

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Marko VERČKOVNIK

**KONSTRUKCIJA TEKOČEGA TRAKU ZA
EKSTRUZIJO FILAMENTA Z ZRAČNIM
HLAJENJEM**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, junij 2024

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

KONSTRUKCIJA TEKOČEGA TRAKU ZA EKSTRUZIJO FILAMENTA Z ZRAČNIM HLAJENJEM

Diplomsko delo

Študent:	Marko VERČKOVNIK
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	izr. prof. dr. Blaž NARDIN
Somentor:	doc. dr. Dragan KUSIĆ

Slovenj Gradec, junij 2024

IZJAVA

Podpisani Marko Verčkovnik izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Blažu Nardinu za strokovno pomoč ter usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela in somentorju doc. dr. Draganu Kusiću za strokovno podporo in pomoč pri realizaciji eksperimentalnega dela.

Prav tako bi se rad zahvalil ostalim zaposlenim v laboratoriju za njihove nasvete in pomoč pri delu. Zahvalil bi se rad tudi prof. dr. Andreju Kitanovskemu za usmerjanje in nasvete izvedbe numeričnih simulacij.

Posebna zahvala gre tudi moji družini, ki me je tako med študijem kot tudi pri pisanju diplomskega dela ves čas vzpodbujala in mi stala ob strani.

POVZETEK

Konstrukcija tekočega traku za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem

V okviru diplomskega dela smo pripravili tekoči trak za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem. Pripravili smo numerične simulacije računalniška dinamika tekočin (angl. computational fluid dynamics, CFD) po metodi končnih elementov. Te smo uporabili za določitev volumskega pretoka zraka ventilatorjev, s katerim smo dosegli zadostno hlajenje filamenta. Takšno hlajenje je bilo doseženo s tretjo simulacijo, ki je imela volumski pretok zraka $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Maksimalna temperatura je v tej simulaciji po času 50 s hlajenja filamenta znašala $72,4 \text{ }^\circ\text{C}$, medtem ko se je povprečna temperatura v tej simulaciji spustila na $54,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Sklepamo lahko, da bo za dobro hlajenje potreben volumski pretok zraka, ki znaša vsaj $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Potrebno je bilo tudi določiti obremenitve tekočega traku, pripraviti NTM diagrame ter izvesti mehanski preračun za določitev velikosti nosilnega aluminijastega profila. V primeru nosilne konstrukcije ventilatorjev zadostujeta dve podpori, takrat dejanska napetost znaša $44,3 \text{ N/mm}^2$. Pri nosilni konstrukciji celotnega tekočega traku so potrebne tri podpore, takrat dejanska napetost znaša $18,5 \text{ N/mm}^2$. Nato smo pretvorili tekoči trak v obliko za računalniško podprto načrtovanje (angl. computer aided design, CAD) obliko ter pripravili CAD konstrukcijo tekočega traku. Pregledovali smo literaturo na področju vodenja ter izbrali primeren princip vodenja hitrosti vrtenja tekočega traku ter vodenja volumskega pretoka zraka ventilatorjev. Krmiljenje tekočega traku smo izvedli na podlagi frekvenčne regulacije. Krmiljenje ventilatorjev smo izvedli na podlagi spreminjanja napetosti s pomočjo potenciometrom. Tekoči trak smo nato tudi sestavili ter preverili obratovanje.

Ključne besede:

Numerična simulacija CFD, NTM diagram, mehanski preračun nosilnosti, CAD, vodenje tekočega traka, tekoči trak za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem.

SUMMARY

Design of conveyer for filament extrusion with air cooling

As part of this work, we prepared a conveyor belt for filament extrusion with air cooling. We created numerical simulations of computational fluid dynamics (CFD) using the finite element method. We used these to determine the air flow rate of the fans with which we could achieve sufficient cooling of the filaments. Such cooling was achieved with the third simulation, which had an air flow rate of 150 m³/h. The maximum temperature in this simulation was 72,4 °C after 50 s of filament cooling, while the average temperature in this simulation dropped to 54,3 °C. From this we can conclude that an air flow rate of at least 150 m³/h is required for good cooling. It was also necessary to determine the physical loads on the conveyor belt, create an NTM diagram and make a mechanical estimate to determine the size of the supporting aluminum profile. In the case of the supporting profile of the fans, two supports are sufficient and the actual stress is 44,3 N/mm². In the case of the supporting aluminum profile of the entire conveyor belt, three supports are required, with an actual tension of 18,5 N/mm². We then converted the assembly line into a CAD format and created a CAD design of the assembly line. We reviewed the literature in the field of control and selected a suitable principle for controlling the speed of the conveyor belt and the air flow rate of the fans. The conveyor belt was designed to be controlled with the frequency control. The fans were controlled on the basis of changing the voltage with the help of a potentiometer. We then assembled the conveyor belt and checked its operation.

Keywords:

Numerical CFD simulation, NTM diagram, mechanical calculation of the physical load, CAD, control of conveyer, conveyer for filament extrusion with air cooling.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Opis področja dela in opredelitev problema	1
1.2	Cilji	1
1.3	Hipoteze ali trditve	1
1.4	Omejitve	2
1.5	Uporabljene metode	2
1.6	Opis dela	2
2	TEORETIČNI DEL	3
2.1	Termoplastični materiali	3
2.2	Ekstruzija	4
2.2.1	Lijak	4
2.2.2	Cilinder	5
2.2.3	Polž	5
2.2.4	Pogonski sistem ekstruderja	6
2.2.5	Šoba	6
2.2.6	Hlajenje	7
2.3	Prenos toplote	7
2.3.1	Prenos toplote v polimerih	8
2.3.2	Prevod toplote	13
2.3.3	Prestop toplote	13
2.4	Numerične simulacije	17
2.4.1	Princip	17
2.4.2	Metoda končnih elementov	18
2.4.3	Mreženje ali diskretizacija	18
2.5	Mehanika	19
2.5.1	Statika	19
2.5.2	Trdnost	22
2.6	Vodenje tekočega traku in ventilatorjev	25
2.6.1	Krmiljenje	25
2.6.2	Regulacija	26
2.6.3	Vodenje hitrosti enosmernega ventilatorja	27
3	EKSPERIMENTALNI DEL	29
3.1	Določitev zahtev, želja ter priprava idejne konstrukcije tekočega traku	29
3.2	Toplotni preračun	30
3.2.1	Priprava modela prenosa toplote pri zračno hlajeni ekstruziji	30
3.2.2	Izvedba CFD simulacije v programu Siemens NX12 Nastran	30
3.3	Mehanski preračun	33
3.3.1	Določitev sil v podporah, obremenitev in navorov	33
3.3.2	Izdelava NTM diagramov	36

3.3.3 Mehanski preračun za izbiro nosilne konstrukcije tekočega traku in naprav za hlajenje filamenta	40
3.4 Konstrukcija tekočega traku in naprav za hlajenje filamenta	41
3.5 Krmiljenje sistema	42
4 REZULTATI IN DISKUSIJA	43
4.1 Rezultati toplotnega preračuna	43
4.2 Rezultati mehanskega preračuna	44
4.3 Izvedba tekočega traku za zračno hlajenje filamenta	45
4.3.1 Tekoči trak za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem	45
4.3.2 Eksplozijska risba tekočega traku	45
4.3.3 Končna izvedba tekočega traku za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem	45
5 SKLEP	46
SEZNAM LITERATURE IN VIROV	48
SEZNAM SLIK	50
SEZNAM TABEL	52
SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	53
SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	55
PRILOGE	56
Priloga 1:CAD konstrukcija tekočega traku	56
Priloga 2:Podatki prve simulacije z zračnim volumskim pretokom 50 m ³ /h	57
Priloga 3:Podatki druge simulacije z zračnim volumskim pretokom 75 m ³ /h	60
Priloga 4:Podatki tretje simulacije z zračnim volumskim pretokom 150 m ³ /h	63
Priloga 5:Primerjava izvedenih simulacij	66
Priloga 6:Rezultati mehanskega preračuna	67
Priloga 7:Konstruiranje tekočega traku	69

1 UVOD

1.1 Opis področja dela in opredelitev problema

Na Fakulteti za tehnologijo polimerov se nahaja tekoči trak, ki nima nosilne konstrukcije in možnosti nadzora hitrosti traku. Namen raziskave je z računalniško podprtim načrtovanjem pripraviti konstrukcijo tekočega traku. Ta konstrukcija bo temeljila na mehanskih preračunih in numeričnih simulacijah. Produkt raziskave je delujoči tekoči trak z zračnim hlajenjem, ki omogoča ekstruzijo tudi bolj krhkih ter hidrofilnih materialov. Zahtevana je tudi možnost spreminjanja hitrosti traku in intenzivnosti hlajenja.

1.2 Cilji

Ključni cilj diplomskega dela je konstrukcija tekočega traku za ekstruzijo filameta z zračnim hlajenjem in možnostjo vodenja.

Sprotni cilji dela so:

- Določitev zahtev, želja ter priprava idejne konstrukcije tekočega traku.
- Se bolje spoznati s programom za CAD, ki ga bomo uporabili pri konstruiranju in numeričnih simulacijah.
- S pomočjo numeričnih simulacij določiti volumski pretok zraka, kateri bo dovolj dobro odvajal toploto pri procesu ekstruzije filameta.
- Na podlagi numerične simulacije izbrati primeren ventilator in njegovo število.
- Izbrati primeren nosilni profil konstrukcije in nosilni profil ventilatorjev na osnovi mehanskega preračuna.
- Priprava konstrukcije celotnega tekočega traku in ventilatorjev s pomočjo CAD.
- Zagotoviti ustrezno vodenje ventilatorjev in tekočega traku.

1.3 Hipoteze ali trditve

Hipoteza 1: Predpostavljamo, da sta debelina filameta in masni pretok ekstruzije dovolj majhna, da bo zadostovalo le zračno hlajenje, brez pršenja vode za povečan odvzem toplote.

Hipoteza 2: Predpostavljamo, da bo pri hlajenju filameta največjo vlogo igral prestop toplote. Na podlagi tega predvidevamo, da bo za večji prenos toplote potrebna prisilna konvekcija, katero bomo dosegli s turbulentnim gibanjem zračnega medija.

1.4 Omejitve

Pri delu pričakujemo predvsem težave pri pripravi numeričnih simulacij, zaradi pomanjkanja izkušenj s tega področja. Prav tako lahko pričakujemo težave z natančnostjo numeričnih simulacij, te so lahko ob nepravilnih vhodnih podatkih nenatančne.

1.5 Uporabljene metode

V diplomskem delu smo najprej iskali literaturo, na podlagi katere smo pripravili numerične simulacije, mehanske preračune nosilnosti in CAD konstrukcijo. Uporabili smo metode konstruiranja s pomočjo CAD v računalniškem programu Siemens NX12, numerične simulacije v programu Siemens NX12 z uporabo Simcenter Thermal/Flow na osnovi metode končnih elementov (MKE), mehanske preračune nosilnosti in iskanje literature.

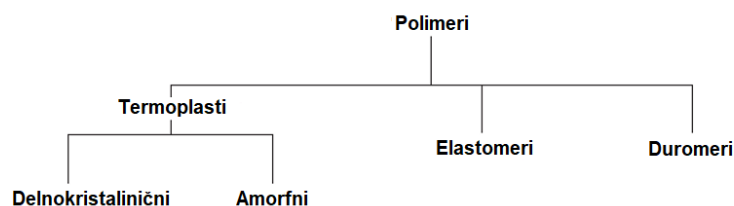
1.6 Opis dela

Najprej smo s pomočjo CAD obstoječi tekoči trak pretvorili v računalniško obliko za lažje konstruiranje. Nato smo izvedli numerično simulacijo za določitev primernih ventilatorjev, ki bodo zagotavljali zadostno hlajenje filamenta. Določili smo obremenitve, ki delujejo na tekoči trak. Izvedli smo mehanski preračun za določitev primernih aluminijastih profilov. V konstrukciji smo uporabili aluminijaste profile, te smo določili s pomočjo rezultatov mehanskega preračuna. Za dobro obratovanje smo izbrali primeren način vodenja hitrosti tekočega traka ter volumnskega pretoka zraka ventilatorjev. Tekoči trak smo sestavili in preverili delovanje.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Termoplastični materiali

Polimere sestavljajo ponavljajoče monomerne enote. Polimere pogosto razdelimo v različne skupine glede na molekulsko strukturo, saj to omogoča lažjo primerjavo med polimeri. Slika 1 prikazuje razdelitev polimerov na termoplaste, elastomere in duromere. Termoplasti se dalje delijo na amorfne in delno kristalinične termoplaste [1].



Slika 1: Razvrstitev polimerov [1]

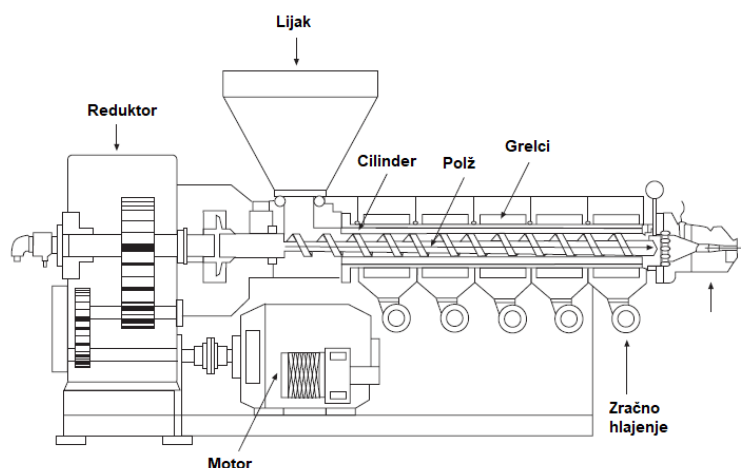
Termoplasti imajo linearno ali razvejano obliko makromolekul. Vse pogostejša uporaba termoplastičnih materialov je predvsem zaradi enostavne oblikovalnosti in predelave teh materialov. Oblikovanje termoplastičnih materialov poteka z uporabo toplote in tlaka. Toplota pri tem omogoči spremembo agregatnega stanja iz trdnega v tekoče, polimerna talina se nato s tlakom oblikuje v želeno obliko. Po ohlajanju zopet preidejo v trdno agregatno stanje. Termoplastični materiali se ob ponovnem segrevanju stalijo, tako je mogoče ponovno oblikovanje [1, 2].

Pri ohlajanju lahko termoplastični materiali kristalizirajo, takrat se naključno urejene in prepletene makromolekule uredijo. Kristalizacijo pogosto ovirajo precej prepletene makromolekule v polimerni talini, zato lahko makromolekule le delno kristalizirajo. Delno kristalinične termoplaste sestavljajo kristalinična in amorfna območja. Kristalinična območja imajo urejeno strukturo makromolekul in jih opisuje temperatura taljenja T_m . Mnogi termoplasti so lahko popolnoma amorfni, saj niso zmožni kristalizacije. V amorfni termoplastih, katere opisuje temperatura steklastega prehoda T_g , so makromolekule naključno urejene [1, 2].

Urejenost makromolekul ima precejšen vpliv na temperaturno obnašanje termoplastov. Pri amorfni termoplastični materialih se polimer postopno mehča s povečevanjem temperature. Pri prehodu preko T_g postanejo polimerne verige prosto gibljive. Med tem je pri delno kristaliničnih termoplastičnih materialih izrazit prehod v tekoče agregatno stanje pri povečanju temperature preko T_m [3].

2.2 Ekstruzija

Ekstruzija je proces izdelave izdelkov s prisilnim gibanjem materiala skozi šobo, kjer izdelek dobi obliko. Pri ekstruziji je termoplaste za preoblikovanje potrebno zmeščati, kar dosežemo s segrevanjem. To zmeščanje termoplastov pod vplivom toplote lahko imenujemo tudi plastifikacija. Ekstruder je stroj, ki se uporablja za ekstruzijo. Slika 2 prikazuje prerez enopložnega ekstruderja. Električni motor preko mehanskega menjalnika zagotavlja vrtenje polža. Polž in cilinder zagotavljata taljenje in gibanje termoplastičnega materiala proti šobi, kjer se nato oblikuje. Končna oblika je odvisna še od hlajenja [4].



Slika 2: Enopložni ekstruder [4]

2.2.1 Lijak

Lijak je enota pritrjena na cilinder in omogoča dovod materiala skozi odprtini v notranjost cilindra. Oblika lijaka ima precejšen vpliv na doziranje materiala. Stožčasta oblika lijaka je najprimernejša za prosto doziranje. Poleg tega mora biti notranja površina lijaka gladka in visoko polirana, da tako omogoča gibanje materiala in prepreči oprijemanje materiala. Ob neenakomernem doziranju lahko nastanejo mostovi, takrat se poslužujemo tudi vibriranja lijaka ali mešalnih naprav [4].

Za zagotovitev prostega dovajanja materiala po principu »flood feeding«. To je v primeru ko imamo poln lijak materiala in ta pada na podlagi gravitacije ter imamo z materialom napolnjen del od vstopne cone polža do nasutega materiala. Takrat je masni pretok definiran s številom obratov polža. V takšnem primeru je zelo pomembno, hlajenje vstopne cone z vodo, ki preprečuje taljenje materiala v tej coni [4].

2.2.2 Cilinder

Cilinder ekstruderja je izvotljen valj, v katerem se vrti polž in ga opisuje premer v milimetrih. Če imamo en polž, je izgled preseka cilindra oblike kroga, v primeru dveh polžev je presek oblike števila osem. Polž in cilinder omogočata taljenje materiala, zagotavljata tlak na polimerni material v notranjosti ekstruderja. Za zagotavljanje nadzorovanih pogojev, kot sta enakomerno plastificiran material in enakomerna sestava materiala, je potrebna visoka natančnost obdelave cilindra. Poleg tega mora cilinder prenesti tudi precej visoke tlake, ne da bi ga ti poškodovali. Cilinder je lahko izdelan tudi iz več različnih sestavnih delov, to omogoča enostavno menjavo sestavnih delov [4].

Na cilinder so pritrjeni tudi elementi, ki omogočajo segrevanje in hlajenje cilindra. Pri večini ekstruderjev poteka dovod toplote z električnimi grelci, ki so razporejeni okrog cilindra. Cilinder vsebuje tudi sistem hlajenja za lažjo regulacijo in odvod toplote. Za izboljšano hlajenje se uporablja sistem hlajenja z vodo [4].

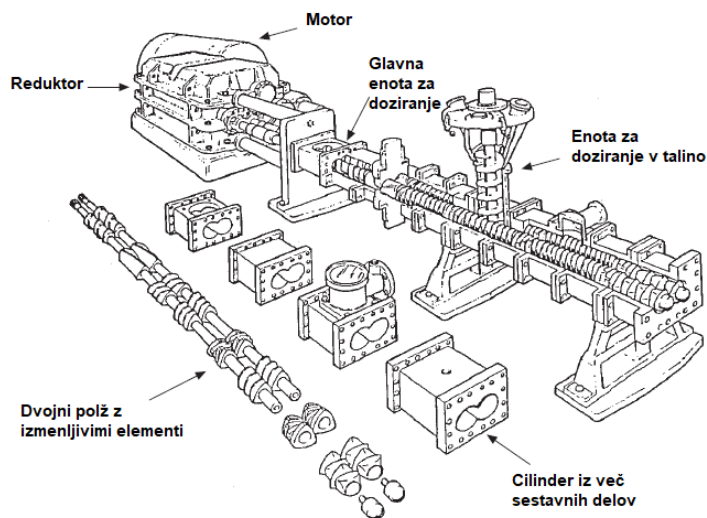
Cilinder lahko vsebuje tudi sistem odplinjevanja na mestu, kjer se ta premer polža zmanjša in z njim tudi tlak, plini lahko tam zapustijo talino [4].

2.2.3 Polž

Polž je najpomembnejši sestavni del ekstruderja, saj zagotavlja nadzorovano enakomerno plastifikacijo materiala z enakomerno sestavo. Polž je narejen iz jeklenega cilindra s katerega je izprazen vijačni kanal, zunanji premer je običajno konstanten, med tem ko se notranji premer v vijačnem kanalu spreminja. Glede na globino izpraznjenega vijačnega kanala lahko polž razdelimo tudi na različne cone, kot so vstopna cona, kompresijska cona in iztisna cona. Ta polž se vrti v cilindru in zagotavlja transport iz vstopne cone pri lijaku do šobe. V primeru idealnega delovanja polža se med vrtenjem polža material sprime notranjosti cilindra in drsi na površini polža. V tem primeru se oprijet material na cilindru prične najprej taliti v neposredni bližini polža, saj s trenjem med polimernim materialom ter polžem nastaja toplota. To povzroči enoosno gibanje polimerne taline v smeri šobe. Kadar se polimerni material sprime na polž in drsi ob stenah cilindra, ne bo prišlo do pretoka, saj se polž in material vrtita skupaj. Takrat polž ne zagotavlja gibanja materiala v smeri šobe, pač pa se material oprijet na polžu le vrti s polžem in ostaja na istem mestu. V tem primeru ne nastaja zadostna količina polimerne taline za kontinuirano obratovanje, saj velik del nastale toplote odvaža v okolico. Realno delovanje polža in obnašanje materiala je navadno nekje vmes med tema skrajnima oblikama, saj se material sprime na polž in tudi cilinder [4].

Slika 3 prikazuje dvopolžni ekstruder. Posebnost pri dvopolžnih ekstruderjih je da doziranje materiala poteka po principu »starve feeding«, to je postopno doziranje materiala v vstopno cono, s tem preprečimo nastanek previsokega striga in z njim lom. Glede na postavitev polžev lahko govorimo tudi o različnih stopnjah prepletanja polžev.

Pri tem je pretok materiala neodvisen od obratov polža, pač pa od tlaka na šobo. Dvopolžni ekstruder dosegajo večje taljenje materiala zaradi intenzivnejšega mešanja dveh delno ali celotno prepletenih polžev [4].



Slika 3: Zgradba dvopolžnega ekstruderja [4]

2.2.4 Pogonski sistem ekstruderja

Pogonski sistem ekstruderja sestavljajo električni motor, mehanski menjalnik (reduktor), povezave z jermeni in potisni ležaj. Električni motor je navadno povezan preko jermenice z mehanskim menjalnikom. Takšna postavitve zmanjša vrtljaje in poveča navor na izhodu menjalnika. Uporaba jermenice med motorjem in mehanskim menjalnikom je uporabna za doseganje točno želenih obratov na menjalniku, kadar neposredna poveza z motorjem in menjalnikom temu ne zadošča. Menjalnik je nato povezan s polžem. Potisni ležaj prenaša tlačne obremenitve nastale pri ekstruziji skozi šobo [4].

2.2.5 Šoba

Šoba je kovinski del z notranjim kanalom na mestu, kjer se ekstruder konča in daje izdelku obliko, tako da oblikuje polimerno talino. Za izdelavo dobrih izdelkov z ekstruzijo moramo posebno pozornost posvetiti izdelavi šobe, saj le tako dosežemo enakomerno debelino izdelka. Šoba mora med procesom ekstruzije za enakomerno debelino sten vedno zagotavljati [4]:

- enakomeren pretok materiala skozi izhod na šobi;
- enakomerno temperaturo taline na izhodu šobe;
- talino, ki je vedno enako strižno obremenjena.

