

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Timej VENGUŠT

**OPTIMIZACIJA BRIZGANJA PLASTIČNEGA  
IZDELKA Z UPORABO NUMERIČNIH  
SIMULACIJ**

Magistrsko delo

Slovenj Gradec, junij 2025

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

# OPTIMIZACIJA BRIZGANJA PLASTIČNEGA IZDELKA Z UPORABO NUMERIČNIH SIMULACIJ

Magistrsko delo

Študent: Timej VENGUŠT  
Študijski program: Tehnologija polimerov  
Mentor: izr. prof. dr. Blaž NARDIN  
Somentor: viš. pred. mag. Andrej GLOJEK

Slovenj Gradec, junij 2025

## IZJAVA

Podpisani Timej Vengušt izjavljam, da:

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

Slovenj Gradec, \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč in nasvete pri pisanju magistrskega dela se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Blažu Nardinu in somentorju viš. pred. mag. Andreju Glojeku.

Zahvaljujem se podjetju BSH Hišni aparati d. o. o. Nazarje za ponujeno priložnost in izvedbo magistrskega dela v podjetju.

Hvala vsem mojim, ki ste me podpirali pri dokončanju magistrskega dela.

## **SUMMARY**

### **Optimization of Injection Molded Plastic Part Using Numerical Simulation**

The competitiveness of manufacturing companies is crucial for success in the market. Companies strive to increase efficiency, reduce costs, and increase product quality to remain competitive in their industry. To achieve these results, it is necessary to implement certain improvements in the company's processes. Improvements lead to the realization of an increase in quality, competitiveness, and, last but not least, profit. The master's thesis presents the optimization of injection molding plastic parts using Moldflow numerical simulation. All experimental work was carried out at the company BSH Hišni aparati d.o.o. Nazarje. Using numerical simulations, we investigated all the potential for shortening the cycle time of an injection molded product in serial production. Using the Autodesk Moldflow program, we created a simulation model. The simulation model contained part, injection system, cooling, tool inserts and tool. Using the serial production parameters, we created a simulated serial state. Results obtained served as a basis for comparison in further optimization of parameters. Simulation of serial state showed some hot spots areas where ejection temperature was not reached. In serial production hot spots were not causing problems with material sticking and deformation. Hot spots were also detected in thermograms recorded with a thermal camera during the analysis of the serial state. In order to achieve a shorter cycle time, we wanted to recreate same hot spot state and maintain the dimensional suitability of product by changing the parameters and tool tempering method. We came to the conclusion that existing serial injection molding process can shorten injection time and cooling time. Reducing cooling time can be achieved by changing tool temperature and connection of tool tempering circuits. A comparison of serial and optimized state showed that we maintained same hot spot state. Results of the optimized state were taken into production, where we produced samples of new product state and recorded new thermograms of hot spots. A comparison of thermograms showed that we maintained same hot spot state by changing tool temperature and connection of tool tempering circuits. Measurements comparison showed that we improved product's dimensional accuracy. By introducing a shorter cycle time into production, we created a beneficial effect in savings and released machine capacities.

#### **Keywords:**

Plastic material injection molding, product cycle time optimization, Moldflow numerical simulation, thermography, savings.

---

4.6	Kapaciteta stroja	53
4.7	Prihranek	53
<b>5</b>	<b>SKLEP</b>	<b>54</b>
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	56
	SEZNAM SLIK	59
	SEZNAM TABEL	61
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	62
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	63

## 1 UVOD

Rast uporabe in razvoj plastičnih komponent v gospodinskih aparatih, elektronskih napravah, avtomobilskih ter letalskih delih sta potrošnje polimernih materialov dvignili na povsem novo raven. Glavni dejavniki, ki pripomorejo k povečanju uporabe polimernih talin, so možnost visoke masovne proizvodnje, oblikovna stabilnost izdelkov, velika sposobnost preoblikovanja in dobre površinske lastnosti izdelkov. Najbolj uporabljena tehnika predelave je brizganje polimernih materialov, ki omogoča hitro masovno proizvodnjo izdelkov. Dandanes obstaja vedno večja težnja po tem, da so izdelki tanjši, lažji in proizvedeni s čim nižjimi stroški dela. Za ohranitev oziroma dvig konkurenčnosti podjetij v panogi proizvodnje polimernih materialov je čas cikla najbolj pomemben dejavnik, ki pripomore k doseganju cenejše proizvodnje izdelkov [1].

Znižanje časa cikla v veliki meri pomeni znižanje proizvodnje cene in dvig produktivnosti. Kljub temu znižanje časa cikla ne pomeni vedno enostavne naloge. Ob zniževanju lahko hitro naletimo na kar nekaj težav. V želji, da izdelke proizvedemo v krajšem času, jih odvezemamo iz orodij pri visoki temperaturi, kar lahko privede do napak na izdelku. Obstaja kar nekaj načinov, s katerimi prispevamo h krajšemu času cikla izdelka. Glavni vpliv na čas cikla izdelka imajo spremembe dizajna izdelka, hlajenja, procesnih parametrov in drugih tehnoloških časov. Marsikatere od naštetih sprememb je potrebno koncipirati že v snovanju izdelka, da bi lahko v popolnosti izkoristili njihov potencial [1].

Hlajenje v procesu brizganja lahko predstavlja tudi do 60 % celotnega časa cikla. Iskanje načinov, kako skrajšati čas hlajenja izdelka, je precej težaven proces. Pri določevanju časa hlajenja dostikrat sledimo izkušnjam, ki smo jih pridobili ob testiranjih in napakah. Hlajenje orodja ima vpliv na dimenzije, kakovost površin in čas cikla izdelka, zato velja za pomembnejši dejavnik pri proizvodnji visokokakovostnih izdelkov za razumljivo ceno. Da bi si olajšali iskanje idealnih parametrov, si pomagamo s številnimi programskimi orodji, kot so simulacije, ki z uporabo metode končnih elementov dobro opišejo in predvidevajo, kaj se bo zgodilo v procesu izdelave izdelka [2].

Primer programske opreme, ki nam to omogoča, je Autodesk Moldflow, s katero je mogoče predvidevati nekaj ključnih dejavnikov proizvodnje, ki kasneje krojijo čas cikla izdelka. Avtor v članku omenja uporabo simulacije Moldflow kot orodje, s katerim lahko preverimo procesne parametre in omejitve, ki jih predstavljata material ter izdelek. Z več ponovitvami je avtor prišel do optimiziranega stanja časov hlajenja, brizganja in naknadnega tlaka. S procesnimi parametri, ki jih je podprla simulacija brizganja glede izvedljivosti, so skrajšali čas cikla 35 s na 24 s. Omenja, da se je izvajanje simulacij za optimizacijo procesa brizganja izkazalo za zelo stroškovno učinkovit način. Rezultate analiz so prenesli in potrdili z brizganjem na stroju. Prav tako omenjajo, da je orodje Moldflow odlična pomoč za inženirje pri preventivni in korektivni analizi procesa. Z njim lahko izboljšamo proces in kvaliteto izdelka [3].

V člankih o optimizaciji časa cikla avtorji govorijo o tem, kako pomembno vlogo imajo pri hlajenju izdelka hladilni kanali. Ti namreč poskrbijo za odvod toplote iz izdelka. Izdelek je potrebno ohlajati enakomerno, da ne pride do prevelikih temperaturnih razlik. Razlika nastane, ko so nekatera mesta orodja bolj ali manj temperirana kot druga. Cilj je vedno doseči enakomerno porazdelitev temperature orodja skozi celotno orodje. V kolikor slednje ni možno moramo zagotoviti, da bo temperaturna razlika mest na orodju minimalna. Temperaturne razlike v izdelku povzročajo neenakomerno zvijanje. Pomembne so oblika in velikost hladilnih kanalov ter njihova oddaljenost od sten izdelka. Pri obliki hladilnih kanalov je govora predvsem o zamenjavi konvencionalno izdelanih hladilnih kanalov s konformnimi hladilnimi kanali. Oddaljenost hladilnih kanalov od sten izdelka mora biti čim manjša, saj lahko tako dosežemo dober prenos toplote. Deformacije, ki jih povzročijo temperaturne razlike temperiranja orodja, je mogoče odpraviti s spremembami načina hlajenja, povečanja hladilnih kanalov, povečanja pretoka in temperaturo temperiranja [3,4].

### **1.1 Namen dela**

V magistrskem delu bomo pod drobnogled vzeli izdelek z nazivom Okvir levi FAEM IV in proces serijske proizvodnje, saj smo mnenja, da vsi potenciali za optimizacijo procesa še niso bili doseženi. S spremembami hlajenja in procesnih parametrov bi lahko dosegli hitrejši čas cikla izdelka. Ob doseganju hitrejšega časa cikla pa bi lahko ohranili dimenzijsko stabilnost, estetiko in mehansko ustreznost izdelka.

### **1.2 Hipotezi dela**

Postavili smo dve hipotezi.

Hipoteza 1 – S spremembo načina hlajenja in optimizacijo parametrov brizganega izdelka lahko skrajšamo čas cikla od 10 do 20 %.

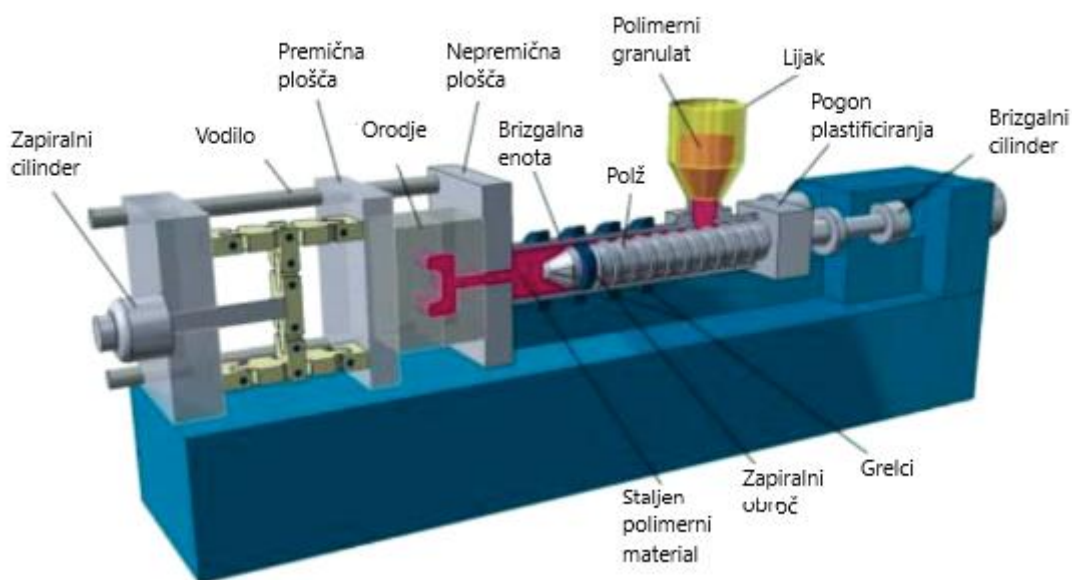
Hipoteza 2 – Z optimizacijo procesnih parametrov lahko ohranimo mersko ustreznost izdelka in pripomoremo h krajšemu času cikla izdelka.

## 2 TEORETIČNI DEL

### 2.1 Proces brizganja izdelka

Brizganje polimernih materialov je ena izmed najpogosteje uporabljenih metod za proizvodnjo plastičnih izdelkov. Gre za postopek, pri katerem se staljen polimerni material vbrizga v orodje, kjer se ohladi in strdi v končni izdelek. Ta metoda omogoča izdelavo kompleksnih oblik z visoko natančnostjo in ponovljivostjo, kar je ključnega pomena za množično proizvodnjo [6].

Za izvedbo procesa brizganja se potrebuje brizgalni stroj, orodje in druge periferne naprave. Stroj za brizganje polimernih materialov je sestavljen iz brizgalne enote, zapiralne enote, krmilne enote in agregata. Stroji so lahko hidravlični, električni in hibridni. Zapiralna enota omogoča, da orodje ostane zaprto ob vbrizgu polimernega materiala v orodje. Zapiralno silo lahko dosežem s kolenskim zgibom ali hidravličnim zaklepom. Na sliki 1 je prikaz glavnih sestavnih delov stroja [5].



Slika 1: Sestavni deli brizgalnega stroja [6]

Za proizvodnjo izdelkov potrebujemo orodje kot kovinsko orodje, ki izdelku da obliko. V večini primerov so izdelana iz jekla in so lahko bolj ali manj kompleksna. Več o načinih izvedb orodja je napisano v poglavju 2.2 [6].

Poleg stroja in orodja so v procesu brizganja potrebne še druge periferne naprave, kot so sušilni sistemi, temperirne naprave, transportni trak in robot. Sušilni sistemi poskrbijo za pravilno pripravo polimernega materiala za nemoteno delovanje procesa. Določeni materiali nase vežejo vodo, ki jo je pred predelavo potrebno odstraniti iz granul polimernega materiala. V nasprotnem primeru lahko med predelavo naletimo na težave [6].

Pri pravilni rabi polimernih materialov je potrebno orodja temperirati na predpisano temperaturo. Proizvajalec polimernega materiala poda temperaturno območje, znotraj katerega bi se moralo temperirati orodje. Za doseganje temperature se uporablja temperirne naprave, ki medij segrevajo. Večinoma se kot medij uporablja voda ali olje [6].

Za avtomatsko delovanje stroja in orodja v procesu brizganja najdemo tudi robote, transportne trakove in prijemala. Prijemala so kot roke, ki so nameščena na robota, s katerim skupaj odvzameta izdelek iz orodja. Izdelek se nato odloži na transportni trak, kjer po traku potuje do delovnega mesta delavca, ki izdelek nato preveri in zloži v namensko embalažo [6].

### 2.1.1 Koraki procesa brizganja

Proces brizganja je razdeljen na tri korake. V prvem koraku brizganja se v lijak brizgalne enote stroja nasujejo granule polimernega materiala, kjer jih polž brizgalne enote s pomočjo vrtenja in sile trenja stali do temperature tališča [1].

V drugem je s pomočjo pomika polža brez rotacije polimerna talina vbrizvana v orodno votlino. Pri tem se tvori visok tlak, ki je potreben za zapolnitev orodne votline. Kot protiutež visokemu tlaku deluje zapiralna sila orodja, ki skrbi, da se orodje med fazo vbrizgavanja ne odpre [1].

V tretjem koraku naknadnega tlaka je potrebno v orodno votlino dovajati določeno vrednost tlaka za doseg optimalne teže izdelka in kompenzacijo skrčka izdelka zunaj orodne votline. V tem koraku poteka tudi ohlajanje izdelka v orodni votlini. Polimerna talina, ki je formirana v obliko izdelka, se mora ohladiti do temperature izmetavanja iz orodne votline [1].

Vse te faze so podvržene različnim dejavnikom, kot so karakteristike materiala, procesni parametri stroja, konstrukcija orodja, strojni pogoji in končni kakovosti izdelka. Od vseh treh faz je časovno najdaljša faza ohlajanja, saj se mora polimerna talina v orodju ohladiti do temperature, ki je primerna za izmetavanje. Orodje se v praksi v največji meri ohlaja z vodo, ki potuje skozi vodne kanale v orodju. Pri tem prihaja do toplotne izmenjave med orodnim jeklom in vodo. Toplota, ki jo je orodno jeklo sprejelo med brizganjem polimernega taline, je delno oddana toku vode skozi vodne kanale. Za temperiranje orodij z vodo se v največji meri uporablja temperirne naprave ali večje toplotne izmenjevalce. Ko je dosežena temperatura izmetavanja izdelka, se orodje na stroju odpre in izdelek se lahko izvrže s pomočjo izmetalnega paketa orodja ali odvzame z robotom. Orodje se nato zopet zapre in celoten proces se ponovi [1].

Ena od glavnih prednosti brizganja polimernih materialov je njegova sposobnost izdelave zelo kompleksnih in natančnih oblik. To omogoča izdelavo izdelkov z zelo finimi detajli in natančnimi dimenzijami, kar je pogosto zahtevano v industrijah, kot so avtomobilska, medicinska, elektronska in potrošniška industrija. Poleg tega brizganje

polimernih materialov omogoča uporabo različnih vrst materialov, kar omogoča prilagodljivost glede na zahteve končnega izdelka. Brizganje ima tudi nekatere omejitve. Orodja pred izdelavo predstavljajo večji začetni strošek. Kljub temu je brizganje najbolj ekonomsko učinkovito in primerno za proizvodnjo veliko serijskih izdelkov. Poleg tega je proces brizganja omejen z velikostjo in obliko izdelka, saj mora biti orodje dovolj majhno, da se prilega brizgalnemu stroju. Oblika izdelka mora biti takšna, da je dosežena možnost izdelave orodja [7].

### 2.1.2 Uporabnost procesa brizganja

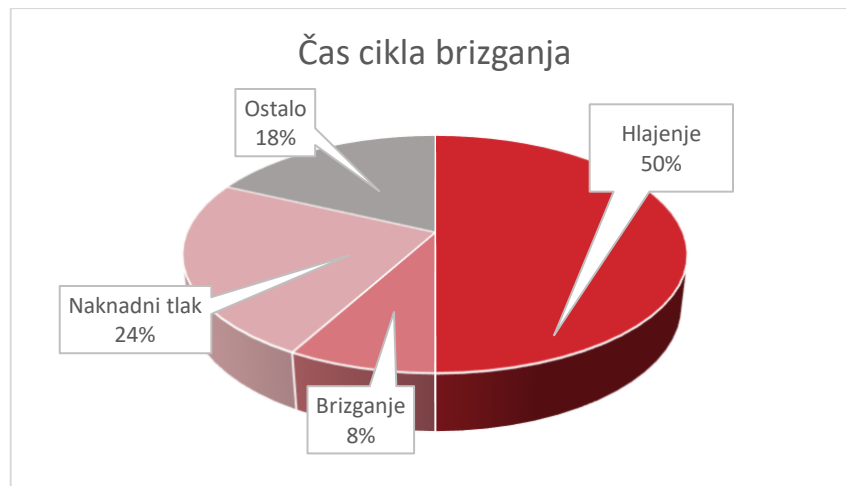
Kljub tem omejitvam je brizganje polimernih materialov izjemno priljubljeno zaradi svoje učinkovitosti, natančnosti in sposobnosti izdelave kompleksnih oblik. Tehnološki napredek je omogočil razvoj novih vrst polimernih materialov in izboljšanje procesov brizganja, kar še naprej širi možnosti in uporabo te metode. Na primer, dodajanje vlaken ali drugih materialov lahko izboljša mehanske lastnosti, kar je še posebej pomembno za industrijske aplikacije [1, 7].

Poleg tega se vse bolj uporablja tehnologija večkomponentnega brizganja, ki omogoča vbrizgavanje več vrst polimernih materialov v isto orodje. To omogoča izdelavo izdelkov z različnimi funkcijami v enem postopku, kar povečuje fleksibilnost in učinkovitost proizvodnje [1, 7].

V prihodnosti lahko pričakujemo nadaljnji razvoj tehnologij brizganja polimernih materialov, vključno z avtomatizacijo in digitalizacijo procesov, kar bo še povečalo natančnost, hitrost in prilagodljivost. Poleg tega bo vse večji poudarek na trajnosti in recikliranju polimernih materialov, kar bo spodbudilo razvoj novih materialov in procesov, ki bodo bolj okolju prijazni. Brizganje bo tako ostalo ključna tehnologija v proizvodnji polimernih izdelkov, saj omogoča visoko kakovost, natančnost in učinkovitost, ki so potrebne za sodobno industrijo [1, 7].

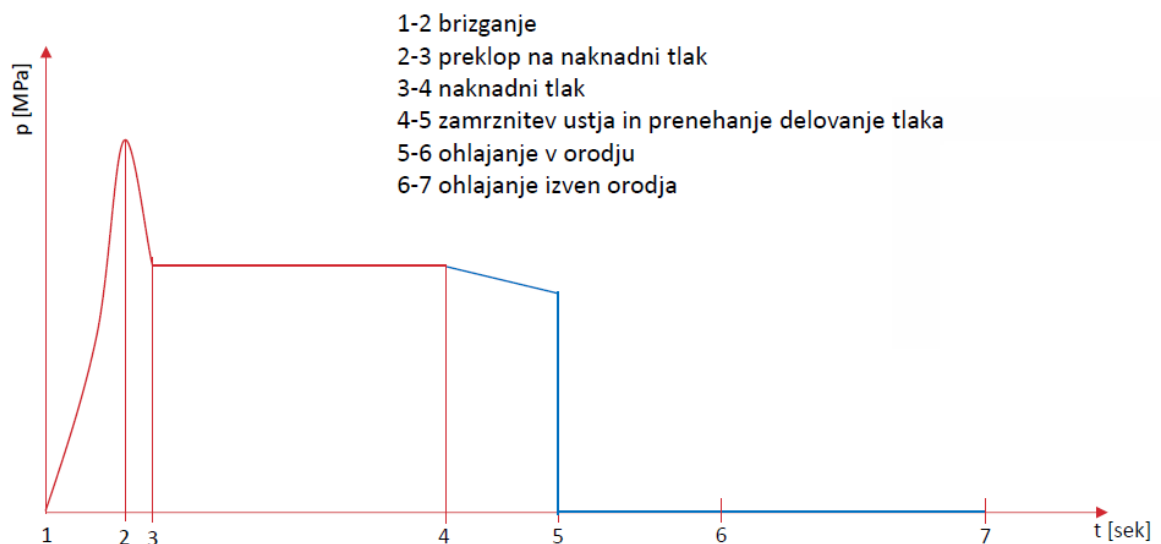
### 2.1.3 Čas cikla brizganja

V osnovi je čas cikla sestavljen iz časov brizganja, naknadnega tlaka, hlajenja in ostalih gibov (odpiranje orodja, zapiranje orodja, izmetavanje izdelka, pomik jeder, pomik šobe, odvzema izdelka). Slika 2 prikazuje razdelitev časa cikla brizganja glede na faze med procesom brizganja. Največji delež v celotnem ciklu predstavlja čas hlajenja. V veliko primerih je ta 50 % časa cikla. Naknadni tlak lahko predstavlja delež do 24 %. Čas brizganja predstavlja 8 % delež. 18 % preostalega časa pa predstavljajo ostali gibi orodja in odvzem izdelka iz orodja [8].



