

# Temperiranje kalupa za injekcijsko prešanje polimera

---

Švigir, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2009

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:235222>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Hrvoje Švigir**

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

**Prof. dr. sc. Mladen Šercer**

**Doc. dr. sc. Damir Godec**

**Hrvoje Švigir**

Zagreb, 2009.

## **IZJAVA**

Diplomski rad izradio sam potpuno samostalno uz pomoć dostupne literature i konzultacije te svesrdnu pomoć mentora doc. dr. sc. Damira Godeca, kojemu se ovim putem i zahvaljujem na pruženoj stručnoj pomoći.

Zahvaljujem se i cijeloj Katedri za preradbu polimera na pruženoj pomoći i na strpljenju.

*Hrvoje Švigir*

## ZAHVALA

*Puno hvala mojim roditeljima, sestri, te supruzi na velikom strpljenju, odricanju i potpori koju su mi pružili tijekom mog školovanja i studiranja.*

*Posebno bih se zahvalilo svim prijateljima i kolegama koji su na bilo koji način pridonijeli mom uspješnom završetku studija.*

## SAŽETAK RADA

Tema ovog diplomskog rada je “Temperiranje kalupa za injekcijsko prešanje polimera”. U sklopu rada bilo je potrebno detaljno razraditi osnove temperiranja kalupa tijekom injekcijskog prešanja polimera u teoriji i to primijeniti na praksu.

U prvom dijelu rada opisan je teorijski dio injekcijskog prešanja, izmjena topline u kalupu, načini i karakteristike izmjene. Zatim su opisani postupci temperiranja. Tu se opisuju načini rada temperirala, vrste temperirala te vrste medija za temperiranje.

Drugi dio temelji se na praktičnom dijelu odnosno na temperiranju kalupa u praksi. Za potrebe rada korišteno je temperiralo tvrtke PIOVAN i ubrizgavalica tvrtke ENGEL. Korišteni polimerni materijal je polistiren PS BX 3740. Kao medij za temperiranje korištena je voda. Računalnom simulacijom dobio se prikaz temperature stijenke kalupne šupljine u ovisnosti o temperaturi medija za temperiranje i dopunskom vremenu hlađenja.

Na poslijetku analizom pokusa rada dobio se zaključak o utjecajima temperiranja i dopunskog vremena hlađenja na temperaturu stijenke kalupne šupljine i na svojstva otpreska.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. INJEKCIJSKO PREŠANJE</b> .....	2
<b>2.1. Postupci injekcijskog prešanja</b> .....	2
<b>2.2. Elementi sustava za injekcijsko prešanje</b> .....	3
<b>2.2.1. Ubrizgavalica</b> .....	4
<b>2.2.2. Kalup</b> .....	4
<b>2.2.3. Uređaj za temperiranje- temperiralo</b> .....	5
<b>2.3. Vrijeme hlađenja plastomernoga otpreska</b> .....	5
<b>2.3.1. Vrijeme ubrizgavanja</b> .....	6
<b>2.3.2. Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka</b> .....	6
<b>2.3.3. Vrijeme plastificiranja</b> .....	6
<b>2.3.4. Dopunsko vrijeme hlađenja</b> .....	7
<b>2.4. Područje upotrebe injekcijskih prešanih proizvoda</b> .....	7
<b>3. TEMPERATURNO POLJE KALUPA</b> .....	8
<b>3.1. Temperature u kalupu</b> .....	8
<b>3.2. Zakonitosti izmjene topline u kalupima</b> .....	10
<b>3.3. Izmjena topline u procesima preradbe polimera</b> .....	12
<b>3.3.1. Provođenje topline</b> .....	13
<b>3.3.2. Konvektivni prijelaz topline</b> .....	14
<b>3.3.3. Izmjena topline zračenjem</b> .....	15
<b>3.4. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na svojstva         otpreska</b> .....	16
<b>3.5. Utjecaj materijala stijenke kalupne šupljine na izmjenu topline         u kalupu</b> .....	17
<b>3.6. Stohastičnost temperature stijenke kalupne šupljine</b> .....	19

3.7. Reguliranje temperaturnog polja u kalupu.....	22
3.7.1. Reguliranje ulazne temperature medija za temperiranje.....	22
3.7.2. Reguliranje temperature stijenke kalupne šupljine.....	22
3.7.3. Kaskadno reguliranje.....	23
3.8. Tijek proračuna izmjene topline u kalupima.....	23
3.8.1. Opis „Liste otpreska“.....	25
3.8.2. Ulazni podaci za proračun izmjene topline u kalupima.....	25
3.8.3. Toplinska bilanca kod izmjene topline.....	26
3.8.3.1. Proračun topline izmijenjene s okolinom.....	26
3.8.3.2. Toplina koju dovodi plastomer.....	27
3.8.3.3. Toplina izmijenjena medijem za temperiranje.....	29
<b>4. SUSTAVI ZA TEMPERIRANJE.....</b>	<b>30</b>
4.1. Mediji i oprema za temperiranje.....	30
4.1.1. Mediji za temperiranje.....	30
4.1.1.1. Temperiranje vodom iz vodovodne mreže.....	31
4.1.1.2 Temperiranje uljem.....	32
4.2. Uređaji za temperiranje.....	32
4.2.1. Temperirala kalupa.....	32
4.2.2. Vrste temperirala kalupa.....	33
4.2.3. Rad temperirala kalupa.....	35
<b>5. EKSPERIMENTALNI DIO.....</b>	<b>37</b>
5.1. Ubrizgavalica.....	38
5.2. Kalup za injekcijsko prešanje.....	38
5.3. Temperiralo.....	40
5.4. Mjerna stanica.....	41
5.5. Osjetilo temperature.....	41
5.6. Program za obradbu podataka.....	41
5.7. Centralno-kompozitni plan pokusa.....	42



---

---

5.8. Oprema za mjerenje.....	43
5.9. Provedba i rezultati pokusa.....	44
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>54</b>
<b>7. LITERATURA.....</b>	<b>56</b>
<b>8. PRILOZI.....</b>	<b>57</b>

## POPIS SLIKA

- Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz ubrizgavalice i kalupa
- Slika 2.2. Faze injekcijskog prešanja plastomera
- Slika 3.1. Presjek nepomične kalupne ploče s ucrtanim temperaturnim poljem
- Slika 3.2. Tijek promjene temperatura stijenke kalupne šupljine
- Slika 3.3. Toplinska bilanca kalupa za injekcijsko prešanje plastomera
- Slika 3.4. Toplinska bilanca jediničnog elementa mase
- Slika 3.5. Kakvoća otpreska u ovisnosti o uvjetima preradbe
- Slika 3.6. Povezanost utjecajnih čimbenika i kriterija izbora materijala za izradbu kalupne šupljine
- Slika 3.7. Vjerojatnost postizanja temperature stijenke kalupne šupljine
- Slika 3.8. Dubina prodiranja topline
- Slika 3.9. Kalup kao termodinamički sustav
- Slika 3.10. Dijagram „specifična entalpija – temperatura“
- Slika 4.1. Uređaj za temperiranje-temperiralo
- Slika 4.2. Temperiralo kalupa s otvorenim sustavom i posrednim hlađenjem medija
- Slika 4.3. Temperiralo kalupa sa zatvorenim sustavom i posrednim hlađenjem optočnog medija
- Slika 4.4. Radna shema temperirala kalupa
- Slika 5.1. Ubrizgavalica
- Slika 5.2. Kalup za injekcijsko prešanje
- Slika 5.3. Temperiralo
- Slika 5.4. Mjerna stanica
- Slika 5.5. Centralno kompozitni plan pokusa za tri faktora
- Slika 5.6. Digitalna pomična mjerka
- Slika 5.7. Digitalna vaga
- Slika 5.8. Tijek promjene temperature stijenke kalupne šupljine
- Slika 5.9. Dijagram temperatura stijenke kalupne šupljine i temperatura medija na ulazi izlazu iz kalupa za svih 13 stanja pokusa
- Slika 8.1. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje1*

- Slika 8.2. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 2*
- Slika 8.3. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 3*
- Slika 8.4. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 4*
- Slika 8.5. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 5*
- Slika 8.6. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 6*
- Slika 8.7. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 7*
- Slika 8.8. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 8*
- Slika 8.9. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 9*
- Slika 8.10. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 10*
- Slika 8.11. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 11*
- Slika 8.12. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 12*
- Slika 8.13. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 13*

## POPIS TABLICA

- Tablica 2.1. Područje primjene injekcijskih prešanih proizvoda
- Tablica 3.1. Tijek proračuna izmjene topline
- Tablica 3.2. Vrijednosti koeficijenata za izračunavanje razlike specifične entalpije
- Tablica 5.1. Karakteristike ubrizgavalice ENGEL VC 330/80
- Tablica 5.2. Svojstva čelika 40CrMnMoS86
- Tablica 5.3. Temperiralo Piovan TPH6
- Tablica 5.4. Vrijednosti temperature stijenke kalupne šupljine
- Tablica 5.5. Vrijednosti temperatura  $T_D$  i  $T_{OK}$
- Tablica 5.6. Rezultati analize varijance
- Tablica 5.7. Statistički podaci
- Tablica 8.1. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 1*
- Tablica 8.2. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 2*
- Tablica 8.3. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 3*
- Tablica 8.4. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 4*
- Tablica 8.5. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 5*
- Tablica 8.6. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 6*
- Tablica 8.7. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 7*
- Tablica 8.8. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 8*
- Tablica 8.9. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 9*
- Tablica 8.10. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 10*
- Tablica 8.11. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 11*
- Tablica 8.12. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 12*
- Tablica 8.13. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 13*

## 1. UVOD

Injekcijsko prešanje je najvažniji, a prema dostignutoj razini i najusavršeniji ciklički postupak preradbe polimera. Na stvaranje otpreska i na njegova konačna svojstva utječu brojni parametri injekcijskog prešanja.

Jedan od parametara injekcijskog prešanja je temperiranje kalupa. Najjednostavniji i najzastupljeniji način temperiranja jest vodom iz vodovodne mreže. Usprkos jednostavnosti upotrebe takav način temperiranja opterećen je brojnim nedostacima. Voda kao medij moguća je samo kada se kalupu toplina odvodi. Stoga su razvijeni uređaji za temperiranje kalupa, tzv. temperirala. Temperirala reguliraju temperaturu medija. Svojim optočnim zagrijavanjem ili hlađenjem tekućine održavaju temperaturno polje kalupa stalnim. Regulirane veličine temperirala su temperatura medija, brzina i tlak medija za temperiranje.

Temperiranjem uz pomoć temperirala moguće je postići povišenje proizvodnosti skraćenjem ciklusa injekcijskog prešanja, te povišenja kvalitete otpreska.

U radu je promatran utjecaj temperiranja i dopunskog vremena hlađenja na svojstva otpreska. Od reguliranih veličina temperiranja mijenjala se temperatura medija dok su protok i tlak bili konstantni.

## **2. INJEKCIJSKO PREŠANJE [1,2]**

Injekcijsko prešanje plastomera razvilo se po uzoru na tlačno lijevanje metala. Klipna ubrizgavalica braće J. W. i I. Hyatta iz 1872. smatra se pretečom suvremenih strojeva za taj postupak. Međutim, zbog nedostatka pravoga materijala za injekcijsko prešanje, došlo je do zastoja u razvoju proizvoda.

Suvremeno injekcijsko prešanje započinje oko 1920. patentom Nijemca A. Eichengrūna, a komercijalno upotrebljiv stroj konstruirao je H. Buchholz. Bila je to klipna ubrizgavalica. Godine 1956. njemački stručnjaci iz tvrtke Ankerwerk uspijevaju proizvesti prvu jednopusnu ubrizgavalicu za plastomere. To je danas prevladavajuće načelo injekcijskog prešanja.