Na šobi imamo pogosto tudi vgrajen grelec in termočlen za merjenje temperature. Temperatura šobi se navadno nastavi na temperaturo taline na šobi, kadar želimo izdelek bleščečih površin, se lahko nastavi tudi višja temperatura [4].

2.2.6 Hlajenje

Temperature različnih termoplastičnih talin v območju šobe ekstruderja lahko segajo vse od 160 °C do 300 °C, zato je zelo pomembno hlajenje termoplastične mase, ki priteka skozi šobo. Obstajajo različni sistemi hlajenja ekstrudata, najpogostejše hlajenje poteka z zrakom ali vodo. Zaželeno je hlajenje, ki poteka na vseh straneh ekstrudiranja, to ni vedno izvedljivo. Poleg tega pri hlajenju stremimo k čim hitrejšemu ohlajanju ekstrudiranja, ki ob enem prepreči nastanek napak, kot so slab izgled površine in spremembe v fizikalnih lastnostih [4, 5].

Zračno hlajenje velja za manj zahtevno in cenejše, saj je za izvedbo potrebno manj komponent, vendar je izkoristek odvoda toplote pri tem načinu slabši. Za izvedbo takšnega načina hlajenja potrebujemo ventilator, ki ga poganja električni motor. Vrtenje ventilatorja povzroči sesanje zraka skozi dovodno mesto ventilatorja, nato zrak piha na mesto kamor je ventilator usmerjen [5].

2.3 Prenos toplote

Prenos toplote poteka s področja z višjo temperaturo na področje z nižjo temperaturo. Prenos toplote lahko opredelimo tudi glede na število koordinatnih smeri, v katerih poteka. Ločimo [6]:

- enodimezionalen prenos toplote (ena koordinatna smer),
- dvodimezionalen prenos toplote (dve koordinatni smeri),
- tridimezionalen prenos toplote (tri koordinatne smeri).

S toplotnim tokom podajamo hitrost prenosa toplote, ta nam pove koliko toplote se prenese v časovni enoti. Toplotni tok je podan z enačbo 1 [6].

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1),$$

pri čemer je:

- Φ - toplotni tok (W),
- Q - toplota (J),
- t - čas (s).

Gostota toplotnega toka je podana z enačbo 2 [6].

$$q = \frac{d\phi}{dA} \quad (2),$$

pri čemer je:

- q - gostota toplotnega toka (W/m^2),
- ϕ - toplotni tok (W),
- A - ploščina pravokotna na smer toka (m^2).

Prenos toplote poteka po treh različnih mehanizmih, ki se lahko tudi prepletajo. Prenos lahko poteka s prevodom toplote, prestopom toplote in sevanjem toplote ob visokih temperaturah [6].

2.3.1 Prenos toplote v polimerih

Prenos toplote v polimerih je precej otežen z nizko toplotno prevodnostjo polimerov in visoko specifično toploto. Slaba toplotna stabilnost polimerov v kombinaciji z nizko toplotno prevodnostjo ter visoko specifično toploto pomenijo, da polimere težko segrejemo do temperature primerne za preoblikovanje. Ko nam jih uspe segreti, je želja to toploto v čim krajšem času odstraniti, da ne degradirajo in da izdelek ohrani obliko. Vendar je tudi odvod toplote s polimerov oviran in je pogojen s prenosom toplote v polimerih. Poleg tega se lahko pri predelavi materiala dodatno segreje s strigom, pri pretoku skozi zmanjšane kanale. Delno kristalinični materiali potrebujejo več toplote pri predelavi, saj je za predelavo potrebno staliti kristaliničen del materiala. To pomeni, da je pri ohlajanju prav tako treba odstraniti več toplote [4, 7].

Zato je za uspešno predelavo termoplastov potrebno poznavanje toplotnih lastnosti polimerov in njihovo temperaturno odvisnost. Pomembno je poznavanje temperaturnih območij različnih faznih prehodov, kakor je temperatura steklastega prehoda, temperatura tečenja amorfnih materialov, temperatura tališča kristaliničnega dela termoplastov. Poleg tega je zelo pomembno poznavanje tudi materialnih lastnosti povezanih s prevodom toplote, kot so toplotna kapaciteta, prevod toplote in specifični volumen. Toplotne lastnosti termoplastov so močno povezane tudi z molekulsko strukturo [7].

Temperatura steklastega prehoda

Medmolekularne interakcije močno omejujejo gibljivost makromolekul termoplastov pod temperaturo steklastega prehoda, zato lahko rečemo, da polimer pod T_g postane podoben steklu. Pri povečevanju temperature preko T_g lahko opazimo povečano gibljivost segmentov verig in stranskih verig, polimer postane mehkejši in je še vedno mehansko stabilen, polimer postane bolj podoben gumi. Ta prehod se zgodi na temperaturnem območju okrog temperature T_g , kjer se poveča tudi volumen polimer zaradi povečane gibljivosti makromolekulskih verig [7].

Temperatura tečenja

Temperatura tečenja T_f je značilna za amorfne materiali, saj ti nimajo temperature taljenja, kljub temu se ob povečevanju temperature amorfni del zmehča. To je posledica zmanjševanja vpliva medmolekularnih interakcij ob povečevanju temperature. Ko dosežemo T_f lahko celotne makromolekulske verige drsijo ena ob drugi [7].

Temperatura taljenja

Temperatura taljenja T_m je temperatura pri kateri material ob segrevanju spremeni agregatno stanje iz trdnega v tekoče. Ko dosežemo T_m se začno taliti kristalinični segmenti termoplastičnih materialov v širšem temperaturnem območju. Celoten termoplast postane plastificiran, saj je temperaturno območje taljenja kristaliničnega dela višje kot temperaturno območje tečenja amornega dela. Če ni prišlo do termičnega razpada, lahko talino zopet ohladimo v trdno stanje. Na nastanek kristaliničnega dela vplivajo predvsem pogoji hlajenja, kot sta hitrost in čas hlajenja. Zato lahko po hlajenju nastane drugačna velikost in razporeditev teh kristalov, kakor je bila pred segrevanju. Ob intenzivnejšem hlajenju bo material dosegel manjše število kristalov, ki bodo manjši [4, 7].

Specifična toplota

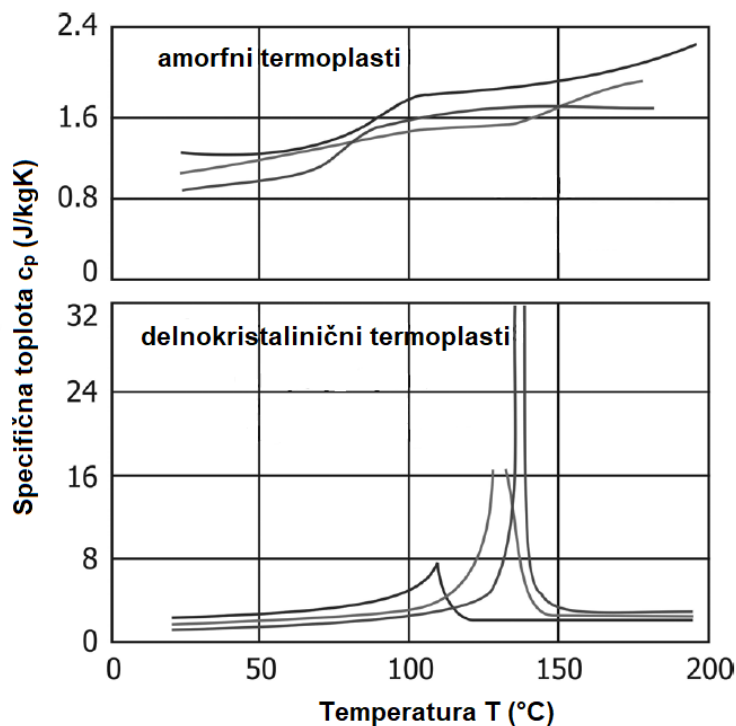
Specifična toplota ob konstantnem tlaku je potrebna količina toplote, da se enemu kilogramu nekega materiala temperatura spremeni za en kelvin. Specifična toplota je definirana z enačbo 3 [7].

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{C}{m} \quad (3),$$

pri čemer je:

- c_p - specifična toplota (J/kgK),
- Q - toplota (J),
- m - masa (kg),
- T - temperatura (K),
- C - toplotna kapaciteta (J/K).

Specifična toplota je tudi odvisna od temperature, torej se njena vrednost spreminja s temperaturo, ravno zato se ob specifični toploti zapiše tudi temperatura. Pri delno kristaliničnih polimerih talilna toplota povzroči precejšnje povečanje vrednosti specifične toplote v točki taljenja kristaliničnega dela. Preko te temperature prične vrednost zopet padati. Slika 4 prikazuje temperaturno odvisnost specifične toplote [4, 7].



Slika 4: Temperaturna odvisnost specifične toplote polimerov [7]

Enačba 4 prikazuje izračun količine toplote, ki jo polimer vsebuje in jo je treba odvesti, se lahko izračuna ob poznanem volumskem pretoku, specifični toploti polimera in temperaturi taline. Iz volumskega pretoka lahko s pomočjo gostote izračunamo masni pretok [4].

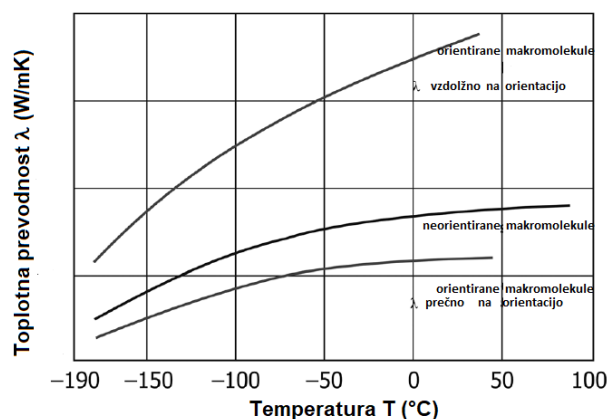
$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_{melt} - T_{final}) \quad (4),$$

pri čemer je:

- Q - toplota (J),
- m - masa (kg),
- c_p - specifična toplota (J/kgK),
- T_{melt} - temperatura taline (°C),
- T_{final} - končna temperatura polimera (°C).

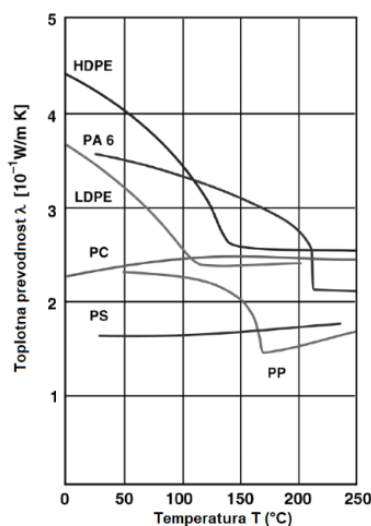
Toplotna prevodnost

Toplotna prevodnost termoplastičnih materialov je zelo nizka, saj ti materiali nimajo prostih elektronov. Prevod toplote v tem primeru omogoča nihanje polimernih verig. Toplotna prevodnost se spremeni, kadar material raztegnemo. Enosmerno raztezanje materiala povzroči orientacijo makromolekul v to smer, posledica te orientiranosti je anizotropna toplotna prevodnost. Slika 5 prikazuje toplotno prevodnost orientiranega in neorientiranega PMMA v odvisnosti od temperature, kjer lahko opazimo povečano toplotno prevodnost v vzdolžni smeri orientiranih makromolekul in zmanjšano toplotno prevodnost v prečni smeri glede na orientiranost makromolekul [7].



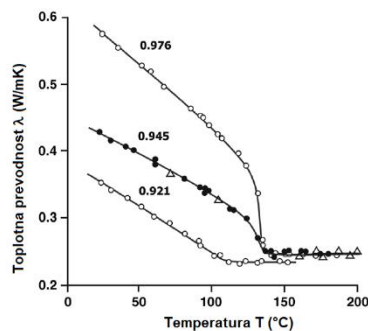
Slika 5: Toplotna prevodnost orientiranega in neorientiranega PMMA v odvisnosti od temperature [7]

Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti amorfnih in delno kristaliničnih termoplastov se precej razlikuje. Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti amorfnih termoplastov je znatno manjša v primerjavi z delno kristaliničnimi. Povečevanje toplotne prevodnosti s povečevanjem temperature je posledica povečanja specifične toplote. Ta se pri delno kristaliničnih termoplastih zaradi talilne entalpije znatno poveča, kar posledično precej poveča tudi toplotno prevodnost delno kristaliničnih termoplastov pri višjih temperaturah. Slika 6 prikazuje temperaturno odvisnost toplotne prevodnosti amorfnih in delno kristaliničnih termoplastov [7].



Slika 6: Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti amorfnih in delno kristaliničnih materialov [7]

Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti delno kristaliničnih termoplastov je odvisna tudi od stopnje kristaliničnosti materiala. Delno kristalinične termoplaste lahko obravnavamo kot dvofazni sistem, katerega sestavljajo amorfni in kristalinični segmenti. S povečanjem stopnje kristaliničnosti se poveča tudi gostota materiala, to posledično pomeni boljše toplotno prevodnost. Slika 7 prikazuje temperaturno odvisnost toplotne prevodnosti glede na različne stopnje kristaliničnosti [7].



Slika 7: Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti materialov z različnimi stopnjami kristaliničnosti [7]

Specifična prostornina

Zaradi temperaturnega raztezanja se termoplastom s temperaturo spreminja tudi prostornina. Z dvigovanjem temperature opazimo intenzivnejše termično gibanje atomov ter molekul, kar poveča razdalje med delci. S specifično prostornino opisujemo prostornino materiala z neko maso ob določeni temperaturi. Enačba 5 prikazuje odvisnost specifične prostornine [7].

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (5),$$

pri čemer je:

- ν - specifična prostornina (m^3/kg),
- V - volumen (m^3),
- m - masa (kg),
- ρ - gostota (kg/m^3).

Toplotna difuzivnost

Toplotna prevodnost, specifična toplota in gostota so materialne lastnosti, ki so temperaturno odvisne pri polimerih. Za lažje izračune uporabljamo toplotno difuzivnost, ki opisuje hitrost spremembe temperature pri prevodu toplote. Enačba 6 opisuje toplotno difuzivnost [7].

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (6),$$

pri čemer je:

- a - toplotna difuzivnost (m^2/s)
- λ - toplotna prevodnost (W/mK)
- c_p - specifična toplota (J/kgK)
- ρ - gostota (kg/m^3)

Toplotna difuzivnost amorfni termoplastov

Toplotna difuzivnost je pri amorfni termoplastih odvisna od [7]:

- toplotne prevodnosti, ki nekoliko narašča s temperaturo,
- specifične toplote, ta izrazito narašča s temperaturo po T_g ,
- gostote, ta nekoliko pada pod T_g in bolj izrazito pada preko T_g .

Toplotna difuzivnot delno kristaliničnih termoplastov

Toplotna difuzivnost je pri delno kristaliničnih termoplastih odvisna od [7]:

- toplotne prevodnosti, ta znatno pada do T_m in prične počasi naraščati preko T_m ,
- specifične toplote, ta narašča s temperaturo, se precej poveča pri T_m ter precej pade nad T_m ,
- gostote, ta pada s povečevanjem temperature.

2.3.2 Prevod toplote

Prevod toplote se v snoveh pojavi zaradi gibanja, vibriranja in rotiranja delcev snovi kot so atomi, elektroni, ioni ter molekule. Povečevanje temperature snovi povzroči dvig kinetične energije delcev snovi. Prenos kinetične energije v snovi poteka s področja z višjo temperaturo v področje z nižjo temperaturo, ko ti delci trkajo med seboj. Na ta način poteka prenos toplote s prevodom toplote. Enodimezionalen prenos toplote je opisan z enačbo 7 in je poimenovan Fourier-ov zakon [6].

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (7),$$

pri čemer je:

- q - gostota toplotnega toka (W/m^2),
- λ - toplotna prevodnost (W/mK),
- T - temperatura ($^{\circ}C$),
- x - dolžina v smer toplotnega toka (m).

Negativni predznak v enačbi pove, da se toplota prenaša v smeri padanja temperature. Prevod toplote lahko poteka pri trdnih snoveh, tekočinah in plinih. Ta je pri slednjih precej omejen zaradi nizke toplotne prevodnosti plinov in znaša nekaj 0,01 do 0,1 W/mK [6].

2.3.3 Prestop toplote

Prenos toplote s prestopom se pojavi, kadar imamo predmet s toplejšo ali hladnejšo površino v stiku s tekočino ali plinom. Prenos toplote s prestopom delimo na [6]:

- naravno konvekcijo,
- prisilno konvekcijo.

Naravna konvekcija je značilna za mirujoče tekočine, ki so v stiku s toplejšo površino predmeta. Del tekočine v stiku se segreje, kar povzroči padec gostote tekočine in delovanje vzgona, ki dvigne segreto tekočino. Na tisto mesto nato priteče sveža tekočina. Pri naravni konvekciji gibanje tekočine v mejni plasti povzroči razlika v temperaturi tekočine, ta režim gibanja tekočine vpliva na hitrost toplotnega prestopa. O prislini konvekciji govorimo, ko je gibanje tekočine povzročeno npr. z mešalom, črpalko ali ventilatorjem. V tem primeru povzročijo mešanje tekočin poleg vzgonskih sil tudi vztrajnostne sile, zato je prestop toplote intenzivnejši. Hitrost prestopa je v tem primeru odvisen od pretočnega režima osnovnega toka. Glede na gibanje tekočine ločimo laminarni in turbulentni pretok, ta je določen tudi z vrednostjo Reynoldsovega števila, ki je prikazan na enačbi 8. Ker je prestop toplote odvisen od lastnosti tekočine, je uvedba Reynoldsovega števila pomembna, saj združuje gostoto, hitrost tekočine, kinematično in dinamično viskoznost [6, 8].

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\eta} = \frac{v D_h}{\nu} \quad (8),$$

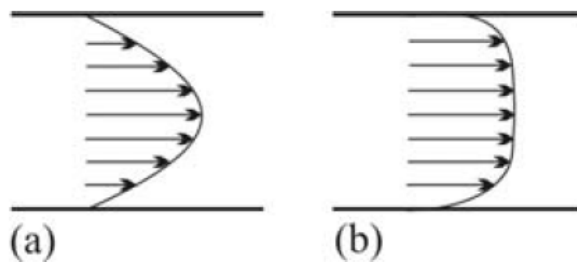
pri čemer je:

- Re - Reynoldsovo število ($/$),
- ρ - gostota (kg/m^3),
- v - hitrost tekočine (m/s),
- D_h - hidravlični premer (m),
- η - kinematična viskoznost (m^2/s),
- ν - dinamična viskoznost (Pas).

Hidravlični premer je lahko notranji ali zunanji premer cevi. Ko se tekočina pretaka v cevi okroglega preseka, je D_h notranji premer, ko pa se tekočina pretaka prečno na cev, je D_h enak zunanjemu premeru. Če se tekočina pretaka vzporedno ob cevi namesto D_h , uporabimo dolžino cevi L [6].

Pri vrednostih $Re < 2300$ govorimo o laminarnem pretoku. V tem primeru ob steni nastane tanka mirujoča plast, proti osi cevi sledijo vzporedne plasti, kjer hitrost toka narašča. Prenos toplote se v mirujočih plasteh vrši s prevodom, v ostalih plasteh na prenos vpliva tok tekočine [6, 8].

Pri vrednostih $Re > 10.000$ govorimo o turbulentnem pretoku. Pri takšnem pretoku imamo ob steni zelo tanko laminarno plast, tej sledi območje vrtnčenja tekočine z bolj enotno porazdeljeno hitrostjo tekočine. Termična plast, kjer se temperatura strmo spreminja se zaradi vrtnčenja bistveno zoži. Primer turbulentnega pretoka je gibanje zrak ob visokih hitrostih. Slika 8 prikazuje porazdelitev hitrosti pri laminarnem toku (a) in turbulentnem toku (b) [6].



Slika 8: Porazdelitev hitrosti pri laminarnem toku (a) in turbulentnem toku (b) [6]

Enačba 9 opisuje zvezo za konvekcijo ob steni, ki jo je postavil Prandtl. Tu vpeljemo toplotno prestopnost, saj ne moremo izmeriti debelino mejnega sloja ločeno od toplotne prevodnosti [6, 8].

$$\phi = \lambda A \frac{T_s - T_{fl}}{\delta} = A\alpha (T_s - T_{fl}) \quad (9),$$

pri čemer je:

- Φ - toplotni tok (W),
- λ - toplotna prevodnost (W/mK),
- A - ploščina površine (m²),
- T_s - temperatura površine stene (°C),
- T_{fl} - temperatura tekočine (°C),
- δ - debelina mejnega sloja (m),
- α - toplotna prestopnost (W/m²K).

Toplotna prestopnost je odvisna od vrste tekočine, geometrije stene ter režima gibanja tekočine. Vsi ti dejavniki vplivajo na debelino mejnega sloja in na temperaturno porazdelitev v njem. Toplotna prestopnost hrapave površine je večja kot gladke, saj ima večjo površino [6].

V praksi toplotna prevodnost zaradi kompleksnosti pogosto ni izpeljana in se izraža z Nusseltovim številom, ki ga podaja enačba 10. Nusseltovo število nam daje primerjavo med prestopom in prevodom v tekočini, kjer večja vrednost pomeni, da je prenos toplote s konvekcijo večji kot s prevodom [6, 8].

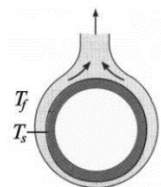
$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (10),$$

pri čemer je:

- Nu - Nusseltovo število (l),
- α - toplotna prestopnost (W/m²K),
- L - karakteristična dolžina površine oz. ekvivalentni premer vodnika cevi (m),
- λ - toplotna prevodnost (W/mK).

Naravna konvekcija ob vodoravni cevi

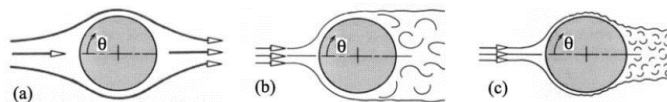
Pri naravni konvekciji je gonilna sila vzgon. Slika 9 prikazuje potek naravne konvekcije ob dolgi vodoravni cevi, kjer je režim gibanja tekočine v mejni plasti lahko laminaren ali turbulenten [6].