Slika 2: Grafični prikaz razdelitve časa cikla brizganja [8]

Na slika 3 je prikazan diagram odvisnosti tlaka v času pri procesu brizganja. Tlak v orodju se v času spreminja glede na določene faze procesa. Prva faza je vbrizg polimernega materiala v orodno votlino, pri čemer tlak hitro narašča in v drugi fazi preklopa na naknadni tlak doseže najvišjo vrednost. Nato se v tretji fazi tlak nekoliko zmanjša in doseže nastavljeno vrednost delovanja naknadnega tlaka. V četrti fazi pride do zamrznitve ustja in do točke, ko naknadni tlak na izdelek ne more več delovati. Sledi peta faza, kjer se izdelek ohlaja v orodni votlini do temperature izmetavanja. V šesti fazi se izdelek ohladi do sobne temperature zunaj orodja [5].



Slika 3: Diagram tlaka v času za proces brizganja [5]

#### 2.1.4 Procesni parametri

Procesni parametri so eden izmed ključnih dejavnikov pri zagotavljanju kakovosti procesa brizganja. Parametrov je veliko in vsak izmed njih velja za pomemben del procesa. Med procesom brizganja se lahko pojavi potreba po prilagajanju parametrov. Spremljanje in prilagajanje parametrov med procesom je ključno za doseganje optimalnih rezultatov. Spremembe parametrov se lahko nanašajo na temperaturo, tlak, hitrost brizganja ali čas hlajenja, odvisno od specifičnih potreb in zahtev izdelka. Prilagajanje parametrov lahko vključuje tudi optimizacijo geometrije orodja ali spremembo materiala [9].

Temperatura taline je temperatura, pri kateri polimerni material postane staljen ravno prav za brizganje v orodje. Temperatura mora biti kontrolirana za zagotavljanje enakomernega tečenja in zapolnjevanja orodja. Nepravilna nastavitve temperature taline lahko vodi v napake na površini izdelka, nezadostne trdnosti izdelka in prekomerne valovitosti [9].

Temperatura orodja je temperatura, s katero je temperirano orodje. Ima velik vpliv na proces hlajenja in na končne lastnosti izdelka. Za vsak posamezen material proizvajalec predpiše temperaturno območje temperiranja. Temperatura orodja vpliva na čas hlajenja, dimenzijsko stabilnost in kakovost površin izdelka. Z dobro nastavitvijo temperature orodja lahko zagotovimo zmanjšamo napetosti in krčenje izdelka, kar vpliva na kakovosti in trajnost izdelka [9].

Tlak brizganja je tista gonilna sila, s katero je polimerna talina vbrizgana v orodje. Je ključnega pomena za proces brizganja. Tlak mora biti ravno prav velik, da talina lepo steče in zapolni orodno votlino. Za veliko večino materialov je tlak brizganja med 500 in 1500 bar. Ima prav tako vpliv kakovost površin in dimenzije izdelka [9].

Naknadni tlak je tlak, ki je vzpostavljen po tem, ko je bila polimerna talina vbrizgana v orodno votlino. Tlak je za 50-65 % nižje vrednosti kot brizgalni tlak in poskrbi za kompenzacijo skrčka v polimernem materialu med ohlajanjem. Naknadni tlak je ključnega pomena za preprečevanje vpadnih mest, ohranjanje stabilne mase in dimenzij izdelka [9].

Zapiralna sila je sila, ki skrbi, da orodje med vbrizgavanjem polimerna taline z visokim brizgalnim tlakom ostane zaprto. Zapiralna sila mora biti ravno prav nastavljena, da omogoča dihanje orodja in preprečuje nastanek prelitja izdelka. Zapiralna sila je odvisna od projekcijske površine izdelka in brizgalnega tlaka [9].

Hitrost brizganja je dinamičen parameter, s katerim določimo, s kakšno hitrostjo bo polimerna talina zapolnjevala orodno votlino. Hitrost brizganja zelo vpliva na kakovost izdelka. Pravilna hitrost brizganja omogoča enakomerno napolnjevanje orodne votline, kar zagotavlja kakovosten in homogen izdelek. Previsoka hitrost brizganja lahko

povzroči zračne mehurčke ali druge napake, medtem ko lahko prenizka hitrost povzroči nepopolno polnjenje orodne votline [9].

Vrtljaji polža in protitlak vplivata na optimalno pripravo materiala za brizganje, pri čemer se s pravilnimi nastavitvami izognemo zračnim vključkom in degradaciji v materialu. Protitlak poskrbi tudi za enakomerno pripravo materiala, porazdelitev barvil, polnil in drugih aditivov. Z vrtenjem polža dosežemo trenje med granulami polimernega materiala, zaradi česar se prične taliti. Izgubljeno toploto v polžu pa kompenziramo s temperaturo cilindra [9].

Čas hlajenja je čas, v katerem dosežemo, da polimerni material doseže temperaturo izmetavanja. Ima velik vpliv na dimenzijsko stabilnost in kakovost izdelka. Pravilno nastavljen čas hlajenja zagotavlja, da se polimerni material popolnoma strdi, kar omogoča enostavno odstranitev izdelka iz orodja. Prekratek časa hlajenja lahko povzroči deformacije ali napake v izdelku, medtem ko lahko predolg čas podaljša cikel brizganja. Čas hlajenja polimernega izdelka je definiran v enačbi 1. Odvisno je od debeline izdelka, temperature polimerne taline, temperature orodja, temperature izmetavanja izdelka in toplotne difuzivnosti materiala. S spremembo teh dejavnikov lahko vplivamo na dolžino hlajenja izdelka [9, 10, 11].

$$t_c = \frac{d^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left\{ \frac{4}{\pi} \left( \frac{T_t - T_o}{T_i - T_o} \right) \right\} \quad (1),$$

pri čemer je:

- $t_c$  - čas hlajenja (s),
- $d$  - debelina izdelka (mm),
- $\alpha$  - toplotna difuzivnost ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ),
- $T_t$  - temperatura taline ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $T_o$  - temperatura orodja ( $^{\circ}\text{C}$ ) in
- $T_i$  - temperatura izmetavanja ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Čas hlajenja je čas, ki je potreben za strjevanje polimernega materiala do te mere, da je primerno za izmetavanje iz orodne votline. Debelina izdelka predstavlja povprečno debelino izdelka po preseku. Toplotna difuzivnost je količnik med toplotno prevodnostjo in zmnožkom gostote ter specifično toplotno prevodnostjo materiala. Temperatura taline je temperatura, s katero je polimerni material vbrizgan v orodno votlino. Temperatura orodja je temperatura, s katero s pomočjo temperirnih naprav segrevamo orodje na predpisano temperaturo glede na zahteve materiala. Temperatura izmetavanja je temperatura polimernega materiala, pri kateri se material strdi in bi po proizvajalčevih navedbah lahko izmetavali izdelek iz orodne votline [11].

### 2.1.5 Možnosti za skrajšanje časa cikla

Proces brizganja velja za enega bolj kompleksnih. Znotraj njega se skriva ogromno dejavnikov, kot so izbira materiala, procesni parametri, geometrija izdelka, izvedba

orodja, karakteristike stroja, karakteristike temperirne naprave in zahteve izdelka. Vsak od teh dejavnikov vpliva na končni čas cikla izdelka.

Izbira materiala za izdelek je lahko ključnega pomena za krajši čas cikla izdelka. Materiali se razlikujejo po lastnostih, kot so hitrost ohlajanja, viskoznost in toplotna prevodnost. Sprva se te lastnosti mogoče ne razlikujejo veliko, vendar lahko bistveno pripomorejo pri želji po krajšem času cikla [12].

Nastavitev procesnih parametrov se je potrebno lotiti z dovoljšno mero znanstvenega pristopa. Predvsem je potrebno uporabiti vse možne načine za določitev najbolj ustreznih parametrov. Potrebno je analizirati vsak korak procesa brizganja, da bi lahko dosegli čim krajši čas cikla [12].

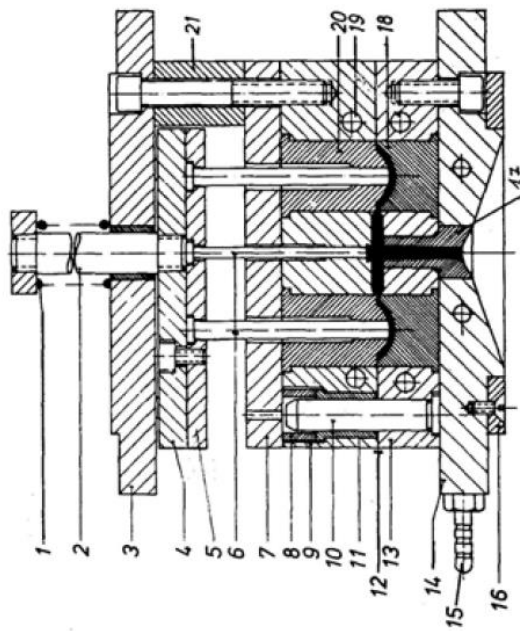
Geometrija izdelka in izvedba orodja sta zelo pomembna za določitev časa cikla. Pri geometriji izdelka je pomembno, da je izdelek izdelan z enakomernimi debelinami sten in ne predstavlja zapletene geometrije za izvedbo orodja. Če geometrija izdelka zahteva zapleteno konstrukcijo orodja zaradi stranskih pogonov in drugih funkcij, gre pričakovati, da bo slednje imelo vpliv na čas cikla. Prav tako je pri konstrukciji orodja pomembna postavitev hladilnih kanalov in razdalja le-teh do izdelka [12].

V veliko primerih s procesom pridemo do fizikalnih in drugih omejitev, ki onemogočajo izpopolnjenje procesa. Vedno lahko znotraj posameznih dejavnikov storimo več za doseganje krajših časov ciklov [12].

## **2.2 Orodje za brizganje polimernih materialov**

Orodje je mehatronski sistem, ki daje polimernemu izdelku obliko, strukturo in funkcijo [5]. Običajno je izdelano iz jekla ali aluminija. Sestavljeno iz brizgalne (nepremična) in izmetalne (premična) strani orodja. Ključni elementi orodja so orodna votlina, jedro, dolivni sistem, hladilni sistem in izmetalni sistem. Orodja za brizganje polimernih materialov so po navadi izdelana iz visokokakovostnega jekla, ki zagotavlja trdnost, natančnost in vzdržljivost v času življenjske dobe orodja. Slika 4 prikazuje sestavne dele orodja [13].

## SESTAVNI DELI ORODJA



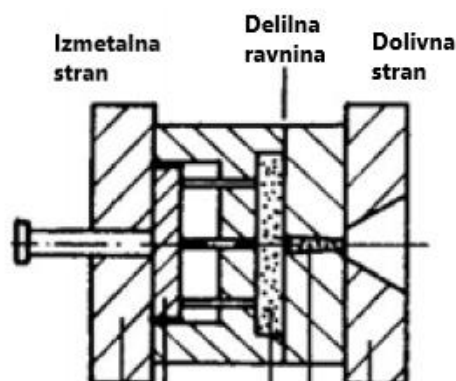
1. Tlačna vzmet
2. Izmetalni drog
3. Vpenjalna plošča– izmetalna stran
4. Izmetalna plošča
5. Vračalna plošča
6. Izmetač
7. Podložna plošča
8. Centrirna puša
9. Oblikovna plošča– izmetalna stran
10. Vodilni steber
11. Vodilna puša
12. Delilna ravnina
13. Oblikovna plošča – dolivna stran
14. Vpenjalna plošča – dolivna stran
15. Hladilni priključek
16. Centrirni obroč
17. Dolivna šoba
18. Oblikovni vložek – dolivna stran
19. Hladilni kanal
20. Oblikovni vložek– izmetalna stran
21. Distančna letev

Slika 4: Sestavni deli orodja [13]

## 2.2.1 Vrste orodij

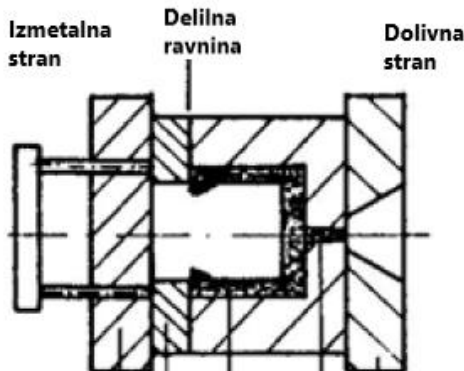
Poznamo več vrst orodij, ki se med sabo razlikujejo po tem, da omogočajo različne gibe, funkcije. Kompleksnost izdelka nam narekuje, kakšno vrsto orodja bo potrebno izbrati. Obstaja več vrst, kot so osnovno, s prisilnim snemanjem, s stranskimi pogoni, odvijalno orodje, z več delilnimi ravninami, toplokanalno, etažno in posebne izvedbe (dvo- ali več komponentno). Konstruktorji orodij venomer uporabljajo različne kombinacije zaradi velike kompleksnosti izdelkov in potrebe po čim lažji uporabi orodja [14].

Osnovno orodje (slika 5) je orodje, ki ima najbolj osnovne elemente. Sestavljeno je iz vpenjalnih plošč, gravurnega vložka, trna, izmetalnega paketa in podpornih plošč [13].



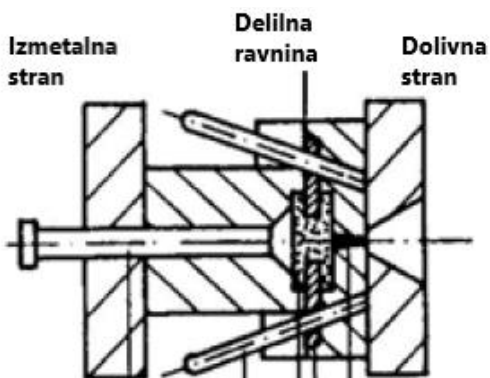
Slika 5: Osnovno orodje [13]

Orodje s prisilnim izmetavanjem (slika 6) je orodje, ki ima vgrajen mehanizem za prisilen izmet izdelka iz orodja. S tem mehanizmom si lahko pomagamo kadar je izdelek zahtevnejši zaradi svoje oblike in pričakujemo težave pri izmetavanju s klasičnimi izmetači [13].



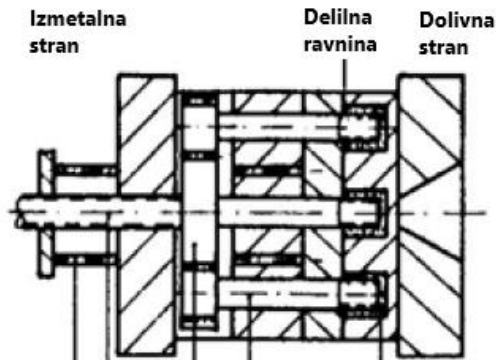
Slika 6: Orodje s prisilnim izmetavanjem [13]

Orodje s stranskimi pogoni (slika 7) je orodje, ki ima vgrajene stranska pomična jedra oziroma vložke. Stranski pogoni orodja so posebni sistemi, ki omogočajo prečne pomike drsniških elementov orodja z namenom sprostitve izdelka. Izdelki velikokrat vsebujejo preboje, utore, izbokline in druga previsna mesta, ki potrebujejo vrsto različnih izvedb stranskih pomikov. Poznamo drsniški stranski pogon, čeljustni stranski pogon, vpadna jedra, vzmetne in poševne snemalce. Stranski pogoni so lahko gnani mehansko z vodilnimi stebri, pnevmatsko s pnevmatskim cilindrom ali hidravlično s hidravličnim cilindrom [14].



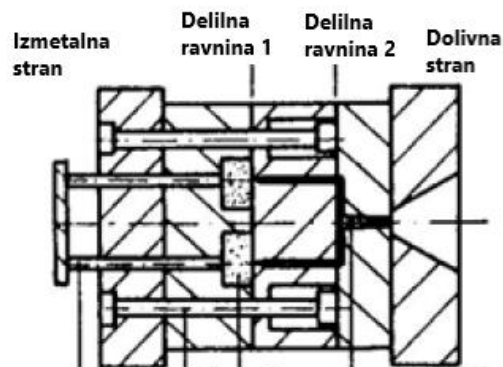
Slika 7: Orodje s stranskimi pogoni [13]

Odvijalno orodje (slika 8) je orodje, ki ima vgrajen mehanizem za odvijanje navojev iz izdelka pred izmetavanjem. S tem preprečimo poškodovanje navoja na izdelku, ki v veliko primerih za izdelek predstavlja glavno funkcijo. Za namen sprostitve vijavnic se uporabljajo sistemi odvijanja z navojnim vretenom, z matico vretena s pomočjo hidravličnega cilindra in pogoni z zobato letvijo. Obstajajo tudi primeri, ko je odvijanje vodeno s pomočjo pnevmatike, hidravlike ali servomotorja [14].



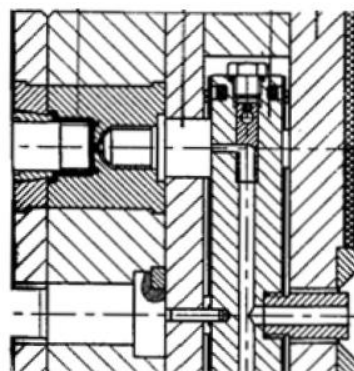
Slika 8: Odvijalno orodje [13]

Orodje z več delilnimi ravninami (slika 9) ima več srednjih plošč, ki omogočajo različne funkcije orodja. Uporablja se za mehansko sprostitvev zapletenejših oblik izdelka, ločeno izmetavanje doliva, mehansko delovanje stranskih jeder, odrez hladnega doliva in drugo [14].



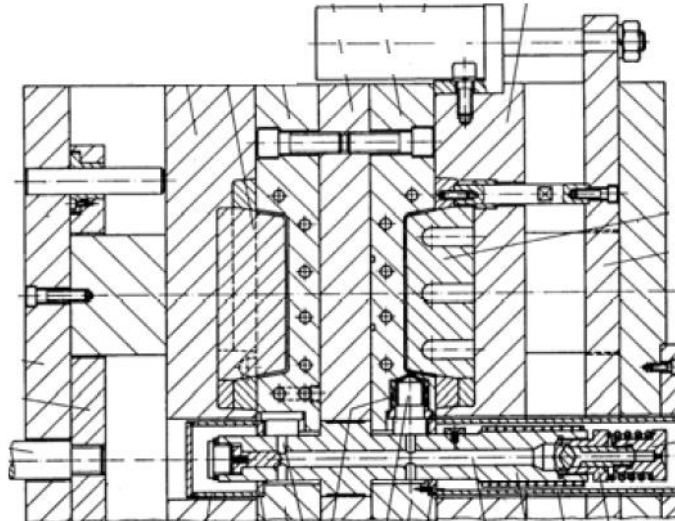
Slika 9: Orodje z več delilnimi ravninami [13]

Toplokanalno orodje (slika 10) je orodje, ki ima ogrevan sistem za dovajanje polimernega materiala. Sistem za dovajanje je obdan z električnimi grelci, ki skrbijo, da se material ne strdi. Toplokanalni sistem omogoča delovanje brez odpadnega materiala; ni potrebe po ohlajanju hladilnih dolivov, temperatura materiala je stabilna [14].



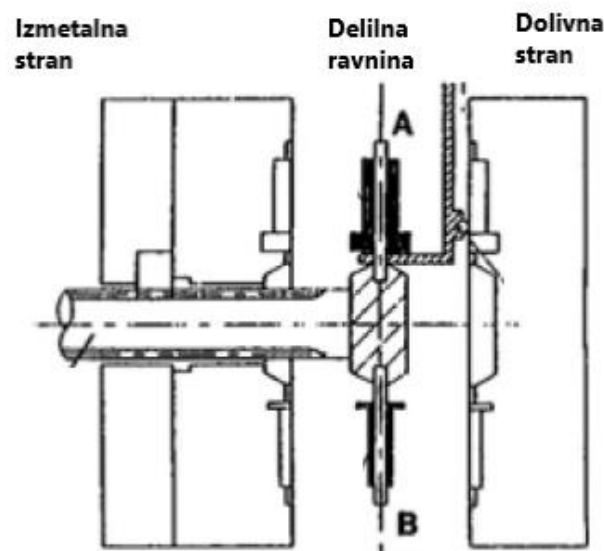
Slika 10: Toplokanalno orodje [13]

Etažno orodje (slika 11) je poseben tip orodja za brizganje, katerega posebnost je, da ima orodje več delovnih ravnin. Razporejene so ena za drugo kot etaže. Ta postavitev omogoča, da se na istem stroju v enem ciklu brizga več kosov hkrati brez potrebe po višji zapiralni sili. Polnjenje izdelkov poteka preko centralne plošče [14].



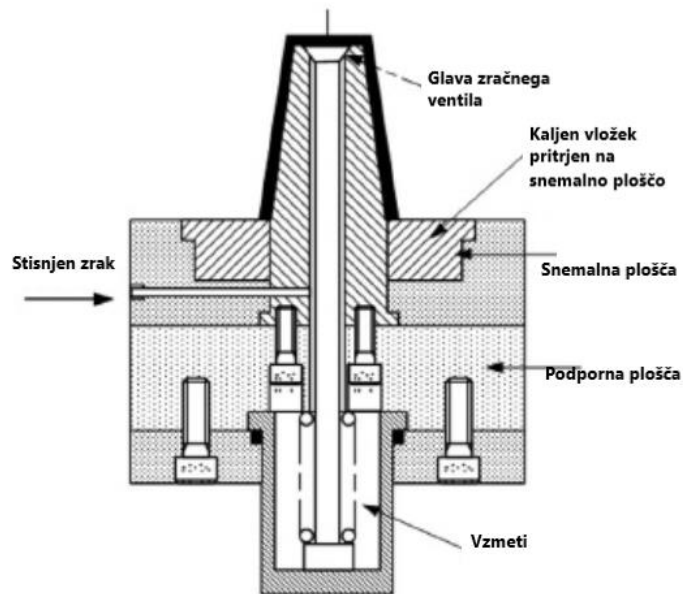
Slika 11: Etažno orodje [13]

Med posebne izvedbe orodij (slika 12) spadajo orodja za dvo- ali večkomponentno brizganje. Pri tem moramo zagotoviti, da je izdelek odbrizgan z vsemi materiali. Orodje mora biti prilagojeno tako, da ima vrtljiv središčni del orodja ali da ima stroj vrtljivi disk [14].