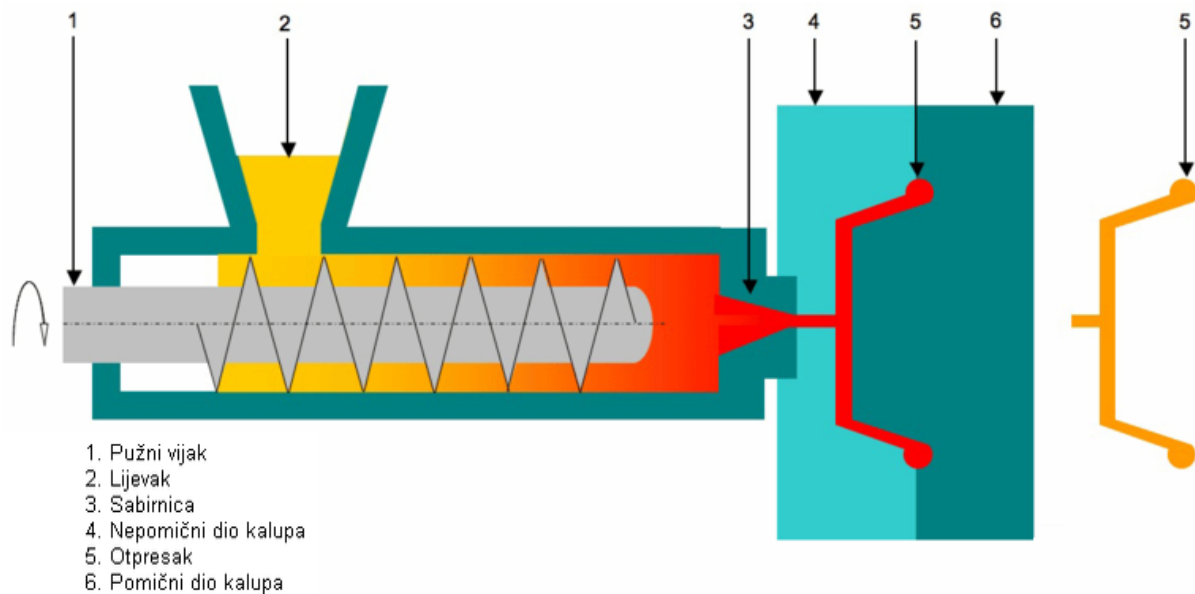
### **2.1. Postupci injekcijskog prešanja [2]**

Injekcijsko prešanje je postupak ubrizgavanja plastomerne taljevine u temperiranu kalupnu šuplinu i njezino skrućivanje u izradak. Injekcijskom se prešanjem prerađuju svi polimeri: duromeri, elastomeri i elastoplastomeri.

Osnovni koraci u procesu injekcijskog prešanja:

1. zatvaranje kalupa
2. ubrizgavanje
3. zadržavanje taljevine u kalupu
4. hlađenje
5. otvaranje kalupa
6. izbacivanje otpreska.

Na slici 2.1 prikazana je pojednostavljena shema ubrizgavalice i kalupa.



Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz ubrizgavalice i kalupa [3]

Polimerni materijal ulazi kroz lijevak u cilindar za taljenje, koji se zagrijava uz pomoć grijača, gdje ga zahvaća rotirajući pužni vijak. Rastaljeni polimer potiskuje se k vrhu pužnog vijka. Nakon što se potisnulo dovoljno polimerne taljevine, pužni se vijak pomiče prema naprijed, pri čemu počinje ubrizgavanje kroz mlaznicu u kalup. Taljevina se drži pod tlakom ubrizgavanja, a istodobno se i hladi. Nakon toga kalup se otvara, a proizvod izbacuje.

## 2.2. Elementi sustava za injekcijsko prešanje [2]

Sustav za injekcijsko prešanje čine:

1. ubrizgavalica
2. kalup
3. temperiralo

### **2.2.1. Ubrizgavalica**

Ubrizgavalica je element sustava, što znači da se njome, unutar njezinih zadanih izmjera i kapaciteta, može izrađivati beskonačan broj različitih otpresaka.

Ubrizgavalica mora ostvariti više funkcija. To su:

1. priprema taljevine za ubrizgavanje
2. ubrizgavanje taljevine u kalup
3. otvaranje i zatvaranje kalupa
4. vađenje otpreska.

Svaka ubrizgavalica sastoji se od četiri jedinice. To su:

1. jedinica za pripremu taljevine i ubrizgavanje
2. jedinica za otvaranje i zatvaranje kalupa
3. pogonska jedinica
4. jedinica za vođenje procesa.

### **2.2.2. Kalup**

Kalup za razliku od ubrizgavalice, ne može se smatrati univerzalnim primjenjivim elementom sustava za injekcijsko prešanje. Kalup ima točnu namjenu i može u pravilu poslužiti samo za pravljenje jedne vrste otpreska. Kalup mora sniženjem temperature taljevine dati oblik ubrizganom plastomeru i omogućiti da se dovoljno ohlađeni otpresak izvadi iz kalupne šupljine.

Osnovni zadatci kalupa su:

1. prihvaćanje taljevine pripremljene u ubrizgavalici
2. očvršćivanje taljevine u željeni oblik otpreska
3. ciklički rad sustava za injekcijsko prešanje.



### 2.2.3. Uređaj za temperiranje- temperiralo

Održavanje pravilnog toplinskog režima linije za injekcijsko prešanje plastomera zahtijeva postizanje potrebnog temperaturnog polja u kalupu, što se ostvaruje temperiranjem. Pod pojmom temperiranje podrazumijeva se postizanje propisane temperature, bez obzira na to dovodi li se pritom toplina ili odvodi.

Propisanu temperaturu stijenke kalupne šupljine moguće je postići vodom iz vodovodne mreže ili uređajima, temperiralima, pri čemu u zatvorenom krugu kruži medij za temperiranje.

## 2.3. Vrijeme hlađenja plastomernoga otpreska [4]

Vrijeme hlađenja otpreska definira se kao vrijeme koje počinje naredbom ubrizgavanja, a završava naredbom otvaranja kalupa. To je najdulje vrijeme u ciklusu. Na slici 2.2 prikazan je ciklus injekcijskog prešanja.



Slika 2.2. Faze injekcijskog prešanja plastomera [4]

Iz slike 2.2 vidljivo je da se tokom definiranog vremena obavljaju ove operacije: ubrizgavanje, djelovanje naknadnog tlaka ubrizgavalice, plastificiranje i vraćanje mlaznice u početni položaj. Prikazane operacije biti će izvršene prije negoli se otpresak dovoljno ohladi, da pri potiskivanju iz kalupne šupljine ne dođe do njegove deformacije.

Vrijeme potrebno za hlađenje otpresaka proizvedenih injekcijskim prešanjem mora zadovoljiti ovu jednadžbu:

$$t_h = t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr} + t_d \quad (2.1)$$

gdje su:

- vrijeme ubrizgavanja
- vrijeme djelovanja naknadnog tlaka
- vrijeme plastificiranja
- vrijeme vraćanja mlaznice u početni položaj
- dopunsko vrijeme hlađenja.

### **2.3.1. Vrijeme ubrizgavanja**

Vrijeme ubrizgavanja je u pravilu vrlo kratko vrijeme, ali je iznimno bitno za kvalitetu otpreska. Proračunava se jednom od simulacijskih metoda s pomoću računala. Vrijeme ubrizgavanja čine: vrijeme potrebno da se kalupna šupljina ispuni plastomernom taljevinom, vrijeme stlačivanja i vrijeme održavanja maksimalnog tlaka u kalupnoj šupljini.

### **2.3.2. Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka**

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka svodi se na određivanje vremena hlađenja presjeka ušća. Za proračun toga vremena vrijede iste zakonitosti kao za određivanje potrebnog vremena hlađenja otpreska.

### **2.3.3. Vrijeme plastificiranja**

Vrijeme plastificiranja kod pužnih ubrizgavalica određuje se iz izraza:

$$t_{ps} = \frac{mg}{qP} \quad (2.2)$$

gdje su:

- masa grozda
- kapacitet plastificiranja.

Kapacitet plastificiranja je ona količina materijala koja se dobavi sabirnici tijekom vrtnje pužnog vijka u jednom ciklusu. Plastificirana količina plastomera u ciklusu ovisi, među ostalim, o frekvenciji vrtnje pužnog vijka i njegovu putu, učinku ubrizgavalice i uspornom tlaku.

#### 2.3.4. Dopunsko vrijeme hlađenja

Dopunsko vrijeme hlađenja računa se iz jednadžbe:

$$t_d = t_h - (t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr}) \quad (2.3)$$

To je vrijeme u pravilu veće od nule, a valja težiti da bude što kraće.

#### 2.4. Područje primjene injekcijskih prešanih proizvoda

Najvažnije područje primjene proizvoda injekcijskim prešanjem je industrija ambalaže u kojem završi otprilike četvrtina prerađenih plastomera. Znatna količina konstrukcijskih plastomera preradi se injekcijskim prešanjem za potrebe elektroničke industrije te u automobilske dijelove. U tablici 2.1 prikazana su područja primjene injekcijskih prešanih proizvoda.

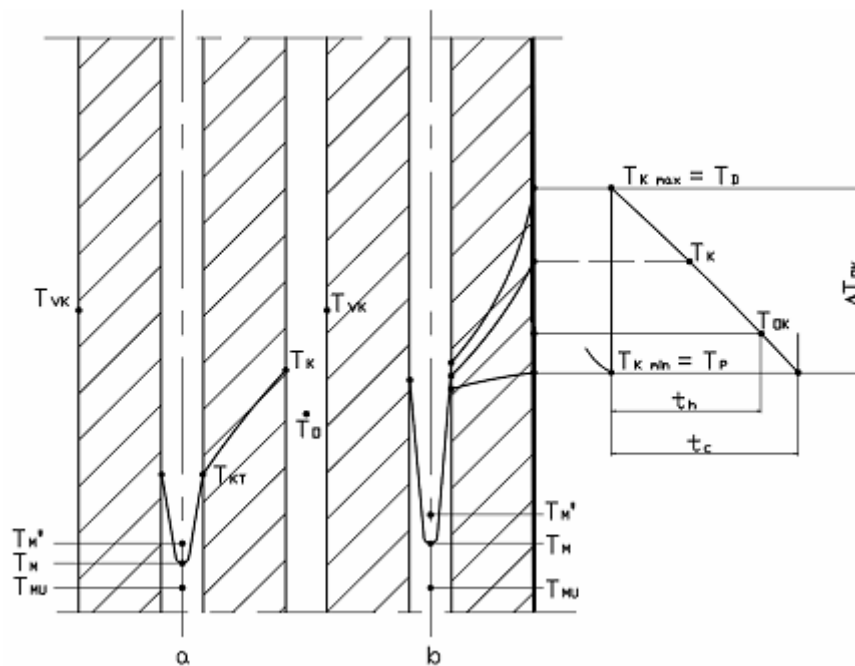
Tablica 2.1. Područje primjene injekcijskih prešanih proizvoda [5]

Područje primjena	Udio %
Automobili	15,4
Ambalaža	25,4
Igračke	2,9
Građevinarstvo	3,3
Namještaj	6,2
Kućanske potrepštine	10,3
Telekomunikacijski i elektronički uređaji	15
Ostalo	21,2

### 3. TEMPERATURNO POLJE KALUPA

#### 3.1. Temperature u kalupu [4]

Na slici 3.1 prikazan je presjek nepomične kalupne ploče s ucrtanim temperaturnim poljem. Na podebljanoj plohi dolazi nepomična kalupna ploča u dodir s taljevinom.



a) temperirana ploča bez dodira  
s taljevinom

b) temperaturno polje tijekom proizvodnje  
pri toplinski ravnotežnom stanju

Slika 3.1. Presjek nepomične kalupne ploče s ucrtanim temperaturnim poljem [4]

Kad se kalup priključi na uređaj za temperiranje, u kanale za temperiranje ustrujava medij za temperiranje temperature medija  $T_{MU}$ , a napušta ih s izlaznom temperaturom  $T_{MI}$ . Temperatura medija za temperiranje  $T_M$  jednaka je aritmetičkoj sredini ulazne i izlazne temperature:

$$T_M = \frac{T_{MI} + T_{MU}}{2} \quad (3.1)$$

Stijenke kalupa u dodiru s okolinom temperature  $T_O$  imaju temperaturu  $T_{VK}$ . Kad se započne s ubrizgavanjem i postigne toplinski ravnotežno stanje, na površini

nepomične kalupne ploče u dodiru s taljevinom dolazi do značajnih promjena. U trenutku koji neposredno prethodi ubrizgavanju taljevine temperatura na površini je najniža. To je početna temperatura  $T_P$ . Maksimalna temperatura u ciklusu nazvana je dodirnom temperaturom  $T_D$ , a izračunava se jednadžbom:

$$T_{Kmax} = T_D = \frac{T_P b_K + T_T b_P}{b_K + b_P} \quad (3.2)$$

gdje su:

$T_P$  - početna temperatura kalupne šupljine

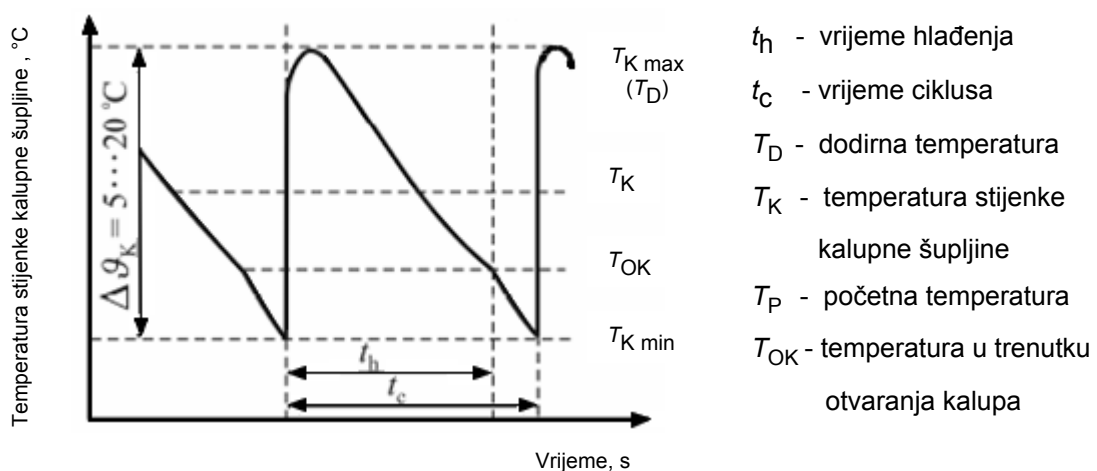
$b_K$  - toplinska prodornost kalupne šupljine

$b_P$  - toplinska prodornost polimera.

