

# Optimiranje procesa injekcijskog prešanja s pomoću računalne simulacije

---

Sever, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:243836>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Mislav Sever**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Mislav Sever

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Godecu, dipl. ing. na susretljivosti, prenesenom znanju i stručnim savjetima tijekom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se tvrtki Metal Product d.o.o., posebno Slavenu Ragužu, dipl. ing. na ustupljenim modelima, tehničkoj dokumentaciji i korisnim savjetima.

Posebne zahvale upućujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studija.

Mislav Sever



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment, mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mislav Sever** JMBAG: 0035221290

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimiranje procesa injekcijskog prešanja s pomoću računalne simulacije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Injection moulding process optimisation with computer simulation**

Opis zadatka:

Injekcijsko prešanje najvažniji je postupak prerade polimera. Omogućuje visokoautomatiziranu, visokoserijsku proizvodnju polimernih otpresaka, pri čemu oblici mogu biti vrlo kompleksni, a polimerni materijali otpresaka vrlo različitih preradbenih i uporabnih svojstava. Stoga razvoj kalupa za injekcijsko prešanje te definiranje optimalnih parametara procesa injekcijskog prešanja postaje vrlo zahtjevan zadatak, čak i za iskusne konstruktore kalupa i prerađivače polimera injekcijskim prešanjem. Jedan od inženjerskih alata koji omogućuju optimiranje tih elemenata sustava injekcijskog prešanja je računalna simulacija postupka injekcijskog prešanja koja omogućuje u virtualnom okruženju predviđanje zbivanja u kalupnoj šupljini tijekom procesa injekcijskog prešanja, kao i ponašanje otpreska nakon vađenja iz kalupne šupljine.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- detaljno opisati sve faze injekcijskog prešanja
- opisati utjecaje signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na proces prerade i svojstva otpresaka
- opisati primjenu računalne simulacije injekcijskog prešanja
- za konkretan otpresak i već proizveden kalup simulacijom načiniti analizu postojećeg procesa prerade svojstava otpreska
- simulacijom provesti optimiranje parametara prerade i svojstava otpreska
- na temelju dobivenih rezultata optimiranja donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	V
POPIS TABLICA.....	X
SAŽETAK.....	1
SUMMARY .....	2
1. UVOD .....	3
2. INJEKCIJSKO PREŠANJE.....	4
2.1. Sustav za injekcijsko prešanje .....	4
2.1.1. Ubrizgavalica .....	5
2.1.2. Kalup .....	6
2.1.3. Temperiralo .....	7
2.1.4. Dopunska oprema.....	8
2.2. Faze procesa injekcijskog prešanja.....	9
2.2.1. Plastificiranje.....	9
2.2.2. Ubrizgavanje i djelovanje naknadnog tlaka .....	9
2.2.3. Očvršćivanje i vađenje otpreska iz kalupa .....	10
3. KONSTRUKCIJA KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE .....	11
3.1. Kalupna šupljina.....	11
3.2. Kućište kalupa .....	13
3.3. Uljevni sustav .....	16
3.3.1. Čvrsti uljevni sustav .....	16
3.3.2. Vrući uljevni sustav.....	19
3.4. Sustav za temperiranje kalupa .....	20
3.5. Sustav za vađenje otpreska iz kalupa .....	22
3.6. Sustav za vođenje i centriranje elemenata kalupa .....	24

---

3.7.	Sustav za odzračivanje kalupne šupljine .....	25
4.	PARAMETRI PROCESA INJEKCIJKOG PREŠANJA.....	27
4.1.	Temperatura.....	27
4.1.1.	Temperatura taljevine.....	27
4.1.2.	Temperatura stijenke kalupne šupljine.....	28
4.1.3.	Temperatura medija za temperiranje.....	29
4.2.	Tlak.....	30
4.2.1.	Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje .....	30
4.2.2.	Tlak u kalupnoj šupljini.....	31
4.2.3.	Preklapanje na naknadni tlak.....	32
4.2.4.	Naknadni tlak .....	33
4.3.	Vrijeme .....	34
4.3.1.	Vrijeme ubrizgavanja (brzina ubrizgavanja).....	34
4.3.2.	Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka.....	34
4.3.3.	Vrijeme hlađenja otpreska.....	35
4.3.4.	Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja.....	35
5.	RAČUNALNA SIMULACIJA PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA – MOLDEX 3D	36
5.1.	Uvod .....	36
5.2.	Numeričke metode.....	37
5.2.1.	Metoda konačnih elemenata (FEM).....	37
5.2.2.	Metoda konačnih volumena .....	38
5.2.3.	Metoda konačnih razlika .....	38
5.3.	Vrste analize .....	38
5.3.1.	2,5D analiza.....	39
5.3.2.	3D analiza.....	40

---

5.4.	Tijek simulacije .....	41
5.4.1.	Definiranje simulacijskog modela.....	41
5.4.2.	Definiranje parametara simulacije.....	42
5.4.3.	Simuliranje procesa injekcijskog prešanja .....	44
5.4.4.	Analiza rezultata simulacije .....	44
6.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	47
6.1.	Opis proizvoda.....	47
6.2.	Opis kalupa .....	49
6.2.1.	Kalupna šupljina.....	49
6.2.2.	Kućište kalupa .....	51
6.2.3.	Uljevni sustav .....	51
6.2.4.	Sustav za temperiranje .....	52
6.2.5.	Sustav za vađenje otpreska iz kalupa .....	53
6.3.	Provedba računalne simulacije procesa injekcijskog prešanja .....	54
6.3.1.	Definiranje projekta.....	54
6.3.2.	Učitavanje modela proizvoda.....	54
6.3.3.	Definiranje ušća.....	55
6.3.4.	Definiranje uljernih kanala .....	56
6.3.5.	Definiranje uljevka i uljernog zdenca.....	57
6.3.6.	Definiranje kalupnih ploča .....	59
6.3.7.	Definiranje kanala za temperiranje.....	60
6.3.8.	Definiranje mreže konačnih elemenata .....	60
6.3.9.	Definiranje materijala.....	63
6.3.10.	Definiranje procesa.....	64
6.4.	Rezultati računalne simulacije postojećeg procesa .....	67
6.4.1.	Nejednoliko popunjavanje kalupnih šupljina.....	68



---

6.4.2. Pojava zračnih džepova .....	68
6.4.3. Neučinkovita konfiguracija kanala za temperiranje .....	70
6.5. Optimiranje postojećeg procesa .....	72
6.5.1. Jednoliko popunjavanje kalupnih šupljina .....	72
6.5.2. Učinkovitija konfiguracija kanala za temperiranje .....	76
6.5.3. Učinkovitije odzračivanje kalupne šupljine .....	80
7. ZAKLJUČAK .....	83
LITERATURA .....	85
PRILOZI .....	87

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Proizvodi načinjeni postupkom injekcijskog prešanja [3] .....	4
Slika 2.	Shema sustava za injekcijsko prešanje [1] .....	5
Slika 3.	Ubrizgavalica .....	6
Slika 4.	Presjek kalupa za injekcijsko prešanje s prikazom parcijalnih funkcija [5] .....	7
Slika 5.	Temperiralo [6] .....	8
Slika 6.	Automatizirana linija za injekcijsko prešanje [7] .....	8
Slika 7.	Faza plastificiranja u procesu injekcijskog prešanja [1] .....	9
Slika 8.	Faza ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka u procesu injekcijskog prešanja [1] 9	
Slika 9.	Faza vađenja otpreska iz kalupne šupljine u procesu innjekcijskog prešanja [1].	10
Slika 10.	Raspored kalupnih šupljina [5] .....	12
Slika 11.	Kalup s različitim oblicima kalupnih šupljina [8].....	12
Slika 12.	Glavne komponente kućišta kalupa [5].....	13
Slika 13.	N i Q tip ploča kućišta kalupa [5] .....	14
Slika 14.	Kućište s tri kalupne ploče – na slici: Ploča za skidanje uljevnog sustava [8] .....	14
Slika 15.	Kućište s bočnim otvaranjem.....	15
Slika 16.	Kućište kalupa s vrućim uljevnim sustavom [9].....	15
Slika 17.	Čvrsti uljevni sustav [5] .....	17
Slika 18.	Komponente kalupa za oblikovanje i izbacivanje uljevnog sustava.....	17
Slika 19.	Uljevna vitka (lijevo) i uljevni zdenac (desno) [10] .....	18
Slika 20.	Vrste uljevnih kanala [8].....	18
Slika 21.	Najčešće vrste ušća [5].....	19
Slika 22.	Vruće mlaznice [5].....	20
Slika 23.	Razdjelni blokovi [11] .....	20
Slika 24.	Kontrolna jedinica vrućih mlaznica [11] .....	20

Slika 25.	Konfiguracije kanala za temperiranje kalupnih ploča.....	21
Slika 26.	Konfiguracija kanala za temperiranje žiga [8].....	21
Slika 27.	Sustav za vađenje otpreska iz kalupa [5] .....	22
Slika 28.	Izbacivala [10].....	23
Slika 29.	Primjena klizača .....	23
Slika 30.	Raskoljiva jezgra [5] .....	24
Slika 31.	Komponente unutarnjeg vođenja i centriranja [10] .....	24
Slika 32.	Prsten za centriranje kalupa [10].....	25
Slika 33.	Kanali za odzračivanje na sljubnici kalupa [5] .....	25
Slika 34.	Kanal za odzračivanje na izbacivalu [5] .....	26
Slika 35.	Temperatura taljevine – ABS [8].....	28
Slika 36.	Temperatura stijenke kalupne šupljine [15].....	28
Slika 37.	Utjecaj temperature hidrauličkog ulja na hidraulički tlak [13].....	30
Slika 38.	Analiza karakteristike hidrauličkog tlaka u jedinici za ubrizgavanje [13].....	31
Slika 39.	Analiza karakteristike tlaka u kalupnoj šupljini [13].....	32
Slika 40.	Odnos tlaka u hidrauličkom sustavu i tlaka u kalupnoj šupljini [13].....	33
Slika 41.	Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka [13] .....	34
Slika 42.	Vremenski dijagram injekcijskog prešanja [14] .....	35
Slika 43.	Vrste numeričkih analiza – Moldex3D .....	39
Slika 44.	Primjena 2,5D analize [16] .....	39
Slika 45.	Pojave tijekom faze punjenja kalupne šupljine [15] .....	40
Slika 46.	Vrste konačnih elemenata – Moldex3D [16] .....	40
Slika 47.	Definirani simulacijski model – Moldex3D .....	42
Slika 48.	Baza materijala – Moldex3D [16].....	42
Slika 49.	Definiranje parametara faze ubrizgavanja – Moldex3D [16] .....	43
Slika 50.	Definiranje parametara faze hlađenja – Moldex3D [16] .....	44

Slika 51.	Simulacija popunjenosti kalupne šupljine – Moldex3D [15].....	44
Slika 52.	Simulacija potrebnog vremena i tlaka ubrizgavanja – Moldex3D.....	45
Slika 52.	Simulacija gustoće otpreska (lijevo) i razdiobe stezanja otpreska (desno) – Moldex3D [15].....	45
Slika 54.	Simulacija vremena hlađenja otpreska – Moldex3D [15].....	46
Slika 55.	Simulacija vitoperenja otpreska – Moldex3D.....	46
Slika 56.	Zupčasto odcjepna stezaljka ZOS 3/2.....	47
Slika 57.	Zupčasto odcjepna stezaljka ZOS 3/2.....	48
Slika 58.	Gornji dio kućišta – ZOS 3/2 .....	49
Slika 59.	Donji dio kućišta – ZOS 3/2 .....	49
Slika 60.	Nepomična kalupna ploča.....	50
Slika 61.	Nepomična kalupna ploča.....	50
Slika 62.	Skica izvedenog kućišta s dimenzijama ploča kućišta.....	51
Slika 63.	Model uljavnog sustava .....	51
Slika 64.	Model tunelnog ušća .....	52
Slika 65.	Izvedeni sustav za temperiranje .....	52
Slika 66.	Izbacivala u položaju izbacivanja .....	53
Slika 67.	Otisci izbacivala na otpresku gornjeg dijela kućišta ZOS 3/2 stezaljke .....	53
Slika 68.	Učitani modeli proizvoda.....	54
Slika 69.	Vrste ušća – Moldex3D .....	55
Slika 70.	Definiranje ušća – Moldex3D .....	55
Slika 71.	Položaj ušća – Moldex3D .....	56
Slika 72.	Definiranje uljavnog kanala.....	57
Slika 73.	Definirana konfiguracija uljavnih kanala – Moldex3D .....	57
Slika 74.	Definiranje uljevka – Moldex3D .....	58
Slika 75.	Definiranje uljavnog zdenca – Moldex3D.....	58

Slika 76.	Uljevni sustav – Moldex3D .....	59
Slika 77.	Definirane kalupne ploče – Moldex3D.....	59
Slika 78.	Definiranje kanala za temperiranje – Moldex3D.....	60
Slika 79.	Raspodjela čvorova na otpresku– Moldex3D .....	61
Slika 80.	Mreža konačnih elemenata – otpresak – Moldex3D.....	61
Slika 81.	Skočni prozor naredbe „Generate“ – Moldex3D .....	62
Slika 82.	Mreža konačnih elementa simulacijskog model – Moldex3D.....	62
Slika 83.	Parametri prerade (temperature) materijala – Moldex3D Bank.....	63
Slika 84.	Moldex3D Process Wizard .....	64
Slika 85.	Ubrizgavalica Arburg 470C Golden Edition 1500-400-35 – Metal Product.....	64
Slika 86.	Kartica „Filling/Packing Settings“ - „Moldex3D Process Wizard“.....	65
Slika 87.	Profil djelovanja naknadnog tlaka - „Moldex3D Process Wizard“ .....	65
Slika 88.	Kartica „Cooling“ - „Moldex3D Process Wizard“ .....	66
Slika 89.	„Cooling Advanced Setting“ - „Moldex3D Process Wizard“ .....	66
Slika 90.	Temperiralo Regloplas 90S – Metal Product.....	67
Slika 91.	Prikaz nejednolikog popunjavanja kalupnih šupljina – Moldex3D.....	68
Slika 92.	Tragovi rasplinjavanja .....	69
Slika 93.	Prikaz potencijalnih mjesta pojave zračnih džepova – Moldex3D.....	69
Slika 94.	Prikaz učinkovitosti kanala za temperiranje – Moldex3D.....	70
Slika 95.	Prikaz postotka taljevine na kraju faze hlađenja – Moldex3D.....	70
Slika 96.	Prikaz vitoperenja otpreska – Moldex3D .....	71
Slika 97.	Usporedba vitoperenja .....	72
Slika 98.	Prva iteracija optimiranja uljavnog sustava – Moldex3D.....	73
Slika 99.	Prikaz popunjavanja kalupnih šupljina – prva iteracija optimiranja uljavnog sustava	
	73	
Slika 100.	Druga iteracija optimiranja uljavnog sustava – Moldex3D.....	74

---

Slika 101. Prikaz popunjavanja kalupnih šupljina – druga iteracija optimiranja uljevnog sustava – Moldex3D.....	75
Slika 102. Razmještaj dodatnih kanala za temperiranje.....	76
Slika 103. Prva iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D .....	76
Slika 104. Prikaz učinkovitosti kanala za hlađenje – prva iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D .....	77
Slika 105. Prikaz postotka taljevine na kraju faze hlađenja - prva iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D .....	77
Slika 106. Druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D.....	78
Slika 107. Prikaz učinkovitosti kanala za temperiranje – druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D.....	79
Slika 108. Prikaz postotka taljevine na kraju faze hlađenja - druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D .....	79
Slika 109. Prijedlog površina otpreska za oblikovanje pomoću umetaka .....	80
Slika 110. Model umetka – nepomična kalupna ploča - Solidworks .....	80
Slika 111. Nepomična kalupna ploča s kalupnim umetcima – Solidworks .....	81
Slika 112. Razmještaj kalupnih umetaka u odnosu na kanale za temperiranje – Solidworks	81

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Preporučene temperature taljevine nekih plastomera [12] .....	27
Tablica 2.	Preporučene temperature stijenke kalupne šupljine za neke plastomere [12]....	29
Tablica 3.	Promatrane pojave i parametri primjenom računalne simulacije [15] .....	36
Tablica 4.	Prva iteracija optimiranja uljevnog sustava.....	72
Tablica 5.	Druga iteracija optimiranja uljevnog sustava.....	74

## **SAŽETAK**

Cilj ovoga rada je prikazati postupak optimiranja procesa injekcijskog prešanja pomoću računalne simulacije u programskom paketu Moldex3D. Optimiranje procesa će se provesti za konkretan otpresak i već proizvedeni kalup. Rad se sastoji od teorijske podloge potrebne za razumijevanje samog procesa injekcijskog prešanja, konstrukcije kalupa, parametara procesa i primjene računalne simulacije. Praktični dio sastoji se od opisa postojećeg proizvoda i kalupa, postupka izrade računalne simulacije u programskom paketu Moldex3D i optimiranja određenih parametara prerade. Optimiranje se provodi u nekoliko faza s ciljem postizanja što optimalnijih rezultata simulacije. Na temelju dobivenih rezultata optimiranja donijeti će se odgovarajući zaključci, te na temelju njih predložiti određene dorade na postojećem kalupu.

Ključne riječi: injekcijsko prešanje, računalna simulacija, optimiranje parametara prerade, Moldex3D



**SUMMARY**

The subject of this thesis is to present the optimization process of injection molding using computer simulation in the Moldex3D software package. The optimization process will be applied to a specific molded part and an already manufactured mold. The paper consists of a theoretical foundation necessary for understanding the injection molding process itself, mold design, process parameters and the application of computer simulation. The practical part includes a description of the existing product and mold, the process of creating a computer simulation in the Moldex3D software package and the optimization of certain processing parameters. The optimization is conducted in several stages to achieve the most optimal simulation results possible. Based on the obtained optimization results appropriate conclusions will be drawn and certain modifications to the existing mold will be proposed accordingly.

Keywords: injection moulding, computer simulation, optimisation of process parameters, Moldex3D

## **1. UVOD**

Postupak injekcijskog prešanja predstavlja najvažniji ciklički postupak prerade polimera. Proces injekcijskog prešanja je vrlo teško matematički opisati, pa se vrlo često razvoj i konstrukcija otpreska i kalupa temelje na iskustvu. Primjena CAE programskih paketa omogućuje matematičko opisivanje procesa injekcijskog prešanja primjenom različitih numeričkih metoda, što rezultira uvidom u parametre i pojave tokom samog procesa. Uvidom u parametre i pojave mogu se učiti nedostaci u vođenju procesa, kao i nedostaci na konstrukciji kalupa i geometriji otpreska već u fazi razvoja i konstruiranja. Uočavanje nedostataka u fazi već izrađenog kalupa uzrokuje dorade koje su skupe i oduzimaju vrijeme, pa iz toga proizlazi potreba za primjenom CAE programskih paketa.

Upotreba CAE programskih paketa iziskuje znanje korisnika u vidu vođenja procesa, konstrukcije kalupa, razumijevanja parametara procesa, a kasnije i ispravne interpretacije dobivenih rezultata simulacije.

Cilj ovog diplomskog rada je primjenom računalne simulacije načiniti analizu postojećeg kalupa i otpreska s ciljem optimiranja parametara prerade i svojstava otpreska.

Na početku će se iznijeti teorijska podloga potrebna za razumijevanje samog procesa injekcijskog prešanja, konstrukcije kalupa, parametara procesa i provođenja računalne simulacije procesa injekcijskog prešanja primjenom CAE programskog paketa. U okviru praktičnog dijela prvo će se dati opis proizvoda za koji će se provoditi računalna simulacija, zatim opis konstrukcije kalupa i opreme potrebne za provođenje procesa. Srž praktičnog dijela predstavlja opis provedenih računalnih simulacija u programskom paketu Moldex3D s ciljem optimiranja parametara prerade i svojstava otpreska tj. zadanog proizvoda. Na temelju dobivenih rezultata računalne simulacije će se iznijeti određeni zaključci i predložiti potrebne preinake u vidu vođenja procesa, konstrukcije kalupa i geometrije otpreska.

## 2. INJEKCIJSKO PREŠANJE

Injekcijsko prešanje predstavlja najvažniji ciklički postupak prerade polimera. Postupak se sastoji od ubrizgavanja tvari potrebne smične viskoznosti u temperiranu kalupnu šupljinu, očvršćivanja otpreska u kalupnoj šupljini i vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Najčešće se prerađuju plastomeri i to oko 90 %, dok ostatak čine elastomeri i duromeri. Uz polimere postupkom injekcijskog prešanja mogu se oblikovati proizvodi od metala i keramike. Injekcijskim prešanjem se mogu postići različiti oblici, dimenzije i mase proizvoda, a uz to se mogu postići i vrlo uske tolerancije što osigurava široku primjenu takvog postupka. Slika 1 prikazuje proizvode dobivene postupkom injekcijskog prešanja. [1] [2]



Slika 1. Proizvodi načinjeni postupkom injekcijskog prešanja [3]

### 2.1. Sustav za injekcijsko prešanje

Funkcije sustava za injekcijsko prešanje prema [1] su:

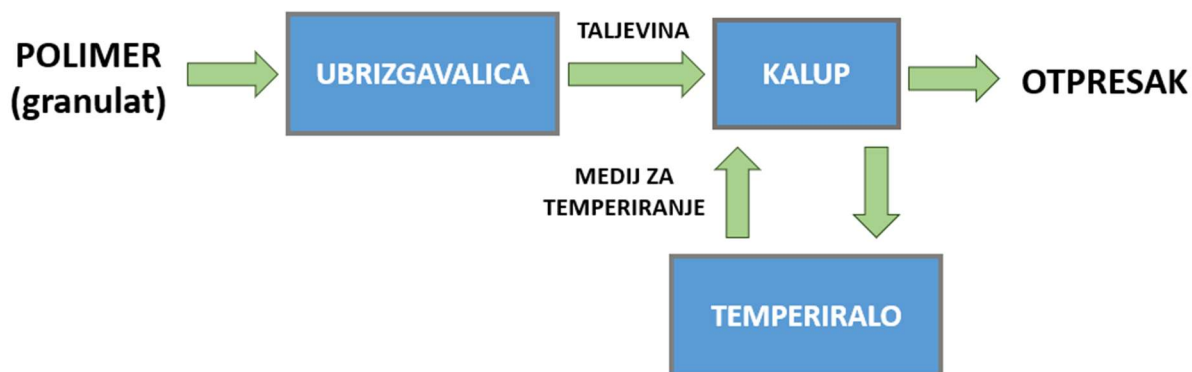
- priprema tvari potrebne smične viskoznosti,
- ubrizgavanje tvari u kalupnu šupljinu,
- oblikovanje i strukturiranje otpreska,
- održavanje propisanog temperaturnog polja u kalupu i
- vađenje otpreska iz kalupa.

Sustav za injekcijsko prešanje čine: [1]

- ubrizgavalica,
- kalup,

- temperiralo i
- dopunska oprema.

Slika 2 daje shematski pregled sustava za injekcijsko prešanje.



**Slika 2.** Shema sustava za injekcijsko prešanje [1]

### 2.1.1. Ubrizgavalica

Ubrizgavalica tj. stroj za injekcijsko prešanje omogućuje pripremu tvari potrebne smične viskoznosti, zatvaranje kalupa, ubrizgavanje tvari u kalupnu šupljinu, te otvaranje kalupa i vađenje otpreska iz kalupa. Dvije osnovne jedinice ubrizgavalice su jedinica za ubrizgavanje i jedinica za otvaranje i zatvaranje kalupa, a pored njih je još potrebno spomenuti pogonsku i upravljačku jedinicu. Jedinica za ubrizgavanje sastoji se od cilindra za taljenje i elementa za ubrizgavanje. Zadaća jedinice za ubrizgavanje je taljenje polimernog granulata koje se odvija pomoću grijača koji su razmješteni uzduž cilindra i ubrizgavanje tvari u kalupnu šupljinu pomoću elementa za ubrizgavanje koji može biti realiziran u obliku klipa i/ili pužnog vijka ovisno da li se radi o hidrauličnoj, električnoj ili hibridnoj ubrizgavalici. Jedinica za otvaranje i zatvaranje kalupa mora osigurati kontakt između pomičnog i nepomičnog dijela kalupa tijekom ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka, a po završetku procesa mora omogućiti otvaranje kalupa i vađenje otpreska iz kalupa. Jedinica za otvaranje i zatvaranje kalupa može posjedovati hidraulički, električni ili mehanički pogon. Pogonska jedinica zadužena je opskrbu pojedinih pogona odgovarajućom vrstom energije. Zadaća upravljačke jedinice je reguliranje cjelokupnog procesa injekcijskog prešanja što podrazumijeva usklađivanje rada jedinice za ubrizgavanje, jedinice za otvaranje i zatvaranje kalupa, temperirala i dopunske opreme. Upravljačka jedinica mora osigurati i interakciju s korisnikom na način da korisnik može unijeti odgovarajuće parametre rada, a uz to mora obavijestiti korisnika ukoliko dođe do poteškoća. [1] [4]

Na slici 3 su prikazane prethodno opisane jedinice ubrizgavalice.



**Slika 3.** Ubrizgavalica – na slici: a - jedinica za ubrizgavanje, b - jedinica za otvaranje i zatvaranje kalupa, c – pogonska jedinica, d – upravljačka jedinica [4]

Prilikom izbora ubrizgavalice potrebno je obratiti pažnju na nekoliko najznačajnijih parametara, a to su prema [2]:

- tlak ubrizgavanja polimerne taljevine,
- volumen ubrizgavanja,
- sila držanja kalupa i
- razmak vodilica.

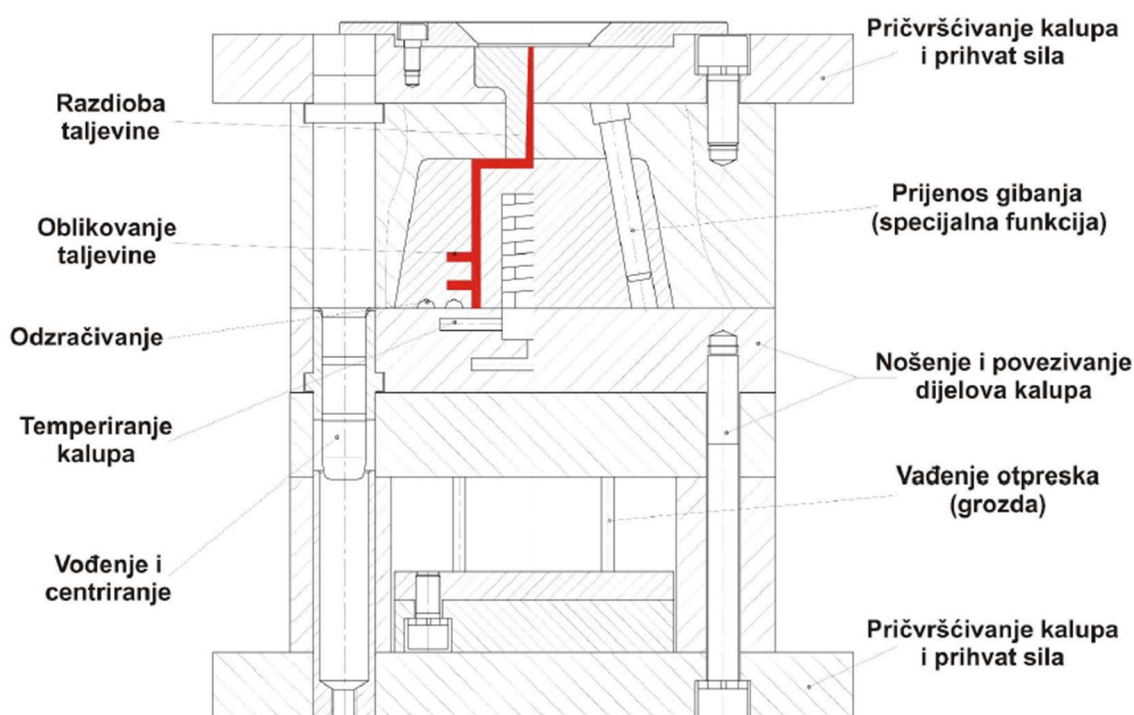
### 2.1.2. Kalup

Kalup se može definirati kao namjenski element sustava za injekcijsko prešanje polimera i u pravilu služi za izradbu jedne vrste otpresaka. U procesu injekcijskog prešanja kalup predstavlja središnji, specifični i vitalni dio. Kalup tj. njegova konstrukcija ima veliki utjecaj na kvalitetu konačnog proizvoda, a i na odvijanje samog procesa injekcijskog prešanja. Konstrukcija kalupa je kompleksna budući da se on sastoji od većeg broja komponenata, o čemu će biti više riječi u narednim poglavljima. Konstruiranje kalupa predstavlja vrlo složen proces u kojem se mora osigurati da kalup ispunjava sljedeće parcijalne funkcije [5]:

- razdijeliti taljevinu,
- oblikovati taljevinu,
- održavati propisano temperaturno polje u kalupu,
- odzračiti kalupnu šupljinu,

- izvaditi otpresak i uljevni sustav iz kalupa,
- voditi i centrirati elemente kalupa,
- pričvrstiti kalup na ubrizgavalicu,
- prihvatiti i prenijeti sile,
- povezati elemente kalupa i
- posebne funkcije kalupa.

Slika 4 prikazuje konstrukciju alata s naznačenim dijelovima koji obavljaju neku od prethodno navedenih parcijalnih funkcija.



Slika 4. Presjek kalupa za injekcijsko prešanje s prikazom parcijalnih funkcija [5]

### 2.1.3. Temperiralo

Temperiralo pored kalupa i medija za temperiranje predstavlja jedan dio sustava za temperiranje kalupa koji omogućava izmjenu i regulaciju temperature medija za temperiranje. Tijekom procesa injekcijskog prešanja kalup se ciklički zagrijava, a razvijena toplina se predaje mediju za temperiranje kako bi se postiglo propisano temperaturno polje u kalupu. Zadaća temperirala je da održava definiranu temperaturu medija za temperiranje na način da odvodi zagrijani medij iz kalupa i vraća u sustav ohlađeni medij. Poželjno je da razlika temperatura medija za temperiranje na ulazu i izlazu iz kalupa bude oko 3 °C. [6]

Na slici 5 je prikazano temperiralo proizvođača Regloplas.



Slika 5. Temperiralo [6]

#### 2.1.4. Dopunska oprema

U praksi se sve češće pronalaze potpuno automatizirani sustavi za injekcijsko prešanje koji pored prethodno opisanih jedinica sadrže različitu dopunsku opremu u vidu sustava za pripremu i dobavu materijala, robota, manipulatora, konvejera i sl. Osnovni cilj automatizacije i uvođenja dopunske opreme je optimizacija procesa injekcijskog prešanja čime se ostvaruje visoka i ujednačena kvaliteta proizvoda, a uz to dolazi i do skraćenja ciklusa procesa. Slika 6 prikazuje automatiziranu liniju za injekcijsko prešanje proizvođača Arburg.

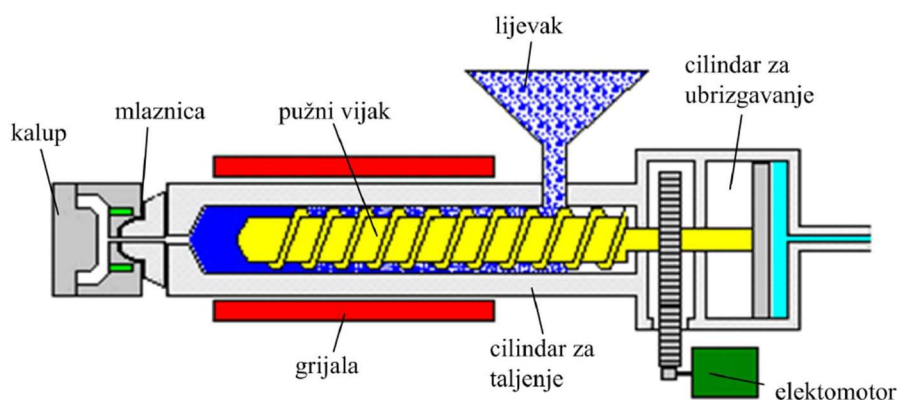


Slika 6. Automatizirana linija za injekcijsko prešanje [7]

## 2.2. Faze procesa injekcijskog prešanja

### 2.2.1. Plastificiranje

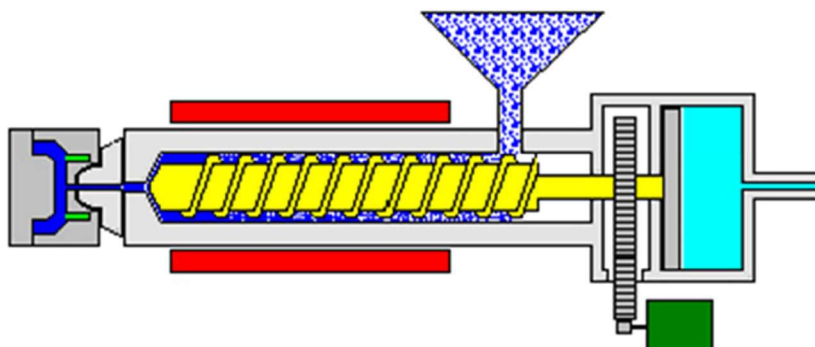
Faza plastificiranja započinje dobavom polimernih granula kroz lijevak ubrizgavalice u cilindar gdje ih zahvaća pužni vijak. Pomoću grijača raspoređenih uzduž cilindra i pužnog vijka koji se sastoji od najčešće tri zone (uvlačna zona, zona stlačivanja i istisna zona) dobiva se homogena polimerna taljevina koja se sakuplja ispred vrha pužnog vijka koji se uslijed djelovanja tlaka taljevine potiskuje unatrag. Na slici 7 je prikazan položaj pužnog vijka ubrizgavalice i kalupa tijekom faze plastificiranja. [1]



Slika 7. Faza plastificiranja u procesu injekcijskog prešanja [1]

### 2.2.2. Ubrizgavanje i djelovanje naknadnog tlaka

U trenutku kada se pripremi dovoljna količina taljevine, rotacija pužnog vijka se zaustavlja i dolazi do pokretanja cilindra za ubrizgavanje koji potiskuje pužni vijak i na taj način ubrizgava taljevinu u temperiranu kalupnu šupljina pod definiranim tlakom. Kako bi se spriječilo stezanje materijala potrebno je održavati naknadni tlak u kalupnoj šupljini tako dugo dok ne očvrсне područje ušća nakon čega se u kalupu može uspostaviti okolišnji tlak. Slika 8 prikazuje fazu ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka. [1]



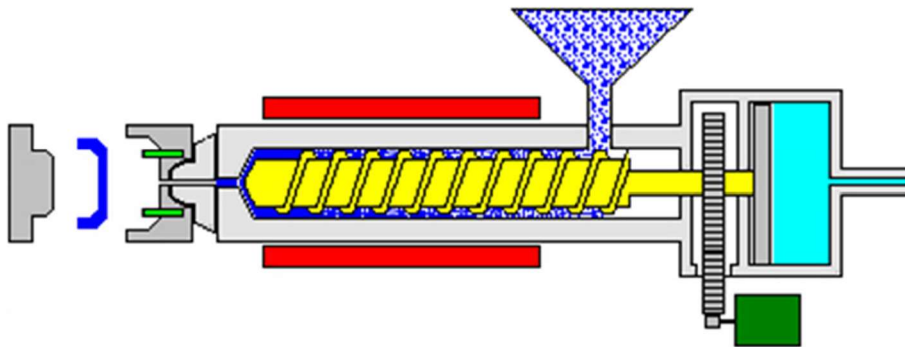
Slika 8. Faza ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka u procesu injekcijskog prešanja

[1]



### 2.2.3. Očvršćivanje i vađenje otpreska iz kalupa

Nakon što očvrstne ušće i nakon što se tlak u kalupnoj šupljini izjednači s okolišnjim tlakom otpresak poprima svoj konačni oblik u kalupu, no on još uvijek nije sposoban za vađenje iz kalupa. Kako bi se otpresak sigurno izvadio iz kalupne šupljine on mora postići temperaturu postojanosti oblika što znači da je potrebno osigurati vrijeme hlađenja do postizanja navedene temperature. Faza hlađenja otpreska se odvija usporedno s fazom plastificiranja i pripreme taljevine za sljedeći ciklus injekcijskog prešanja. Nakon što otpresak postigne temperaturu postojanosti oblika slijedi vađenje otpreska iz kalupa čime se završava proces injekcijskog prešanja. Slika 9 prikazuje fazu vađenja otpreska iz kalupne šupljine. [1]



Slika 9. Faza vađenja otpreska iz kalupne šupljine u procesu injekcijskog prešanja [1]

### 3. KONSTRUKCIJA KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE

U prethodnom poglavlju je spomenuto kako je konstrukcija alata tj. kalupa za injekcijsko prešanje vrlo kompleksna. Unutar ovog poglavlja detaljno će se objasniti svi sustavi koje kalup sadrži. Svaki sustav se sastoji od nekoliko komponenta čija je zadaća izvršavanje određenih parcijalnih funkcija koje su navedene u poglavlju 2.1.2.

