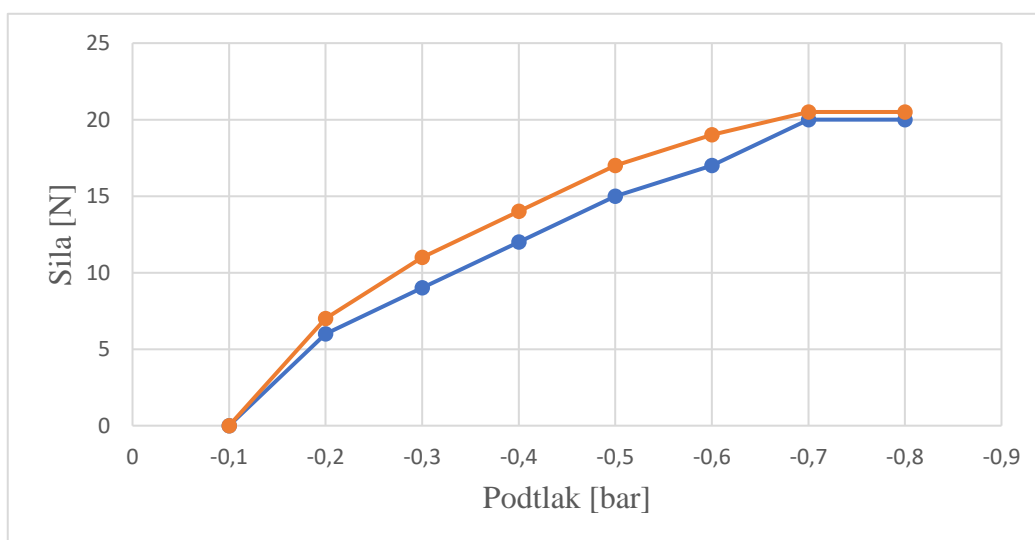


*Slika 6.7 Graf ovisnosti sile o podtlaku za kut 45°*



*Slika 6.8 Mjerenje sile za kutni pomak od 90°*

Isto mjerenje se izvršilo za kut od  $90^\circ$  gdje je također pomaknut senzor tako da vezica i mišić zajedno zatvaraju kut od  $90^\circ$ . Ovdje su rezultati vidljivi na slici 6.9, gdje je narančastom bojom označeno upravo to mjerenje gdje je senzor pomaknut, a plavom prijašnje mjerenje gdje je senzor sile ostao na istom mjestu. Kao i kod prvog mjerenja, kutni pomak od  $90^\circ$  se nije mogao ostvariti pri podtlaku od -0,1 bar. Ovdje također nije došlo do izvijanja mišića. Nakon dobivenih rezultata mjerenja koji su prikazani na grafu, može se zaključiti kako pomicanje senzora ne utječe značajno na dobivene rezultate sile, već samo na pojavu izvijanja.

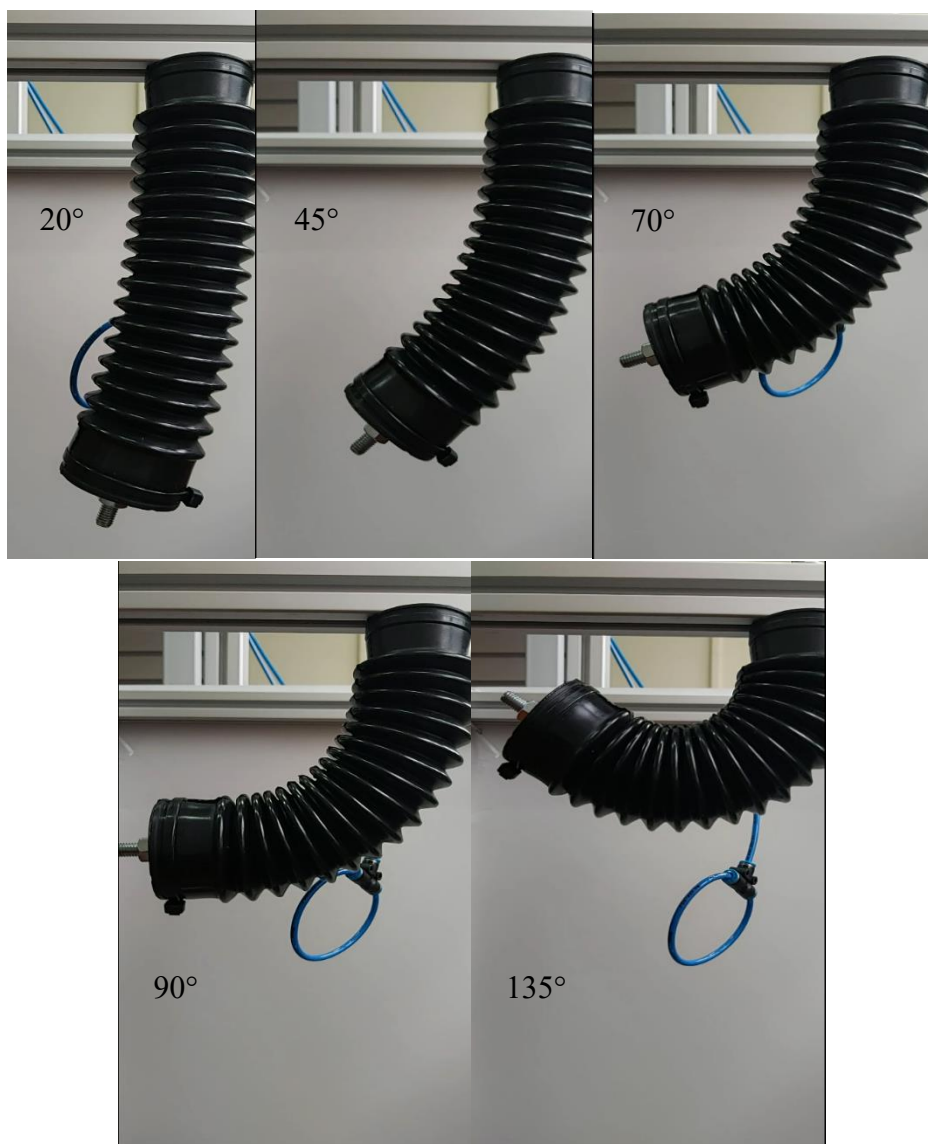


Slika 6.9 Graf ovisnosti sile o podtlaku za kut  $90^\circ$  sa pomakom (narančasto) i bez pomaka (plavo) senzora sile

## 6.2 Ispitivanje ovisnosti kutnog pomaka o brzini

Nakon mjerenja sile koje može postići mišić pri različitim kutnim pomacima izvršilo se mjerenje brzine pomaka mišića pri različitim vrijednostima podtlaka. To je osobito bitno kako bi se znalo koje je vrijeme potrebno da mišić izvrši rad u stvarnom vremenu. No prvo je potrebno izvršiti mjerenje vremena koje je potrebno da mišić ostvari određeni kutni pomak. Mjerenje se izvršilo tako da se pomoću kamere snimao rad mišića te se pri zaustavljanju slike moglo očitati točno vrijeme kada je mišić postigao određeni kut pri određenom podtlaku.