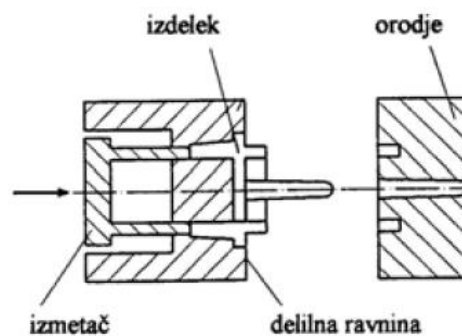
Slika 12: Dvokomponentno orodje [13]



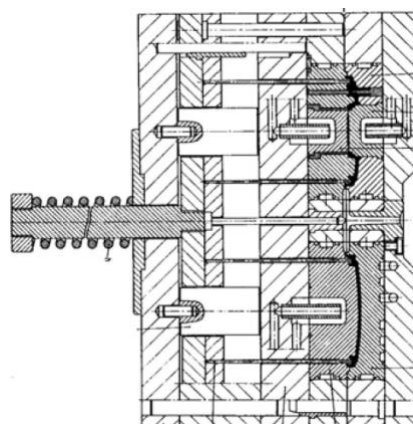


Slika 15: Izmetavanje s pomočjo stisnjenega zraka [16]

Za pomike izmetal se po navadi uporablja izmetalni drog v kombinaciji s hidravličnim cilindrom stroja (slika 16). V nekaterih primerih lahko imamo izmetavanje izvedeno preko hidravličnega cilindra na orodju ali s pomočjo vzmeti (slika 17) [14].



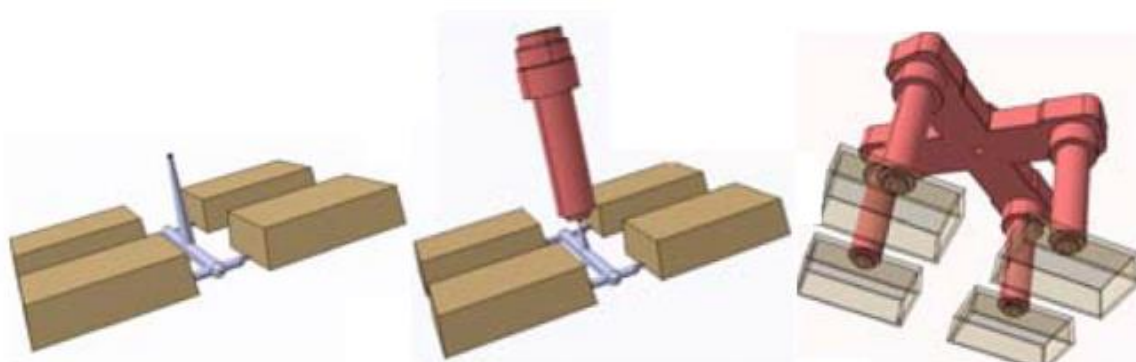
Slika 16: Izmetavanje z drogom [13]



Slika 17: Izmetavanje z vzmetjo [13]

### 2.2.3 Dolivni sistem

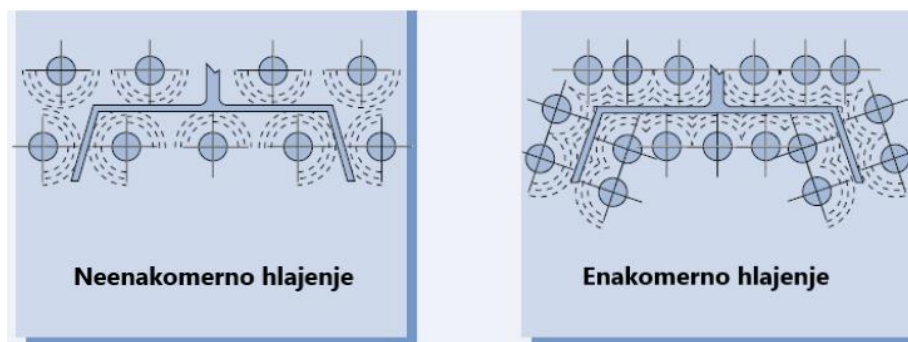
Pri izbiri dolivnega sistema orodja imamo na voljo hladnokanalni (slika 18), toplokanalni (slika 18), delno toplokanalni (slika 18) in sistem brez dolivkov. Med hladnokanalne dolivne sisteme spadajo hladni dolivki različnih oblik. Hladni dolivki so lahko stožčasti, točkasti, tunnelski, filmski in stranski. Pri toplokanalnem dolivnem sistemu je govora o kanalskem razvodu materiala, ki ima grelne enote. Talino v kanalih je možno segreti z zunanjim ali notranjim gretjem. Danes se v večini primerov uporablja zunanje gretje z grelci, ki so regulirani na stroju, ali z zunanjo krmilno enoto. V nekaterih primerih zaradi kompleksnosti dolivanja uporabljamo tudi kombinacijo teh dveh sistemov. V tem primeru govorimo o delno toplokanalnem dolivnem sistemu. Pri sistemih brez dolivkov se uporablja topla šoba kot ustje [14].



*Slika 18: Hladnokanalni doliv (levo), delno toplokanalni (sredina) in toplokanalni dolivni sistem (desno) [13]*

### 2.2.4 Hlajenje orodij

Hlajenje orodij je predvsem odvisno od geometrije izdelka, ki določa karakteristike in posebnosti orodja. Pri načrtovanju hlajenja orodij je najpomembnejše vodilo, da dosežemo enakomerno porazdelitev temperature po izdelku in učinkovitost proizvodnega procesa. Enakomerna porazdelitev temperature v izdelku pomeni, da na izdelku ne bo prišlo do večjih deformacij. Poleg omenjenega na kakovost izdelka in proces vplivajo tudi temperatura hladilnega medija, pretok, postavitev hladilnih kanalov, material orodja, material izdelka in temperatura polimerne taline. Slika 19 prikazuje postavitev hladilnih kanalov, ki povzročajo neenakomerno in enakomerno hlajenje. S črtkano črto je označeno območje, na katerega ima vpliv hladilni kanal [17].



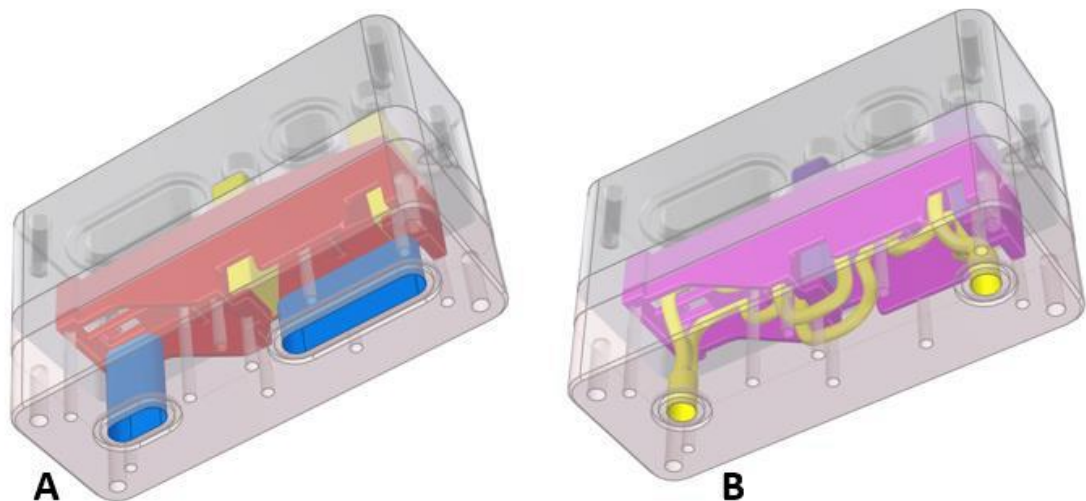
Slika 19: Prikaz neenakomernega in enakomernega hlajenja [13]

Hlajenje izdelka ima v veliki meri vpliv na dimenzije izdelka, kakovost površin in čas cikla. Pri prekratkem hlajenju imamo izdelke z vizualno nižjo kakovostjo, kar se izraža v vpadnih mestih. Vpadna mesta so pojav v materialu, kjer pride do neenakomernega skrčka zaradi razlik v temperaturi. Če je ta predolg, imamo daljše čase ciklov, ki dvigujejo proizvodnje stroške in zapolnjujejo kapacitete. Hlajenje izdelka je kritični dejavnik pri proizvodnji visoko kakovostnih izdelkov po razumljivi ceni. V veliki meri ima na čas hlajenja vpliv geometrija izdelka in geometrija hlajenja oziroma hladilnih kanalov. Hlajenje poskrbi, da se iz izdelka preko orodja odvede toplota, ki je bila potrebna za taljenje taline. To zagotovi temperirna naprava, s katero orodje segrevamo oziroma ohlajamo na predpisano vrednost glede na material. V praksi se največkrat pojavlja konvencionalno hlajenje, vedno več pa najdemo orodij, ki vsebujejo konformno hlajenje [2, 14].

Konvencionalno hlajenje je hlajenje, pri katerem so izvrtine za vodne kanale v večji meri izdelane v ravni liniji, ki jih med seboj povežemo v daljše tokokroge. Pri tem smo omejeni, da pri bolj kompleksnih geometrijah izdelkov z izvrtinami ne pridemo dovolj blizu orodne površine za dober odvod toplote. Konvencionalno hlajenje je stroškovno cenejše in lažje izvedljivo. Obstajajo različne kombinacije vodnih kanalov s pregrado, fontano, spiralo in potopljenimi bakrenimi vložki [2, 14].

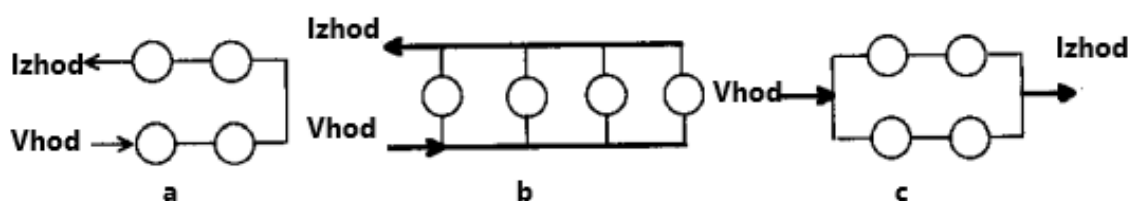
Konformno hlajenje je tehnika, kjer so hladilni kanali oblikovani tako, da sledijo obliki in konturam orodja, kar omogoča enakomernejše in učinkovitejše odvajanje toplote. S takšno izvedbo hladilnih kanalov lahko izboljšamo odvod toplote iz orodja s tem, ko se znatno bolj približamo orodni površini. Prispeva tudi k izboljšani končni obdelavi površine in zmanjšanemu tveganju napak, kot so madeži in praznine. Izboljšano upravljanje toplote zagotavlja, da temperatura orodja ostane konstantna, kar je ključnega pomena za ohranjanje celovitosti končnega izdelka. Z njim zmanjšamo tudi čas hlajenja, ki je potreben za doseg temperature izmetavanja izdelka. S tem znižamo proizvodnji strošek in pridobimo kapaciteto stroja. Izvedba konformnega hlajenja pogosto vključuje napredne proizvodne tehnike, kot je 3D-tiskanje, ki lahko ustvari zapletene geometrije, potrebne za te hladilne kanale. Čeprav je začetna naložba v konformne hladilne sisteme višja, so zaradi dolgoročnih koristi v smislu kakovosti, učinkovitosti in prihrankov stroškov dragocena inovacija na področju brizganja [4, 8].

Slika 20 prikazuje konvencionalno in konformno hlajenje orodja. Namesto konvencionalnih vložkov za hlajenje (slika A) se lahko uporabi konformno hlajenje orodja oziroma po obliki izdelka (slika B). V članku se omenja, da so s konformnim načinom hlajenja izboljšali odvzem toplote z izdelka in s porazdelitvijo toplote zagotovili bolj enakomerno ohlajanje izdelka [18].



Slika 20: Konvencionalno (A) in konformno (B) hlajenje [18]

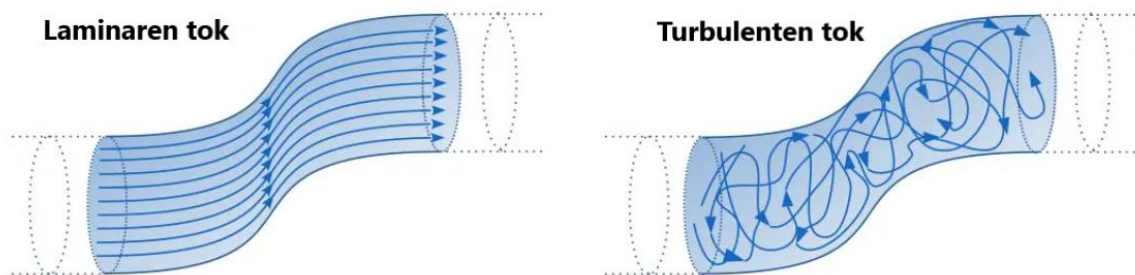
Za učinkovito hlajenje orodja moramo zagotoviti, da skozenj preide zadostna količina hladilne tekočine. Nazadnje preverimo, da imajo vsi tokokrogi hladilnih kanalov skozi orodje zadosten pretok. Višji kot bodo pretoki skozi posamezne hladilne kanale, manjši bo dvig temperature hladilnega medija. Poleg pretoka je za hlajenje pomembna tudi vezava hladilnih tokokrogov. Vežemo jih lahko zaporedno, vzporedno in kombinirano (slika 21). Pri tem ni posebnega pravila, kakšna vezava je boljša. Držati se moramo predvsem tega, da skupaj vežemo tokokroge, ki imajo podobne ali enake pretoke. Le tako bomo pri vezavi ohranili učinkovitost hlajenja [19].



Slika 21: Zaporedna (a), vzporedna (b) in kombinirana vezava (c) [19]

Med pomembnejše dejavnike pri hlajenju sodi tok tekočine skozi vodne kanale. Pri tem ločimo laminaren ali turbulenten tok tekočine (slika 22). Za definiranje toka tekočine se uporablja Reynoldsovo število, ki je brezrazsežno število, ki upošteva fizikalne lastnosti tekočine in cevi. Definirano je kot razmerje med zmnožkom premera cevi, povprečne hitrosti tekočine, gostoto tekočine in med viskoznostjo tekočine. Število manj kot 2300 pove, da gre za laminaren tok, in število večje od 2300, da gre za turbulenten tok. Prenos toplote med orodjem in hladilnim medijem je zelo odvisen od načina, kako

tekočina teče skozi hladilne kanale. Pri laminarnem toku tekočina teče paralelno v plasteh na površino sten orodja. Pri tem tekočina nima veliko stika s površino orodja v smeri prenosa toplote. Ustvari se temperaturni gradient, ki poveča toplotno odpornost; s tem se znatno zmanjša učinkovitost konvektivnega prenosa toplote. Pri turbulentnem toku se tekočina giblje v vrtincih, ki zmanjšajo temperaturni gradient. S povečanim stikom tekočine na steno orodja se poveča tudi konvektivni prenos toplote [20, 21].



Slika 22: Laminaren in turbulenten tok [21]

Posebne oblike izdelka zahtevajo poseben način hlajenja. Na kompleksnejših izdelkih lahko najdemo mesta, kjer je hlajenje lahko kritično. Izdelava hladilnih kanalov je na takšnih mestih onemogočena. V takšnih primerih je potrebno najti druge načine, kako ohladiti takšne oblike. Obstajajo načini, kjer lahko ta mesta hladimo z zrakom ali z vgradnjo orodnih vložkov, ki bolje odvajajo toploto [19].

### 2.2.5 Orodni materiali

Pomembno vlogo pri hlajenju izdelka ima izbira materiala za orodje. Na trgu obstaja precejšnje število orodnih jekel, ki se med seboj razlikujejo po namembnosti uporabe. Glavne razlike med jekli so v tem, na kakšen način bo jeklo uporabljeno in kakšnim zunanjim vplivom bo izpostavljeno [22].

Obstaja več načinov obdelave orodnih jekel. Poznamo rezkanje, struženje, vrtanje, toplotne obdelave, poliranje in erodiranje. Vsa jekla niso primerna za vse obdelave. Pri izdelavi določenih delov orodja moramo pazljivo izbrati orodno jeklo, ki je primerno za način obdelave [13].

Poleg navadnih orodnih jekel poznamo tudi visoko temperaturno prevodna jekla, ki se uporabljajo v aplikacijah, kjer je potrebna visoka toplotna prevodnost. Jekla so običajno sestavljena z legirnimi elementi, kot so volfram, molibden, krom in vanadij, ki izboljšujejo toplotno prevodnost in trdnost materiala. So izjemno koristna pri oblikovanju orodij za brizganje, kjer je potrebno hitro in učinkovito hlajenje. Zaradi visoke toplotne prevodnosti se polimerni material hitreje strdi, kar omogoča krajše čase cikla brizganja in povečuje produktivnost. Poleg tega visoko temperaturno prevodna jekla omogočajo bolj enakomerno porazdelitev toplote po orodju, kar preprečuje lokalno pregrevanje in zmanjšuje tveganje za deformacije ali poškodbe orodja [22].

Nekatera pogosto uporabljena visoko temperaturno prevodna jekla vključujejo [23]:

- X40CrMoV5-1 (1.2344) je krom-molibdenovo-vanadijevo orodno jeklo, ki je znano po visoki toplotni prevodnosti, trdnosti in odpornosti na obrabo. Je eno najpogosteje uporabljenih jekel za orodja za brizganje polimernih materialov, saj ohranja svoje lastnosti tudi pri visokih temperaturah.
- X37CrMoV5-1 (1.2343) je orodno jeklo, ki je po sestavi zelo podobno 1.2344 in zagotavlja visoko toplotno prevodnost in trdnost. Primerno je za uporabo pri visokih temperaturah in je odporno na mehansko obremenitev.
- 40CrMnMo7 (1.2311) je orodno jeklo legirano z elementi kroma, mangana in molibdena. Ima dobro trdnost in je primerno za nadaljnjo obdelavo. Zelo primerno je za izdelavo površinskih struktur.
- X30WCrV9-3 (1.2581) je orodno jeklo, ki je znano po svoji visoki toplotni prevodnosti in trdnosti. Primerno je za uporabo pri visokih temperaturah, kot tudi za aplikacije, ki zahtevajo odpornost na obrabo.
- 40CrMnNiMo8-6-4 (1.2738) je nizko legirano orodno jeklo, ki je primerno za uporabo pri brizganju polimernih materialov. Ima dobro toplotno prevodnost in trdnost, kar omogoča hitro in učinkovito hlajenje orodij.

Visoko temperaturno prevodna jekla so ključna pri izdelavi orodij za brizganje polimernih materialov, kjer sta pomembna hitrost in kakovost proizvodnje. Omogočajo optimalno hlajenje in zagotavljajo dolgo življenjsko dobo orodij, kar prispeva k učinkovitemu in zanesljivemu procesu brizganja polimernih materialov. Pravilna izbira materiala za orodje je ključna za uspešno izvajanje procesa brizganja polimernega materiala in doseganje želenih rezultatov. Na tržišču obstajajo jekla z visoko toplotno prevodnostjo, ki zagotavljajo boljše prehajanje toplote z izdelka preko jekla na vodo. Med takšna visoko temperaturno prevodna jekla spadata Fastcool 55 in Moldmax HH. Njihove toplotne prevodnosti dosegajo vrednosti do 130 W/mK, kar je lahko tudi do dvakratnik v primerjavi z drugimi orodnimi jekli. Takšna orodna jekla so pomemben dejavnik pri zmanjševanju časa cikla, saj ga lahko zmanjšamo od 3 do 21 %. S tem ne le da izdelku znižamo proizvodno ceno, temveč tudi pridobimo kapacitete stroja [24, 25].

Pri težje dostopnih delih orodja, kjer izdelava hladilnih kanalov ni možna, pri izdelavi orodij izdelujejo vložke iz bakrenih zlitin. Na trgu se pojavljajo bakrene zlitine pod trgovskim imenom Ampcoloy, katerih glavna lastnost je temperaturna prevodnost tudi do 208 W/mK (Ampcoloy 940). Pri uporabi vložkov iz bakrenih zlitin je pomembno, da iz kritičnih mest izdelka, kjer prihaja do pregrevanja, odvedemo kar se da največ toplote. V članku omenjajo, da je odvod toplote preko bakrenega vložka najbolj enakomeren v primerjavi s konvencionalnih in konformnim hlajenjem. Toda veliko je odvisno tudi od oblike izdelka [22].

## 2.3 Polimerni izdelki

Izdelki iz polimernih materialov so postali nepogrešljiv del naših življenj. Njihova vsestranskost izhaja iz velike raznolikosti polimerov, ki omogočajo prilagajanje lastnosti končnega izdelka. Izdelki so lahko trdi, mehki, prozorni, neprozorni, barvni, odporni na toploto in kemikalije. Zaradi izjemne prilagodljivosti in relativno nizkih stroškov proizvodnje so le-ti tako široko uporabljeni. Uporabljajo se v različnih industrijah, kot so proizvodnja embalaže, gradbeništvo, avtomobilska industrija, bela tehnika, elektronika, medicina in drugo [26].

Kljub temu raba polimernih izdelkov v okolju vzbuja precej skrbi. Zaradi izjemno počasne razgradnje se ti izdelki kopičijo na odlagališčih in kar nekaj jih pristane v oceanih. Mikroplastika se pojavlja že praktično povsod, onesnažuje vodne vire in predstavlja tveganje za zdravje ljudi ter živali. Vedno večji poudarek je na uporabi bioplastike in razvoju trajnostnih načinov rabe polimernih materialov. Recikliranje polimernih materialov bo v prihodnosti ključnega pomena. Prav tako bo potrebno še veliko postoriti v smeri razvoja infrastrukture za učinkovitejše ločevanje materialov in njihovo ponovno rabo [26].

### 2.3.1 Izbira materiala

V začetni fazi razvoja vsakega izdelka najprej izberemo polimerni material. Material je prvi korak, saj ga izberemo na podlagi zahtev namembnosti rabe. Material se izbira glede na funkcijske, estetske, tehnološke, ekonomske in okoljske zahteve.

Pri funkcijskih zahtevah govorimo predvsem o mehanskih lastnostih, toplotni odpornosti, kemijski odpornosti, električnih lastnostih in ultravijolični zaščiti [27].

Pri estetskih zahtevah so pomembne lastnosti kot so barva, sijaj in tekstura. Materiali imajo tudi omejitve pri doseganju različnih površin kot so visok sijaj, matirana površina ali površine za nadaljnje obdelave. Površine lahko dodatno obdelujemo z lakiranjem, tiskanjem, lepljenjem, varjenjem ali metaliziranjem [27].

Med tehnološke zahteve materiala spadajo primernost za brizganje, doseganje zelenega časa cikla, temperatura predelave, dimenzijska stabilnost in sposobnost zapolnjevanja izdelka [27].