#### 3.1. Kalupna šupljina

Kalupna šupljina se može definirati kao prostor koji oblikuje otpresak, a kojeg zatvaraju pomični i nepomični dijelovi kalupa. Oblik kalupne šupljine odgovara obliku otpreska, no dimenzije kalupne šupljine su uvećane za iznos stezanja tj. sakupljanja polimernog materijala. Kalupna šupljina definira i kvalitetu površine otpreska tj. kvaliteta površine kalupne šupljine se izravno preslikava na kvalitetu površine otpreska.

Kalupe je obzirom na broj kalupnih šupljina moguće podijeliti na:

- kalupe s jednom kalupnom šupljinom i
- kalupe s više kalupnih šupljina.

Prema [2] postoji nekoliko stavki prema kojima se može donijeti odluka o primjeni kalupa s više kalupnih šupljina:

- broj otpresaka i rok isporuke,
- oblik i dimenzije otpreska,
- cijena otpresaka,
- korišteni polimerni materijal,
- dimenzijska točnost otpreska i
- karakteristike ubrizgavalice.

Kod konstruiranja kalupa s više kalupnih šupljina potrebno je obratiti pažnju na njihov raspored, pri čemu treba težiti:

- najpovoljnijem rasporedu kalupnih šupljina radi minimalnih izmjera kalupa,
- minimiranju puta tečenja od mlaznice ubrizgavalice do kalupnih šupljina i
- simetričnom rasporedu kalupnih šupljina radi simetričnosti zatvaranja kalupa i simetričnosti djelovanja tlaka.

Podjela rasporeda kalupnih šupljina prema kriteriju ujednačenog puta tečenja može se sažeti na:

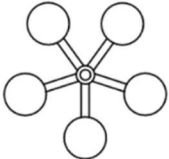
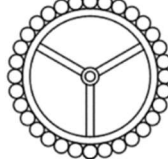
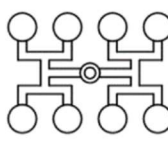
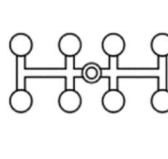

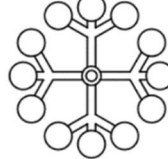
- uravnoteženi raspored kod kojeg je put tečenja jednolik do pojedine kalupne šupljine i

- neravnotežni raspored kod kojeg je put tečenja nejednolik do pojedine kalupne šupljine.

Podjela rasporeda kalupnih šupljina prema obliku je na:

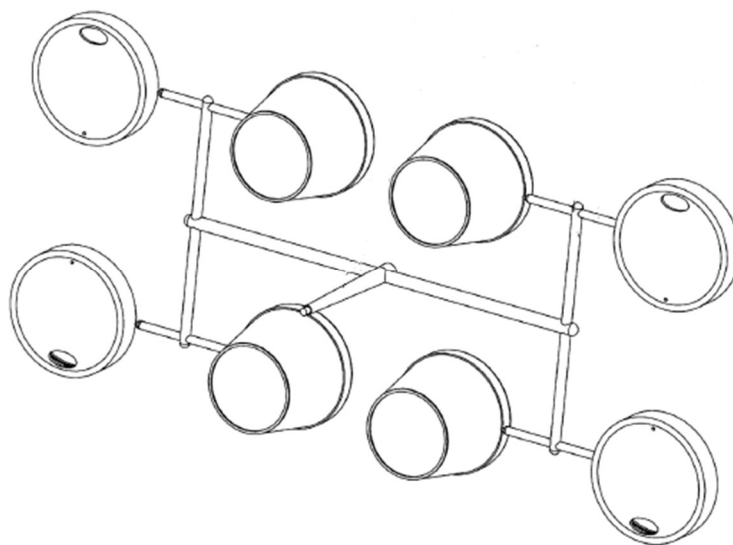
- zvjezdasti raspored,
- redni raspored i
- simetrični raspored.

Na slici 10 su prikazane prethodno navedene podjele kalupnih šupljina.

ZVJEZDASTI RASPORED		REDNI RASPORED		SIMETRIČNI RASPORED	
URAVNOTEŽENI	NEURAVNOTEŽENI	URAVNOTEŽENI	NEURAVNOTEŽENI	URAVNOTEŽENI	NEURAVNOTEŽENI
					

**Slika 10. Raspored kalupnih šupljina [5]**

Kalupi s više kalupnih šupljina mogu se koristiti za izradu jedne vrste otpresaka ili više otpresaka istovremeno, što podrazumijeva primjenu kalupa s različitim oblicima kalupnih šupljina što je prikazano na slici 11.



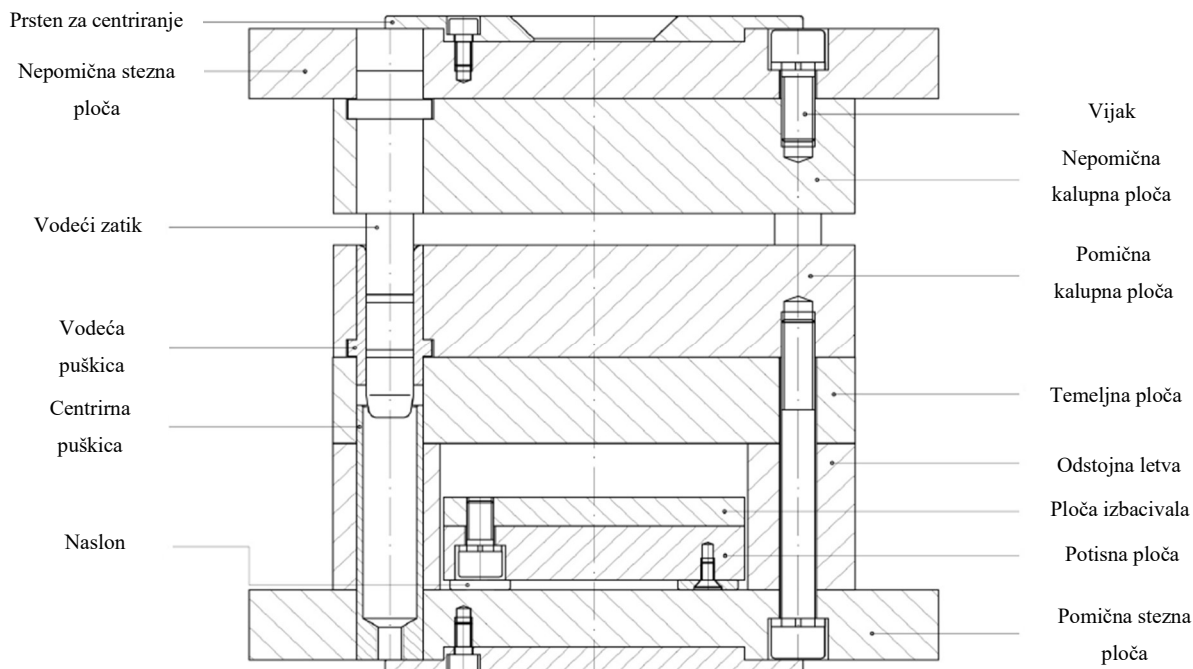
**Slika 11. Kalup s različitim oblicima kalupnih šupljina [8]**

Prema svemu ranije navedenom mogu se definirati funkcije kalupne šupljine, a to su:

- razdioba polimerne taljevine,
- prijenos tlaka taljevine u kalupnu šupljinu,
- definiranje izmjera otpreska i
- definiranje kvalitete površine otpreska.

### 3.2. Kućište kalupa

Kućište kalupa sastavljeno je od ploča međusobno povezanih vijcima i zaticima. Na slici 12 je prikazano pravokutno kućište s dvije kalupne ploče s naznačenim glavnim komponentama.



Slika 12. Glavne komponente kućišta kalupa [5]

Kućište kao cjelina mora ispunjavati sljedeće parcijalne funkcije kalupa:

- povezivanje dijelova kalupa,
- pričvršćivanje kalupa na ubrizgavalicu, te
- prihvat i prijenos sila.

Pored prikazanog pravokutnog kućišta postoje i okrugla kućišta koja se koriste za izradu otpresaka rotacijsko simetričnih oblika i slično, a uz njih se mogu pronaći i školjkasta kućišta primjerena za izradu otpresaka većih dimenzija s vanjskim podrezima ili navojem. [5]

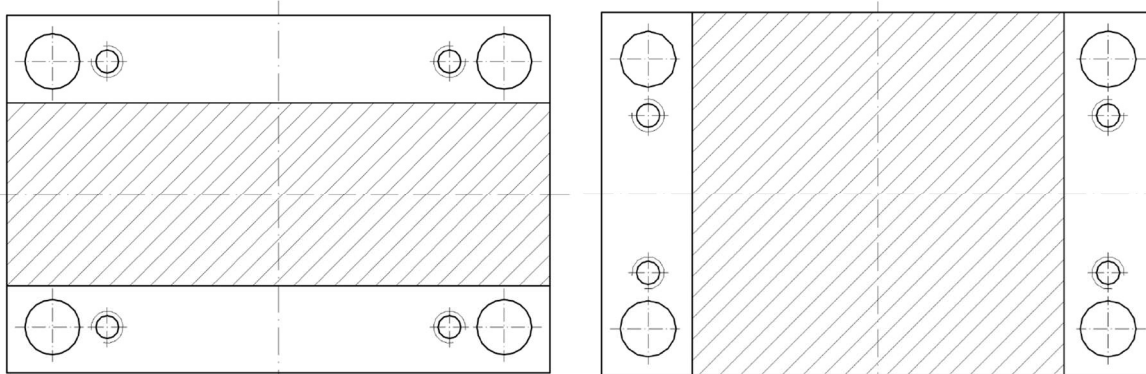
Podjela pravokutnih kućišta obzirom na način spajanja dijelova kućišta glasi:

- kućišta europa sustava (vijci u osi s elementima za vođenje i centriranje) i
- kućišta standardnog sustava (vijci nisu u osi s elementima za vođenje i centriranje).

Podjela obzirom na način smještaja radnog obujma kalupa, odnosno na način postavljanja ploča sustava za vađenje otpreska iz kalupa je na:

- N tip ploča kućišta kalupa i
- Q tip ploča kućišta kalupa.

Slika 13 prikazuje N tip ploča lijevo i Q tip ploča desno.

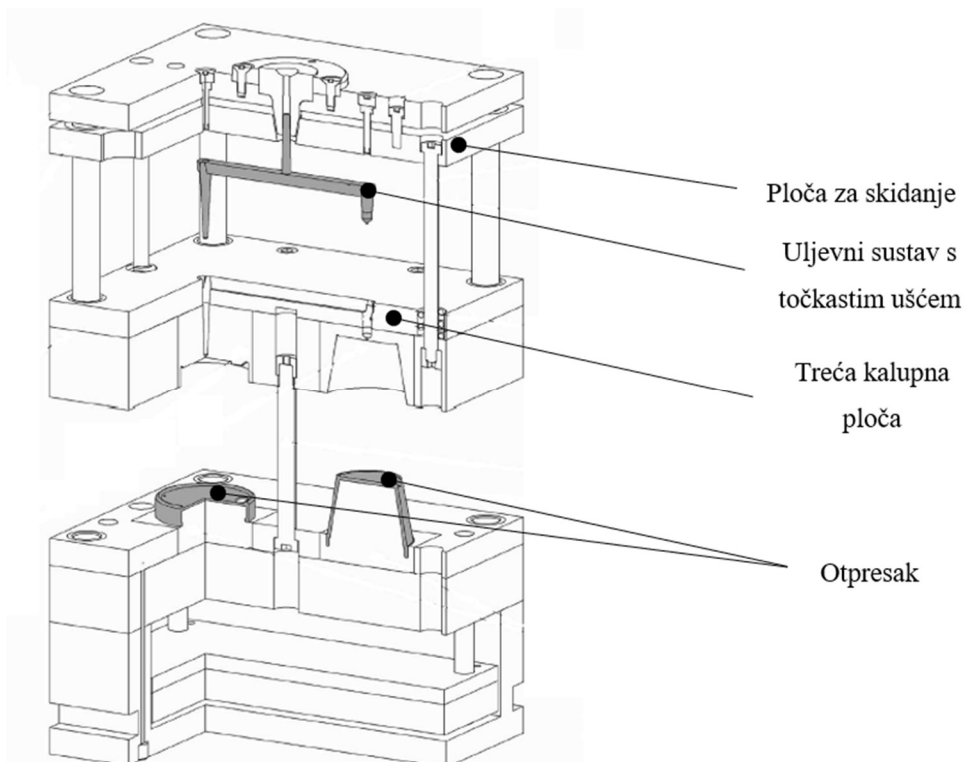


**Slika 13. N i Q tip ploča kućišta kalupa [5]**

Pored prethodno navedenih podjela razlikuju se još dva tipa kućišta kalupa koji se primjenjuju kod hladnog uljavnog sustava, a to su:

- kućišta kalupa s dvije kalupne ploče i
- kućišta kalupa s tri kalupne ploče.

Kućište s dvije kalupne ploče je prikazano na slici 12, a slika 14 prikazuje kućište kalupa s tri kalupne ploče.

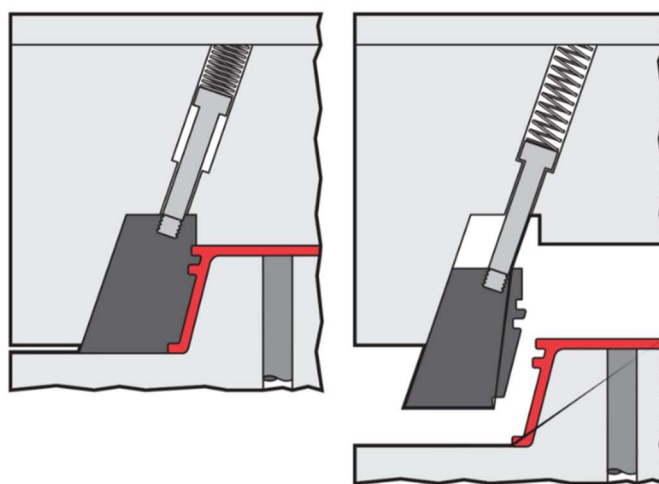


**Slika 14. Kućište s tri kalupne ploče – na slici: Ploča za skidanje uljavnog sustava [8]**

S prethodne slike se može uočiti kako se kućište s tri kalupne ploče primjenjuje u slučaju uljavnog sustava s točkastim ušćem. Primjena kućišta s tri kalupne ploče omogućuje pozicioniranje ušća na bilo kojoj lokaciji, a uz to osigurava i automatsko odvajanje uljavnog sustava od otpreska. [8]

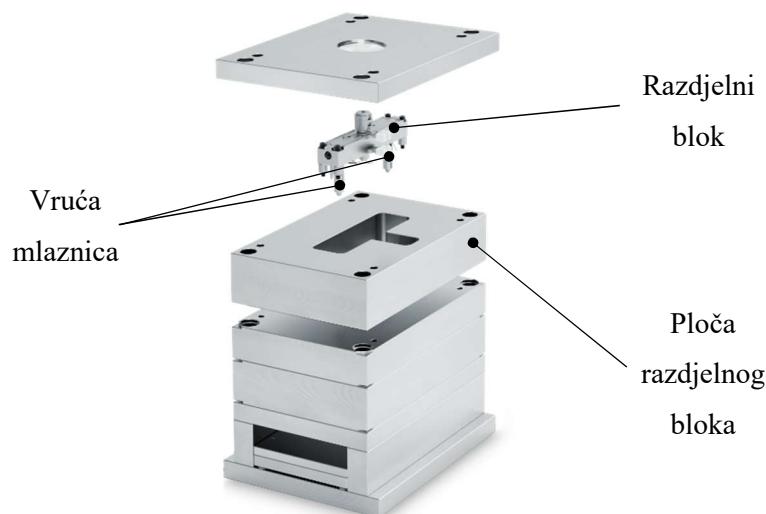
Kao vrlo važan tip kućišta ističu se kućišta s bočnim otvaranjem koja se koriste kod izrade otpresaka s vanjskim podrezima i otvorima okomitim na smjer otvaranja kućišta. Kod takvih vrsta kućišta pojavljuju se kosa izvlačila kao elementi za bočno otvaranje elementa koji oblikuju kalupnu šupljinu. [5]

Slika 15 prikazuje primjer prethodno opisanog kućišta.



Slika 15. Kućište s bočnim otvaranjem [5]

Primjena vrućeg uljavnog sustava zahtjeva primjenu odgovarajućeg kućišta kalupa koje je prikazano na slici 16.



Slika 16. Kućište kalupa s vrućim uljavnim sustavom [9]

### 3.3. Uljevni sustav

Uljevni sustav kalupa čine svi elementi koji ispunjavaju parcijalnu funkciju razdjeljivanja polimerne taljevine na određeni broj kalupnih šupljina. [5]

Temeljna podjela uljevnih sustava je na:

- čvrsti (hladni) uljevni sustav,
- kapljeviti (vrući) uljevni sustav i
- njihova kombinacija.

Prethodno navedene vrste uljevnih sustava posjeduju određene prednosti i nedostatke. Kod hladnog uljevnog sustava postoji otpad u vidu materijala od kojeg se sastoji sam uljevni sustav, a uz to postoji vjerovatnost za produljenjem vremena hlađenja tj. cjelokupnog ciklusa injekcijskog prešanja. S druge strane prednost uljevnog sustava u odnosu na vruću uljevni sustav je cijena kalupa koja je značajno manja. Vrući uljevni sustav iziskuje dodatnu opremu koje povećava cijenu takvog kalupa. S druge strane vrući uljevni sustav pruža niz prednosti od smanjenog pada tlaka ubrizgavanja, smanjenog utroška materijala, skraćanja ciklusa injekcijskog prešanja i više fleksibilnosti u pogledu konstruiranja uljevnog sustava. [8]

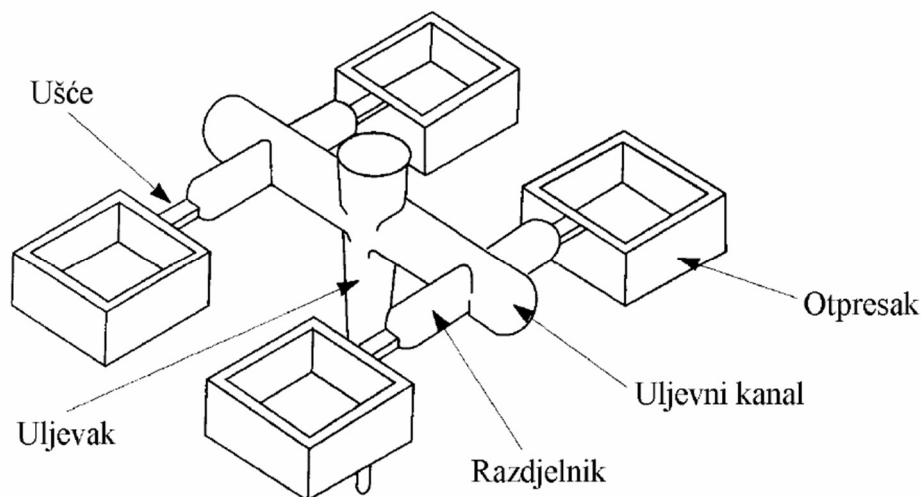
Prema [8] uljevni sustav treba konstruirati tako da:

- pad tlaka u uljevnom sustavu ne bude veći od 50 % tlaka potrebnog da taljevina ispuni kalupne šupljine ili 50 MPa,
- količina materijala od koje se sastoji uljevni sustav bude minimalne, tj. da ona ne iznosi više od 30 % volumena materijala koji ispunjava kalupne šupljine kod hladnog uljevnog sustava ili 100 % volumena materijala kod vrućeg uljevnog sustava i
- da ne dolazi do produljenja vremena hlađenja.

#### 3.3.1. Čvrsti uljevni sustav

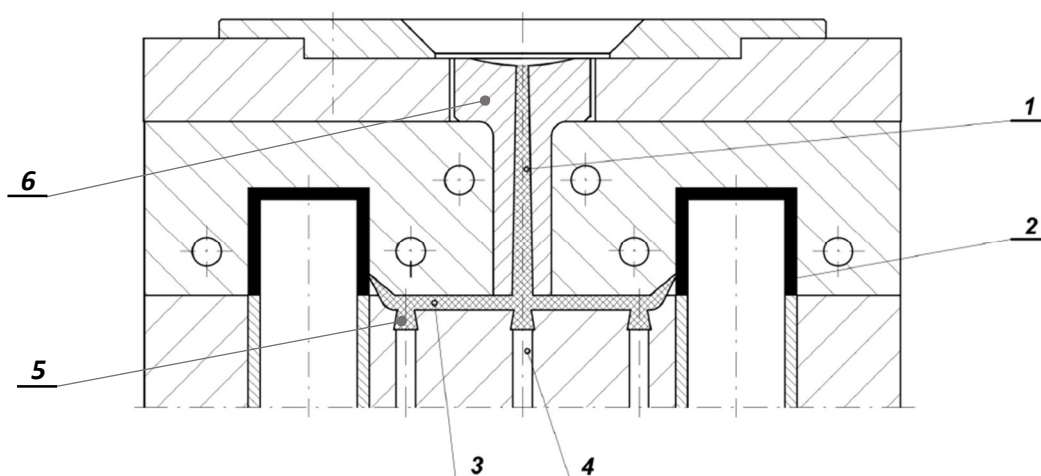
Čvrsti uljevni sustav sastoji se od jednog ili više kanala povezanih u cjelinu koji dovode polimernu taljevinu do kalupnih šupljina. Kanali omogućuju što lakše, brže i laminiranije provođenje polimerne taljevine do kalupne šupljine. Kanali su s kalupnim šupljinama povezani suženjima koja se nazivaju ušćima. [5]

Slika 17 prikazuje čvrsti uljevni sustav s označenim komponentama.



Slika 17. Čvrsti uljevni sustav [5]

Na slici 18. su prikazane komponente kalupa koje služe za oblikovanje i izbacivanje uljavnog sustava.

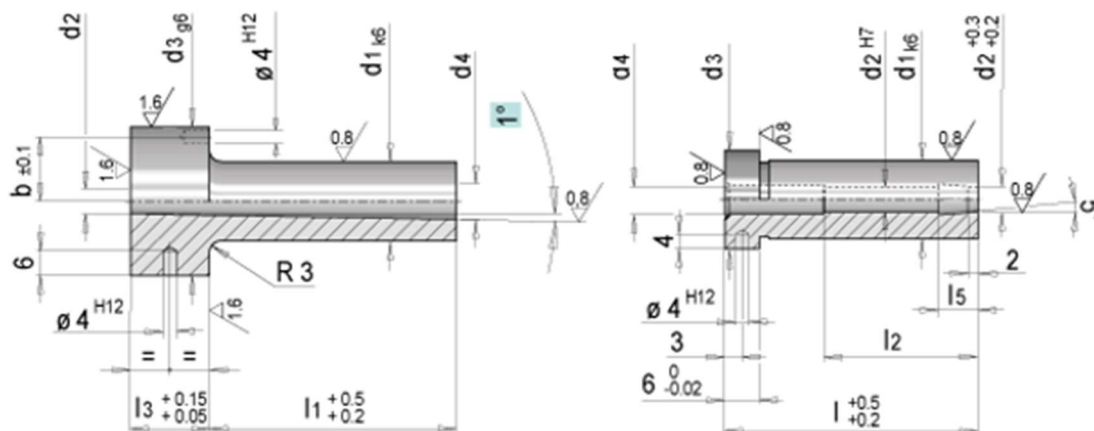


Slika 18. Komponente kalupa za oblikovanje i izbacivanje uljavnog sustava – na slici: 1 – uljevnik, 2 – otpresak, 3 – uljevni kanal, 4 – izvlačilo, 5 – zdenac, 6 – uljevna vitka [5]

Uljevnik se oblikuje pomoću uljevne vitke koja se ugrađuje u nepokretni dio kalupa i priteže s pomoću prstena za centriranje. Kod manjih izvedbi kalupa uljevnik može biti oblikovan izravno u nepokretnoj kalupnoj ploči, no takva izvedba se ne preporuča zbog trošenja konusnog otvora. Na slici 18. mogu se vidjeti zdenci koji su oblikovani u pomičnoj kalupnoj ploči, no i oni mogu biti oblikovani s pomoću uljavnog zdenca također kako bi se izbjeglo trošenje konusnog otvora. Za izbacivanje uljavnog sustava iz kalupne šupljine koristi se izvlačilo prikazano na slici 18. [5]

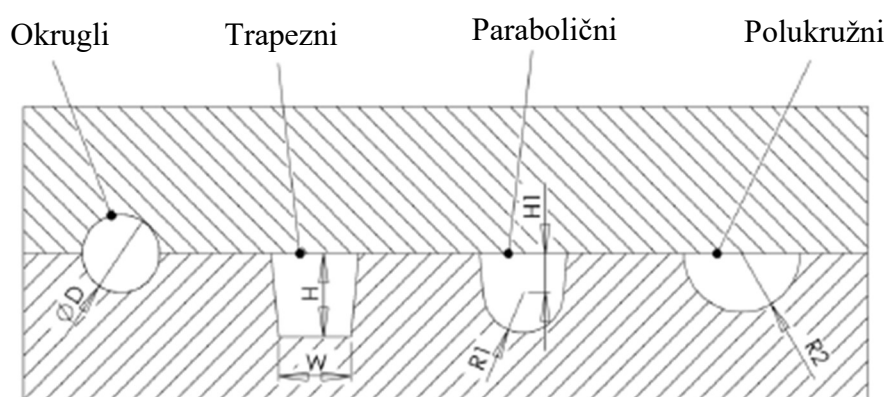


Na slici 19 lijevo je prikazana uljevna vitka, a desno uljevni zdenac proizvođača Mesburger.



Slika 19. Uljevna vitka (lijevo) i uljevni zdenac (desno) [10]

Kod kalupa s više kalupnih šupljina ili kalupa s jednom kalupnom šupljinom, a koja se popunjava s više ušća primjenjuju se uljevni kanali kojima je zadaća povezivanje uljevka s ušćima. Uljevni kanali raspoređuju polimernu taljevinu na način da ona pod jednakim tlakom i jednakim sastavom puni istovremeno sve kalupne šupljine. Dimenzije uljernih kanala se prilagođavaju veličini ubrizgavalice, vrsti uljevka i značajkama polimerne taljevine. Poprečni presjek kanala mora biti veći što je viši pritisak ubrizgavanja ili što su deblje stijenke otpreska. Slika 20. prikazuje poprečne presjeka različitih vrsta uljernih kanala.



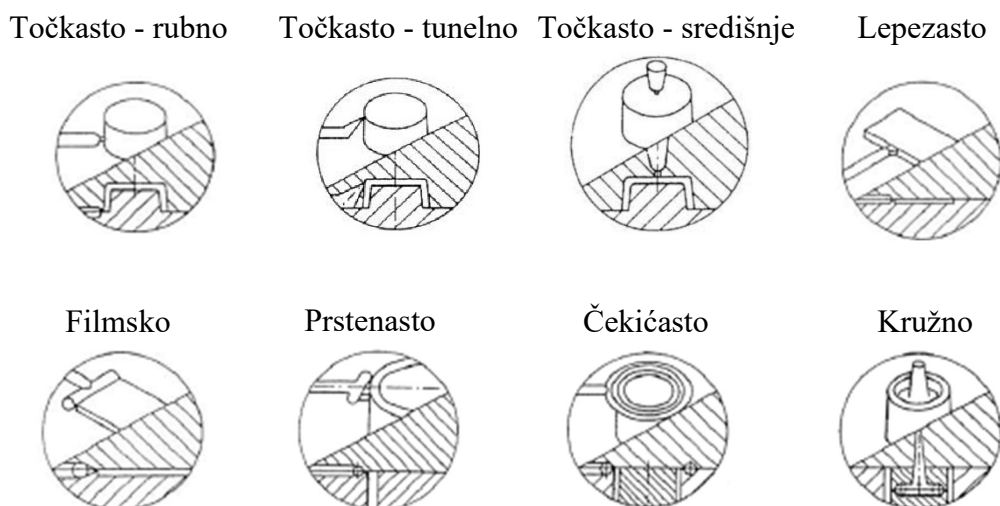
Slika 20. Vrste uljernih kanala [8]

Okrugli poprečni presjek je najpovoljniji, no strojna obrada je zahtjevnija nego li je to kod ostalih vrsta uljernih kanala budući da se obrađuje nepomična i pomična kalupna ploča pri čemu može doći do neusklađenosti. Trapezni poprečni presjek je najjednostavniji za izradu, ali

kod njega problem predstavljaju kutovi u čijoj blizini dolazi do smanjenja protoka taljevine. Navedeni problem se može izbjeći dodavanjem radijusa čime se dobiva parabolični poprečni presjek prikazan na slici 20. Nedostatak svih ne kružnih poprečnih presjeka je u tome što oni moraju biti veći u odnosu na ekvivalentni kružni poprečni presjek budući da takvi uljevni kanali koriste veću količinu taljevine kako bi se postigao isti tlak ispunjavanja kalupne šupljine kao kod kanala s kružnim poprečnim presjekom. [8]

Ušće je mjesto na kojem taljevina ulazi u kalupnu šupljinu i ono predstavlja najvažniji element uljavnog sustava kalupa. Ušće je znatno manjeg presjeka od uljavnog kanala. Postoje različite vrste poprečnih presjeka ušća, a to su: točkasto, lepezasto, filmsko, čekićasto, prstenasto i kružno. Unutar svake vrste postoje još dodatni tipovi ušća. Poprečni presjek ušća se odabire na temelju oblika uljavnog kanala pri čemu se pravokutna ušća rabe zbog jednostavne izvedbe, dok ušća s kružnim presjekom ostvaruju najbolje rezultate. [5]

Slika 21. prikazuje prethodno navedene vrste ušća.



Slika 21. Najčešće vrste ušća [5]

### 3.3.2. Vrući uljevni sustav

Prema [5] osnovna podjela vrućih uljavnih sustava je na sustave koji posjeduju:

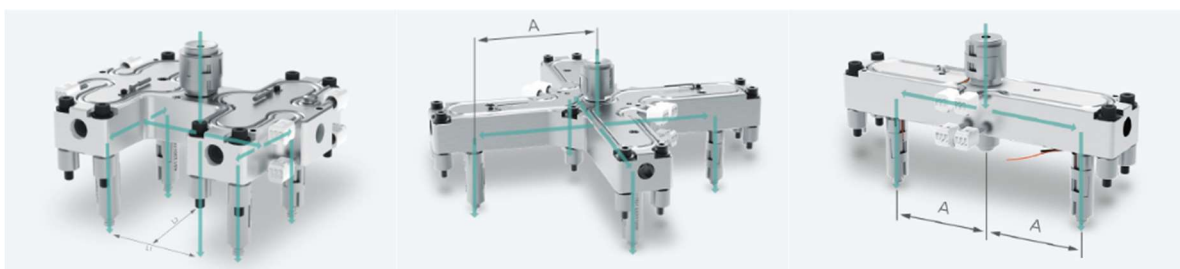
- unutrašnje grijane mlaznice,
- vanjske grijane mlaznice ili
- vanjske grijane mlaznice s iglastim ventilom.

Slika 22. prikazuje mlaznice s unutrašnjim grijanjem lijevo i s vanjskim grijanjem desno.



Slika 22. Vruće mlaznice [5]

Prikazane mlaznice se ugrađuju u razdjelne blokove prikazane na slici 23. Razdjelni blokovi definiraju broj i raspored kalupnih šupljina. Takvi blokovi se ugrađuju u ploču razdjelnog bloka kalupa prikazanog na slici 16.



Slika 23. Razdjelni blokovi [11]

Uz prethodno navedeno vrući uljevni sustav mora posjedovati i kontrolnu jedinicu koja upravlja radom mlaznica. Slika 24 prikazuje kontrolnu jedinicu proizvođača Mesburger.



Slika 24. Kontrolna jedinica vrućih mlaznica [11]

### 3.4. Sustav za temperiranje kalupa

Zadaća sustava za temperiranje je postizanje propisane temperature kalupne šupljine, bez obzira treba li kalupu toplinu dovesti ili odvesti. Kalupe za oblikovanje plastomera je potrebno hladiti, dok s druge strane kalupe za oblikovanje duromera je potrebno zagrijavati. Toplina se kalupu može dovesti i odvesti kapljevinama, a grijalima samo dovesti. [5]

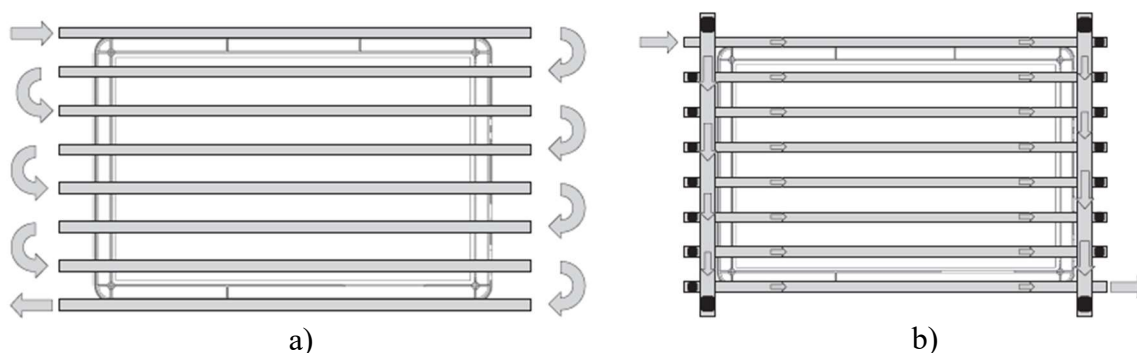
Kao najčešći medij za temperiranje se koristi voda zbog niske cijene, široke dostupnosti i vrlo dobrih toplinskih svojstava. Potrebno je osigurati turbulentno strujanje medija za temperiranje kako bi se postigla što brža izmjena topline u kalupu. [2]

Osnovno načelo koje određuje uspješnost prerade polimera injekcijskim prešanjem je optimiranje temperaturne razlike između temperature taljevine i temperature stijenke kalupne šupljine. Kako bi se postiglo što kraće trajanje procesa injekcijskog prešanja potrebno je postići što veću razliku između navedenih temperatura. Sa stajališta kvalitete velika temperaturna razlika može dovesti do određenih nedostataka na otpresku, pa je poželjno da temperaturna razlika između temperature taljevine i temperature kalupne šupljine bude što manja. [5]

Prema [5] krugovi za temperiranje se mogu podijeliti na :

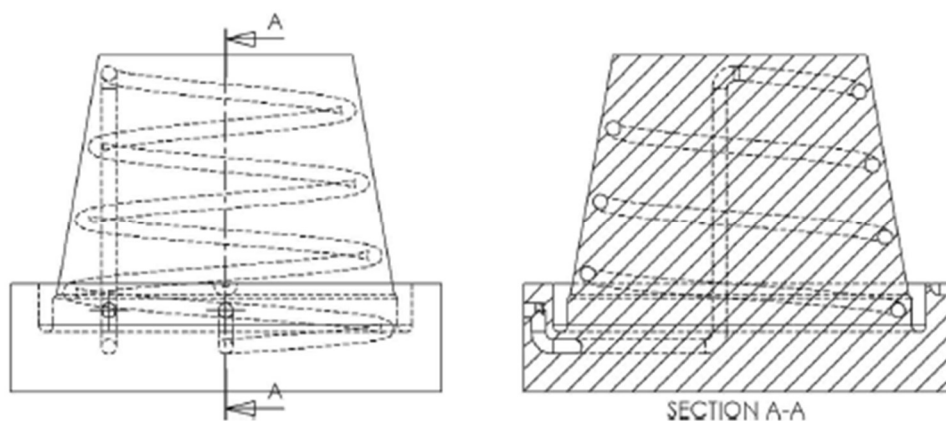
- krugove za temperiranje gnijezda i kalupnih ploča i
- krugove za temperiranje žigova i jezgara.