Temperatura stijenke kalupne šupljine  $T_K$  računaska je vrijednost i predstavlja aritmetičku sredinu između temperature stijenke kalupne šupljine u trenutku otvaranja kalupa i dodirne temperature između taljevine i stijenke kalupne šupljine pri njezinu popunjavanju:

$$T_K = \frac{T_D + T_{OK}}{2} \quad (3.3)$$

Iz analize temperaturnog polja proizlazi za praksu izuzetno važan zaključak. Ne može se govoriti o jedinstvenoj temperaturi kalupa, kako se u pojedinim literaturama navodi. U kalupu postoji temperaturno polje koje se ciklički mijenja (slika 3.2) temperatura stijenke kalupne šupljine, koja je odlučujući čimbenik uspješne izmjene topline, jest računaska vrijednost koja se mora postići u ciklusu na određeni način.



Slika 3.2. Tijek promjene temperatura stijenke kalupne šupljine [5]

### 3.2. Zakonitosti izmjene topline u kalupima [4]

Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera obuhvaćena je bilancom izmjene topline koja glasi: "Suma izmijenjenih toplina u kalupu jednaka je nuli".

Pravilan tijek izmjene topline u kalupu od velike je važnosti kako za kakvoću tako i za proizvodnost otpreska.

Tijekom procesa injekcijskog prešanja, ubrizgavanjem plastomerne taline u kalupnu šupljinu, dovodi se talinom određena količina topline, koju djelomično preuzme kalup tijekom hlađenja otpreska. Drugi dio topline predaje otpresak okolini, kad se hladi od temperature s kojom je napustio kalupnu šupljinu do temperature okolišnjeg zraka. Taj dio predane topline nije značajan za daljnja razmatranja. Važno je uočiti da taljevina uvijek odaje toplinu i da će ta toplina po konvenciji uvijek biti pozitivnog predznaka.

Ako se temperature na površini kalupa i okoline razlikuju, postoji izmjena topline između kalupa i okoline. Konačno, za postizanje propisanog temperaturnog područja potrebno je kalup zagrijavati ili hladiti. To se najčešće radi medijem za temperiranje, iako se kalup može zagrijavati i električnim grijalima, a hladiti rashladnom tekućinom.

Izmijenjene topline svode se na jedinicu vremena i jednadžba izmjene topline glasi:

$$\Phi_P + \Phi_O + \Phi_M = 0 \quad (3.4)$$

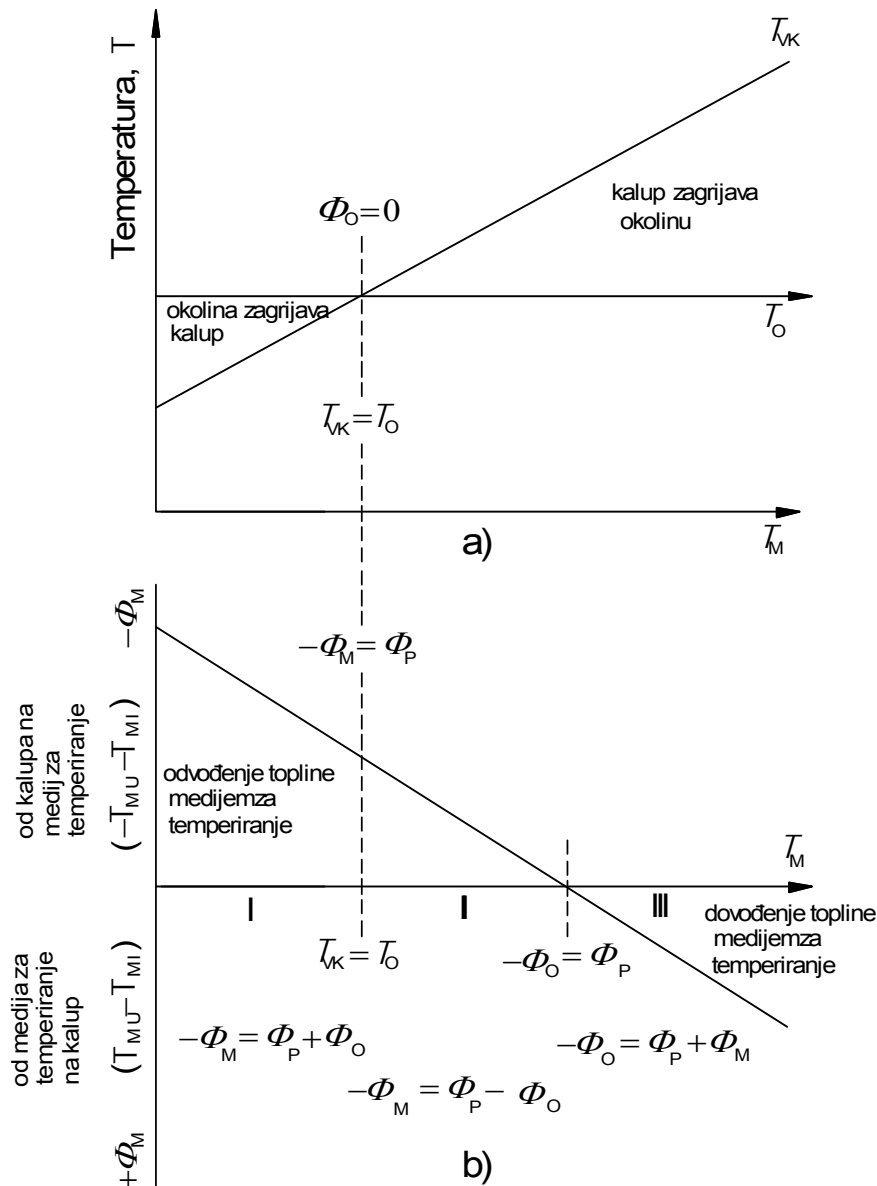
gdje su:

$\Phi_P$  - toplina koju plastomerna taljevina preda kalupu u jedinici vremena

$\Phi_O$  - toplina izmijenjena s okolinom u jedinici vremena

$\Phi_M$  - toplina izmijenjena medijem za temperiranjem u jedinici vremena.

Kako plastomer uvijek dovodi toplinu kalupu, moguće je razlikovati pet slučajeva izmjene topline tijekom procesa injekcijskog prešanja; proizlaze iz jednadžbe, a prikazani su slikom 3.3.



a) I - okolina zagrijava kalup

II - okolina hladi kalup

b) grafički prikaz jednadžbe izmjene topline u pojedinim područjima

$\Phi_P$  - toplina dovedena plastomerom,  $\Phi_M$  - toplina izmijenjena medijem za temperiranje,  $\Phi_O$  - toplina izmijenjena s okolinom,  $T_O$  - temperatura okoline,  $T_{VK}$  - temperatura stijenke kalupa u dodiru s okolinom,  $T_M$  - temperatura medija za temperiranje,  $T_{MU}$  - ulazna temperatura medija za temperiranje,  $T_{MI}$  - izlazna temperatura medija za temperiranje

Slika 3.3. Toplinska bilanca kalupa za injekcijsko prešanje plastomera [5]

U području I medij za temperiranje mora odvesti toplinu koju mu predaju plastomer i okolina. Kako u području II dio topline plastomera kalup predaje okolini, medij za temperiranje odvodi samo dio topline. U području III gubici topline prema okolini toliki su da kalup valja vrlo intenzivno zagrijavati kako bi se nadoknadili gubici topline i održalo toplinski ravnotežno stanje.

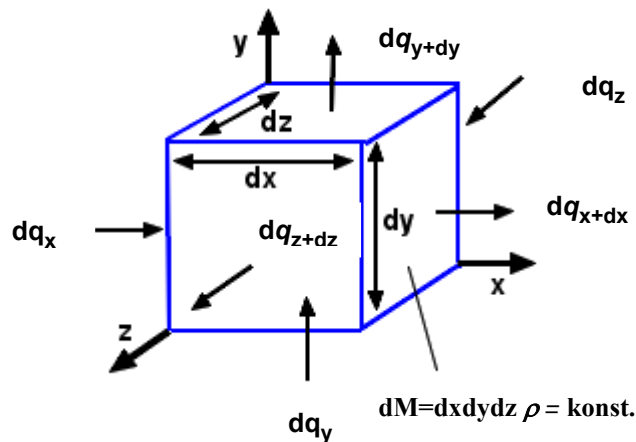
### **3.3. Izmjena topline u procesima preradbe polimera [4]**

Pod pojmom izmjene topline tijekom preradbe polimera razlikuju se procesi dovođenja i odvođenja topline. Da bi se polimerni materijal doveo iz čvrstog stanja u elastoviskozno stanje, stanje taljevine, potrebno je dovesti određenu količinu topline. Potrebna energija zagrijavanja polimernih materijala i izradaka dovodi se provođenjem topline i to: konvekcijom, zračenjem, posebno IC-zračenjem, dielektričnim zagrijavanjem, pretvaranjem mehaničke energije u toplinu zbog rada trenja, stlačivosti polimera ili prisilnih vibracija te egzotermnom reakcijom pri umrežavanju duromera. Cjelokupna potrebna toplina dovodi se jednim procesom ili kombinacijom više njih.

Tijekom injekcijskog prešanja toplinu koju posjeduje polimerni proizvod može se odvoditi sljedećim procesima ili njihovim kombinacijama: provođenjem topline, konvektivnim prijelazom i prijenosom, zračenjem te endotermnom kemijskom reakcijom (proces apsorpcije topline).



Za kvantitativno proučavanje promjene temperature potrebno je sastaviti energijsku bilancu (slika 3.4).



Slika 3.4. Toplinska bilanca jediničnog elementa mase [4]

Energijski procesi prikazani slikom mogu se predočiti i riječima:

suma dovedenih toplina – suma odvedenih toplina + toplina razvijena u elementu mase = vremenska promjena unutrašnje energije elementa mase

gdje su:

$$\text{dovedena toplina} = dq_x + dq_y + dq_z \quad (3.5)$$

$$\text{odvedena toplina} = dq_{x+dx} + dq_{y+dy} + dq_{z+dz} \quad (3.6)$$

$$\text{proizvedena toplina u elementu mase} \quad \Phi_U = dx dy dz \quad (3.7)$$

( $\Phi_U$  – moć unutrašnjeg izvora topline)

$$\text{vremenska promjena unutrašnje energije} = c \frac{\partial T}{\partial t} \rho dx dy dz \quad (3.8)$$

### 3.3.1. Provođenje topline

To je oblik izmjene topline koji nastaje kao rezultat kaotičnog gibanja molekula i atoma uvijek kad u materijalu postoji temperaturni gradijent.

Osnovna zadaća teorije provođenja topline jest utvrđivanje rasporeda temperatura unutar tijela. Raspodjela temperatura može biti ovisna o vremenu i neovisna.

Kada se govori o ovisnosti temperaturnog polja o vremenu, tada se takav proces naziva nestacionaran. Obrnut proces je stacionaran slučaj provođenja topline.

Osnovna jednadžba provođenja topline temelji se na Fourierovu zakonu:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right) = \Phi = -\lambda \nabla T \quad (3.9)$$

Ako u tijelu postoji unutrašnji izvor energije, kakav je slučaj pri injekcijskom prešanju umreživih polimera, Fourierova diferencijalna jednadžba ovisnosti temperature o vremenu glasi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \Phi_U \frac{1}{c_p \rho} \quad (3.10)$$

### 3.3.2. Konvektivni prijelaz topline

Konvektivni prijelaz topline javlja se pri injekcijskom prešanju u procesu izmjene topline u kalupu koji se temperira medijem za temperiranje, gdje sredstvo konvekcijom prima ili odaje toplinu, odnosno pri izmjeni topline s okolinom. Konvektivni prijelaz topline obilježen je prijelazom topline s površine čvrstog tijela provođenjem na čestice tekućine u neposrednom dodiru s površinom čvrstog tijela. Proces može biti i obrnut. Takav proces postoji pri zagrijavanju kalupa medijem za temperiranje. U tom slučaju tekućina predaje toplinu čvrstom tijelu.