Na slici 6.10 prikazani su kutovi za koje su u sljedećim tablicama u ovom poglavlju postavljene rezultati mjerenja vremena.



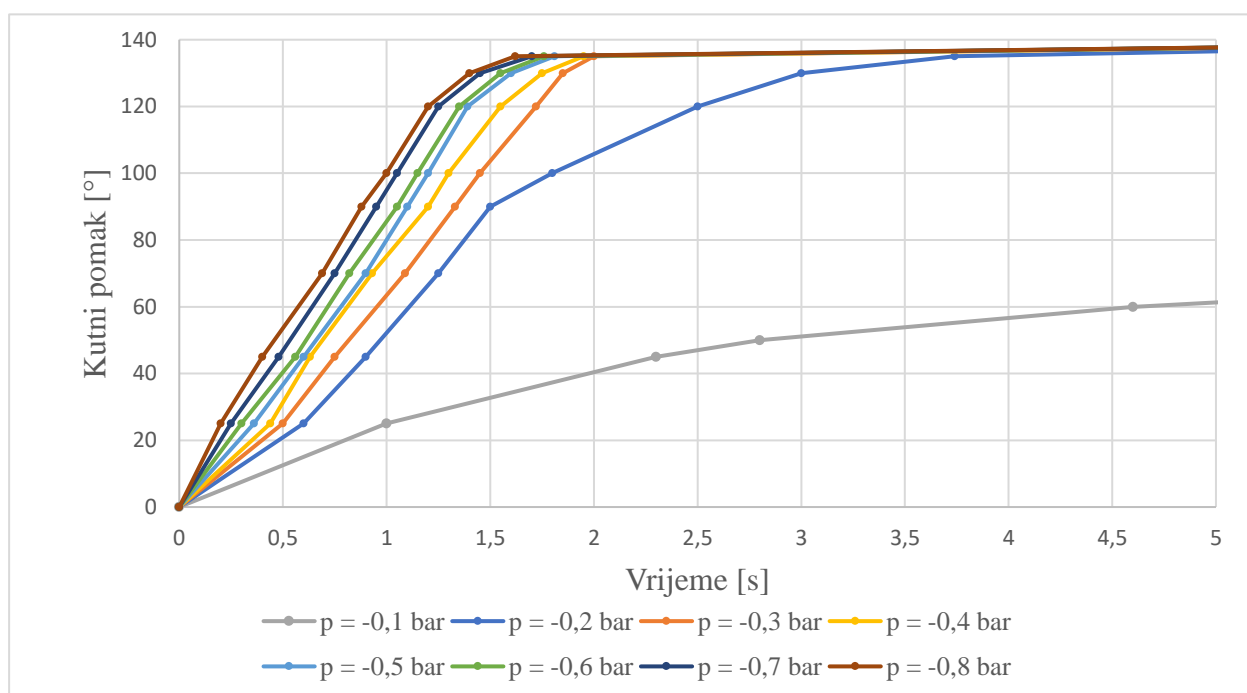
*Slika 6.10 Mjereni kutovi prilikom rada mišića bez opterećenja*

U tablici 6.1 je prikazano postignuto vrijeme za određene kutove i korištene vrijednosti podtlaka od -0,1 bar do -0,8 bar, dok je na slici 6.11 prikazan graf koji prikazuje odnos kutnog pomaka o vremenu obavljanja rada mišića.

Pri korištenju podtlaka od -0,1 bar ostvario se maksimalni kut pneumatskog mišića od 70°. Mjerenjem je uočeno kako je zbog malog podtlaka potrebno duže vrijeme da se mišić stabilizira u svom konačnom položaju te je zbog toga kut od 70° popravljen za 7,6 sekundi. Korištenjem ostalih vrijednosti podtlaka od -0,2 bar do -0,8 bar, pneumatski mišić je uspio izvršiti rad sa maksimalnim mogućim kutom od 135°, kao što je vidljivo na prijašnjoj slici 6.10.

Tablica 6.1 Rezultati kutnog pomaka tijekom vremena bez opterećenosti mišića pri različitim vrijednostima podtlaka

$p = -0,1$ bar		$p = -0,2$ bar		$p = -0,3$ bar		$p = -0,4$ bar	
Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]
25°	1 s	25	0,6	25	0,5	25	0,44
45°	2,3 s	45	0,9	45	0,75	45	0,63
70°	7,6 s	70	1,25	70	1,09	70	0,93
-	-	90	1,5	90	1,33	90	1,2
-	-	135	3,74	135	2	135	1,95
$p = -0,5$ bar		$p = -0,6$ bar		$p = -0,7$ bar		$p = -0,8$ bar	
Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]
25	0,36	25	0,3	25	0,25	25	0,2
45	0,6	45	0,56	45	0,48	45	0,4
70	0,9	70	0,82	70	0,75	70	0,69
90	1,1	90	1,05	90	0,95	90	0,88
135	1,81	135	1,76	135	1,7	135	1,62

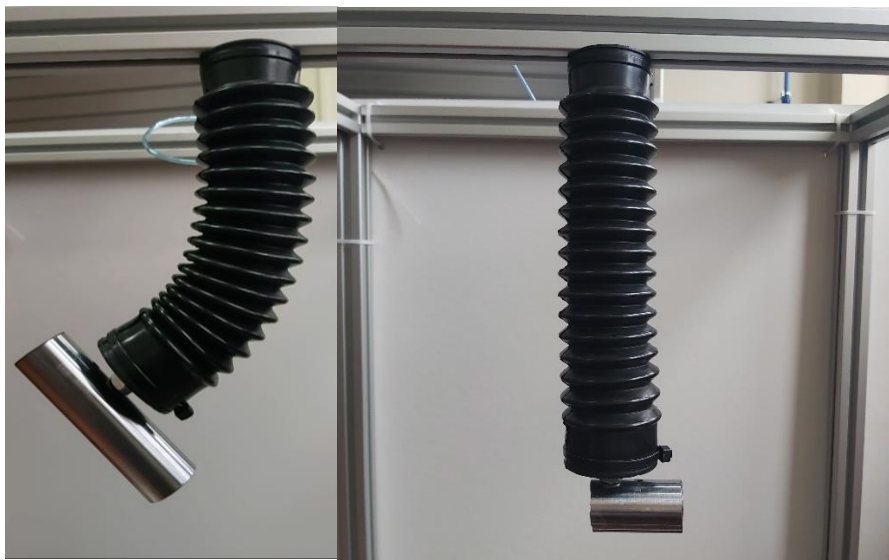


Slika 6.11 Mjerenje vremena ostvarivanja određenog kutnog pomaka pri različitim vrijednostima podtlaka

Iz grafa je vidljivo kako je vrijeme testiranja različito za različite vrijednosti podtlaka, odnosno za niže vrijednosti podtlaka vrijeme je veće, a za više vrijednosti podtlaka vrijeme je manje. Tako je mišiću za podtlak od -0,1 bar bilo potrebno 7,6 s da se stabilizira na konačnoj poziciji kutnog pomaka od 70°, dok pri korištenju podtlaka od -0,8 bar do stabilizacije je došlo pri vremenu od 1,6 s za kutni pomak od 135°. Također je vidljivo kako vrijeme linearno raste do kuta

od  $120^\circ$  za više vrijednosti podtlaka, nakon čega kreće stabilizacija mišića u krajnjoj poziciji kutnog pomaka od  $135^\circ$ .