Na slici 25 je prikazana serijska i paralelna konfiguracija kanala za temperiranje kalupnih ploča.



**Slika 25. Konfiguracije kanala za temperiranje kalupnih ploča: a) serijska konfiguracija, b) paralelna konfiguracija [8]**

Slika 26 prikazuje primjer konfiguracije kanala za temperiranja žiga.



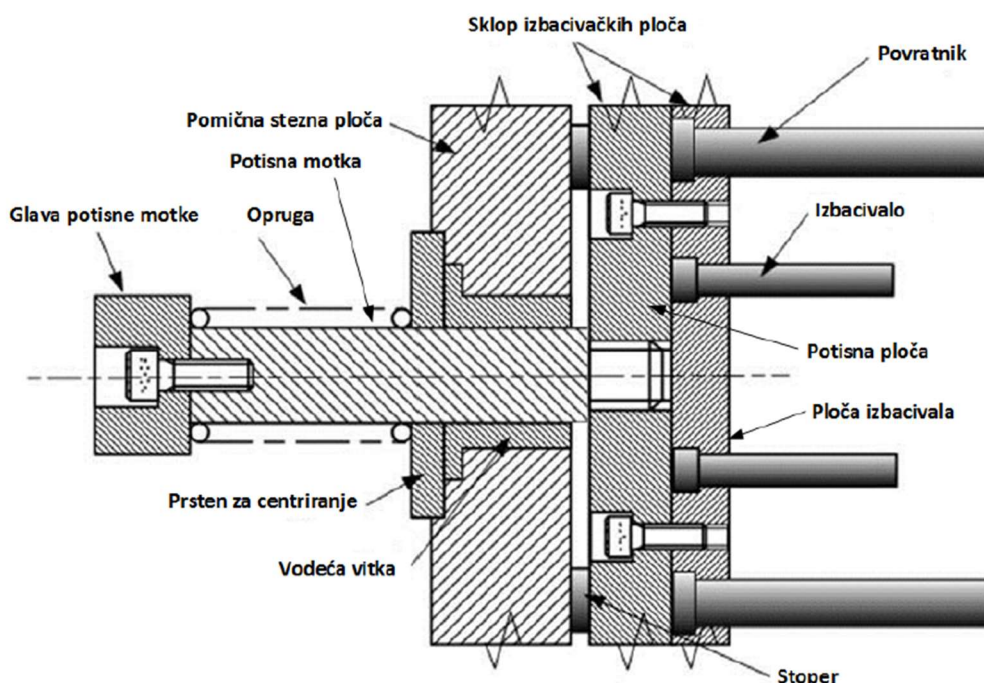
**Slika 26. Konfiguracija kanala za temperiranje žiga [8]**

### 3.5. Sustav za vađenje otpreska iz kalupa

Sustav za vađenje otpreska obavlja parcijalnu funkciju otvaranja kalupa i vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Prema [5] sustav za vađenje otpreska mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- vađenje otpreska bez oštećivanja,
- ostavljanje što manje vidljivih otisaka na otpresku,
- jednoliko vađenje otpresaka,
- pravilno postavljeni elementi za vađenje otpresaka i
- pravilna koordinacija sustava s ostalim elementima kalupa.

Na slici 27 je prikazan sustav za vađenje otpreska iz kalupa.



Slika 27. Sustav za vađenje otpreska iz kalupa [5]

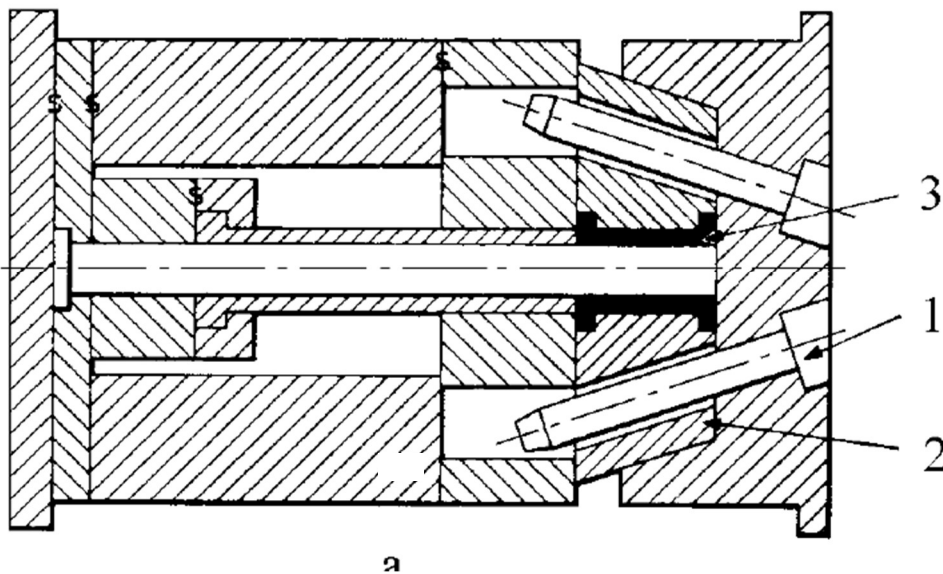
Postupak izbacivanja otpreska iz kalupa započinje otvaranjem kalupa. Nakon nekoliko trenutaka dolazi do aktiviranja potisne motke koja potiskuje sklop izbacivačkih ploča. U sklopu izbacivačkih ploča nalaze se izbacivala koja zatim potiskuju otpreska izvan kalupne šupljine. Duljinu puta izbacivala je potrebno pažljivo odrediti kako bi se osiguralo nesmetano vađenje otpreska. Povratak izbacivačkog paketa ploča ostvaruje se oprugom ili hidraulički, pri čemu povratnici služe za vođenje izbacivačkog paketa ploča u početni položaj prilikom zatvaranja kalupa. [8]

Slika 28 prikazuje različite vrste izbacivala.



Slika 28. Izbacivala [10]

Postoje slučajevi kod kojih prikazana izbacivala nisu dovoljna za vađenje otpreska iz kalupa. To su slučajevi kod kojih otpresak posjeduje određene podreze ili navoje. U slučaju podreza neophodna je primjena klizača prikazanog na slici 29.



Slika 29. Primjena klizača – na slici: 1 – koso izvlačilo, 2 – klizač, 3 – otpresak [5]

Kod otpresaka s unutrašnjim navojem primjenjuju se raskoljive jezgre koje omogućuju vađenje otpreska bez odvijanja ili različiti mehanizmi koji posjeduju zubne letve, zupčanike i slično, a koji omogućuju vađenje otpreska odvijanjem navojnih jezgri. Slika 30 prikazuje primjer raskoljive jezgre.



**Slika 30. Raskoljiva jezgra [5]**

### **3.6. Sustav za vođenje i centriranje elemenata kalupa**

Sustav za vođenje i centriranje sastoji se od različitih komponenata koje osiguravaju pravilno unutarnje i vanjsko vođenje elemenata kalupa. Unutarnje vođenje podrazumijeva pravilno vođenje elemenata kalupa tijekom otvaranja i zatvaranja kalupa, kao i pravilno centriranje elemenata kalupa prilikom nalijeganja pomičnog dijela kalupa na nepomični dio kalupa. S druge strane vanjsko vođenje podrazumijeva pravilno pozicioniranje kalupa na nosače ubrizgavalice i na samu mlaznicu ubrizgavalice.

Na slici 31 su prikazane komponente za unutarnje vođenje kalupa (vodeći zatic, vodeća puškica, centrirna puškica, povratnici i ostalo).



**Slika 31. Komponente unutarnjeg vođenja i centriranja [10]**

Slika 32 prikazuje prsten za centriranje koji se primjenjuje za vanjsko centriranje kalupa na mlaznicu ubrizgavalice.

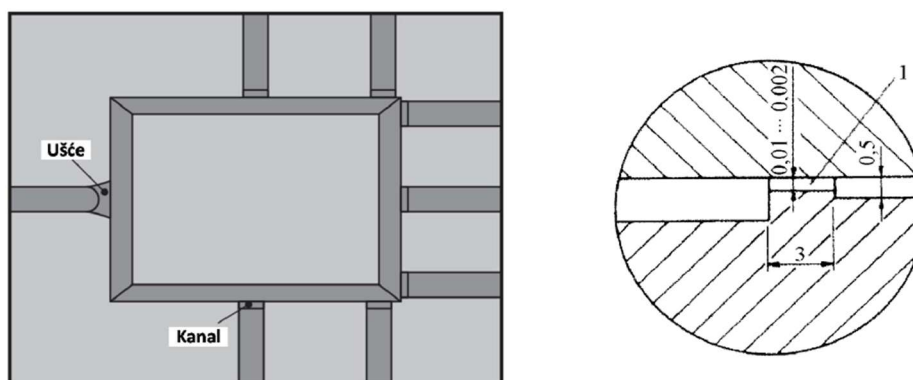


Slika 32. Prsten za centriranje kalupa [10]

### 3.7. Sustav za odzračivanje kalupne šupljine

Svaka kalupna šupljina sadrži zrak koji mora neometano izlaziti izvan kalupne šupljine tijekom ispunjavanja s polimernom taljevinom. Ukoliko zrak ne može izaći ili presporo izlazi izvan kalupne šupljine može doći do problema u vidu sporog punjenja kalupne šupljine, preranog postizanja zadanog tlaka taljevine u kalupnoj šupljini i u najgorem slučaju paljenja polimernog materijala na mjestima zaostalog zraka. Odzračivanje se vrši s pomoću malih otvora na sljubnici kalupa, kroz izbacivala, kroz umetke i s pomoću specijalnih ventila. [2]

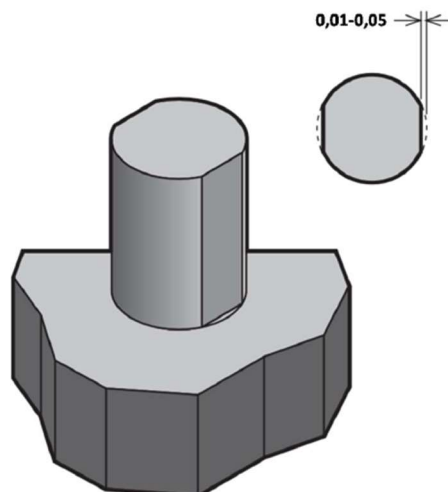
Slika 33 prikazuje izgled i dimenzije kanala za odzračivanje na sljubnici kalupa.



Slika 33. Kanali za odzračivanje na sljubnici kalupa [5]

Na slici 34 je prikazan kanal za odzračivanje izveden na izbacivalu.





Slika 34. Kanal za odzračivanje na izbacivalu [5]

## 4. PARAMETRI PROCESA INJEKCIJKOG PREŠANJA

Prema [12] postoji više od 200 parametara koji izravno ili posredno utječu na proces injekcijskog prešanja. U sklopu ovog poglavlja opisati će se grupe parametara koje imaju najveći utjecaj, a to su redom po važnosti: temperatura, tlak i vrijeme. Prilagođavanje jedne od prethodno navedenih grupa može imati utjecaj na jednu, nekoliko njih ili na sve grupe parametara.

### 4.1. Temperatura

#### 4.1.1. Temperatura taljevine

Kao što je to već ranije spomenuto, polimerni materijal u obliku granulata se tali unutar cilindra za taljenje koji se sastoji od nekoliko zona. Zagrijavanje polimernog materijala se postiže s pomoću grijača u obliku prstena postavljenih na cilindar za taljenje i trenjem koje se ostvaruje između polimernog materijala i pužnog vijka. Polimerni materijal se prolaskom kroz pojedine zone cilindra za taljenje postupno zagrijava. Temperatura taljevine se mjeri u mlaznici ubrizgavalice prilikom ubrizgavanja polimerne taljevine. Iznos temperature taljevine se određuje u ovisnosti o vrsti polimernog materijala. Tablica 1 prikazuje preporučene iznose temperature taljevine za neke polimerne materijale. [12]

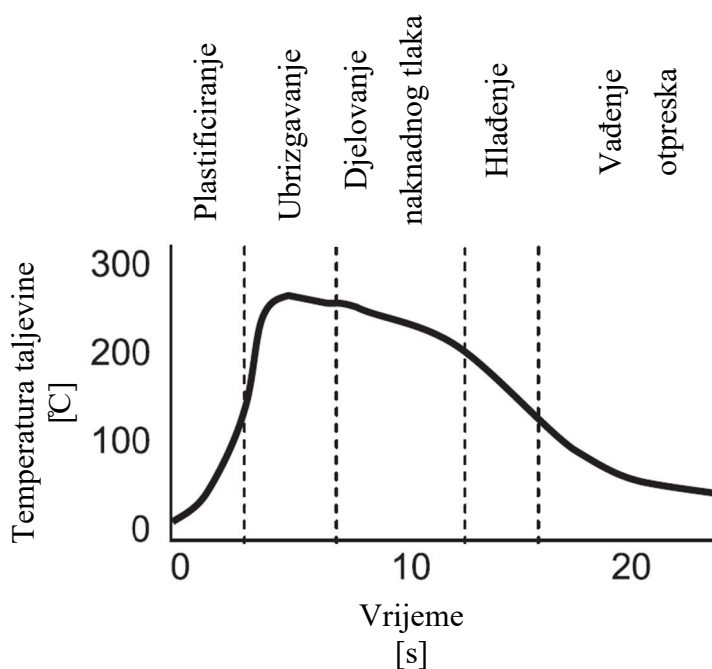
**Tablica 1. Preporučene temperature taljevine nekih plastomera [12]**

<b>Polimerni materijal</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
ABS	216
Poliamid PA	343
Polietilen niske gustoće LDPE	163
Polietilen visoke gustoće HDPE	204
Polipropilen PP	177
Polistiren PS	177
PVC	163

Iz prethodne tablice se može vidjeti kako postoje značajne razlike u preporučenim temperaturama taljevine za pojedine materijale.

Temperatura taljevine određuje termodinamička svojstva taljevine tj. viskoznost, entalpiju i specifični obujam, pa shodno tome ima utjecaj na određene parametre procesa. Primjerice, s povišenjem temperature taljevine dolazi do povećanja tlaka u kalupnoj šupljini. Temperatura taljevine je od značajnog utjecaja i na vrijeme ciklusa pošto se s povišenjem temperature taljevine produljuje vrijeme očvršćivanja ušća. [13]

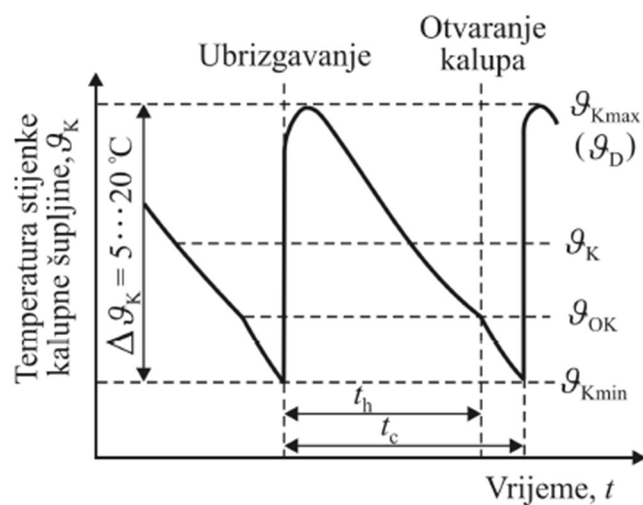
Slika 35 prikazuje tijek temperature taljevine tijekom procesa injekcijskog prešanja za materijal ABS.



Slika 35. Temperatura taljevine – ABS [8]

#### 4.1.2. Temperatura stijenke kalupne šupljine

Temperatura stijenke kalupne šupljine je glavni parametar procesa injekcijskog prešanja koji utječe na svojstva otpreska, proizvodnost procesa, dimenzijsku točnost otpreska, ponovljivost procesa i ostalo. Spomenuta temperatura je vrlo kompleksan parametar koji ovisi o većem broju statičkih i dinamičkih čimbenika, a uz to potrebno je spomenuti kako se ne radi o samo jednoj temperaturi nego o temperaturnom polju koje se ciklički mijenja tijekom procesa injekcijskog prešanja. Promjena temperature stijenke kalupne šupljine je prikazana na slici 36. [13][14]



Slika 36. Temperatura stijenke kalupne šupljine [15]

Iz prethodne slike se može uočiti kako se maksimalna temperatura kalupne šupljine tj. dodirna temperatura ( $\vartheta_D$ ) postiže u trenutku ubrizgavanja taljevine u kalupnu šupljinu. Po završetku ubrizgavanja slijede faze djelovanja naknadnog tlaka, hlađenja i vađenja otpreska tijekom kojih medij za temperiranje i okolina preuzimaju toplinu od stijenke kalupne šupljine što rezultira postizanjem minimalne temperature kalupne šupljine ( $\vartheta_{Kmin}$ ). Temperatura stijenke kalupne šupljine ( $\vartheta_K$ ) se definira kao aritmetička sredina između dodirne temperature ( $\vartheta_D$ ) i temperature stijenke u trenutku otvaranja kalupa ( $\vartheta_{OK}$ ). [14]

Tablica 2 prikazuje preporučene vrijednosti temperature stijenke kalupne šupljine za neke polimerne materijale.

**Tablica 2. Preporučene temperature stijenke kalupne šupljine za neke plastomere [12]**

Polimerni materijal	Temperatura [°C]
ABS	185
Poliamid PA	204
Polietilen niske gustoće LDPE	27
Polietilen visoke gustoće HDPE	43
Polipropilen PP	49
Polistiren PS	60
PVC	27

Ranije je spomenuto kako temperatura stijenke kalupne šupljine ovisi o nizu statičkih i dinamičkih čimbenika, pa je iz toga razloga vrlo teško postići i regulirati propisane vrijednosti temperature navedene u tablici 2.

Temperatura stijenke kalupne šupljine također ima utjecaj na tlak, ali samo za vrijeme djelovanja naknadnog tlaka. Kao što je to slučaj i s temperaturom taljevine, tako i s porastom temperature stijenke kalupne šupljine dolazi do povećanja iznosa tlaka što bitno utječe na proces hlađenja otpreska. [13]

#### 4.1.3. Temperatura medija za temperiranje

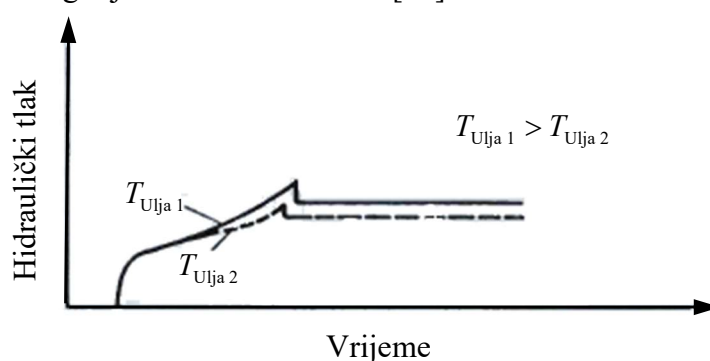
Prema [14] temperatura medija za temperiranje se definira kao aritmetička sredina između temperature medija za temperiranje na ulasku u kalup i temperature medija za temperiranje na izlasku iz kalupa. Primjenom temperirala opisanog u poglavlju 2.1.3. postoji mogućnost reguliranja temperature medija za temperiranje, što omogućuje postizanje propisanog temperaturnog polja u kalupu. Reguliranje temperature medija za temperiranje je znatno

jednostavnije budući da ono ne ovisi o velikom broju čimbenika poput temperature stijenke kalupne šupljine.

## 4.2. Tlak

### 4.2.1. Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje

Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje je zadužen za svladavanje otpora tečenja taljevine kroz mlaznicu ubrizgavalice, uljevni sustav i kalupnu šupljinu. Karakteristika hidrauličkog tlaka vrlo dobro odgovara karakteristici tlaka taljevine koja se nalazi na vrhu pužnog vijka, ali samo tijekom faze ubrizgavanja. Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje naglo raste od minimalnog tlaka u sustavu do tlaka koji omogućuje svladavanje otpora tečenja taljevine od mlaznice ubrizgavalice do kalupne šupljine, zatim se postiže iznos naknadnog tlaka u kalupu i na kraju tlak ponovno pada na iznos minimalnog tlaka u sustavu. Viskoznost hidrauličkog ulja koja ovisi o temperaturi ima značajan utjecaj na hidraulički tlak. Slika 37 prikazuje utjecaj temperature hidrauličkog ulja na hidraulički tlak. [13]

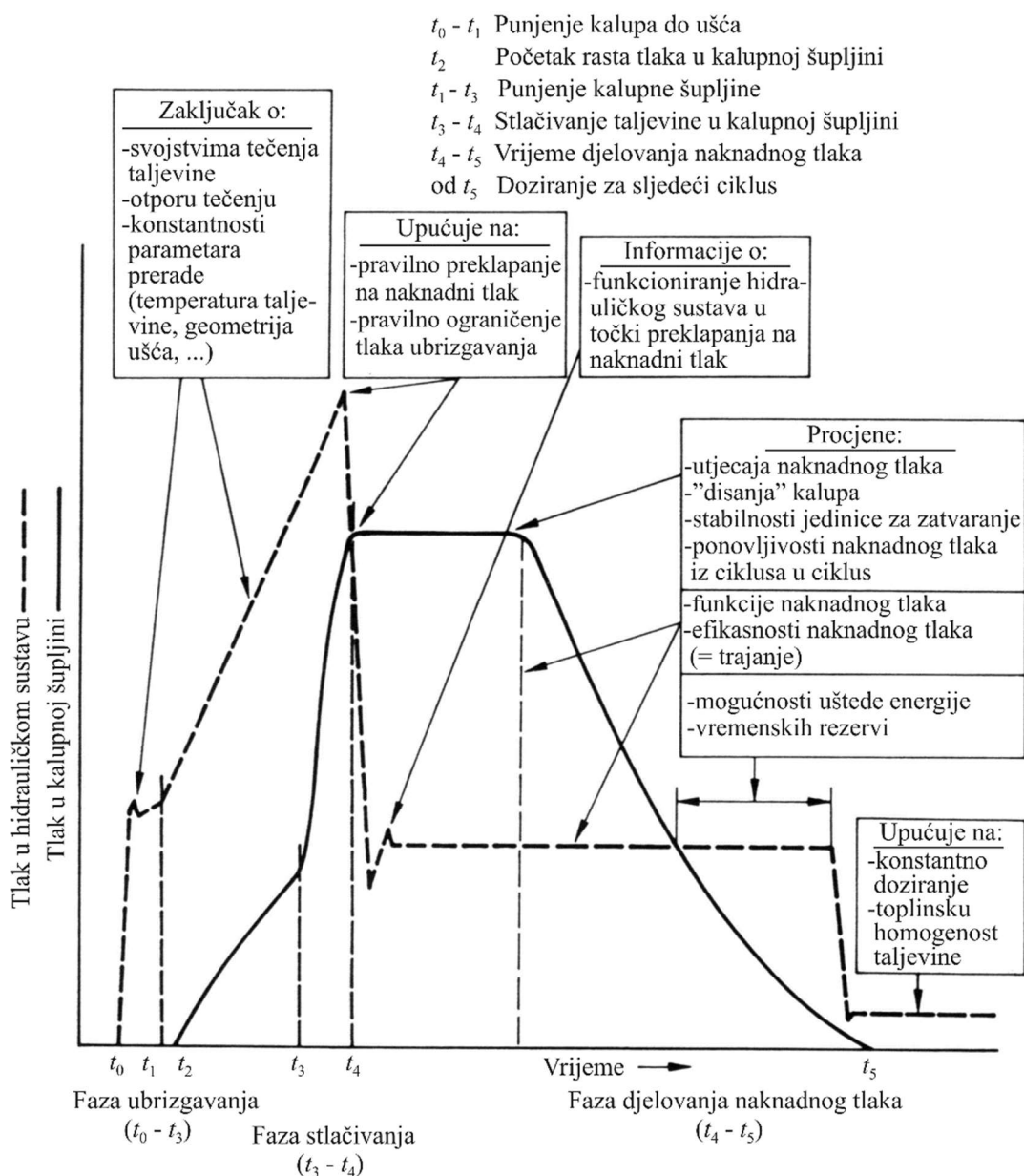


Slika 37. Utjecaj temperature hidrauličkog ulja na hidraulički tlak [13]

Iz prethodne slike se može zaključiti kako je ubrizgavalicu potrebno prethodno zagrijati kako bi se postigao optimalni hidraulički tlak.

Mjerenje hidrauličkog tlaka u jedinici za ubrizgavanje je vrlo jednostavno, a može dati vrlo bitne informacije o popunjavanju kalupne šupljine tj. o otporu pri tečenju taljevine kroz mlaznicu ubrizgavalice, uljevni sustav i kalupnu šupljinu.. Analizom karakteristike hidrauličkog tlaka u jedinici za ubrizgavanje mogu se prepoznati određene poteškoće u sustavu tijekom popunjavanja kalupne šupljine, no ne mogu se utvrditi nikakve poteškoće tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka. [13]

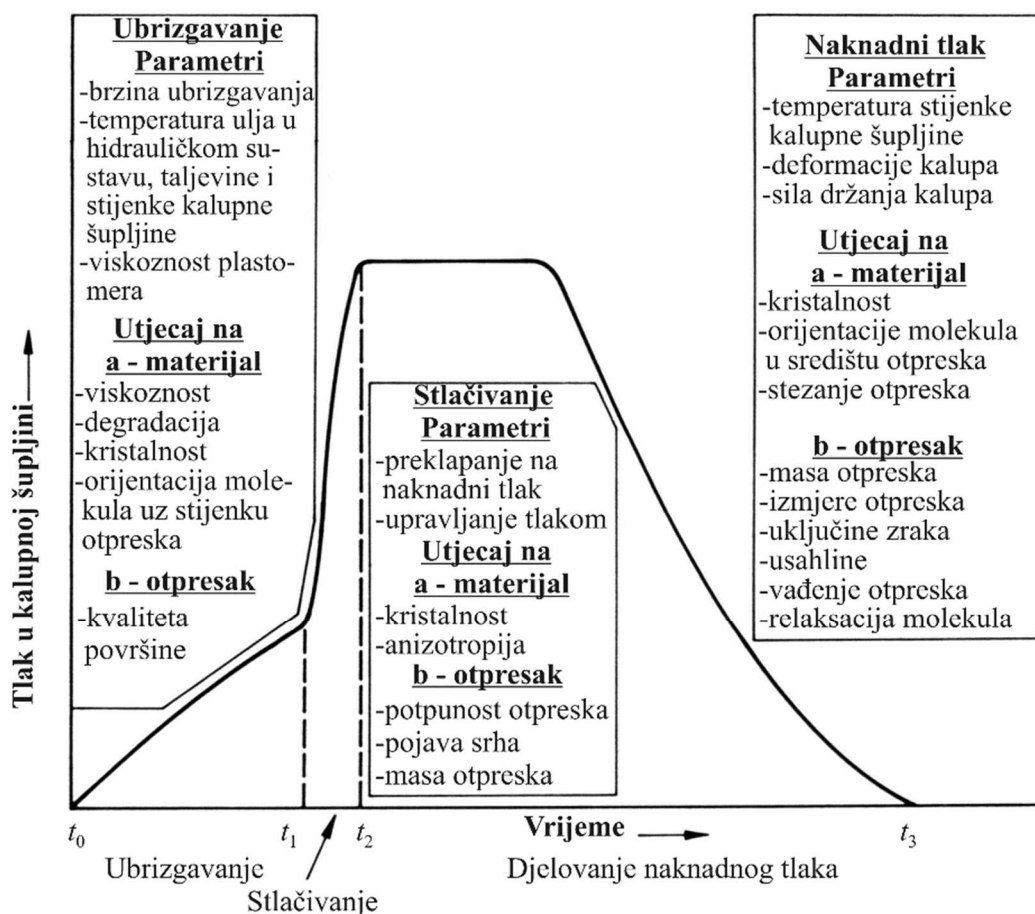
Slika 38 prikazuje karakteristiku hidrauličkog tlaka u jedinici za ubrizgavanje i tlaka kalupne šupljine s naznačenim informacijama koje se mogu prikupiti tijekom analize.



**Slika 38.** Analiza karakteristike hidrauličnog tlaka u jedinici za ubrizgavanje [13]

#### 4.2.2. Tlak u kalupnoj šupljini

Tlak u kalupnoj šupljini predstavlja središnju varijablu procesa injekcijskog prešanja koja omogućuje njegovo vođenje. Mjerenje tlaka u kalupnoj šupljini je dosta kompleksno budući da mjereni tlak izravno ovisi o položaju senzora u kalupnoj šupljini. Karakteristika tlaka u kalupnoj šupljini se sastoji od tri glave faze: faza ubrizgavanja, faza stlačivanja i faza djelovanja naknadnog tlaka. Faza ubrizgavanja primarno ima utjecaja na izgled samog otpreska, dok faza stlačivanja direktno utječe na dimenzijsku točnost otpreska. Slika 39 prikazuje karakteristiku tlaka u kalupnoj šupljini s naznačenim informacijama koje se mogu prikupiti tijekom analize.



Slika 39. Analiza karakteristike tlaka u kalupnoj šupljini [13]

Oblik karakteristike tlaka u kalupnoj šupljini može upozoriti na tipične pogreške u procesu. Primjerice, izražena vršna vrijednost tlaka u kalupnoj šupljini u fazi stlačivanja ukazuje na netočno podešenu točku preklapanja na naknadni tlak. Takva pogreška uzrokuje pojavu srha na otpresku, napetost u materijalu uslijed prekomjernog stlačivanja taljevine, odnosno smanjenu dimenzijsku točnost i razliku u težinama otpreska između pojedinih ciklusa. [13]

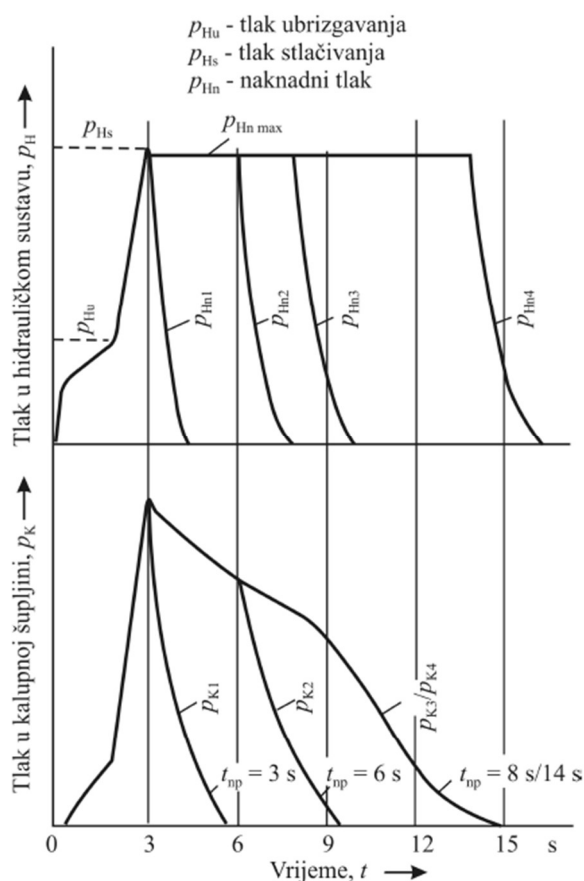
#### 4.2.3. Preklapanje na naknadni tlak

Točka preklapanja na naknadni tlak se vrlo često netočno određuje iz razloga što ne postoji pouzdana informacija o tlaku u kalupnoj šupljini tj. u praksi se vrlo rijetko ugrađuju senzori tlaka u kalupnu šupljinu. Poželjno je postići optimalnu točku preklapanja na naknadni tlak kako bi se izbjegli problemi na otpresku, kalupu i jedinici za otvaranje i zatvaranje kalupa. [13]

Za određivanje optimalne točke preklapanja koristi se nekoliko pristupa: preklapanje ovisno o vremenu, preklapanje ovisno o prijednom putu pužnog vijka, preklapanje ovisno o tlaku u kalupnoj šupljini i preklapanje ovisno o sili držanja kalupa. [13]

#### 4.2.4. Naknadni tlak

Cilj održavanja naknadnog tlaka u kalupnoj šupljini je sprječavanje stezanja materijala što utječe na dimenzijsku točnost i izgled otpreska. Faza djelovanja naknadnog tlaka počinje od točke preklapanja na naknadni tlak, a završava u trenutku očvršćivanja ušća. Slika 40 prikazuje odnos tlaka u hidrauličkom sustavu i tlaka u kalupnoj šupljini. [13]



**Slika 40. Odnos tlaka u hidrauličkom sustavu i tlaka u kalupnoj šupljini [13]**

Na prethodnoj slici je vidljivo kako održavanje naknadnog tlaka u hidrauličkom sustavu nakon proteka određenog vremena više nema utjecaja na tlak u kalupnoj šupljini tj. tlak u hidrauličkom sustavu ima utjecaj na tlak u kalupnoj šupljini sve do trenutka očvršćivanja ušća nakon čega se gubi bilo kakav utjecaj. Stoga se može zaključiti kako je vrlo važno odrediti vrijeme djelovanja naknadnog tlaka tj. trenutak očvršćivanja ušća. Bez mogućnosti izravnog mjerenja tlaka u kalupnoj šupljini iznos optimalnog naknadnog tlaka se određuje na temelju mase otpreska i vremena djelovanja naknadnog tlaka. [13]



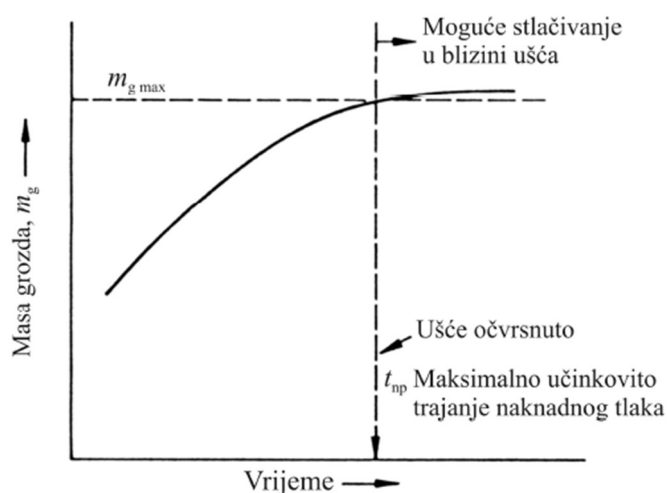
### 4.3. Vrijeme

#### 4.3.1. Vrijeme ubrizgavanja (brzina ubrizgavanja)

Vrijeme ubrizgavanja je recipročno povezano s brzinom ubrizgavanja. Brzina ubrizgavanja predstavlja brzinu kretanja pužnog vijka tijekom ubrizgavanja taljevine u kalup. Što je veća brzina ubrizgavanja, to će biti kraće vrijeme ubrizgavanja, no pored toga dolazi i do povećanja tlaka u kalupnoj šupljini. Povećanje tlaka u kalupnoj šupljini je izravna posljedica većeg otpora tečenju taljevine kroz uljevni sustav do kalupne šupljine. Produljenje vremena ubrizgavanja tj. smanjenje brzine ubrizgavanja uzrokuje veći pad tlaka u blizini ušća zbog procesa hlađenja koji se odvija usporedno s procesom ubrizgavanja, pri čemu dolazi do povećanja viskoznosti taljevine i smanjenja efektivnog presjeka uljevnih kanala. Poželjno je postići minimalno vrijeme ubrizgavanja kako bi se postigla što veća proizvodnost i kvaliteta otpreska. [13]

#### 4.3.2. Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka

Optimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka je važno odrediti. U slučaju prekratkog djelovanja naknadnog tlaka dolazi do greške na otpresku, a s druge strane u slučaju predugog djelovanja naknadnog tlaka dolazi do nepotrebnog utroška vremena i energije. Slika 41 prikazuje način određivanja optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka. [13]



Slika 41. Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka [13]

Sa prethodne slike je vidljivo kako nakon određenog trenutka nema porasta mase grozda. Taj trenutak predstavlja trenutak očvršćivanja ušća i nakon njega nema potrebe održavati naknadni tlak u kalupnoj šupljini. Dodatno održavanje naknadnog tlaka predstavlja nepotrebnii utrošak energije i produljenje ukupnog ciklusa injekcijskog prešanja. [13]

### 4.3.3. Vrijeme hlađenja otpreska

Vrijeme hlađenja otpreska prema normi DIN 24450 se definira kao vrijeme koje započinje naredbom „ubrizgavanje“, a završava naredbom „otvaranje kalupa“. Vrijeme definirano na taj način obuhvaća sljedeće operacije: ubrizgavanje, djelovanje naknadnog tlaka, plastificiranje i vraćanje mlaznice u početni položaj. Vrijeme hlađenja otpreska predstavlja najdulje vrijeme i vrlo često sve prethodne operacije završavaju prije nego li se otpresak ohladi do temperature postojanosti oblika. Iz prethodnog razloga je nužno osigurati dodatno vrijeme hlađenja otpreska. Slika 42 prikazuje vremenski dijagram s naznačenim fazama injekcijskog prešanja. [14]



Slika 42. Vremenski dijagram injekcijskog prešanja [14]

Vrijeme hlađenja otpreska ovisi o nizu parametara, a to su:

- debljina stijenke otpreska,
- oblik otpreska,
- toplinska svojstva polimerne taljevine,
- temperatura polimerne taljevine,
- temperatura stijenke kalupne šupljine i
- temperatura postojanosti oblika otpreska.