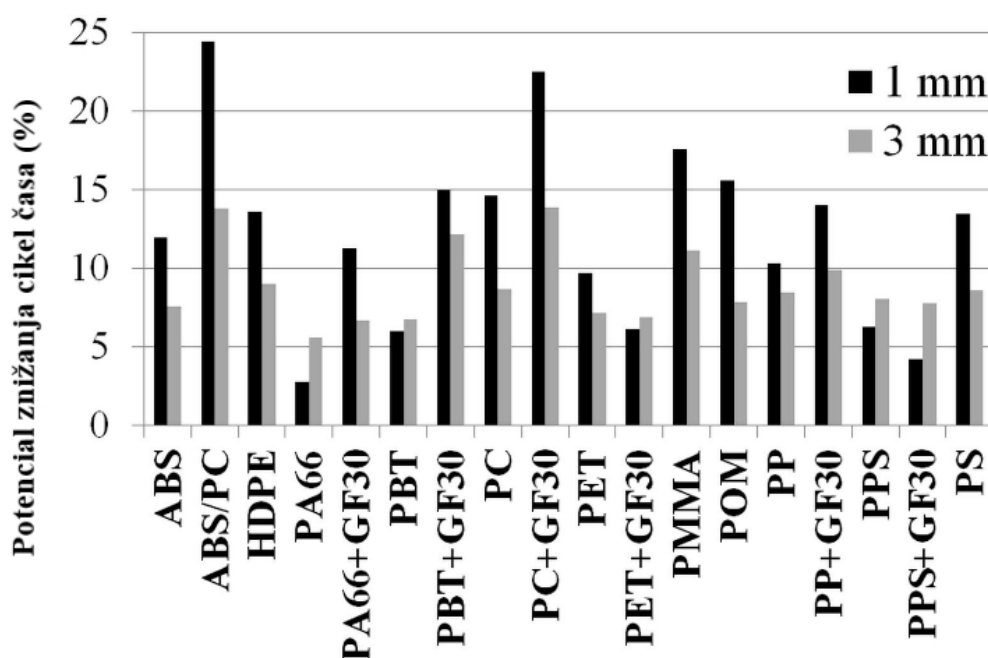
Vedno je pomemben ekonomski vidik, ki delno narekuje izbor materiala, če je funkcionalnost izdelka zagotovljena. V ekonomskem vidiku sta zajeti cena in dobavljivost materiala [27].

V določenih panogah industrije izbor material dopolnjujejo različne regulative tržišča, reciklaža in trajnost. Med pomembnejše okoljske in regulativne zahteve spadajo RoHS, REACH, FDA in UL certifikati.

### 2.3.2 Geometrija izdelka

Posebno vlogo pri času cikla ima geometrija izdelka. Velikokrat razvoj izdelkov ne dopušča velikih posegov v obliko zaradi tehničnih zahtev izdelka. V veliki meri so izdelki nedovršeni zaradi predimenzioniranega toleriranja mehanskih obremenitev. Premalo je zavedanja, kako dizajn izdelka vpliva na doseganje časa cikla.

Pomembno je oblikovati izdelek z ustreznimi debelinami sten, snemalnimi koti in radiji, ki omogočajo enakomerno polnjenje orodne votline, zmanjšujejo napetosti v materialu in preprečujejo nastanek napak, kot so nezapolnjenost, vpadna mesta ali deformacije. Pravilna geometrija izdelka lahko precej skrajša čas cikla in optimizira uporabo materiala. Največji vpliv, ki ga geometrija izdelka doprinese času cikla, je debelina sten. V primerih, ko je debelina sten na izdelku zelo neenakomerna, prihaja do potreb po daljšem času hlajenja. Nekateri deli izdelka zahtevajo debelejšje stene zaradi večje obremenitve ali funkcionalnih zahtev, medtem ko lahko drugi deli zahtevajo tanjše stene zaradi manjše obremenitve ali estetskih razlogov. Pravilno določene debeline sten v različnih delih izdelka omogočajo optimalno porabo materiala, enakomerno polnjenje votline in zagotavljanje potrebne trdnosti in funkcionalnosti. Na teh odebeljenih mestih prihaja do neenakomernega hlajenja izdelka; hkrati polimerna talina deluje kot izolator in zaradi svoje slabe toplotne prevodnosti podaljšuje čas, potreben za odvod toplote preko jekla na vodne kanale. Vpliv debeline izdelka je tako velik, da lahko v hipu izgubimo vse prednosti uporabe visoko prevodnega jekla in konformnega hlajenja. Vpliv debeline sten na čas cikla je predstavljen na sliki 23. [19, 24].



Slika 23: Potencial znižanja časa cikla s spremembo debeline izdelka [25]

Pri oblikovanju izdelka je potrebno upoštevati material, iz katerega bo izdelek proizveden. Različni materiali imajo različne lastnosti, kot so toplotna prevodnost, trdnost, odpornost na obrabo in viskoznost. Pomembno je izbrati material, ki je primeren za specifično aplikacijo in upoštevati njegove zahteve glede temperature taljenja, tlaka brizganja in hitrosti polnjenja. Velik vpliv pri krajšanju cikla ima toplotna difuzivnost materiala [19,24].

Izbira materiala ima vpliv tudi na pravilno upoštevanje snemalnih kotov in radijev. Ostri koti in majhni radiji povzročajo težave pri zapolnjevanju orodnih votlin. Slednje se na izdelku kaže v obliki zračnih mehurčkov, neodlitosti in napetosti v materialu. Za brizganje polimernih materialov se običajno priporoča snemalni kot med  $1^\circ$  in  $3^\circ$  ter radije med 0,5 mm in 1 mm. Izbira primerne snemalnega kota je pogojena z izborom materiala. Vsak material ima svoje zakonitosti, kako velik snemalni kot je potreben. Snemalni kot mora biti večji v primerih, kjer imamo večjo globino izdelka. Prav tako je večji snemalni kot potreben v primerih, kjer imamo na snemalni površini prisotno tudi teksturo. Glede na globino zrnate teksture je odvisno kakšen dodatek snemalnega kota bo potreben. Generalno se snemalni kot poveča za  $1,5^\circ$  za vsakih 20  $\mu\text{m}$  globine teksture [28].

Oblikovanje izdelka za brizganje polimernih materialov zahteva celovit pristop, ki vključuje upoštevanje postopka brizganja, geometrije izdelka, lastnosti polimernega materiala, odstranjevanja izdelka, estetike, funkcionalnosti, prototipiranja in sodelovanja med oblikovalci in inženirji. Pravilno oblikovanje izdelka za brizganje polimernih materialov omogoča visoko kakovostne izdelke, optimizacijo proizvodnje in zadovoljstvo končnih uporabnikov [19].

### 2.3.3 Numerična simulacija

Industrija brizganja izdelkov je prepoznala prednosti, ki jih prinaša računalniško podprto inženirstvo, pri čemer inženirju v veliki meri pripomore k boljši sposobnosti predvidevanja in razumevanja procesa brizganja izdelka. Večanje števila uporabnikov kaže na to, da je uporaba numeričnih simulacij za brizganje v porastu, kar samo potrjuje njegove prednosti. Numerična simulacija brizganja izdelkov inženirjem omogoča, da preizkusijo, kako se bo izbrani material obnašal pod različnimi pogoji brez potrebe po izdelavi fizičnih prototipov. Uporaba numeričnih simulacij za brizganje izdelkov se predvsem izraža v dvigu produktivnosti, kakovosti in znižanju stroškov razvoja. Z izvedbo simulacij lahko predvidimo morebitne težave, kot so zračni vključki, deformacije, lokalna pregrevanja in slabo zapolnjevanje orodja. Te napake bi drugače odkrili šele po več poskusih na stroju, tako pa jih nekaj lahko odpravimo že v fazi izdelave orodja [29].

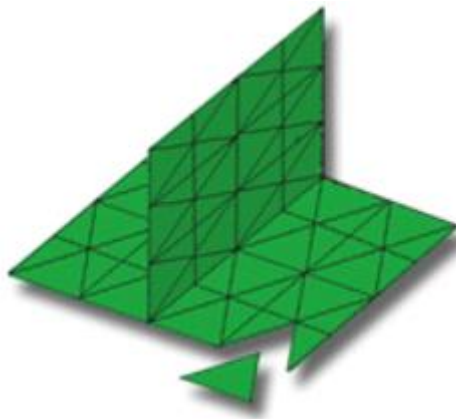
Numerično simulacijo brizganja se lahko uporablja v več fazah razvojnega cikla izdelka. Uporablja se jo na začetku razvoja izdelka, pri čemer je v ospredju sposobnost izdelave in zagotavljanje funkcionalnost izdelka. Pri tem se morajo upoštevati pravila

za snovanje izdelkov in hkrati je potrebno izdelati dovolj robusten dizajn izdelka za doseganje funkcij [30].

Po potrditvi dizajna izdelka si lahko s pomočjo numeričnih simulacij pomagamo pri snovanju orodja za brizganje. Z njimi lahko z dobrimi vhodnimi podatki preverimo, kakšne težave se bodo pojavile pri trenutni konstrukciji orodja. Predvidevamo lahko napake pri brizganju, ki jih je mogoče odpraviti z dodatnimi popravki, še preden je orodje izdelano. S spremembami mesta dolivanja, debeline sten, hladilnih kanalov in izdelavo odzračevanja lahko preprečimo kar nekaj težav, ki bi se lahko pojavile v procesu brizganja izdelka [30].

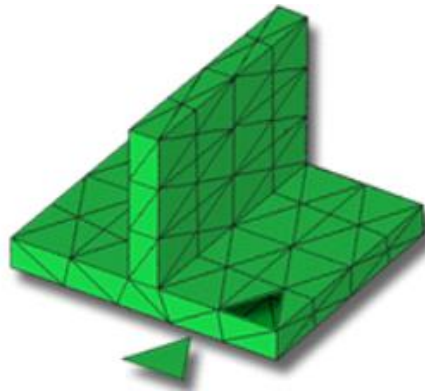
Numerične simulacije nam koristijo tudi pri že utečenih proizvodnih procesih, kjer lahko raziščemo potenciale za optimizacijo izdelka ali poiščemo vzroke za določene napake orodja. S spreminjanjem vhodnih podatkov lahko testiramo različne nastavitve brizganja in njihov vpliv na proces ter izdelek [30].

Pri numerični simulaciji brizganja se uporablja metoda končnih elementov. Metoda temelji na razdelitvi izdelka na majhne elemente, ki jih je mogoče matematično popisati. Popis izdelka in drugih elementov je možen na tri načine. Pri prvem popisu modela gre za površinski popis elementov v 2,5 D prostoru (ang. Midplane), kar je prikazano na sliki 24. Pri tem se model kreira tako, da so tvorjene srednje površine modela. Takšen popis je primeren za tankostenske izdelke. Pri tem moramo vsem elementom definirati debelino, kar je zelo pomembno za doseganje dobrih rezultatov [30].



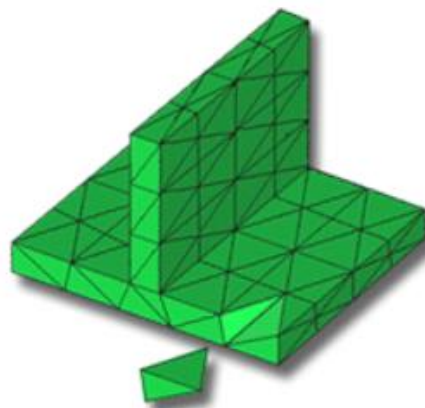
*Slika 24: Površinska mreža, izdelana iz središčnic modela (ang. Midplane) [31]*

Drugi način je novejši popis modela, ki lahko zaobide rabo prvega načina. Pri tem načinu se uporabi 3D model izdelka, ki se ga pomreži površinsko (ang. Dual domain). Prikaz mreže je viden na sliki 25. Pri tem načinu je debelina modela avtomatsko določena z razdaljo med dvema nasprotno ležnima površinama. Zato je pomembno, da ima kreirana mreža dovolj velik ujem z nasprotno ležečimi elementi [30].



Slika 25: Površinska mreža modela (ang. Dual domain) [31]

Tretji način popisa modelov je s pomočjo 3D mreže. 3D mreža za popis modela izdelka uporablja tetraedre in druge elemente za popis geometrije (slika 26). S tem načinom lahko opišemo tako tankostenske kot debelostenske izdelke. Priporočeno je, da se za popis modela uporablja najmanj 10 slojev elementov skozi debelino stene izdelka [30].



Slika 26: 3D mreža modela [31]

Za kontrolo kakovosti 3D mreže obstajata kontrolna parametra diedrskega kota in razmerje stranic tetraedrov. Diedrski kot tetraedrov mora biti manjši od  $178^\circ$ . Manjši kot je kot, boljši popis 3D modela lahko izvedemo. Razmerje stranic tetraedrov mora biti za 3D mrežo manjše od razmerja 100:1. Višjim vrednostim razmerja stranic se je dobro izogniti, saj lahko vplivajo na rezultat simulacije [31].

Za vsak element se izračuna nabor enačb, ki opisujejo mehanske, toplotne in reološke interakcije med materialom in orodjem za brizganje. Simulacija je razdeljena na fazo zapolnjevanja izdelka, hlajenja in deformacij. Pri zapolnjevanju izdelka program predvidi tok tečenja materiala, pri čemer upošteva lastnosti materiala, kot so viskoznost, hitrost zapolnjevanja in tlak. Kot rezultat analize lahko spremljamo možnost zapolnitve orodne votline, potreben tlak brizganja, spremembo temperature na fronti tečenja, delovanje naknadnega tlaka, linije spoja, zračne vključke, orientacijo vlaken in nastanek vpadnih mest. Pri hlajenju, ki je ključni dejavnik procesa brizganja, lahko

predvidimo temperaturo orodja votline, temperaturo celotnega orodja, temperaturo hladilnega medija, pretok hladilnega medija in tlak hladilnega medija. Pri tem lahko s spreminjanjem pogojev hlajenja (pretoki, čas, temperatura, oblika temperiranih kanalov) vplivamo na rezultat ohlajanja in s tem predvidimo, kakšno hlajenje bi bilo najbolj optimalno za naš izdelek. Pri ohlajevanju izdelka se pojavijo notranje napetosti, ki vplivajo na deformacijo izdelka. Numerična simulacija brizganja pri oblikovanju orodij pripomore, da se s pravilnim pristopom zmanjša tveganje za nastanek napak v izdelkih. Simulacija predvidi končno deformacijo pod danimi pogoji, pri čemer imamo še vedno možnost za izvedbo popravkov in izboljšav [32].

## 2.4 Sistemi za nadzor kakovosti izdelkov

Nadzor kakovosti je sistem, ki zagotavlja želeno stopnjo kakovosti. V sistemu s pomočjo spremljanja karakteristik izdelka pridobimo povratne informacije o odstopanju od predpisanih mej [33].

Za nadzor kakovosti se v proizvodnjah polimernih izdelkov uporablja vrsta merilnih pripomočkov. Mednje spadajo kalibri, kljunasta merila, mikrometri, globinomer, višinomer, 3D koordinatni merilni stroj, merilne šablone, optični skenerji in računalniška tomografija (CT). Med seboj se razlikujejo po natančnosti in uporabi [33].

Prav tako se izdelke nadzoruje vizualno in s sestavo sklopov. Pri tem so definirani interni predpisi o kakovosti izdelkov. Pri sestavi sklopov so definirane vrednosti vijačnih momentov in različni ujemi soležnih kosov [33].

Statistično obvladovanje procesov vodi do uporabe kontrolnih list, histogramov in drugih orodij za nadziranje spremenljivk pri procesu brizganja izdelka. V proizvodnjah, ki so opremljene s statističnim obvladovanjem procesov, lahko spremljamo nastavljene parametre stroja, kot so čas cikla, čas brizganja in še mnogo drugih parametrov. Za nadzor procesov velikokrat uporabljamo analizo sposobnosti procesa. Pri tej analizi vidimo, kakšni sta sposobnost in centriranost procesa [34].

V magistrskem delu bomo spremljali dve posebni karakteristiki, ki sta označeni na načrtu izdelka. Ti dve sta pomembni statistični meri za sestavo soležnega kosa (slika 27). Merjenje bo izvedeno s 3D optičnim skenerjem. Obenem bomo preverili sestavo na montažni liniji.



ki jih povzroča površina objekta. Programska oprema te deformacije pretvori v 3D podatke. Strukturirani svetlobni skenerji so hitri in natančni ter se pogosto uporabljajo v medicini in zabavni industriji.

- Fotogrametrija je metoda, ki uporablja več fotografij objekta, posnetih z različnih kotov. Programska oprema nato analizira te fotografije in ustvari 3D model na podlagi prepoznavanja značilnosti in vzorcev na slikah. Fotogrametrija je cenovno ugodna metoda, ki omogoča snemanje velikih objektov ali območij, vendar je manj natančna kot lasersko skeniranje ali strukturirana svetloba.

ScanBox Series 5 je merilna naprava (slika 28), ki se uporablja za 3D optično merjenje in kontrolo kakovosti v proizvodnih procesih. Gre za avtomatiziran sistem, ki omogoča hitro in natančno merjenje kompleksnih geometrijskih oblik. Deluje s pomočjo 3D optičnih skenerjev, ki zajemajo podatke o obliki in dimenzijah objektov. Slika 4 prikazuje merilno napravo, s katero bodo opravljene meritve izdelkov v eksperimentalnem delu magistrskega dela. Gre za napravo, ki deluje po principu strukturiranega svetlobnega skenerja [35].

Osnovno delovanja je takšno, da najprej sledi priprava objekta. Objekt, ki ga želite izmeriti, se postavi na merilno platformo znotraj ScanBoxa. Naprava je zasnovana tako, da omogoča enostavno in hitro nameščanje različnih predmetov. Nato vir svetlobe projicira svetlobne vzorce na površino objekta. Kamere snemajo deformacije teh vzorcev, kar omogoča ustvarjanje natančne 3D digitalne kopije objekta. Zajeti podatki se obdelajo s pomočjo napredne programske opreme, ki jih pretvori v 3D model. Programska oprema omogoča primerjavo izmerjenih podatkov z referenčnimi CAD modeli, kar omogoča zaznavanje odstopanj in napak. Po obdelavi podatkov programska oprema ustvari podrobna poročila o izmerjenih dimenzijah, odstopanjih in morebitnih napakah. Ta poročila se lahko uporabijo za nadzor kakovosti, izboljšanje proizvodnih procesov in zagotavljanje skladnosti z zahtevami. Merilna naprava je zasnovana za avtomatizirano delovanje, kar omogoča neprekinjeno merjenje brez potrebe po ročnem poseganju. To povečuje učinkovitost in zmanjšuje možnost človeških napak [35].

Prednosti 3D optičnega skeniranja so visoka natančnost, hitrost in možnost zajema kompleksnih geometrij. Poleg tega 3D optično skeniranje omogoča natančno dokumentiranje in analizo objektov, kar je koristno za raziskave in razvoj. Vendar ima nekatere omejitve, kot so visoki stroški opreme in programske opreme ter zahteva po usposobljenem osebju za upravljanje skenerjev in obdelavo podatkov. Kljub tem izzivom se tehnologija 3D optičnega skeniranja hitro razvija in postaja vse bolj dostopna. Z napredkom v tehnologiji senzorjev, računalniške obdelave in programske opreme se natančnost in zmogljivost skenerjev nenehno izboljšujeta, kar odpira nove možnosti za uporabo in inovacije v različnih panogah [35].



Slika 28: Optični 3D skener Zeiss Scanbox 5

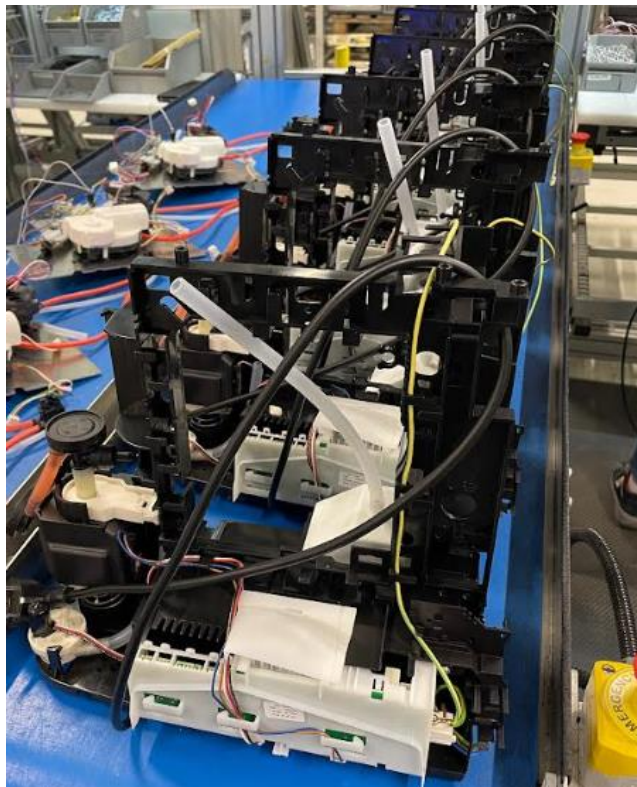
#### 2.4.2 Infrardeča termografija

Infrardeča termografija je tehnika, ki se uporablja za zaznavanje in merjenje infrardeče toplotnega sevanja, ki ga oddaja opazovani objekt. S pomočjo meritev, ki jih opravimo s termografsko kamero in ustrezno programsko opremo, lahko infrardeče sevanje pretvorimo v prikaz temperaturne porazdelitve. Sliki, ki jo ustvari termo kamera, pravimo termogram. Tehnika se je uspešno uveljavila kot način za spremljanje pogojev. Uporablja se v gradbeništvu, elektroindustriji in tudi za spremljanje plastičnih ter nateznih deformacij. Z njo lahko opazujemo spremembe pri utrujanju materialov. Uveljavila se je tudi v jedrski, vesoljski, lesni in pridelovalni industriji [36].

Pri brizganju polimernih materialov prihaja do prenosa toplote med izdelkom in orodjem. Odvod toplote zagotavlja kroženje vode preko hladilnih kanalov orodja s pomočjo temperiranih naprav. S pomočjo infrardeče kamere lahko preverimo, kakšen je prenos toplote z izdelka. Na izdelku lahko spremljamo vroča mesta, ki nastajajo zaradi fizičnih omejitev orodja. V procesih brizganja polimernih materialov kamero uporabljamo za spremljanje hlajenja, odkrivanje napak na izdelku ali za optimizacijo časa hlajenja. Termogrami, ki so posneti takoj po izmetavanju izdelka iz orodja, nam povedo, kje je vzrok za večje deformacije izdelka. Glavni namen uporabe pa je lahko spremljanje in določitev temperature izdelka ali orodja pri spremembah, ki jih uvedemo v proces. Tako lahko spremljamo, kako se temperatura izdelka spreminja v odvisnosti od dolžine časa cikla [36, 37, 38].