Za taj oblik prijenosa topline vrijedi Newtonov zakon, koji za jediničnu površinu prijelaza glasi:

$$q_K = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{POVR.}} = \alpha_K (T_{ST} - T_M) \quad (3.11)$$

gdje su:

$q_K$  - gustoća toplinskog toka konvektivnog prijelaza topline

$\alpha_K$  - konvektivna toplina prijelaza

$T_{ST}$  - temperatura stijenke tijela na površini u dodiru s medijem

$T_M$  - srednja temperatura medija za temperiranje ( općenito medija za izmjenu topline)

### 3.3.3. Izmjena topline zračenjem

Izmjena topline zračenjem temelji se na Stefan-Bolzmanovu zakonu zračenja apsolutnog crnog tijela. Kako realna tijela imaju nižu emisijsku vrijednost, izmijenjena toplina kroz jediničnu površinu zračenje  $q_Z$  može se izračunati iz izraza:

$$q_Z = \alpha_Z (T_{ST} - T_O) \quad (3.12)$$

gdje je:

$T_O$  – temperatura okoline u koju zrači toplije tijelo.

Toplinska prijelaznost zračenjem jednaka je :

$$\alpha_Z = \frac{\varepsilon_Z C_Z [T_{ST}^4 - T_O^4]}{T_{ST} - T_O} \quad (3.13)$$

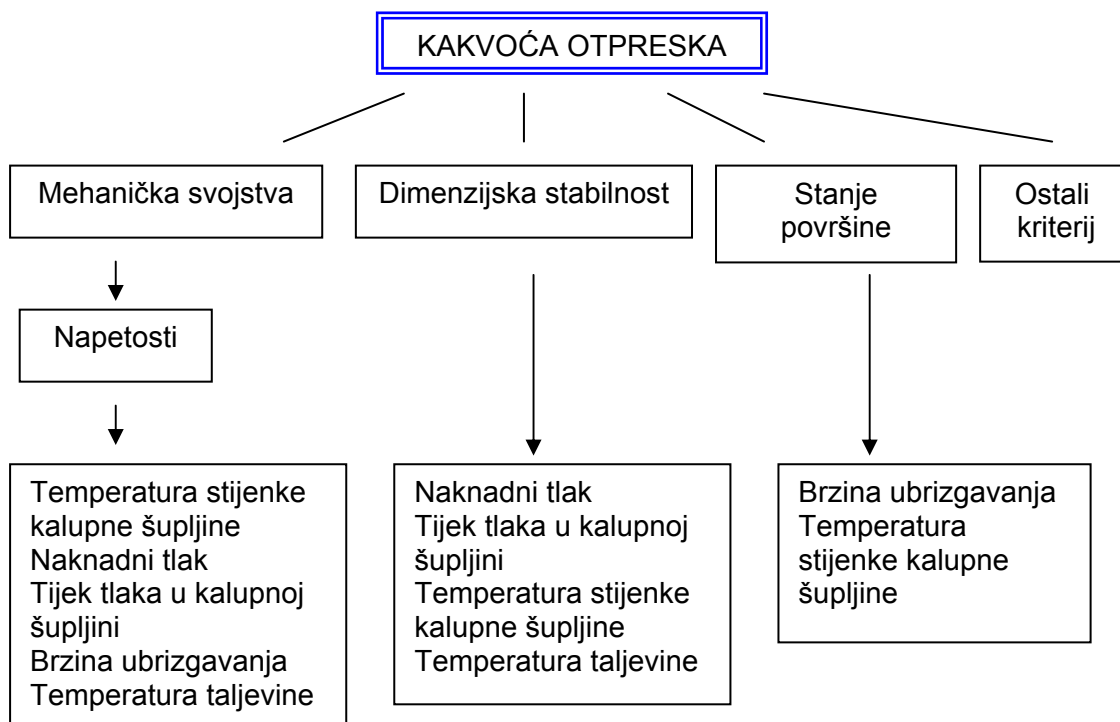
gdje su:

$\varepsilon_Z$  - sposobnost zračenja realnog tijela; daje omjer koliko je puta manje zračenje tijela s obzirom na zračenje crnog tijela

$C_Z$  – zračivost apsolutno crnog tijela;  $C_Z = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

### 3.4. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na svojstva otpreska [4,6]

Kvalitetu otpreska moguće je podijeliti u pet skupina: stanje površine otpreska, mehanička svojstva, unutrašnja svojstva, dimenzijska stabilnost, ostala svojstva. Povezanost pojedinih parametara procesa injekcijskog prešanja s kvalitetom otpreska pokazuje slika 3.5.



Slika 3.5. Kakvoća otpreska u ovisnosti o uvjetima preradbe [4]

Iz redoslijeda utjecaja pojedinih parametara preradbe na kakvoću, a znajući da temperatura stijenke kalupne šupljine posebno značajno djeluje na potrebno vrijeme hlađenja otpreska, nedvosmisleno proizlazi važnost toga parametra za proces injekcijskog prešanja plastomera. To je zbirno najutjecajniji faktor preradbe.

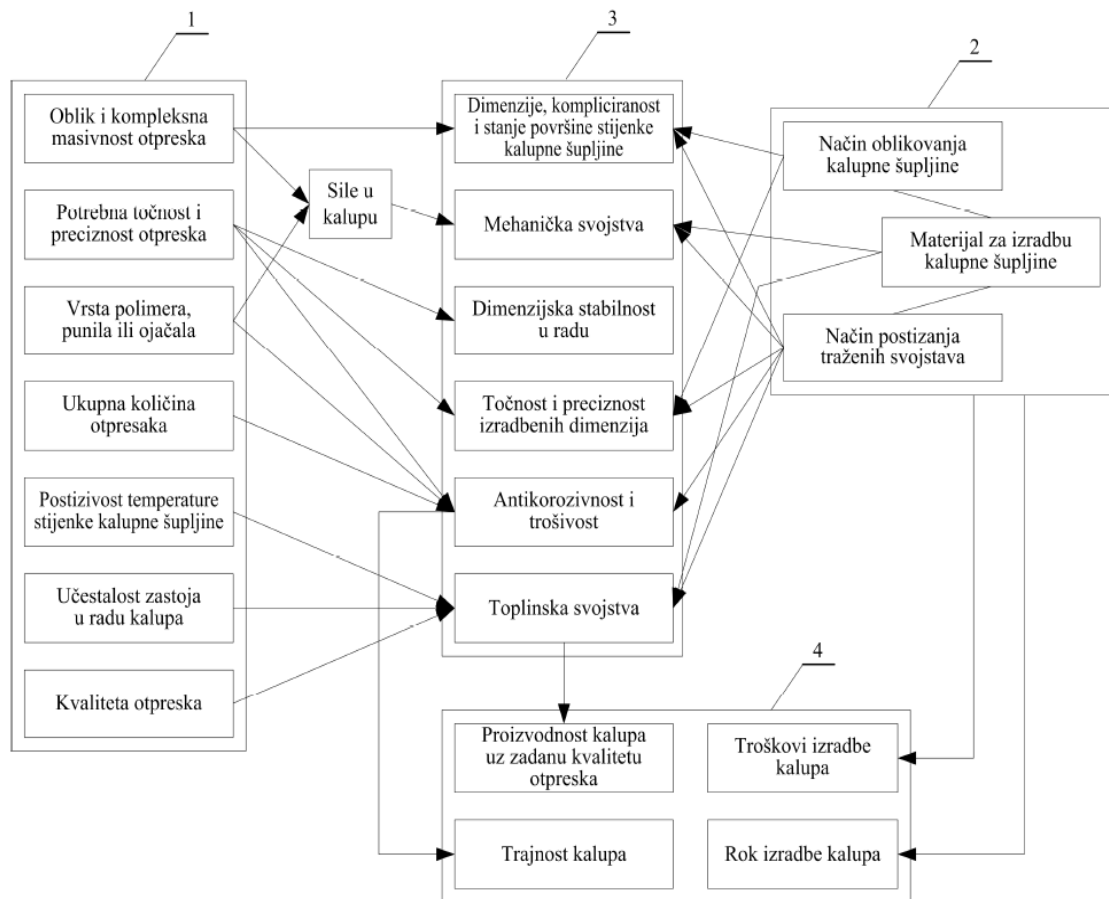
### 3.5. Utjecaj materijala stijenke kalupne šupljine na izmjenu topline u kalupu [4]

Iz dosadašnjeg proračuna uočava se činjenica, a to je da važnu ulogu ima i materijal od kojega je izrađena kalupna šupljina. Potrebno je poznavanje kako toplinskih tako i mehaničkih svojstava. Svaki materijal mora udovoljiti brojnim uvjetima, jer je izrada kalupa, a posebno dijelova kalupne šupljine, dugotrajna i zato skupa. Izbor materijala od kojeg će se izraditi konkretna kalupna šupljina vrlo je složen.

Zbirno se kriteriji izbora materijala mogu podijeliti u temeljne, koji vrijede općenito za kalupe za preradbu polimera, i specifične kriterije, koji su do sada razvijeni samo za injekcijsko prešanje. Kriteriji izbora mogu se svrstati u skupine primarnih, eksploatacijskih i tehnoloških faktora.

Materijal za izradbu kalupne šupljine morao bi biti dobrih mehaničkih i toplinskih svojstava, kemijski postojan, dopuštene trošivosti, dobre obradljivosti male mase.

Slika 3.6. prikazuje povezanost utjecajnih faktora i kriterija izbora materijala za izradbu kalupne šupljine.



1 - čimbenici koji utječu na izbor svojstva materijala stijenke kalupne šupljine, 2 - čimbenici koji utječu na svojstva materijala kalupne šupljine, 3 - svojstva materijala stijenke kalupne šupljine, 4 - korisnost izabrane kombinacije materijal - način obradbe

Slika 3.6. Povezanost utjecajnih čimbenika i kriterija izbora materijala za izradbu kalupne šupljine [6]

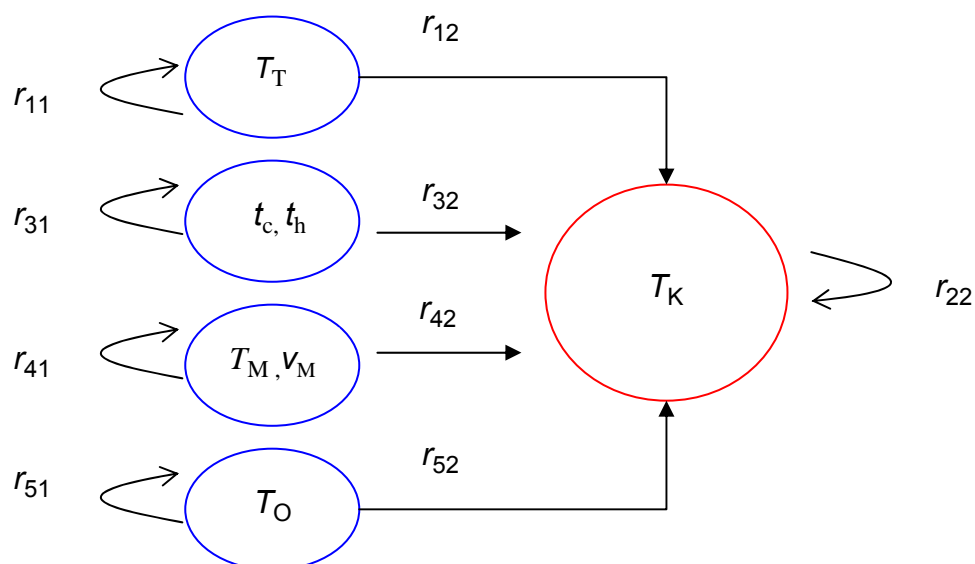
Pri istoj temperaturi taljevine i kalupne šupljine, pri preradbi zadanog plastomera, niža toplinska svojstva materijala kalupne šupljine, niža toplinska prodornost, rezultira višom dodirnom temperaturom. To dovodi do sporog hlađenja. Budući da je gradijent hlađenja manji, bit će i amorfna kožica tanja, a svojstva bolja.

Pri višoj temperaturi stijenke kalupne šupljine tijekom ubrizgavanja, na što se može utjecati izborom materijala nižih toplinskih svojstava, postoji bolja mogućnost oporavka makromolekula amorfnih plastomera, snizuje se orijentiranost, čime se postižu bolja svojstva.

U slučaju primjene materijala visokih toplinskih svojstava, a zahtijeva se visoka proizvodnost, radi se s niskim temperaturama stijenke kalupne šupljine i medija za temperiranje. Traže li se visoka mehanička svojstva materijala, potrebno je raditi s visokim temperaturama stijenke kalupne šupljine

### 3.6. Stohastičnost temperature stijenke kalupne šupljine [4]

Temperaturno polje u kalupu, izraženo temperaturom stijenke kalupne šupljine, slučajna je varijabla, koja ovisi o većem broju statičkih i dinamičkih čimbenika.



Slika 3.7. Vjerojatnost postizanja temperature stijenke kalupne šupljine

- $r_{i1}$  - vjerojatnost da se i u narednom ciklusu zadrži isto stanje:
- $r_{11}$  - vjerojatnost da i u narednom ciklusu  $T_T$  bude ista
- $r_{31}$  - vjerojatnost da i narednom ciklusu  $t_h$  i  $t_c$  budu isti
- $r_{41}$  - vjerojatnost da i narednom ciklusu  $T_M$  i  $v_M$  budu isti
- $r_{51}$  - vjerojatnost da i narednom ciklusu  $T_O$  bude isti
- $r_{22}$  - vjerojatnost da se zadrži poremećeno stanje temperature kalupne šupljine
- $r_{i2}$  - prijelazna vjerojatnost iz postojećeg stanja u stanje poremećene temperature kalupne šupljine (vrijedi za  $r_{12}$ ,  $r_{32}$ ,  $r_{42}$  i  $r_{52}$ ).