### 4.3.4. Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja

Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja sastoji se od vremena hlađenja otpreska i pomoćnih vremena. Pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja se dijeli na: vrijeme podmazivanja i čišćenja kalupa, vrijeme posluživanja otvorenog kalupa, vrijeme zatvaranja kalupa, vrijeme ukapčanja, vrijeme približavanja mlaznice, vrijeme otvaranja kalupa i vrijeme vađenja otpreska iz kalupne šupljine. [14]

## 5. RAČUNALNA SIMULACIJA PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA – MOLDEX 3D

### 5.1. Uvod

Danas se postupkom injekcijskog prešanja izrađuju otpresci vrlo složenih geometrija izrađeni od polimernih materijala izrazito dobrih svojstva. Tržište postavlja visoke zahtjeve na kvalitetu takvih proizvoda, a ujedno zahtjeva i što kraći ciklus injekcijskog prešanja, te niže cijene kalupa i otpresaka. Za zadovoljavanje prethodno navedenih zahtjeva neophodna je primjena računalne simulacije primjenom CAE (Computer Aided Engineering) softvera. Pomoću računalne simulacije mogu se predvidjeti određeni nedostaci i problemi u vidu grešaka u konstrukcijama kalupa i otpresaka, te grešaka u određivanju parametara procesa injekcijskog prešanja. Uočeni nedostaci i problemi mogu se otkloniti veću fazama razvoja i konstruiranja što je puno ekonomičnije nego da se spomenuti nedostaci primijete kada je kalup već izrađen. S druge strane primjena računalne simulacije uzrokuje veće početne troškove koji se u kasnijim fazama isplate. Također je vrlo bitno napomenuti kako kvaliteta dobivenih rezultata računalne simulacije i njihova interpretacija izravno ovisi o znanju i vještinama osobe koja se njome koristi tj. osobe koja zadaje ulazne parametre. [15]

Tablica 3 prikazuje koje se pojave i parametre prate tijekom određenih faza ciklusa injekcijskog prešanja primjenom računalne simulacije. [15]

**Tablica 3. Promatrane pojave i parametri primjenom računalne simulacije [15]**

Faza ciklusa injekcijskog prešanja	Promatrane pojave/parametri
Punjenje kalupne šupljine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- popunjenost kalupne šupljine</li> <li>- potreban tlak ubrizgavanja</li> <li>- potrebno vrijeme ubrizgavanja</li> <li>- postojanje mjesno većih otpora tečenju</li> <li>- pojava uključina zraka u otpresku</li> <li>- pojava linija spajanja</li> <li>- uravnoteženje uljevnog sustava</li> <li>- temperaturno polje taljevine</li> <li>- temperaturno polje otpreska</li> <li>- razdioba tlaka</li> <li>- razdioba smičnih naprezanja</li> </ul>

Djelovanje naknadnog tlaka	<ul style="list-style-type: none"> <li>- praćenje čela taljevine</li> <li>- zone prekomjernog stlačivanja molekula</li> <li>- razdioba tlaka</li> <li>- razdioba stezanja</li> <li>- masa/gustoća otpreska</li> <li>- temperatura otpreska</li> </ul>
Hlađenje otpreska	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vrijeme hlađenja</li> <li>- vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja</li> <li>- temperiranje</li> <li>- temperaturno polje otpreska</li> <li>- temperaturno polje kalupa</li> <li>- postizanje temperature postojanosti oblika</li> <li>- mjesta akumulacije toplinske energije</li> </ul>
Deformiranje otpreska	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stezanje</li> <li>- vitoperenje</li> <li>- deformiranje tijekom faze punjenja i djelovanja naknadnog tlaka</li> <li>- deformiranje tijekom faze hlađenja otpreska</li> <li>- deformiranje nakon vađenja otpreska iz kalupne šupljine</li> </ul>

## 5.2. Numeričke metode

Računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja je vrlo složena budući da opisuje različite pojave i parametre navedene u prethodnom poglavlju. Za njihovo kvalitetno opisivanje potrebna je primjena različitih vrsta numeričkih metoda koje će biti opisane u nastavku. [16]

### 5.2.1. Metoda konačnih elemenata (FEM)

Metoda konačnih elemenata se upotrebljava za rješavanje problema rubnih vrijednosti, a temelji se na fizičkoj diskretizaciji razmatranog područja na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi. Elementi su međusobno povezani točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Za svaki element pretpostavlja se rješenje zadane diferencijalne jednadžbe (koja npr. opisuje razdiobu tlaka u kalupnoj šupljini) u obliku interpolacijskih funkcija koje povezuju zavisne varijable s njihovim vrijednostima u čvorovima. Izvodi se sustav algebarskih jednadžbi

u kojem su nepoznanice čvorne vrijednosti svih elementa diskretizirano područja. [17]  
U okviru programskog paketa Moldex 3D metoda konačnih elementa se najviše upotrebljava za opisivanje faze djelovanja naknadnog tlaka i faze deformiranja otpreska. [16]

### 5.2.2. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnih volumena se najviše primjenjuje za numeričko rješavanje problema mehanike fluida te različitih problema polja kao što su temperaturna i elektromagnetska polja. Važno je svojstvo metode konačnih volumena da su osnovne relacije kojima je opisan problem zadovoljene u integralnom obliku i u diskretiziranim jednadžbama. Polazna točka za diskretizaciju konačnih volumena je podjela razmatranog područja na odgovarajući broj potpodručja koja se nazivaju kontrolni volumeni čijim se spajanjem razmatrano područje potpuno opisuje. [17]

Primjena metode konačnih volumena unutar programskog paketa Moldex3D se očituje u opisivanju faza punjenja kalupne šupljine i hlađenja otpreska za tj. za opisivanje tečenja taljevine i temperaturnog polja taljevine, otpreska i kalupa. [16]

### 5.2.3. Metoda konačnih razlika

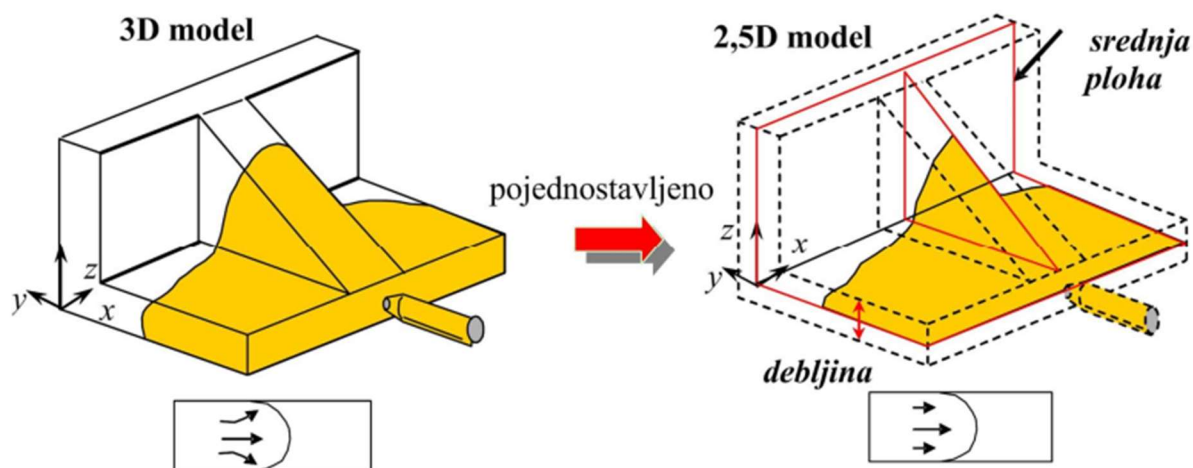
Metoda konačnih razlika numerička je metoda za rješavanje diferencijalnih jednadžbi pri čemu se numeričko rješenje dobiva u odabranim točkama razmatrane konstrukcije. Derivacije odgovarajućih funkcija koje su zavisne varijable u diferencijalnoj jednadžbi, zamjenjuju se s razlikom vrijednosti tih funkcija u susjednim točkama podijeljenom s međusobnom razlikom točaka. Te točke nazivaju se čvorovi i čine mrežu konačnih razlika. Za svaki čvor dobiva se jedna algebarska diferencijalna jednadžba koja povezuje nepoznatu vrijednost u čvoru s vrijednostima te varijable u odgovarajućem broju susjednih čvorova. Broj obuhvaćenih čvorova ovisi o redu derivacije u diferencijalnoj jednadžbi. Na taj način dobiva se sustav linearnih algebarskih jednadžbi čiji je broj jednak broju čvorova, odnosno nepoznanica. [17]

Unutar programskog paketa Moldex3D metoda konačnih razlika se koristi za opisivanje faze punjenja kalupne šupljine kod 3D analize za stijenke proizvoda i faze djelovanje naknadnog tlaka u slučaju 2,5D analize koja će se opisati u idućem poglavlju. [16]

## 5.3. Vrste analize

Programski paket Moldex3D nudi na raspolaganje dvije vrste analiza tj. 3D i 2,5D analizu. Navedene analize se razlikuju u vrsti mreža konačnih elemenata. Kod 3D analize koristi se trodimenzionalna mreža konačnih elemenata, dok se kod 2,5D analize koristi plosna mreža

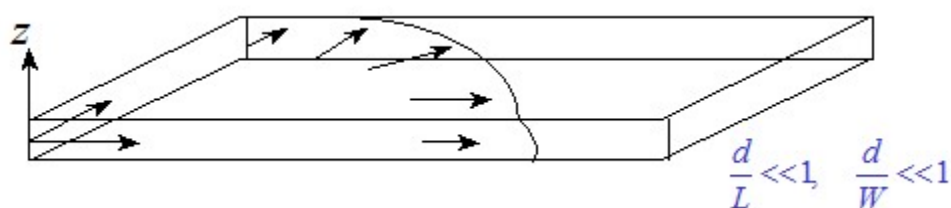
konačnih elemenata. Specifičnost 2,5D analize je definiranje srednje plohe modela. Prije izrade simulacije potrebno je voditi računa o vrsti analize pomoću koje će se provesti simulacija budući da dobiveni rezultati uvelike ovise o mogućnostima primijenjene analize. Slika 43 prikazuje navedene vrste analiza.



Slika 43. Vrste numeričkih analiza – Moldex3D: 3D analiza (lijevo), 2,5D plošna analiza (desno) [18]

### 5.3.1. 2,5D analiza

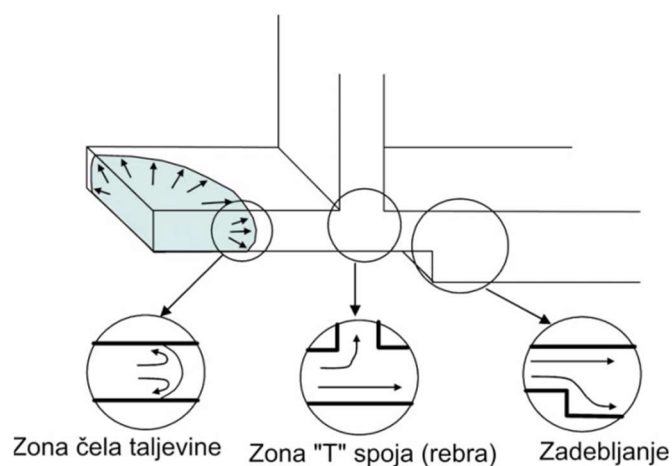
Prema [16] primjena 2,5D analize se preporuča za otpreske čiji je omjer debljine stijenke i duljine odnosno širine u smjeru tečenja taljevine manji od 0,1 što je prikazano na slici 44.



Slika 44. Primjena 2,5D analize [16]

Kod 2D analize geometrija modela je pojednostavljena primjenom srednje plohe prikazane na slici 43. Pojednostavljena geometrija rezultira bržim generiranjem rezultata, a uz to se postiže robusnost procesa proračuna čime se smanjuje mogućnost nastanka greške tijekom simulacije. Najveći problem koji se javlja je upravo definiranje srednje plohe za što se troši više od 80 % ukupnog vremena simulacije. Kod otpresaka vrlo složene geometrije srednja ploha se pojednostavljuje što uvodi određenu netočnost u rezultat simulacije. Dodatni izvor netočnosti

predstavljaju proračuni naprezanja u otpresku ili elementu kalupne šupljine zbog poteškoća u integriranju s rješavateljima (engl. solverima). Primjenom 2,5D analize zanemaruju se pojave vezane uz treću dimenziju tijekom faze punjenja kalupne šupljine koje su prikazane na slici 45, što također predstavlja izvor netočnosti. [15]

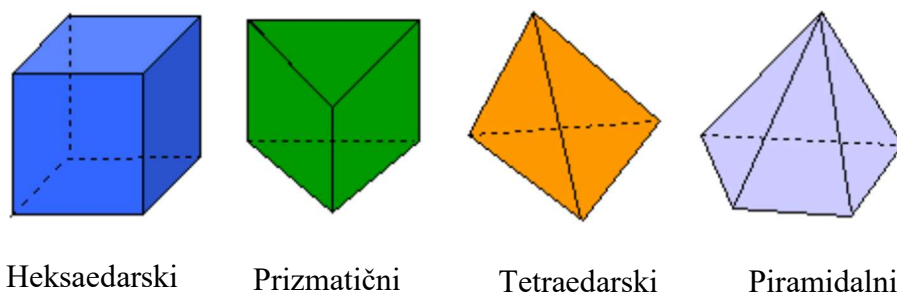


**Slika 45. Pojave tijekom faze punjenja kalupne šupljine [15]**

Na kraju se može zaključiti kako primjena 2,5D analize omogućuje brže generiranje rezultata, pri čemu je pogodnija za otpreske jednostavnije geometrije gdje ne dolazi do problema vezanih uz definiranje srednje plohe, a samim time i generiranjem lošijih rezultata.

### 5.3.2. 3D analiza

Primjenom 3D analize izbjegavaju se problemi koji se javljaju prilikom 2,5D analize u vidu generiranja srednje plohe modela otpreska, te problema vezanih uz opisivanje faze punjenja kalupne šupljine. S druge strane 3D analiza zahtijeva veću računalnu moć pri čemu je potrebno i dulje vrijeme za analizu. Točnost 3D analize uvelike ovisi o definiranoj mreži potpodručja tj. mreži konačnih elemenata odnosno konačnih volumena ovisno o primijenjenoj numeričkoj metodi, no zbog jednostavnosti potpodručja će se nadalje nazivati konačnim elementima. Prilikom definiranja mreže konačnih elemenata definira se vrsta i broj konačnih elemenata. Programski paket Moldex3D nudi nekoliko vrsta konačnih elemenata prikazanih na slici 46.



Heksaedarski

Prizmatični

Tetraedarski

Piramidalni

**Slika 46. Vrste konačnih elemenata – Moldex3D [16]**

Odabir vrste konačnih elementa ovisi o geometriji koju je potrebno opisati, konačni elementi s većim brojem čvorova omogućuju kvalitetnije opisivanje određenih geometrijskih diskontinuiteta poput zaobljenja i slično. Korištenje elemenata s većim brojem čvorova otežava samu analizu tj. produljuje vrijeme analize.

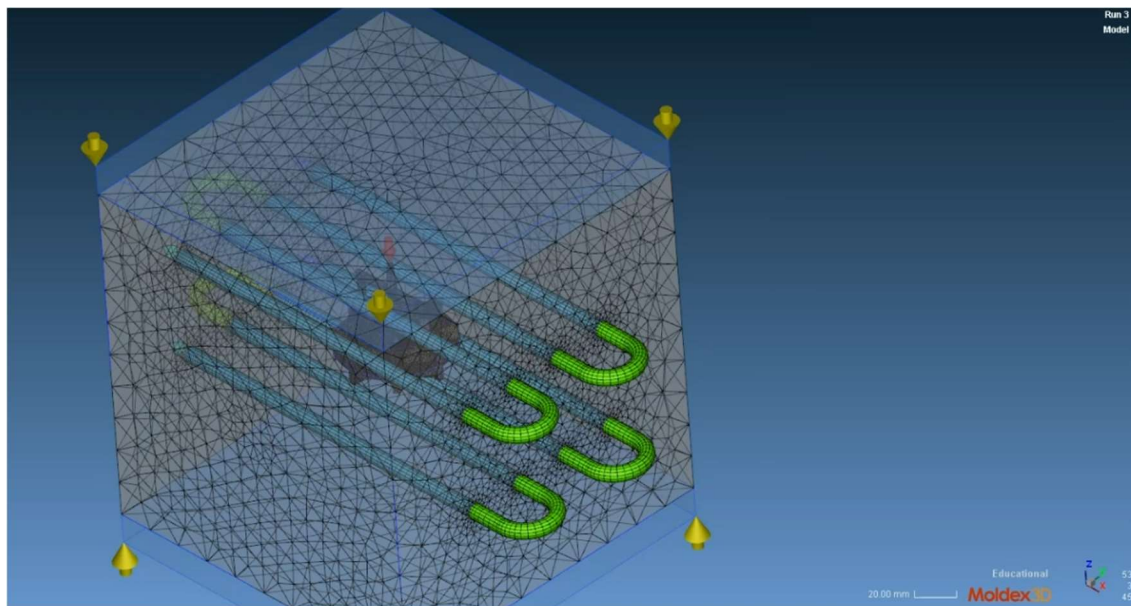
Broj konačnih elementa je neizmjerljivo važan parametar prilikom definiranja mreže konačnih elemenata. S povećanjem broja konačnih elementa simulacija bolje konvergira stvarnom rješenju, no s druge strane dolazi do značajnog produljenja vremena trajanja simulacije. Vrlo je bitno da korisnik pronađe optimum između broja konačnih elemenata tj. točnosti rješenja, vremena potrebnog za izvođenje simulacije i raspoložive računalne snage.

## **5.4. Tijek simulacije**

### **5.4.1. Definiranje simulacijskog modela**

Simulacijski model predstavljaju otpresak i kalup s pripadajućim uljevnim sustavom i sustavom za temperiranje. Prvo se učitava model otpreska pri čemu je potrebno obratiti pažnju na vrstu datoteke otpreska, budući da programski paket Moldex3D podržava samo STEP datoteke. Nakon definiranja modela slijedi definiranje vrste, geometrije i položaja ušća, a uz to i vrste uljevnog sustava odnosno hladnog ili vrućeg uljevnog sustava. Što se tiče uljevnog sustava preostaje još samo definirati njegovu geometriju, Moldex3D sam definira inicijalnu geometriju uljevnog sustava koju je kasnije moguće prilagoditi od strane korisnika. Prije definiranja sustava za temperiranje potrebno je definirati kalup u vidu njegovih gabaritnih dimenzija, površine razdvajanja i smjera otvaranja kalupa. Definiranje gabaritnih dimenzija uvelike ovisi o iskustvu korisnika budući da treba dobro predvidjeti potrebnu površinu za realizaciju što učinkovitijeg sustava za temperiranje i smještaj ostalih elemenata kalupa potrebnih za oblikovanje, vođenje, izbacivanje i slično o čemu je više bilo riječi u prethodnim poglavljima. Moldex3D programski paket omogućuje izradu različitih konfiguracija kanala za temperiranje, a uz to nudi mogućnost definiranja konfiguracije kanala u nekom drugom CAD programskom paketu. Pored navedenog Moldex3D nudi i upute za što učinkovitiju realizaciju sustava za temperiranje u vidu razmještaja kanala za temperiranje u ovisnosti od debljini stijenke otpreska. Posljednji korak definiranja simulacijskog modela predstavlja definiranje mreže konačnih elemenata gdje korisnik definira željenu veličinu konačnih elemenata pri čemu Moldex3D nudi mogućnost i lokalnog povećanja gustoće mreže na mjestima gdje npr. dolazi do različitih geometrijskih diskontinuiteta. Moldex3D definira zasebne mreže konačnih elemenata za otpresak, kalup i uljevni sustav. Slika 47 prikazuje definirani simulacijski model.

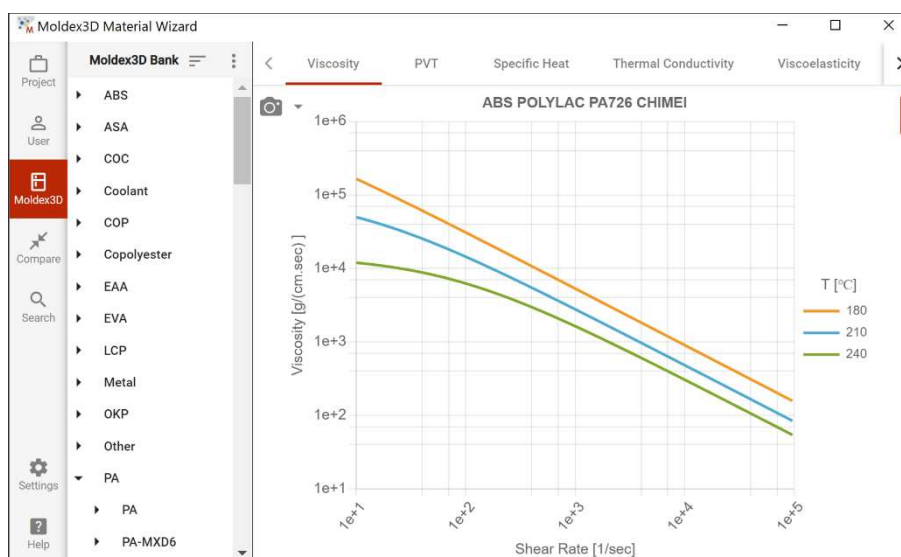




Slika 47. Definirani simulacijski model – Moldex3D

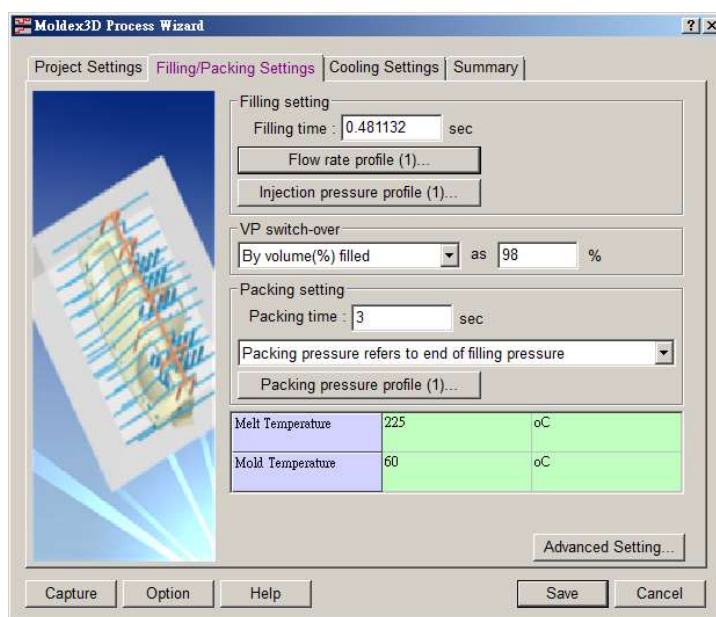
#### 5.4.2. Definiranje parametara simulacije

Prvi korak kod definiranja parametara simulacije je odabir materijala. Unutar Moldex3D programskog paketa postoji baza materijala unutar koje se nalaze podaci o materijalima različitih proizvođača. Za svaki materijal su opisana njegova mehanička, toplinska i reološka svojstva stupanj kristalnosti, stezanje materijala i PVT dijagram. Pored toga proizvođači su naveli optimalne raspone parametara prerade kao što su temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine i temperatura postojanosti oblika. Postoji mogućnost dodavanja i vlastitog materijala određenih svojstva. Slika 48 prikazuje bazu materijala unutar programskog paketa Moldex3D.



Slika 48. Baza materijala – Moldex3D [16]

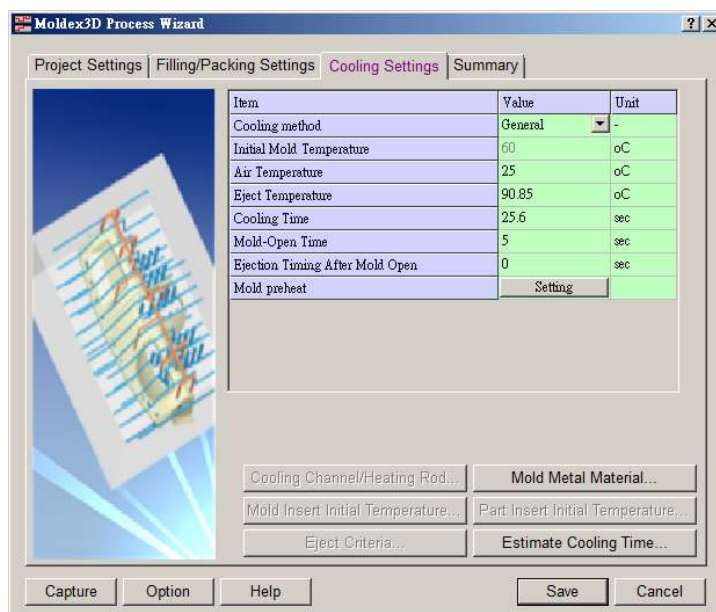
Nakon definiranog materijala slijedi definiranje parametara vezanih uz ubrizgavalicu pri čemu Moldex3D posjeduje podatke za veliki broj ubrizgavalica različitih proizvođača, a omogućeno je i dodavanje vlastitog modela ubrizgavalice. Sljedeći korak je definiranje parametara vezanih uz fazu ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka. Moldex3D omogućava definiranje vremena ubrizgavanja, postotak popunjenosti kalupne šupljine pri kojem dolazi do preklapanja na naknadni tlak, vrijeme djelovanja naknadnog tlaka, te temperature taljevine i stijenke kalupne šupljine. Pored navedenog postoji mogućnost i definiranja vrijednosti tlaka tijekom pojedinih faza. Slika 49 prikazuje dijaloški okvir programskog paketa Moldex3D za unos prethodno spomenutih parametara.



Slika 49. Definiranje parametara faze ubrizgavanja – Moldex3D [16]

Na kraju slijedi definiranje parametara faze očvršćivanja tj. hlađenja. Unutar te faze moguće je definirati niz parametara poput metode hlađenja, okolišnje temperature, temperature postojanosti oblika, vremena hlađenja, vremena otvorenog kalupa i slično. Pored navedenih parametara potrebno je definirati parametre i svojstva medija za temperiranje tj. vrstu medija, protok i Reynoldsov broj. Također je moguće definirati vrstu materijala kalupa. Slika 50 prikazuje dijaloški okvir u koji se unose navedeni parametri.

Nakon što je definiran simulacijski model i svi prethodni parametri moguće je provesti simulaciju procesa injekcijskog prešanja.



Slika 50. Definiranje parametara faze hlađenja – Moldex3D [16]

### 5.4.3. Simuliranje procesa injekcijskog prešanja

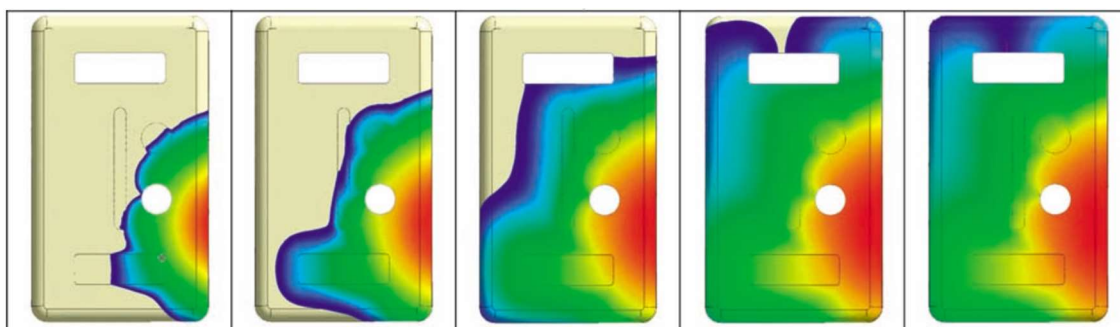
Moldex3D omogućava simulaciju kompletnog procesa injekcijskog prešanja što se i preporučuje, a pored toga postoji mogućnost simulacije samo pojedine faze poput na primjer faze djelovanja naknadnog tlaka. Simuliranje samo jedne faze može rezultirati pogrešnim podacima budući da dobiveni rezultati prethodne faze predstavljaju ulazne podatke za iduću fazu procesa. Izvođenjem cjelovite simulacije ili simulacije pojedine faze dobiva se uvid u pojave i parametre opisane u tablici 3.

### 5.4.4. Analiza rezultata simulacije

U sklopu ovog poglavlja pokazati će se primjeri dobivenih rezultata simulacije karakterističnih pojava i parametara za pojedinu fazu procesa injekcijskog prešanja.

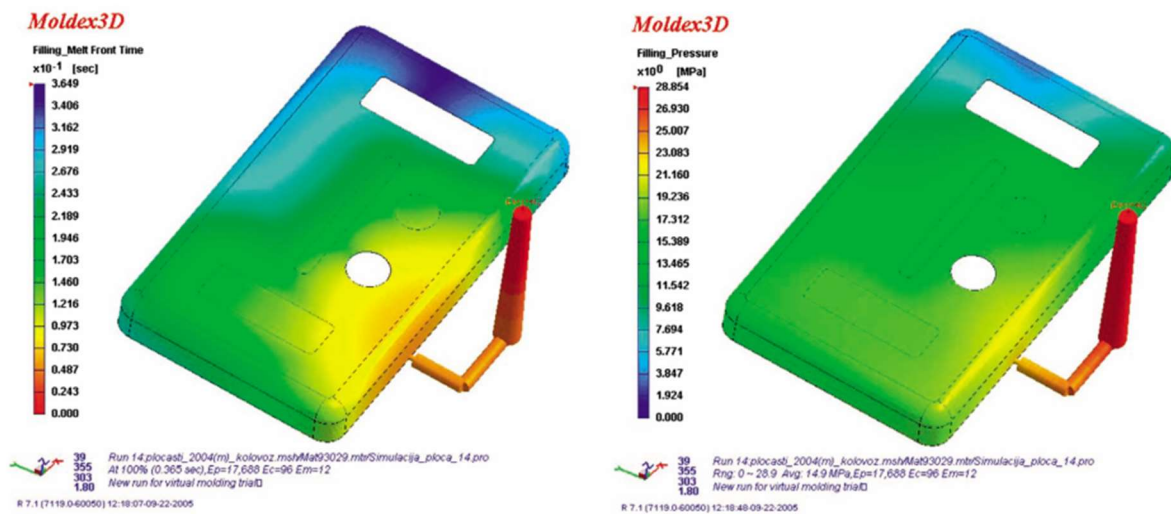
#### Faza punjenja kalupne šupljine

Tijekom faze punjenja kalupne šupljine temeljna pojava koja se promatra je popunjenost kalupne šupljine tj. napredovanje čela taljevine što je prikazano na slici 51.



Slika 51. Simulacija popunjenosti kalupne šupljine – Moldex3D [15]

Pored navedene pojave vrlo je bitno s pomoću simulacije odrediti potreban tlak ubrizgavanja i vrijeme ubrizgavanja čiji su primjeri rezultata prikazani na slici 52.

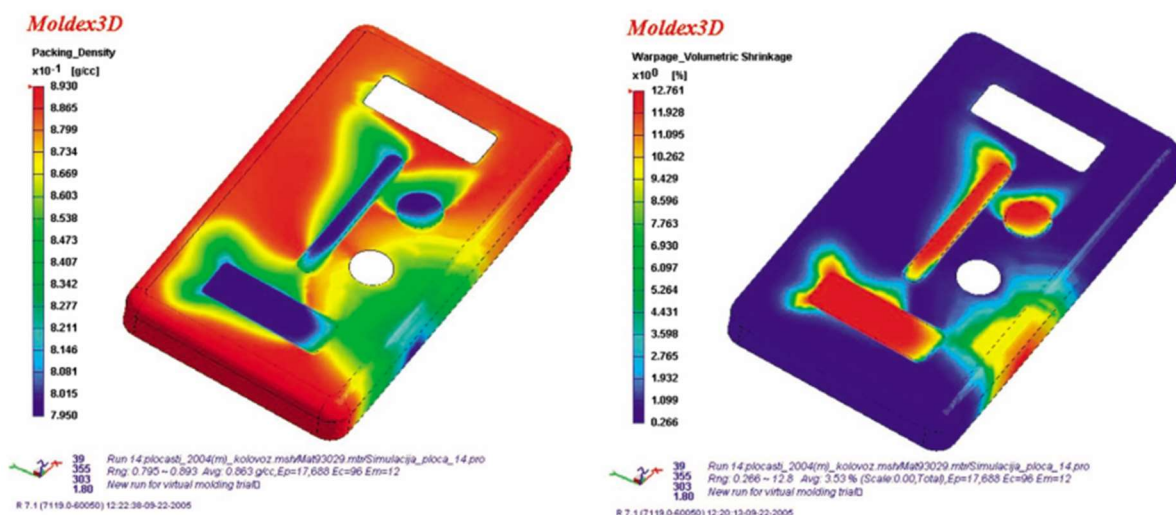


Slika 52. Simulacija potrebnog vremena i tlaka ubrizgavanja – Moldex3D – vrijeme ubrizgavanja (lijevo), tlak ubrizgavanja (desno) [15]

### Faza djelovanja naknadnog tlaka

Simulacija faze djelovanja naknadnog tlaka omogućuje uvid u dva glavna rezultata: masu (gustoću) otpreska i stezanje otpreska. [15]

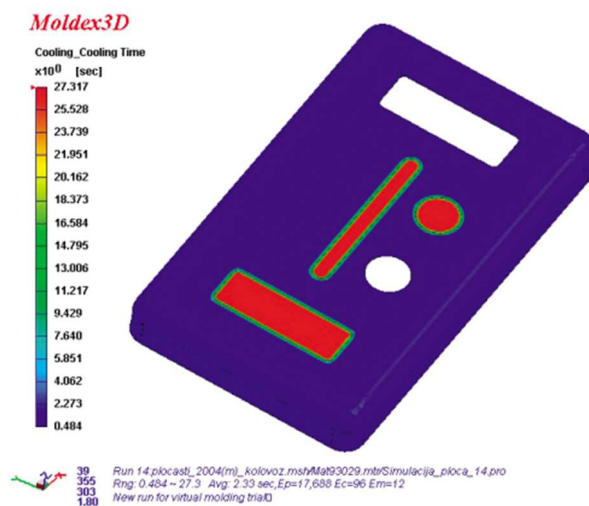
Na slici 53 su prikazani navedeni rezultati.