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

V eksperimentalni del magistrskega dela smo vzeli izdelek z nazivom Okvir levi FAEM IV iz podjetja BSH Hišni aparati d. o. o. Nazarje. Izdelek je v serijski proizvodnji in je del kavnega aparata. Njegova funkcija je nosilnost sestavov, ki skupaj tvorijo notranjost kavnega aparata. Izdelek se uporablja za pritrditev elektronike, črpalke in manjše posodice. Na sliki 29 vidimo sestavo izdelka na liniji.

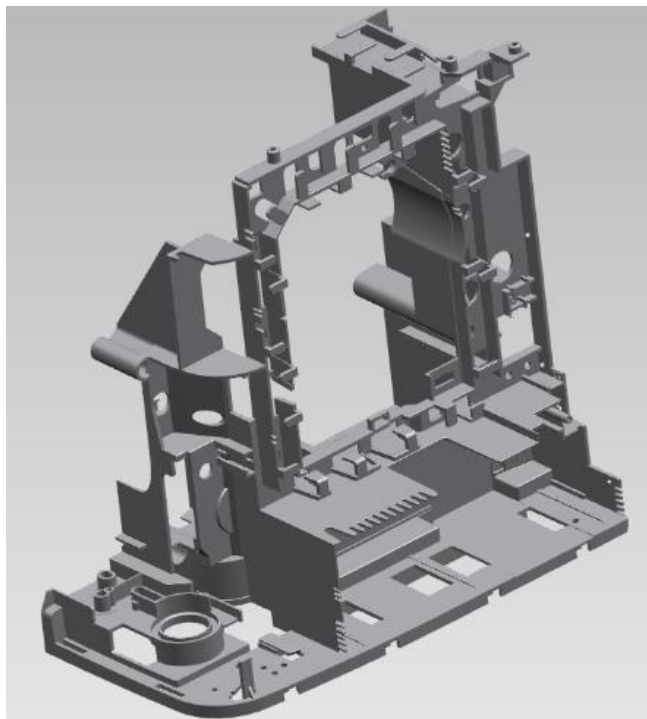


*Slika 29: Sestava izdelka Okvir levi FAEM IV (izdelek v črni barvi)*

S pomočjo numeričnih simulacij smo izvedli simulacijo serijskih parametrov. Dobljene rezultate serijskega stanja smo preučili in izvedli nekaj iteracij simulacije za skrajšanje časa cikla. Poudarek je bil na optimiziranju brizgalnega časa, naknadnega tlaka in časa hlajenja. Hlajenje serijskega stanja na orodju ni idealno, saj se uporablja zaporedna vezava tokokrogov, ki pa z nizkim skupni pretokom temperirne naprave ne dosega turbulentnega toka. S spremembo načina temperiranja orodja bi lahko dosegli precejšnje izboljšanje časa hlajenja in s tem skrajšali čas cikla izdelka. Z optimizacijo procesa smo želeli pridobiti produktivnost, ceno izdelka in sprostitev kapacitete stroja. Predpostavljali smo, da v obstoječem procesu še niso bili raziskani celotni potenciali v optimizaciji časa cikla izdelka in da obstoječ način temperiranja ni optimalen za proizvodnjo.

### 3.1 Predstavitev izdelka

Na sliki 30 je prikazan izdelek Okvir levi FAEM IV, ki je izdelan iz materiala Polylac PA-757H natur proizvajalca Chi Mei in barvila Masterbatch (MB) Fibaplast ABS 0587484 RAL 9004 proizvajalca Karl Finke. Masa izdelka znaša 606 g. Izdelek ima nosilno funkcijo drugih komponent znotraj kavnega aparati in nima visokih estetskih zahtev, saj ta pri aparatu ni viden. Pri izdelku je pomembno, da je mersko znotraj statističnih mer in omogoča sestavo ostalih komponent.



*Slika 30: Izdelek Okvir levi FAEM IV*

Material Polylac PA-757H natur je kemijsko termoplastičen polimer akrilonitril-butadien-stiren (ABS). Temperaturno območje predelave je med 190 °C in 230 °C. Priporočena temperatura orodja s strani proizvajalca je med 30 °C in 70 °C. Material je potrebno predhodno sušiti od 2 do 4 ure s suhim zrakom temperature med 80 °C in 85 °C. Priporočena temperatura izmetavanja za material znaša 93 °C. Dodatni podatki o lastnostih materiala so zbrani v tabeli 1.

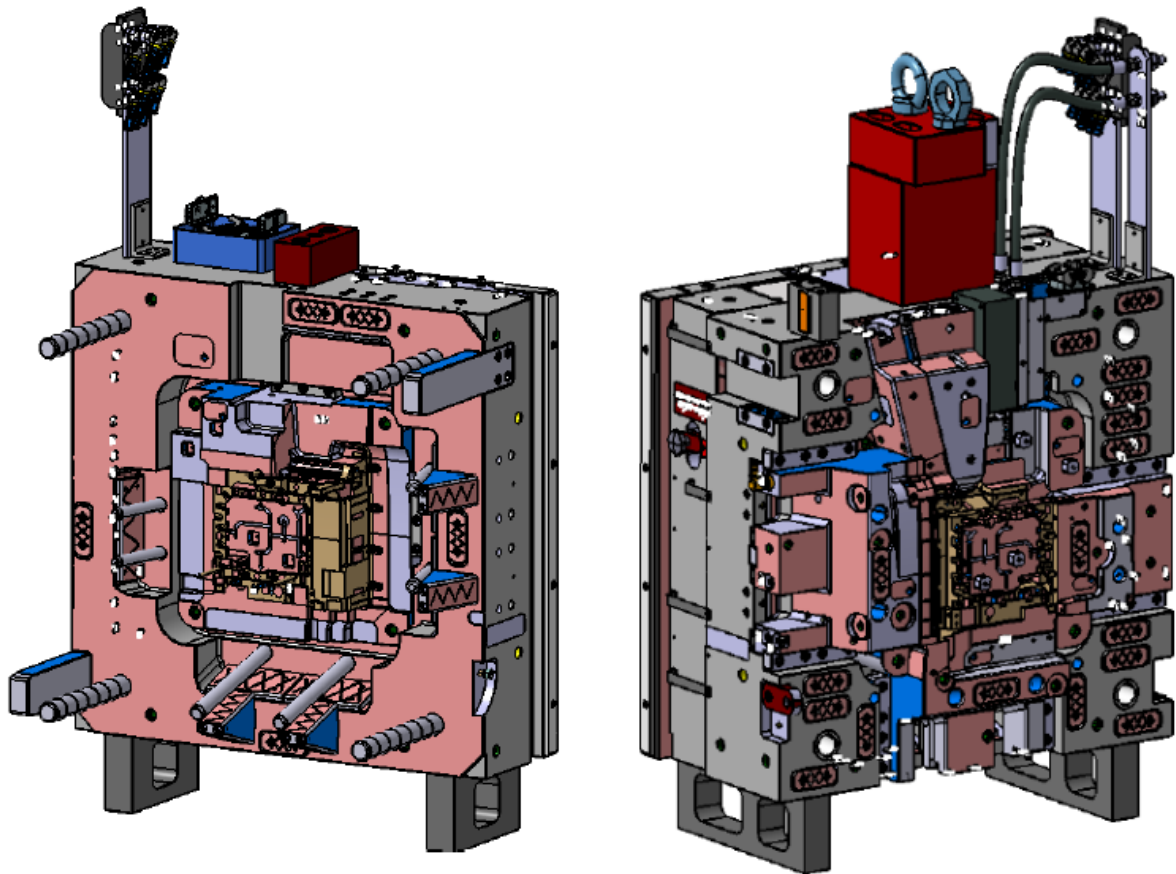
Tabela 1: Lastnosti materiala Polylac PA-757H [40]

Lastnost	Enota (pogoj)	Vrednost
Gostota	g/cm <sup>3</sup> (23 °C)	1,04
Volumski pretok	ml/10 min (220 °C, 10 kg)	30
Natezna trdnost	MPa (50 mm/min)	40
Natezna trdnost pri pretrgu	MPa (50 mm/min)	31
Raztezek pri nategu	% (50 mm/min)	40
Upogibna trdnost	MPa (2 mm/min)	61
Upogibni modul	GPa	2
Udarna žilavost	KJ/m <sup>2</sup> (23 °C, z zarezo)	29
Koeficient linearnega temperaturnega raztezka	/	8,6 x 10 <sup>-5</sup>
Gorljivost	/ (UL-94)	1,5 mm HB
Skrček v orodju	%	0,4-0,7
Sušenje	°C (2-4 h)	80 - 85
Temperatura orodja	°C	30 -70
Temperatura taline	°C	190-230
Temperatura izmetavanja	°C	93

Barvilo MB Fibaplast ABS 0587484 RAL 9004 je barvilo na osnovi ABS materiala v barvi črni barvi RAL 9004. Barvilo se dozira direktno na stroju z gravimetričnim dozirnim sistemom, ki zagotavlja natančno in ponovljivo doziranje. Barvilo se dozira v 4 % mase izdelka.

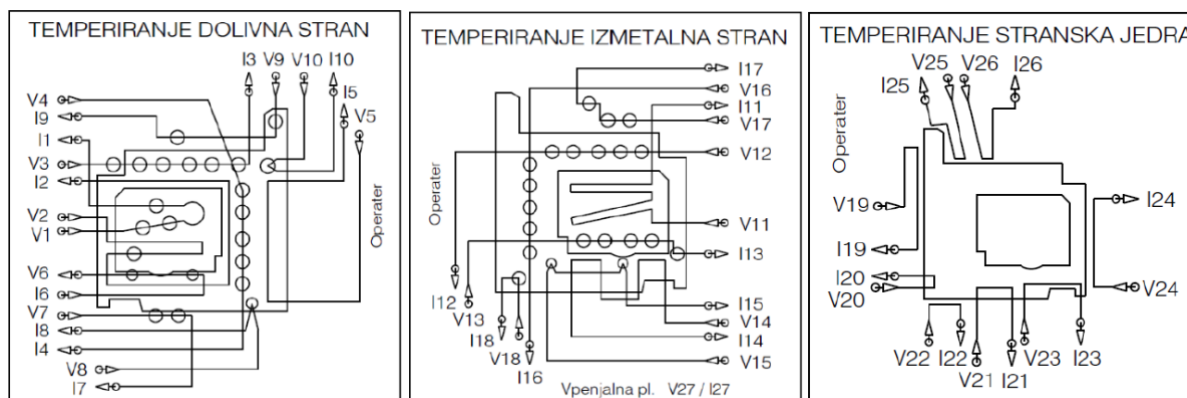
### 3.2 Predstavitev orodja

Na sliki 31 je prikazano orodje za brizganje izdelka Okvir levi FAEM IV, ki je v osnovi orodje s stranskimi drsniki. Orodje je sestavljeno iz glavnega gravurnega vložka, treh mehanskih drsnikov in enega hidravlično vodenega drsnika. Za dolivni sistem izdelka je v uporabi delni toplokanalni sistem s pettočkovnim hladnim dolivom. Izmetavanje izdelka poteka z okroglimi izmetači, ki so mehansko vodeni preko izmetalnega droga z gibom hidravličnega cilindra stroja. Temperiranje orodja ima 27 samostojnih tokokrogov. Zaradi večjega števila tokokrogov smo za temperiranje orodja primorani uporabiti zaporedno vezavo vodnih tokokrogov. Temperiranje orodja poteka s štirimi temperirnimi napravami, po dvema na vsaki strani orodja. Na orodju uporabljamo tudi dva hladna tokokroga, ki hladita najbolj vroča mesta orodja v kombinaciji z bakrenimi vložki iz Ampcoloy materiala.



Slika 31: Orodje OZB Okvir levi FAEM IV (levo dolivna, desno izmetalna stran)

Temperiranje orodja je v serijski proizvodnji izvedeno s štirimi temperirnimi napravami, po dve na vsaki strani orodja. Vsi tokokrogi temperirnih kanalov so prikazani na sliki 32. Zaradi številčnosti tokokrogov je vezava serijske proizvodnje takšna, da se uporablja mostičenje tokokrogov. Slednje pomeni, da se uporablja zaporedna vezava tokokrogov. Zaporedna vezava tokokrogov za posamezno temperirno napravo je prikazana v tabeli 2. Na dolivni strani orodja je v uporabi sistemska hladna voda, ki se uporablja v primerih, kjer je že v osnovi orodja zasnovano slabše hlajenje oziroma hlajenja ni bilo mogoče izvesti v večji meri. Zato se na teh mestih, kjer bi prihajalo do pregrevanja, že v osnovi uporabi hladnejša voda, ki je v našem primeru 15 °C. Hladna voda se na orodju uporablja na tokokrogoma 6 in 10. Na teh mestih pri izdelavi orodja na vložkih ni bilo možnosti izdelati vodnega kanala, zato so vložki, izdelani iz materiala Ampcoloy. Ampcoloy vložki so v stiku s hladnim tokokrogom, ki skrbi, da se toplota odvede v največji možni meri.

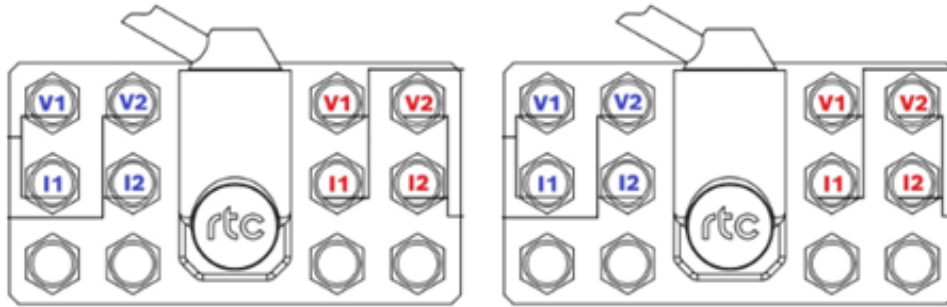


Slika 32: Prikaz vseh tokokrogov na orodju Okvir levi FAEM IV

Tabela 2: Vezava vodnih kanalov serijskega stanja

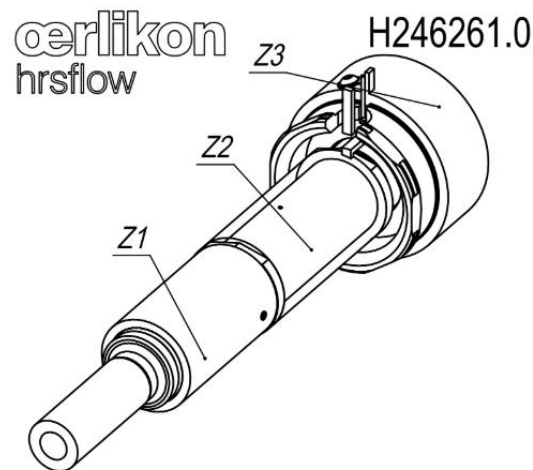
Stran orodja	Vir vode	Oznaka tokokroga na hitri sklopki	Vezava tokokrogov na orodju
Dolivna	Temperirna naprava 1	V1-I1	V8-I8-V7-I7-V4-I4
	Temperirna naprava 2	V2-I2	V3-I3-V5-I5-V9-I9-V2-I2-V1-I1
	Hladilni sistem	V1-I1	V6-I6-V10-I10
		V2-I2	Ni v uporabi
Izmetalna	Temperirna naprava 1	V1-I1	V17-I17-V16-I16-V18-I18-V13-I13-V12-I12-V11-I11-V24-I24-V15-I15-V14-I14
	Temperirna naprava 2	V2-I2	V19-I19-V20-I20-V22-I22-V21-I21-V23-I23-V26-I26-V25-I25-V27-I27
	Hladilni sistem	V1-I1	Ni v uporabi
		V2-I2	Ni v uporabi

Na sliki 33 je prikazana vezava vode serijskega stanja s hitrimi sklopkami. Na dolivni in izmetalni strani je v uporabi po ena hitra sklopka. Hitra sklopka je iznajdba, ki se uporablja za hitro in učinkovito menjavo ter preprečuje nepravilen priklop s strani posluževalca. Vsaka od hitrih sklopk vsebuje po dva tokokroga iz temperirne naprave (rdeča oznaka) in po dva tokokroga hladne systemske vode (modra oznaka). Oznaki V1 in I1 na hitri sklopki označujeta vhod 1 in izhod 1 za temperirno napravo 1. Vodni vir, ki vstopa iz temperirne naprave 1 na oznaki V1, potuje skozi vezavo vodnih kanalov 8, 7 in 4 (tabela 1) ter se nato vrača v temperirno napravo 1 skozi izhod I1 na hitri sklopki. Za ostale tokokroge je v veljavi enak način razlage vezave.

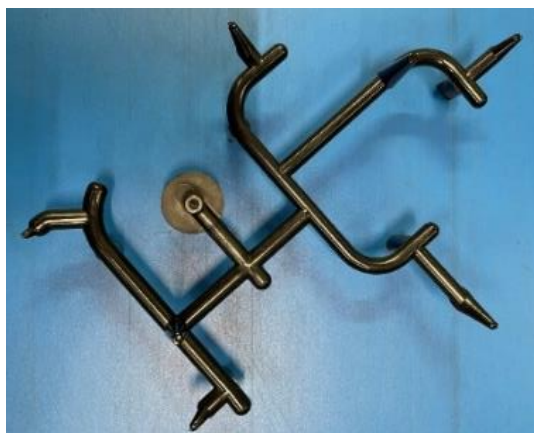


Slika 33: Priklop vode s hitrimi sklopkami serijskega stanja

Dolivni sistem orodja je kombinacija tople šobe in hladnega dolivka. Na sliki 34 je prikazana uporabljena topla šoba proizvajalca Oerlikon, ki ima tri grelne cone. Topla šoba v kombinaciji s hladnim dolivom poskrbi za enakomerno zapolnjevanje izdelka. Na sliki 35 je viden hladni doliv izdelka. Hladni doliv je z izdelkom v stiku v petih točkah. Slednje poskrbi za boljšo porazdelitev brizgalnega tlaka v orodju.



Slika 34: Topla šoba dolivnega sistema



Slika 35: Hladni doliv

### 3.3 Stroj za brizganje polimernih materialov

Eksperimentalni del je bil izveden na stroju Haitian MA 7000, ki je prikazan na sliki 36. Stroj omogoča 7000 kN zapiralne sile, ki jo doseže s pomočjo škarjastega zaklepa. Brizgalna enota stroja ima premer polža 70 mm, ki omogoča volumen brizganja 1424 cm<sup>3</sup> in tlak brizganja 207 MPa.



Slika 36: Stroj za brizganje polimernih materialov Haitian MA 7000

### 3.4 Temperirna naprava

Za temperiranja orodja smo uporabili štiri temperirne naprave Tempro D90 proizvajalca Wittmann. Na sliki 37 je prikazana uporabljena temperirna naprava. V proizvodnji se uporablja interni dogovor, pri katerem velja, da je vsak stroj opremljen s štirimi temperirnimi napravami ter opcijo hladne sistemske vode s temperaturo 15 °C. Temperirna naprava segreva vodo z 9 kW grelcem ter omogoča maksimalen pretok 40 l/min pri tlaku 0,38 MPa [41].



Slika 37: Temperirna naprava Tempro D90 proizvajalca Wittmann [41]

### 3.5 Infrardeča termo kamera

Pri termografični analizi izdelkov smo uporabili termo kamero PI 450 (slika 38) proizvajalca Optris. Temperaturno območje delovanje kamere je od 0 °C do 250 °C. Resolucija posnetkov je znašala 382 × 288 točk, vidni kot 18° x 14°, osveževanje posnetka pa 80 Hz. Termo kamera je naprava, ki tvori sliko s pomočjo infrardečega sevanja v območju valovne dolžine od 1000 do 14000 nanometrov. Termo kamere pretvorijo energije infrardečega sevanja v vidno svetlobo. Prednost termo kamere je, da ima sposobnost pasivno videti vse predmete ne glede na osvetlitev okolice. [42].



Slika 38: Termo kamera PI 450 [42]

### 3.6 Numerična simulacija Moldflow

Za numerične simulacije smo uporabili programsko opremo Autodesk Moldflow Insight 2024 verzijo 2024.4. Najprej smo s programom simulirali serijsko stanje izdelka. V analizi smo uporabili 3D model izdelka Okvir levi FAEM IV.

Izdelek smo popisali s 3D mrežo, in sicer s 4121575 tetraedri. Dolžina roba elementa je znašala 4,91 mm in po debelini izdelka je mreža vsebovala 10 elementov. Kakovost 3D mreže je bila ocenjena z razmerjem stranic in maksimalnim diedrskim kotom elementov (slika 39). S povprečjem razmerja stranic 8,67 je model dobro popisan. Nekaj elementov je presegalo priporočeno maksimalno razmerje stranic, ki ga priporoča program. Nekaj teh elementov, ki so odstopali od povprečja na analizo nimajo vpliva, saj je njihova lokacija na koncu tečenja in ne predstavljajo večjih odstopanj. Maksimalen diedrski kot je znašal 177,2°, kar ne predstavlja večjih težav pri izračunu. Lahko bi znašal manj, vendar bi v tem primeru še povečali število elementov.

```
Tetrahedras
-----
Entity counts:
Tetrahedra          4268356
Connected nodes     773138
Connectivity regions 4

Volume by element types:
(Mold blocks and cooling channels are
not included)
Tetra:             901.897 cm^3
Total:             940.375 cm^3

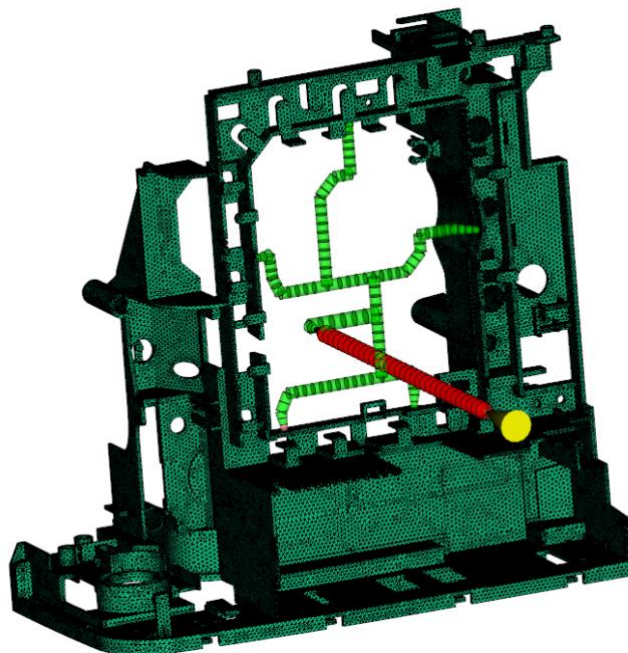
Volume by components:
Cavity:            592.993 cm^3
Inserts:           308.904 cm^3
Mold blocks:       0 cm^3

Aspect ratio:
Maximum   Average   Minimum
  81.20    8.67    1.01

Maximum dihedral angle: 177.2
```

Slika 39: Statistika 3D mreže izdelka

Celoten model za analizo je vseboval kombinacijo toplokanalnega dolivnega sistema in hladnega doliva. Za izdelavo hlajenja smo v program naložili srednjice hladilnih kanalov in jim določili lastnosti. Določili smo jim vrsto hladilnega kanala in fizikalne lastnosti, kot so dimenzije, pretok in temperatura voda v tokokrogu. Na sliki 40 je prikazana 3D mreža modela izdelka za simulacijo brizganja v programu Autodesk Moldflow. Na njej je viden popis izdelka in kombinacija toplokanalnega sistema s hladnim dolivom.