Sljedeća dva mjerenja vremenskog perioda u kojem mišić obavi rad poprimajući određeni kutni pomak su obavljena s opterećenjem mišića na njegovom donjem dijelu. Kao opterećenje se koristio uteg u obliku valjka s provrtom za vijak, mase 0,55 kg. Zatim se isti valjak izrezao na pola kako bi se dobila masa od 0,3 kg koja se na isti način postavila na mišić te se nastavilo mjerenje. Obje konstrukcije s opterećenjem prikazane su na slici 6.12.



*Slika 6.12 Opterećenje mišića s utezima*

Tablica 6.2 prikazuje vremena za opterećenost od 0,3 kg, a na slici 6.13 vidljiv je graf koji prikazuje ovisnost kutnog pomaka o vremenu. Za razliku od vremenskog testiranja mišića koji nije opterećen, ovdje se vidi veća razlika u vremenu koje je potrebno da mišić dođe do svoje konačne pozicije kutnog pomaka. Zbog toga što provrt na utegu u obliku osovine nije postavljen u središte osovine već pomaknut za određenu duljinu na jednu stranu, dolazi do laganog njihanja konstrukcije. Isto tako do toga dolazi jer je težište osovine pomaknuto pa veći dio koji se nalazi na desnoj strani vuče pneumatski mišić.

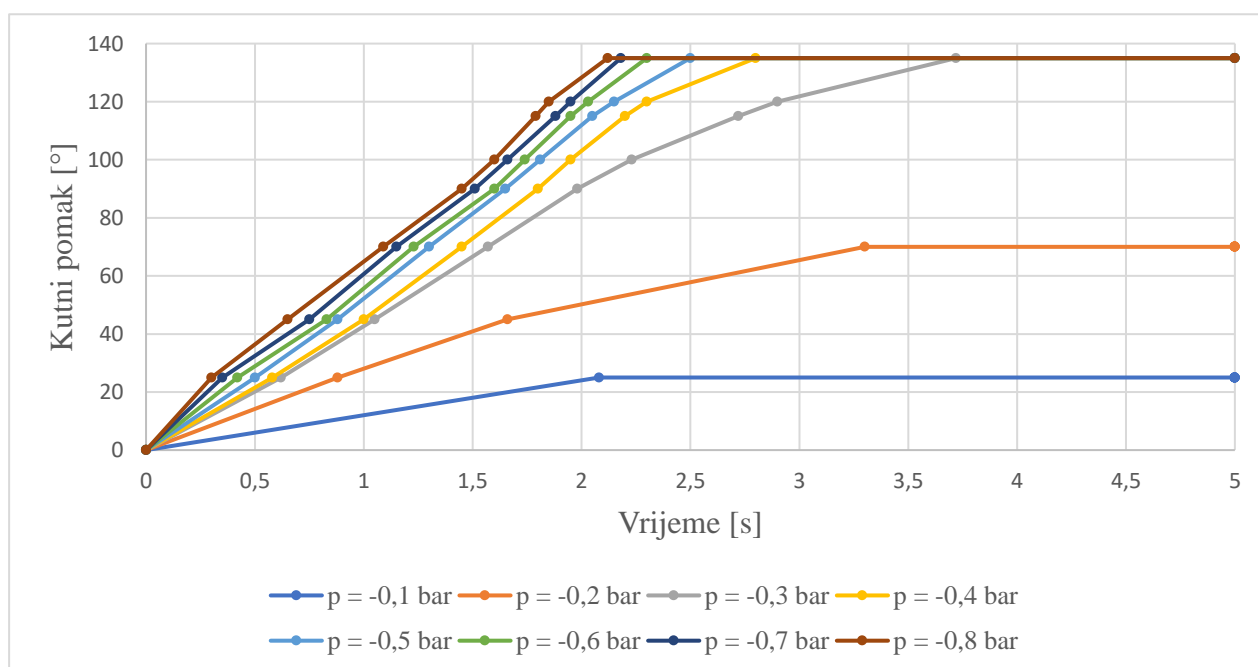
Ovdje je maksimalna pozicija kutnog pomaka od  $135^\circ$  postignuta pri vrijednostima podtlaka višim od -0,2 bar, dok je za prijašnje mjerenje bez opterećenja ta ista pozicija postignuta pri vrijednostima podtlaka višim od -0,1 bar. Također je vidljivo kako u ovom slučaju mišić pri podtlaku od -0,1 bar je uspio napraviti kutni pomak od samo  $25^\circ$  za 2,08 s, dok bez opterećenosti pri istom podtlaku je došao do maksimalnog kutnog pomaka od  $70^\circ$ , a kut od  $25^\circ$  je poprimio za 1 s. Na grafu je također vidljiva vremenska linearnost do postizanja kutnog pomaka od  $120^\circ$  pri



podtlacima od -0,3 bar do -0,8 bar gdje nakon toga dolazi do stabiliziranja mišića u konačnog poziciji kutnog pomaka od 135°.

Tablica 6.2 Rezultati kutnog pomaka tijekom vremena s opterećenjem mišića od 0,3 kg pri različitim vrijednostima podtlaka

$p = -0,1$ bar		$p = -0,2$ bar		$p = -0,3$ bar		$p = -0,4$ bar	
Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]
25	2,08	25	0,88	25	0,62	25	0,58
-		45	1,66	45	1,05	45	1
-		70	3,3	70	1,57	70	1,45
-		-		90	1,98	90	1,8
-		-		135	3,72	135	2,8
$p = -0,5$ bar		$p = -0,6$ bar		$p = -0,7$ bar		$p = -0,8$ bar	
Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]
25	0,5	25	0,42	25	0,35	25	0,3
45	0,88	45	0,83	45	0,75	45	0,65
70	1,3	70	1,23	70	1,15	70	1,09
90	1,65	90	1,6	90	1,51	90	1,45
135	2,5	135	2,3	135	2,18	135	2,12



Slika 6.13 Mjerenje vremena ostvarivanja određenog kutnog pomaka pri različitim vrijednostima podtlaka sa opterećenjem od 0,3 kg