Slika 9: Shema naravne konvekcije ob vodoravni cevi [6]

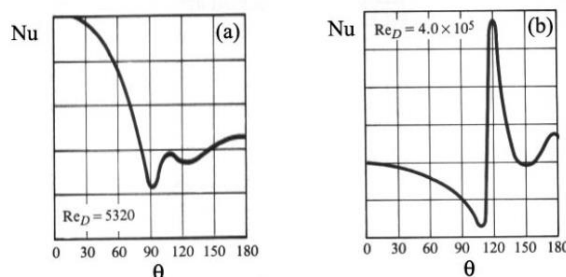
Prisilna konvekcija toka tekočine prečno na cev

Določitev toplotne prestopnosti v tekočini (kapljevini oz. plinu), ki se pretaka prečno čez okroglo cev, je težavna predvsem zaradi ločitve toka tekočine za cevjo. Hitrost toka tekočine na cev močno vpliva na obliko toka, pri toku se na sredini sprednje strani cevi pojavi t. i. zastojna točka, kjer je tlak tekočine največji. Ob počasnem pretakanju ob celotni strani cevi nastane laminarna mejna plast, ta je prikazana na sliki 10 (a). Pri povečevanju hitrosti pretoka tekočine prečno na cev lahko opazimo nastajanje vrtincev in ločitev toka. Če vrednost $Re < 200\,000$ v mejni plasti opazimo laminaren režim in kot ločitve je $\theta \approx 80^\circ$, to prikazuje Slika 10 (b). Če je vrednost $Re \geq 200\,000$ v mejni plasti dobimo turbulenten pretok in ločitev pri $\theta \approx 140^\circ$, to prikazuje Slika 10 (c) [6].



Slika 10: Shema toka tekočine pravokotno na cev [6]

Slika 11 prikazuje porazdelitev toplotne prestopnosti v odvisnosti od kota θ pri laminarnem (a) in turbulentnem pretoku (b), ki je podana z Nu . Opazimo lahko, da je toplotna prestopnost pri laminarni mejni plasti največja v zastojni točki, pri turbulentni mejni plasti pa pri točki ločitve [6].



Slika 11: Porazdelitev toplotne prestopnosti (Nu) ob površini cevi [6]

2.4 Numerične simulacije

2.4.1 Princip

Za lažje razumevanje kompleksnih sestavov ali procesov si ljudje pogosto pomagamo na način, da sestav ali proces razdelimo na posamezne komponente, katerih delovanje oz. obnašanje nam je znano. Posamezne komponente nato zopet združimo v prvoten sestav [9].

Diskretni in kontinuum problemi

To tehniko lahko uporabimo tudi za reševanje mnogih problemov, kjer modele pripravimo z uporabo končnega števila elementov oz. diskretizacijo modelov. Takšne probleme imenujemo standardni diskretni problemi. Reševanje diskretnih problemov je mogoče z uporabo računalnika, tudi ob zelo velikem številu elementov. V problemih kjer se porazdelitev nadaljuje v neskončnost, reševanje lahko poteka s parcialnimi diferencialnimi enačbami, ob uporabi neskončnega števila elementov. Te probleme imenujemo kontinuumi. Reševanja teh parcialnih diferencialnih enačb poteka z različnimi matematičnimi tehnikami, ki omejujejo poenostavitev teh enačb [9].

Reševanje kontinuum problemov je mogoče tudi z različnimi metodami diskretizacije. Vse te metode temeljijo na aproksimaciji, ki se lahko ob povečevanju števila diskretnih spremenljivk približujejo limiti oz. končni rešitvi. Reševanja tega se lahko lotimo z inženirskim pristopom, ki temelji na metodi končnih elementov MKE. Pri reševanju se parcialne diferencialne enačbe numerično integrirajo kot sistem enačb. Pri tem dobimo odstopanje od dejanske vrednosti že pred samim reševanjem. To je zaradi aproksimacije diferencialnih enačb. Poleg te napake dobimo tudi numerično napako, ki nastane pri reševanju problema. Numerična napaka lahko povzroči precejšnje razhajanje tudi v primeru nelinearnega obnašanja. To razhajanje od dejanske vrednosti lahko delno odpravimo z različnimi tehnikami, kar vseeno poveča težavnost izračuna [9, 10].

Linearnost in nelinearnost

Problem je dobro opisan z uporabo parcialnih diferencialnih enačb, ki so za reševanje precej težavne. Pri določenih parcialnih diferencialnih enačbah se za reševanje lahko poslužujemo tudi linearnih sistemov. Linearnost dobimo z aproksimacijo realnega stanja, to pomeni da popolna linearnost v realnosti ne obstaja. Problem je pogosto nelinearen, takrat uporaba linearnosti ni primerna zaradi prevelikega razhajanja. Kljub temu lahko nelinearne probleme rešujemo z inkrementalno iterativno metodo. S to metodo reševanje poteka z več koraki oz. inkrementi, znotraj katerih z iteracijami iščemo približevanje končni rešitvi ravnotežnih enačb [11].

Stacionarno in nestacionarno obnašanje

Kadar govorimo o stacionarnemu obnašanju, pomeni da se to časovno ne spreminjajo in je ustaljeno. Ob nestacionarnem obnašanju se vrednosti prostorsko in časovno spreminjajo. Primer nestacionarnega obnašanja pri prenosu toplote je, ko telo z ustaljeno temperaturo postavimo v območje z nižjo temperaturo. V tem primeru preteče nekaj časa, preden se zopet vzpostavi ustaljen prenos toplote [6].

2.4.2 Metoda končnih elementov

MKE je numerična tehnika za reševanje problemov opisanih z diferencialnimi enačbami. Metoda končnih elementov je aproksimacija kontinuum problemov, ki:

- razdeli kontinuum v končno število elementov, obnašanje teh je določeno z končnim številom parametrov,
- omogoči rešitev celotnega sistema kot sestava elementov, ki poteka po enakih pravilih kot tistih pri standardnih diskretnih problemih [9, 12].

Reševanje problemov z MKE navadno poteka po naslednjem zaporedju [12]:

- diskretizacija ali mreženje, pri tem se struktura razdeli na končne elemente;
- izbira funkcije interpolacije, ta omogoča izračun spremenljivk preko elementov, pogosto so to polinomi, katerih stopnja je odvisna od števila vozlišč dodeljenih elementov;
- iskanje lastnosti elementov, določi se matrika enačb končnega elementa, ki poveže neznano vrednost funkcije vozlišča z drugimi parametri;
- združitev enačb elementov, vse enačbe diskretiziranih elementov se združijo za določitev globalnega sistema enačb, združitev poteka s povezavo elementov, pred reševanjem je treba določiti še robne pogoje;
- reševanje vodilnega sistema diferencialnih enačb, pri tem se izračunajo vrednosti v vozliščih in predstavljajo rešitev, pri tem strmimo k najmanjši razliki med uporabljenimi aproksimacijo in funkcijo;
- izračun dodatnih rezultatov, pogosto je treba še izračunati dodatne parametre, katere lahko dobimo s pomočjo pravkar izračunanih rešitev.

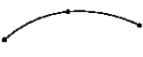
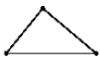
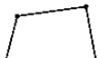
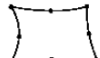
2.4.3 Mreženje ali diskretizacija

Diskretizacija lahko poteka z različnimi končnimi elementi (KE), ti so lahko enodimenzionalne, dvodimenzionalne ali tridimenzionalne oblike. Poleg tega so lahko KE tudi različnih redov kot sta linearni in kvadratni red KE [10, 12].

Diskretiziran model je sestavljen iz KE, ki so povezani v vozliščih. Navadno je uporabljena preprosta oblika KE, ti so pri dvodimenzionalnih problemih navadno trikotniki ali štirikotniki in tetraedri ali heksaedri pri tridimenzionalnih problemih. Vozlišča v diskretiziranem modelu so mesta z določenimi vrednostmi fizikalnih lastnosti in robnih pogojev. V vozliščih poteka tudi iskanje rešitev problema. Natančnejša rešitev

je dosegljiva z uporabo večjega števila KE, torej elementov manjše velikosti. Možna je tudi uporaba elementov kompleksnejše oblike [12].

Slika 12 prikazuje različne končne elemente z vozlišči, pri tem so končni elementi lahko linearne ali kvadratne reda.

Geometrijski red KE:	Linearni KE	Kvadratni KE	
Linijski končni elementi:			Linije (2 ali 3 vozliščne)
Površinski končni elementi:			Trikotniki (3 ali 6 vozliščni)
			Štirikotniki (4 ali 8 vozliščni)
Volumski končni elementi:			Tetraedri (4 ali 10 vozliščni)
			Prizme (6 ali 15 vozliščni)
			Heksaedri (8 ali 20 vozliščni)

Slika 12: Različni končni elementi linearne ali kvadratne reda [13]

2.5 Mehanika

Mehanika je veda, ki opisuje obnašanje objekta pod vplivom določenih sil in se deli na statiko in dinamiko. Potrebno bo na podlagi obremenitev tekočega traku poskrbeti za zadostno število podpor ob izbranih aluminijastih profilih. To bomo storili z določitvijo obremenitev in sil v podporah. Na podlagi izračunanih notranjih obremenitev bomo izvedli trdnostni preračun [14, 15].

2.5.1 Statika

Statika je veja mehanike, ki preučuje ravnotežje mirujočih teles pod vplivom določenih sil in momentov [15, 16].

Ravnotežje sil

Če imamo togo telo v mirovanju in nanj delujejo sile, imamo sile v ravnotežju. Pri tem moramo zadostiti pogojem za ravnotežje, vsota vseh sil in momentov mora biti nič. Pri tem morata komponenti sile v osi x in y , prav tako znašati nič. Za lažjo določitev ravnotežja se poslužujemo rezultante sil, ta je predstavljena z enačbo 11.

$$F_R = \sum_{i=1}^n F_i = 0 \quad (11),$$

pri čemer je [17]:

- F_R - rezultanta sil,
- F_i - sila v osi i.

Moment sile in ravnotežje momentov

Moment sile na izbrano točko je vektorska količina, ki jo določa vektorski produkt sile in pravokotne razdalje iz izhodišča do učinkovalnice sile. Enačba 12 prikazuje zvezo, ki predstavlja moment sile.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (12),$$

pri čemer je [16, 17]:

- M - moment sile (Nm),
- r - pravokotna razdalja (m),
- F - sila (N).

Enačba 13 prikazuje izračun ravnotežja momentov.

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0 \quad (13),$$

pri čemer je [17]:

- M_i - moment sile v smeri i (Nm).

Notranje sile in momenti

Za določitev notranjih sil in sil v podporah je pri statiki treba določiti zunanje sile. Zunanje sile predstavljajo sile, ki delujejo na konstrukcijo in lastno težo elementa. Notranje sile se pojavijo v notranjosti konstrukcije kot posledica zunanjih sil. Določitev notranjih sil in momentov poteka tako, da element v analiziranem prerezu namišljeno prerežemo na dva dela. Vsota notranjih sil in momentov je v obeh prerezih enaka, saj velja ravnotežje notranjih sil in momentov [16, 17].

Izračun notranje osne sile poteka z enačbo 14.

$$\sum F_{ix} + F_N = 0 \quad (14),$$

pri čemer je [17]:

- F_x - sila v smeri osi x (N),
- F_N - osna sila (N).

Enačba 15 prikazuje izračun notranje prečne sile.

$$\sum F_{iy} + F_T = 0 \quad (15),$$

pri čemer je [17]:

- F_y - sila v smeri osi y (N),
- F_T - prečna sila (N).

Enačba 16 prikazuje izračun notranje upogibnega momenta.

$$\sum M_{ix} + M = 0 \quad (16),$$

pri čemer je [16, 17]:

- M_x - moment v smeri osi x (Nm),
- M - upogibni moment (Nm).

2.5.2 Trdnost

Trdnost je veda, ki opisuje obnašanje teles na katere delujejo različne obremenitve. Pri tem pogosto telo predpostavimo kot zvezno snov, s tem telesu določimo enakomerno porazdelitev lastnosti in poenostavitev izračuna [trdnost].

Napetosti, deformacije in modul elastičnosti

Kadar zunanja sila deluje na neko telo z določenim prerezom in se to telo ne preoblikuje pod vplivom sile, lahko govorimo o reakciji v notranjosti telesa, ki se upira spremembi dimenzij telesa. Zaradi koncepta zveznosti snovi lahko silo porazdeljeno na prerez predstavimo kot napetost. Uporaba napetosti natančneje opiše obremenitev v telesu in je definirana v enačbi 17 [15, 18].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (17),$$

pri čemer je [15]:

- σ - napetost (N/m²),
- F - sila (N),
- A - ploščina prereza (m²).

Sprememba dimenzij oz. deformacije telesa se pojavi pri vseh obremenjenih telesih in je odvisna od [15, 18]:

- vrste in velikosti zunanjih sil,
- načina podpore,
- materialnih lastnosti snovi,
- geometrijskih lastnosti telesa.

Enačba 18 opisuje zvezo za določitev deformacije.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (18),$$

pri čemer je [15]:

- ε - deformacija (/),
- ΔL - sprememba dolžine (m),
- L - prvotna dolžina (m).

Modul elastičnosti je lastnost material, ki opisuje togost materiala. Enačba 19 podaja zvezo med modulom elastičnosti, napetostjo in deformacijo.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (19),$$

pri čemer je [15]:

- E - modul elastičnosti (N/m²)
- σ - napetost (N/m²),
- ε - deformacija (/).

Vztrajnostni in odpornostni moment prereza

Vztrajnostni moment prereza je lastnost, pri kateri se določi porazdelitev površine prereza okrog določene osi. Vztrajnostni moment prereza podaja vpliv geometrije oz. oblike prereza na nosilnost. Enačba 20 podaja zvezo za vztrajnostni moment prereza [15].

$$I = \int y^2 \cdot dA \quad (20),$$

pri čemer je [15]:

- I - vztrajnostni moment prereza (m⁴),
- y - razdalja od osi x do težišča prereza (m),
- A - ploščina površine (m²).

Odpornostni moment prereza je opisan z enačbo 21.

$$W = \frac{I}{e_1} \quad (21),$$

pri čemer je [17]:

- W - odpornostni moment prereza (m³),
- I - vztrajnostni moment prereza (m⁴),
- e - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi (m).

Dejanska, dopustna napetost in varnostni količnik

Za preprečitev porušitve konstrukcije mora biti dopustna napetost vedno manjša od kritične napetosti. Kritična napetost je meja, kjer pride do porušitve strojnega elementa ali konstrukcije. Pri tem za določitev dopustne napetosti poteka z določitvijo ustreznega varnostnega količnika, ki se določi glede na zahteve uporabe. Večji varnostni količnik pomeni, da je konstrukcija varnejša, ampak hkrati težja in posledično dražja. Enačba 22 podaja zvezo med dopustno, kritično napetostjo in varnostnim količnikom.

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_k}{v} \quad (22),$$

pri čemer je [15, 17]:

- σ_{dop} - dopustna napetost (N/m²),
- σ_k - kritična napetost (N/m²),
- v - varnostni količnik (/).

Nateg, tlak in upogib

Kadar imamo v mehaniki opravke s podolgovatim telesom in je ena razsežnost tega telesa precej večja od drugi dveh. V takšnih primerih za izračune telo poenostavimo v model linijskega nosilca [19].

Pri nategu deluje enakomerno porazdeljena obremenitev sile normalno na površini in povzroča raztezanja ter posledično nastanek natezne napetost $+\sigma$. Pri tlaku deluje enakomerno porazdeljena obremenitev sile normalno na površino in povzroča tlačjenje ter s tem nastanek tlačne napetost $-\sigma$ [15, 17].

Pri upogibu nevtralna os telesa poteka skozi težišče in predstavlja mesto, kjer je normalna napetost enaka nič. Upogibni moment povzroča prenosorazmerno porazdelitev normalne napetosti po prerezu z oddaljenostjo od nevtralne osi. Nosilec je hkrati natezno in tlačno obremenjen, največja napetost se pojavi v točki, ki je najbolj oddaljena od nevtralne osi [17].

Enačba 23 prikazuje zvezo za izračun največje natezne napetosti.

$$+\sigma_{maks} = \frac{Me_1}{I} \quad (23),$$

pri čemer je [17]:

- $+\sigma_{maks}$ - največja natezna napetost (N/m²),
- M - upogibni moment (Nm),
- e_1 - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi v natezno obremenjenem delu (m),
- I - vztrajnostni moment prereza (m⁴).

Enačba 24 prikazuje zvezo za izračun največje tlačne napetosti.

$$\sigma_{maks} = \frac{Me_2}{I} \quad (24),$$

pri čemer je [17]:

- σ_{maks} - največja tlačna napetost (N/m²),
- M - upogibni moment (Nm),
- e_2 - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi v tlačno obremenjenem delu (m),
- I - vztrajnostni moment prereza (m⁴).

V primeru ko je prerez simetričen lahko enačbi 24 in 25 še dodatno poenostavimo, saj je e_1 po velikosti enak e_2 . Enačba 25 prikazuje zvezo za izračun simetričnega prereza.

$$\sigma_{maks} = \frac{Me}{I} = \frac{M}{W} \quad (25),$$

pri čemer je:

- σ_{maks} - največja napetost (N/m²),
- M - upogibni moment (Nm),
- e - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi (m),
- I - vztrajnostni moment prereza (m⁴),
- W - odpornosti moment prereza (m³).

2.6 Vodenje tekočega traku in ventilatorjev

Za izdelavo visoko kakovostnih izdelkov se vse več poslužujemo različnih senzorjev in sistemov, ki omogočajo vodenje posameznih naprav (tekoči trak, ventilatorji, grelci itd.) [20].

V primeru ekstruzije je vodenje prisotno pri [21]:

- nadzoru temperature tekom ogrevanja vstopne cone, cilindra in šobe,
- nadzoru vrtljajev motorja,
- hlajenju ekstrudiranega materiala,
- nadzoru hitrosti rezanja in hitrosti vlečenja filamenta v primeru granulacije.

2.6.1 Krmiljenje

Odprto zančno vodenje ali krmiljenje je sistem vodenja, kjer nimamo povratne informacije o izhodni fizikalni veličini (npr. o temperaturi). Primer takšne izvedbe je prikazan na sliki 13, kjer dvig temperature povzroči električni grelec, ki zagotavlja zadostno količino toplote na cilinder. Prednost te izvedbe v primerjavi z zaprto zančno je, da so cenejše in zasedejo manj prostora pri električni vezavi. Ta način vodenja je primeren za namene vodenja ventilatorjev in pretoka hladilnega sredstva. Zaradi ne

poznavanja dejanske fizikalne veličine na izhodu pri odprto zančnem vodenju je dosegljiva natančnost omejena [21].



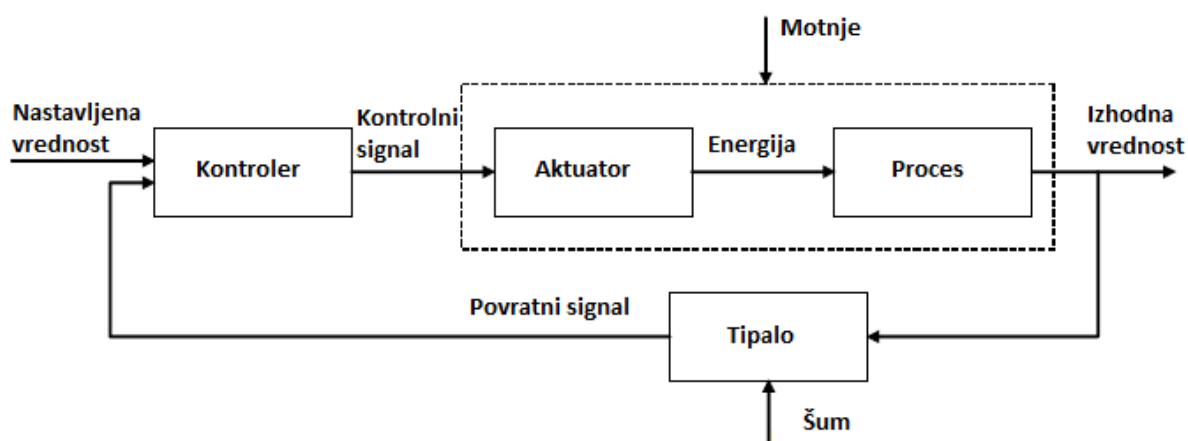
Slika 13: Primer odprto zančnega vodenja temperature [21]

Krmiljenje hitrosti izmeničnega motorja ter enosmernega ventilatorja

Najpogostejše krmiljenje hitrosti oz. števila obratov izmeničnega motorja na določeno časovno enoto je uporaba napetostno frekvenčnega nadzora. Navadno je hitrost motorja skoraj konstantna pri 50 Hz. Obstaja možnost spreminjanja hitrosti s spreminjanjem frekvence. Takšen način krmiljenja hitrosti izmeničnega motorja je možen z uporabo frekvenčnega regulatorja (oz. frekvenčnega pretvornika). Pričakujemo lahko manjše probleme, saj hitrosti motorja ni mogoče popolnoma natančno voditi [22].

2.6.2 Regulacija

Zaprto zančno vodenje ali regulacija je sistem vodenja, kjer s pomočjo senzorja dobimo povrtano informacijo o dejanski vrednosti fizikalne veličine na izhodu. S dejansko vrednostjo na izhodu je mogoča tudi lažja primerjava z želeno vrednostjo na vhodu, kar opravlja krmilno-regulacijska enota, ki omogoča natančno vodenje. Razlika med tema vrednostima se v primeru zaprto zančnega vodenja zmanjšuje s pomočjo povratnega signala, ki ga posreduje senzor. Prednost regulacije je, da omogoča hitrejši odziv in manjšo napako v primerjavi s pristopom odprto zančnega krmiljenja. Slika 14 prikazuje shemo zaprto zančnega vodenja [21, 23].



Slika 14: Primer sheme zaprto zančnega vodenja [21]

2.6.3 Vodenje hitrosti enosmernega ventilatorja

Delovanje enosmernega ventilatorja lahko poteka [24]:

- brez vodenja hitrosti (direktni priklop na napetost),
- z vodenjem tipa vklop/izklop,
- s spreminjanjem napajalne napetosti,
- s pulzno širinsko modulacijo.

Najenostavnejši način je, da hitrosti ventilatorja ne reguliramo, takrat ventilator vedno obratuje z najvišjo hitrostjo v načinu neposrednega krmiljenja. Kljub krajši življenjski dobi ventilatorja, precejšnemu hrupu ter višji porabi energije, takšna izvedba zagotavlja večji odvzem toplote oz. toplotno obremenitev [24].

Vodenja ventilatorja na način vklop/izklop poteka na podlagi vzdrževanja nastavljenе temperature. V tej izvedbi je potreben senzor temperature, kadar izmerjena temperatura preseže prag, se ventilator vklopi in zagotovi hlajenje. Slabost takšne izvedbe je, da ventilator obratuje pod največjo hitrostjo in povzroča precejšen hrup [24].

Vodenje s spreminjanjem napetosti povzroči spremembo hitrosti ventilatorja. Pri tem je napetost sorazmerna s hitrostjo ventilatorja, kar pomeni, da je hitrost ventilatorja manjša ob nižji napetosti in večja ob višji napetosti. Pri takšnem načinu vodenja je dobro vedeti, da je pri zagonu ventilatorja potrebna višja napetost, ki se jo lahko nato zmanjša, s čimer se zmanjša tudi hitrost. Ta izvedba je precej tiha, vendar ima omejeno območje vodenja hitrosti [24].