Slika 52. Simulacija gustoće otpreska (lijevo) i razdiobe stezanja otpreska (desno) – Moldex3D [15]

## Faza hlađenja otpreska

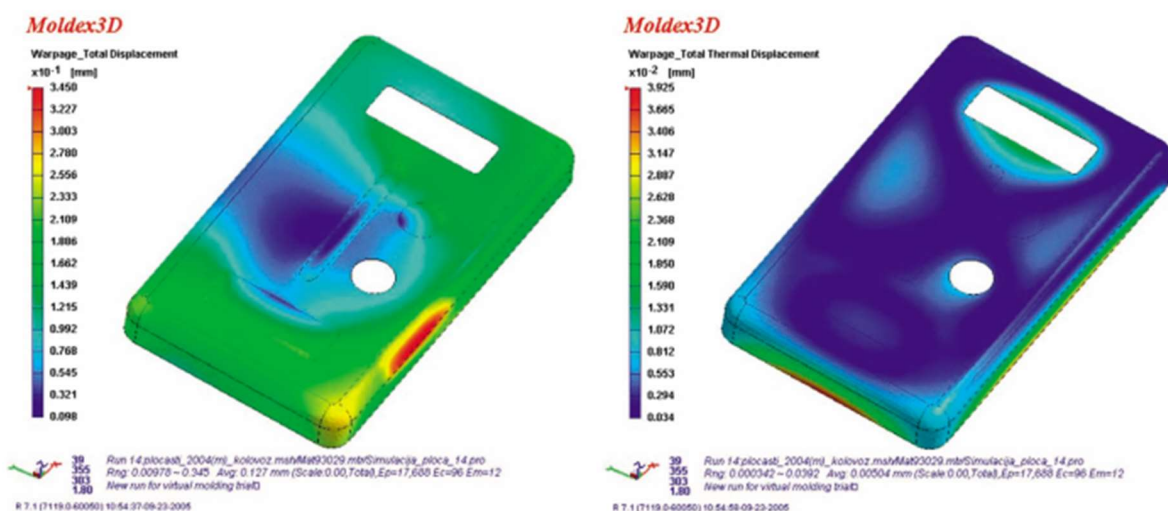
Najvažniji parametar faza hlađenja otpreska je vrijeme hlađenja otpreska čiji je primjer rezultata simulacije prikazan na slici 54.



Slika 54. Simulacija vremena hlađenja otpreska – Moldex3D [15]

## Faza deformiranja otpreska

Tijekom faze deformiranja otpreska najvažnije pojave koje se prate su vitoperenje i stezanje. Stezanje nastaje zbog hlađenja taljevine u kalupnoj šupljine, a do vitoperenja dolazi zbog nejednolikog stezanja u pojedinim područjima otpreska. Na slici 55 su prikazani navedeni rezultati.



Slika 55. Simulacija vitoperenja otpreska – Moldex3D – deformacija (lijevo), toplinska deformacija (desno) [15]

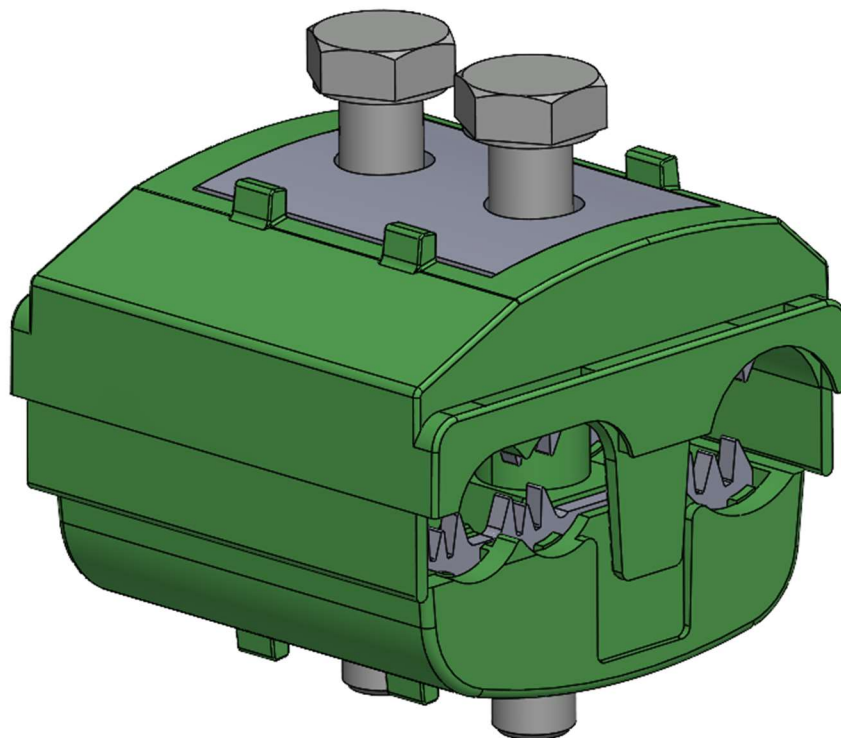
## 6. EKSPERIMENTALINI DIO

U okviru eksperimentalnog dijela provesti će se računalna simulacija injekcijskog prešanja postojećeg otpreska i već izrađenog kalupa s ciljem pronalaska optimalnih parametara prerade.

### 6.1. Opis proizvoda

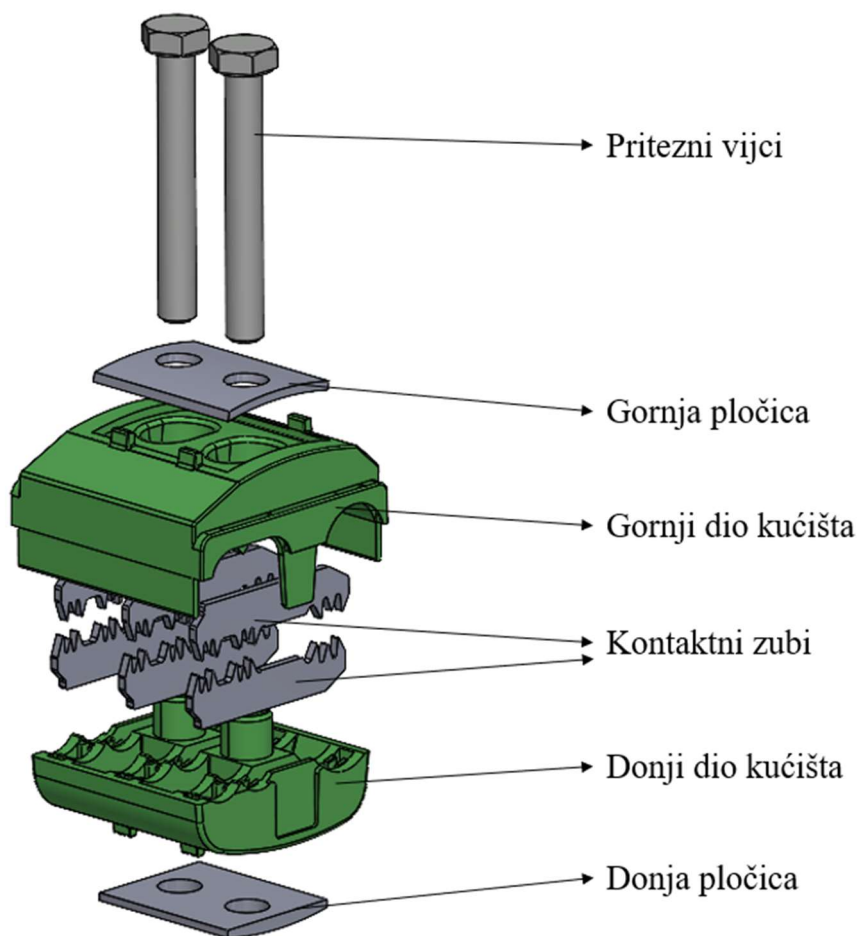
Odabrani proizvod predstavlja kućište zupčasto odcjepne stezaljke tip: ZOS 3/2 koja spada u skupinu izoliranih stezaljki za probijanje izolacije proizvodnog programa tvrtke Metal Product d.o.o. koja se bavi proizvodnjom elektro opreme.

Zupčasto odcjepna stezaljka koristi se za probijanje izolacije izoliranih vodiča u snopu kao i za spajanje žila kabela kućnog priključka i javne rasvjete. Model zupčasto odcjepne stezaljke je prikazan na slici 56.



Slika 56. Zupčasto odcjepna stezaljka ZOS 3/2

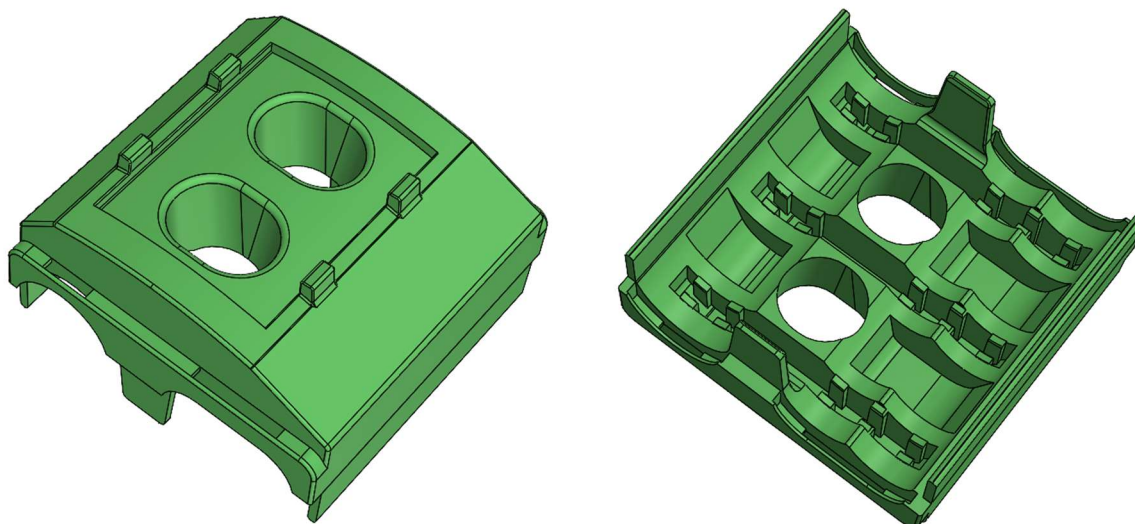
Sastavni dijelovi zupčasto odcjepne stezaljke su gornji i donji dio kućišta, kontaktne zubi, pločice i pritezni vijci. Slika 57 prikazuje prethodno navedene dijelove zupčasto odcjepne stezaljke.



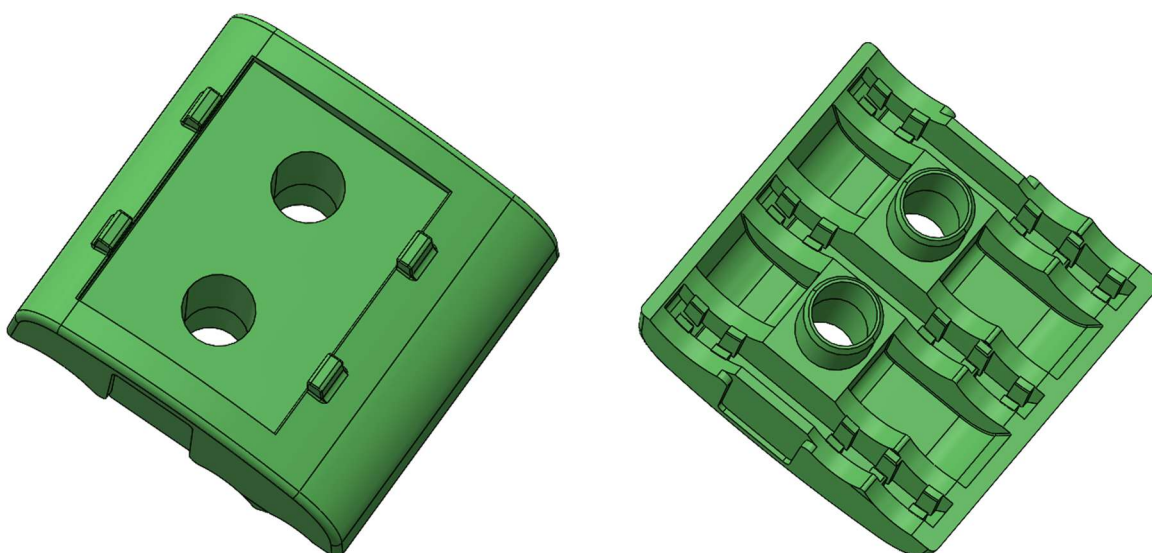
Slika 57. Zupčasto odcjepna stezaljka ZOS 3/2 – dijelovi

Zupčasto odcjepna stezaljka tipa ZOS 3/2 namijenjena je za spajanje glavnog vodiča površine presjeka od 16 do 70 mm<sup>2</sup> s dva odvojna vodiča površine presjeka 16 mm<sup>2</sup>. Kontakt između glavnog i odvojnih vodiča ostvaruje se pomoću kontaktnih zuba izrađenih od bakra i prevučenih kositrom. Materijal kućišta stezaljke je poliamid PA6-GF30 ojačan staklenim vlaknima, otporan na UV zračenje i vremenske uvjete. Pritezni vijci su naponski izolirani što omogućava ugradnju stezaljke pod naponom. Vijci su zaštićeni od korozije postupkom vrućeg pocinčavanja. Kontaktni zubi su tvornički oslojeni mašću koja usporava prodor vode i koroziju. Stezaljke su ispitane pod nazivnim naponom od 4 kV u zraku i u potpunosti udovoljavaju zahtjevima VDE 0220 norme.

U okviru ovog rada izraditi će se računalna simulacija injekcijskog prešanja gornjeg i donjeg dijela kućišta zupčasto odcjepne stezaljke ZOS 3/2. Na slikama 58 i 59 su prikazani modeli kućišta. Okvirne dimenzije gornjeg dijela kućišta stezaljke su 57x55x35 mm, a donjeg dijela kućišta 50x50x25 mm.



Slika 58. Gornji dio kućišta – ZOS 3/2



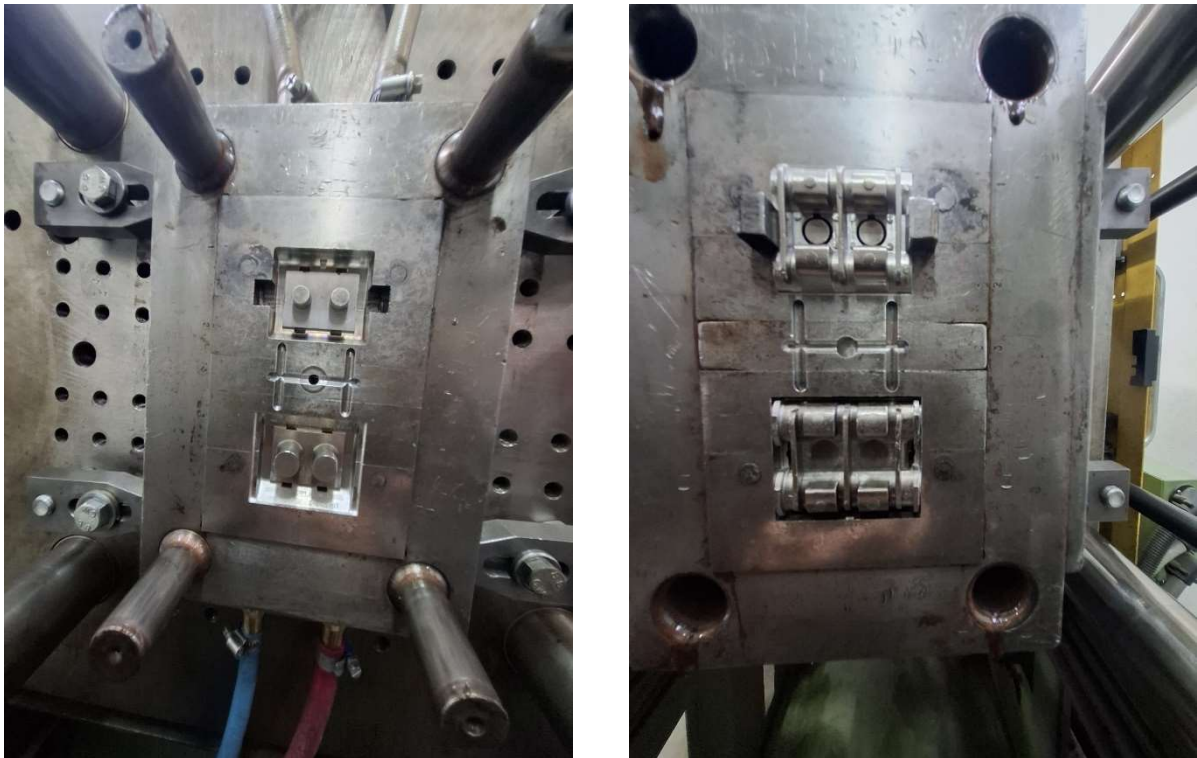
Slika 59. Donji dio kućišta – ZOS 3/2

## 6.2. Opis kalupa

### 6.2.1. Kalupna šupljina

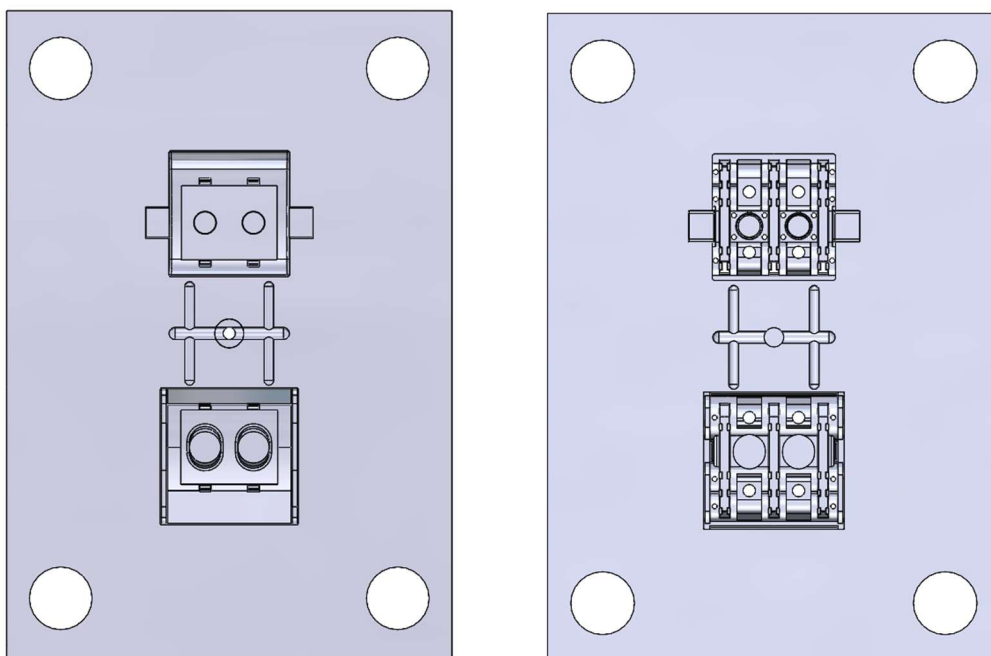
Izvedeni kalup sastoji se od dvije kalupne šupljine. Jedna kalupna šupljina služi za oblikovanje gornjeg dijela kućišta, a druga za oblikovanje donjeg dijela kućišta zupčasto odcjepne stezaljke ZOS 3/2. Kalupne šupljine su izvedene pomoću matrice u nepomičnoj kalupnoj ploči, te žiga u pomičnoj kalupnoj ploči. Za oblikovanje donjeg dijela kućišta koriste se i dva umetka u pomičnoj kalupnoj ploči. Slika 60 prikazuje pomičnu i nepomičnu kalupnu ploču.





Slika 60. Nepomična kalupna ploča (lijevo) i pomična kalupna ploča (desno)

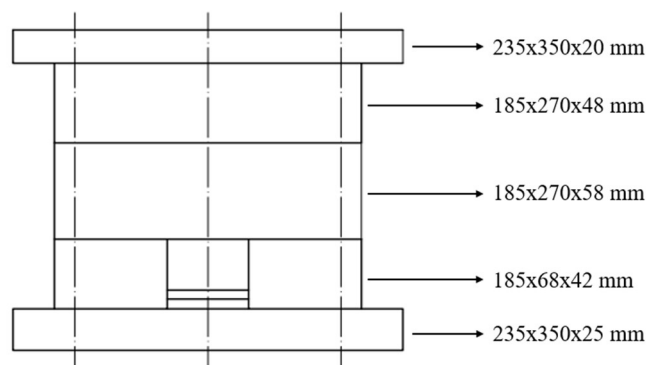
Na slici 61 je prikazan model nepomične i pomične kalupne ploče izrađen u programskom paketu Solidworks.



Slika 61. Nepomična kalupna ploča (lijevo) i pomična kalupna ploča (desno) – Solidworks

### 6.2.2. Kućište kalupa

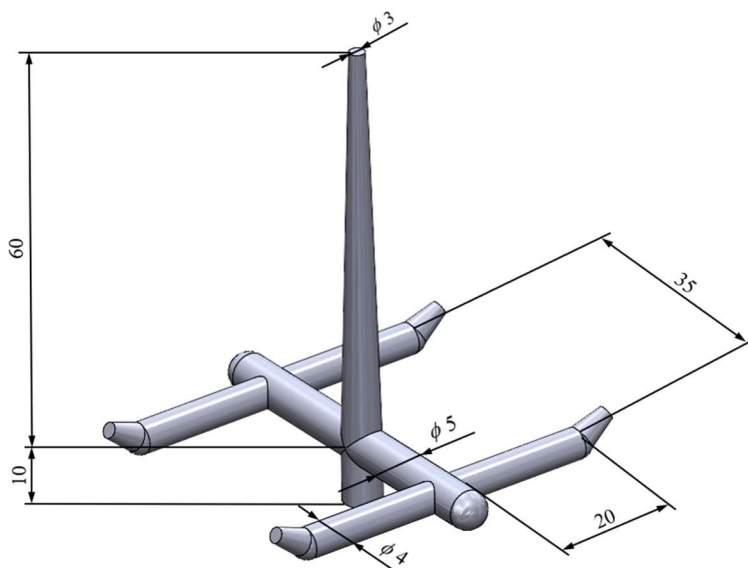
Izvedeno kućište spada u skupinu kućišta europa sustava s N tip pločama kućišta kalupa detaljno objašnjenih u poglavlju 3.2. Slika 62 prikazuje skicu izvedenog kućišta kalupa s naznačenim dimenzijama pojedinih ploča kućišta.



Slika 62. Skica izvedenog kućišta s dimenzijama ploča kućišta

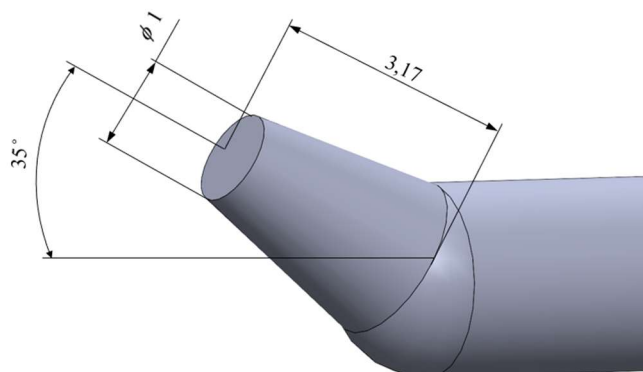
### 6.2.3. Uljevni sustav

Uljevni sustav je izveden kao hladni uljevni sustav s uljevkom visine 60 mm i početnog promjera 3 mm, uljevnim zdencem visine 10 mm i krajnjeg promjera 6 mm, glavnim uljevnim kanalom kružnog poprečnog presjeka promjera 5 mm i četiri odvodna uljevna kanala kružnog poprečnog presjeka promjera 4 mm. Svaka kalupna šupljina je povezana s dva uljevna kanala pomoću tunelnih ušća. Odvodni uljevni kanali prema kalupnim šupljinama su međusobno razmaknuti 35 mm. Prethodno opisani model uljavnog sustava s naznačenim dimenzijama je prikazan na slici 63.



Slika 63. Model uljavnog sustava

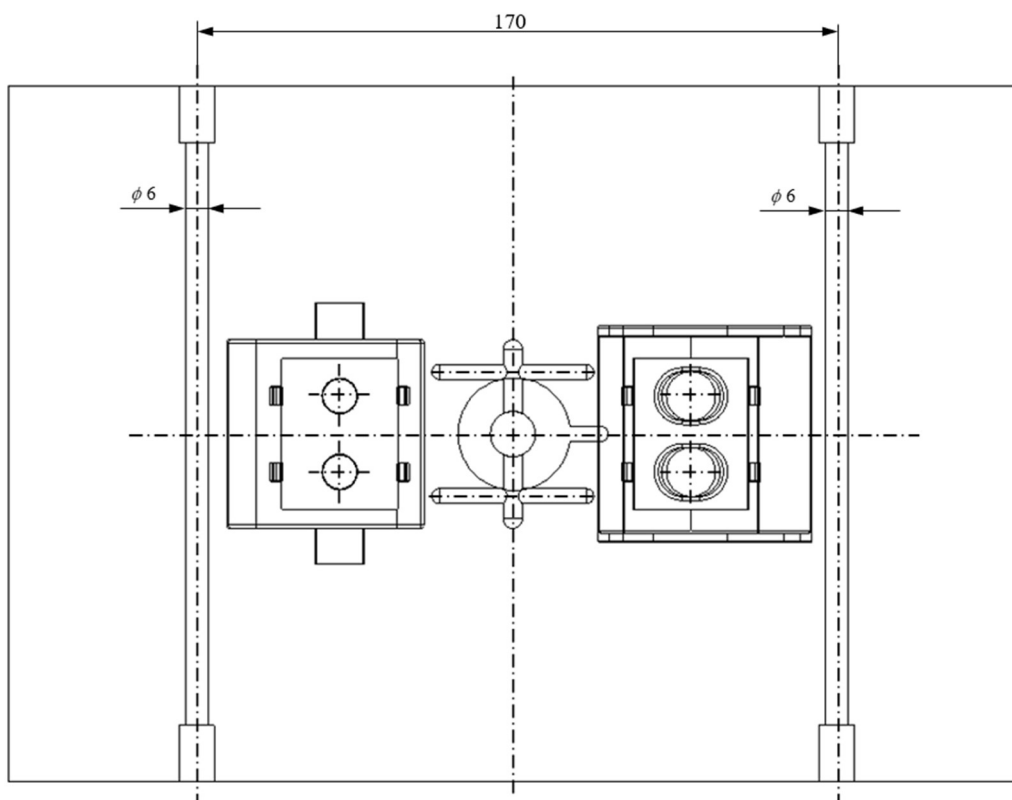
Na slici 64 je pobliže prikazan model izvedenog tunelnog ušća. Tunelno ušće je izvedeno u nepomičnoj kalupnoj ploči pod kutom od  $35^\circ$  u odnosu na sljubnicu, krajnjeg promjera 1 mm i duljine 3,17 mm.



Slika 64. Model tunelnog ušća

#### 6.2.4. Sustav za temperiranje

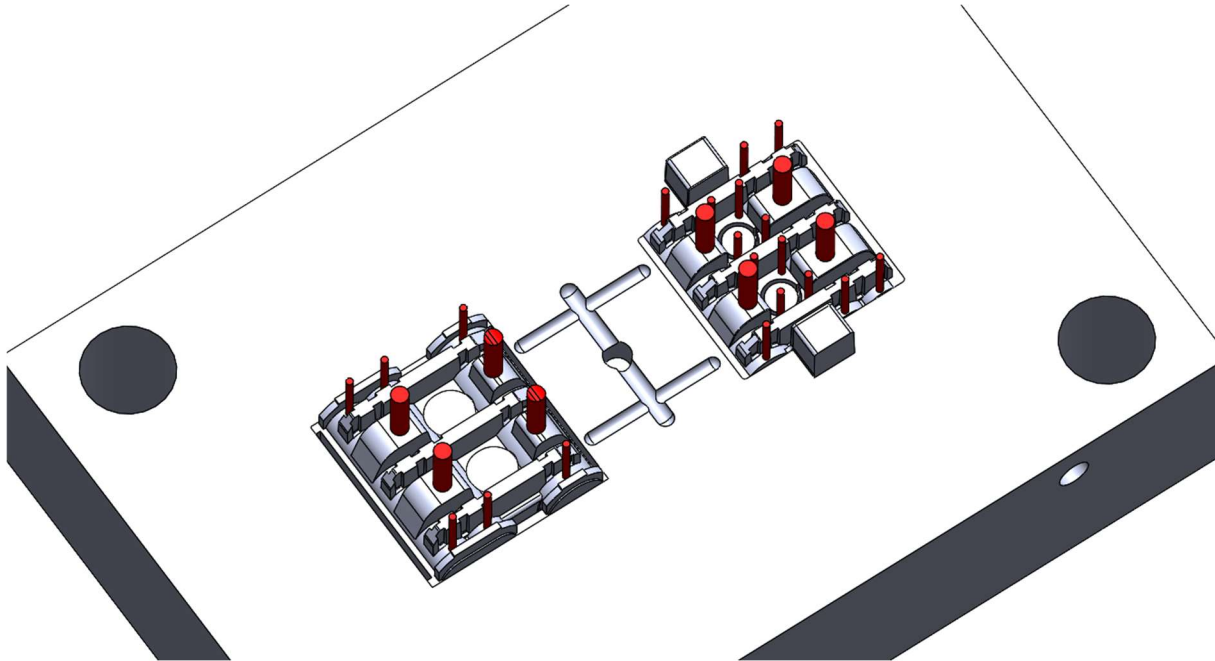
Izvedeni sustav za temperiranje sastoji se od dva kanala kružnog poprečnog presjeka promjera 6 mm međusobno razmaknuta 170 mm na svakoj od kalupnih ploča.. Kanali za temperiranje nisu međusobno povezani tj. svaki od njih ima zasebni ulaz i izlaz medija za temperiranje. Slika 65 prikazuje izvedeni sustav za temperiranje.



Slika 65. Izvedeni sustav za temperiranje

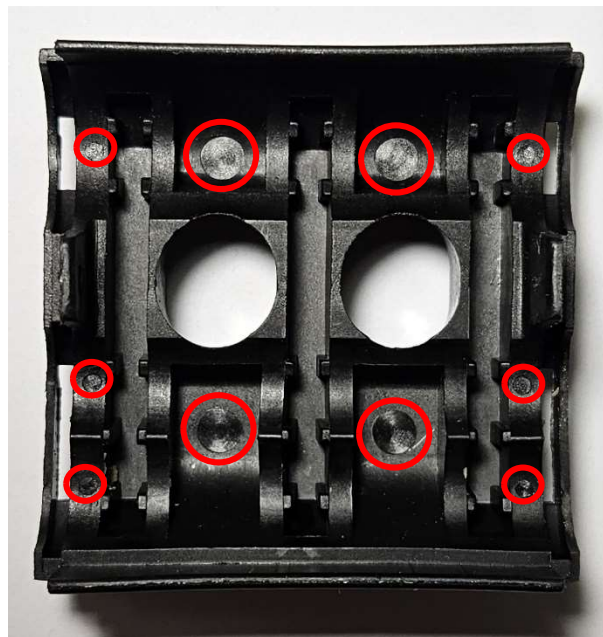
### 6.2.5. Sustav za vađenje otpreska iz kalupa

Sustav za vađenje otpreska iz kalupa sastoji se od izbacivala promjera 2 mm i 4 mm uz izbacivački paket ploča i povratnike. Na slici 66 su prikazana izbacivala u stanju izbacivanja otpresaka i uljevnog sustava izvan kalupa.



Slika 66. Izbacivala u položaju izbacivanja

Slika 67 prikazuje otiske izbacivala na otpresku gornjeg dijela kućišta ZOS 3/2 stezaljke.



Slika 67. Otisci izbacivala na otpresku gornjeg dijela kućišta ZOS 3/2 stezaljke

### 6.3. Provedba računalne simulacije procesa injekcijskog prešanja

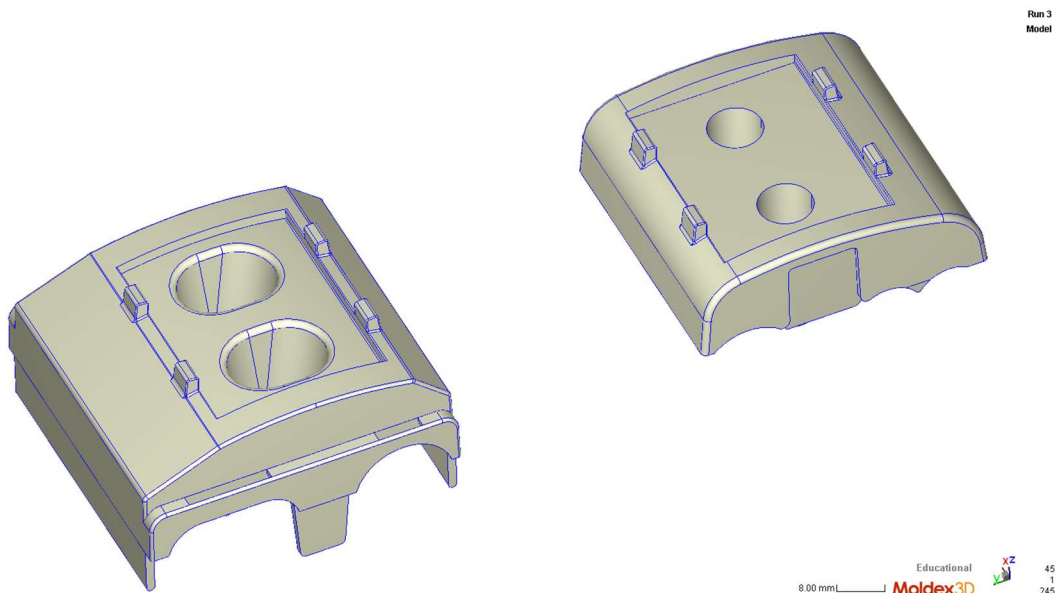
Računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja provesti će se pomoću programskog paketa Moldex3D detaljno opisanog u poglavlju 5. U sklopu ovog poglavlja dati će se поблиži opis tijeka provedbe računalne simulacije za prethodno opisani već izrađeni proizvod i kalup.