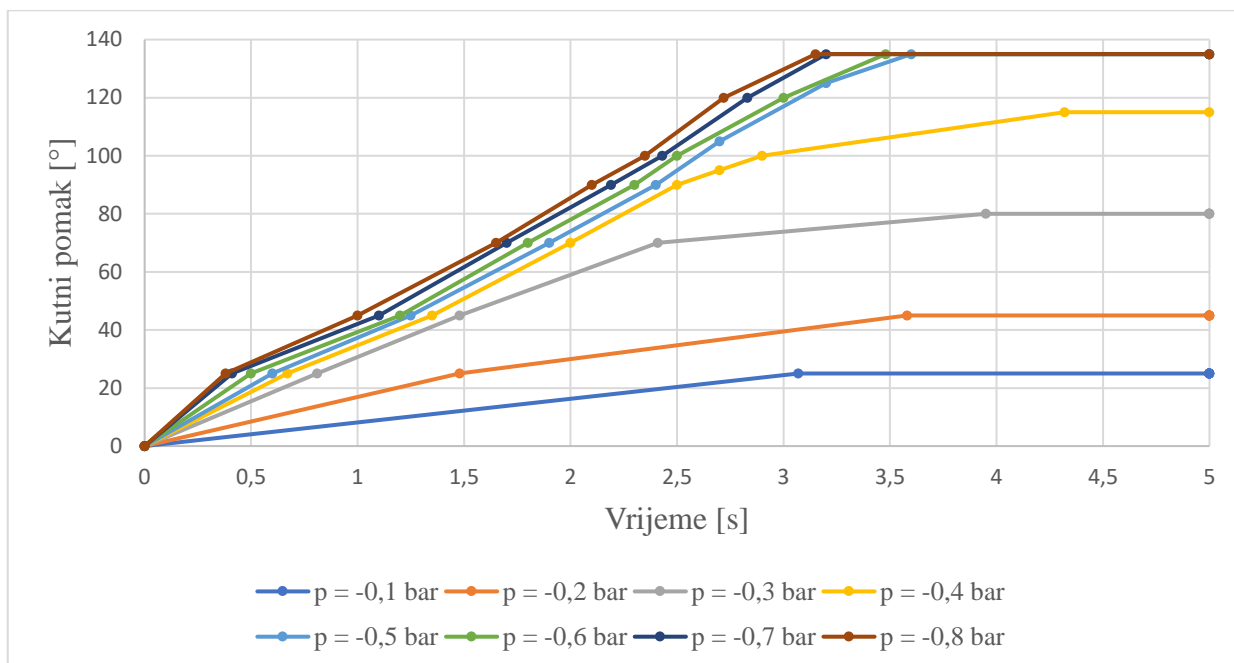
Sljedeće je izrađeno isto mjerenje, ali za veću masu od 0,55 kg. Izrađena je tablica 6.3 s rezultatima mjerenja za neke od kutova, a na slici 6.14 je prikazan graf gdje je vidljiva ovisnost kutnog pomaka o vremenu. U ovom slučaju je mišić pri podtlaku od -0,1 bar uspio napraviti kutni pomak 25° za 3,07 s, dok je mišić sa manjim utegom napravio isti kutni pomak pri istoj vrijednosti podtlaka za 2,08 s.

Isto tako je vidljivo kako se u slučaju opterećenosti mišić stabilizirao pri kutnom pomaku od 135° tek za vrijednosti podtlaka više od -0,4 bar, dok pri neopterećenom testiranju nije došao do svoje maksimalne pozicije od 135° samo za podtlak od -0,1 bar, a pri opterećenosti manjom masom je postigao taj isti kutni pomak za vrijednosti podtlaka više od -0,2 bar.

Kod ovog ispitivanja je također došlo do njihanja konstrukcije zbog pomaka središta osovine. Prilikom mjerenja uočeno je kako pri podtlaku od -0,4 bar, kada pneumatski mišić dođe do maksimalnog pomaka od 115°, dolazi do laganog izvijanja mišića.

*Tablica 6.3 Rezultati kutnog pomaka tijekom vremena s opterećenjem mišića od 0,55 kg pri različitim vrijednostima podtlaka*

$p = -0,1$ bar		$p = -0,2$ bar		$p = -0,3$ bar		$p = -0,4$ bar	
Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]
25	3,07	25	1,48	25	0,81	25	0,67
-	-	45	3,58	45	1,48	45	1,35
-	-	-	-	70	2,41	70	2
-	-	-	-	80	3,95	90	2,5
-	-	-	-	-	-	115	4,32
$p = -0,5$ bar		$p = -0,6$ bar		$p = -0,7$ bar		$p = -0,8$ bar	
Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]	Kut [°]	Vrijeme [s]
25	0,6	25	0,5	25	0,41	25	0,38
45	1,25	45	1,2	45	1,1	45	1
70	1,9	70	1,8	70	1,7	70	1,65
90	2,4	90	2,3	90	2,19	90	2,1
135	3,6	135	3,48	135	3,2	135	3,15

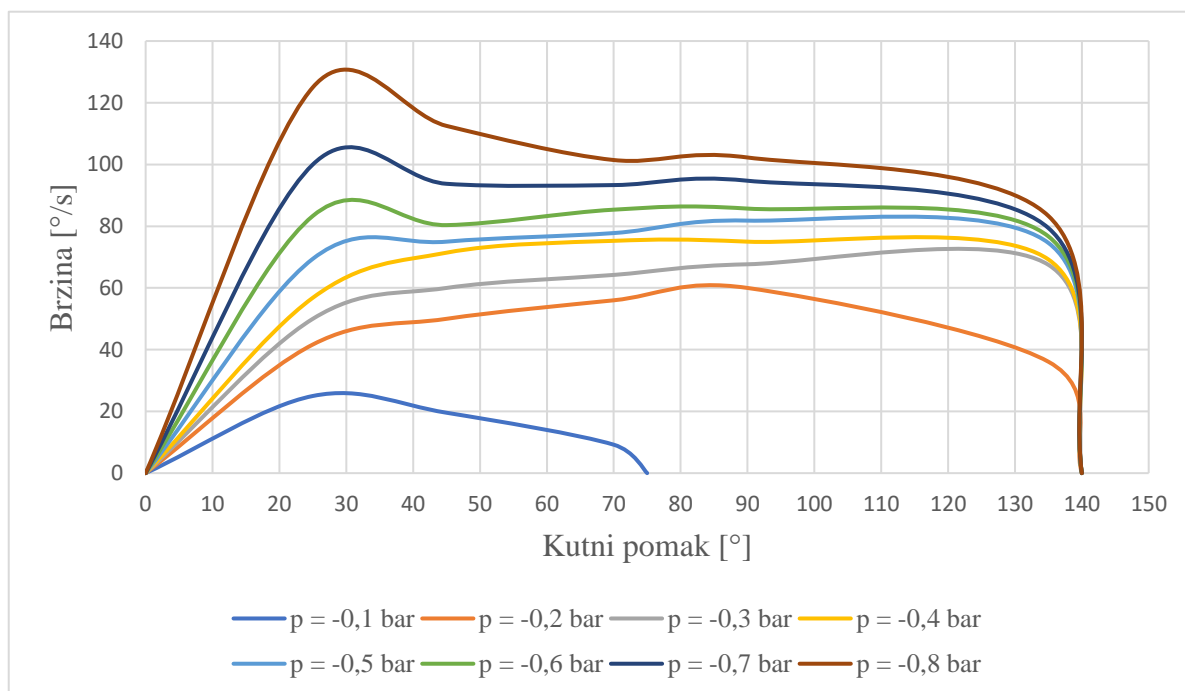


Slika 6.14 Mjerenje vremena ostvarivanja određenog kutnog pomaka pri različitim vrijednostima podtlaka s opterećenjem od 0,55 kg