Vodenje lahko poteka s PWM, ki uporablja relativno širino pulzov (tj. pulzno širinsko modulacijo) za spreminjanje moči na motorju. Modulacija deluje na podlagi spreminjanja širine pulzov vklopljene napetosti in izklopljene napetosti, kjer se trajanje teh period lahko posledično spreminja. Pri vodenju s PWM ločimo dva načina [24]:

- nizko frekvenčno,
- visoko frekvenčno.

Vodenje z nizkofrekvenčno pulzno širinsko modulacijo omogoča enostavno, poceni in zanesljivo vodenje. Vendar se lahko pojavi napaka v povratni informaciji, saj se uporablja trižilni ventilator. Poleg tega je ta izvedba glasnejša zaradi vklapljanja in izklapljanja celotnega ventilatorja. Te slabosti lahko odpravimo z izvedbo vodenja z visokofrekvenčnim PWM, tu je ventilator gnan izven slišnega območja. Izvedba zunanjega vezja je enostavnejša, vendar je mogoča uporaba le štirižilnih ventilatorjev [24].

Izvedbe enosmernih ventilatorjev

Poznamo različne izvedbe ventilatorjev glede na število žil vodnika [24]:

- dvožilni ventilator,
- trižilni ventilator,
- štirižilni ventilator.

Vodenje dvožilnega ventilatorja poteka z odprto zanko, kjer se hitrost krmili s spreminjanjem napetosti oz. s PWM direktno. Pri dvožilnem ventilatorju prva žila vodnika predstavlja zemljo (potencial 0V), druga pa napetost [24].

Na enak princip poteka vodenje trižilnega ventilatorja, kjer je možnost tudi zaprto zankega vodenja zaradi povratne informacije. V tem primeru prva žila predstavlja zemljo (potencial 0V), druga napetost, tretja žila deluje kot senzor (običajno temperature) in daje povratno informacijo. Povratna informacija je lahko napačna zaradi vklapljanja in izklapljanja na osnovi pred nastavljene PWM modulacije [24].

Pri štirižilnem ventilator pa četrta žila omogoča krmilni PWM signal. S tem je omogočen najboljši nadzor hitrosti ventilatorja z vklapljanjem in izklapljanjem krmilnega PWM signalov širokem hitrostnem območju delovanja. Takšen ventilator je mogoče dobro voditi tudi pri nizkih hitrostih [24].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

V tem diplomskem delu bomo poskrbeli za konstruiranje tekočega traku, ki se bo uporabljal za zračno hlajenje filameta. Določiti bo treba primerno število ventilatorjev za hlajenje. Potrebno bo zasnovati tudi nosilno konstrukcijo celotne naprave. To bomo razdelili na nosilno konstrukcijo ventilatorjev in nosilno konstrukcijo celotnega tekočega traku. Potem bomo tekoči trak tudi sestavili in poskrbeli za primerno vodenje hitrosti tekočega traku ter hitrosti vrtenja ventilatorjev, saj bodo ti vplivali na intenzivnost odvzema toplote.

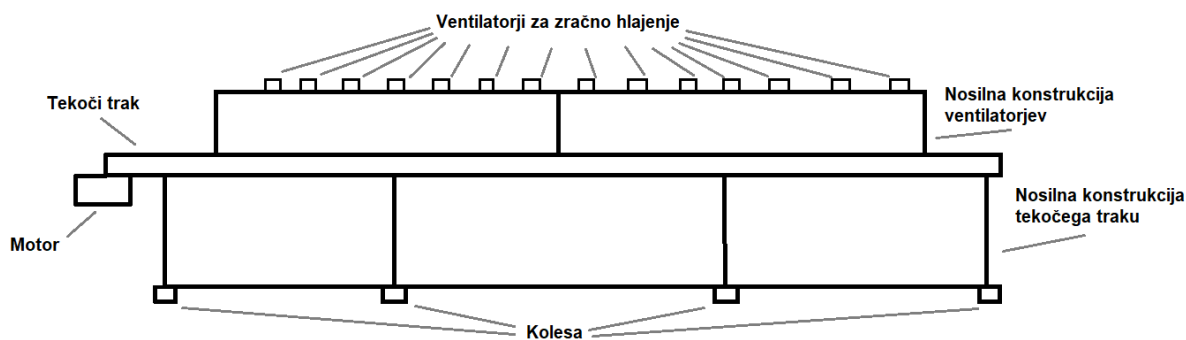
3.1 Določitev zahtev, želja ter priprava idejne konstrukcije tekočega traku

V tabeli 1 so zapisane zahteve in želje za tekoči trak.

Tabela 1: Zahteve in želje za izvedbo tekočega traku

Zahteva	Želja
Možnost nadzora hitrosti vrtenja traku	Višinsko prilagodljiva konstrukcija
Možnost nadzora intenzivnosti hlajenja	/
Nosilnost konstrukcije primerna z upoštevanim koeficientom varnost	/
Enostavno premikanje tekočega traku	/
Konstrukcija zgrajena iz aluminijastih profilov	/

Slika 15 prikazuje idejno konstrukcijo pripravljeno glede na zapisane zahteve in željo.



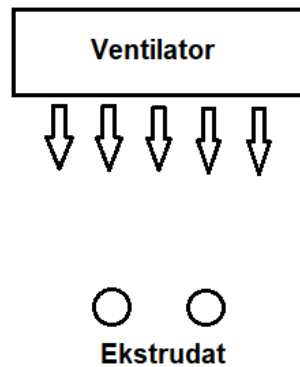
Slika 15: Idejna risba tekočega traku

Nato bomo dimenzije tekočega traku za lažjo predstavo pretvorili v CAD obliko.

3.2 Toplotni preračun

3.2.1 Priprava modela prenosa toplote pri zračno hlajeni ekstruziji

Slika 16 prikazuje način prenosa toplote pri zračno hlajeni ekstruziji.



Slika 16: Način prenosa toplote

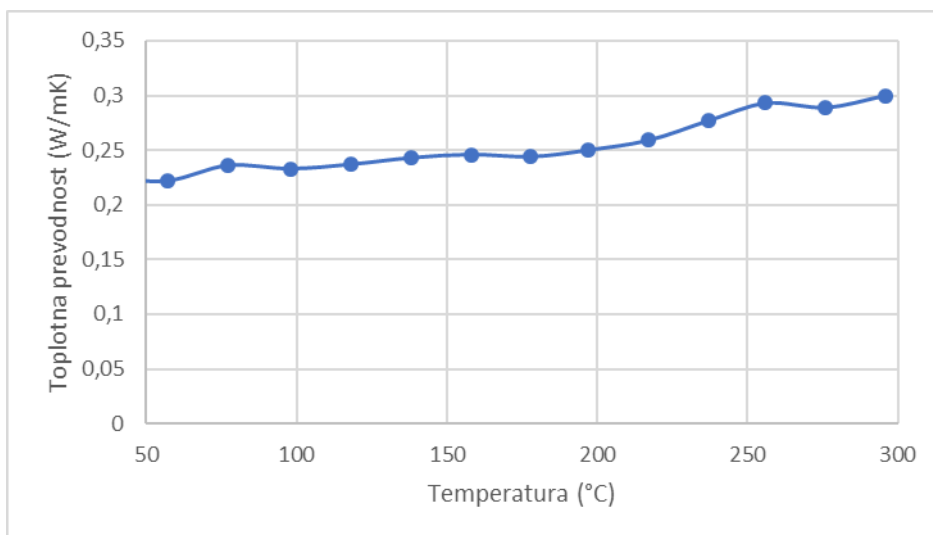
3.2.2 Izvedba CFD simulacije v programu Siemens NX12 Nastran

Za izbiro primerne ventilatorja za hlajenje filamenta smo uporabili CFD simulacijo, ta glede na robne pogoje najprej izračuna tok zraka in nato prenos toplote, ki je posledica gibanja fluida. Reševanje simulacije je potekalo v računalniškem programu Siemens NX12 z uporabo Simcenter Thermal/Flow. Nastavili smo naslednje nastavitve simulacije, ki smo jih zbrali v tabelo 2.

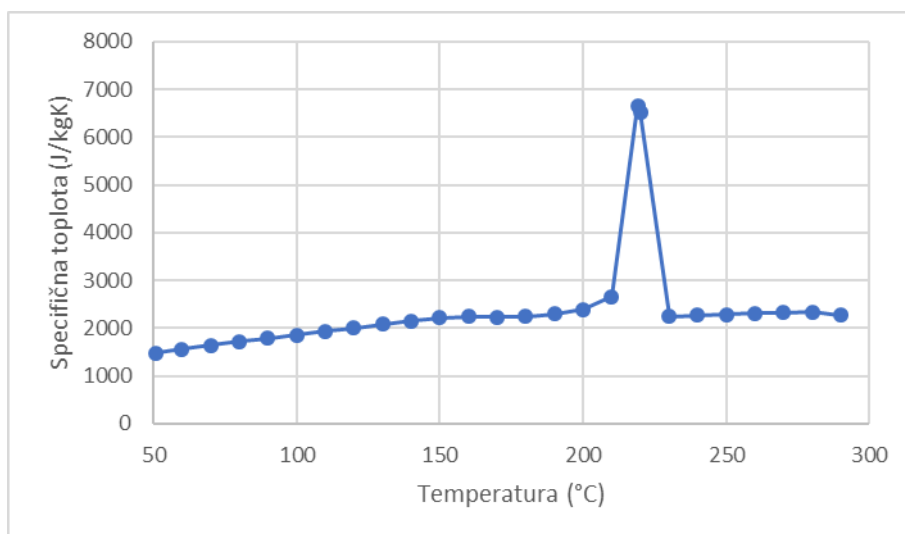
Tabela 2: Nastavitve simulacije

Nastavitve simulacije	Vrednost / lastnost
Vrsta simulacije	Transientna / nestacionarna
Trajanje reševanja	50 s
Število računskih korakov	500
Število rezultatov	50
Površina na katero teče zrak	gladka
Upoštevanje vzgona pri gibanju zraka	da

Potem smo nadaljevali v naslednjo datoteko, kjer smo izbrali materialne podatke in nastavili velikost elementov. Gostota PA66 znaša 1339 kg/m^3 . V izračunu smo uporabili temperaturno odvisnost specifične toplote in toplotne prevodnosti, kjer smo podatke pridobili iz materialne baze programa Autodesk Moldflow Adviser 2019. Temperaturna odvisnost je prikazana na sliki 17 in sliki 18.



Slika 17: Toplotna prevodnost PA 66 v odvisnosti od temperature [25]



Slika 18: Specifična toplota PA 66 v odvisnosti od temperature [25]

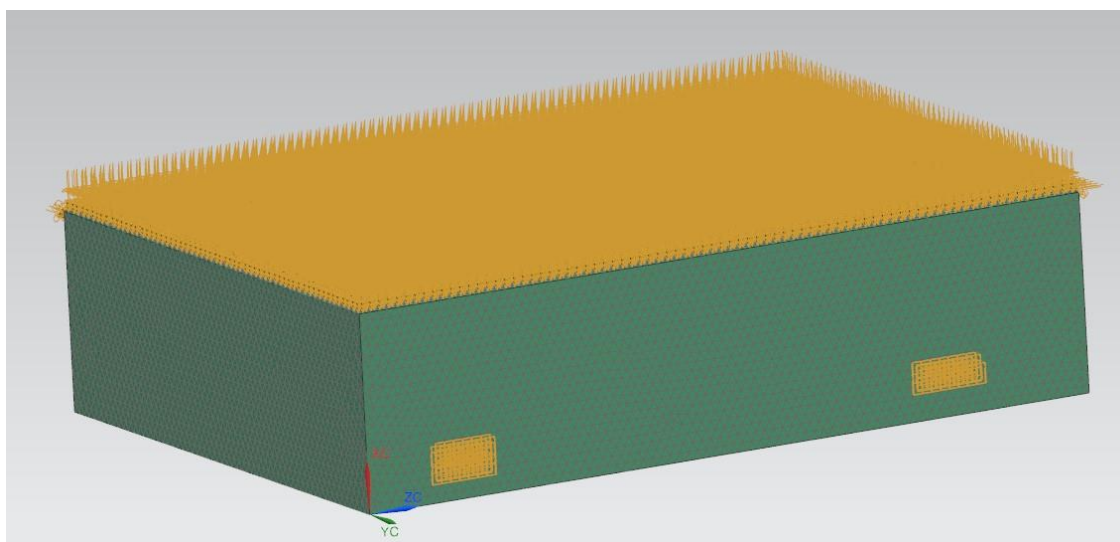
Nastavili smo nato še velikost elementov mreže zraka in elementov mreže filameta pri tem smo zagotovili povezavo mreže v vozliščih s funkcijo »mesh mating«. Najprej smo CFD simulacije izvajali za določitev optimalne velikosti elementov mreže. To smo storili na način zmanjševanja velikosti elementov. S tem smo povečali število vozlišč, v katerih poteka izračun in tako dobili natančnejši rezultat. Primerno velikost elementov smo dosegli, ko smo opazili pri simulaciji opazili minimalno spremembo ob manjšanju elementov.

Nato smo nastavili robne pogoje simulacije, ti so prikazani v tabeli 3.

Tabela 3: Robni pogoji

Robni pogoj	Velikost veličine	Enota
Območje zraka	80 x 60 x 20	mm
Temperatura zraka	30	°C
Končna velikost elementov mreže zraka	1	mm
Gostota filameta	1339	kg/m ³
Premer filameta	5	mm
Dolžina filameta	60	mm
Začetna temperatura filameta	300	°C
Končna velikost elementov mreže filameta	0,5	mm
Volumski pretok zraka prve simulacije	50	m ³ /h
Volumski pretok zraka druge simulacije	75	m ³ /h
Volumski pretok zraka tretje simulacije	150	m ³ /h

Poleg vseh teh pogojev smo določili tudi mesta, kjer se tlak uravnava z okolico. Ta mesta omogočajo tudi vstopanje in izstopanje zraka. Slika 19 prikazuje mrežo in pozicije pretoka zraka ter odprtine za uravnavanje.



Slika 19: Mreža, pozicija volumskega pretoka zraka in odprtini

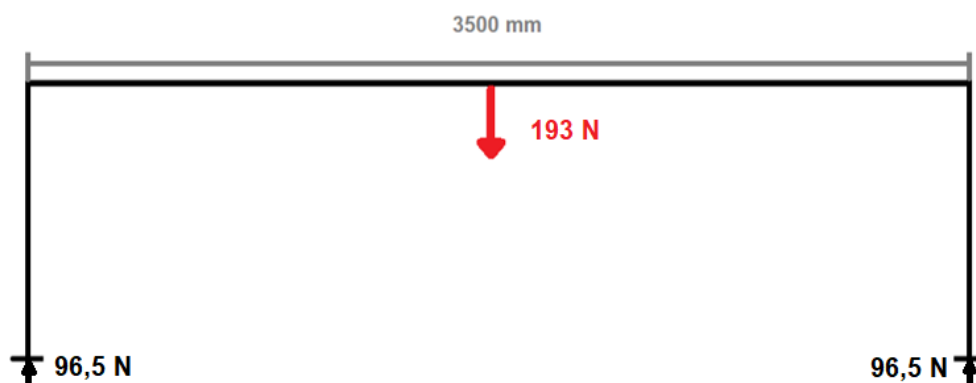
3.3 Mehanski preračun

Za izbiro primernih nosilnih profilov je bilo potrebno izvesti mehanski preračun, s katerim smo zagotovili zadostno nosilnost tekočega traku.

3.3.1 Določitev sil v podporah, obremenitev in navorov

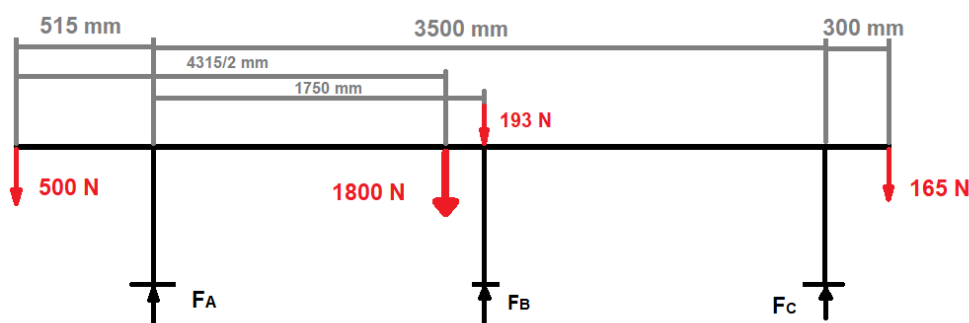
Tekoči trak smo za lažji izračun razdelili na dva območja ter predpostavili vpete podpore. Predpostavili smo 15 ventilatorjev s težo 10 N ventilatorjev. Teža nosilca je predstavljena na dolžino in znaša 12,4 N/m. Glede na to, da so ventilatorji enakomerno porazdeljeni po nosilni konstrukciji, smo obremenitev predstavili v težišču. Slika 20 prikazuje točkovno obremenitev in sile podpor nosilne konstrukcije ventilatorjev, izračun rezultante sil je prikazan z enačbo 11.

$$F_R = F_1 + F_2 = 10 \text{ N} \cdot 15 + 12,4 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 3,5 \text{ m} = 193 \text{ N}$$



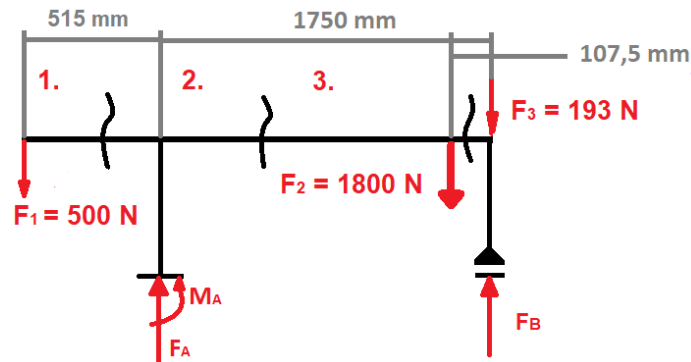
Slika 20: Obremenitev in podpora nosilne konstrukcije ventilatorjev

Nato smo določili še obremenitve nosilne konstrukcije tekočega traku. Glede na geometrijo tekočega traku in ekstruderja smo določili poziciji podpor. Določitev posameznih sil je potekala s pomočjo CAD programu Siemens NX12, kjer smo sile določili s programom glede na volumen komponent. Za večjo varnost konstrukcije smo predpostavili, da sile delujejo v skrajnih legah. Slika 21 prikazuje določene obremenitve ter sile v podporah, te smo izračunali z ravnotežnimi enačbami momentov.



Slika 21: Obremenitve in podpora nosilne konstrukcije tekočega traku

Za lažji izračun smo nosilec razdelili na dva dela ter tako izračunali sile in momente v podporah za prvi del. Prvi del nosilca je prikazan na sliki 22.



Slika 22: Sile na nosilec v prvem delu nosilca

Izračun sil in momentov v podporah smo izvedli z enačbama 11 in 13.

$$\sum M_A = 500 \text{ N} \cdot 0,515 \text{ m} - 1800 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} - 0,1075 \text{ m}) - 193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} + F_B \cdot 1,75 \text{ m} = 0$$

$$F_B = \frac{-500 \text{ N} \cdot 0,515 \text{ m} + 1800 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} - 0,1075 \text{ m}) + 193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m}}{1,75 \text{ m}} = 1735,3 \text{ N}$$

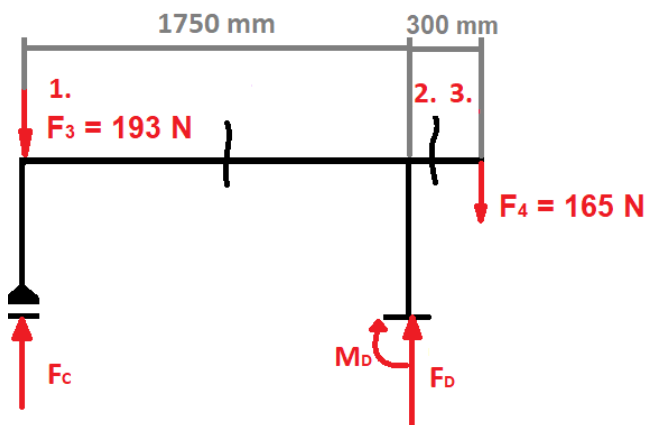
$$\sum F_y = -500 \text{ N} - 1800 \text{ N} - 193 \text{ N} + F_A + F_B = 0$$

$$F_A = 500 \text{ N} + 1800 \text{ N} + 193 \text{ N} - 1735,7 \text{ N} = 739,3 \text{ N}$$

$$\sum M_B = 500 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} + 0,515 \text{ m}) - F_A \cdot 1,75 \text{ m} + 1800 \text{ N} \cdot 0,1075 \text{ m} - R_A = 0$$

$$M_A = 500 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} + 0,515 \text{ m}) - F_A \cdot 1,75 \text{ m} + 1800 \text{ N} \cdot 0,1075 \text{ m} = 500 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} + 0,515 \text{ m}) - 739,3 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} + 1800 \text{ N} \cdot 0,1075 \text{ m} = 32,2 \text{ Nm}$$

Drugi del nosilca je prikazan na sliki 23.



Slika 23: Sile na nosilec v drugem delu nosilca

Izračun sil in momentov v podporah smo izvedli z enačbama 11 in 13.

$$\sum M_D = F_C \cdot 1,75 \text{ m} + 193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 165 \text{ N} \cdot 0,3 \text{ m} = 0$$

$$F_C = \frac{193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 165 \text{ N} \cdot 0,3 \text{ m}}{1,75 \text{ m}} = 164,7 \text{ N}$$

$$\sum F_y = F_C + F_D - 193 \text{ N} - 165 \text{ N} = 0$$

$$F_D = 193 \text{ N} + 165 \text{ N} - F_C = 193 \text{ N} + 165 \text{ N} - 164,7 \text{ N} = 193,3 \text{ N}$$

$$\sum M_C = -M_D + F_D \cdot 1,75 \text{ m} - 165 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} + 0,3 \text{ m}) = 0$$

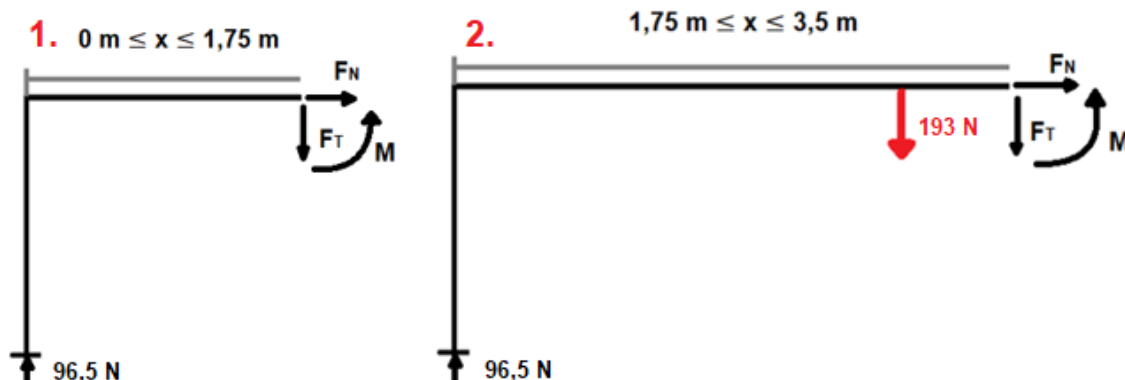
$$\begin{aligned} M_D &= F_D \cdot 1,75 \text{ m} - 165 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} + 0,3 \text{ m}) \\ &= 193,3 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 165 \text{ N} \cdot (1,75 \text{ m} + 0,3 \text{ m}) = -0,5 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3.3.2 Izdelava NTM diagramov

Z uporabo izračunanih podatkov smo nato izračunali notranje sile in momente ter s tem izdelali NTM diagrame.