#### 6.3.1. Definiranje projekta

Prvo se započinje definiranjem projekta unutar kojeg će se provoditi simulacije. Definiranje projekta obuhvaća zadavanje naziva projekta i lokacije njegovog pohranjivanja na računalo.

#### 6.3.2. Učitavanje modela proizvoda

Nakon definiranja projekta slijedi učitavanje modela proizvoda za koji će se provoditi simulacija tj. gornjeg i donjeg dijela kućišta ZOS 3/2 stezaljke u okviru ovog diplomskog rada. Pri učitavanju modela potrebno je obratiti pažnju da model bude u STEP formatu datoteke. Učitavanje modela se vrši pomoću naredbe „Import Geometry“ pri čemu postoji opcija „Auto Heal“ koja je izrazito korisna budući da provjerava postoje li greške u geometriji učitano modela koje bi kasnije tijekom simulacije mogle stvarati poteškoće. Na slici 68 su prikazani učitani modeli proizvoda u sučelje Moldex3D programskog paketa.

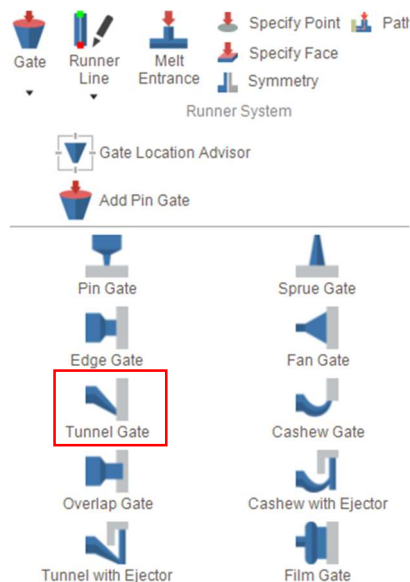


Slika 68. Učitani modeli proizvoda

Razmještaj modela u prostoru se ostvaruje pomoću naredbi „Move“ i „Rotate“ na način da se definiraju X, Y i Z koordinate određene točke modela u prostoru.

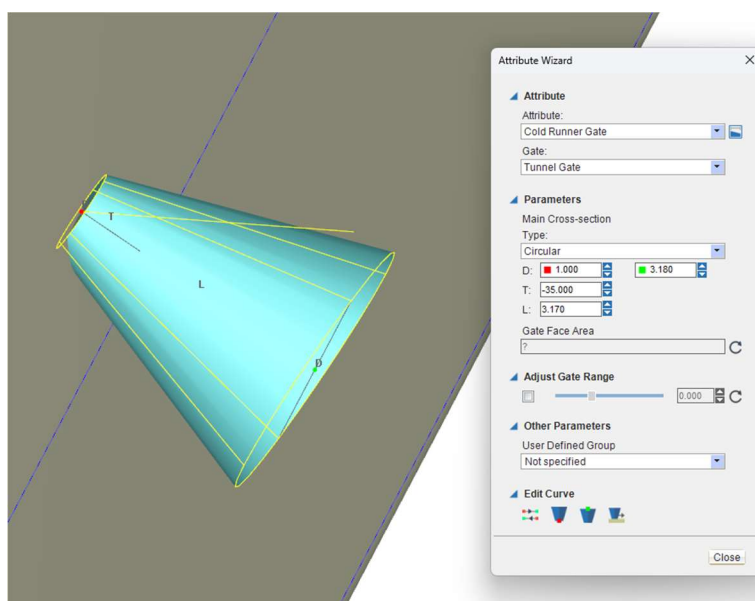
### 6.3.3. Definiranje ušća

Za definiranje ušća prikazanih u poglavlju 6.2.3. potrebno je koristiti naredbu „Gate“, unutar navedene naredbe ponuđeno je više vrsta ušća od kojih je potrebo odabrati tunelno ušće odnosno „Tunnel Gate“. Slika 69 prikazuje skočni izbornik naredbe „Gate“.



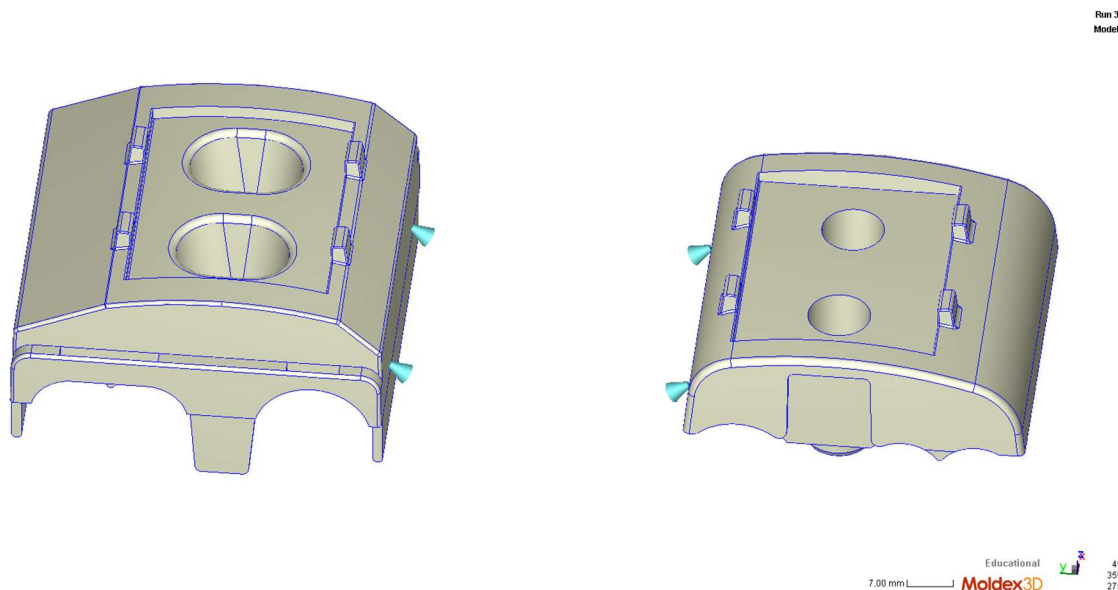
Slika 69. Vrste ušća – Moldex3D

Nakon odabira ušća potrebno je definirati njegov položaj na način da se definiraju X, Y i Z koordinate točke ulijevanja. Kada je položaj definiran slijedi definiranje dimenzija tunelnog ušća, a to su kut, duljina ušća, početni promjer i krajnji promjer. Slika 70 prikazuje skočni prozor za definiranje navedenih dimenzija.



Slika 70. Definiranje ušća – Moldex3D – na slici: D – krajnji i početni promjer, T – kut i L – duljina ušća

Na slici 71 je prikazan položaj ranije definiranih ušća.

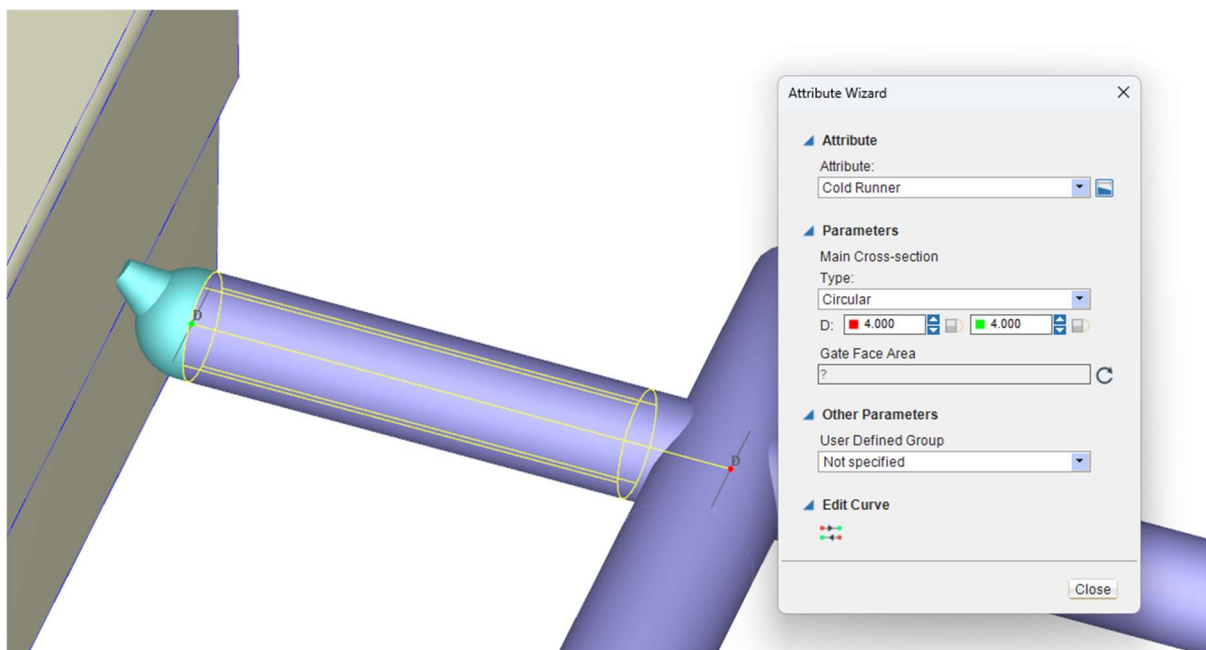


Slika 71. Položaj ušća – Moldex3D

#### 6.3.4. Definiranje uljernih kanala

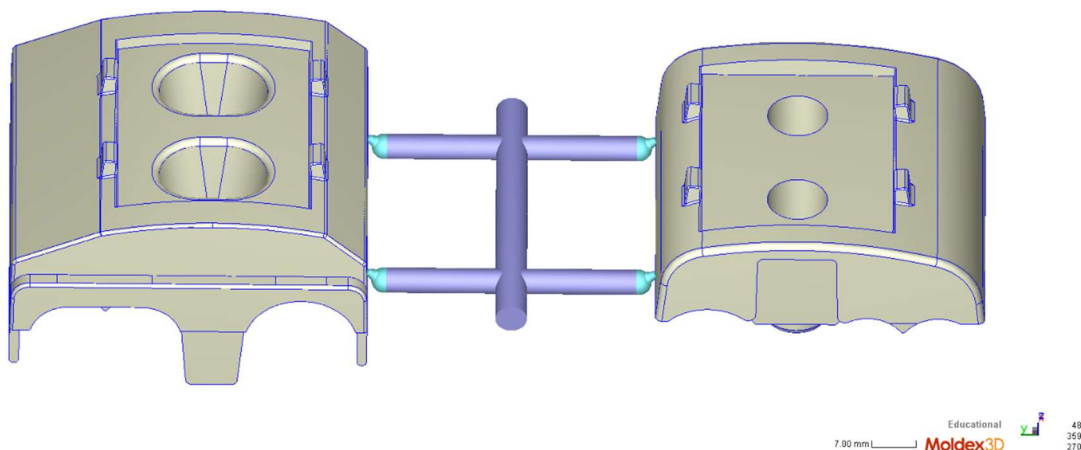
Definirana ušća je potrebno povezati uljernim kanalima. Način na koji će se definirati uljevni kanali unutar programskog paketa Moldex3D je pomoću naredbe „Sketch Runner Line“. Ta naredba zahtjeva definiranje linije koja definira položaj i duljinu uljernog kanala, te definiranje vrste i dimenzija poprečnog presjeka kanala. Uz tu naredbu postoji još mogućnost definiranja konfiguracije uljernih kanala u nekom drugom CAD programskom paketu te učitavanje takve konfiguracije pomoću datoteke formata IGS. Ukoliko se provodi simulacija za neki još ne izrađeni kalup što nije slučaj kod ovog diplomskog rada, Moldex3D nudi mogućnost samostalnog generiranja konfiguracije uljernih kanala koju je kasnije moguće dodatno prilagođavati.

Slika 72 prikazuje skočni prozor pomoću kojeg se u izborniku „Type“ definira vrsta poprečnog presjeka uljernih kanala, a uz to je još potrebno definirati početni i krajnji promjer uljernog kanala.



**Slika 72. Definiranje uljavnog kanala – na slici: D – početni i krajnji promjer uljavnih kanala**

Slika 73 prikazuje definiranu konfiguraciju uljavnih kanala. Poprečni presjek uljavnih kanala je kružni pri čemu je promjer glavnog uljavnog kanala 5 mm, a odvodnih kanala prema svakoj kalupnoj šupljini 4 mm što odgovara izvedenom stanju kalupa.



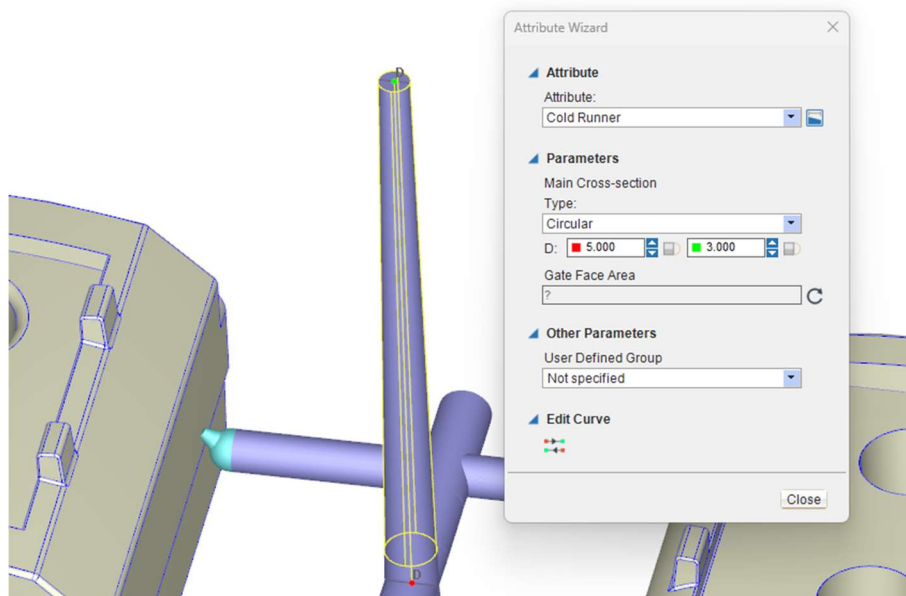
**Slika 73. Definirana konfiguracija uljavnih kanala – Moldex3D**

### 6.3.5. Definiranje uljevka i uljavnog zdenca

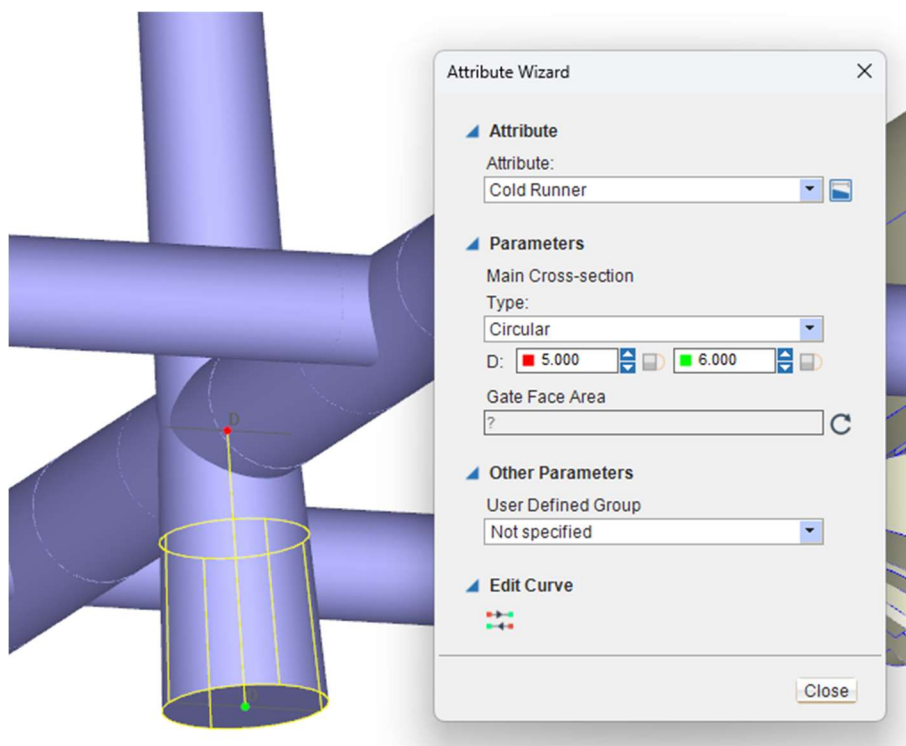
Uljevak i uljevni zdenac se definiraju na isti način kao i uljevni kanali tj. pomoću iste naredbe „Sketch Runner Line“. Razlika u odnosu na uljevne kanala je ta da promjer nije konstantan po



cijeloj duljini uljevka i uljavnog zdenca nego se on smanjuje u ovisnosti o izvedenom kutu kako bi kasnije omogućilo lakše vađenje otpreska iz kalupa. Na slici 74 je prikazan uljevak i pripadajuće dimenzije definirane u Moldex3D programskom paketu, dok je to isto prikazano za uljevni zdenac na slici 75.

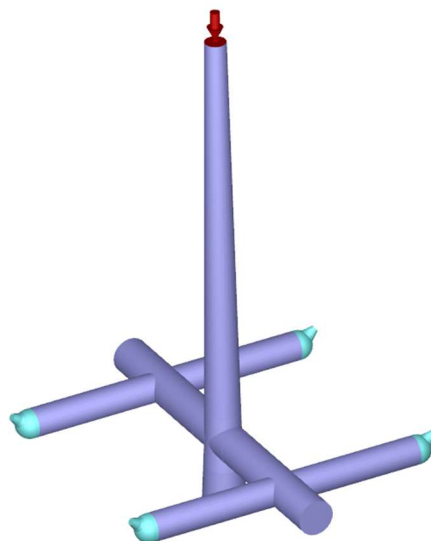


Slika 74. Definiranje uljevka – Moldex3D



Slika 75. Definiranje uljavnog zdenca – Moldex3D

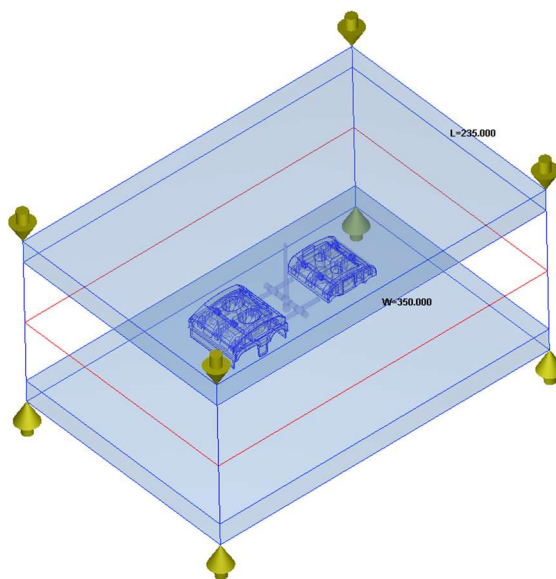
Nakon što je uljevni sustav u potpunosti definiran potrebno je još odrediti točku ulaska taljevine koja se definira pomoću naredbe „Melt Entrance“. Slika 76 prikazuje izvedeni uljevni sustav u simulacijskom okruženju.



Slika 76. Uljevni sustav – Moldex3D

#### 6.3.6. Definiranje kalupnih ploča

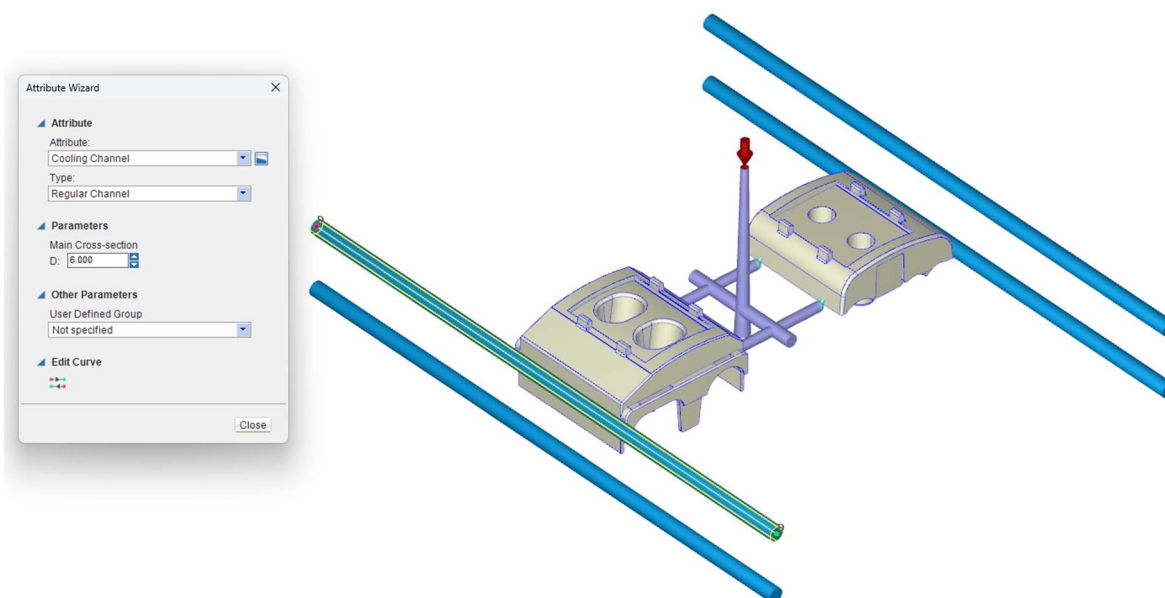
Primjenom naredbe „Moldbase“ omogućuje se definiranje dimenzija i položaja kalupnih ploča odnosno položaja kalupnih šupljina unutar kalupnih ploča. Spomenuta naredba ima mogućnost definiranja položaja kalupa apsolutno u koordinatnom sustavu simulacijskog okruženja ili relativno u odnosu na neku definiranu točku. Slika 77 prikazuje definirane kalupne ploče prema dimenzijama izvedenih kalupnih ploča prikazanih u poglavlju 6.2.2.



Slika 77. Definirane kalupne ploče – Moldex3D

### 6.3.7. Definiranje kanala za temperiranje

Definiranje kanala za temperiranje u Moldex3D programskom paketu provedeno je primjenom „Cooling Channel Line“ naredbe. Navedena naredba zahtjeva definiranje linije koja određuje položaj i duljinu kanala, te definiranje promjera samih kanala unutar skočnog izbornika naredbe. Pored samih kanala potrebno je definirati ulaze i izlaze medija za temperiranje. Naredbe koje to omogućuju su „Add Inlet“ i „Add Outlet“. Slika 78 prikazuje definirane kanale za temperiranje prema dimenzijama izvedenih kanala prikazanih u poglavlju 6.2.4.



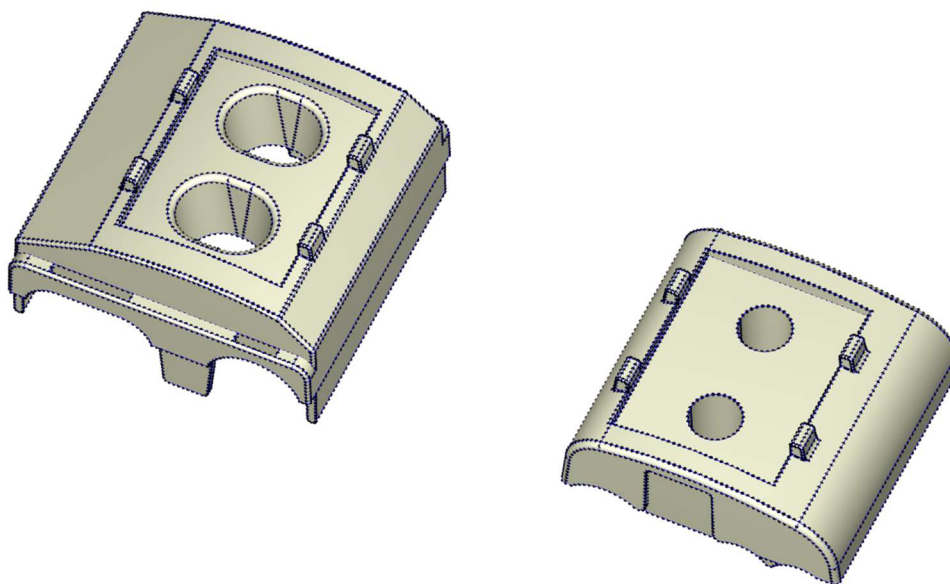
Slika 78. Definiranje kanala za temperiranje – Moldex3D

Nakon potpunog definiranja sustava za temperiranje poželjno je pomoću naredbe „Check Cooling System“ provesti provjeru definiranog sustava kako bi se izbjegli kasniji problemi tijekom provođenja simulacije. Navedena naredba omogućava otkrivanje potencijalnih grešaka i automatsko uklanjanje nekih od njih.

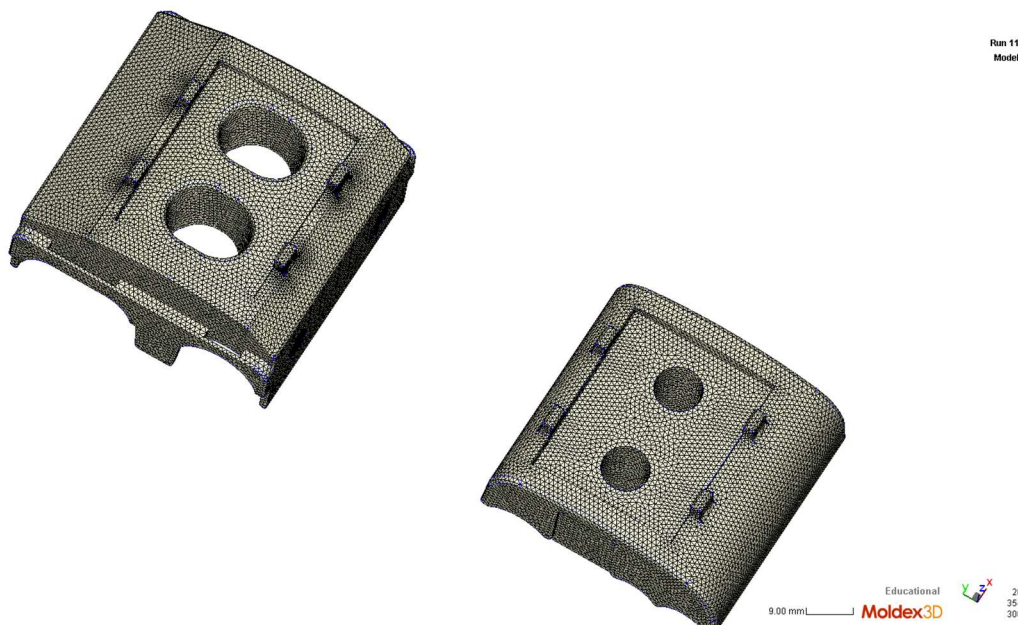
### 6.3.8. Definiranje mreže konačnih elemenata

Za potpuno definirani simulacijski model potrebno je dodijeliti mrežu konačnih elemenata. Prvi korak je definiranje mreže konačnih elemenata otpresaka što se odvija pomoću naredbe „Seeding“. Unutar navedene naredbe potrebno je odrediti veličinu konačnih elemenata. Prilikom određivanja veličine konačnih elemenata potrebno je pronaći kompromis između točnosti računalne simulacije i raspoloživih računalnih resursa. U okviru Moldex3D programskog paketa postoji preporuka da razmak između dva čvora mora biti dovoljan da između stane jedan ili dva čvora za slučaj kada je otpresak pozicioniran pomoću naredbe „Fit

to window“. Takav raspored čvorova osigurava dovoljnu točnost simulacije uz optimalno iskorištenje računalnih resursa. U slučaju ovog diplomskog rada odabrana veličina konačnih elementa je 1 mm. Slika 79 prikazuje raspodjelu čvorova, a slika 80 generiranu mrežu konačnih elemenata otpreska.

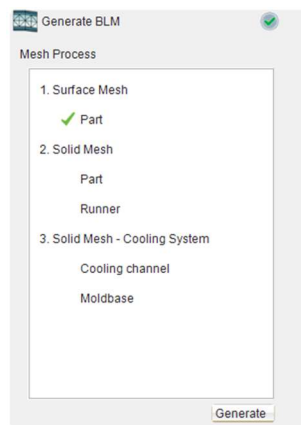


**Slika 79. Raspodjela čvorova na otpresku– Moldex3D**



**Slika 80. Mreža konačnih elemenata – otpresak – Moldex3D**

Nakon definiranja mreže konačnih elemenata otpreska slijedi definiranje mreže konačnih elemenata preostalih komponenti simulacijskog modela pomoću naredbe „Generate“. Nakon odabira navedene naredbe otvara se skočni prozor prikazan na slici 81.

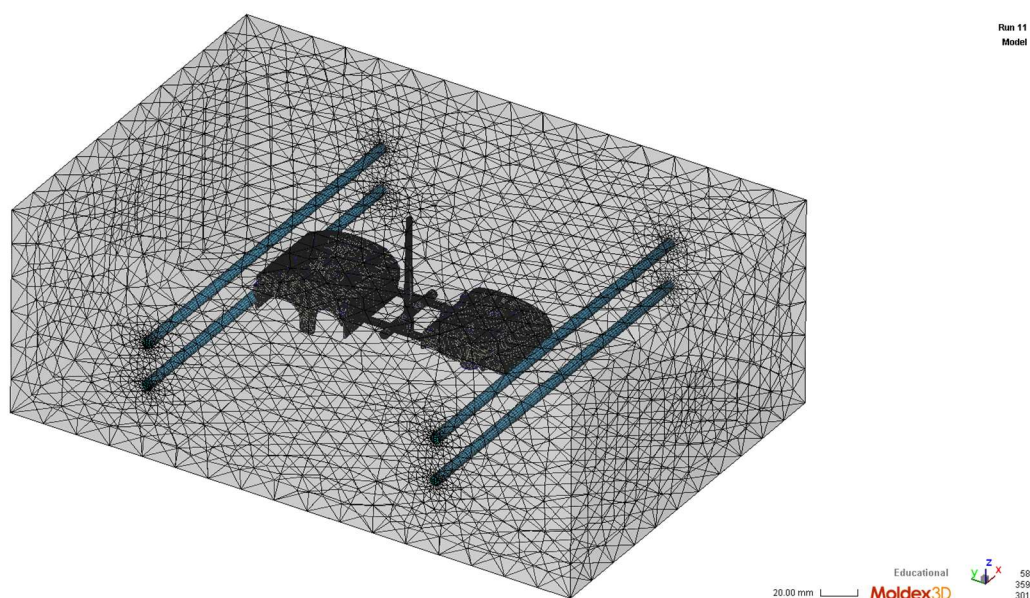


**Slika 81.        Skočni prozor naredbe „Generate“ – Moldex3D**

S prethodne slike može se vidjeti sljedeći redoslijed generiranja mreže simulacijskog modela:

1. definiranje dvodimenzijske tj. površinske mreže konačnih elemenata otpreska što je ostvareno ranije pomoću naredbe „Seeding“,
2. definiranje trodimenzijske mreže konačnih elemenata otpresaka, pripadajućih ušća i ostatka uljevnog sustava,
3. definiranje trodimenzijske mreže konačnih elemenata sustava za temperiranje i kućišta kalupa tj. kalupnih ploča.

Pritiskom na tipku „Generate“ dobiva se kompletna mreža konačnih elemenata simulacijskog modela prikazana na slici 82.



**Slika 82.        Mreža konačnih elementa simulacijskog model – Moldex3D**

Na prethodnoj slici se može vidjeti kako Moldex3D samostalno provodi adaptivnu analizu tj. lokalno povećanje gustoće mreže konačnih elementa na mjestima gdje dolazi do geometrijskih diskontinuiteta poput ulaza i izlaza kanala za temperiranje, ušća i slično. Lokalno povećanje gustoće mreže konačnih elemenata je jako korisno iz razloga što osigurava točnije rezultate uz optimalno korištenje računalnih resursa.

Generiranu mrežu konačnih elemenata je potrebno provjeriti pomoću naredbe „Final Check“ kako bi se osiguralo ispravno izvođenje računalne simulacije.

### 6.3.9. Definiranje materijala

U poglavlju 6.1. kao materijal proizvoda je definiran poliamid ojačan staklenim vlaknima oznake PA6-GF30. Definiranje materijala se ostvaruje naredbom „Material“ pri čemu se otvara „Moldex3D Material Wizard“ unutar kojeg je dostupna baza materijala „Moldex3D Bank“ opisana u poglavlju 5.4.2. Unutar baze materijala pronađen je traženi materijal proizvođača BASF oznake Ultramid B3EG6. Slika 83 prikazuje propisane temperature taljevine (eng. Melt Temperature), temperature kalupne šupljine (eng. Mold Temperature) i temperaturu postojanosti oblika (eng. Ejection Temperature) iz baze materijala.

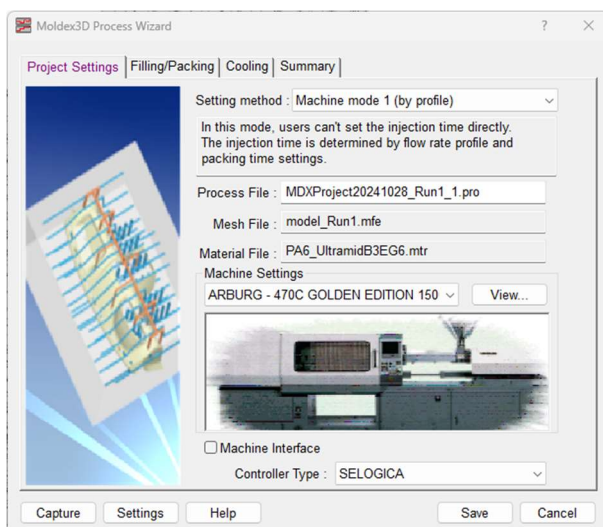
Type	PA6
Grade Name	Ultramid B3EG6
Producer	BASF
Comment	30%GF, MVR(275, 5)=50 cm <sup>3</sup> /10min, D=1.36 g/cm <sup>3</sup>
Melt Temperature (Minimum)	270.00 °C
Melt Temperature (Normal)	280.00 °C
Melt Temperature (Maximum)	290.00 °C
Mold Temperature (Minimum)	80.00 °C
Mold Temperature (Normal)	85.00 °C
Mold Temperature (Maximum)	90.00 °C
Ejection Temperature	150.00 °C
Freeze Temperature	170.00 °C

**Slika 83. Parametri prerade (temperature) materijala – Moldex3D Bank**

Svojstva materijala u potpunosti odgovaraju onima koje proizvođač propisao u „Processing Data Sheet“ dokumentu koji se nalazi u prilogu ovoga rada.

### 6.3.10. Definiranje procesa

Odabirom naredbe „Process“ otvara se skočni prozor „Moldex3D Process Wizard“ prikazan na slici 84.