Iz dobivenih grafova gdje se mjerilo vrijeme i dobio odnos vremena i kutnog pomaka za različite vrijednosti podtlaka i različite opterećenosti mišića, moguće je zaključiti da vrijeme potrebno da mišić dođe do svoje konačne pozicije kutnog pomaka koja iznosi  $135^\circ$  upravo ovisi o vrijednosti podtlaka i opterećenosti. Pri nižim vrijednostima podtlaka mišić većinom neće ni doći do svoje moguće konačne pozicije te će mu biti potrebno duže vrijeme dok se ne stabilizira u konačnoj poziciji. Dok pri višim vrijednostima podtlaka puno brže će doći do svoje krajnje pozicije kutnog pomaka. Isto to vrijedi za mišić koji je neopterećen i koji je opterećen. Čim je mišić neopterećen tim će brže doći do svoje konačne pozicije kutnog pomaka, a pri nižim vrijednostima podtlaka će poprimiti veće kutne pomake, za razliku od mišića koji je opterećen, što dokazuje Pascalov zakon.

Nakon dobivenih vremenskih perioda, izrađen je graf na kojem je vidljiva brzina gibanja pneumatskog mišića za verzije bez opterećenosti te opterećenosti s utezima od 0,3 kg i 0,55 kg. Na slici 6.15 prikazan je odnos brzine i kutnog pomaka pneumatskog mišića bez korištenja opterećenja tijekom rada pri različitim vrijednostima podtlaka. Uočeno je da za male vrijednosti podtlaka brzina pri kojom mišić obavlja rad isto ostaje vrlo malena, dok sa povećanjem podtlaka brzina drastično raste. Također je uočeno da brzina rada mišića linearno raste dok ne dostigne svoj maksimum. Nakon toga je vidljiv umjereni pad brzine dok mišić ne dođe do konačne pozicije kutnog pomaka mišića od  $135^\circ$ . Za više vrijednosti podtlaka maksimum se postiže pri kutnom pomaku od  $30^\circ$ , gdje zatim kreće drastični pad brzine pri povećanju kuta za  $10^\circ$  te nakon toga

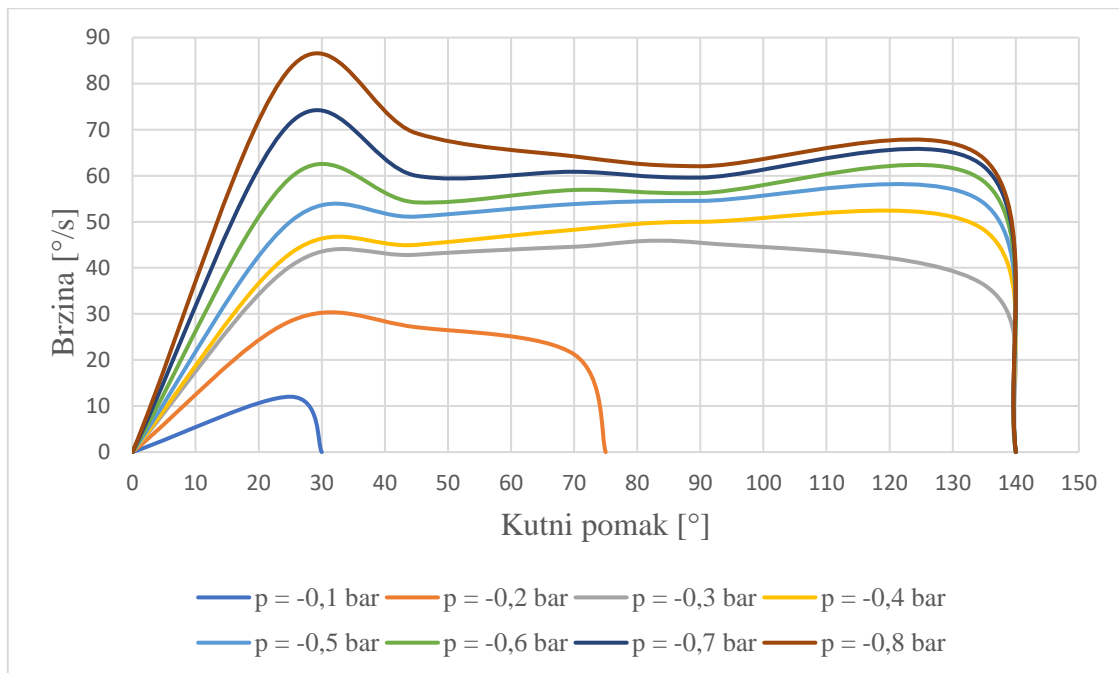
lagani pad brzine do stabiliziranja. Za niže vrijednosti podtlaka brzina počinje padati nakon postizanja svoga maksimuma.



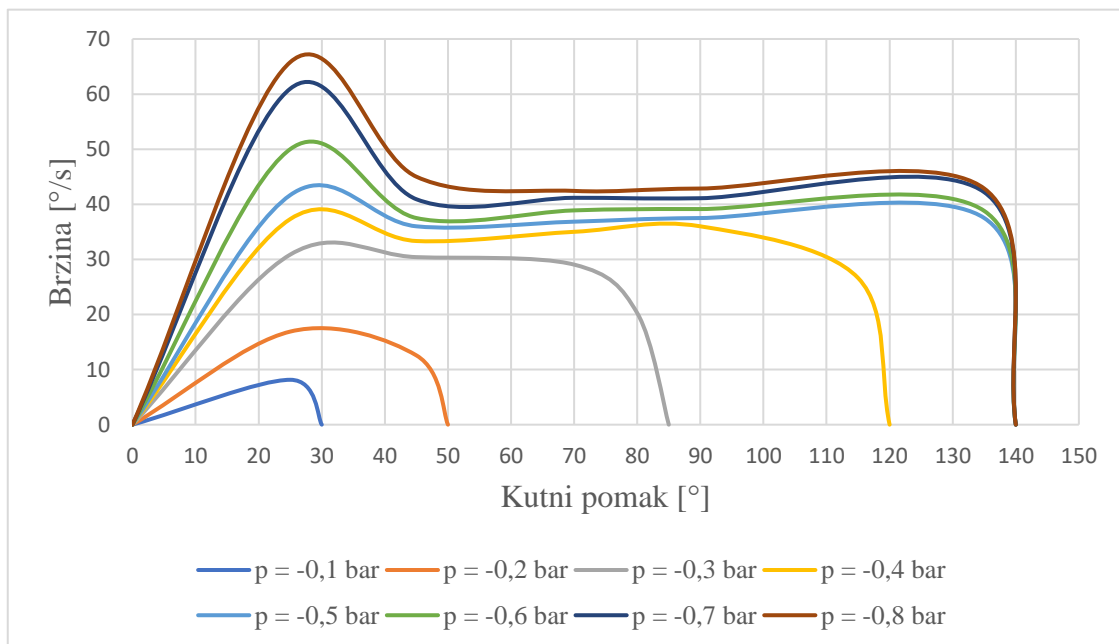
Slika 6.15 Odnos brzine i kutnog pomaka bez opterećenja mišića

Na slici 6.16 prikazan je odnos brzine i kutnog pomaka pneumatskog mišića pri opterećenosti od 0,3 kg. Ovdje je najveća brzina obavljanja rada postignuta pri kutu od 30° i vrijednosti podtlaka od -0,8 bar. Za razliku od toga, na slici 6.17 prikazan je odnos brzine i kutnog pomaka pneumatskog mišića pri opterećenosti od 0,55 kg, gdje maksimalna ostvarena brzina iznosi 68 °/s pri kutnom pomaku od 30° i korištenjem podtlaka od -0,8 bar.