Nosilna konstrukcija ventilatorjev

Najprej smo izračunali notranje sile in momente za nosilno konstrukcijo ventilatorjev. Slika 24 prikazuje kako smo za izračun navidezno prerezali nosilec na dveh mestih.



Slika 24: Navidezno prerezan nosilec ventilatorjev

Najprej smo na območju $0 \text{ m} \leq x \leq 1,75 \text{ m}$ izračunali notranje sile. Izračuna notranje osne sile nismo izvedli, saj so vse obremenitve prečno na nosilec.

Nato smo z enačbo 15 izračunali notranjo prečno silo.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$F_A - F_T = 0$$

$$F_T = F_A = 96,5 \text{ N}$$

Z enačbo 16 smo izračunali notranji upogibni moment.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M - F_A \cdot x = 0$$

$$M = F_A \cdot x = 96,5 \text{ N} \cdot x$$

$$M_{(x=0 \text{ m})} = 96,5 \text{ N} \cdot 0 \text{ m} = 0 \text{ Nm}$$

$$M_{(x=1,75 \text{ m})} = 96,5 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} = 168,875 \text{ Nm} = 168,9 \text{ Nm}$$

Nato je izračun potekal na območju $1,75 \text{ m} \leq x \leq 3,5 \text{ m}$. uporabili smo enačbo 15 za izračun notranje prečne sile.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$F_A - F - F_T = 0$$

$$F_T = F_A - F = 96,5 \text{ N} - 193 \text{ N} = -96,5 \text{ N}$$

Z enačbo 16 smo nato izračunali notranji upogibni moment.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M - F_A \cdot x + F \cdot (x - 1,75 \text{ m}) = 0$$

$$\begin{aligned} M &= F_A \cdot x - F \cdot (x - 1,75 \text{ m}) = 96,5 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot (x - 1,75 \text{ m}) \\ &= 96,5 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot x + 337,75 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{(x=1,75 \text{ m})} &= 96,5 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} + 337,75 \text{ Nm} = 168,875 \text{ Nm} \\ &= 168,9 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$M_{(x=3,5 \text{ m})} = 96,5 \text{ N} \cdot 3,5 \text{ m} - 193 \text{ N} \cdot 3,5 \text{ m} + 337,75 \text{ Nm} = 0 \text{ Nm}$$

Prvi del nosilne konstrukcije tekočega traku

Podoben preračun smo izvedli tudi za nosilno konstrukcijo tekočega traku, kjer smo prvi in drugi del nosilca navidezno prerezali na različnih mestih. Sliki 22 in 23 prikazujeta pozicije navideznih delitev. Najprej smo izvedli izračun notranjih obremenitev v prvem delu nosilca v območju $0 \leq x \leq 0,515 \text{ m}$. Z enačbo 15 smo izračunali notranjo prečno silo.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$-F_1 - F_T = 0$$

$$F_T = -F_1 = -500 \text{ N}$$

Nato smo z enačbo 16 izračunali notranji upogibni moment.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M + F_1 \cdot x = 0$$

$$M = -F_1 \cdot x = -500 \text{ N} \cdot x$$

$$M_{(x=0 \text{ m})} = -500 \text{ N} \cdot 0 \text{ m} = 0 \text{ Nm}$$

$$M_{(x=0,515 \text{ m})} = -500 \text{ N} \cdot 0,515 \text{ m} = -257,5 \text{ Nm}$$

Nato smo izračun izvedli v območju $0,515 \text{ m} \leq x \leq 2,1575 \text{ m}$. Uporabili smo enačbo 15 za izračun notranje prečne sile.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$-F_1 - F_T + F_A = 0$$

$$F_T = F_A - F_1 = 739,3 \text{ N} - 500 \text{ N} = 239,3 \text{ N}$$

Z enačbo 16 smo izračunali notranji upogibni moment.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M + M_A + F_1 \cdot x - F_A \cdot (x - 0,515 \text{ m}) = 0$$

$$\begin{aligned} M &= F_A \cdot (x - 0,515 \text{ m}) - F_1 \cdot x - M_A \\ &= 1611,2 \text{ N} \cdot (x - 0,515 \text{ m}) - 500 \text{ N} \cdot x - 32,2 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{(x=2,1575 \text{ m})} &= 739,3 \text{ N} \cdot (2,1575 \text{ m} - 0,515 \text{ m}) - 500 \text{ N} \cdot 2,1575 \text{ m} - 32,2 \text{ Nm} \\ &= 103,4 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Naslednji izračun smo izvedli v območju $2,1575 \text{ m} \leq x \leq 2,265 \text{ m}$. Uporabili smo enačbo 15 za izračun notranje prečne sile.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$-F_1 + F_A - F_2 - F_T = 0$$

$$F_T = F_A - F_1 - F_2 = 739,2 \text{ N} - 500 \text{ N} - 1800 \text{ N} = -1560,8 \text{ N}$$

Z enačbo 16 smo izračunali notranji upogibni moment.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M + M_A + F_1 \cdot x - F_A \cdot (x - 0,515 \text{ m}) + F_2 \cdot (x - 2,1575 \text{ m}) = 0$$

$$\begin{aligned} M &= F_A \cdot (x - 0,515 \text{ m}) - F_1 \cdot x - F_2 \cdot (x - 2,1575 \text{ m}) - M_A \\ &= 739,3 \text{ N} \cdot (x - 0,515 \text{ m}) - 500 \text{ N} \cdot x - 1800 \text{ N} \cdot (x - 2,1575 \text{ m}) \\ &\quad - 32,2 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{(x=2,265 \text{ m})} &= 739,3 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 500 \text{ N} \cdot 2,265 \text{ m} - 1800 \text{ N} \cdot (2,265 \text{ m} - 2,1575 \text{ m}) \\ &\quad - 32,2 \text{ Nm} = -64,4 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Drugi del nosilne konstrukcije tekočega traku

Nato smo izračun notranjih sil izvedli še v drugem delu nosilca, katerega prikazuje slika 23. Naprej smo izračun izvedli na območju $0 \text{ m} \leq x \leq 1,75 \text{ m}$. Notranjo prečno silo smo izračunali z enačbo 15.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$F_C - F_3 - F_T = 0$$

$$F_T = F_C - F_3 = 164,7 \text{ N} - 193 \text{ N} = -28,3 \text{ N}$$

Z enačbo 16 je potekal izračun notranjega upogibnega momenta.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M + F_3 \cdot x - F_C \cdot x = 0$$

$$M = F_C \cdot x - F_3 \cdot x = 164,7 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot x$$

$$M_{(x=0 \text{ m})} = 164,7 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot x = 164,7 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} = 0 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} M_{(x=1,75 \text{ m})} &= 164,7 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot x = 164,7 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} - 193 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m} \\ &= -49,53 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Nato smo izračun izvedli v območju $1,75 \text{ m} \leq x \leq 2,05 \text{ m}$. Uporabili smo enačbo 15 za izračun notranje prečne sile.

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} + F_T = 0$$

$$F_C - F_3 + F_D - F_T = 0$$

$$F_T = F_C + F_D - F_3 = 164,7 \text{ N} + 193,3 \text{ N} - 193 \text{ N} = 165 \text{ N}$$

Z enačbo 16 je potekal izračun notranjega upogibnega momenta.

$$\sum_{i=1}^n M_{ix} + M = 0$$

$$M + F_3 \cdot x - F_C \cdot x = 0$$

$$\begin{aligned} M &= F_C \cdot x - F_3 \cdot x - M_D + F_D \cdot (x - 1,75 \text{ m}) \\ &= 164,7 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot x + 0,5 \text{ Nm} + 193,3 (x - 1,75 \text{ m}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{(x=2,05 \text{ m})} &= 164,7 \text{ N} \cdot x - 193 \text{ N} \cdot x + 0,5 \text{ Nm} + 193,3 \cdot (x - 1,75 \text{ m}) \\ &= 164,7 \text{ N} \cdot 2,05 \text{ m} - 193 \text{ N} \cdot 2,05 \text{ m} + 0,5 \text{ Nm} + 193,3 \cdot (2,05 \text{ m} - 1,75 \text{ m}) = 0,475 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3.3.3 Mehanski preračun za izbiro nosilne konstrukcije tekočega traku in naprav za hlajenje filamenta

Pri mehanskem izračunu smo si pomagali s tabelo 4, v kateri so zbrani podatki za mehanski preračun.

Tabela 4: Materialne lastnosti aluminija [26]

Materialna lastnost	Modul elastičnosti (GPa)	Kritična napetost (N/mm ²)	Varnostni količnik
Vrednost	70	150	2

Z enačbo 21 smo izračunali vrednost dopustne napetosti.

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_k}{v} = \frac{150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{2} = 75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

V tabeli 5 so zbrane geometrijske lastnosti nosilcev.

Tabela 5: Geometrijske lastnosti nosilcev [26]

Geometrijska lastnost	Vztrajnostni moment (cmm ⁴)	Odpornostni moment (cmm ³)
Nosilec 40x40	7,62	3,81
Nosilec 40x80	55,72	13,93

Mehanski preračun smo izvedli na podlagi NTM diagrama. V primeru nosilne konstrukcije ventilatorjev smo izbrali nosilec, katerega prerez ima dolžino 40 mm in višino 40 mm. S pomočjo enačbe 24 smo nato izračunali dejansko napetost nosilca ventilatorjev.

$$\sigma_{dej} = \frac{M}{W} = \frac{168,9 \text{ Nm}}{3,81 \text{ cm}^3} = \frac{168,9 \cdot 1000 \text{ Nmm}}{3,81 \cdot 1000 \text{ mm}^3} = 44,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{dop} > \sigma_{dej}$$

Za celotno nosilno konstrukcijo smo izbrali nosilec, katerega prerez ima dolžino 40 mm in višino 80 mm. Z enačbo 24 smo izračunali dejansko napetost v notranjosti, kjer smo izračunali največji notranji upogibni trenutek.

$$\sigma_{dej} = \frac{M}{W} = \frac{257,15 \text{ Nm}}{13,93 \text{ cm}^3} = \frac{257,15 \cdot 1000 \text{ Nmm}}{13,93 \cdot 1000 \text{ mm}^3} = 18,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{dop} > \sigma_{dej}$$

3.4 Konstrukcija tekočega traku in naprav za hlajenje filamenta

Pripravili smo nosilno konstrukcijo v programu Siemens NX12 na podlagi mehanskih izračunov. Nosilna konstrukcija je pripravljena z aluminijastimi profili, ki omogočajo enostavno montažo. Za nosilno konstrukcijo tekočega traku smo izbrali profil širine 40 mm in višine 80 mm. Pri nosilni konstrukciji ventilatorjev smo za konstrukcijo izbrali profil širine 40 mm in višine 40 mm.

Te oblike profilov smo našli na prodajni strani podjetja Tuli, d. o. o. ter si prenesli tudi CAD obliko profilov. CAD profile smo nato v programu Siemens NX 12 spremenili na željeno dolžino in jih s pomočjo funkcije »Assembly Constraints« postavili na mesto, dokler nismo dobili celotne CAD konstrukcije. Pozorni smo bili tudi na obliko utora profilov, saj so komercialno dobavljivi tudi profili z različnimi utori. Z enakimi utori debeline 10 mm smo zagotovili spajanje med različnimi profili s pomočjo kotnikov, T-vijakov in matic. Slika 25 v prilogi 1 prikazuje CAD konstrukcijo tekočega traku.

3.5 Krmiljenje sistema

Pri izbiri načina vodenja hitrosti tekočega traku in hitrosti ventilatorjev smo upoštevali, da ne potrebujemo povratne informacije o hitrosti. Zato smo krmiljenje hitrosti tekočega traku izvedli na podlagi frekvenčne regulacije, saj ta popolnoma zadostuje v tem primeru.

Krmiljenje hitrosti ventilatorjev je bilo sprva načrtovano na podlagi pulzirajoče širinske modulacije, saj ta omogoča večje območje vodenja hitrosti. Pri tem bi morali izbrati zadostno število trižilnih ventilatorjev, saj nam to omogoča možnost nizkofrekvenčnega PWM krmiljenja hitrosti ventilatorjev. Pri tem se je izvedba PWM vodenja izkazala za približno petkrat dražjo, zaradi nujnosti uporabe dražjih komponent kot sta PWM krmilnik ter trižilni oz. štirižilni ventilator. Iz tega razloga smo se odločili za cenovno ugodnejšo opcijo, ki zagotavlja dobro krmiljenje ventilatorjev na podlagi spreminjanja napetosti s pomočjo potenciometra.

Vezavo komponent je bila izvedena s pomočjo električnega strokovnjaka.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Rezultati toplotnega preračuna

Prva simulacija je bila izvedena z volumskim pretokom zraka, ki znaša 50 m³/h. Na sliki 26 v prilogi 2 lahko vidimo potek temperature skozi čas za prvo simulacijo. Vsaka krivulja predstavlja mesto na preseku filamenta. Pri tem je krivulja z najvišjimi temperaturami v središču filamenta, krivulja z najnižjimi na zunanosti filamenta. Slika 27 v prilogi 2 prikazuje porazdelitev temperature na vzdolžnem prerezu filamenta po času 50 sekund zračnega hlajenja v prvi simulaciji. Opazimo lahko, da se najnižja temperatura pojavi na površini filamenta ta znaša 36,4 °C, saj je ta površina v stiku z zrakom tako se toplota lažje odvaja. Najvišja temperatura se pojavi v središču filamenta in znaša 84,8 °C. Povprečna temperatura znaša 61,7 °C. Slika 28 v prilogi 2 prikazuje zračni tlak v prvi simulaciji po času 50 s. Opazimo lahko, da se območja z višjimi in nižjimi vrednostmi tlaka pojavljajo na območju odprtih za izmenjavo zraka z okolico. Na tem območju se tlak giblje med 0,06 MPa in 0,16 MPa. Vrednost zračnega tlaka je v preostalem območju 0,1 MPa približno enaka atmosferskemu tlaku. Slika 29 v prilogi 2 prikazuje temperaturo zraka v prvi simulaciji po času 50 s. Opazimo, da se ob volumskem pretoku zraka, ki znaša 50 m³/h temperatura zraka v okolici filamenta dvigne za največ 11,5 °C. Ta dvig temperature okoliškega zraka se pojavi na strani filamenta, ki ni izpostavljena zračnemu pretoku.

Druga simulacija je bila izvedena z volumskim pretokom zraka, ki znaša 75 m³/h. Slika 30 v prilogi 3 prikazuje potek temperature skozi čas za drugo simulacijo. Slika 31 v prilogi 3 prikazuje temperaturno porazdelitev vzdolž prereza filamenta v drugi simulaciji po 50 s. Opazimo lahko, da se najvišja temperatura pojavi v središču filamenta in znaša 81,0 °C. Najnižja temperatura znaša 35,6 °C, povprečna temperatura pa znaša 59,4 °C. Slika 32 v prilogi 3 prikazuje zračni tlak v drugi simulaciji po 50 s. Ta se v območju izmenjave zraka giblje med 0,05 MPa in 0,15 MPa. Vrednost zračnega tlaka je v ostalih točkah znaša 0,1 MPa ter je primerljiva z atmosferskim tlakom. Slika 33 v prilogi 3 prikazuje temperaturo zraka v drugi simulaciji po 50 s, kjer temperatura naraste za največ 9,7 °C.

Tretja simulacija je bila izvedena z volumskim pretokom zraka, ki znaša 150 m³/h. Slika 34 v prilogi 4 prikazuje časovno odvisnost temperature filamenta za tretjo simulacijo. Slika 35 v prilogi 4 prikazuje temperaturno porazdelitev na vzdolžnem prerezu filamenta v tretji simulaciji po 50 s. Povprečna temperatura je znašala 54,3 °C, minimalna temperatura 33,3 °C ter maksimalna temperatura 72,4 °C. Slika 36 v prilogi 4 prikazuje zračni tlak v tretji simulaciji po 50 s. Večje in manjše vrednosti zračnega tlaka lahko opazimo na mestih izmenjave zraka, kjer se vrednosti gibljejo med 0,07 MPa in 0,20 MPa. V ostalih točkah tretje simulacije so bile vrednosti zračnega tlaka znaša 0,1 MPa in je primerljiva atmosferskemu tlaku. Slika 37 v prilogi 4 prikazuje temperaturo zraka v tretji simulaciji po času 50 s. Opazili smo nekoliko večjo

temperaturo zraka na strani filameta, ki ni neposredno izpostavljena zračnemu pretoku. Na tistem mestu temperatura zraka naraste za največ 3,6 °C.

Slika 38 v prilogi 5 prikazuje primerjavo temperature na vzdolžnem prerezu filameta po 50 s. Pri tem je na zgornji delu predstavljena prva simulacija, na sredinskem druga ter na spodnjem tretja. Legenda je enaka za vse dele in tako omogoča razlikovanje med simulacijami. Opazimo lahko, da je najboljše hlajenje filameta v tretji simulaciji.

Rezultati simulacij so pokazali, da sta bila debelina filameta in masni pretok ekstruzije dovolj majhna, da bo zadostovalo le zračno hlajenje, brez pršenja vode za povečan odvzem toplote. Simulacijo smo izvajali pri konstantni debelini filameta, ki je znašala 5 mm. Pri simulaciji smo povečevali volumni pretok zraka, dokler nismo dosegli želenih rezultatov. Pri tem smo spremljali tudi vrednost zračnega tlaka ter temperature zraka, dokler nismo dobili rezultatov, kjer je vrednost zračnega tlaka primerljiva z atmosferskim. Pri temperaturi zraka smo bili pozorni na mesto pojavljanja najvišje temperature in vrednosti temperature zraka. Obe izračunani spremenljivki smo uporabili za verifikacijo simulacije.

Rezultati simulacije se prav tako pokazali, da pri hlajenju filameta največjo vlogo ne bo igral le prestop toplote. Glede na rezultate simulacije lahko rečemo, da ima poleg prestopa toplote velik vpliv tudi prenos toplote. To je posledica nizke toplotne prevodnosti polimerov.

Uporaba numeričnih simulacij se je izkazala kot precej uporabna raziskovalna metoda. Rezultati simulacije omogočajo določitev števila ter zahtevanega volumnskega pretoka ventilatorja. Omogočajo tudi vizualizacijo hlajenja ter gibanja zraka v določenem območju izvedene simulacije. Kljub temu je izvedba takšnih simulacij predstavljala precejšen izziv.

4.2 Rezultati mehanskega preračuna

Na podlagi statičnih izračunov smo izdelali NTM diagrame. Slika 39 v prilogi 6 prikazuje NTM diagram nosilca ventilatorjev.

NTM diagram nosilca celotnega tekočega traku je predstavljen v obliki dveh grafov. Slika 40 v prilogi 6 predstavlja NTM diagram prvega dela nosilca tekočega traku.

Slika 41 v prilogi 6 predstavlja NTM diagram drugega dela nosilca tekočega traku.

Konstrukcijo tekočega traku sestavljata dve vrsti aluminijastih profilov. Pri nosilni konstrukciji ventilatorjev izračunana dejanska napetost znaša 44,3 N/mm. Ta dejanska napetost pri nosilni konstrukciji tekočega traku s tremi podporami znaša 18,5 N/mm.

4.3 Izvedba tekočega traku za zračno hlajenje filamenta

4.3.1 Tekoči trak za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem

Slika 42 v prilogi 7 prikazuje CAD konstrukcijo tekočega traku z ventilatorji. Pritrditev ventilatorjev je potekala s pomočjo natisnjenih elementov.

4.3.2 Eksplozijska risba tekočega traku

Izdelali smo tudi eksplozijsko risbo, ta je prikazana na sliki 43 v prilogi 7. Eksplozijska risba nam je služila kot pomoč pri sestavljanju tekočega traku ter določitve zadostnega števila elementov za spajanje.

4.3.3 Končna izvedba tekočega traku za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem

Izbrane profile smo nato sestavili v konstrukcijo tekočega traku, ki smo jo pred tem predvideli v CAD programu. Pritrdili smo ventilatorje ter s pomočjo električnega strokovnjaka izvedli vezavo elektronskih komponent za zagotovitev predvidenega krmiljenja sistema. Slika 44 v prilogi 7 prikazuje končno izvedbo tekočega traku za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem.

5 SKLEP

V diplomskem delu smo uspešno izvedli konstrukcijo tekočega traku, ki smo ga opremili z ventilatorji za zračno hlajenje filameta. Pri tem smo poskrbeli za možnost vodenja hitrosti tekočega traku, vodenja intenzivnosti hlajenja, nosilno konstrukcijo iz aluminijastih profilov, zadostno nosilnost nosilne konstrukcije ter za enostavno premikanje po prostoru.

Pri vodenju tekočega traku in ventilatorjev je bilo treba izbrati najprimernejši princip vodenja. Vodenje tekočega traku je bilo izvedeno s pomočjo frekvenčne regulacije, vodenje volumskega pretoka zraka ventilatorjev smo sprva načrtovali s pomočjo PWM vodenja. V primeru vodenja hitrosti tekočega traku smo se odločili za direktno frekvenčno krmiljenje hitrosti, saj povratna informacija o hitrosti ni potrebna, potrebno je le uskladiti hitrost tekočega traku z masnim pretokom na ekstruderju. Pri vodenju volumskega pretoka zraka ventilatorjev smo se zopet odločili za krmiljenje, saj ni potrebe po povratni informaciji. Ob zagonu se uporabi najvišja vrednost volumskega pretoka zraka, ta se po potrebi nekoliko zmanjšali med obratovanjem. Izkazalo se je, da PWM vodenja stane približno petkrat več kot vodenje s spreminjanjem napetosti preko potenciometra. Ravno zato smo izbrali cenovno ugodnejšo opcijo, ki zagotavlja dobro krmiljenje ventilatorjev s spreminjanjem napetosti. Krmiljenje smo izvedli s pomočjo štirih potenciometrov ter s tem zagotovili štiri cone krmiljenja ventilatorjev.