Slika 84. Moldex3D Process Wizard

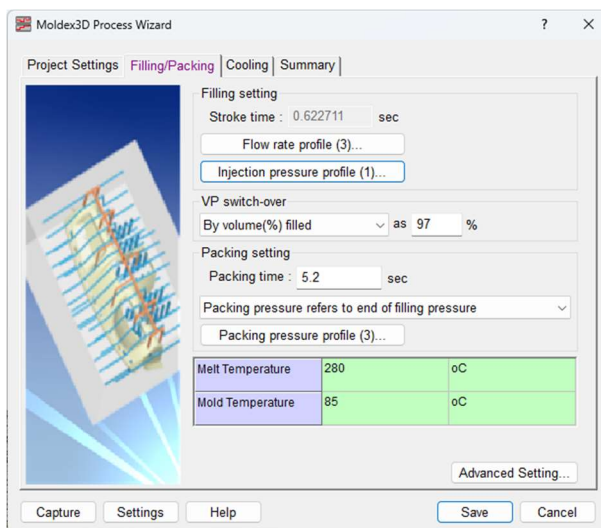
Sa slike se vidi kako je odabrana metoda definiranja procesa „Machine mode 1 (by profile)“. Navedena metoda izravno određuje vrijeme ubrizgavanja pri čemu korisniku ostaje mogućnost definiranja profila tlaka tijekom ubrizgavanja. Glavna karakteristika ove metode je da ona omogućuje simuliranje procesa na stvarnoj ubrizgavalici što je poželjno u okviru ovog diplomskog rada. Za proizvodnju promatranog proizvoda tj. ZOS 3/2 stezaljke koristi se Arburg 470C Golden Edition 1500-400-35 ubrizgavalica prikazana na slici 85.



Slika 85. Ubrizgavalica Arburg 470C Golden Edition 1500-400-35 – Metal Product

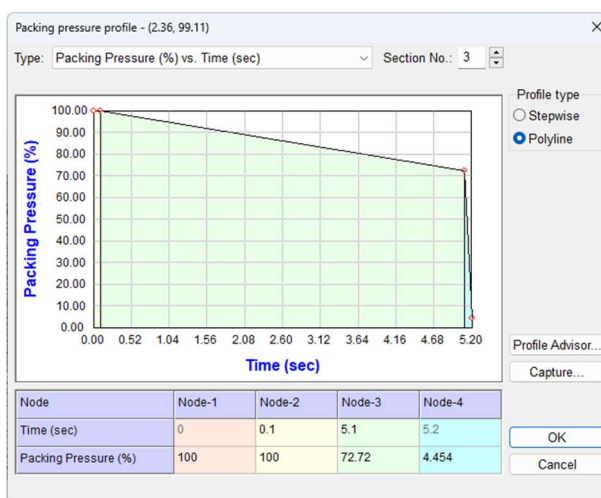
U sklopu Moldex3D programskog paketa željena ubrizgavalica se odabire iz baze ubrizgavalice koja sadrži različite tipove ubrizgavalica renomiranih proizvođača.

Nadalje slijedi definiranje pojedinih faza procesa injekcijskog prešanja. Započinje se s definiranjem faze ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka. Slika 86 prikazuje karticu „Filling/Packing Settings“ unutar „Moldex3D Process Wizard-a“.



**Slika 86. Kartica „Filling/Packing Settings“ - „Moldex3D Process Wizard“**

Na prethodnoj slici se može vidjeti kako nema mogućnosti definiranja vremena ubrizgavanja, ali je zato moguće definirati profil tlaka ubrizgavanja koji je prema izvedenom stanju konstantan i iznosi 1500 bar. Nadalje je definirana točka preklapanja na naknadni tlak kao trenutak u kojem je 97 % volumena kalupne šupljine ispunjeno taljevinom. Vrijeme trajanja faze djelovanja naknadnog tlaka iznosi 5,2 s prema izvedenom stanju, a profil djelovanja naknadnog tlaka je prikazan na slici 87.

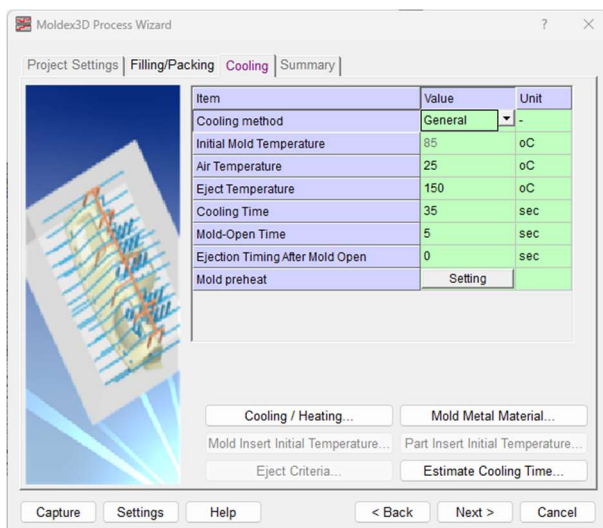


**Slika 87. Profil djelovanja naknadnog tlaka - „Moldex3D Process Wizard“**



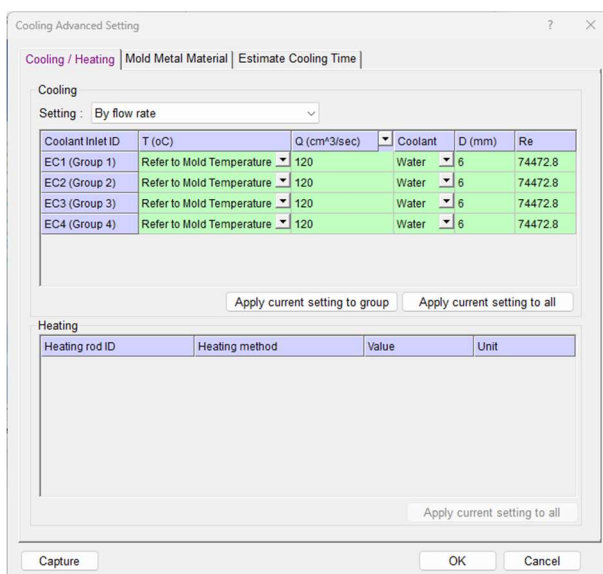
Vrijednosti temperature taljevine i temperature stijenske kalupne šupljine odgovaraju preporučenim temperaturama od strane proizvođača, a preuzete su iz Moldex3D baze materijala.

Na kraju slijedi definiranje postavki faze hlađenja unutar kartice „Cooling“ također u sklopu „Moldex3D Process Wizard-a“. Slika 88 prikazuje navedenu karticu.



Slika 88. Kartica „Cooling“ - „Moldex3D Process Wizard“

Vrijeme hlađenja je postavljeno na 35 s prema izvedenom stanju, a isto tako je postavljeno vrijeme otvaranja kalupa koje iznosi 5 s. Ostale vrijednosti vezane uz materijal su preuzete iz baze materijala. U sklopu navedene kartice potrebno je definirati svojstva medija za temperiranje. Pritiskom na tipku „Cooling/Heating“ otvara se skočni prozor prikazan na slici 89.



Slika 89. „Cooling Advanced Setting“ - „Moldex3D Process Wizard“

Unutar prikazanog prozora kao medij za temperiranje je odabrana voda, a temperatura medija za temperiranje odgovara temperaturi stijenke kalupne šupljine tj. ona iznosi 85 °C što odgovara izvedenom stanju. Volumenski protok medija za temperiranje je također definiran prema izvedenom stanju tj. on iznosi 120 cm<sup>3</sup>/s. Vrijednost Reynoldsovog broja je preuzeta iz korištenog programskog paketa. Navedeni parametri se vezani uz temperiralo opisano u poglavlju 2.1.3. Slika 90 prikazuje temperiralo proizvođača Regloplas koje se koristi za temperiranje izvedenog kalupa.



**Slika 90. Temperiralo Regloplas 90S – Metal Product**

U navedenom skočnom prozoru moguće je definiranje i svojstva materijala kalupnih ploča, ali to nije korišteno iz razloga što nema pouzdanih informacija o korištenom materijalu.

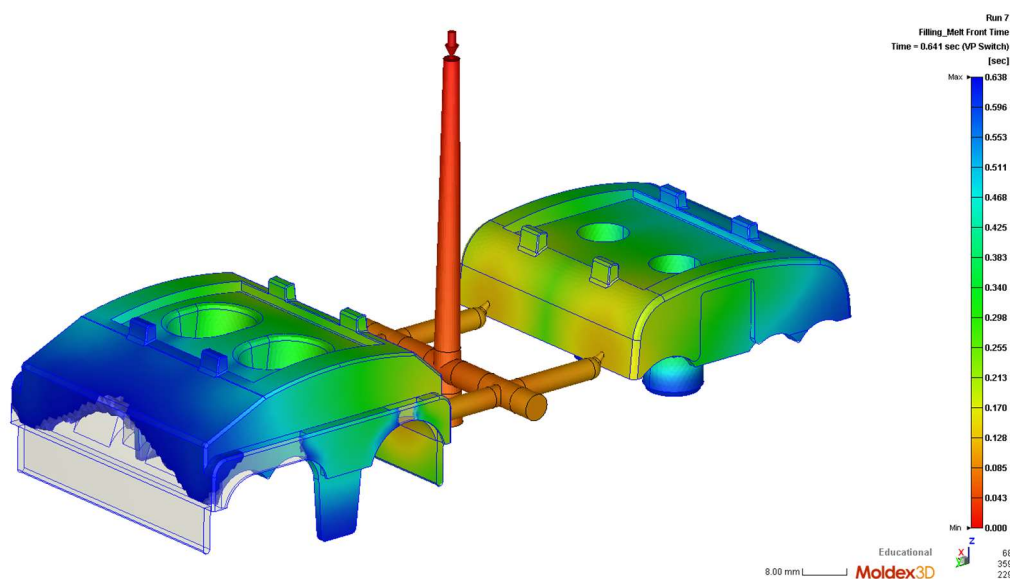
#### **6.4. Rezultati računalne simulacije postojećeg procesa**

Analizom rezultata prethodno opisane računalne simulacije uočilo se nekoliko problematičnih pojava tijekom ciklusa injekcijskog prešanja, a to su:

- nejednoliko popunjavanje kalupnih šupljina,
- pojava zračnih džepova i
- neučinkovita konfiguracija kanala za temperiranje.

### 6.4.1. Nejednoliko popunjavanje kalupnih šupljina

Postojeći kalup sastoji se od dvije kalupne šupljine povezane istom konfiguracijom uljernih kanala, a koje se koriste za oblikovanje dva različita otpreska tj. gornjeg i donjeg dijela kućišta ZOS 3/2 stezaljke. Masa gornjeg dijela kućišta iznosi 39 g, a donjeg dijela kućišta 29 g, što uz različitu geometriju otpresaka (debljine stijenki, putovi tečenje itd.) dovodi do nejednolikog popunjavanja kalupnih šupljina. Slika 91 prikazuje prethodno opisani problem za vrijeme faze ubrizgavanja u trenutku preklapanja na naknadni tlak.



Slika 91. Prikaz nejednolikog popunjavanja kalupnih šupljina – Moldex3D

Na prethodnoj slici može se vrlo jasno uočiti kako je kalupna šupljina koja oblikuje donji dio kućišta ZOS 3/2 stezaljke u potpunosti ispunjena taljevinom, dok to nije slučaj kod kalupne šupljine koja oblikuje gornji dio kućišta. Neispunjeni dio kalupne šupljine ispuniti će se taljevinom za vrijeme faze djelovanja naknadnog tlaka, no tu dolazi do nejednolikog temperiranja otpresaka tj. dok će neispunjeni dio popunjavati taljevina preostali dijelovi će se početi hladiti. Cilj je da na kraju faze ubrizgavanja tj. pri preklapanju na naknadni tlak popunjenost kalupnih šupljina bude ujednačena i da ona iznosi iznad 90 %.

### 6.4.2. Pojava zračnih džepova

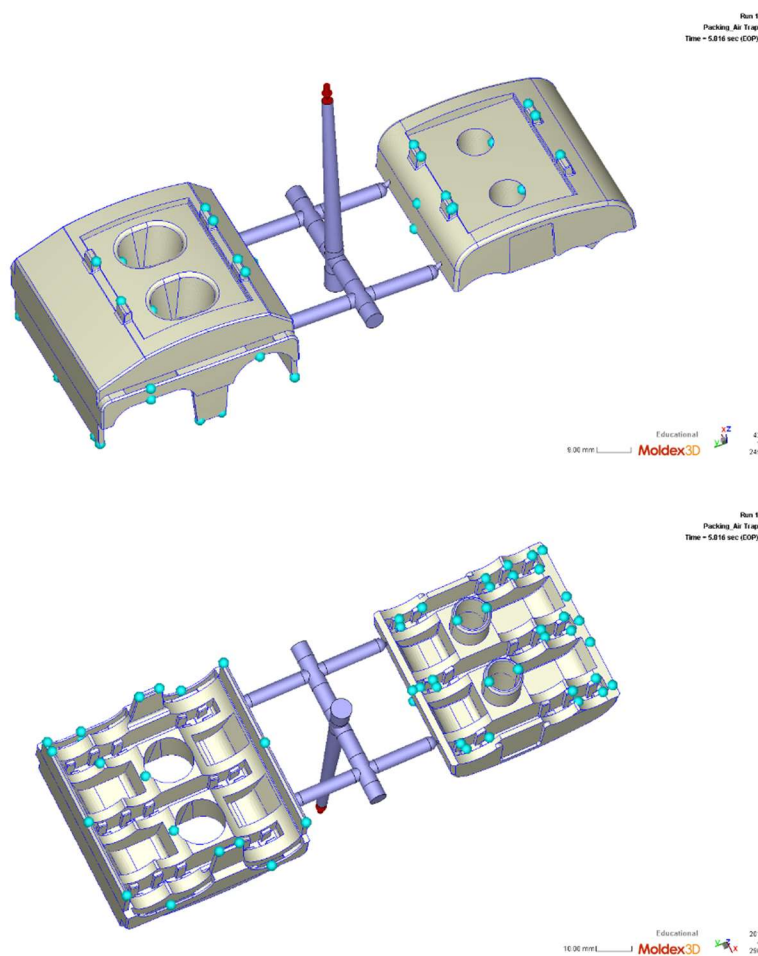
Do pojave zračnih džepova dolazi uslijed neadekvatno izvedenog sustava za odzračivanje kalupnih šupljina. Zrak ostaje zarobljen unutar kalupne šupljine zbog čega taljevina ne uspije u potpunosti ispuniti kalupnu šupljinu. Uz prethodno navedenu pojavu moguća je pojava izgorina na otpresku u obliku crnih točaka gdje dolazi do izgaranja materijala zbog pregrijanog zraka koji ostaje zarobljen unutar kalupne šupljine. Sustav odzračivanja postojećeg kalupa je vrlo loš,

a u prilog tome govore crne mrlje koje se mogu uočiti na kalupnim pločama, a koje nastaju uslijed rasplinjavanja polimernog materijala. Na slici 92 su pobliže prikazani opisani tragovi rasplinjavanja.



Slika 92. Tragovi rasplinjavanja

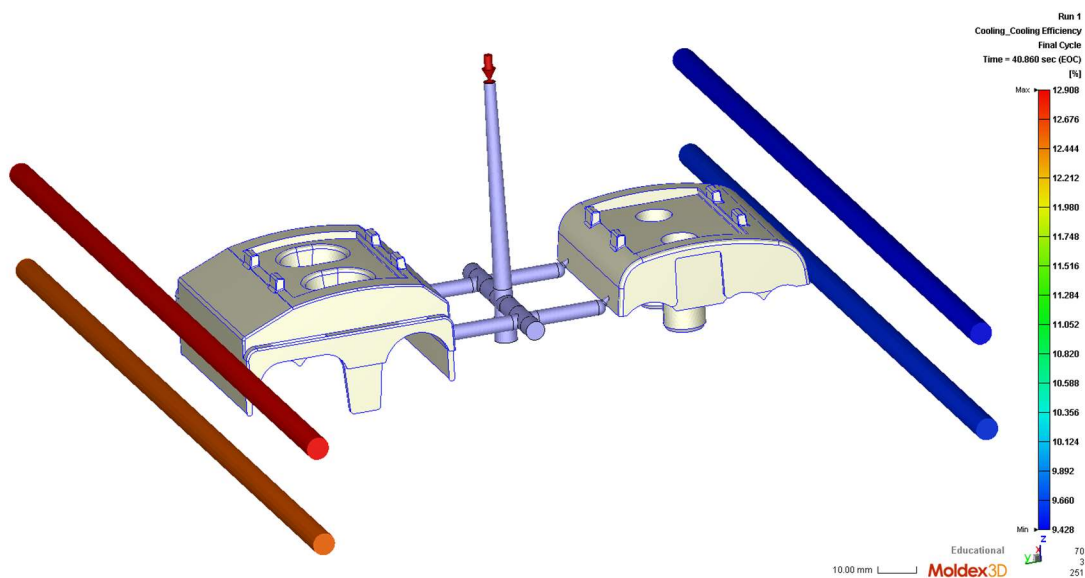
Primjenom računalne simulacije moguće je odrediti potencijalna mjesta pojave zračnih džepova koja su za slučaj izvedenog kalupa prikazana na slici 93.



Slika 93. Prikaz potencijalnih mjesta pojave zračnih džepova – Moldex3D

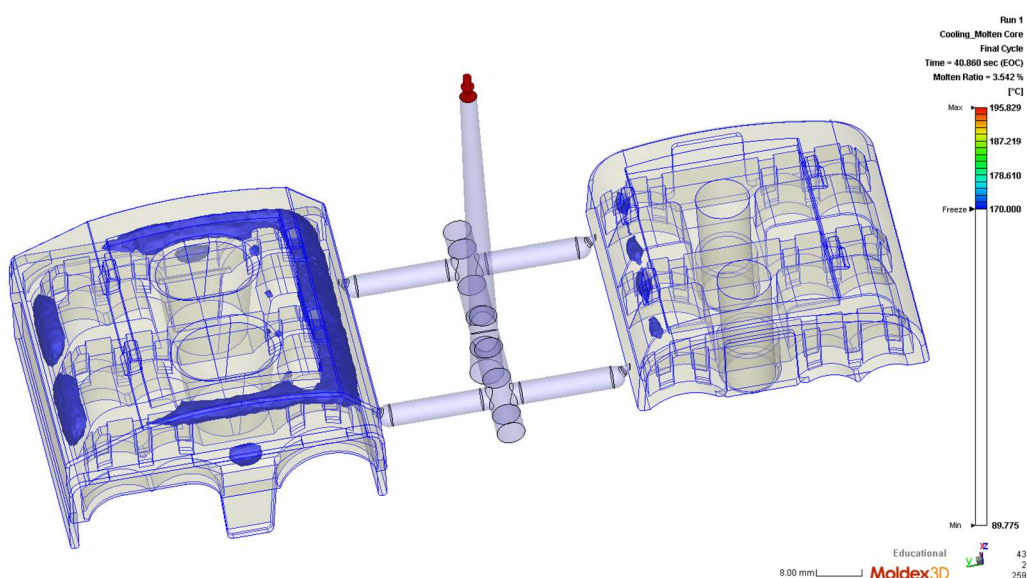
### 6.4.3. Neučinkovita konfiguracija kanala za temperiranje

Opisana konfiguracija kanala za hlađenje u poglavlju 6.2.4. je izrazito neučinkovita, a uz to treba imati na umu da je propisana temperatura stijenke kalupne šupljine  $85^{\circ}\text{C}$  što je dosta visoka temperatura i samim time je odvođenje topline s otpreska vrlo usporeno. Dobiveni rezultati vezani uz učinkovitost kanala za temperiranje su prikazani na slici 94.



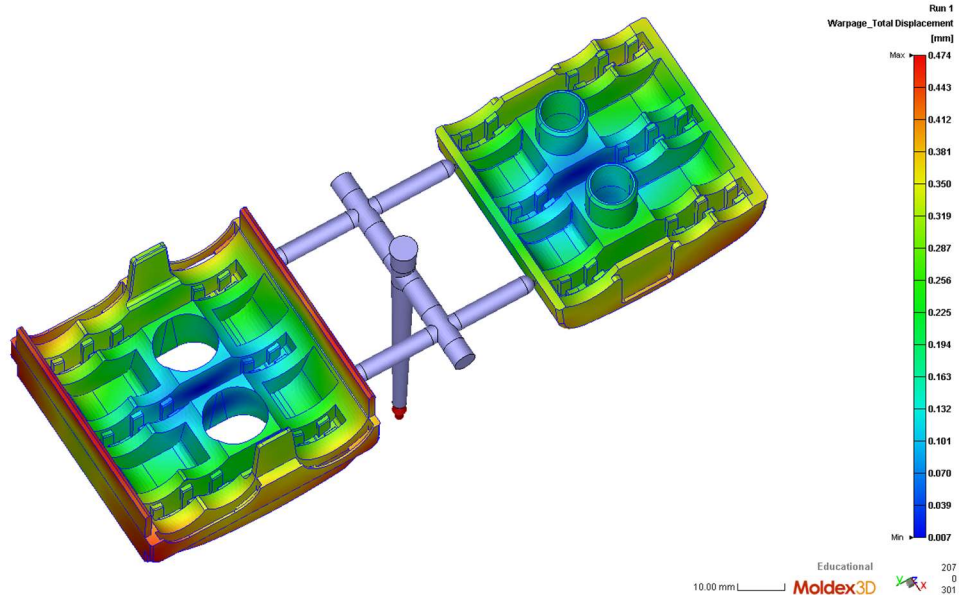
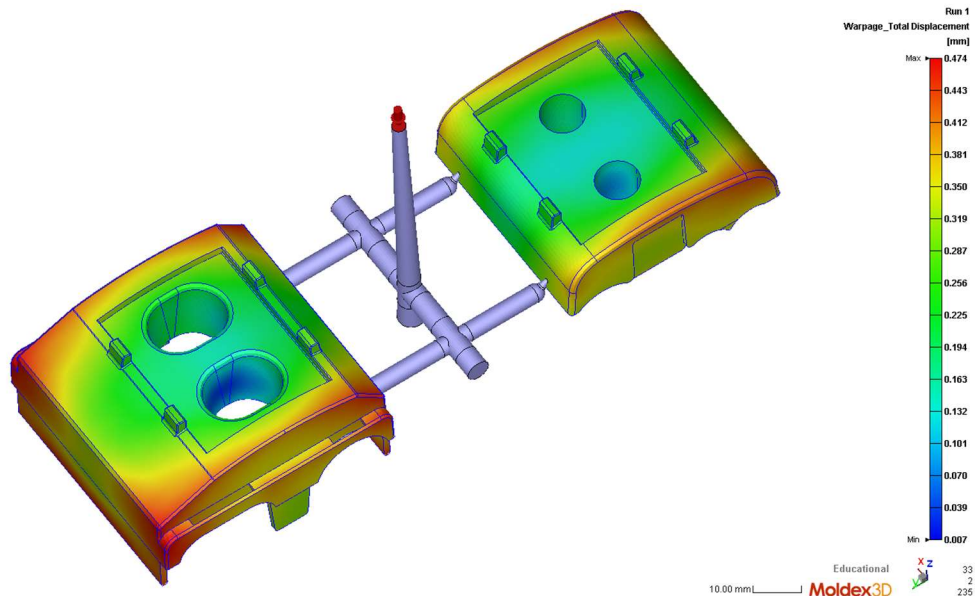
Slika 94. Prikaz učinkovitosti kanala za temperiranje – Moldex3D

Također jedan od problema koje je potrebno otkloniti boljom efikasnošću kanala za temperiranje je dosta veliki postotak taljevine prisutan na kraju procesa hlađenja. Trenutačni postotak taljevine iznosi 3,54 % i prikazan je na slici 95.



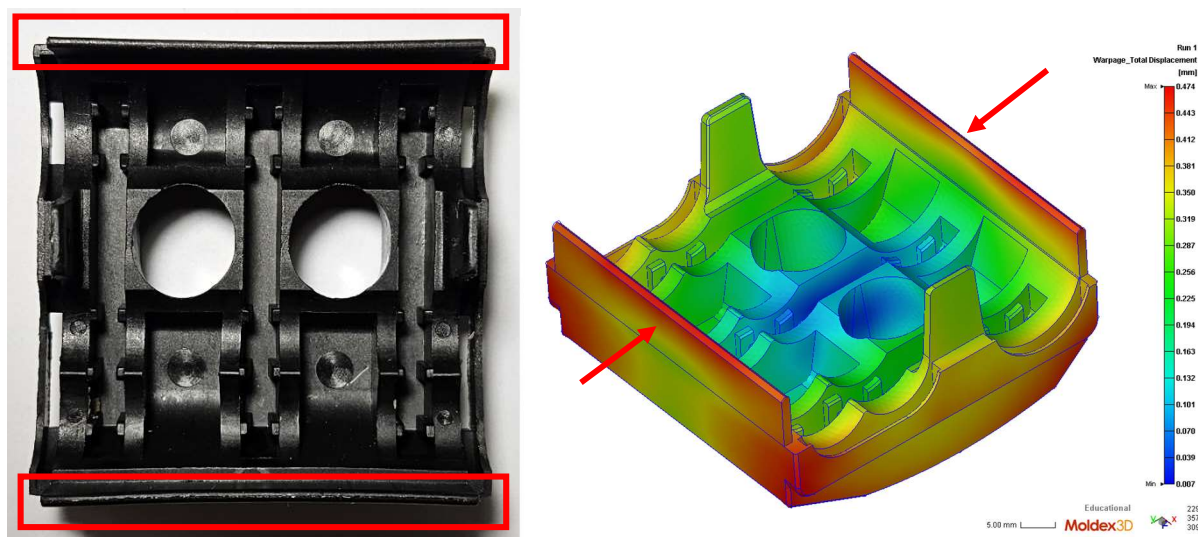
Slika 95. Prikaz postotka taljevine na kraju faze hlađenja – Moldex3D

Ostatak taljevine na kraju faze hlađenja uzrokuje povećano vitoperenje otpreska po izlasku iz kalupa jer u tim zonama nije postignuta temperatura postojanosti oblika. Na slici 96 su prikazani rezultati vezani uz vitoperenje otpreska.



Slika 96. Prikaz vitoperenja otpreska – Moldex3D

Slika 97 na sljedećoj stranici prikazuje vitoperenje na samom otpresku u usporedbi s rezultatima vitoperenja dobivenih računalnom simulacijom.



Slika 97. Usporedba vitoperenja – na slici: lijevo – otpresak, desno – rezultat računalne simulacije

### 6.5. Optimiranje postojećeg procesa

Na temelju uočenih pojava provesti će se optimiranje u nekoliko koraka, a to su:

- postizanje jednolikog popunjavanja kalupnih šupljina,
- optimiranje kanala za temperiranje i
- optimiranje sustava za odzračivanje kalupnih šupljina.

#### 6.5.1. Jednoliko popunjavanje kalupnih šupljina

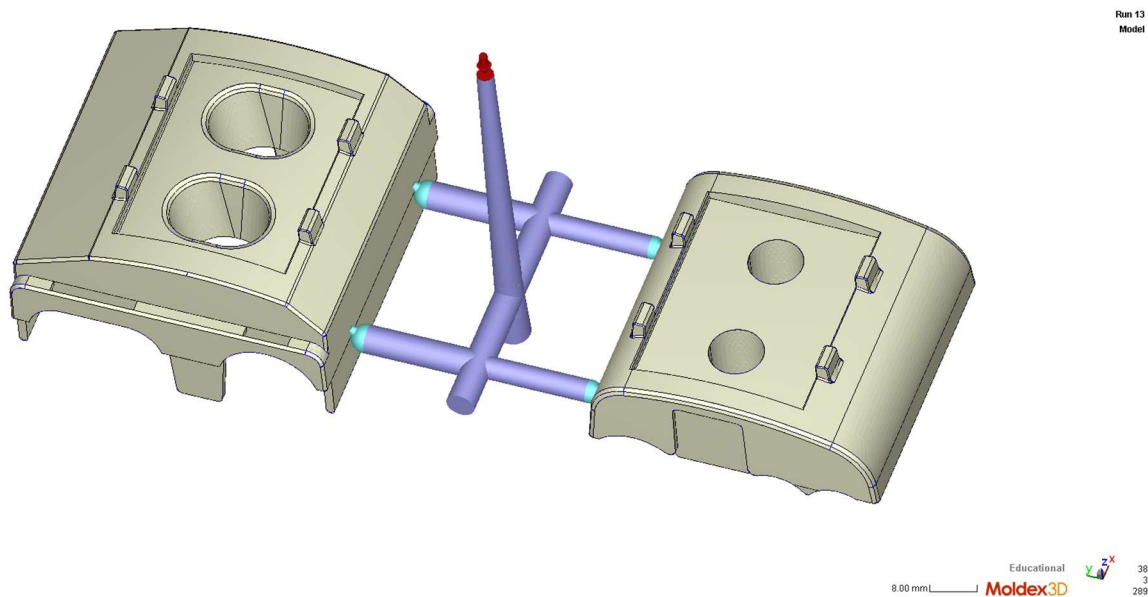
Kako bi se postiglo jednoliko popunjavanje kalupnih šupljina potrebno je optimirati uljevni sustav na način da se promijene dimenzije ušća i/ili uljevnih kanala.

U sklopu ovog diplomskog rada prvo se krenulo od promjene dimenzija ušća i uljevnih kanala prema kalupnoj šupljini koja oblikuje gornji dio kućišta ZOS 3/2 stezaljke. Tablica 4 prikazuje postojeće i nove dimenzije ušća i uljevnih kanala.

Tablica 4. Prva iteracija optimiranja uljevnog sustava

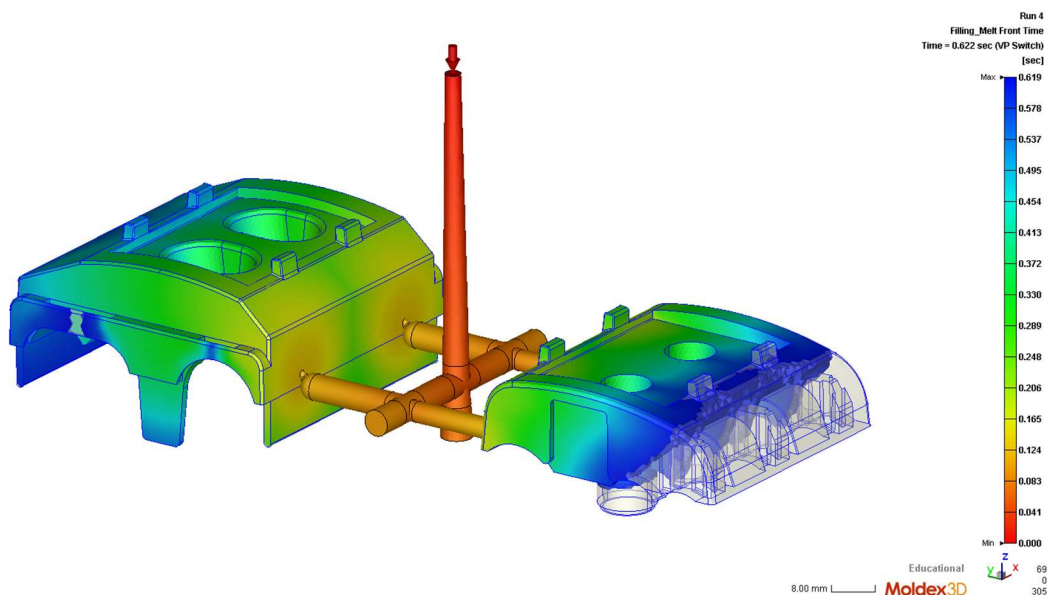
	Postojeće dimenzije [mm]	Nove dimenzije [mm]
Kranji promjer tunelnog ušća	1	1,3
Promjer uljevnih kanala	4	4,5

Slika 98 prikazuje optimirani uljevni sustav u simulacijskom okruženju prema vrijednostima iz tablice 4.



**Slika 98. Prva iteracija optimiranja uljavnog sustava – Moldex3D**

Dobiveni rezultati popunjavanja kalupne šupljine za vrijeme faze ubrizgavanja u trenutku preklapanja na naknadni tlak su prikazani na slici 99.



**Slika 99. Prikaz popunjavanja kalupnih šupljina – prva iteracija optimiranja uljavnog sustava**

Uvođenjem promjena prikazanih u tablici 4 postigla se suprotna situacija tj. taljevina popuni kalupnu šupljinu za oblikovanje gornjeg dijela kućišta ZOS 3/2 u potpunosti, dok za to vrijeme ne uspije u potpunosti popuniti kalupnu šupljinu za oblikovanje donjeg dijela kućišta. Dobivena

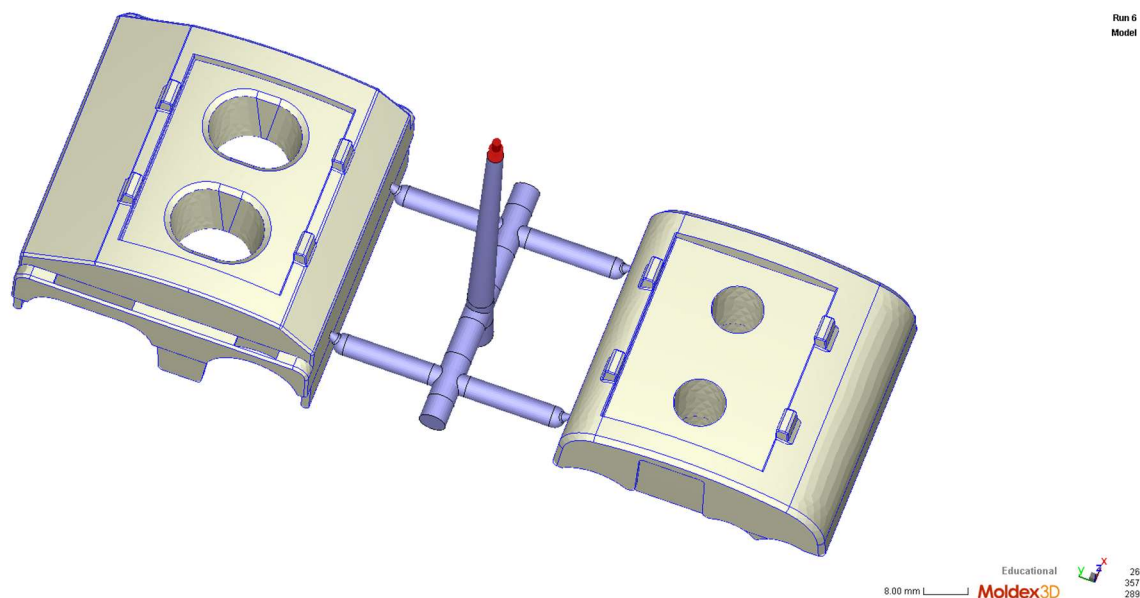


promjena tijekom faze ubrizgavanja je također nepovoljna i potrebno je provesti drugu iteraciju optimiranja uljavnog sustava. Promjene na uljevnom sustavu tijekom druge iteracije optimiranja su prikazane u tablici 5.