Očitavanjem prijašnjih vrijednosti i proučavanjem oba grafa gdje se koristi mišić sa opterećenjem može se zaključiti kako kao i kod mišića bez opterećenja, brzina pri višim vrijednostima podtlaka naglo linearno raste do postizanja svoga maksimuma koji se u sva tri slučaja postiže pri kutnom pomaku od 30°. Nakon toga brzina naglo pada u sljedećih desetak stupnjeva gdje naposljetku dolazi do laganog pada sve do konačne pozicije kutnog pomaka od 135°. Kod nižih vrijednosti podtlaka brzina lagano pada odmah nakon postizanja svoga maksimuma.



Slika 6.16 Odnos brzine i kutnog pomaka pri opterećenju od 0,3 kg



Slika 6.17 Odnos brzine i kutnog pomaka pri opterećenju od 0,55 kg

Iz dobivenih rezultata moguće je uočiti da čim se koristi veće opterećenje (slika 6.17), brzina će nakon dostizanja svoga maksimuma pri kutnom pomaku od 30° pasti na dosta nižu vrijednost naspram pri nižim opterećenjima ili bez opterećenja. To je u grafu na slici 6.17 moguće uočiti strmom i dugom krivuljom nakon postignutog maksimuma.

Nakon proučavanja svih dobivenih podataka od mjerenja blokirajuće sile i brzine u ovisnosti o kutnom pomaku i vrijednosti podtlaka moguće je zaključiti kako se pri većim kutnim pomacima smanjuje sila koju ostvaruje mišić te je zbog toga prilikom opterećenosti mišića brzina kojom on dolazi u krajnji položaj kutnog pomaka sve sporija. Isto tako se brzina smanjuje ako se koriste niže vrijednosti podtlaka, a povećava kada se koriste više vrijednosti podtlaka. Najveću silu mišić ostvaruje pri nižim kutnim pomacima za veće vrijednosti podtlaka. Zbog toga mišić koji je opterećen može vrlo brzo postići niže pozicije kutnog pomaka, dok svoju krajnju poziciju od  $135^\circ$  postiže samo pri višim vrijednostima podtlaka, koji su viši od -0,2 bar za slučaj opterećenosti utegom od 0,3 kg i viši od -0,4 bar za slučaj opterećenosti utegom od 0,55 kg.

## 7. ZAKLJUČAK

Danas postoji mnogo različitih vrsta umjetnih pneumatskih mišića kojima se postižu različiti načini gibanja kao što su kontrakcija i savijanje, kao i načini hvatanja objekata koji se postižu na temelju same geometrije mišića. Pneumatski mišići imaju široki raspon primjene koja se kreće od primjene u industriji za hvatanje i prijenos objekata s jednog mjesta na drugo, do medicinske primjene u rehabilitacijske svrhe.

Nakon proučavanja različitih vrsta umjetnih pneumatskih aktuatora mišića primijećeno je da postoji malo onih koji rade sa podtlakom te su još u fazi razvijanja i istraživanja. Shodno tome odlučeno je izraditi pneumatski mišić koji vrši kutni pomak na bazi podtlaka. Takav mišić je jednostavan za korištenje, ne zahtijeva mehaničke dijelove, lako se sastavlja i lako se zamjenjuju dijelovi od kojih je sastavljen. Također, ne zahtijeva upotrebu složenog upravljačkog hardvera i algoritama.

Za vanjsku membranu se koristio komercijalno dostupni gumeni mijeh u čije žljebove u unutrašnjosti su se umetnula prstenasta ojačanja. Za ostvarivanje kutnog gibanja koristila se PVC vezica koja prolazi kroz jedan kraj ojačanja, a za dodatni potporanj između svakog prstena postavili su se graničnici. Konačno se cijela konstrukcija morala osigurati od propuštanja zraka, a to se omogućilo čepovima na gornjem i donjem kraju mijeha. Izrađen je program u softveru LabVIEW preko kojeg se omogućilo upravljanje mišićem, odnosno upravljanje podtlakom. Preko toga programa odabirala se vrijednost podtlaka od -0,1 bar do -0,8 bar. Njime je omogućen kutni pomak od  $0^\circ$  do maksimalnih  $135^\circ$  u jednom smjeru. Nakon izrađenog programa za upravljanje, krenulo se sa testiranjem mišića.

Testirala se blokirajuća sila koju mišić ostvaruje pri različitim kutnim pomacima, kao i brzina djelovanja mišića. Vrijednost maksimalne sile iznosi 123 N pri podtlaku od -0,8 bar za kut od  $0^\circ$ , odnosno dok je mišić u početnom položaju. Povećavanjem kuta sila drastično pada te naposljetku za kut od  $90^\circ$  vrijednost sile iznosi 20 N pri istoj vrijednosti podtlaka od -0,8 bar.

Nakon toga izmjereno je vrijeme potrebno da mišić ostvari svoj konačni kutni pomak za različite vrijednosti podtlaka i to za mišić bez opterećenja i sa opterećenjem. Iz dobivenih grafova je vidljivo kako je vrijeme testiranja različito za različite vrijednosti podtlaka, odnosno za niže vrijednosti podtlaka vrijeme je veće, a za više vrijednosti podtlaka vrijeme je manje. Isto tako čim je mišić pri većim opterećenjem to će vrijeme testiranja biti duže te u nekim slučajevima korištenja nižih vrijednosti podtlaka, mišić neće poprimiti svoj maksimalni mogući kutni pomak.

Nakon vremenskog testiranja, analizirane su maksimalne brzine koje mišić ostvaruje pri radu bez opterećenja, kao i sa opterećenjem. Uočeno je da za male vrijednosti podtlaka brzina pri kojoj mišić obavlja rad isto ostaje vrlo malena, dok sa povećanjem podtlaka brzina drastično raste te je ostvarena maksimalna brzina od 130°/s. Također, brzina rada mišića linearno raste dok ne dostigne svoj maksimum, koji se za više vrijednosti podtlaka postiže pri kutnom pomaku od 30°, nakon čega brzina umjereno pada dok mišić ne dođe do svoje konačne pozicije kutnog pomaka od 135°. Bez opterećenja mišić ostvaruje velike brzine u radu, a sa povećanjem opterećenosti brzine mu opadaju.