Potrebno je bilo izbrati tudi ventilatorje z zadostnim volumskim pretokom zraka, to smo storili s pomočjo numeričnih simulacij. Izvajali smo CFD simulacije hlajenja filameta z različnimi volumskimi pretoki zraka, kjer je hlajenje filameta trajalo 50 s. Spremljali smo povprečno, maksimalno in minimalno temperaturo. Za določitev primerne volumskega pretoka zraka smo opazovali maksimalno temperaturo. Zadosten volumski pretok zraka je bil dosežen, ko smo z rezultati simulacije dosegli, da se je maksimalna temperatura spustila pod 75 °C. To smo dosegli s tretjo simulacijo, katera je imela volumski pretok zraka 150 m³/h. Maksimalna temperatura je v tretji simulaciji po času 50 s hlajenja filameta znašala 72,4 °C, medtem ko se je povprečna temperatura v tej simulaciji spustila na 54,3 °C. Sklepamo lahko, da bo za dobro hlajenje potreben volumski pretok zraka, ki znaša vsaj 150 m³/h.

Pri rezultatih CFD simulacij smo bili še posebej pozorni na vrednosti absolutnega tlaka zraka, ki nastanejo pri izračunu simulacij. Sklepamo lahko, da so izračuni simulacij dober približek dejanskega stanja hlajenja, saj se vrednosti zračnega tlaka v večini simuliranega območja gibljejo okrog 0,1 MPa, ta vrednost je približno enaka atmosferskemu tlaku. Nižje in višje vrednosti tlaka se pojavijo v območju izmenjave zraka z okolico. Te vrednosti lahko zanemarimo, saj smo ta območja uporabili, samo za zagotovitev izmenjave zraka. Pri izmenjavi zraka govorimo o uravnavanju tlaka in o odvajanju toplote v okolico.

Spremljali smo tudi vrednosti temperature zraka, prav tako lahko sklepamo, da so rezultati simulacije primerljivi z dejanskim hlajenjem. Temperatura zraka v teh

območjih po 50 s hlajenja z zrakom nekoliko naraste, saj se zrak nekoliko segreje pri odvajanju toplote. Zaradi manjšega dviga temperature zraka pri višjih volumskih pretokih zraka lahko sklepamo, da večji volumski pretok pomeni večje odvajanje toplote. Torej z višjim volumskim pretokom zraka dosežemo bolj turbulentno stanje ter s tem povečan odvod toplote.

Na osnovi rezultatov mehanskega preračuna lahko sklepamo, da bodo tri podpore celotne nosilne konstrukcije tekočega traku zagotavljale zadostno nosilnost tekočega traku, saj je vrednost dejanske napetosti $18,5 \text{ N/mm}^2$ manjša od vrednosti dopustne napetosti 75 N/mm^2 . Prav tako lahko sklepamo, da bosta dve podpori zagotovili zadostno nosilnost v območju nosilne konstrukcije ventilatorjev, kjer dejanska napetost $44,3 \text{ N/mm}^2$ znaša in je manjša od dopustne napetosti 75 N/mm^2 .

Hipoteza 1: Z izvedenimi numeričnimi simulacijami smo ugotovili, da se je hipoteza 1 pokazala kot pravilna. Rezultati simulacij so pokazali, da sta debelina filameta in masni pretok ekstruzije dovolj majhna, da bo zadostovalo le zračno hlajenje, brez pršenja vode za povečan odvzem toplote. Ugotovili smo, da je potreben zadosten volumski pretok zraka, ki zagotovi ustrezno hlajenje filameta.

Hipoteza 2: Rezultati izvedenih numeričnih simulacij so pokazali, da je hipoteza 2 napačna, in sicer pri hlajenju filameta največjo vlogo ne bo igral le prestop toplote. Glede na rezultate simulacije lahko rečemo, da ima poleg prestopa toplote velik vpliv tudi prenos toplote. To je lahko predvsem posledica nizke toplotne prevodnosti polimerov.

Opazili smo, da obstajajo možnosti izboljšav v primeru spremljanja dejanskih temperatur filameta na tekočem traku. Tako obstajajo še možnosti izvajanja raziskav s katerimi bi določili primerna tipala za spremljanje temperature filameta v zaključnem delu tekočega traku.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] R.J. Young, P.A. Lovell, Introduction to Polymers, CRC Press, New York, NY, 2011. <https://doi.org/10.1201/9781439894156>.
- [2] M.N. Subramanian, Introduction to Polymer Compounding: Raw materials (Vol 1), 2014. http://files.hanser.de/Files/Article/ARTK_LPR_9783446225695_0001.pdf.
- [3] U. Bruder, User's Guide to Plastic, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2015. <https://doi.org/10.3139/9781569905739>.
- [4] J. Goff, T. Whelan, D. DeLaney, The Dynisco extrusion processors handbook, 2nd editio, Dynisco, 2000.
- [5] C. Fritzon, N. Persson, Modelling and Control of an Extruder Cooling System, Lund University, 2021.
- [6] D. Goričanec, L. Črepinšek, Prenos tolote, Zapiski predavanj, Univerza v Mariboru. (2008).
- [7] C.C. (Jye) Wang, Material Properties of Plastics, in: Molding Simul. Theory Pract., 1st ed., Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2022: pp. 23–72. <https://doi.org/10.3139/9781569908853.002>.
- [8] A. J. Ghajar, Y. C. A.Cengel, Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Application, 5th ed., McGraw-Hill Education, New York, 2015.
- [9] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, The finite element method. Fifth edition (O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor), Bautechnik. 79 (2002) 122–123. <https://doi.org/10.1002/bate.200201090>.
- [10] P.G. Lafleur, B. Vergnes, Polymer Extrusion, Wiley, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118827123>.
- [11] J.K. Hale, J.P. LaSalle, Differential Equations: Linearity vs. Nonlinearity, SIAM Rev. 5 (1963) 249–272. <https://doi.org/10.1137/1005068>.
- [12] M. IZUMI, M. SONOHARA, Introduction to the Finite Element Method, Igaku Toshokan. 55 (2008) 211–211. <https://doi.org/10.7142/igakutoshokan.55.211>.
- [13] H. Karlsson & Sorensen, Abaqus / CAE User ' s Manual, ABAQUS/CAE User's Man. (2000). <https://www.3ds.com/support/hardware-and-software/simulia-system-information/abaqus-2021/>.
- [14] M. Cohen, Classical Mechanics: A Critical Introduction [Textbook], (2013) 356. <https://books.google.com/books?id=QbrmngEACAAJ&pgis=1>.
- [15] C. Lalanne, Basic Mechanics, in: Sinusoidal Vib., Wiley, 2009: pp. 31–83. <https://doi.org/10.1002/9780470611906.ch2>.
- [16] S. Škrabl, B. Macuh, Statika I, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2012. <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=46263>.
- [17] B. Kraut, Krautov strojniški priročnik, 17th ed., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2023.
- [18] S. Srpčič, Trdnost 1, Založba Univerze v Ljubljani (University of Ljubljana Press), 2023. <https://doi.org/10.15292/9789612971663>.

-
- [19] S. Srpčič, Trdnost II, Založba Univerze v Ljubljani (University of Ljubljana Press), 2023. <https://doi.org/10.15292/9789612971670>.
- [20] O. Hassager, Computational analysis of polymer processing, 1st ed., Ripple Road, Barking, Essex, England, 1984. [https://doi.org/10.1016/0377-0257\(84\)80021-x](https://doi.org/10.1016/0377-0257(84)80021-x).
- [21] D.O. Kazmer, Plastics Manufacturing Systems Engineering, in: Plast. Manuf. Syst. Eng., Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2009: pp. I–XVIII. <https://doi.org/10.3139/9783446430143.fm>.
- [22] R. Krishnan, Electric Motor Drives Modeling, Analysis, And Control, Prentice Hall International, New Jersey, 2001.
- [23] M. Kutz, Applied Plastics Engineering Handbook, 1st ed., Elsevier, 2017. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04118-4>.
- [24] M. Burke, Why and How to Control Fan Speed for Cooling Electronic Equipment, Pulse. 38–02 (2004) 1–4.
- [25] Autodesk Moldflow Adviser 2019, (2019).
- [26] M.H. Weik, modular system, in: Comput. Sci. Commun. Dict., Springer US, Boston, MA, 2000: pp. 1036–1036. https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6_11719.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Razvrstitev polimerov [1]	3
Slika 2: Enoplošni ekstruder [4]	4
Slika 3: Zgradba dvopolžnega ekstruderja [4]	6
Slika 4: Temperaturna odvisnost specifične toplote polimerov [7]	10
Slika 5: Toplotna prevodnost orientiranega in neorientiranega PMMA v odvisnosti od temperature [7]	11
Slika 6: Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti amorfni in delno kristaliničnih materialov [7]	11
Slika 7: Temperaturna odvisnost toplotne prevodnosti materialov z različnimi stopnjami kristaliničnosti [7]	12
Slika 8: Porazdelitev hitrosti pri laminarnem toku (a) in turbulentnem toku (b) [6]	15
Slika 9: Shema naravne konvekcije ob vodoravni cevi [6]	16
Slika 10: Shema toka tekočine pravokotno na cev [6]	16
Slika 11: Porazdelitev toplotne prestopnosti (Nu) ob površini cevi [6]	16
Slika 12: Različni končni elementi linearne ali kvadratnega reda [13]	19
Slika 13: Primer odprto zračnega vodenja temperature [21]	26
Slika 14: Primer sheme zaprto zračnega vodenja [21]	26
Slika 15: Idejna risba tekočega traku	29
Slika 16: Način prenosa toplote	30
Slika 17: Toplotna prevodnost PA 66 v odvisnosti od temperature [25]	31
Slika 18: Specifična toplota PA 66 v odvisnosti od temperature [25]	31
Slika 19: Mreža, pozicija volumskega pretoka zraka in odprtini	32
Slika 20: Obremenitev in podpora nosilne konstrukcije ventilatorjev	33
Slika 21: Obremenitve in podpore nosilne konstrukcije tekočega traku	33
Slika 22: Sile na nosilec v prvem delu nosilca	34
Slika 23: Sile na nosilec v drugem delu nosilca	35
Slika 24: Navidezno prerezan nosilec ventilatorjev	36
Slika 25: CAD konstrukcija tekočega traku	56
Slika 26: Temperatura filameta v odvisnosti od časa hlajenja z zračnim pretokom 50 m ³ /h	57
Slika 27: Temperaturna porazdelitev na vzdolžnem prerezu filameta v prvi simulaciji po 50 s	58
Slika 28: Zračni tlak v prvi simulaciji po 50 s	58
Slika 29: Prostorska porazdelitev temperature zraka v prvi simulaciji po času 50 s ..	59
Slika 30: Temperatura filameta v odvisnosti od časa hlajenja druge simulacije	60
Slika 31: Temperaturna porazdelitev na vzdolžnem prerezu filameta v drugi simulaciji po 50 s	61
Slika 32: Zračni tlak v drugi simulaciji po 50 s	61
Slika 33: Prostorska porazdelitev temperature zraka v drugi simulaciji po času 50 s ..	62
Slika 34: Temperatura filameta v odvisnosti od časa hlajenja za zračni volumski pretok 150 m ³ /h	63

Slika 35: Temperaturna porazdelitev na vzdolžnem prerezu filameta v tretji simulaciji po 50 s	64
Slika 36: Zračni tlak v tretji simulaciji po 50 s	64
Slika 37: Prostorska porazdelitev temperature zraka v tretji simulaciji po času 50 s ..	65
Slika 38: Primerjava porazdelitve temperature na vzdolžnem prerezu	66
Slika 39: NTM diagram nosilca ventilatorjev	67
Slika 40: NTM diagram prvega dela nosilca tekočega traku	67
Slika 41: NTM diagram drugega dela nosilca tekočega traku	68
Slika 42: CAD konstrukcija tekočega traku z ventilatorji	69
Slika 43: Eksplozijska risba konstrukcije tekočega traku	69
Slika 44: Dejanska izvedba tekočega traku za ekstruzijo filameta z zračnim hlajenjem	70

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Zahteve in želje za izvedbo tekočega traku	29
Tabela 2: Nastavitve simulacije	30
Tabela 3: Robni pogoji	32
Tabela 4: Materialne lastnosti aluminija	40
Tabela 5: Geometrijske lastnosti nosilcev	40

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

T_m - temperatura tališča
 T_g - temperatura steklastega prehoda
 Φ - toplotni tok
 Q - toplota
 t - čas
 q - gostota toplotnega toka
 A - ploščina površine
 T_f - temperatura tečenja
 c_p - specifična toplota
 m - masa
 T - temperatura
 C - toplotna kapaciteta
 T_{melt} - temperatura taline
 T_{final} - končna temperatura polimera
 λ - toplotna prevodnost
 ν - specifična prostornina
 V - volumen
 ρ - gostota
 a - toplotna difuzivnost
 λ - toplotna prevodnost
 x - dolžina v smer toplotnega toka
 Re - Reynoldsovo število
 ν - hitrost tekočine
 D_h - hidravlični premer
 η - kinematična viskoznost
 ν - dinamična viskoznost
 T_s - temperatura površine stene
 T_{fl} - temperatura tekočine
 δ - debelina mejnega sloja
 α - toplotna prestopnost
 Nu - Nusseltovo število
 L - karakteristična dolžina površine oz. ekvivalentni premer vodnika cevi
 θ - kot ločitve
 F_R - rezultanta sil
 F_i - sila v osi i
 M - moment sile
 r - pravokotna razdalja
 F - sila
 M_i - moment sile v smeri i
 F_x - sila v smeri osi x
 F_N - osna sila
 F_y - sila v smeri osi y

F_T - prečna sila

M_x - moment v smeri osi x

M - upogibni moment

σ - napetost

ε - deformacija

ΔL - sprememba dolžine

L - prvotna dolžina

E - modul elastičnosti

I - vztrajnostni moment prereza

y - razdalja od osi x do težišča prereza

W - odpornostni moment prereza

e - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi

σ_{dop} - dopustna napetost

σ_k - kritična napetost

v - varnostni količnik

$+\sigma_{maks}$ - največja natezna napetost

e_1 - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi v natezno obremenjenem delu

$-\sigma_{maks}$ - največja tlačna napetost

e_2 - najbolj oddaljena točka od nevtralne osi v tlačno obremenjenem delu

σ_{maks} - največja napetost

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

CFD - računalniška dinamika tekočin (angl. computational fluid dynamics)

NTM - normalna sile, tangencialna sile in moment (angl. normal force, tangencial force and moment)

CAD - računalniško podprto načrtovanje (angl. computer aided design)

PWM - pulzno širinska modulacija (angl. pulse width modulation)