Temperatura stijenke kalupne šupljine ovisi o toplinskim svojstvima materijala kalupa i izmjerama kanala za temperiranje, te je dinamička funkcija temperature taljevine, temperature okoline, te temperature i brzine medija za temperiranje i vremena hlađenja otpreska i ciklusa:

$$T_K = f(T_T, T_O, T_M, v_M, t_h, t_c) \quad (3.14)$$

Svi navedeni faktori podložni su promjenama, što znači da se i  $T_K$  mijenja tijekom niza ciklusa. Vjerojatnost da se održi konstantna  $T_K$  jednaka je umnošku vjerojatnosti pojedinih stanja:

$$r_{11}^A = r_{11} \cdot r_{31} \cdot r_{41} \cdot r_{51} \quad (3.15)$$

Stohastičnost temperature stijenke kalupne šupljine ogleda se u činjenici da postoji samo stanovita vjerojatnost da se postignuta  $T_K$  i održi. To zahtijeva mjerenje temperature u kalupu. Pokusi su pokazali da se najbolji rezultat postiže ako je termoelement smješten na površini u dodiru s taljevinom ili neposredno ispod površine. Međutim, zbog cikličke promjene temperature problem regulacije nije tako jednostavan. Najpogodnije je mjeriti u trenutku kad je potisnut otpresak iz kalupne šupljine ili u trenutku kad se ubrizgavalici naredi "zatvaranje kalupa".

Kad se ne raspolaže regulacijskim uređajima koji omogućuju mjerenje temperature na površini stijenke kalupne šupljine ili neposredno ispod nje, zadovoljavajući rezultati postižu se mjerenjem temperature kalupa na određenoj udaljenosti od površine stijenke kalupne šupljine u dodiru s plastomernom taljevinom. Takav način regulacije susreće se danas češće.

Trajno mjerenje temperature u kalupu na taj način među prvima uveo je Wilden, utvrdivši i pojam "reguliranog kalupa".



U pravilu se udaljenost termoelemenata od površine određuje iskustveno. Međutim, potrebna se udaljenost može izračunati jednadžbom za određivanje dubine prodiranja topline (slika 3.8):

$$x_P = \sqrt{\frac{a_K t_{osp}}{\pi}} \ln n \quad (3.16)$$

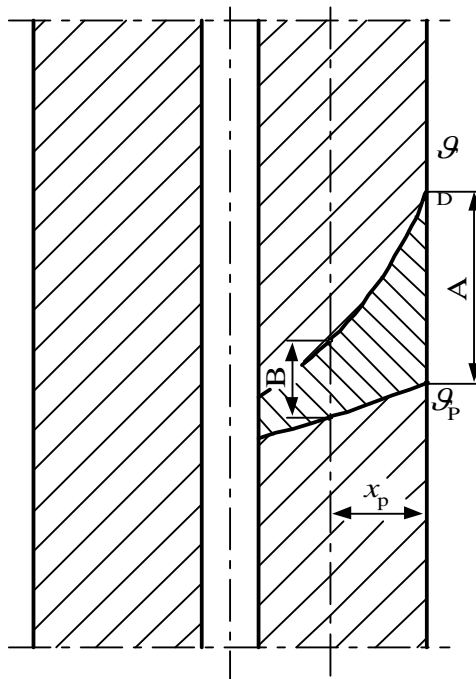
gdje su:

$x_P$  - dubina prodiranja

$a_K$  - toplinska difuznost materijala kalupne šupljine

$t_{osp}$  - trajanje oscilacijskog prodiranja topline, uzima se  $t_h$

$n$  - n- ti dio površinske vrijednosti, pri čemu je površinska vrijednost određena razlikom dodirne temperature i temperature podešavanja ( $T_D - T_P$ ).



Slika 3.8. Dubina prodiranja topline [4]

### **3.7. Reguliranje temperaturnog polja u kalupu [4]**

Razlikuju se tri načina reguliranja temperaturnog polja, a time i temperature stijenke kalupne šupljine:

- reguliranje ulazne temperature medija za temperiranje
- reguliranje temperature stijenke kalupne šupljine
- kaskadno reguliranje.

#### ***3.7.1. Reguliranje ulazne temperature medija za temperiranje***

Reguliranje ulazne temperature medija za temperiranje najzastupljenije je temperiranje kalupa. Brojni su razlozi zašto je to još i danas najrasprostranjeniji način reguliranja. Osnovni je nedostatak da se ništa ne zna o stvarnom temperaturnom polju u kalupu da medij za temperiranje zbog svoje tromosti nije u mogućnosti prenijeti na regulator zbivanja na površini stijenke kalupne šupljine. Vrlo se često temperirala isporučuju s regulacijom temperature medija od  $\pm 2$  stupnja. To je suviše gruba regulacija. Područje regulacije ulazne temperature medija za temperiranje ne smije prekoračiti  $\pm 0,5$  stupnjeva, što se postiže bez poteškoća, postojećim elektroničkim regulatorima.

#### ***3.7.2. Reguliranje temperature stijenke kalupne stijenke***

Znatno je povoljnije regulirati temperaturu medija za temperiranje termoelementom smještenim u kalupu. Najbolje bi bilo da bude na površini ili neposredno ispod površine stijenke kalupne šupljine u dodiru s plastomernom taljevinom. No, zbog skokovite cikličke promjene temperature na površini takav način reguliranja nije moguć uslijed do sada neriješenih tehničkih problema. Stoga se termoelement stavlja na određenu dubinu prodiranja.

### **3.7.3. Kaskadno reguliranje**

Kaskadno reguliranje, koje je kombinacija reguliranja ulazne temperature medija za temperiranje i reguliranja temperature stijenke kalupne šupljine. Takvo reguliranje još nije našlo širu primjenu.

### **3.8. Tijek proračuna izmjene topline u kalupima**

Proračun izmjene topline vrlo je složen i zahtijeva znanje projektanta kalupa kao i konstruktora otpreska. Tijekom rada na razvoju proizvoda konstruktor mora riješiti veći broj zadataka. Ti zadaci mogu se svrstati u dvije skupine:

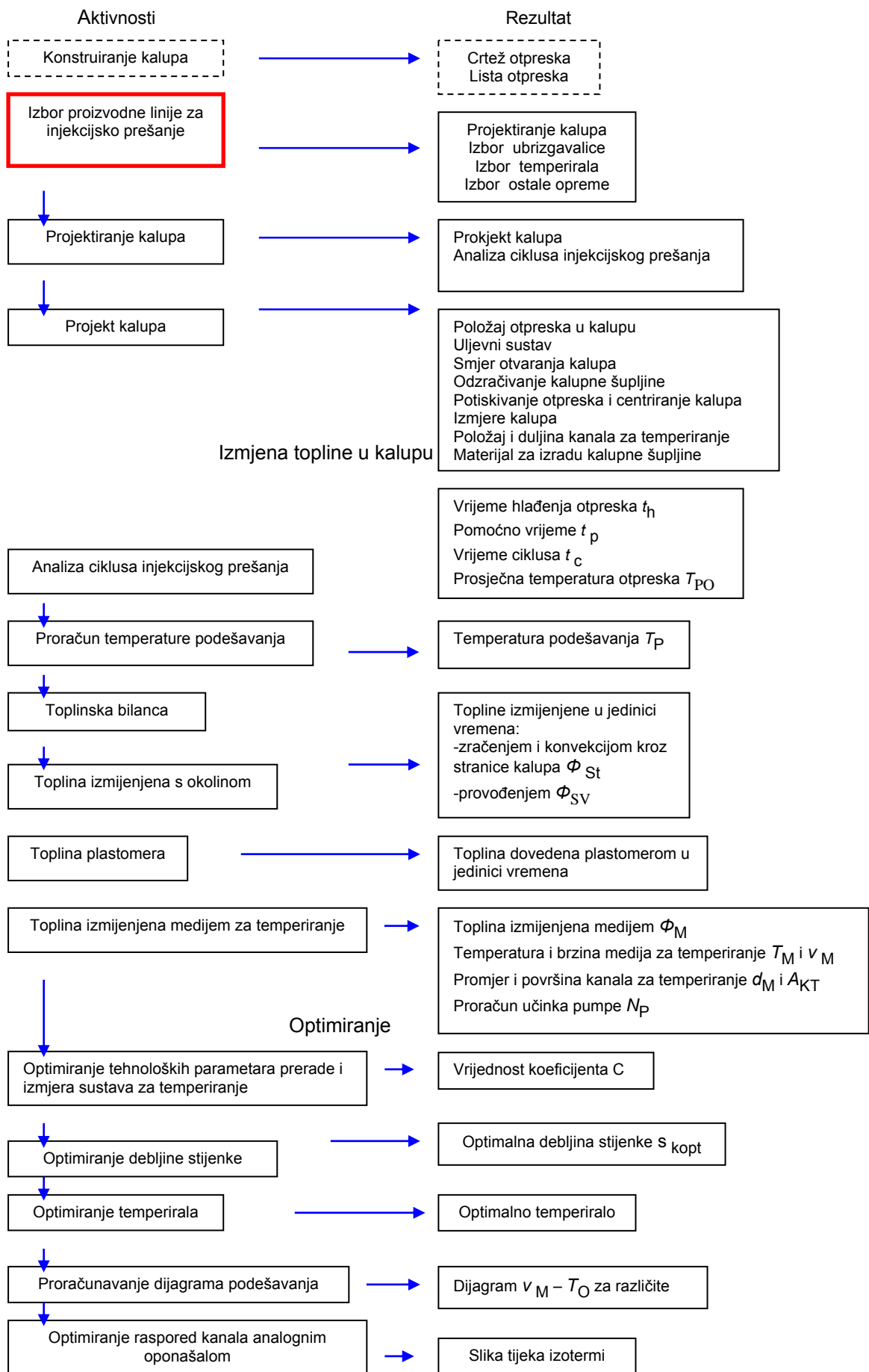
- a) geometrija i upotrebna svojstva otpreska
- b) toplinska svojstva otpreska.

Te podatke konstruktor proizvoda kao i crtež izrađevine unosi u takozvani obrazac „Lista otpreska“ i dostavlja projektantu kalupa. Zadaća projektanta je da projektira kalup, izabere ubrizgavalicu, temperiralo i ostalu opremu. Zatim da proračuna troškove, optimira gnijezda u kalupnoj šupljini te proračuna pouzdanost radnog mjesta.

U tablici 3.1 prikazane su aktivnosti koje su nužna pretpostavka uspješnog proračunavanja izmjene topline, kao i rezultati koji proizlaze iz tih proračuna. Crtkano su označene aktivnosti konstruktora otpreska, a punim crtama projektanta kalupa.

Posebno težište jest izmjena topline. Skupine podataka vezane uz izmjenu topline, što se javljaju kao rezultat aktivnosti koje prethode proračunu, nalaze se u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Tijek proračuna izmjene topline [4]



### **3.8.1. Opis „Liste otpreska“**

“Lista otpreska“ je obrazac koji sadrži osnovne podatke o otpresku, plastomeru, izmjerama otpreska, tolerancijama, svojstvima otpreska, uvjetima njegove upotrebe, mogućem umetku, pripremi za injekcijsko prešanje te naknadnoj i završnoj obradi otpreska.

### **3.8.2. Ulazni podaci za proračun izmjene topline u kalupima**

Podaci potrebni za proračun izmjene topline u kalupima nazivaju se ulaznim podacima i predočuju se “Listom ulaznih podataka“.

Da bi projektant kalupa mogao pristupiti izradbi „Liste ulaznih podataka“ potrebne za proračun izmjene topline, projektant mora najprije projektirati kalup. Izradba projektne skice sastoji se od nekoliko koraka. Najprije je potrebno odrediti položaj otpreska u kalupu, ucrtati elemente i odrediti približne izmjere uljevnog sustava. Potrebno je odrediti i smjer otvaranja kalupa, jer o tome ovisi određeni broj vremena u ciklusu. Također potrebno je i predvidjeti i odzračivanje kalupne šupljine.

Za proračun izmjene topline u kalupima potrebni su podaci:

- a) geometrija i upotrebna svojstva otpreska
- b) toplinska svojstva otpreska
- c) izmjere kalupa
- d) toplinska i mehanička svojstva materijala kalupne šupljine
- e) podaci o mediju za temperiranje
- f) podaci o temperiranjima i načinu ostvarivanja potrebne brzine strujanja medija za temperiranje
- g) kakvoća i proizvodnost otpreska.