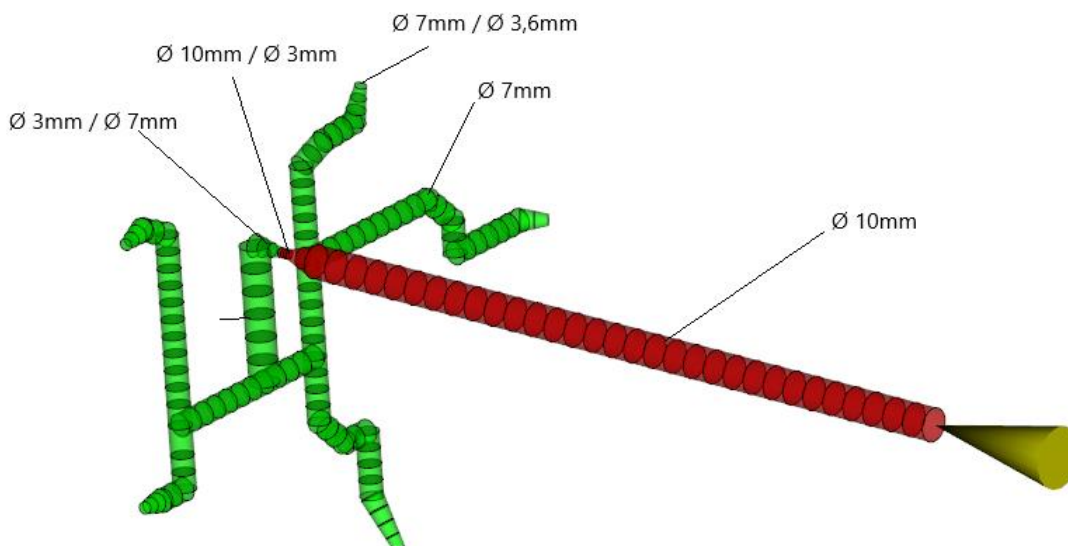
Slika 40: 3D mreža modela izdelka za simulacijo brizganja

V tabeli 3 so prikazani vhodni podatki za izvedbo numeričnih simulacij brizganja za serijsko in zadnje optimizirano stanje.

*Tabela 3: Vhodni podatki za numerično simulacijo brizganja*

Parameter	Serijsko stanje	Optimizirano stanje
Temperatura taline (°C)	220	220
Čas odpiranja orodja (s)	5	5
Skupen čas brizganja, naknadnega tlaka in hlajenja (s)	40	30
Temperatura orodja (°C)	50	30
Temperatura orodja – sistemska hladna voda (°C)	15	15
Pretok vode (l/min)	5	5
Pretok sistemske hladne vode (l/min)	3	3
Čas brizganja (s)	4	2
Naknadni tlak (bar)	45	45
Naknadni čas (s)	6	8

Na sliki 41 je prikazan simulacijski model toplokanalnega sistema s tunelskim dolivom s petimi pripetji. Z rdečo barvo je označen 10 mm notranji premer toplokanalne šobe, po kateri teče polimerni material od brizgalnega polža do hladnega doliva. Z zeleno barvo je označen razvod hladnega doliva, ki se v petih točkah dotika ustja na izdelku. Premer doliva se giblje od 3 mm do 7 mm.



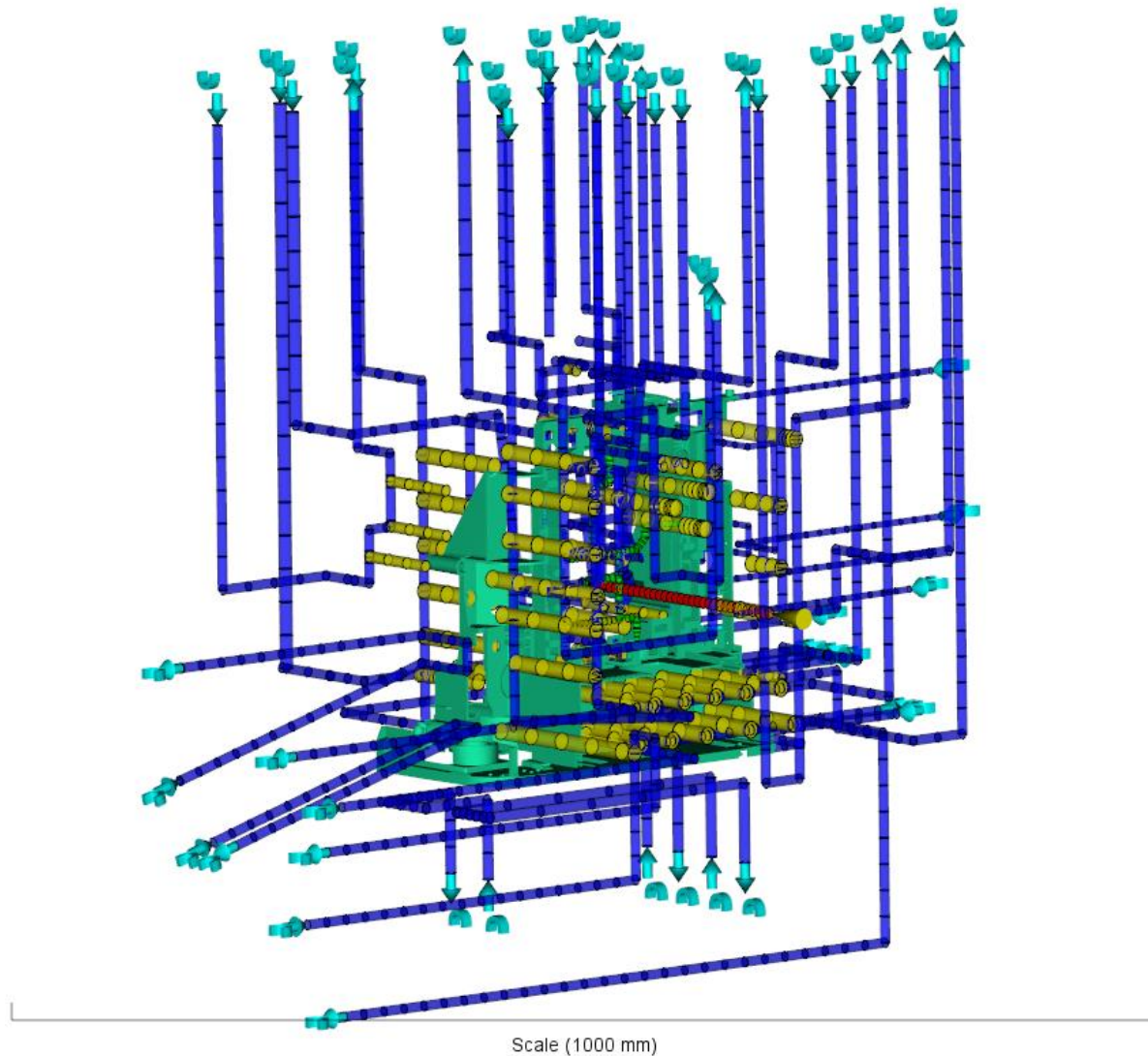
*Slika 41: Dimenzije tople šobe s hladnim 5-točkovnim dolivom*

V numeričnih simulacijah smo zaradi boljše napovedi vročih mest upoštevali tudi orodne vložke, ki so na mestih, kjer je težko izdelati dovolj učinkovito hlajenje. Orodni vložki so izdelani iz materiala Moldmax HH, ki je visoko toplotno prevodno jeklo z vrednostjo 130 W/mK. Na sliki 42 so orodni vložki označeni s sivo barvo.



Slika 42: Orodni vložki, izdelani iz materiala Moldmax HH

Na sliki 43 je prikazan model hlajenja, ki smo ga uporabili v numerični simulaciji. Orodje je imelo 27 tokokrogov, od katerih sta 2 kroga imela nastavljeno temperaturo 15 °C, ostali pa 50 °C pri serijskem oziroma 30 °C pri optimiziranem stanju. Pri vseh ponovitvah simulacije smo za hladna tokokroga uporabili pretok 3 l/min in za preostale tokokroge 5 l/min.



Slika 43: Prikaz hlajenja izdelka z vodnimi tokokrogi

## 4 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 4.1 Zajem podatkov serijskega procesa

Serijsko stanje parametrov je stanje parametrov brizganja na stroju na dan 17. 6. 2024, ko smo jih poslikali in zapisali. Proizvodnja je potekala na stroju Haitian MA7000. Pri zajemu vseh podatkov serijskega stanja stroja nismo ustavljali. Podatki so bili odvzeti potem, ko je bilo izdelanih že nekaj več kot 1500 kosov. Zabeležili smo temperaturo taline, temperaturo toplih kanalov, temperaturo orodja, pretoke vodnih kanalov, čas brizganja, čas naknadnega tlaka, čas odpiranja orodja, čas zapiranja orodja, preklonno točko procesa, čas odvzema, čas doziranja in čas hlajenja. Zabeleženi procesni časi so zbrani v tabeli 4, kjer vidimo, da je čas cikla pred optimizacijo znašal 54,4 s.

*Tabela 4: Procesni časi sekvenc serijskega procesa brizganja*

Sekvenca	Serijsko stanje (s)
Zapiranje orodja	5,5
Brizganje	4,1
Naknadni tlak	6,0
Hlajenje	25,0
Doziranje (v času hlajenja)	16,0
Odpiranje orodja	3,8
Odvzem izdelka	10,0
Čas cikla	54,4

Pri zajemu procesnih parametrov smo upoštevali temperaturo cilindra, temperaturo toplih kanalov, temperaturo temperiranja orodja in vezavo temperiranja orodja. Temperature smo odčitali s krmilne enote stroja in krmilne enote temperirne naprave. V tabeli 5 so zapisane nastavitve serijskega stanja brizganja.

*Tabela 5: Temperaturni profili serijskega procesa brizganja*

Parameter	Temperaturni profil (°C)
Temperature cilindra	220, 220, 220, 220, 215, 210
Temperature toplega kanala	220, 220, 220, 220
Temperatura orodja	Dolivna stran – 50, 50, 15; izmetalna stran – 50, 50

Vezave vodnih tokokrogov temperiranja orodja so zapisane v tabeli 3. V njej lahko vidimo, da je obstoječa vezava vodnih tokokrogov izvedena z zaporedno vezavo več tokokrogov. Predpostavljamo, da bi sprememba vezave temperiranja pripomogla k izboljšanju odvoda toplote iz orodja. Trenutna vezava v proizvodnji je takšna, da v celoti ne izkorišča potenciala temperirne naprave. Temperirne naprave omogočajo visok pretok, ki pa ga ob nepremišljeni zaporedni vezavi tokokrogov precej omejimo. S sprostitvijo dolgih vodnih tokokrogov v več krajših vzporednih vej bi lahko dosegali višje pretoke in turbulenten tok vode. S to spremembo bi vplivali na potencial odvzema toplote iz orodja. Če bi dosegli višje pretoke znotraj posameznih tokokrogov, bi lahko

govorili o spremembi laminarnega toka vode v turbulentnega, ki pa je potreben za boljši odvzem toplote.

## 4.2 Primerjava rezultatov numeričnih simulacij

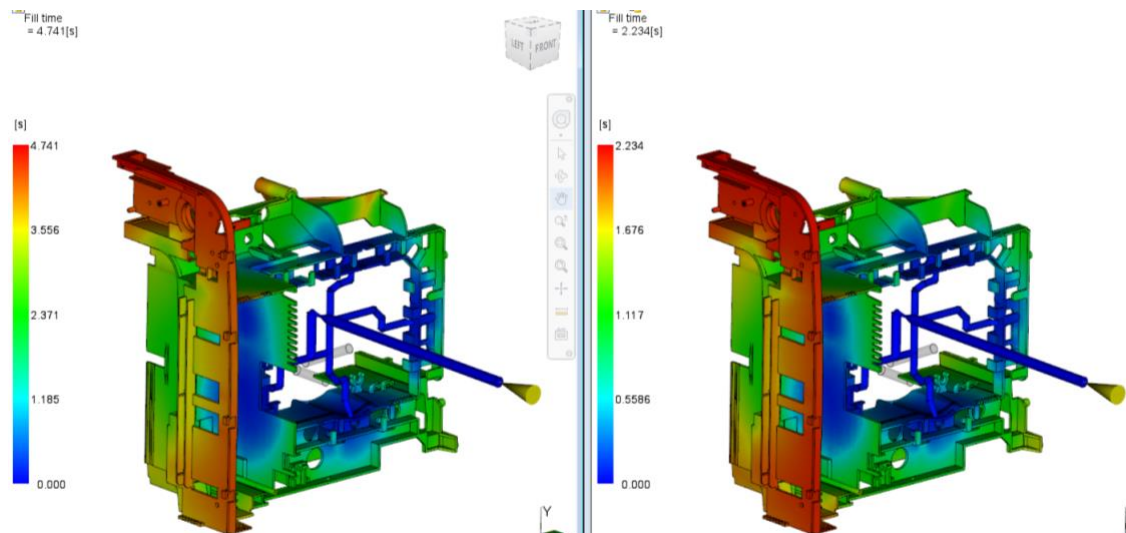
Za začetno analizo smo uporabili nastavitve iz serijske proizvodnje. Po analizi serijskega stanja smo izvedli dodatne analize, pri katerih smo ugotavljali, ali lahko izdelku skrajšamo časa brizganja in hlajenja. Če bi slednje dosegli, bi to močno vplivalo na skrajšanje časa cikla izdelka. Za nastavitve optimiziranega stanja smo izbrali hitrejši čas brizga in hladnejšo temperaturo orodja. Prav tako smo za kompenzacijo skrčka podaljšali čas delovanja naknadnega tlaka. V tabeli 6 so predstavljeni vhodni podatki za simulacijo serijskega stanja.

*Tabela 6: Vhodni podatki serijskega stanja*

Parameter	Serijsko stanje
Temperature cilindra (°C)	220, 220, 220, 220, 215, 210
Temperature toplega kanala (°C)	220, 220, 220, 220
Temperatura orodja (°C)	Dolivna stran – 50, 50, 15; Izmetalna stran – 50, 50
Čas odpiranja orodja (s)	3,8
Čas zapiranja orodja (s)	5,5
Čas naknadnega tlaka (s)	6
Čas hlajenja (s)	25
Čas brizganja (s)	4,1

### 4.2.1 Čas brizganja

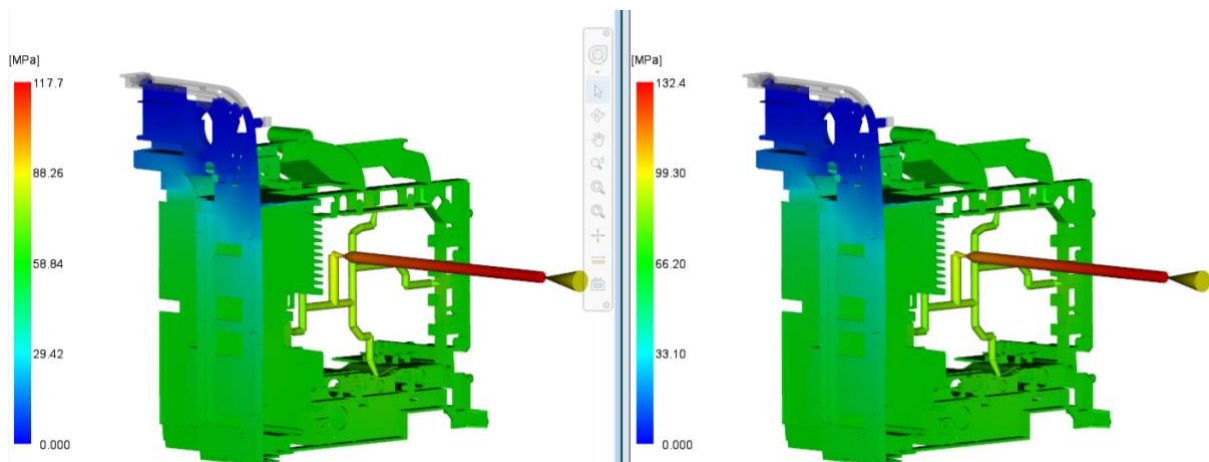
Najprej smo v simulacijo nastavili serijske parametre brizganja in tako dobili začetni rezultat časa brizganja 4,7 s. Z več iteracijami smo simulirali hitrejše zapolnjevanje izdelka. Izdelek je možno zapolniti v 2,2 s. Slika 44 prikazuje čas brizganja serijskega (levo) in optimiziranega (desno) stanja. S časom brizganja bi lahko tako pridobili 2,5 s pri času cikla izdelka. Simulacija hitrejšega brizga ni pokazala nastanka dodatnih težav z izdelkom, kot so hladni spoji, zračni vključki in pregrevanje taline.



Slika 44: Čas brizganja pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju

#### 4.2.2 Tlak brizganja

Hitrejši čas brizganja ima kot posledico zvišanje brizgalnega tlaka pri preklopu na naknadni tlak. Simulacija predvideva, da se bo brizgalni tlak pri preklopu na naknadni tlak dvignil s 117 MPa pri serijskem stanju na 132 MPa pri optimiziranem stanju. Iz slike 45 je razvidna tudi pozicija preklopa na naknadni tlak, kjer je v sivinah označen še ne zapolnjen del izdelka.

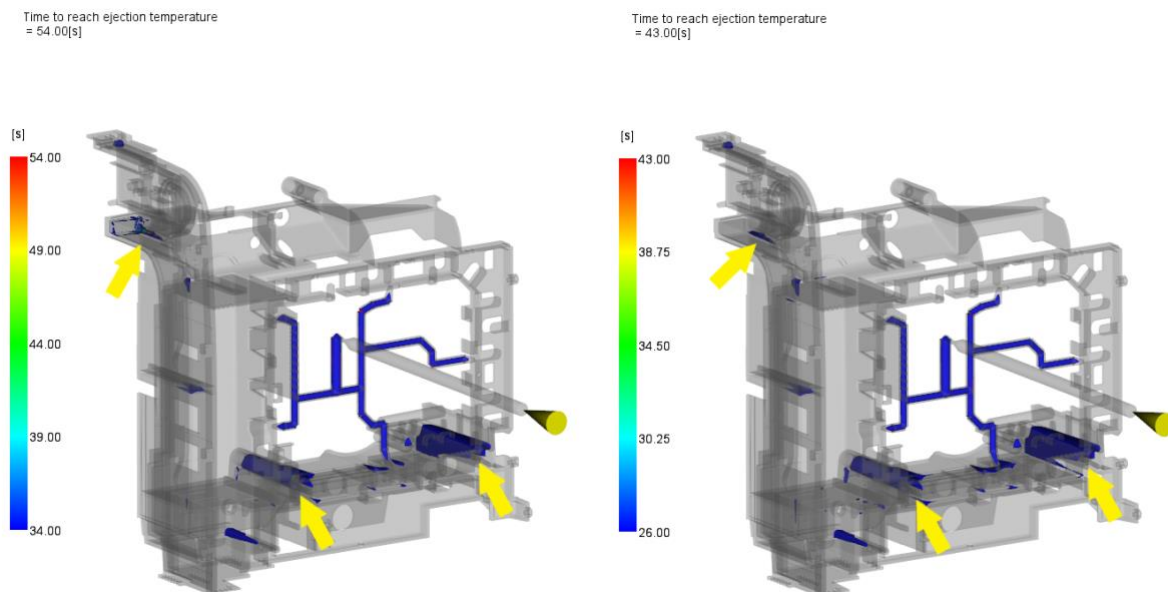


Slika 45: Tlak brizganja pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju

#### 4.2.3 Vroča mesta

Pri analizi vročih mest smo v simulaciji za primerjavo opazovali stanje izdelka v skupnem času brizganja, naknadnega tlaka in hlajenja. Skupni čas pri serijskem stanju je znašal 35 s (čas brizganja 4 s, čas delovanja naknadnega tlaka 6 s in čas hlajenja 25 s) in pri optimiziranem stanju 26 s (čas brizganja 2 s, čas delovanja naknadnega tlaka 8 s in čas hlajenja 16 s). Na podlagi primerjave vročih mest na sliki 46 lahko

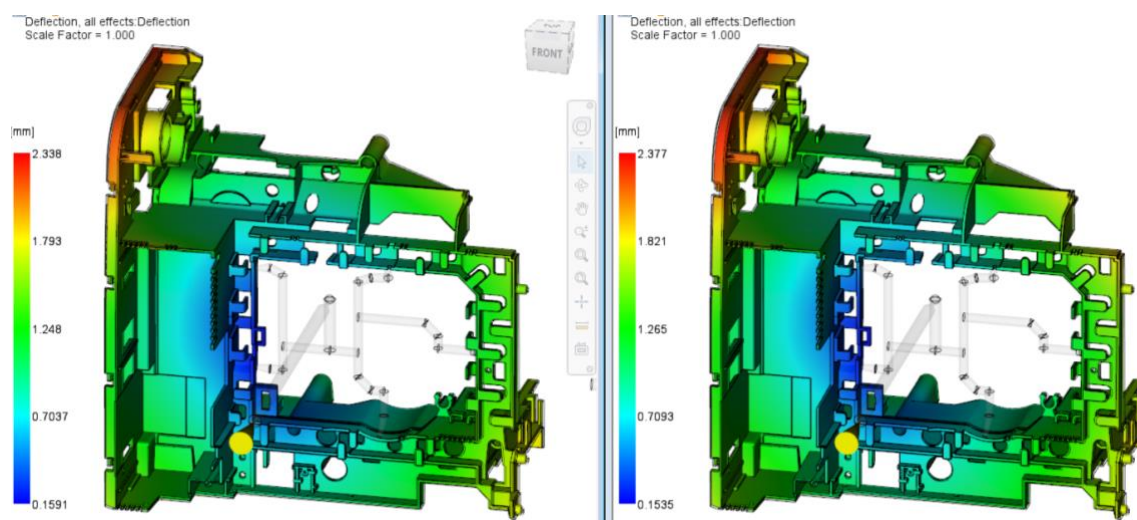
vidimo, da se stanje vročih mest zaradi krajšanja časa brizga in spremembe hlajenja ni poslabšalo. Lahko bi rekli, da je stanje vročih mest ostalo nespremenjeno. Vroča mesta na izdelku nastanejo zaradi slabšega hlajenja na kritičnih mestih. Orodni vložki na teh mestih so izdelani iz materialov Ampcoloy in Moldmax HH, ki sta temperaturno bolj prevodna. Za kar se da najboljši odvod toplote te vložke dodatno hladimo s hladno sistemsko vodo temperature 15 °C. Vroča mesta ne vplivajo na to, da izdelka ne bi bilo mogoče izmetavati. Položaj izmetačev izdelka je na mestih, kjer je stena izdelka že dosegla temperaturo izmetavanja. Vroča mesta v simulaciji sovpadajo z vročimi mesti, ki smo jih posneli s termo kamero.