MKE - metoda končnih elementov

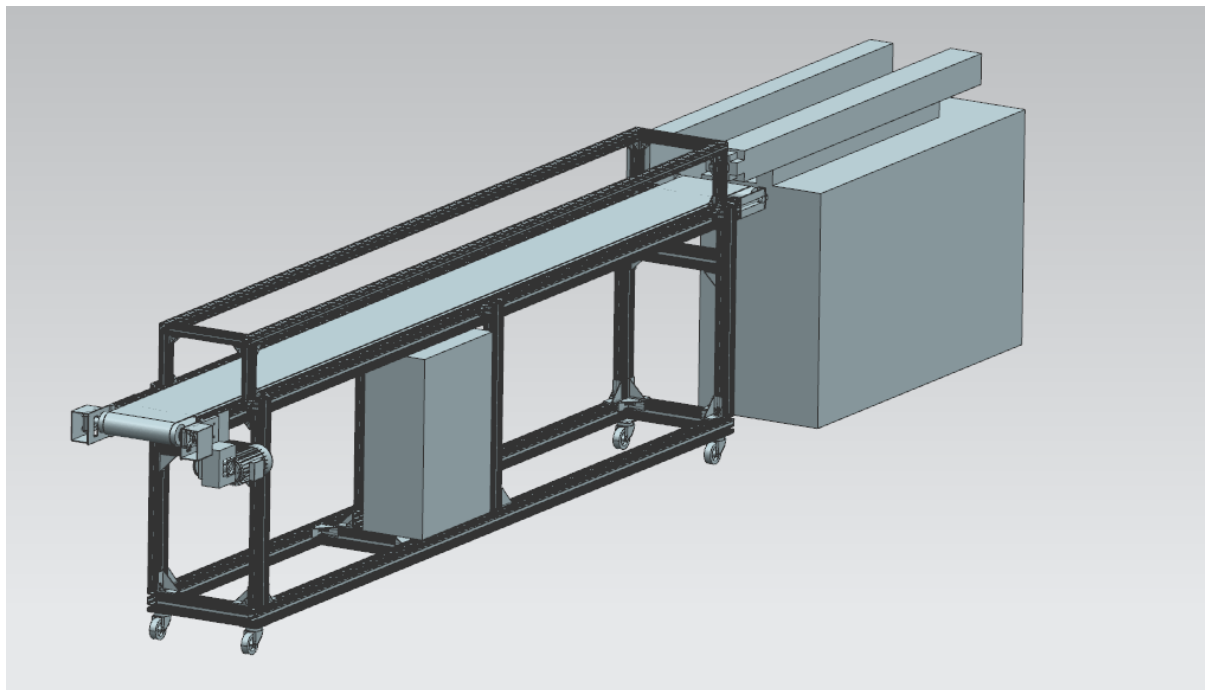
PMMA - polimetilmetakrilat

PA66 - poliamid 66

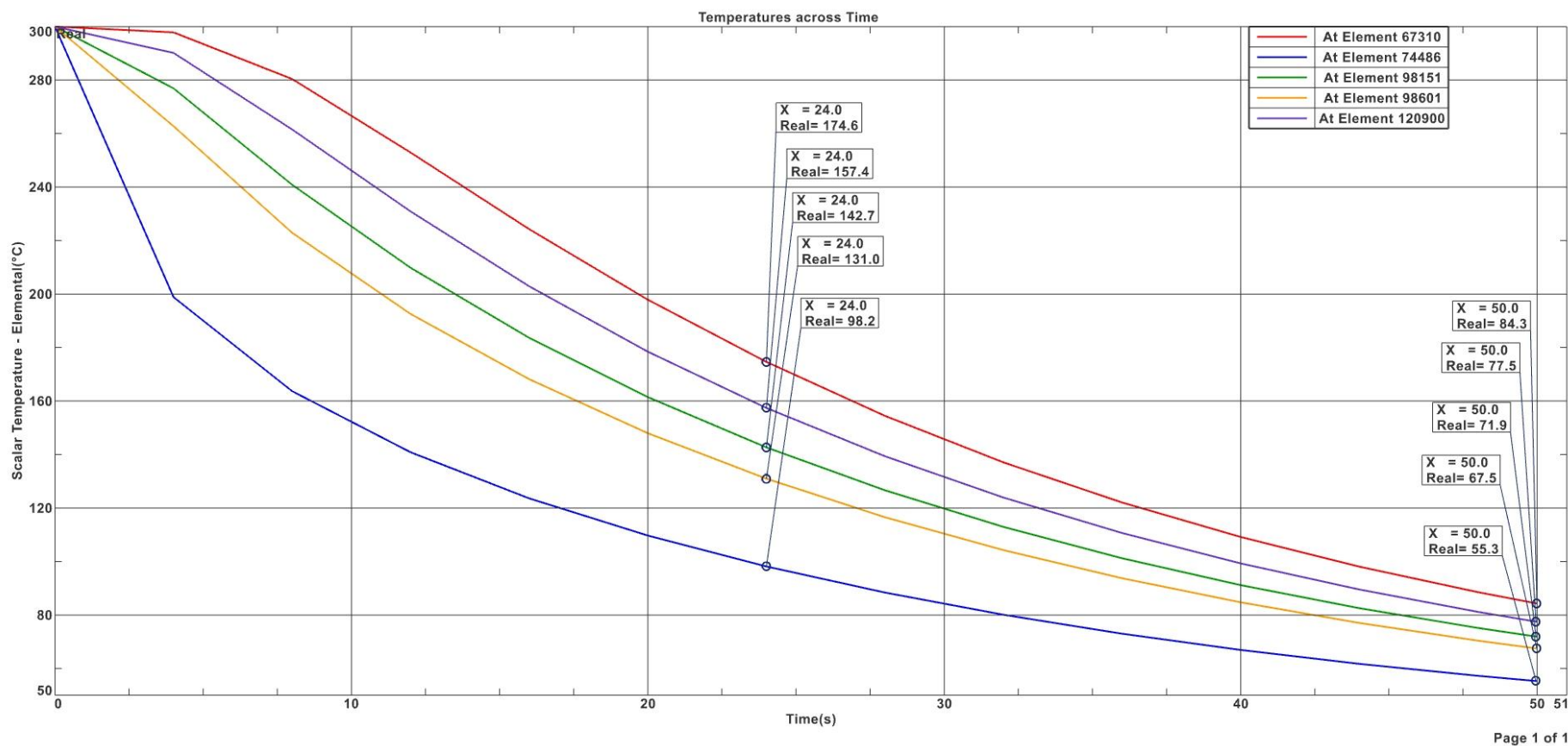
KE - končni element

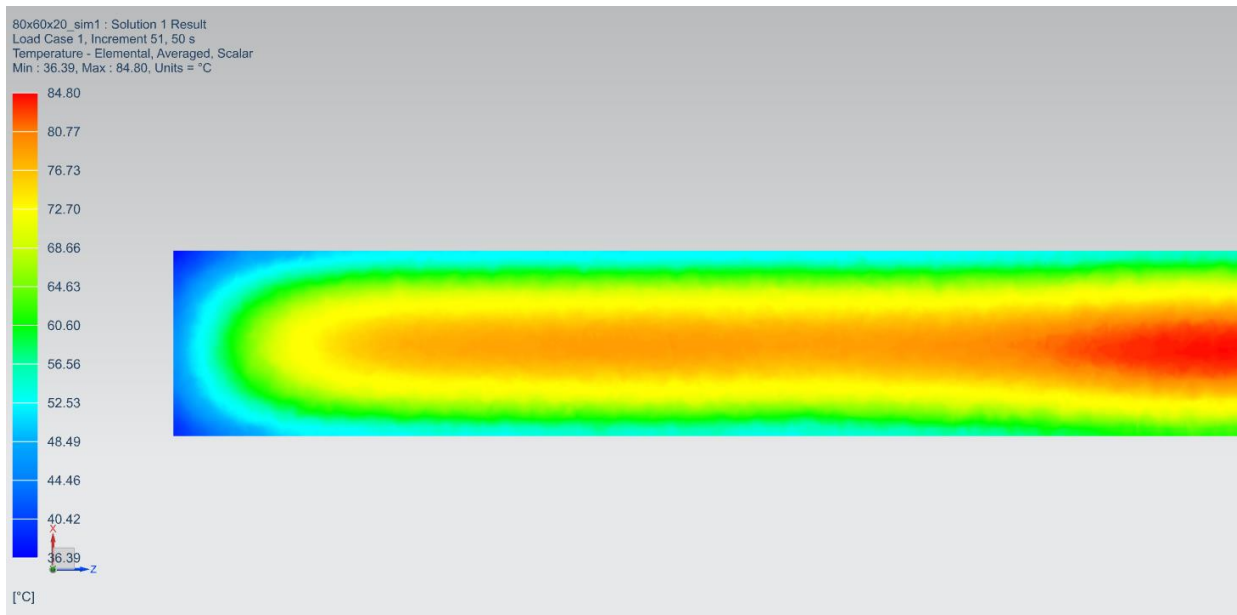
PRILOGE

Priloga 1: CAD konstrukcija tekočega traku

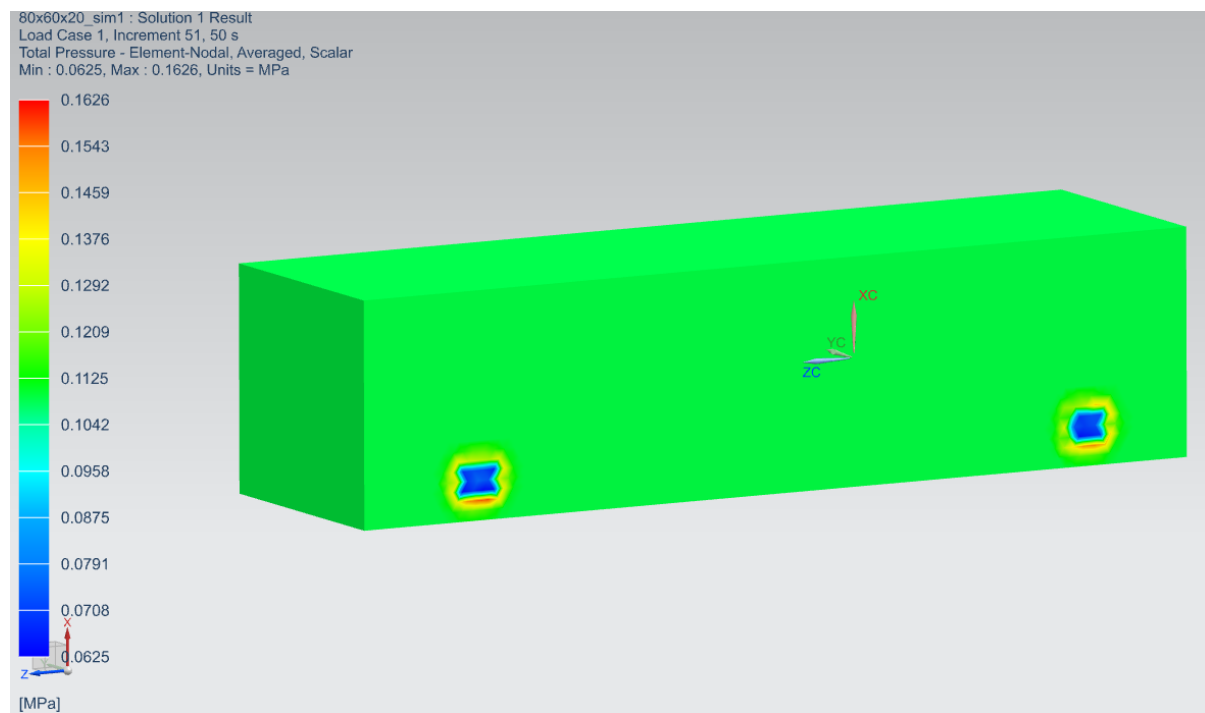


Slika 25: CAD konstrukcija tekočega traku

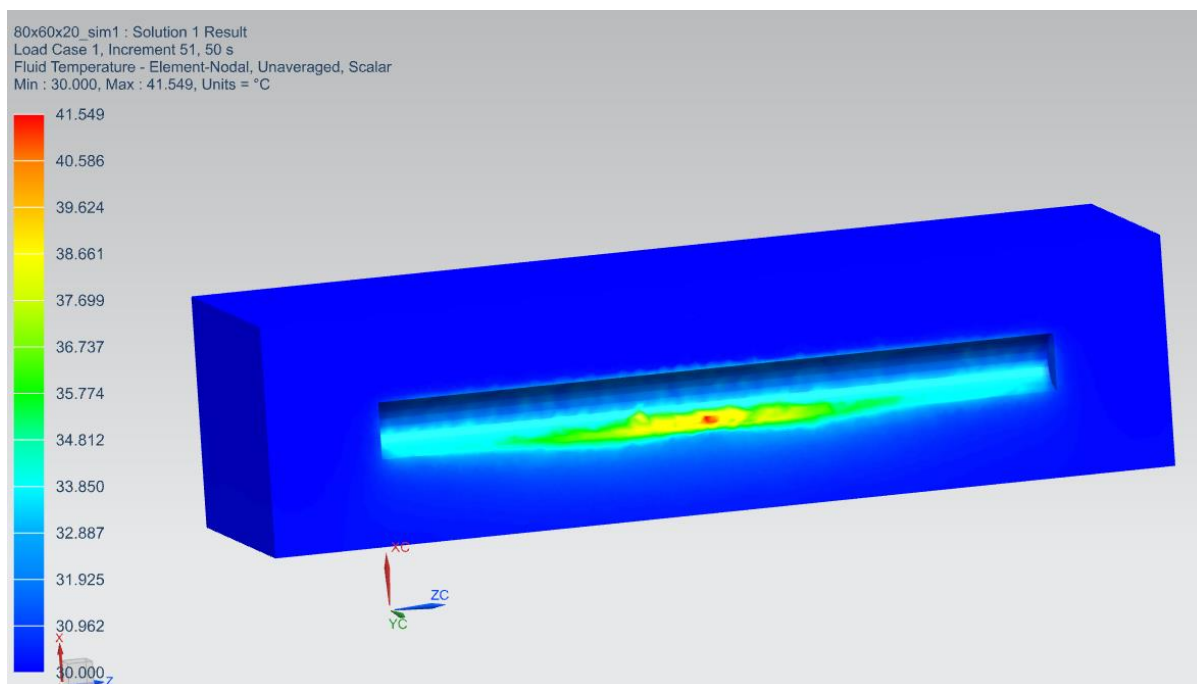
Priloga 2: Podatki prve simulacije z zračnim volumskim pretokom 50 m³/hSlika 26: Temperatura filameta v odvisnosti od časa hlajenja z zračnim pretokom 50 m³/h



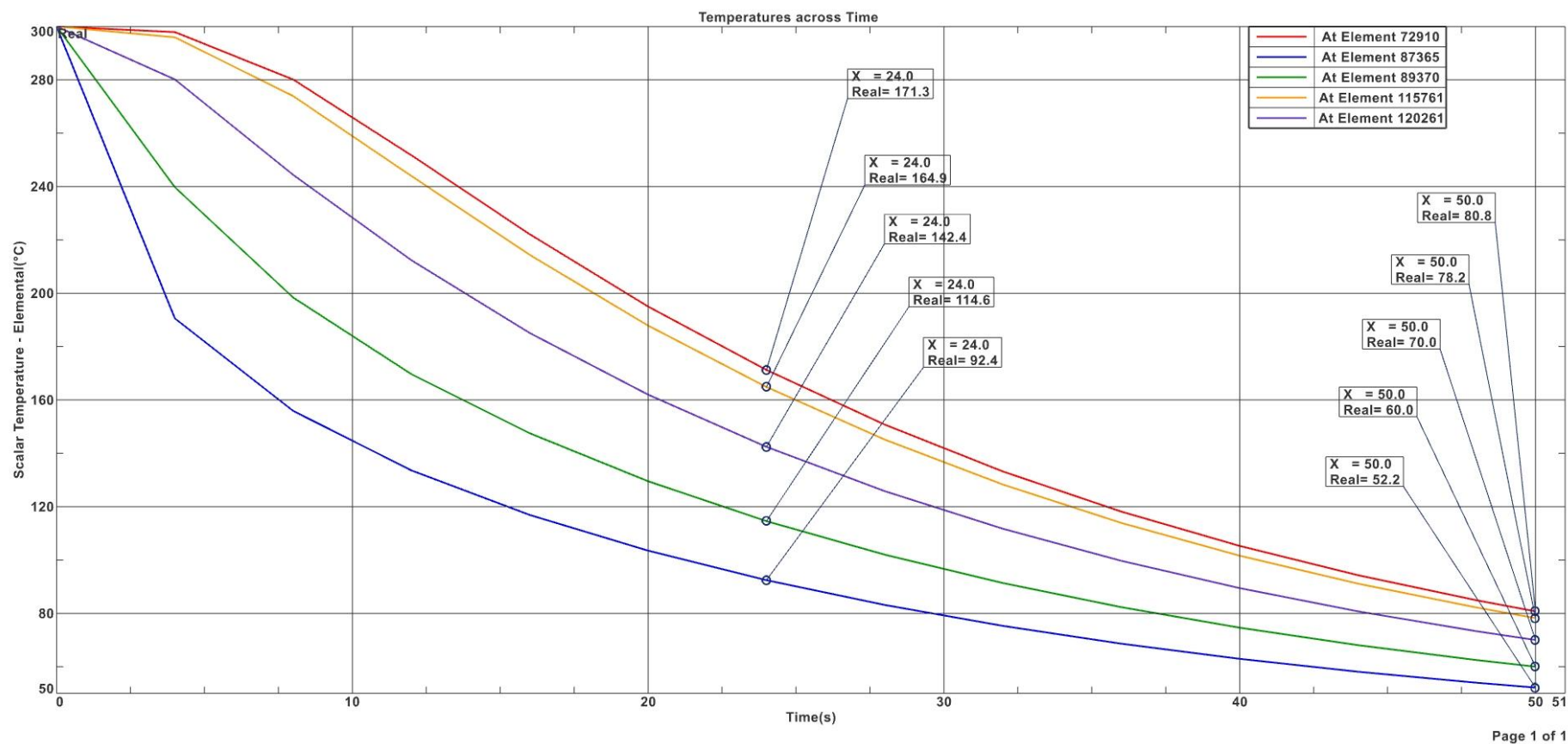
Slika 27: Temperaturna porazdelitev na vzdolžnem prerezu filamenta v prvi simulaciji po 50 s



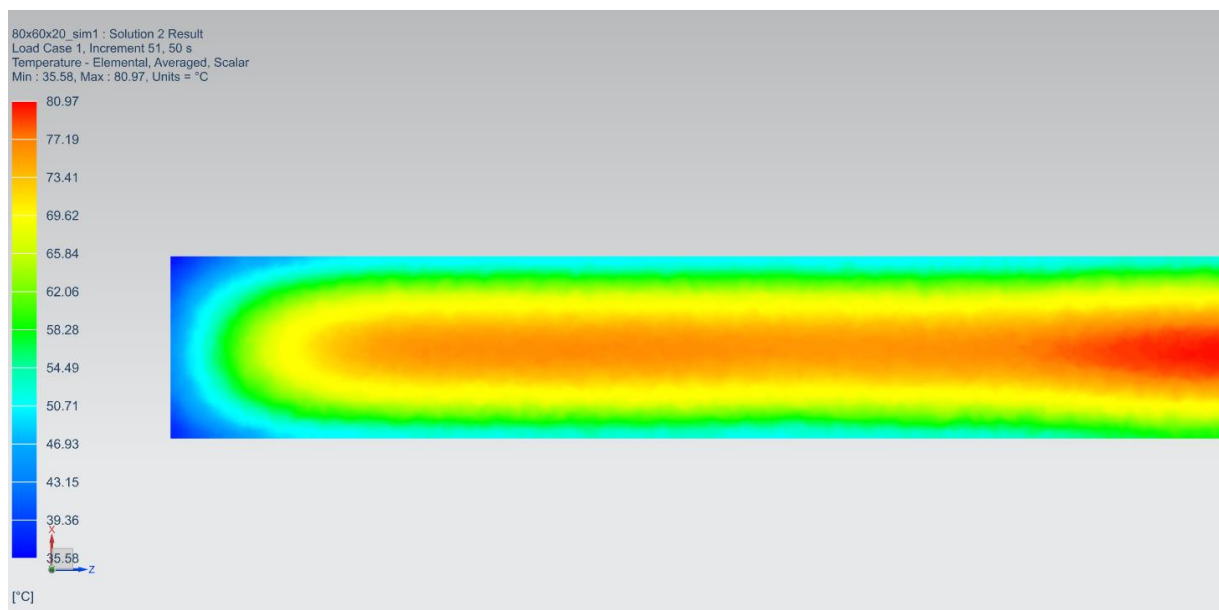
Slika 28: Zračni tlak v prvi simulaciji po 50 s



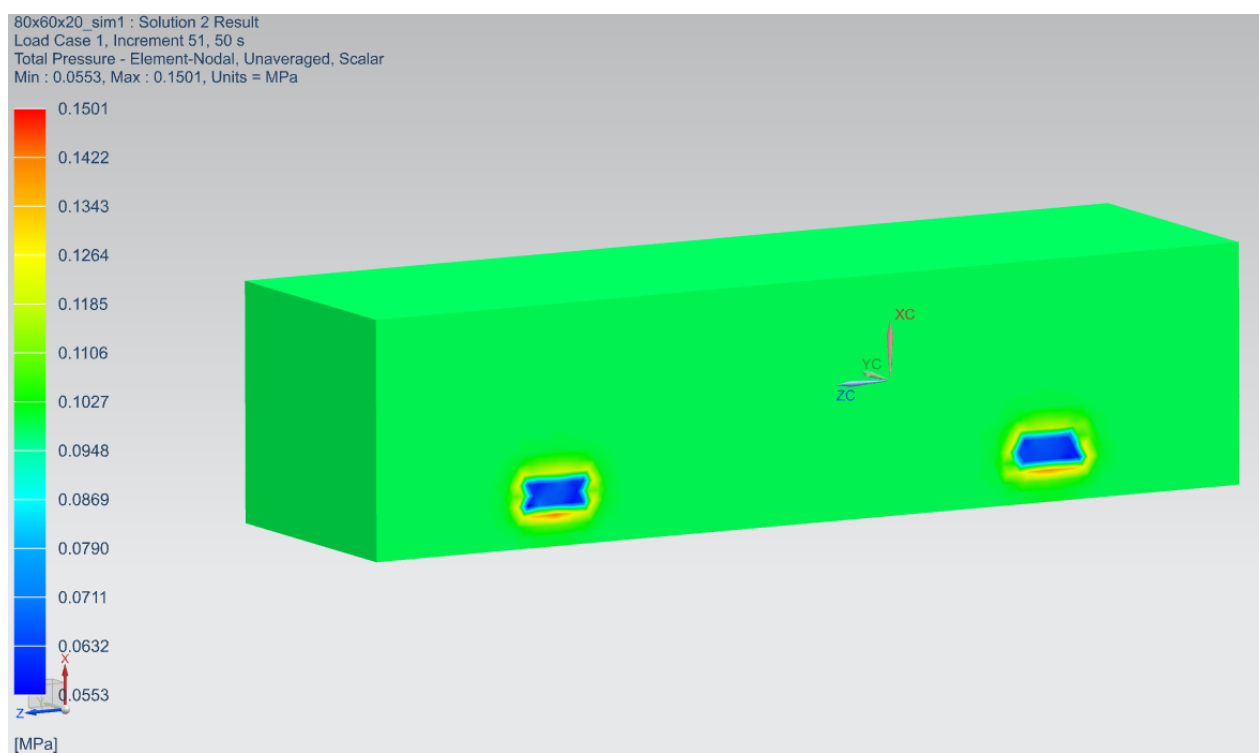
Slika 29: Prostorska porazdelitev temperature zraka v prvi simulaciji po času 50 s

Priloga 3: Podatki druge simulacije z zračnim volumskim pretokom $75 \text{ m}^3/\text{h}$ 

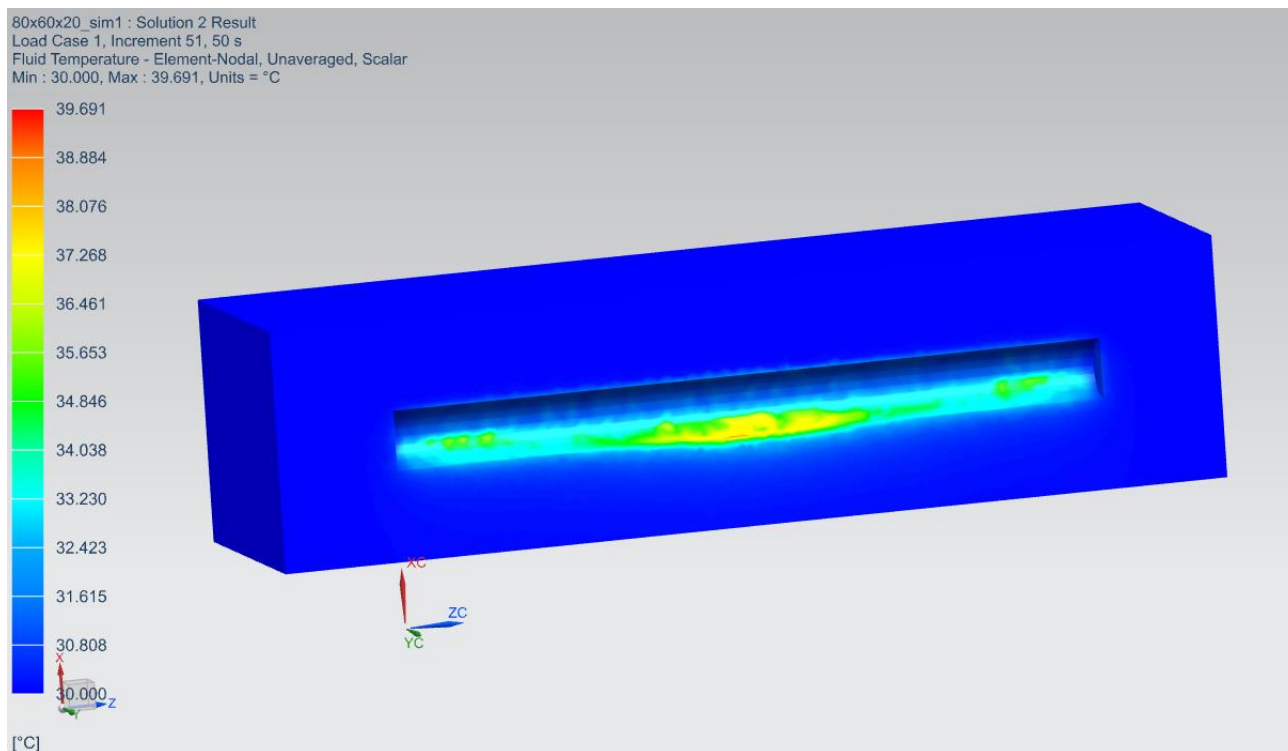
Slika 30: Temperatura filameta v odvisnosti od časa hlajenja druge simulacije



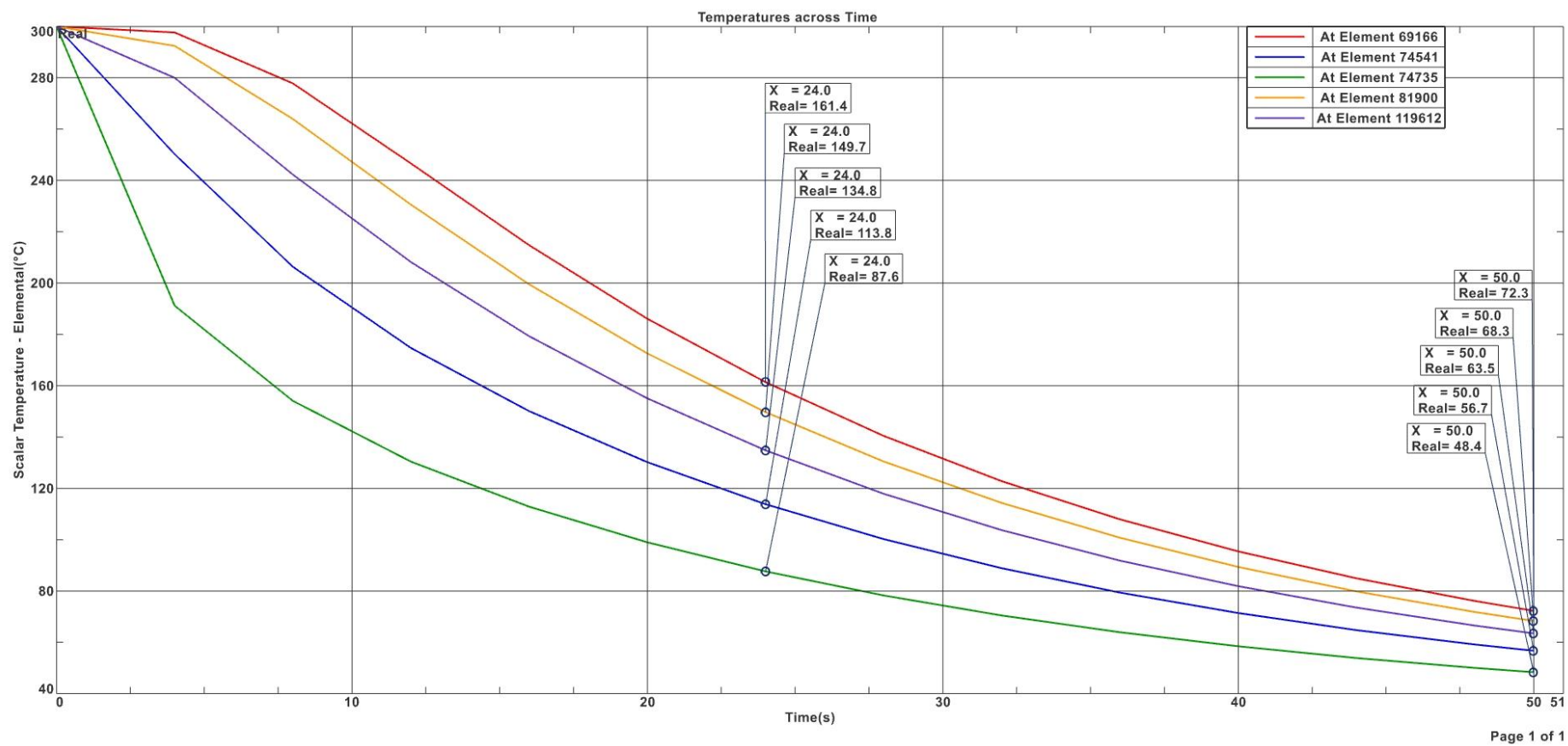
Slika 31 Temperaturna porazdelitev na vzdolžnem prerezu filameta v drugi simulaciji po 50 s