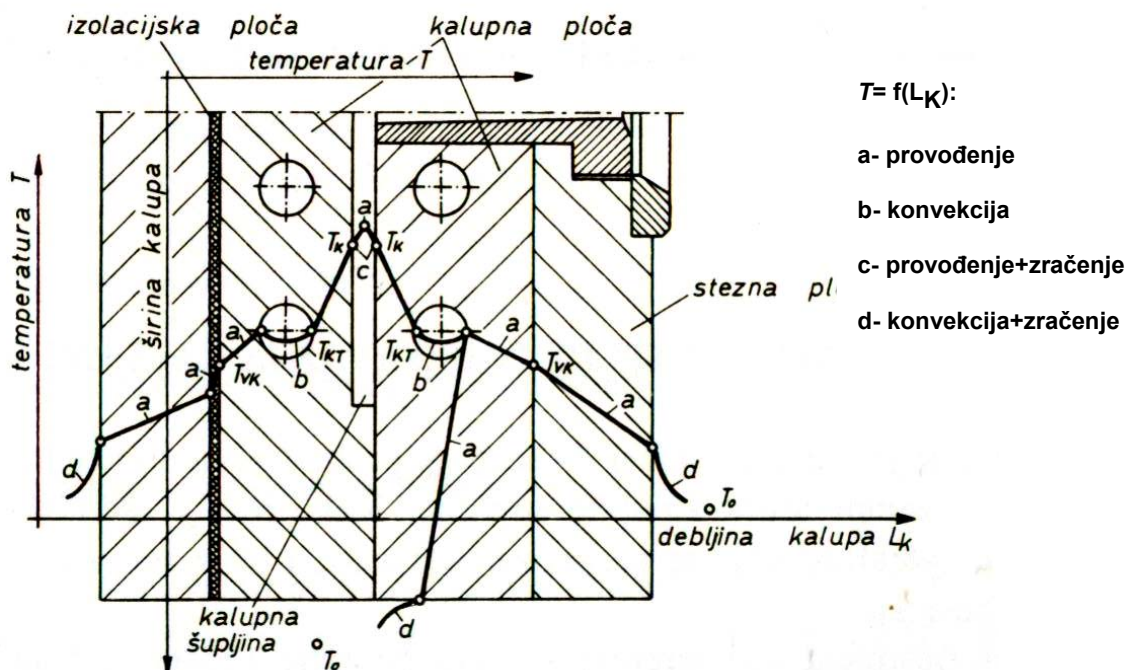
Na temelju tih podataka projektant kalupa može započeti radom na izboru proizvodne linije za injekcijsko prešanje.

### 3.8.3. Toplinska bilanca kod izmjene topline

Kako je već rečeno da suma izmijenjenih toplina u jedinici vremena, koje dovede plastomer, a s kalupom izmijene okolina i medij za temperiranje, mora biti jednaka nuli ( $\Phi_P + \Phi_O + \Phi_M = 0$ ). U daljnjem izlaganju analizirat će se sve tri vrste toplina.

#### 3.8.3.1. Proračun topline izmijenjene s okolinom

Toplina koju kalup izmijeni s okolinom može u toplinskoj bilanci kalupa sačinjavati veoma važan, čak i najznačajniji pojedinačni udio izmijenjene topline tijekom ciklusa. Ako kalup radi pri niskim temperaturama, a želi se postići visoka proizvodnost, okolina može zagrijavati kalup. Pri visokim temperaturama, koje obilježavaju preradu konstrukcijskih plastomera, gubici topline prema okolini mogu biti višestruko veći od topline dovedene plastomerom, što zahtijeva značajan utrošak energije temperiranja. Na slici 3.9 prikazuje se kalup kao termodinamički sustav. Malim slovima obilježeni su termodinamički procesi, a punim linijama pad temperature.



Slika 3.9. Kalup kao termodinamički sustav [4]

Toplina izmijenjena s okolinom sastoji se od topline koju izmijeni kalup zračenjem i konvekcijom preko stranica i sljubnice kalupa te provođenjem s nosačima kalupa ubrizgavalice :

$$\Phi_O = \Phi_{St} + \Phi_{St} + \Phi_V \quad (3.17)$$

gdje su:

$\Phi_{St}$  - toplina izmijenjena zračenjem i konvekcijom kroz stranice kalupa u jedinici vremena

$\Phi_{St}$  - toplina izmijenjena zračenjem i konvekcijom kroz sljubnicu u jedinici vremena

$\Phi_V$  - toplina izmijenjena provođenjem kroz nosače kalupa ubrizgavalice u jedinici vremena.

Toplinski tok kroz stranice kalupa jednak je

$$\Phi_{St} = \Phi_Z + \Phi_K \quad (3.18)$$

gdje su:

$\Phi_Z$  - toplina izmijenjena zračenjem u jedinici vremena

$\Phi_K$  - toplina izmijenjena konvekcijom u jedinici vremena.

### 3.8.3.2. Toplina koju dovodi plastomer

U jedinici vremena plastomer dovede i preda kalupu količinu topline:

$$\Phi_P = \frac{m_g (h_2 - h_1)}{t_c} \quad (3.19)$$

gdje su:

$m_g$  - masa grozda (masa otpreska + masa uljevnog sustava)

$h_2$  - specifična entalpija pri temperaturi i tlaku preradbe

$h_1$  - specifična entalpija pri prosječnoj temperaturi otpreska u trenutku njegova napuštanja kalupa

$t_c$  - vrijeme potrebno za izradbu jednog grozda.

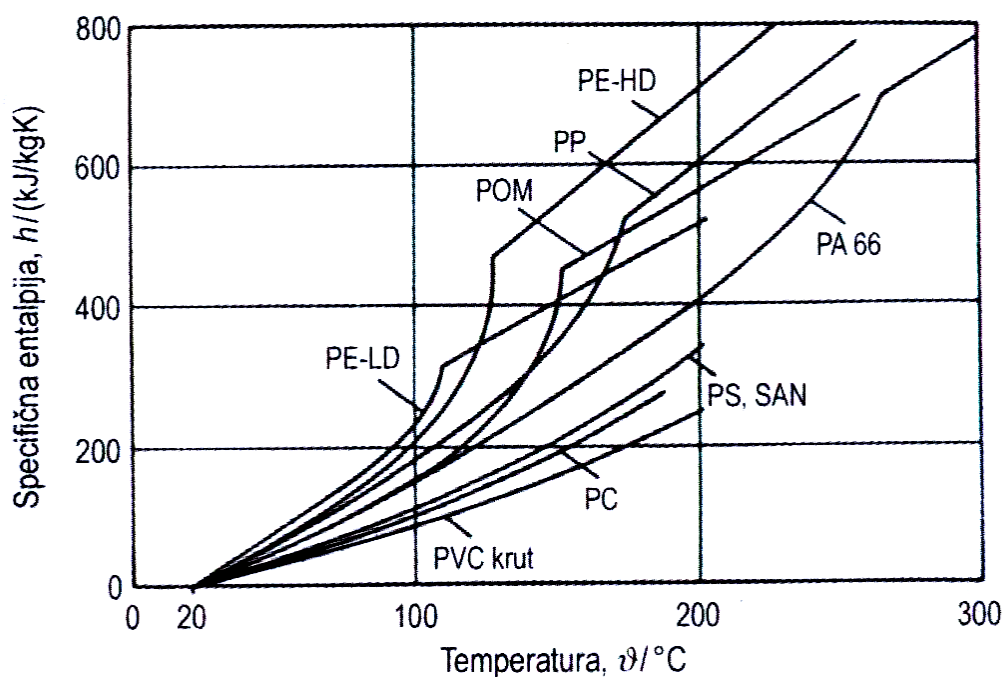
Dimenzijska jednadžba, pri čemu se  $T$  uvrštava u K, glasi:

$$(h_2 - h_1) = [(a_3 T_T + b_3) - (a_2 T_{PO} + b_2)] \text{ kWs/kg} \quad (3.20)$$

U tablici 3.2 navedene su vrijednosti koeficijenata izračunatih iz dijagrama  $h$ - $T$  prikazanih na slici 3.10.

Tablica 3.2. Vrijednosti koeficijenata za izračunavanje razlike specifične entalpije [4]

Plastomer	Koeficijenti			
	$a_3$	$b_3$	$a_2$	$b_2$
PA 6.6	1,880	-317,20	2,022	-592,49
POM	2,500	-632,50	1,596	-567,67
PP	2,963	-810,37	2,088	-611,71
LDPE	1,979	-428,94	2,651	-776,71
HDPE	3,226	-825,81	2,319	-679,49
PVC	1,739	-582,61	1,124	-329,31
PC	1,933	-626,00	1,477	-432,74
PS, SAN	1,875	-571,88	1,400	-410,20
PMMA	2,647	-882,65	1,550	-454,15



Slika 3.10. Dijagram „specifična entalpija – temperatura“ [4]



### 3.8.3.3. Toplina izmijenjena medijem za temperiranje

Za proračun topline izmijenjene medijem za temperiranje potrebno je prvo proračunati promjer kanala, a time i površinu kanala za temperiranje. Jednadžba promjera kanala glasi:

$$d_K = \frac{b_O}{n_K x_K \pi} \quad (3.21)$$

gdje su:

$b_O$  - širina otpreska

$n_K$  - broj kanala za temperiranje

$x_K$  - faktor površine kanala za temperiranje (njegova je vrijednost od 0,6 do 1,5, a obično 0,8 do 1,2).

Zbog izvedbenih razloga promjer kanala se zaokružuje na cijeli broj, pa je njegova stvarna površina jednaka:

$$A_{KT} = d_K^* l_K n_K \pi \quad (3.22)$$

gdje su:

$d_K^*$  - zaokružena vrijednost promjera kanala za temperiranje

$l_K$  - duljina kanala za temperiranje.

Medij za temperiranje mora s kalupom izmijeniti ovu količinu topline:

$$\Phi_M = -\Phi_P - \Phi_O \quad (3.23)$$

gdje su:

$\Phi_P$  - toplinski tok plastomera

$\Phi_O$  - toplinski tok okoline.

## **4. SUSTAVI ZA TEMPERIRANJE [4,7,8]**

Pojam temperiranja obuhvaća održavanje propisane temperature u kalupu. Sustav za temperiranje idealno bi trebao biti tako izveden da održava jednoliko temperaturno polje u kalupu. Pri injekcijskom prešanju sustavom za temperiranje dovodi se ili odvodi toplina potrebna za postizanje propisanog temperaturnog polja u kalupu. Toplina se kalupu može dovoditi i odvoditi kapljevina, a grijalima samo dovoditi.

Propisano temperaturno polje opisuje se s pomoću temperature stijenke kalupne šupljine.

### **4.1. Mediji i oprema za temperiranje**

Svojstva potrebna otpresku i željena proizvodnost izravno utječu na izbor medija i opreme za temperiranje. Posredna je veličina u tome potrebna temperatura kalupne šupljine, koja određuje brzinu i temperaturu medija.

Osim odgovarajućih medija za temperiranje, potrebna je i oprema koja omogućuje postizanje potrebnih temperatura medija.

#### **4.1.1. Mediji za temperiranje**

U praksi se kao medij za temperiranje najviše upotrebljava voda a zatim i ulje. Stlačeni zrak kao medij vrlo je ograničenog značenja i upotrebljiv praktički samo za odvođenje topline vrlo tankim jezgrama (od 3 do 4 mm), tj. kad nije moguće ni jedno drugo rješenje.

Pri visokim temperaturama kalupnih šupljina, oko 400 K, potrebno je medij zagrijati na oko 420 K, oko 20 K iznad temperature stijenke kalupne šupljine. Takvim zahtjevima udovoljavaju kao medij za temperiranje voda, voda uz dodatak sredstva za sprečavanje smrzavanja i ulje. Ostale su tekućine manje značajne za temperiranje kalupa .

Na medije za temperiranje postavlja se niz zahtjeva:

- visoko vrelište pri atmosferskom tlaku
- visoki specifični toplinski kapacitet
- niska viskoznost i pri niskim temperaturama, dobra sposobnost pumpanja
- visoka toplinska stabilnost
- visoka antioksidativnost
- medij ne smije negativno utjecati na materijale uređaja
- niska toksičnost, tvar bez mirisa i jednostavnost uništenja.

*4.1.1.1. Temperiranje vodom iz vodovodne mreže*

Najstariji i najdjelotvorniji način temperiranja kalupa. Primjenjuje se samo kad se kalupu odvodi toplina. Kod niskih temperatura ispod ledišta i visokih iznad vrelišta vode, vodi se mora dodavati tvar za sprječavanje zamrzavanja ili vrenja. Najčešće kao dodatak služi etilenglikol. Voda kao medij primjenjuje se u temperaturnom intervalu od 293 do 368 K, odnosno pri djelovanju povišenog tlaka u sustavu za temperiranje i do 413 K. Zbog toga vodu kao medij za temperiranje najbolje je upotrebljavati pri atmosferskom tlaku iznad ledišta i ispod vrelišta.

Prednosti vode kao medija za temperiranje jesu:

- visoki specifični toplinski kapacitet
- visoka toplinska prijelaznost
- dobra toplinska provodnost
- toplinska svojstva vode praktički su neovisna o temperaturi
- voda je nezapaljiva
- voda je obzirom na ostale medije jeftina.