Također je moguće nadograditi postojeći umjetni pneumatski mišić na način da mu se promijeni područje djelovanja. Za sada je dozvoljeno kutno gibanje samo u jednom smjeru, a to je moguće promijeniti ugradnjom elektromotora na gornjem dijelu mišića. Time bi se omogućilo okretanje mišića za 360° oko svoje osi čime se pokriva mnogo veće područje djelovanja mišića.



## LITERATURA

- [1] s Interneta, <https://whatispiping.com/actuators-working-types-selection/>, 7.1.2023.
- [2] Ali H. i dr.: „A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control)“, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(2): 440-454, 2009.
- [3] Zhang Z. i dr.: „A Pneumatic/Cable-driven Hybrid Linear Actuator with Combined Structure of Origami Chambers and Deployable Mechanism“, IEEE Robotics and Automation Letters PP(99):1-1, 2020.
- [4] Kalita B. i dr.: „A Review on the Development of Pneumatic Artificial Muscle Actuators: Force Model and Application“, Actuators 2022, 11, 288., 2022.
- [5] s Interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic\\_artificial\\_muscles](https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic_artificial_muscles), 20.1.2023.
- [6] Grellmann H. i dr.: „Fundamentals and working mechanisms of artificial muscles with textile application in loop“, Smart Materials and Structures, Volume 31, Number 2, 2021.
- [7] Gong D. i dr.: „Design and Control of the McKibben Artificial Muscles Actuated Humanoid Manipulator, IntechOpen, 8.2.2022.
- [8] s Interneta, <https://newatlas.com/robotics/grace-pneumatic-artificial-muscle-actuator/>, 10.1.2023.
- [9] Seonggun J. i dr.: „Development of the Ultralight Hybrid Pneumatic Artificial Muscle: Modelling and Optimization“, 22.4.2021.
- [10] Ploh T.: „Konstrukcija umjetnog pneumatskog mišića“, Diplomski rad, Tehnički fakultet u Rijeci, 2021.
- [11] Gregov G. i dr.: „Design, Development and Experimental Assessment of a Cost-Effective Bellow Pneumatic Actuator“, Actuators, 11, 170, 2022.
- [12] Gregov G. i dr.: „Position Control of Cost-Effective Bellow Pneumatic Actuator Using an LQR Approach“, Actuators, 12(2), 73, 2023.
- [13] Šoljić A.: „Konstrukcija Stewartove platforme korištenjem umjetnih pneumatskih mišića s mijehom“, Diplomski rad, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [14] Hu W. i dr.: „A Structural Optimization Method for a Soft Pneumatic Actuator“, Robotics 7(2):24, 1.6.2018.

- [15] Souhail A.: „PneuNets bending actuator design and fabrication using low cost silicones“, The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2018.
- [16] Han K. i dr.: „A novel soft pneumatic artificial muscle with high contraction ratio“, School of Mechanical engineering Seoul, 2017.
- [17] Mohammad Hadi Namdar Ghalati i dr.: „Static Modeling of Soft Reinforced Bending Actuator Considering External Force Constraints“, Soft Robotics, Volume: 9 Issue 4, 8.8.2022.
- [18] Tomori H. i dr.: „A Self-Deformation Robot Design Incorporating Bending-Type Pneumatic Artificial Muscles“, Technologies, Volume 7, Issue 3, 23.7.2019.
- [19] s Interneta, <https://wyss.harvard.edu/technology/foams-soft-robotic-artificial-muscles/>, 10.1.2023.
- [20] Usevitch N. S. i dr.: „APAM: Antagonistic Pneumatic Artificial Muscle“, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Australija, 2018.
- [21] Fatahillah M. i dr.: „A Novel Soft Bending Actuator Using Combined Positive and Negative Pressures“, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 8:472, 2020.
- [22] s Interneta, [https://www.festo.com/cat/en-us\\_us/data/doc\\_ENGB/PDF/EN/VN\\_EN.PDF](https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_ENGB/PDF/EN/VN_EN.PDF) , 1.2.2023.
- [23] s Interneta, <https://www.zemiceurope.com/en/top-sensors-t2-weight-transmitter-analog-digital.html>, 1.2.2023.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Princip rada umjetnog pneumatskog mišića (PAM) [6] .....	4
Slika 2.2 Princip rada McKibben mišića [6] .....	5
Slika 2.3 Princip rada naboranog mišića [6] .....	6
Slika 2.4 GRACE pneumatski aktuator [8] .....	7
Slika 2.5 Sustav GRACE aktuatora u obliku ljudske šake [8] .....	7
Slika 2.6 Konstrukcija pneumatskog mišića s mijehom [9] .....	8
Slika 2.7 Proces izrade pneumatskog mišića s mijehom [9] .....	8
Slika 2.8 3D model pneumatskog mišića s pripadajućim dijelovima [10, 11] .....	9
Slika 2.9 Maksimalna ostvarena sila pneumatskog mišića u ovisnosti o podtlaku i pomaku [10]	10
Slika 2.10 Rezultati pozicioniranja pneumatskog mišića s PID i LQR za sustav A s pomakom: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 30 mm, e) 40 mm, f) 50 mm [12] .....	11
Slika 2.11 Rezultati pozicioniranja pneumatskog mišića s PID i LQR za sustav B s pomakom: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 30 mm, e) 40 mm, f) 50 mm [12] .....	12
Slika 2.12 3D model Stewartove platforme [13] .....	13
Slika 3.1 Uzdužni presjek pneumatskog mišića sa šupljim komorama [14] .....	14
Slika 3.2 Kut savijanja pneumatskog mišića pod različitim ulaznim pritiskom zraka [14] .....	15
Slika 3.3 Hvatanje i podizanje različitih objekata pomoću pneumatskog mišića [15] .....	15
Slika 3.4 HRCPAM umjetni pneumatski mišić [16] .....	16
Slika 3.5 Meki savitljivi mišić ojačan vlaknima [17] .....	17
Slika 3.6 Shema rada BPAM mišića [18] .....	17
Slika 3.7 Strukturna geometrija kostura FOAM mišića [19] .....	18
Slika 3.8 Različite vrste FOAM mišića koji ostvaruju različite vrste gibanja [19] .....	19
Slika 3.9 Princip rada APAM mišića [20] .....	20
Slika 3.10 Rad APAM mišića [20] .....	21
Slika 3.11 Princip rada mišića s pozitivnim i negativnim tlakom [21] .....	22