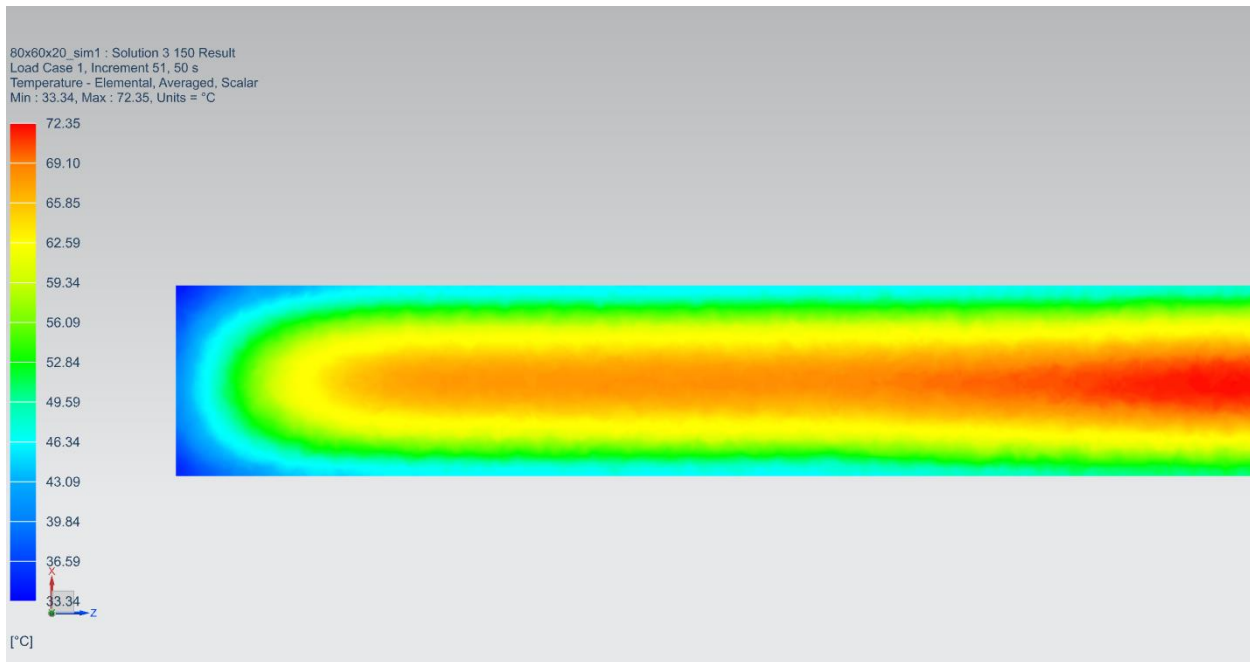


Slika 32: Zračni tlak v drugi simulaciji po 50 s

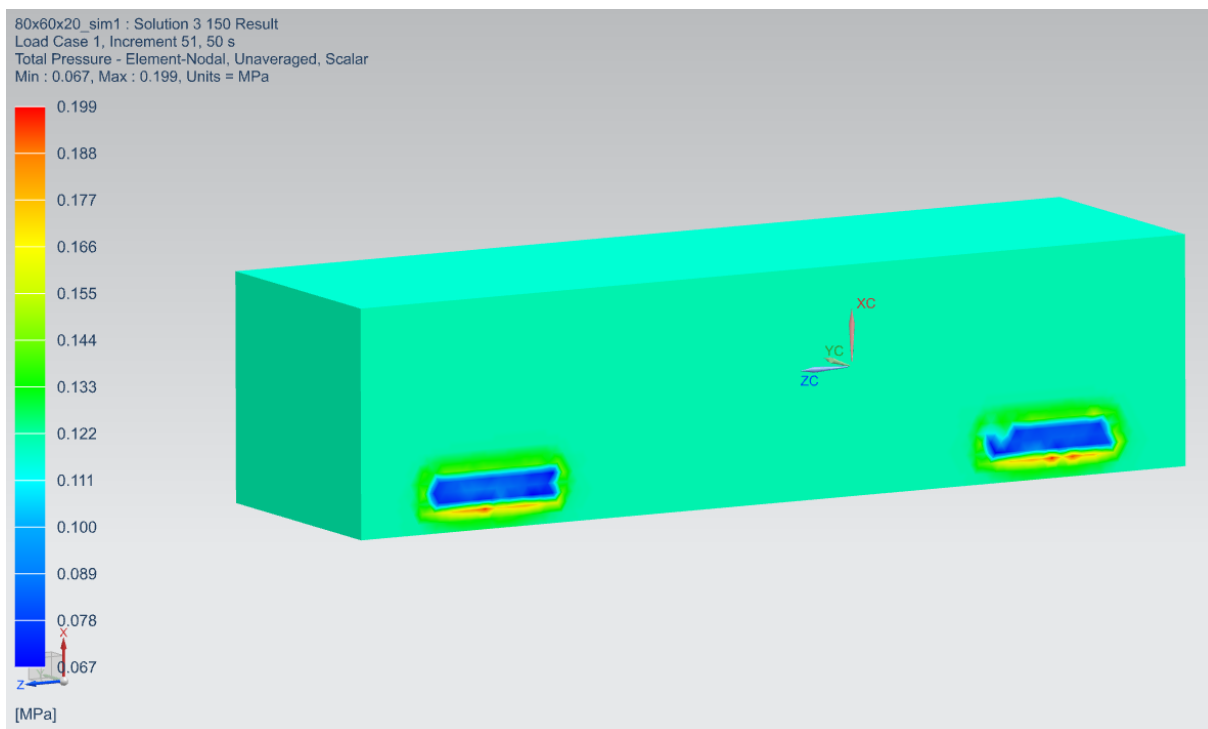


Slika 33: Prostorska porazdelitev temperature zraka v drugi simulaciji po času 50 s

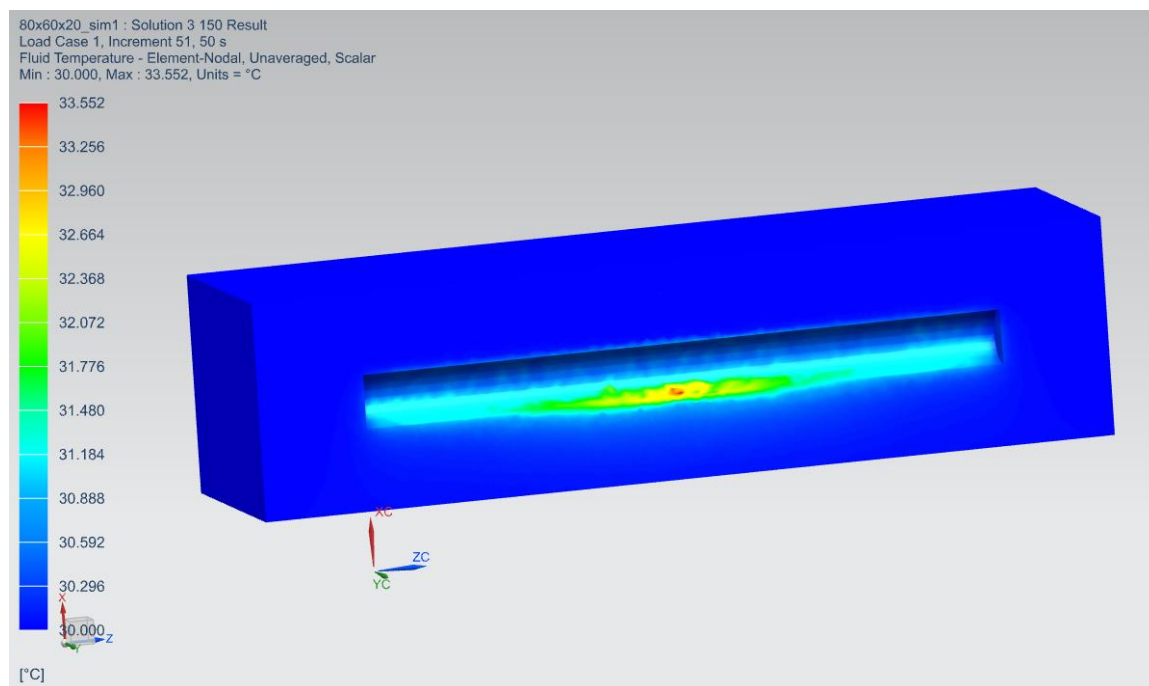
Priloga 4: Podatki tretje simulacije z zračnim volumskim pretokom $150 \text{ m}^3/\text{h}$ Slika 34: Temperatura filamenta v odvisnosti od časa hlajenja za zračni volumski pretok $150 \text{ m}^3/\text{h}$



Slika 35: Temperaturna porazdelitev na vzdolžnem prerezu filamenta v tretji simulaciji po 50 s

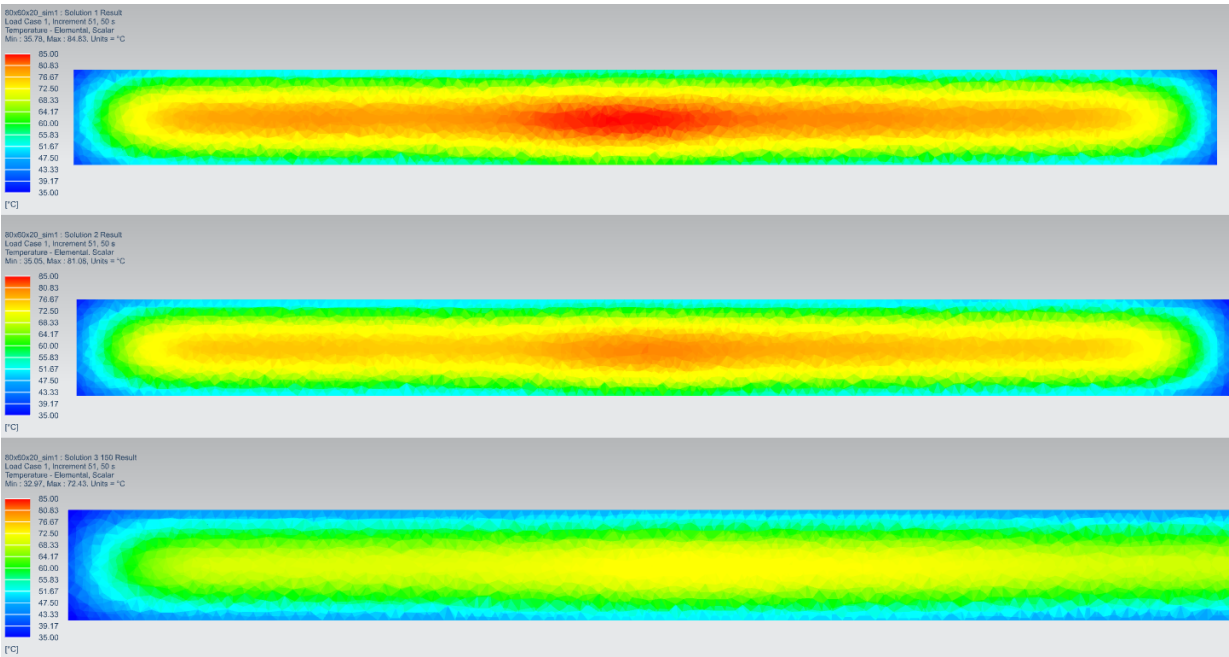


Slika 36: Zračni tlak v tretji simulaciji po 50 s

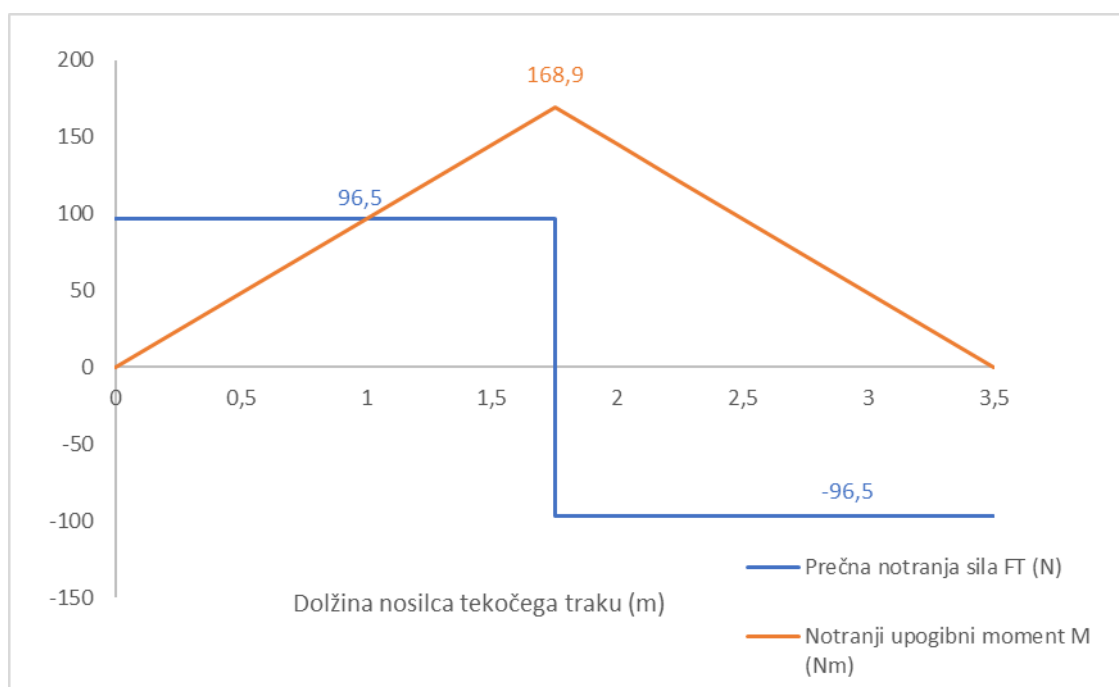
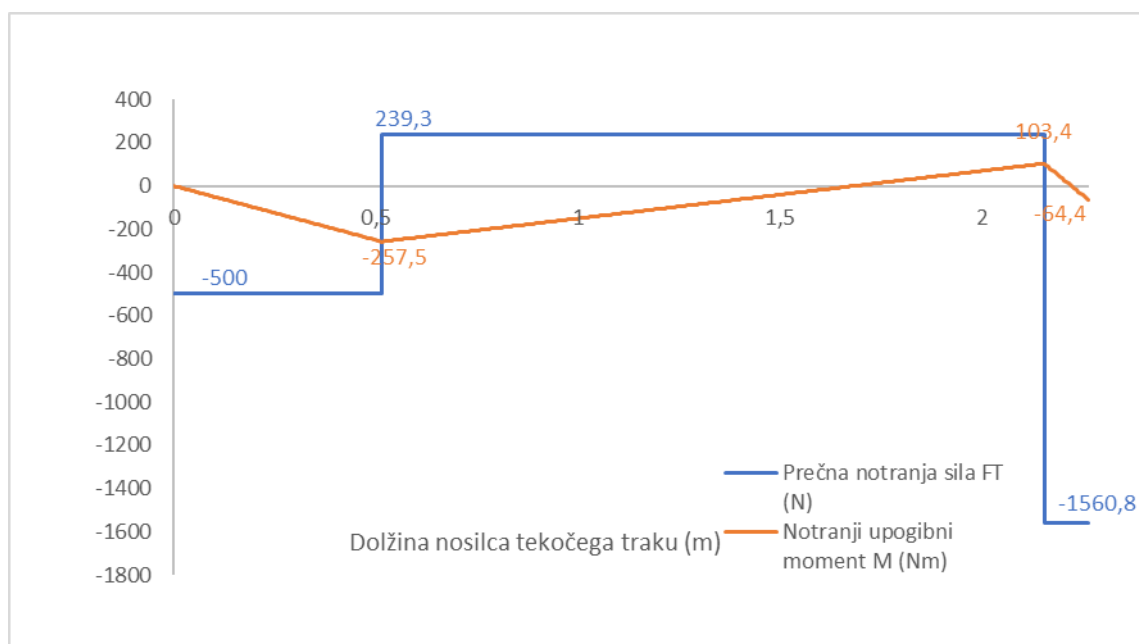


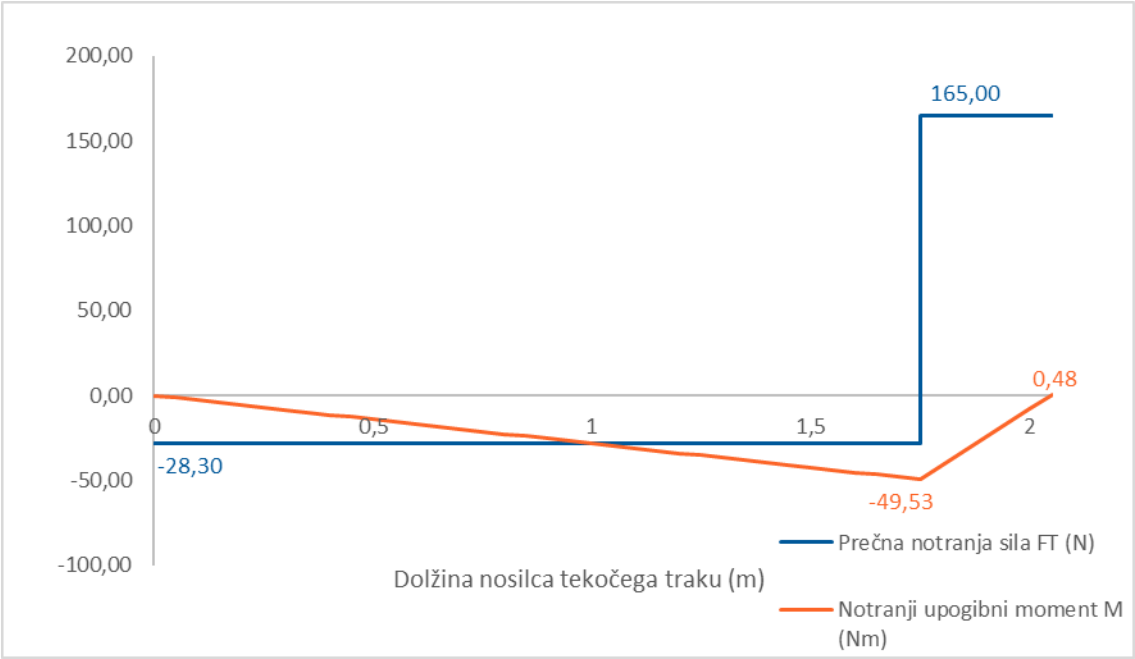
Slika 37: Prostorska porazdelitev temperature zraka v tretji simulaciji po času 50 s

Priloga 5:Primerjava izvedenih simulacij

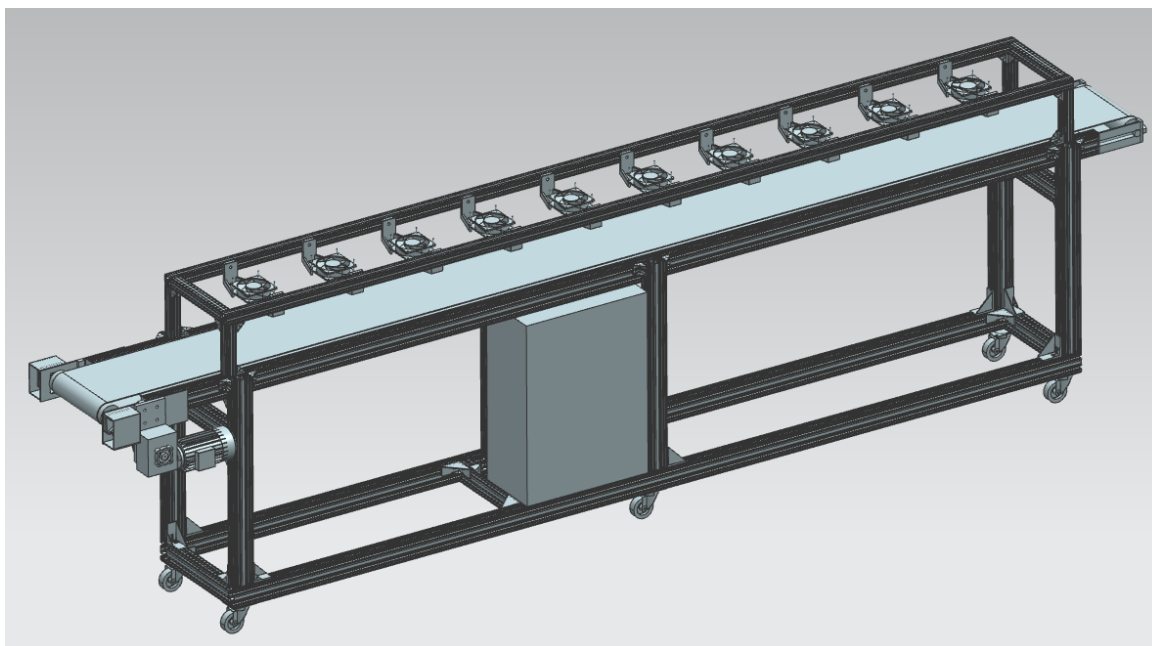


Slika 38: Primerjava porazdelitve temperature na vzdolžnem prerezu

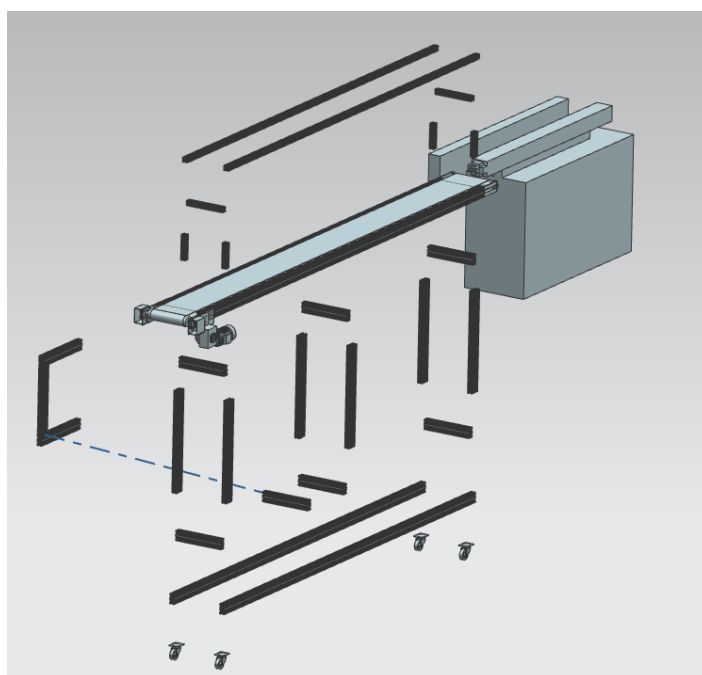
Priloga 6: Rezultati mehanskega preračuna*Slika 39: NTM diagram nosilca ventilatorjev**Slika 40: NTM diagram prvega dela nosilca tekočega traku*



Slika 41: NTM diagram drugega dela nosilca tekočega traku

Priloga 7:Konstruiranje tekočega traku

Slika 42: CAD konstrukcija tekočega traku z ventilatorji



Slika 43: Eksplozijska risba konstrukcije tekočega traku



Slika 44: Dejanska izvedba tekočega traku za ekstruzijo filamenta z zračnim hlajenjem