Nedostaci vode:

- nisko vrelište
- opasnost od taloženja kamenca i korozije- češće čišćenje kanala za temperiranje
- sadrži štetne nitrata, kloride i željezo koje se izlučuje pri povišenim temperaturama

- tijekom procesa bitno se mijenjaju uvjeti promjenom godišnjeg doba pa i radnog dana- ulazna temperatura vode zimi ili ujutro može biti nekoliko stupnjeva niža od one ljeti ili ujutro

- nepovratno se troše velike količine vode, čime opadaju raspoložive količine tehnološke vode

Ti se nedostaci mogu odgovarajućim mjerama ublažiti ili ukloniti. Tako npr. dodavanjem antikorozijskih sredstava i sredstava za odvapnjenje smanjuje se opasnost od taloženja kamenca i korozije u kanalima za temperiranje, postavljanjem filtara za nečistoće.

Uzimajući u obzir sve prednosti i nedostatke vode kao medija za temperiranje, može se reći da je voda toplinski efikasnija, jednostavnija u upotrebi i jeftinija.

#### *4.1.1.2. Temperiranje uljem*

Ulje se može upotrijebiti kao medij u slučajevima kad voda ne zadovoljava. Najčešće se ulje upotrebljava u temperaturnom području od 293 do 573 K, odnosno pri temperaturama dosta iznad vrelišta vode.

Primjenjuju se mineralna i sintetička ulja. Sintetička su pogodnija od mineralnih, višeg su vrelišta i bolje otapaju proizvode starenja u ulju.

## **4.2. Uređaji za temperiranje [4,7,9]**

### **4.2.1. Temperirala kalupa**

Uređaji koji optočnim zagrijavanjem ili hlađenjem tekućine održavaju temperaturu stijenke kalupne šupljine, odnosno temperaturno polje kalupa stalnim. Stalno održavanje propisanog temperaturnog polja koje se predstavlja temperaturom stijenke kalupne šupljine, zahtjeva obuhvaćanje i reguliranje poremećajnih veličina kalupa i temperirala kalupa. Regulirane veličine su kalupna temperatura, brzina i tlak medija za temperiranje.

Na slici 4.1. prikazano je temperiralo.



Slika 4.1. Uređaj za temeriranje- temperiralo [9]

Kao tehničke značajke temperirala kalupa navode se:

- područje radnih temperatura
- moć zagrijavanja
- moć hlađenja
- učinak pumpe
- vrsta medija
- raspoloživa snaga pumpe.

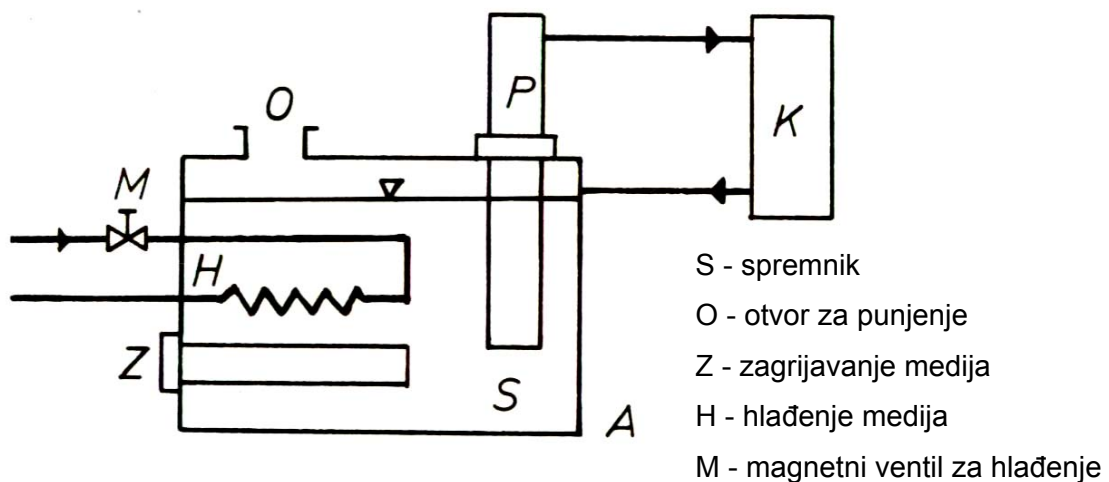
#### **4.2.2. Vrste temperirala kalupa**

Temperirala kalupa mogu se podijeliti prema vrsti medija upotrebljenog za temperiranje te prema području radnih temperatura.

Prema vrsti medija razlikuju se voda i ulje. Prema području radnih temperatura temperirala se mogu podijeliti u tri skupine. Za niske temperature medija, od 253 do 303 K. Za ovo područje upotrebljavaju se temperirala građena na načelu rashladnih uređaja uz upotrebu kompresora i kondenzatora. Zatim su to temperirala za radno područje od 293 do 368 K te temperirala za radne temperature do 413 K.

Temperirala kalupa koja djeluju na načelu optočnog zagrijavanja i hlađenja vode ili ulja prema krugu protoka medija su otvorena ili zatvorena, a načinom hlađenja medija izravna ili posredna.

Na slici 4.2 prikazano je temperiralo kalupa s otvorenim sustavom i posrednim hlađenjem.

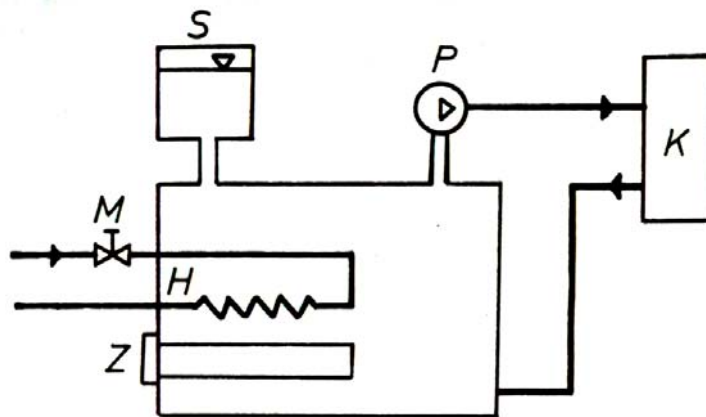


Slika 4.2. Temperiralo kalupa s otvorenim sustavom i posrednim hlađenjem medija[4]

Spremnik je gore otvoren i služi kao ekspanzijska posuda. Takvo je rješenje pogodno za temperiranje vodom ili uljem. Konstrukcija je jednostavna i nisu potrebne mjere sigurnosti. Međutim, već pri oko 353 K voda se isparuje a pri 373 K ključa. Ulje opet relativno brzo oksidira i stari. Potrebno je stalno dolijevati sredstva.

Općenito se smatra da su temperirala sa zatvorenim sustavom za temperiranje bolja ali skuplja. Olakšan je rad, jer ne treba stalno nadgledati razinu medija. Potrebno dolijevanje medija može se automatizirati. Traže se u pravilu što manji spremnici, jer se temperatura preciznije održava.

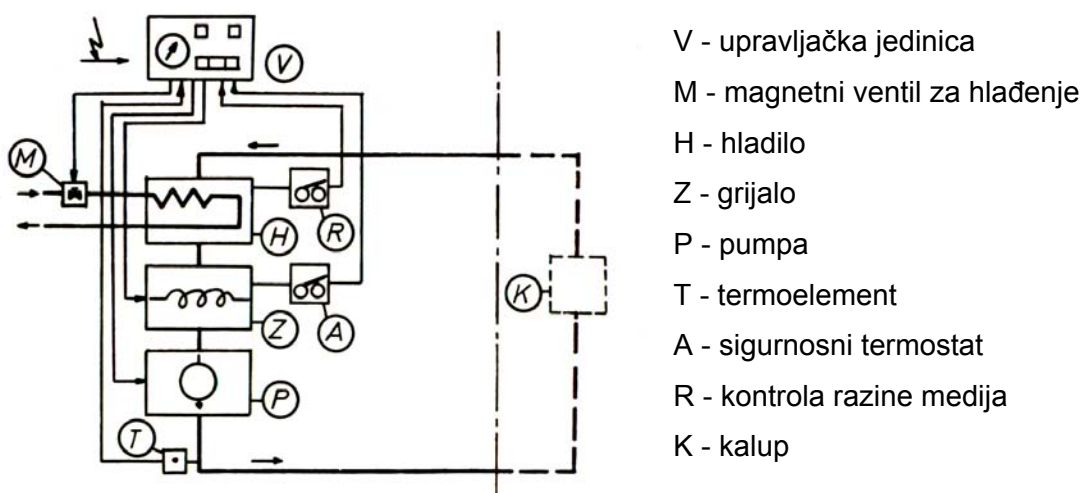
Na slici 4.3 prikazano je temperiralo kalupa sa zatvorenim sustavom i posrednim hlađenjem optočnog medija. Taj tip temperirala ima radno područje do 413 K i radi s predtlakom od 4 bara. Načelno nema zapreke da se u istom temperiralu kalupa izradi više krugova za temperiranje, ali su nedostaci u praksi veći od prednosti.



Slika 4.3. Temperiralo kalupa sa zatvorenim sustavom i posrednim hlađenjem optočnog medija [4]

#### 4.2.3. Rad temperirala kalupa

Na slici 4.4 prikazana je shema temperirala kalupa s otvorenim sustavom i posrednim hlađenjem optočnog medija.



Slika 4.4. Radna shema temperirala kalupa [4]

Medij za temperiranje optječe hladilo H i grijalo Z, a zatim ga pumpa P potiskuje prema potrošaču, u ovom slučaju kalupu K, odakle se vraća prema hladilu. Termoelement T mjeri temperaturu medija za temperiranje i uspoređuje je u upravljačkoj jedinici s propisanom. To je posredni način određivanja temperaturnog polja kalupa temperaturom medija. Kad temperatura medija, a to je ujedno i ulazna temperatura medija, poraste iznad propisane, otvara se magnetni ventil M koji protokom drugog medija hladi medij u temperiraju kalupa. Ako je temperatura medija u temperiraju kalupa preniska, na sličan način ukapča zagrijavanje i postiže propisanu temperaturu.



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela je utvrditi utjecaj temperiranja na stijenku kalupne šupljine te na svojstva plastomernog otpreska. Eksperimentalni dio sastoji se od injekcijskog prešanja plastomernog otpreska, prikaza računalne simulacije i analize na temelju planova pokusa. Računalnom simulacijom dobit će se prikaz temperature stijenke kalupne šupljine i temperature medija za temperiranje. Analiza treba omogućiti zaključak o utjecajima temperiranja na stijenku kalupne šupljine i na svojstva otpreska.

Tijekom ispitivanja i obradbe rezultata upotrijebljena je sljedeća oprema:

- ubrizgavalica ENGEL VC 330/80
- temperiralo PIOVAN THP6
- kalup za injekcijsko prešanje
- mjerna stanica SCXI-1000 CD
- osjetilo temperature NI tip J
- program za prikupljanje podataka, *Lab View 7.0 Express*
- program za statističku obradbu podataka, *DesignExpert*.
- oprema za mjerenje- pomična mjerka i digitalna vaga

## 5.1. Ubrizgavalica [10]

Pokusi u okviru rada provedeni su na ubrizgavalici ENGEL VC 330/80. Radi se o stroju koji pripada skupini ubrizgavalica srednjih veličina, a važnije karakteristike dane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Karakteristike ubrizgavalice ENGEL VC 330/80 [10]

Karakteristika ubrizgavalice	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Promjer pužnog vijka	$d_{pv}$	30	mm
Maksimalni obujam ubrizgavanja	$V_u$	113	cm <sup>3</sup>
Maksimalna frekvencija vrtnje pužnog vijka	$\omega_{pv}$	220	min <sup>-1</sup>
Hod otvaranja kalupa	$h_{OK}$	310	mm
Minimalna ugradbena visina kalupa	$H_K$	150	mm
Maksimalna masa kalupa	$m_K$	450	kg
Pogonska snaga pumpe	$N_P$	18,5	kW

Na slici 5.1 prikazana je ubrizgavalica koja se koristila za vrijeme pokusa.



Slika 5.1. Ubrizgavalica ENGEL VC 330/80

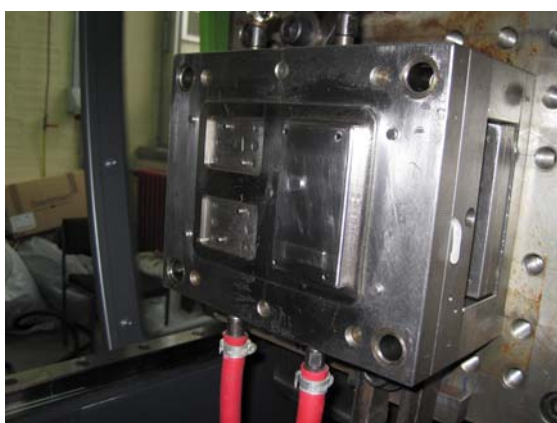
## 5.2. Kalup za injekcijsko prešanje

Za potrebe rada korišteno je standardno kućište tvrtke *HASCO* dimenzija 190•246 mm. Materijal kalupnih umetaka je 40CrMnMoS86. U tablici 5.2 navedena su svojstva čelika 40CrMnMoS86.