Slika 4.1 Preliminarno konstrukcijsko rješenje umjetnog pneumatskog mišića sa kutnim pomakom [10] .....	24
Slika 4.2 3D printani prstenovi s izdankom [10] .....	24
Slika 4.3 Prikaz montaže mišića i povezanosti sa senzorom .....	25
Slika 4.4 Mjerenje sile pneumatskog mišića za kutove od 0° (lijevo), 45° (sredina) i 90° (desno) .....	26
Slika 4.5 Odnos sile i kutnog pomaka mišića pri različitim podtlacima.....	26
Slika 4.6 Dimenzije (lijevo) nove konstrukcije i 3D prikaz (desno) umjetnog pneumatskog mišića sa kutnim pomakom .....	27
Slika 4.7 Skica prstenastog ojačanja sa dimenzijama (lijevo) i izrađeni prsten (desno).....	28
Slika 4.8 Izrađeni čepovi za brtvljenje mišića sa umetnutim vijcima.....	29
Slika 4.9 Izrađeni kvadratni graničnik s provrtom.....	29
Slika 4.10 Konačni izrađeni umjetni pneumatski mišić s kutnim pomakom u opuštenom položaju (lijevo) i potpuno savijenom položaju (desno).....	30
Slika 5.1 Pneumatska oprema .....	31
Slika 5.2 Proporcionalni regulator tlaka VPPI-5L-3-G18-1V1H-V1-S1D.....	32
Slika 5.3 Ovisnost generiranog podtlaka o ulaznom pretlaku [22] .....	33
Slika 5.4 Izvor napona Axio AX-3005L-3.....	33
Slika 5.5 Povezivanje aluminijskih profila .....	34
Slika 5.6 Konstrukcija za ispitivanje pneumatskog mišića .....	34
Slika 5.7 Senzor sile Zemic H3G-C3-50kg-6B postavljen na njegov prihvat .....	35
Slika 5.8 Pretvarač signala i Ni MyRIO akvizicijska kartica.....	36
Slika 5.9 Upute za programiranje pretvarača [23] .....	36
Slika 5.10 Program za upravljanje podtlakom i očitavanje dobivene sile pneumatskog mišića..	37
Slika 5.11 Određivanje svojstva bloka „Podtlak“ .....	38
Slika 5.12 Grafičko korisničko sučelje za upravljanje pneumatskim mišićem.....	39
Slika 6.1 Polipropilenska špaga .....	40
Slika 6.2 Konačni prikaz montaže mišića i njegove povezanosti sa senzorom .....	41

Slika 6.3 Ovisnost sile o kutnom pomaku pri određenom podtlaku .....	42
Slika 6.4 Mjerenje sile za kutni pomak od 30° .....	42
Slika 6.5 Prikaz izvijanja pneumatskog mišića .....	43
Slika 6.6 Mjerenje sile za kutni pomak od 75° (lijevo) i od 90° (desno) .....	44
Slika 6.7 Graf ovisnosti sile o podtlaku za kut 45° .....	45
Slika 6.8 Mjerenje sile za kutni pomak od 90° .....	45
Slika 6.9 Graf ovisnosti sile o podtlaku za kut 90° sa pomakom (narančasto) i bez pomaka (plavo) senzora sile .....	46
Slika 6.10 Mjereni kutovi prilikom rada mišića bez opterećenja .....	47
Slika 6.11 Mjerenje vremena ostvarivanja određenog kutnog pomaka pri različitim vrijednostima podtlaka .....	48
Slika 6.12 Opterećenje mišića s utezima .....	49
Slika 6.13 Mjerenje vremena ostvarivanja određenog kutnog pomaka pri različitim vrijednostima podtlaka sa opterećenjem od 0,3 kg .....	50
Slika 6.14 Mjerenje vremena ostvarivanja određenog kutnog pomaka pri različitim vrijednostima podtlaka s opterećenjem od 0,55 kg .....	52
Slika 6.15 Odnos brzine i kutnog pomaka bez opterećenja mišića .....	53
Slika 6.16 Odnos brzine i kutnog pomaka pri opterećenju od 0,3 kg .....	54
Slika 6.17 Odnos brzine i kutnog pomaka pri opterećenju od 0,55 kg .....	54

## POPIS TABLICA

Tablica 6.1 Rezultati kutnog pomaka tijekom vremena bez opterećenosti mišića pri različitim vrijednostima podtlaka .....	48
Tablica 6.2 Rezultati kutnog pomaka tijekom vremena s opterećenjem mišića od 0,3 kg pri različitim vrijednostima podtlaka .....	50
Tablica 6.3 Rezultati kutnog pomaka tijekom vremena s opterećenjem mišića od 0,55 kg pri različitim vrijednostima podtlaka .....	51

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom radu prikazana je konstrukcija umjetnog pneumatskog mišića koji ostvaruje kutni pomak pomoću podtlaka. Izrađen je 3D model mišića prema kojem se izradila konačna konstrukcija. Umjetni pneumatski mišić se sastojao od jednog homogenog materijala što je u ovom slučaju guma u obliku mijeha. Za ostvarenje kutnog pomaka oblikovana je unutrašnjost mijeha pomoću isprintanih 3D komponenti. Za pokretanje i upravljanje mišićem koristila se pneumatska oprema i računalni program LabVIEW. Provedena su testiranja mišića kako bi se dao uvid u njegov rad u stvarnim uvjetima. Mjerila se blokirajuća sila koju ostvaruje mišić pod različitim kutovima pomoću senzora sile, kao i brzina kojom mišić obavlja gibanje. Najveća sila od 123 N je ostvarena za kutni pomak od  $0^\circ$ , odnosno u početnom položaju mišića, pri vrijednosti podtlaka od -0,8 bar, dok je sa povećanjem kutnog pomaka sila opadala. Kutna brzina gibanja mišića raste do svoje maksimalne vrijednosti od  $130^\circ/\text{s}$ , što se ostvaruje pri kutnom pomaku od  $30^\circ$ , nakon čega brzina umjereno pada dok mišić ne dođe do svoje konačne pozicije kutnog pomaka od  $135^\circ$ .

**KLJUČNE RIJEČI:** umjetni pneumatski mišić, meki aktuator, kutni pomak

## ABSTRACT AND KEYWORDS

This paper presents the construction of an artificial pneumatic muscle that achieves angular displacement through negative pressure. A 3D model of a muscle was created on which the final construction was based. The artificial pneumatic muscle consisted of one homogeneous material, which in this case is rubber in the form of a bellow. To achieve the angular displacement, the interior of the bellow was shaped using 3D printed components. Pneumatic equipment, and the LabVIEW computer program were used to start and control the muscle. Muscle tests were carried out to give an insight into its performance in real-life conditions. The blocking force exerted by the muscle at different angles was measured using a force sensor, as well as the speed at which the pneumatic muscle performed the movement. The highest force of 123 N was achieved for angular displacement of  $0^\circ$ , which is the initial position of the muscle, at a negative pressure value of -0,8 bar, while with the increase of angular displacement, the force decreased. The angular velocity of muscle movement increases to its maximum value of 130  $^\circ/s$ , which is achieved at an angular displacement of  $30^\circ$ , after which the velocity decreases moderately until the muscle reaches its final position of  $135^\circ$ .

**KEY WORDS:** pneumatic artificial muscle, soft actuator, angular displacement