Slika 46: Vroča mesta pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju

#### 4.2.4 Skupna deformacija izdelka

Pri analizi skupne deformacije izdelka smo primerjali stanje deformacij serijskega in optimiziranega stanja. Na sliki 47 vidimo, da na nekaterih mestih izdelka predvideva odstopanja za 2,3 mm od 3D modela izdelka. Deformacije lahko delno kompenziramo z delovanjem naknadnega tlaka in hlajenjem. Da bi dosegli izboljšanje serijskega stanja, bi podaljšali čas delovanja naknadnega tlaka in znižali temperaturo orodja, ki bi nam omogočila krajšanje časa hlajenja. Nastavitev časa delovanja naknadnega tlaka je bila pri serijskem stanju 6 s in pri optimiziranem stanju 8 s. Bistvenih razlik pri simulaciji deformacij serijskega in optimiziranega stanja ni zaznati.



Slika 47: Skupna deformacija pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju

### 4.3 Uvedba rezultatov simulacije v proizvodnjo

Da bi v serijski proizvodnji dosegli hitrejši čas brizganja, smo na stroju povišali vrednosti hitrosti brizganja in dosegli čas brizganja 2,1 s. Podaljšali smo čas delovanja naknadnega tlaka iz 6 s na 8 s, da bi dodatno zmanjšali skrčec, kot je to pokazala analiza Moldflow. Prav tako smo znižali temperaturo orodja s 50 °C na 30 °C in s spremembo vezave vod dosegli, da smo čas hlajenja lahko zmanjšali s 25 s na 16 s. S časom hlajenja smo presegli celo napoved analize Moldflow, ki je sprva kazala enako stanje pri 18,7 s hlajenja. Temperatura izmetavanja optimiziranega stanja je sovpadala s temperaturo izmetavanja serijskega stanja, kar smo preverili s termo kamero. Maksimalna temperatura izmetavanja je lepo sovpadala s stanjem pred optimizacijo. Vrednosti parametrov za serijsko in optimizirano stanje so prikazane v tabeli 7.

Tabela 7: Primerjava parametrov serijskega in optimiziranega stanja

Parameter	Serijsko stanje	Optimizirano stanje
Temperature cilindra (°C)	220, 220, 220, 220, 215, 210	220, 220, 220, 220, 215, 210
Temperature toplega kanala (°C)	220, 220, 220, 220	220, 220, 220, 220
Temperatura orodja (°C)	Dolivna stran – 50, 50, 15; Izmetalna stran – 50, 50	Dolivna stran – 30, 30, 15, 15; Izmetalna stran – 30, 30
Čas odpiranja orodja (s)	3,8	3,8
Čas zapiranja orodja (s)	5,5	3,0
Hitrosti brizganja (mm/s)	18, 22, 28, 28, 26	40, 50, 50, 50, 40
Čas naknadnega tlaka (s)	6	8
Čas hlajenja (s)	25	16
Čas brizganja (s)	4,1	2,1
Čas doziranja (s; v času hlajenja)	16,0	11,0
Čas odvzema izdelka (s)	10,0	10,0
Čas cikla (s)	54,4	42,9

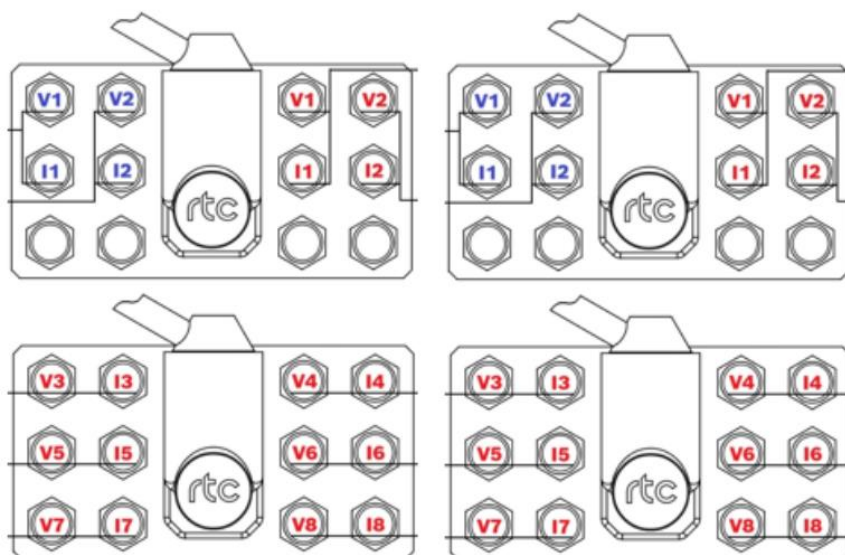
Da bi izničili vpliv vezave vodnih tokokrogov, bomo vezavo izboljšali do te mere, da bo stanje bližje hlajenju, ki ga privzeto uporablja Moldflow. Vezavo tokokrogov smo prilagodili tako, kot je prikazano v tabeli 8. Želja je bila, da iz serijske zaporedne vezave izvedemo vezavo, ki bo imela vzporedne tokokroge. Zaradi velikega števila tokokrogov takšne vezave v popolnosti ni bilo mogoče izvesti. Zato smo nekatere tokokroge še vedno vezali zaporedno. Lahko trdimo, da je s to vezavo precej izboljšano hlajenje orodja in s tem približano hlajenju simulacije. Krogi, ki so vezani vzporedno, so imeli višji pretok. Vezavo smo prilagodili tako, da vsaka temperirna naprava omogoča vzporedno vezavo tokokrogov z razdelilno enoto. Na dolivni strani orodja smo na vsako od dveh temperirnih enot priključili po štiri tokokroge. Na izmetalni strani orodja smo na vsako od temperirnih naprav prav tako priključili po štiri tokokroge. Zaradi velikega števila tokokrogov na orodju smo tri od štirih tokokrogov temperirne naprave 2 še vedno vezali zaporedno. V večji meri so to tokokrogi, ki hladijo plošče orodja in izmetalni paket orodja.

*Tabela 8: Vezava vodnih kanalov po optimizaciji*

Stran orodja	Vir vode	Oznaka tokokroga na hitri sklopki	Vezava tokokrogov na orodju
Dolivna	Temperirna naprava 1	V1-I1	V1-I1
		V3-I3	V2-I2
		V5-I5	V3-I3
		V7-I7	V4-I4
	Temperirna naprava 2	V2-I2	V9-I9
		V4-I4	V8-I8
		V6-I6	V7-U7
		V8-I8	V5-I5
	Hladilni sistem	V1-I1	V6-I6
		V2-I2	V10-I10
Izmetalna	Temperirna naprava 1	V1-I1	V11-I11
		V3-I3	V12-I12
		V5-I5	V13-I13
		V7-I7	V14-I14
	Temperirna naprava 2	V2-I2	V15-I15-V16-I16
		V4-I4	V17-I17
		V6-I6	V18-I18-V19-I19-V20-I20-V22-I22-V21-I21
		V8-I8	V24-I24-V25-I25-V26-I26-V27-I27-V23-I23
	Hladilni sistem	V1-I1	Ni v uporabi
		V2-I2	Ni v uporabi

Sprememba vezave tokokrogov pomeni, da je bila na stroju potrebna prilagoditev priključkov hitrih sklopk. S to spremembo bomo povečali odvzem toplote iz orodja, razbremenili tlak v temperirnih napravah in povečali turbulenten tok vode v tokokrogih. Na sliki 48 je prikazan nov način priklopa vod s hitrimi sklopkami, in sicer sta sedaj na vsaki strani orodja po dve hitri sklopki. Prva hitra sklopka vsebuje dva tokokroga iz temperirnih naprav (rdeča oznaka) in en tokokrog hladne systemske vode (modra oznaka). Druga dodatna hitra sklopka pa vsebuje dodatnih šest tokokrogov. Liha števila tokokrogov so del temperirne naprave 1; soda števila tokokrogov so del temperirne naprave 2.

Dodatni tokokrogi omogočajo razbremenitev temperirnih naprav, povečajo izkoristek in odvzem toplote iz orodja. S to spremembo temperiranja ne bomo podrli obstoječega standarda temperiranja orodij v podjetju in bo imela vlogo dodatne opcije pri orodjih, ki zahtevajo večji odvzem toplote. Z vzpostavitvijo novega načina temperiranja smo postavili temelj nadaljnjih optimizaciji v proizvodnji in zastavili temperiranje novih orodij.



Slika 48: Priklop vode s hitrimi sklopkami optimiziranega stanja

#### 4.4 Primerjava termogramov

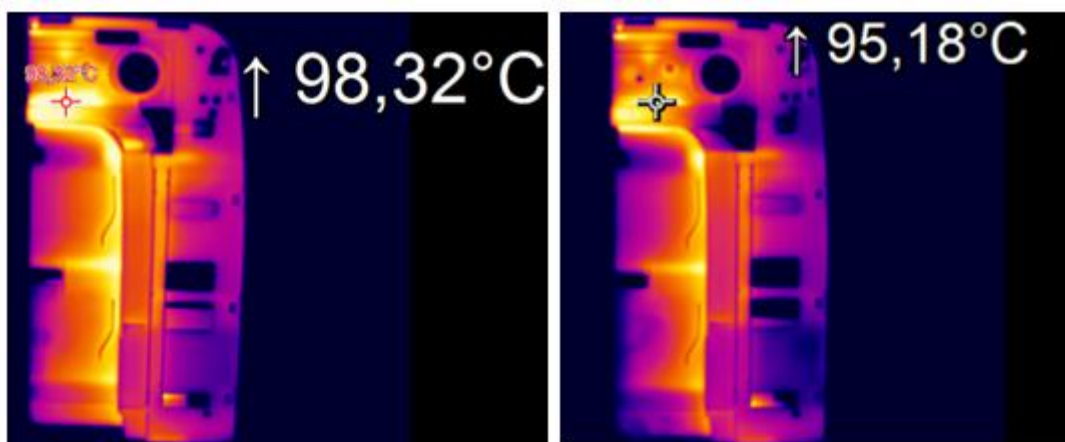
Za pomoč pri optimizaciji procesa smo posneli termograme izdelka pred in po optimizaciji procesa brizganja. Na njih je mogoče videti lokalna pregrevanja in maksimalno zabeleženo temperaturo na vročih mestih, ki nam je lahko vodilo za optimiziranje procesa. Če na izdelku ohranimo temperaturo izmetavanja enako kot pred optimizacijo, bi lahko govorili o tem, da večja merska odstopanja ne bi smela nastati. Na slikah 14, 15 in 16 so predstavljeni trije pogledi termogramov izdelka Okvir levi FAEM IV serijskega in optimiziranega stanja.

Za zajem podatkov serijskega stanja se stroja ni ustavljalo. Pri zajemu termograma optimiziranega stanja smo pod nastavljenimi pogoji proizvajali 30 minut. Nato smo

posneli termograme za tri zaporedne izdelke. Za termo in mersko analizo smo si shranili 10 vzorcev izdelka, in sicer zaporedne brizge od 51 do 60.

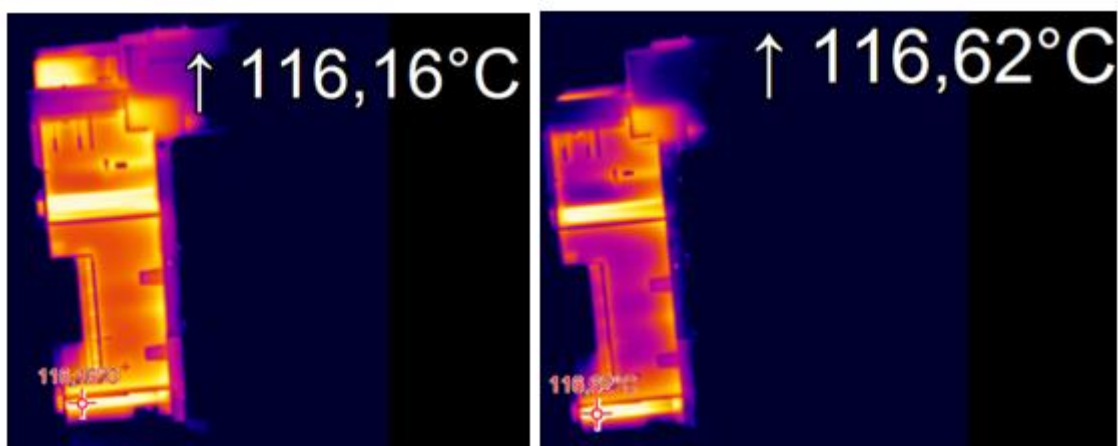
Postopek smo izvedli tako, da smo pol ure proizvajali v avtomatskem načinu. Nato smo izdelek, ki ga je na transportni trak odložil robot, vzeli v roke in ga postavili na mesto, kjer smo posneli termo posnetek. Med odlaganjem na trak in meritvijo je preteklo 10 sekund. Meritev smo ponovili za 5 zaporednih izdelkov ter se tako prepričali o ponovljivosti zajema termo slike. Izdelek smo pri zajemu posnetkov obračali ročno in vedno v enakem vrstnem redu pogledov.

Pod drobnogled smo na termogramih vzeli maksimalne temperature v treh pogledih, ki nam bodo v pomoč pri spremljanju sprememb v procesu. Če nam uspe v procesu ohraniti način ohlajanja izdelka zunaj orodja, ki je primerljiv s serijskim stanjem, bi lahko govorili o tem, da smo proces uspešno optimizirali. Maksimalna temperatura se je pri serijskem stanju z  $98,32\text{ °C}$  zmanjšala na  $95,18\text{ °C}$  pri optimiziranem stanju (slika 49). Pri primerjavi serijskega in optimiziranega stanja ugotavljamo, da se je maksimalna temperatura pri pogledu 1 zmanjšala, kar nakazuje, da je na izdelku prišlo do izboljšanja odvoda toplote.



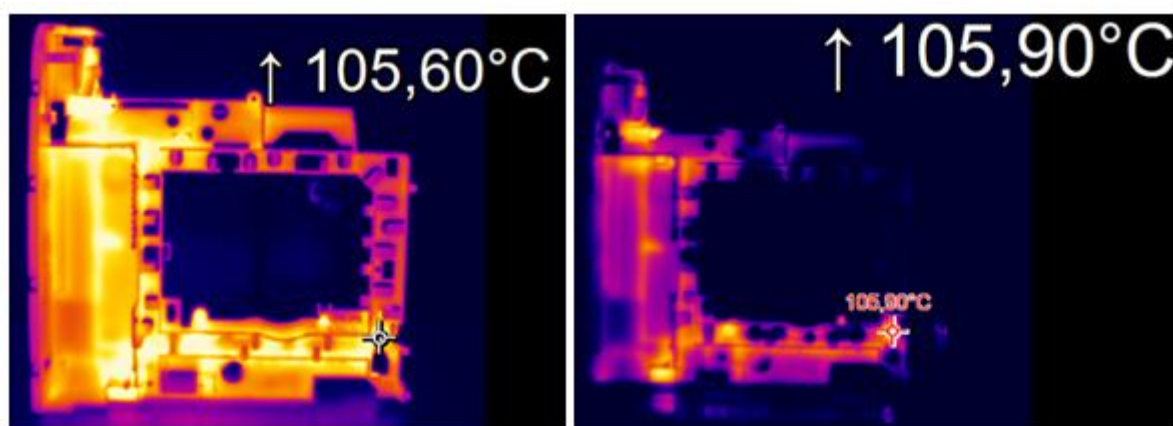
Slika 49: Termogram serijskega (levo) in optimiziranega stanja (desno) – pogled 1

Pri pogledu 2 se je maksimalna temperatura izdelka s  $116,16\text{ °C}$  pri serijskem stanju dvignila na  $116,62\text{ °C}$  pri optimiziranem stanju (slika 50). Ugotovimo, da do bistvene spremembe v maksimalni temperaturi ni prišlo. Izdelek je na preostalih površinah imel nižjo temperaturo, kar je posledica nižje temperature orodja pri optimiziranem stanju.



Slika 50: Termogram serijskega (levo) in optimiziranega stanja (desno) – pogled 2

Pri pogledu 3 se je maksimalna temperatura izdelka s 105,60 °C pri serijskem stanju zmanjšala na 105,9 °C pri optimiziranem stanju (slika 51). Ugotavljamo prav tako, da ni prišlo do bistvenih sprememb.



Slika 51: Termogram serijskega (levo) in optimiziranega stanja (desno) – pogled 3

Iz primerjave termogramov v tabeli 9 pred in po optimizaciji časa cikla izdelka lahko zaključimo, da zaradi krajšega časa cikla ni prišlo do dodatnih lokalnih pregrevanj. Sklepamo, da smo izdelku primerno izboljšali hlajenje s spremembo načina in temperature temperiranja orodja. S to spremembo smo dosegli, da smo v krajšem času hlajenja odvedli enako količino toplote.

Tabela 9: Primerjava opazovanih točk termogramov

Postavitev izdelka	Serijsko stanje	Optimizirano stanje
Pogled 1	98,32 °C	95,18 °C
Pogled 2	116,16 °C	116,62 °C
Pogled 3	105,60 °C	105,90 °C

## 4.5 Primerjava meritev

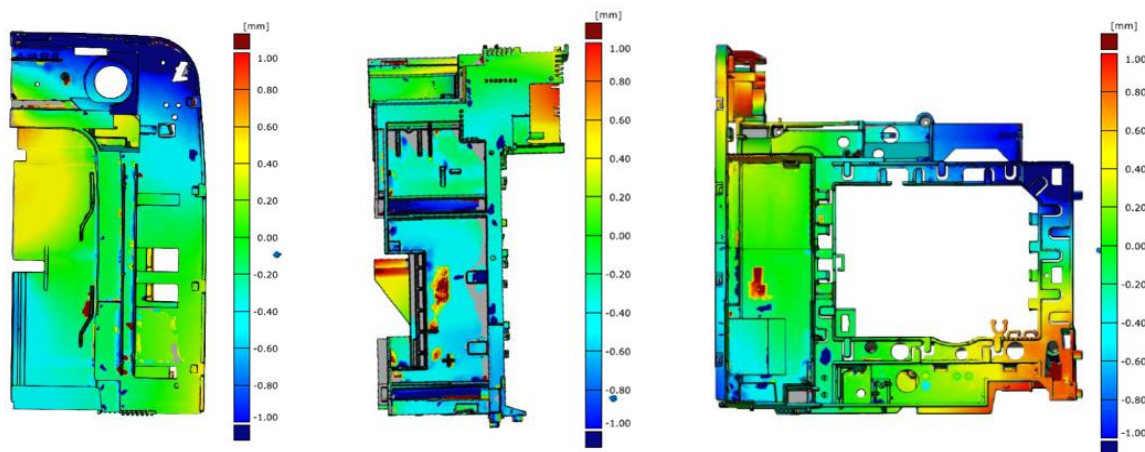
Mersko analizo izdelka smo izvedli na Zeiss Scanbox 5. Primerjali smo serijski in optimiziran izdelek v primerjavi s 3D modelom izdelka z najboljšo poravnavo. Prav tako smo z merilno napravo izvedli meritev dveh ključnih statističnih mer, ki jih nadziramo v času proizvodnje izdelka. Nominalni vrednosti in toleranci kontrolnih točk so zapisane v tabeli 10.

*Tabela 10: Statistični meri za nadzor procesa brizganja*

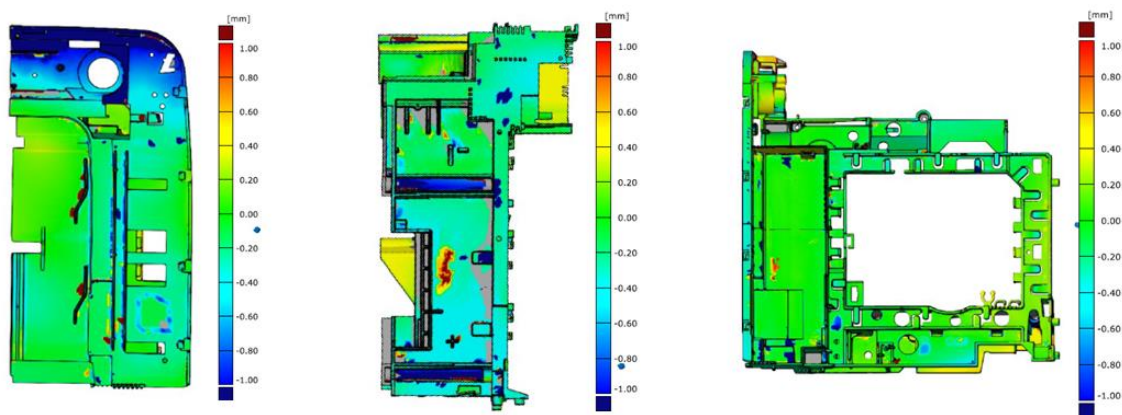
Kontrolna točka	Nominalna vrednost	Negativna toleranca	Pozitivna toleranca
Točka 1	175,75 mm	-0,4 mm	0,4 mm
Točka 2	134,4 mm	-0,4 mm	0,4 mm

Primerjalna analiza na sliki 52 je pokazala določena odstopanja pri serijskem izdelku. Deformacije so na nekaterih mestih izdelka znašale po 1 mm. Nekaj deformacij nastaja ravno na najbolj vročih mestih izdelka, nekatere pa tudi na drugih mestih. Vidimo, da je izdelek na nekaterih mestih nekoliko torzijsko zvit. Slednje za sestavo izdelka na montažni liniji ne predstavlja večjih težav.

Meritve izdelka z optimiziranim stanjem so vidne na sliki 53. Na podlagi primerjave optimiziranega stanja s serijskim stanjem izdelka lahko govorimo o izboljšanju dimenzijske stabilnosti izdelka. Na nekaterih mestih izdelka smo v celoti ohranili dimenzijska odstopanja. Predvsem lahko govorimo, da smo z novimi nastavitvami dosegli celo zmanjšanje deformacij. Torzijska zvitost izdelka je pri optimiziranem stanju skoraj neopazna.