**Tablica 5. Druga iteracija optimiranja uljavnog sustava**

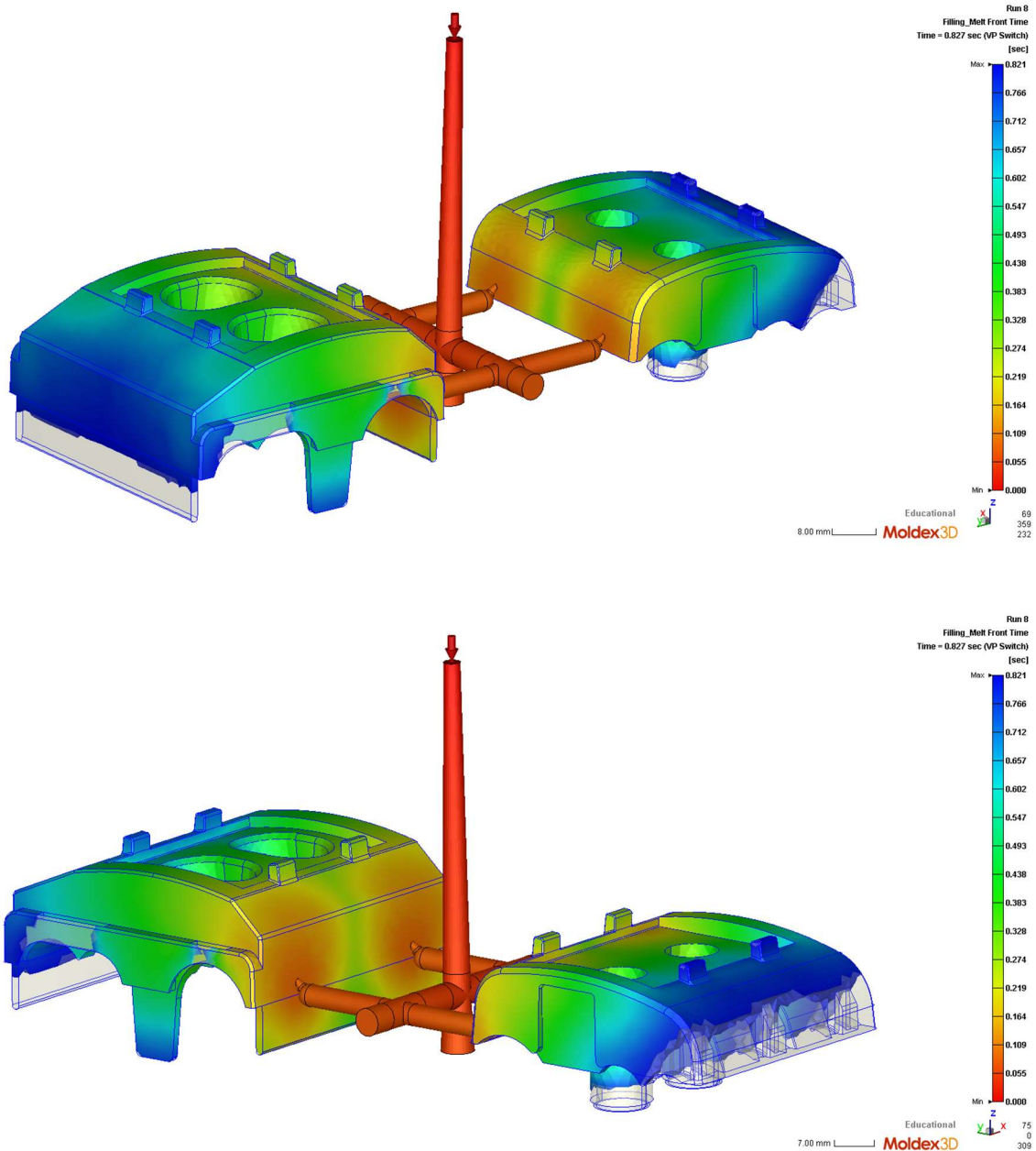
	Postojeće dimenzije [mm]	Nove dimenzije [mm]
Kranji promjer tunelnog ušća	1	1,3
Promjer uljavnih kanala	4	4

Slika 100 prikazuje optimirani uljevni sustav u simulacijskom okruženju prema vrijednostima iz tablice 5.



**Slika 100. Druga iteracija optimiranja uljavnog sustava – Moldex3D**

Rezultati popunjavanja kalupne šupljine za vrijeme ubrizgavanja u trenutku preklapanja na naknadni tlak za drugu iteraciju optimiranja uljavnog sustava su prikazani na slici 101.

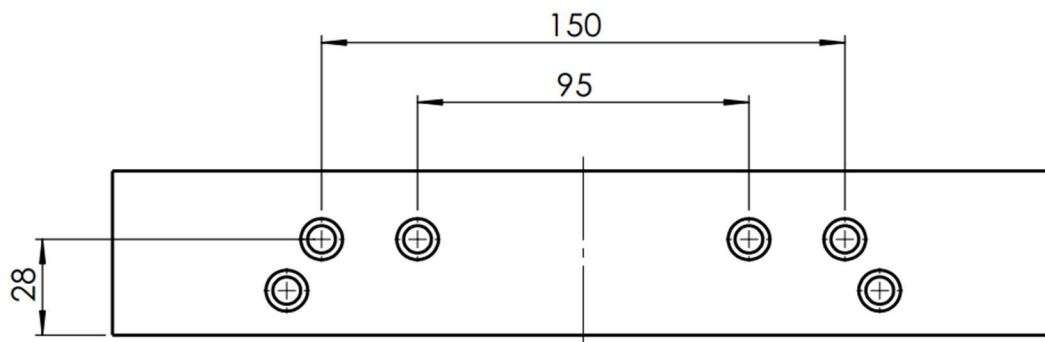


**Slika 101. Prikaz popunjavanja kalupnih šupljina – druga iteracija optimiranja uljevnog sustava – Moldex3D**

Na slici 101 može se vidjeti ujednačenije popunjavanje kalupnih šupljina u odnosu na početni slučaj i slučaj nakon prve iteracije optimiranja uljevnog sustava. Može se zaključiti kako se u trenutku preklapanja na naknadni tlak postiže više od 90 % popunjenosti obje kalupne šupljine što je bio cilj izvođenja ovog optimiranja.

### 6.5.2. Učinkovitija konfiguracija kanala za temperiranje

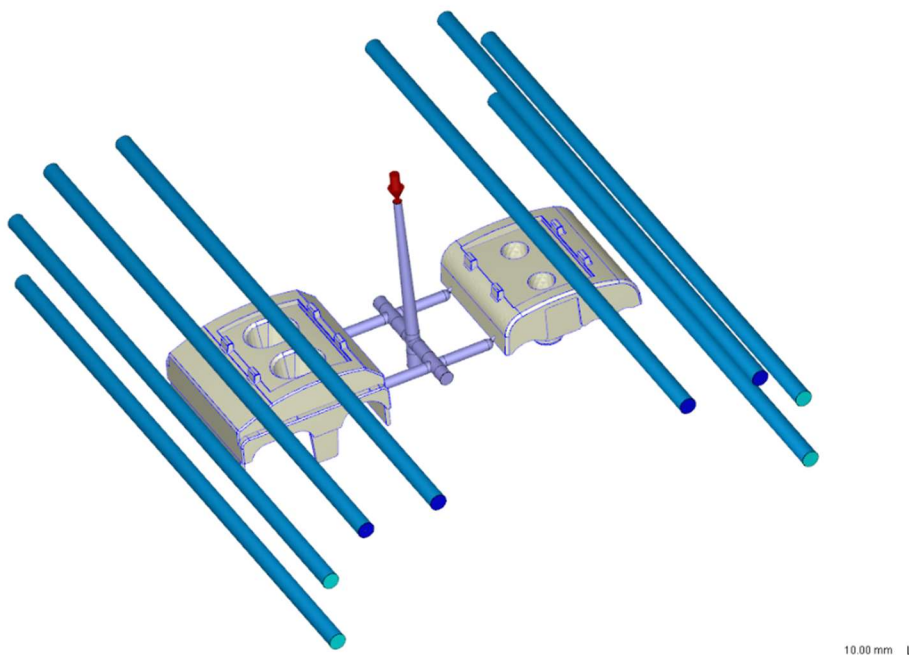
Obzirom na izvedeno stanje sustava za temperiranje tj. samih kanala za temperiranje krenulo se od pretpostavke da povećanje promjera kanala neće biti dovoljno tj. da treba krenuti od dodavanja novih kanala za temperiranje. Prvi korak je bio definiranje novog razmještaja kanala za temperiranje. Dodavanje novih kanala za temperiranje u pomičnu kalupnu ploču nije izvedivo zbog izbacivala, stoga kao jedina opcija preostaje dodavanje kanala u nepomičnu kalupnu ploču. Na slici 102 je prikazan razmještaj dodatnih kanala za temperiranje.



Slika 102. Razmještaj dodatnih kanala za temperiranje

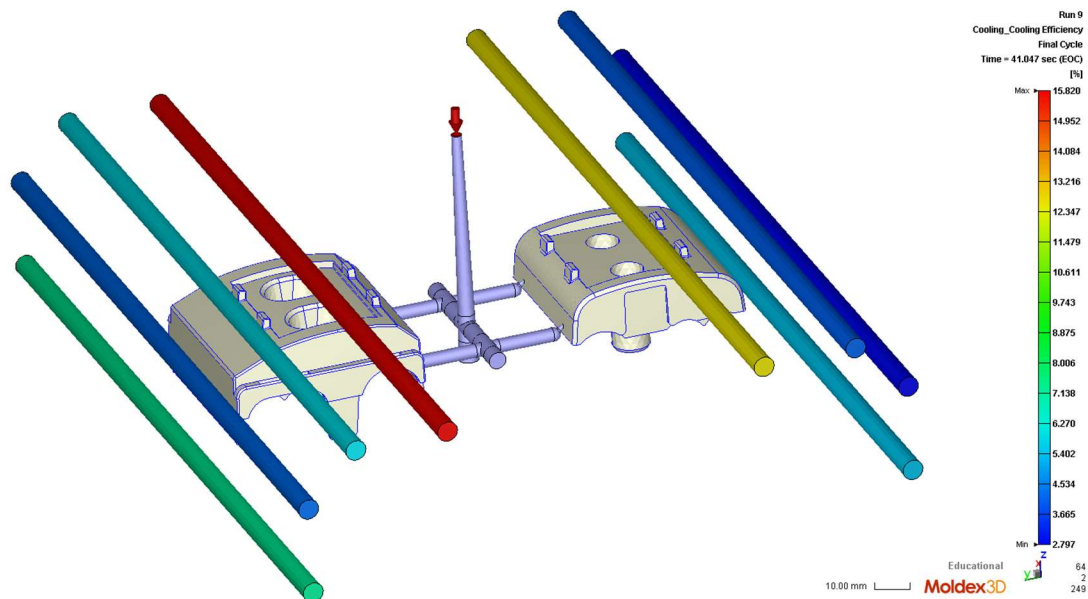
Sa slike 102 vidi se kako su dodana četiri nova kanala za temperiranje na međusobnom razmaku 95 mm i 150 mm, te na visini 28 mm od sljubnice.

Tijekom prve iteracije optimiranja sustava za temperiranje zadržan je početni promjer kanala od 6 mm uz dodatna četiri kanala. Slika 103 prikazuje simulacijski model s dodatnim kanalima.



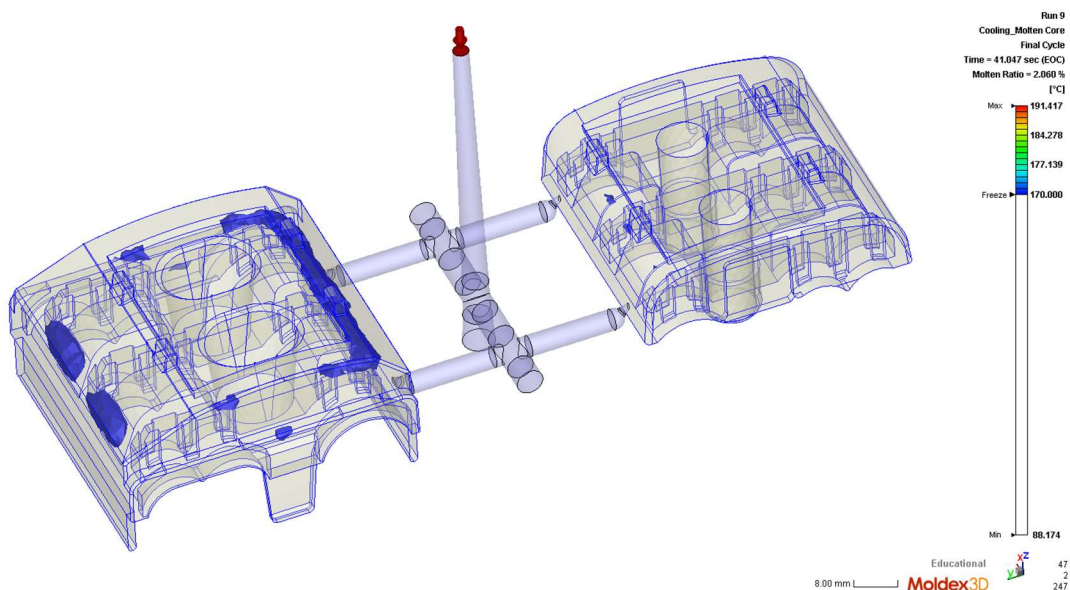
Slika 103. Prva iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D

Slika 104 predstavlja prikaz učinkovitosti kanala za temperiranje nakon prve iteracije optimiranja sustava za temperiranje.



**Slika 104. Prikaz učinkovitosti kanala za hlađenje – prva iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D**

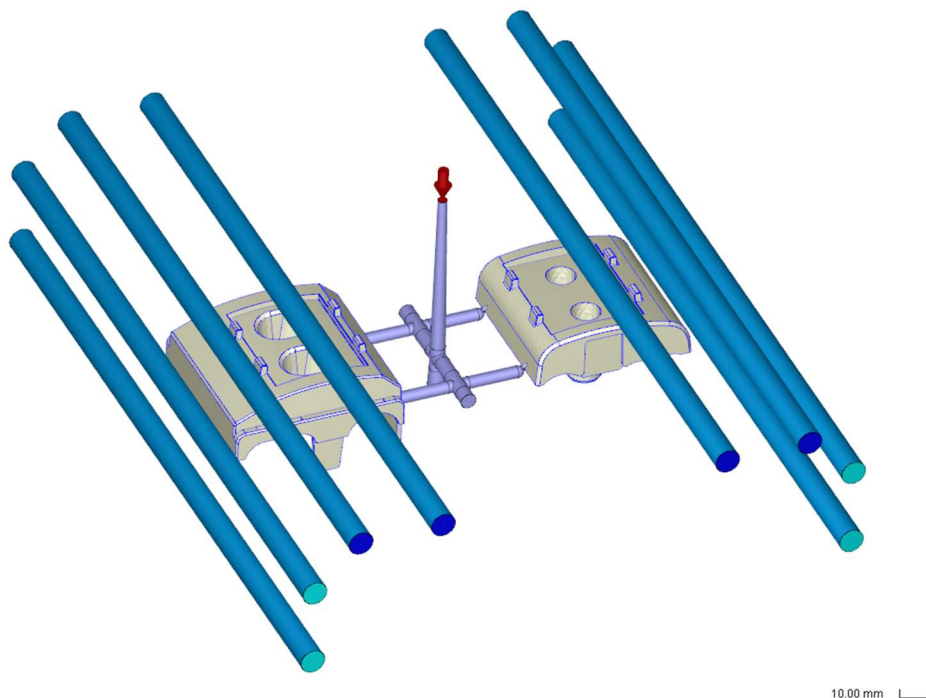
Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti kako učinkovitost naknadno dodanih kanala nije značajno viša u odnosu na postojeće, riječ je o razlici oko 5 %. Preostaje još provjeriti postotak taljevine na kraju faze hlađenja koji je prikazan na slici 105.



**Slika 105. Prikaz postotka taljevine na kraju faze hlađenja - prva iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D**

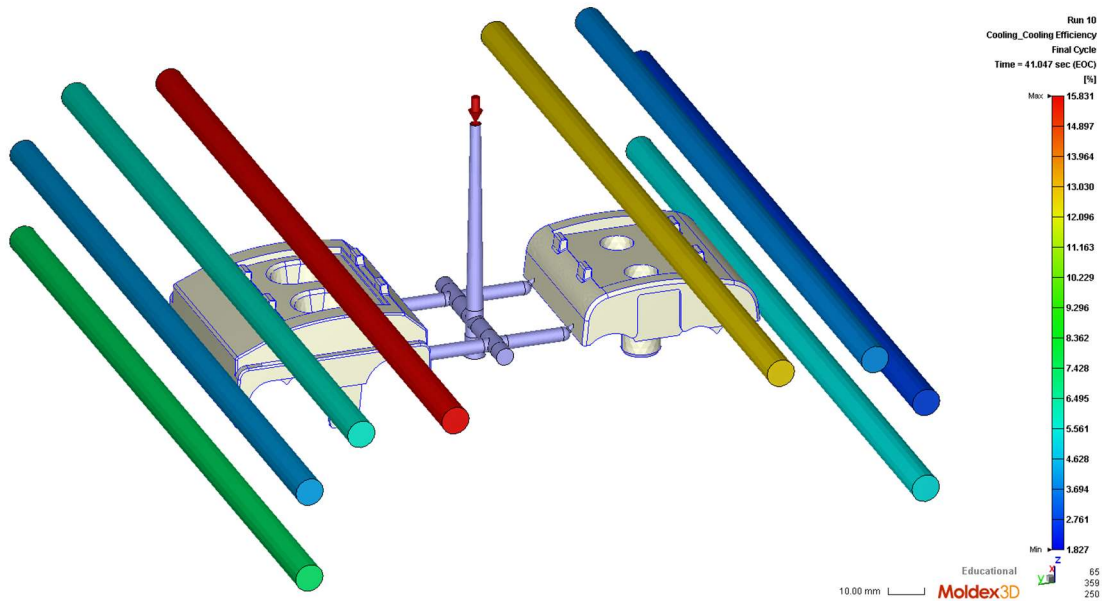
Na temelju prethodnog prikaza može se zaključiti da se postotak taljevine smanjio na 2,06 % što je manje u odnosu na postojeći udio od 3,54 %. Sa slike 105 može se uočiti kako je najveće smanjenje postotka taljevine nastalo u kalupnoj šupljini koja oblikuje gornji dio kućišta ZOS 3/2 stezaljke i to u području ispod naknadno dodanog uljavnog kanala. Što se tiče kalupne šupljine koja oblikuje donji dio kućišta tamo se nalazi mali postotak taljevine koji se može zanemariti.

Druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje uključuje povećanje promjera kanala sa 6 mm na 8 mm. Simulacijski model druge iteracije optimiranja je prikazan na slici 106.



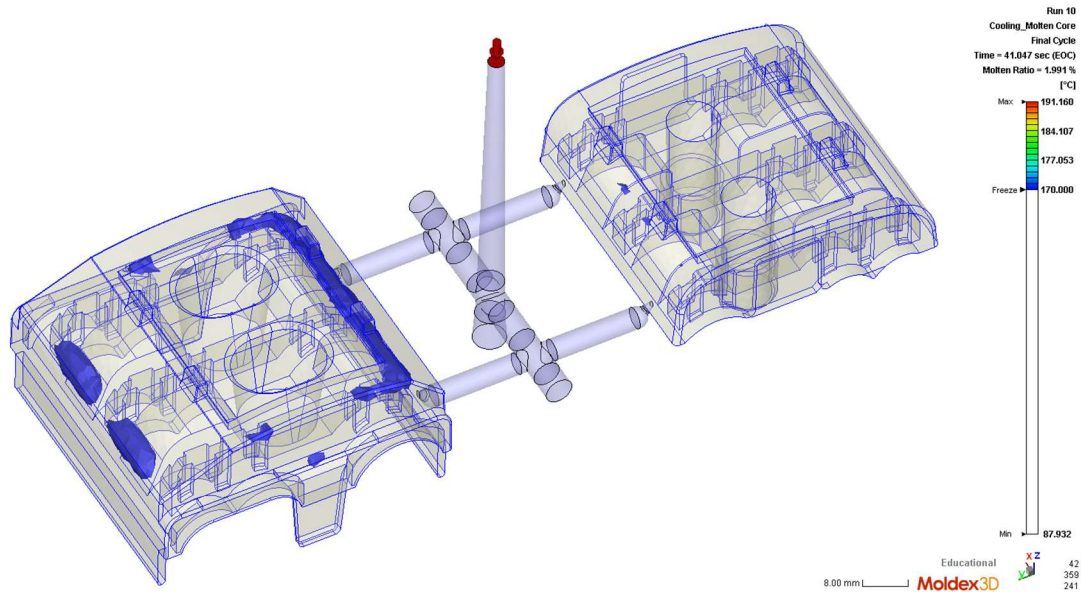
**Slika 106. Druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D**

Slika 107 na sljedećoj stranici predstavlja prikaz učinkovitosti kanala za temperiranje nakon druge iteracije optimiranja sustava za temperiranje. Na slici se može vidjeti da je učinkovitost kanala ostala ista kao i kod prve iteracije optimiranja što je bilo i za očekivati.



**Slika 107. Prikaz učinkovitosti kanala za temperiranje – druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D**

Na slici 108 je prikazan postotak taljevine na kraju faze hlađenja.



**Slika 108. Prikaz postotka taljevine na kraju faze hlađenja - druga iteracija optimiranja sustava za temperiranje – Moldex3D**

Dobiveni rezultati prikazani na slici 108 pokazuju da se s povećanjem promjera kanala za temperiranje sa 6 mm na 8 mm nije desilo ništa značajno. Postotak taljevine nakon druge iteracije optimiranja iznosi 1,99 % što je 0,07 % manje u odnosu na prvu iteraciju optimiranja.

Kroz iteracije optimiranja sustav za temperiranje došlo se do zaključka kako bi bilo potrebno dodati prikazane kanale za temperiranje, ali nema potrebe izrađivati kanale promjera 8 mm nego je dovoljno ostati pri postojećem promjeru od 6 mm. Idealan bi bio slučaj dodati još kanala za temperiranje, ali to nije ostvarivo zbog same konfiguracije kalupa. Na pomičnoj kalupnoj ploči je prostor ograničen s razmještajem izbacivala, dok na nepomičnoj kalupnoj ploči treba voditi računa o naknadnom smještaju umetaka kroz koje bi se ostvarilo bolje odzračivanje kalupne šupljine.

### 6.5.3. Učinkovitije odzračivanje kalupne šupljine

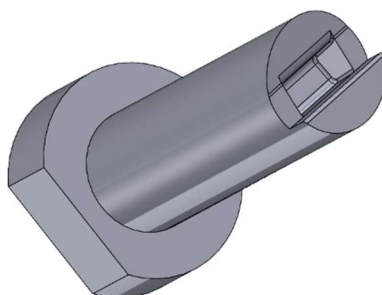
Na temelju dobivenih rezultata koji prikazuje moguća mjesta stvaranja zračnih džepova, a koji su prikazani na slici 93 u sklopu poglavlja 6.4.2. mogu se predložiti sljedeća rješenja.

Što se tiče odzračivanja u nepomičnoj kalupnoj ploči moguće je izraditi umetke kroz koje bi se omogućilo odzračivanje, a koji bi služili za oblikovanje površina otpreska označenih na slici 109 crvenom bojom.



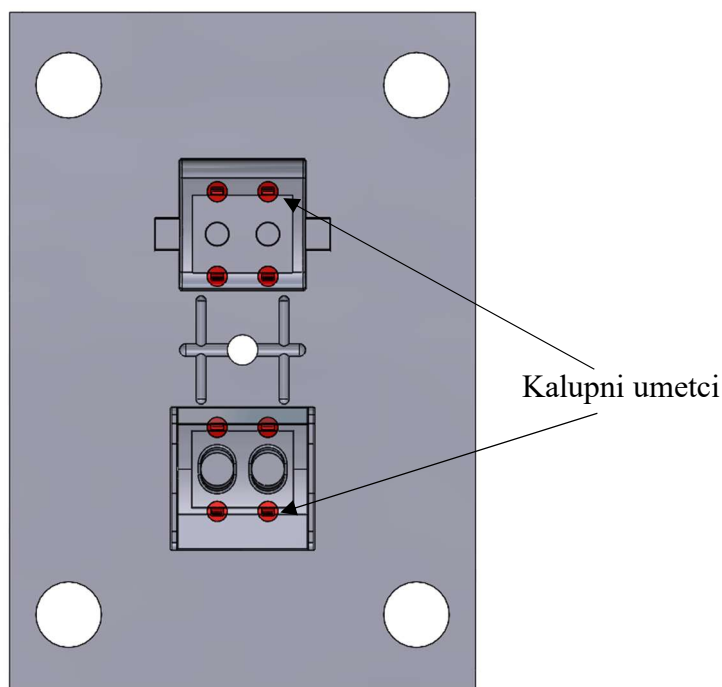
Slika 109. Prijedlog površina otpreska za oblikovanje pomoću umetaka

Slika 110 prikazuje okvirni model umetka za oblikovanje površina prikazanih na prethodnoj slici.



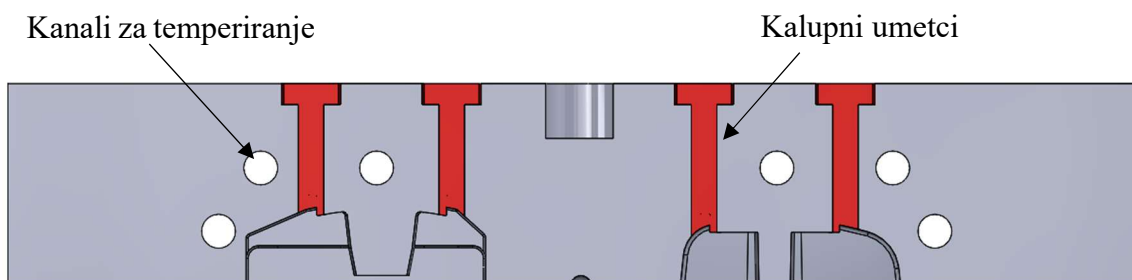
Slika 110. Model umetka – nepomična kalupna ploča - Solidworks

Na slici 111 je prikazana model nepomične kalupne ploče s umetcima.



**Slika 111. Nepomična kalupna ploča s kalupnim umetcima – Solidworks**

Prilikom definiranja razmještaja novih kanala za temperiranje i samih kalupnih umetaka posvećena je pozornost da ne dođe do kolizije između navedenih elemenata kalupa i kanala za temperiranje. Razmještaj kalupnih umetaka u odnosu na kanale za temperiranje je prikazan na slici 112.



**Slika 112. Razmještaj kalupnih umetaka u odnosu na kanale za temperiranje – Solidworks  
– na slici: kalupni umetci, kanali za temperiranje**

Odzračivanje u sklopu pomične kalupne ploče moguće je izvesti pomoću izbacivala. U tom slučaju je izbacivalo potrebno oblikovati na način kako je to prikazano na slici 33 u sklopu poglavlja 3.7. Samo izbacivalo je potrebno tangencijalno izbrusiti od 0,01 do 0,05 mm kako bi se omogućio izlaz zraka, ali ne i taljevine. Oblikovanje izbacivala na taj način ne predstavlja



veliku preinaku na samomu kalupu, ali uvelike pospešuje odzračivanje kalupnih šupljina odnosno sprječava stvaranje zračnih džepova koji se uvelike prisutni sudeći po rezultatima računalne simulacije.

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio prikazati primjenu računalne simulacije procesa injekcijskog prešanja u svrhu optimiranja postojećeg procesa prerade. Na temelju dobivenih rezultata simulacije moglo su se uočiti nekoliko problematičnih pojava tijekom procesa tj. nejednoliko popunjavanje kalupnih šupljina, veliki broj potencijalnih mjesta nastanka zračnih džepova i neučinkovita konfiguracija kanala za temperiranje. Prvo se krenulo s optimiranjem uljevnog sustava kako bi se ostvarilo jednoliko popunjavanje kalupnih šupljina. Ostvarenje jednolikog popunjavanja kalupnih šupljina u ovome slučaju predstavlja problem budući da se kalupne šupljine razlikuju tj. koriste se za oblikovanje dva proizvoda različite geometrije. Optimiranje je provedeno u dvije iteracije dok se nije došlo do zadovoljavajućeg rezultata. Upravo se u tome očituje prednost računalne simulacije. Unutar virtualnog okruženja je vrlo lako mijenjati dimenzije uljevnog sustava i isprobavati različite kombinacije. Na kraju se zadovoljavajuće rješenje prenese na stvarni kalup i time se izbjegnu problemi koji uzrokuju doradu kalupa i gubitak vremena. U slučaju ovog diplomskog rada, gdje se simulacija provodila za već proizvedeni kalup, moguće je na temelju dobivenih rezultata predložiti doradu postojećeg kalupa koja bi obuhvaćala samo doradu ušća koja povezuju kalupnu šupljinu za oblikovanje gornjeg dijela kućišta ZOS 3/2 stezaljke s ostatkom uljevnog sustava. Nakon optimiranja uljevnog sustava nastavilo se s optimiranjem sustava za temperiranje s ciljem pronalaska učinkovitije konfiguracije kanala za hlađenje. Prilikom definiranja dodatnih kanala za hlađenje bilo je potrebno obratiti pažnju na moguću naknadnu ugradnju umetaka za odzračivanje kalupne šupljine, te u skladu s tim ostaviti dovoljno slobodnog prostora. Optimiranje je provedeno također u dvije iteracije, gdje su se prvo dodali dodatni kanali za temperiranje i zadržao se izvedeni promjer od 6 mm, druga iteracija optimiranja je uključivala povećanje promjera kanala s 6 mm na 8 mm. Dobiveni rezultati su pokazali ideju uvođenja dodatnih kanala opravdanom, ali bez potrebe za kanalima promjera 8 mm. Uvođenjem dodatnih kanala se postiglo smanjenje postotka taljevine na kraju procesa hlađenja za 1,48 % što je zadovoljavajući rezultat. Izrađivanje dodatnih kanala za hlađenje ne predstavlja problem budući da to uključuje bušenje četiri kanala promjera 6 mm bez dorade postojećih kanala. Na kraju je preostalo optimiranje sustava za odzračivanje. Na temelju dobivenih rezultata predložila su se dvije preinake postojećeg kalupa. Prva preinaka obuhvaća izradu kalupnih umetaka u nepomičnoj kalupnoj ploči. Kalupne umetke je potrebno izraditi postupkom elektroerozije što je nešto izazovnije u odnosu na prethodne dorade. Druga preinaka obuhvaća odzračivanje pomoću izbacivala što zahtjeva doradu izbacivala koja se sastoji od tangencijalnog brušenja.

U sklopu ovog rada računalna simulacija je korištena za otkrivanje postojećih problema na izvedenom kalupu, a pored toga je korištena i za pronalazak rješenja kako bi se ranije opisani problemi što učinkovitije mogli otkloniti. Na temelju dobivenih rezultata računalne simulacije kroz nekoliko faza definirale su se određene dorade postojećeg kalupa koje nisu toliko zahtjevne, a uvelike mogu poboljšati postojeći proces prerade.

**LITERATURA**

- [1] Godec, D. Autorizirana predavanja iz kolegija Napredni proizvodni postupci. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2024.
- [2] Rosato, V. D., Rosato, V. D., Rosato, G. M. Injection molding handbook, Third edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher; 2000.
- [3] A.C.E. Mold, <https://www.ace-mold.com/what-products-are-made-from-injection-molding/>, pristupljeno: 27.7.2024.
- [4] Šercer, M. Smjerovi razvoja ubrizgavalica za injekcijsko prešanje plastomera. Zagreb: Polimeri, 24 (2-4), 74-78., 2003.
- [5] Godec, D. Autorizirana predavanja iz kolegija Projektiranje alata i naprava. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022.
- [6] Regloplas, <https://www.regloplas.com/en/technologies/mould-temperature-control/temperature-control-in-plastic-injection-moulds>, pristupljeno 28.7.2024.
- [7] Arburg, <https://www.arburg.com/en/tw/smart-production/automation/>, pristupljeno 28.7.2024.
- [8] Kazmer D. Injection Mold Design Engineering, 2nd edition. Munich: Hanser; 2007.
- [9] Mesburger, <https://www.meusburger.com/EN/US/meus2016/injection-moulding/fh-hot-runner-mould>, pristupljeno: 7.8.2024.
- [10] Mesburger, <https://ecom.meusburger.com/e/index.asp?id=135&rnd=>, pristupljeno: 7.8.2024.
- [11] Mesburger, <https://www.meusburger.com/EN/IN/products/hot-runner-systems/customised-hot-runner-systems>, pristupljeno: 9.8.2024.
- [12] Bryce, D. M. Plastic Injection Molding, Volume I: Fundamentals od Injection Molding series. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers; 1996.
- [13] Johannaber, F. Injection Molding Machines. München: Carl Hanser Verlag; 1994.
- [14] Čatić, I. Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera. Zagreb: Društvo plastičara i gumaraca; 1985.
- [15] Godec D. Računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja. Zagreb: Polimeri, 27 (1), 13-19., 2006.

- [16] Moldex, <https://support.moldex3d.com/2024/en/usermanual.html>, pristupljeno 2.9.2024.
- [17] Sorić J. Uvod u numeričke metode u strojarstvu. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009.
- [18] Godec D, Breški T. Autorizirane vježbe iz kolegija Napredni proizvodni postupci: Numeričke simulacije procesa injekcijskog prešanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.

**PRILOZI**

- I. BASF Processing Data Sheet Ultramid B3EG6

## I. BASF Processing Data Sheet Ultramid B3G6

Processing Data Sheet **Ultramid®****B3EG6**

03/2024

**PA6-GF30****BASF**  
We create chemistry**Product description**

A glass fibre reinforced injection moulding grade for industrial articles and electrical insulating parts.

**Physical form and storage**

The product is supplied in the form of granules with a bulk density of approx. 0.7 g/cm<sup>3</sup>. Standard packs are bag and bulk container (octagonal IBC=intermediate bulk container made from corrugated board with a liner bag). Other packaging materials and shipping in road or rail silo wagons are possible by agreement. The containers should only be opened immediately before processing or drying. To ensure that the delivered product absorbs as little moisture as possible, the containers should be stored in dry rooms and always carefully closed again after partial quantities have been withdrawn. In principle, the product can be stored for a long period of time. Containers stored in cold rooms should be equalized to ambient temperature before opening in order to avoid condensation on the granules. Regardless of the storage conditions, the product should be pre-dried according to our recommendations and the machine should preferably be loaded using a closed conveyor system.

**Product safety**

In case processing is done under conditions as recommended (cf. processing data sheet) melts are thermally stable and do not generate hazards by molecular degradation or the evolution of gases and vapors. Like all thermoplastic polymers the product decomposes on exposure to excessive thermal load, e.g. when it is overheated or as a result of cleaning by burning off. Further information is available from the safety data sheet.

**Note**

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

In order to check the availability of products please contact us or our sales agency.

BASF SE  
67056 Ludwigshafen, Germany

**Ultramid® B3EG6****Processing Data Sheet**

	Test method	Unit	Values
<b>Properties</b>			
Polymer abbreviation	-	-	<b>PA6-GF30</b>
Density	ISO 1183	kg/m <sup>3</sup>	<b>1360</b>
Melt volume rate MVR 275 °C/5 kg	ISO 1133	cm <sup>3</sup> /10min	<b>35</b>
<b>Drying</b>			
Moisture, recommended <sup>1)</sup>	-	%	<b>0.03 - 0.06</b>
Dryer temperature <sup>2)</sup>	-	°C	<b>80</b>
Drying time <sup>3)</sup>	-	h	<b>4</b>
Moisture, max.	-	%	<b>0.15</b>
<b>Injection molding</b>			
Melt temperature range	-	°C	<b>270 - 290</b>
Melt temperature, optimal	-	°C	<b>280</b>
Mold temperature range	-	°C	<b>80 - 90</b>
Mold temperature, optimal	-	°C	<b>80</b>
Residence time, max.	-	min	<b>10</b>
<b>Machine Settings</b>			
Temperature hopper throat	-	°C	<b>80</b>
Cylinder temperature 1 (feed zone)	-	°C	<b>260</b>
Cylinder temperature 2 (compression)	-	°C	<b>270</b>
Cylinder temperature 3 (metering-zone, in front of the screw)	-	°C	<b>280</b>
Cylinder temperature 4 (nozzle)	-	°C	<b>280</b>
Peripheral screw speed	-	m/s	<b>≤ 0.3</b>
<b>Shrinkage</b>			
Molding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	<b>0.25</b>
Molding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	<b>0.70</b>
Processing shrinkage, constrained, longitudinal (TM = 280 °C, TW = 80 °C) <sup>4)</sup>	-	%	<b>0.3</b>

## Footnotes

1) Excessive drying of the granules may lead to an increase of melt viscosity during processing.

2) Dry air dryer; drying time is dependent on the initial moisture content of the granules, drying temperature and the dew point of the dried air.

3) In case of improper storage (e.g. open packages) drying time may have to be extended.

4) Model housing with central sprue, measures of the base: 107 x 47 x 1.5 mm.

BASF SE  
67056 Ludwigshafen, Germany