*Slika 52: Deformacije serijskega stanja izdelka v treh pogledih*



Slika 53: Deformacije optimiziranega stanja izdelka v treh pogledih

V tabeli 11 so predstavljene meritve kontrolnih točk serijskega izdelka in optimiziranega izdelka. Opazimo, da smo se z obema kontrolnima točkama bolj približali nominalni vrednosti toleranc. Slednje pomeni, da smo po optimizaciji procesa izboljšali meritve izdelka.

Tabela 11: Primerjava meritev kontrolnih točk izdelka

Kontrolna točka	Nominalna vrednost	Negativna toleranca	Pozitivna toleranca	Dejanska vrednost		Odstopanje od nominalne vrednosti	
				Serijsko stanje	Optimizirano stanje	Serijsko stanje	Optimizirano stanje
Točka 1	175,75 mm	-0,4 mm	0,4 mm	175,43 mm	175,60 mm	-0,32 mm	-0,15 mm
Točka 2	134,4 mm	-0,4 mm	0,4 mm	134,16 mm	134,31 mm	-0,24 mm	-0,09 mm

## 4.6 Kapaciteta stroja

Z optimizacijo časa cikla s 54,4 s na 42,9 s smo posledično dosegli, da lahko v krajšem časovnem obdobju sedaj izdelamo večjo količino izdelkov. S krajšim časom cikla izdelka smo naredili vpliv tudi na skupno zasedenost stroja, na katerem se skozi leto proizvaja izdelek. Omeniti velja, da se na dotičnem stroju proizvajajo tudi drugi izdelki. V tabeli 12 vidimo podatke, kako se je zasedenost stroja zmanjšala samo zaradi spremembe časa cikla izdelka. Zasedenost blizu 80 % za proizvodnjo že lahko predstavlja težavo, saj mora pri planiranju proizvodnje vedno biti nekaj manevrskega prostora za vzdrževanje stroja in za nenaden dvig proizvodnih količin glede na stanje na trgu. Za mesece oktober, november in december je pred spremembo časa cikla stroj imel zasedenost 72 %, 72 % in 78 %, kar v celotnem letu znaša 232 dni od 313 razpoložljivih dni proizvodnje. Po naši spremembi se je zasedenost stroja za omenjeno tromesečje zmanjšala na 60 %, 60 % in 65 %. S tem smo dosegli sprostitev 39 dni proizvodnje.

*Tabela 12: Kapaciteta stroja Haitian MA7000 pred in po optimizaciji*

Čas cikla (s)	Zasedenost stroja po mesecih (%)			Zasedenost stroja v letu (dni)	Prihranek kapacitet v letu (dni)
	Oktober	November	December		
54,4	72	72	78	232	/
42,9	60	60	65	193	39

## 4.7 Prihranek

Prihranek, ki nastane zaradi hitrejšega časa cikla, je razdeljen na strojni del in strošek dela. Zaradi poslovne skrivnosti strojnih ur in drugih občutljivih podatkov celotnega izračuna prihranka ne moremo deliti. Lahko povemo, da je prihranek strojne ure znašal 0,022 € na čas cikla izdelka. Na letno količino izdelkov znese prihranek v strojnih urah 6933 €. Prav tako je prihranek nastal pri stroških dela neposredno vpletenih delavcev v proces. Pri tem je prihranek stroška dela znašal 0,032 € na čas cikla izdelka. Na proizvedeno letno količino pa je prihranek pri strošku dela znašal 10.132 €. Skupen letni prihranek je tako znašal 17.065 €. Za doseganje prihranka je v procesu predelave načina hlajenja na stroju nastalo stroškov za 3500 €. Ocenimo, da je realen letni prihranek 13.565 €.

## 5 SKLEP

V magistrskem delu smo optimizirali proces brizganja izdelka s pomočjo numeričnih simulacij. Preverili smo vse potenciale, ki jih je imel obstoječi proces v proizvodnji. Pri tem smo si zadali dve hipotezi. Predvidevali smo, da bi s spremembo načina hlajenja in optimizacijo parametrov brizganja izdelka skrajšali čas cikla od 10 % do 20 %. Hkrati smo želeli z vsemi vpeljanimi spremembami ohraniti mersko ustreznost izdelka.

Ugotovili smo, da obstoječ način temperiranja orodij ni zadovoljiv. Zaradi zaporedne vezave tokokrogov smo ugotovili, da je izhodna temperatura vode precej višja od nastavljene vrednosti. S tem je sovpadalo tudi, da so pretoki ob takšni vezavi nižjih vrednosti in niso dosegali minimalnih standardov za turbulenten tok temperiranja. Sklenili smo, da spremenimo način temperiranja tako, da izkoristimo potencial temperirne naprave in orodja. Z uporabo večjega števila vzporednih tokokrogov smo razbremenili delovanje temperirnih naprav in povečali pretoke glede na predhodno vezavo. S tem smo na orodju pridobili odvzem toplote z izdelka.

S pomočjo numeričnih simulacij smo prišli do rezultata, da lahko izdelek zapolnimo v dveh sekundah. Slednje je pomenilo, da smo v proizvodnji nastavili višje vrednosti hitrosti brizganja in tako prihranili 2 s na račun časa brizganja.

Prvo hipotezo lahko potrdimo, saj smo čas cikla izdelka uspešno zmanjšali za 21 %. Čas cikla smo znižali s 54,4 s na 42,9 s. Z vpeljšano spremembo načina temperiranja smo izvedli numerično simulacijo na novo načrtanega procesa brizganja. Primerjali smo začetno serijsko stanje in iskali procesne parametre, ki bi nam zagotovili krajši čas cikla izdelka. Pri tem smo ugotovili, da lahko znatno zmanjšamo čas hlajenja zaradi spremembe v načinu temperiranja. Pri simulacijskem modelu smo opazovali vroča mesta serijskega stanja in jih želeli ohraniti v enaki meri pri optimiziranem stanju. Simulacijsko stanje vročih mest smo nato pri uvedbi v proizvodnjo spremljali tudi s pomočjo termo kamere, ki nam je pokazala, da smo na merjenjih mestih ohranili enako temperaturo pri izmetavanju izdelka.

Potrdili smo tudi drugo hipotezo, saj smo z optimizacijo procesnih parametrov ohranili mersko ustreznost izdelka in pripomogli h krajšemu času cikla. Z optimizacijo časa naknadnega tlaka smo ohranili mersko ustreznost. Pri tem nismo prihranili časa, temveč smo za 2 s podaljšali delovanje naknadnega tlaka, ki je pripomoglo h konstanti masi in merski ustreznosti izdelka.

Kot posledica optimizacije časa cikla so se na stroju tako sprostile dodatne kapacitete, ki omogočajo brizganje drugih orodij. Ob tem se je sprostilo za 39 delovnih dni proizvodnje. Obenem smo za podjetje ustvarili tudi prihranek v denarju. Po izračunu smo podjetju letno prihranili 13.565 €. Prihranek izhaja predvsem iz znižanja stroškov dela in stroja. Prav tako optimizacija predstavlja začetek in osnovo za vse nadaljnje optimizacije procesov brizganja izdelkov v podjetju BSH Hišni aparati d. o. o. Nazarje.

V podjetju BSH Hišni aparati d. o. o. Nazarje smo se odločili, da bomo izvedli nadgradnjo obstoječega načina hlajenja. Slednje bomo izvedli na način, ki je predstavljen v magistrskem delu. S tem bomo pripomogli k razbremenitvi temperirnih naprav in povečanju ločenih vzporednih tokokrogov. Preprečili bomo nekatera lokalna pregrevanja temperirne vode zaradi dolgih zaporednih krogov.

Uporaba numeričnih simulacij se je za optimizacijo procesa brizganja izkazala za odlično orodje pri napovedi rezultatov. V nadaljnjem delu znotraj podjetja bomo nadaljevali z uporabo numeričnih simulacij z namenom optimiziranja obstoječih proizvodnih procesov in pri načrtovanju novih procesov.

**SEZNAM LITERATURE IN VIROV**

- [1] S.Y. Martowibowo, A. Kaswadi, Optimization and Simulation of Plastic Injection Process using Genetic Algorithm and Moldflow, *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed. 30 (2017) 398–406. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0081-9>.*
- [2] A. Chaabene, S. Chatti, M. Ben Slama, Optimization of the cooling of a thermoplastic injection mold, *Galati Univ. Press. 32 (2021) 61–70. <https://doi.org/https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/awet/article/view/4994>.*
- [3] M. Vishnuvarthanan, R. Panda, S. Ilangovan, Optimization of injection molding cycle time using moldflow analysis, *Middle East J. Sci. Res. 13 (2013) 944–946. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.13.7.2934>.*
- [4] S.H. Masood, I. Sciences, Cycle time reduction in injection moulding with conformal cooling channels, *Int. Conf. Mech. Eng. 2007. AM-42 (2007) 29–31.*
- [5] B. Nardin, Tehnologije predelave polimernih materialov, *Fak. za Tehnol. Polim. - izročki. (2025).*
- [6] S.K. Selvaraj, A. Raj, R.R. Mahadevan, U. Chadha, V. Paramasivam, *Molding Machines, Hindawi - Adv. Mater. Sci. Eng. (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/1949061>.*
- [7] M. Czepiel, M. Ba, *Advanced Injection Molding Methods : Review, MDPI Polym. - Mater. 16, 5802 (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16175802>.*
- [8] D.E. Dimla, M. Camilotto, F. Miani, Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools, *J. Mater. Process. Technol. 164–165 (2005) 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.162>.*
- [9] Ronan Ye, *Injection Molding Parameters, (2023) Injection Molding Parameters. <https://www.3erp.com/blog/injection-molding-parameters/#:~:text=Injection molding parameters are the,impacts the product's structural integrity>.*
- [10] M. Moayyedian, *Intelligent optimization of mold design and process parameters in injection molding, 2019. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-03356-9\\_2](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-03356-9_2) 13.*
- [11] Y. Wang, C. Lee, Design and Optimization of Conformal Cooling Channels for Increasing Cooling Efficiency in Injection Molding, *MDPI - Appl. Sci. 13, 7437 (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app13137437>.*
- [12] Octex, *Reducing Cycle Times in Large-Scale Injection Molding, (2025). <https://www.octexgroup.com/blog/reducing-cycle-times-in-large-scale-injection-molding/>.*
- [13] A. Glojek, *Orodje za brizganje polimernih materialov, Fak. za Tehnol. Polim. - izročki. (2025) 1–37.*
- [14] C.A. Harper, *Handbook of plastic processes, A John Wiley & Sons, 2006.*
- [15] HASCO Hasenclever GmbH + Co KG, *Hasco - izmetač, (2025). <https://www.hasco.com/sl/Katalog-izdelkov/Z-szabv%25C3%25A1nyos-alkatr%25C3%25A9szek/lzmeta%25C4%258D/lzmeta%25C4%258D/c/PIM030301>.*
- [16] Walsh's Plastic consulting, *Stripper plate and valve ejection, (2025).*

- <https://plasticmolddesign.wordpress.com/strip-plate-and-valve-ejection/>.
- [17] L.Q. Tang, C. Chassapis, S. Manoochchri, Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding, 26 (1997) 229–251.
- [18] D.J. de B. J. Combrinck, B. van As, G.J. Booyesen, Cost-effectiveness of direct metal laser sintered maraging steel inserts for plastic injection moulding process, Journal, South African November, Ind. Eng. Ed. Spec. 30 (2019) 52–62.
- [19] H. Rees, Understanding injection mold design, Carl Hanser Verlag, Munich, Munich, 2001.
- [20] P.M. Patil, A.P. Yadav, P.A. Patil, Comparative study between heat transfer through laminar flow and turbulent flow, IJIRSET. 4 (2015) 2223–2226. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404076>.
- [21] G. Wagner, M. Nóbrega, Conformal cooling channels in injection molding and heat transfer performance analysis through CFD, MDPI - energies. (2025). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en18081972>.
- [22] J.G.K. Béla Zink, Ferenc Szabó, István Hatos, András Suplicz, Norbert Krisztián Kovács, Hajnalka Hargitai, Tamás Tábi, Enhanced injection molding simulation of advanced injection molds, MDPI Polym. (2017). <https://doi.org/10.3390/polym9020077>.
- [23] R.A. Mesquita, Tool steels - Properties and performance, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, 2017.
- [24] Rovalma, High yield strength at elevated temperature and high wear resistance tool steel with, Rovalma, S.A. (2021).
- [25] T. Lucyshyn, L. Des Enffans, C. Holzer, Influence of the mold material on the injection molding cycle time and warpage depending on the polymer processed, MDPI Polym. 13 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym13183196>.
- [26] J. Hopewell, R. Dvorak, E. Kosior, Plastics recycling: challenges and opportunities, Philos. Trans. R. Soc. B. 364 (2009).
- [27] Ž. Loboda, Vodnik za konstruiranje izdelkov iz polimernih materialov, (2023).
- [28] T. Cedorge, J. Colton, Draft angle and surface roughness effects on stereolithography molds, Polym. Eng. Sci. 40 (2000) 1581–1588.
- [29] Jay Shoemaker, Moldflow design guide, Hanser Gardner Publ. Inc. (2006).
- [30] T.C. and J. Courter, Purging old misconceptions: best practices for meshing in simulation moldflow insight, (2007).
- [31] Autodesk, Moldflow mesh tutorial, Autodesk moldflow insight Help. (2024). [https://help.autodesk.com/view/MFIA/2024/ENU/?guid=MoldflowInsight\\_CLC\\_Modelprep\\_Mesh\\_Mesh\\_statistics\\_html](https://help.autodesk.com/view/MFIA/2024/ENU/?guid=MoldflowInsight_CLC_Modelprep_Mesh_Mesh_statistics_html).
- [32] Moldflow Plastics Insight, Moldflow Corp. (2006).
- [33] M. Amitava, Fundamentals of quality control and improvement, John Wiley and Sons Inc, 2016.
- [34] Rajko Kokol, Statistično obvladovanje procesa, (2004).
- [35] A. Kus, Implementation of 3D optical scanning technology for automotive applications, MDPI. 9 (2009) 1967–1979. <https://doi.org/10.3390/s90301967>.

- 
- [36] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, Infrared physics & technology infrared thermography for condition monitoring, *Infrared Phys. Technol.* 60 (2013) 35–55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>.
- [37] K. Bula, L. Róžański, L. Marciniak-podsadna, D. Wróbel, The use of IR thermography to show the mold and part temperature evolution in injection molding, 00 (2016) 40–43. <https://doi.org/10.1515/amtm-2016-0008>.
- [38] L. Techawinyutham, W. Techawinyutham, K. Insawang, M.R. Sanjay, S. Siengchin, Possibility of infrared ( IR ) thermography camera to investigate properties of injected plastic product and optimisation injection process parameter using a design of experiment, *Adv. Mater. Process. Technol.* 10 (2024) 1501–1522. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2193452>.
- [39] A. Bendada, A. Derdouri, Y. Simard, M. Lamontagne, Advances in infrared technology for the online monitoring of injection moulding: application to the understanding of the nature of contact at the polymer – mould interface, 5 (2007) 431–451.
- [40] Chi mei corporation, Datasheet - ABS polylac PA-757H, (2017).
- [41] Robos d.o.o., Temperirne naprave, (2022). <https://www.robos.si/roboti-temperirne-naprave-susilci-mlini-dozatorji/temperirne-naprave-in-regulatorji-pretoka-2/temperirne-naprave/>.
- [42] Optris GmbH, Optris PI 450, (2025). <https://optris.com/products/infrared-cameras/precision-line/pi-450i/>.

**SEZNAM SLIK**

Slika 1: Sestavni deli brizgalnega stroja [6]	3
Slika 2: Grafični prikaz razdelitve časa cikla brizganja [8]	6
Slika 3: Diagram tlaka v času za proces brizganja [5]	6
Slika 4: Sestavni deli orodja [13]	10
Slika 5: Osnovno orodje [13]	10
Slika 6: Orodje s prisilnim izmetavanjem [13]	11
Slika 7: Orodje s stranskimi pogoni [13]	11
Slika 8: Odvijalno orodje [13]	12
Slika 9: Orodje z več delilnimi ravninami [13]	12
Slika 10: Toplokanalno orodje [13]	12
Slika 11: Etažno orodje [13]	13
Slika 12: Dvokomponentno orodje [13]	13
Slika 13: Hasco cilindričen izmetač (levo), ploščati izmetač (sredina) in izmetalna puša (desno) [15]	14
Slika 14: Izmetavanje s snemalno ploščo [16]	14
Slika 15: Izmetavanje s pomočjo stisnjenega zraka [16]	15
Slika 16: Izmetalni sistem z drogom [13]	15
Slika 17: Izmetavanje sistem z vzmetjo [13]	15
Slika 18: Hladnokanalni doliv (levo), delno toplokanalni (sredina) in toplokanalni dolivni sistem (desno) [13]	16
Slika 19: Prikaz neenakomernega in enakomernega hlajenja [13]	17
Slika 20: Konvencionalno (A) in konformno (B) hlajenje [18]	18
Slika 21: Zaporedna (a), vzporedna (b) in kombinirana vezava (c) [19]	18
Slika 22: Laminaren in turbulenten tok [21]	19
Slika 23: Potencial znižanja časa cikla s spremembo debeline izdelka [24]	22
Slika 24: Površinska mreža, izdelana iz središčnic modela (ang. Midplane) [30]	24
Slika 25: Površinska mreža modela (ang. Dual domain) [30]	25
Slika 26: 3D mreža modela [30]	25
Slika 27: Statistični meri za Okvir levi FAEM IV	27
Slika 28: Optični 3D skener Zeiss Scanbox 5	29
Slika 29: Sestav uporabe izdelka Okvir levi FAEM IV (izdelek v črni barvi)	30
Slika 30: Izdelek Okvir levi FAEM IV	31
Slika 31: Orodje OZB Okvir levi FAEM IV (levo dolivna, desno izmetalna stran)	33
Slika 32: Prikaz vseh tokokrogov na orodju Okvir levi FAEM IV	34
Slika 33: Priklop vode s hitrimi sklopkami serijskega stanja	35
Slika 34: Topla šoba dolivnega sistema	35
Slika 35: Hladen doliv	35
Slika 36: Stroj za brizganje polimernih materialov Haitian MA 7000	36
Slika 37: Temperirna naprava Temprow D90 proizvajalca Wittmann [40]	36
Slika 38: Termo kamera PI 450 [41]	37
Slika 39: Statistika 3D mreže izdelka	38
Slika 40: 3D mreža modela izdelka za simulacijo brizganja	38

---

Slika 41: Dimenzije tople šobe s hladnim 5-točkovnim dolivom	39
Slika 42: Orodni vložki, izdelani iz materiala Moldmax HH	40
Slika 43: Prikaz hlajenja izdelka z vodnimi tokokrogi	41
Slika 44: Čas brizganja pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju	44
Slika 45: Tlak brizganja pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju	44
Slika 46: Vroča mesta pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju	45
Slika 47: Skupna deformacija pri serijskem (levo) in optimiziranem (desno) stanju	46
Slika 48: Priklop vode s hitrimi sklopkami optimiziranega stanja	48
Slika 49: Termogram serijskega (levo) in optimiziranega stanja (desno) – pogled 1	49
Slika 50: Termogram serijskega (levo) in optimiziranega stanja (desno) – pogled 2	50
Slika 51: Termogram serijskega (levo) in optimiziranega stanja (desno) – pogled 3	50
Slika 52: Deformacije serijskega stanja izdelka v treh pogledih	51
Slika 53: Deformacije optimiziranega stanja izdelka v treh pogledih	52

---

**SEZNAM TABEL**

Tabela 1: Lastnosti materiala Polylac PA-757H [39].....	32
Tabela 2: Vezava vodnih kanalov serijskega stanja .....	34
Tabela 3: Vhodni podatki za numerično simulacijo brizganja .....	39
Tabela 4: Procesni časi sekvenc serijskega procesa brizganja.....	42
Tabela 5: Temperaturni profili serijskega procesa brizganja .....	42
Tabela 6: Vhodni podatki serijskega stanja .....	43
Tabela 7: Primerjava parametrov serijskega in optimiziranega stanja .....	46
Tabela 8: Vezava vodnih kanalov po optimizaciji.....	47
Tabela 9: Primerjava opazovanih točk termogramov .....	50
Tabela 10: Statistični meri za nadzor procesa brizganja.....	51
Tabela 11: Primerjava meritev kontrolnih točk izdelka .....	52
Tabela 12: Kapaciteta stroja Haitian MA7000 pred in po optimizaciji.....	53

---

**SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC**

FAEM - popolnoma avtomatski kavni aparat (ang. fully automatic espresso machine)  
2D - dvodimenzionalno  
3D - tridimenzionalno  
CT - računalniška tomografija  
ABS - akrilonitril-butadien-stiren  
ABS/PC - akrilonitril-butadien-stiren in polikarbonat  
HDPE - polietilen visoke gostote  
PA66 - poliamid  
PA66 + GF30 - poliamid s 30 % steklenih vlaken  
PBT - polibutilen tereftalat  
PBT + GF30 - polibutilen tereftalat s 30 % steklenih vlaken  
PC - polikarbonat  
PC + GF30 - polikarbonat s 30 % steklenih vlaken  
PET - polietilen tereftalat  
PET + GF30 - polietilen tereftalat s 30 % steklenih vlaken  
PMMA - polimetil meta akrilat  
POM - polioksimetilen  
PP - polipropilen  
PP + GF30 - polipropilen s 30 % steklenih vlaken  
PPS - polifenilen sulfid  
PPS + GF30 - polifenilen sulfid s 30 % steklenih vlaken  
PS - polistiren  
RoHS - direktiva EU, ki omejuje uporabo nevarnih snovi v električni in elektronski opremi  
REACH - evropska uredba, ki ureja varno uporabo kemikalij v celotni dobavni verigi  
FDA - ameriški urad za hrano in zdravila, ki ureja materiale, ki pridejo v stik z živili ali telesom  
UL - ameriška organizacija, ki testira varnost materialov, zlasti glede gorenja in električne varnosti  
HH - visoka trdnost  
V1, V2... V27 - vhod 1, vhod 2 ... vhod 27  
I1, I2... I27 - izhod 1, izhod 2... izhod 27  
MA 7000 - oznaka stroja Haitian Mars s 7000 kN zapiralne sile

## SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

$t_c$  - čas hlajenja

$d$  - debelina izdelka

$\alpha$  - toplotna difuzivnost

$T_t$  - temperatura taline

$T_o$  - temperatura orodja

$T_i$  - temperatura izmetavanja