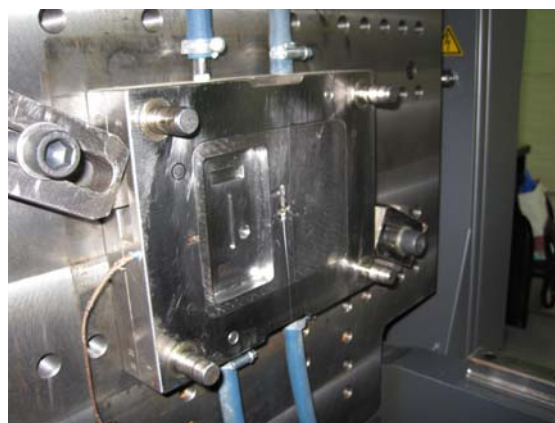
Tablica 5.2. Svojstva čelika 40CrMnMoS86 [11]

Svojstvo	Vrijednost	Jedinica
Toplinska provodnost	33,3	W/mK
Toplinska rastezljivost	$11,7 \cdot 10^{-6}$	m/mK
Specifični toplinski kapacitet	0,46	J/gK
Gustoća	7 850	kg/m <sup>3</sup>
Modul rastezljivosti	210 000	N/mm <sup>2</sup>
Maksimalno postiziva tvrdoća	51	HRC
Maksimalno postiziva rastezna čvrstoća	1730	N/mm <sup>2</sup>

Na slici 5.2 prikazan je kalup odnosno njegov pomični i nepomični dio.



Pomični dio kalupa



Nepomični dio kalupa

Slika 5.2. Kalup za injekcijsko prešanje

### 5.3. Temperiralo

Tijekom pokusa temperatura stijenke kalupne šupljine održavala se konstantnom temperiralom tvrtke PIOVAN, model THP6 (slika 5.3). Kao medij za temperiranje korištena je voda iz vodovodne mreže. Parametar koji se mijenjao za vrijeme pokusa je temperatura medija. Karakteristike temperirala date su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Temperiralo Piovan TPH6 [12]

Karakteristika temperirala	Vrijednost	Jedinica
Snaga električne pumpe	0,75	kW
Medij za temperiranje	Voda	
Maksimalna tem. medija	140	°C
Protok	40	l/min
Volumen spremnika vode	6	l
Tlak	350-450	bar



Slika 5.3. Temperiralo

#### 5.4. Mjerna stanica

Za mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine koristila se mjerna stanica tvrtke SCXI-1000 CD, s 8-kanalnim modulom za mjerenje temperature SCXI-1112 (slika 5.4). Modul omogućuje kompenzaciju hladnog kraja osjetila temperature, te zasebnu kalibraciju.



Slika 5.4. Mjerna stanica

#### 5.5. Osjetilo temperature [13]

Mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine provedeno je s pomoću osjetila temperature tip J (željezo-konstantan termopar) tvrtke NI. Područje rada osjetila je 0 do 482 °C, uz grešku mjerenja  $\pm 0,75\%$ .

#### 5.6. Program za prikupljanje podataka

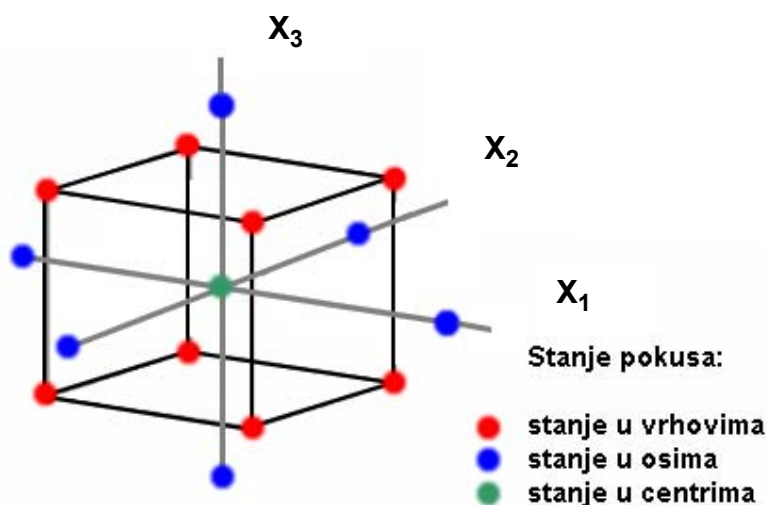
Prikaz mjernog signala ostvaren je s pomoću programskog paketa *Lab View 7.0 Express*. S pomoću tog programa načinjen je potprogram (prividni instrument) za mjerenje temperature.

### 5.7. Centralno-kompozitni plan pokusa [14-16]

Centralno kompozitni plan pokusa pripada u skupinu planova pokusa višeg reda, tzv. metoda odzivne površine. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Mjerljiva veličina kvalitete proizvoda ili procesa naziva se *odziv*. Svrha plana pokusa je generiranje matematičkog modela, odnosno jednadžbe (polinoma II. stupnja) koja opisuje proces. Ako su proučavani faktori u pokusu doista oni koji utječu na proces, a podatci dobiveni pokusom prihvatljive točnosti i preciznosti, tada je moguće razviti model koji vjerodostojno opisuje proces.

Centralno kompozitni plan pokusa je model I. reda ( $2^k$ ) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima da bi se omogućila procjena parametara modela II. reda. Centralno kompozitni plan pokusa sastoji se od  $2^k$  stanja u vrhovima (faktorska stanja),  $2k$  stanja u osima i stanja u središtu ( $k$  – broj faktora). Centralno kompozitni plan pokusa je alternativa  $3k$  modelu pri sastavljanju modela pokusa II. reda jer je broj izvođenja smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa.

Za  $k = 3$  (faktori su  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$ ) na slici 5.5 prikazan je model centralno kompozitnog pokusa za koji je potrebno 15 stanja pokusa ( $2^3+2\cdot 3+1$ ).



Slika 5.5. Centralno kompozitni plan pokusa za tri faktora [14]

Poželjna karakteristika svakoga pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih efekata i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotatabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ako je zbroj produkata kodiranih stanja bilo kojih dviju kolona u matrici pokusa jednak nuli. Rotatabilnost centralno kompozitnog plana pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od središta pokusa, odnosno rotatabilnost ovisi o tzv. osnovj udaljenosti  $\alpha$  (udaljenosti stanja u osima od centra).

Pokus je rotabilan ako je:  $\alpha = \sqrt[k]{F}$  (5.1)

gdje je:

$F$  - broj faktorskih stanja ( $F = 2^k$  u slučaju potpunoga faktorskog pokusa).

Prema, u slučaju dva faktora  $\alpha = 2^{2/4} = 1,414$ , a u slučaju tri faktora  $\alpha = 2^{3/4} = 1,682$ . Dodatna stanja u središtu pokusa služe da bi se mogle usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u središtu pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ako je aritmetička sredina središta pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna.

Ako se pokus barem djelomično ponavlja, tada se može procijeniti pogreška pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Budući da se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena pogreške pokusa iz tih podataka neovisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan te sadržava li interakcije višeg reda. Tako je procijenjena pogreška pokusa *čista* pogreška (*eng. pure error*), odnosno ona je posljedica samo nesigurnosti mjerenja zavisne varijable. Jednadžba (polinom II. stupnja) kojom se opisuje proces (odzivna funkcija) za općeniti slučaj glasi ( $k$  faktora pokusa):

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (5.2)$$

gdje se:

- $b_0 \dots b_k$  određuju primjenom metode minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti.

## 5.8. Oprema za mjerenje otpresaka

Tijekom pokusa za potrebe mjerenja dimenzija otpresaka korištena je digitalna pomična mjerka mjernog raspona od 0 – 150 mm (slika 5.6). Za mjerenje mase otpreska korištena je digitalna vaga (slika 5.7).



Slika 5.6. Digitalna pomična mjerka



Slika 5.7. Digitalna vaga

## 5.9. Provedba i rezultati pokusa

Tijekom provedbe pokusa potrebno je bilo izvršiti 13 stanja pokusa. Od svakog stanja pokusa nakon što su se temperature medija i temperature stijenke kalupne šupljine ustalile uzimalo se po 5 primjeraka otpreska. Naknadnim mjerenjem dimenzija i mase otpreska utvrdila bi se međusobna ovisnost zadanih veličina. Temperatura okoline bila je 19 do 21 °C. Materijal koji se koristio tijekom pokusa je polistiren PS BX 3740. Pokus se izvodio statistički slučajno, prema tablici slučajnih brojeva.



Vrijednosti koje su se mijenjale tijekom pokusa su temperatura medija za temperiranje (na temperiralu) i dopunsko vrijeme hlađenja (na ubrizgavalici). Temperiralo, njegov priključak (dolazni i odlazni) za medij spojen je preko gumenog crijeva na kalup. Na crijevima i u kalupu nalazilo se osjetilo temperature. Osjetila temperature priključena su bila na mjernu stanicu.

Mjerna stanica služila je za mjerenje temperature medija prije ulaza u kalup i nakon izlaza iz kalupa i za mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine.

Mjerni signali temperatura bilježeni su preko programa *Lab View 7.0 Express* koji je davao grafički prikaz. Grafičkim prikazom vidljiva je bila temperatura stijenke kalupne šupljine kao i ulazna i izlazna temperatura medija. Temperatura stijenke kalupne šupljine navedena je u tablici 5.4 a računski je vrijednost dobivena uz pomoć jednadžbe 3.3.

### Vrijednosti temperatura

U tablici 5.4 navedene su vrijednosti temperature stijenke kalupne šupljine i medija za temperiranje dobivene tijekom pokusa.

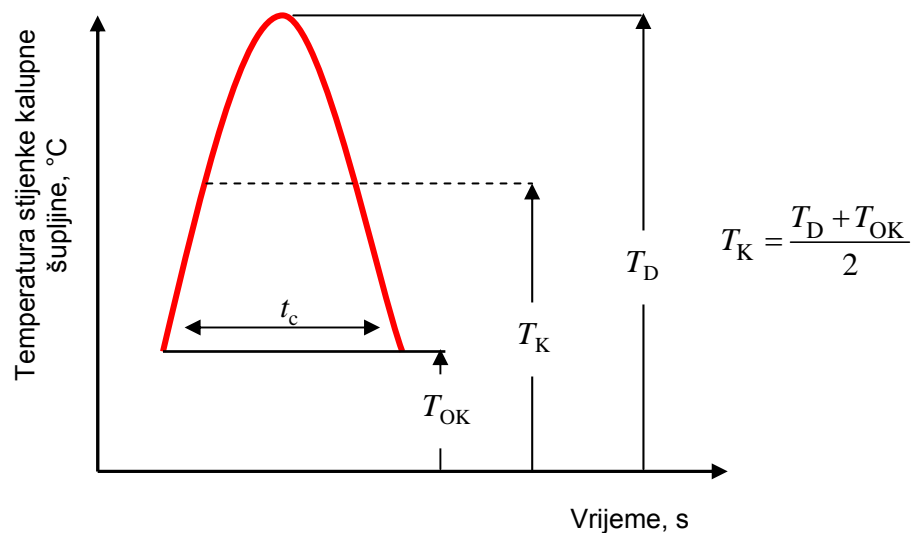
Tablica 5.4. Vrijednosti temperature stijenke kalupne šupljine

Stanje	Redoslijed izvođenja	Temperatura medija °C	Dopunsko vrijeme hlađenja s	Temperatura na ulazu kalupa °C	Temperatura na izlazu kalupa °C	Temperatura stijenke kalupne šupljine °C
11	1	55,0	7,0	47,373	50,369	54,879
6	2	76,20	7,0	60,540	65,340	67,647
5	3	33,80	7,0	30,574	32,182	33,021
3	4	40,00	9,0	35,907	36,050	36,623
8	5	55,00	9,8	47,288	49,744	52,723
1	6	40,00	5,0	36,623	37,452	38,883
10	7	55,00	7,0	49,231	50,430	53,105
7	8	55,00	4,2	47,361	50,186	54,905
9	9	55,00	7,0	48,213	51,026	52,647
12	10	55,00	7,0	48,643	50,765	52,569
4	11	70,00	9,0	58,480	62,610	63,186
2	12	70,00	5,0	59,785	63,344	64,223
13	13	55,00	7,0	48,832	51,632	53,854

## Određivanje temperature stijenke kalupne šupljine

Temperatura stijenke kalupne šupljine proračuna se kao srednja vrijednost između temperature stijenke kalupne šupljine u trenutku otvaranja kalupa i dodirne temperature između taljevine i stijenke kalupne šupljine pri njezinu popunjavanju.

Na slici 5.8 prikazan je tijek promjene temperature stijenke kalupne šupljine za vrijeme jednog ciklusa.

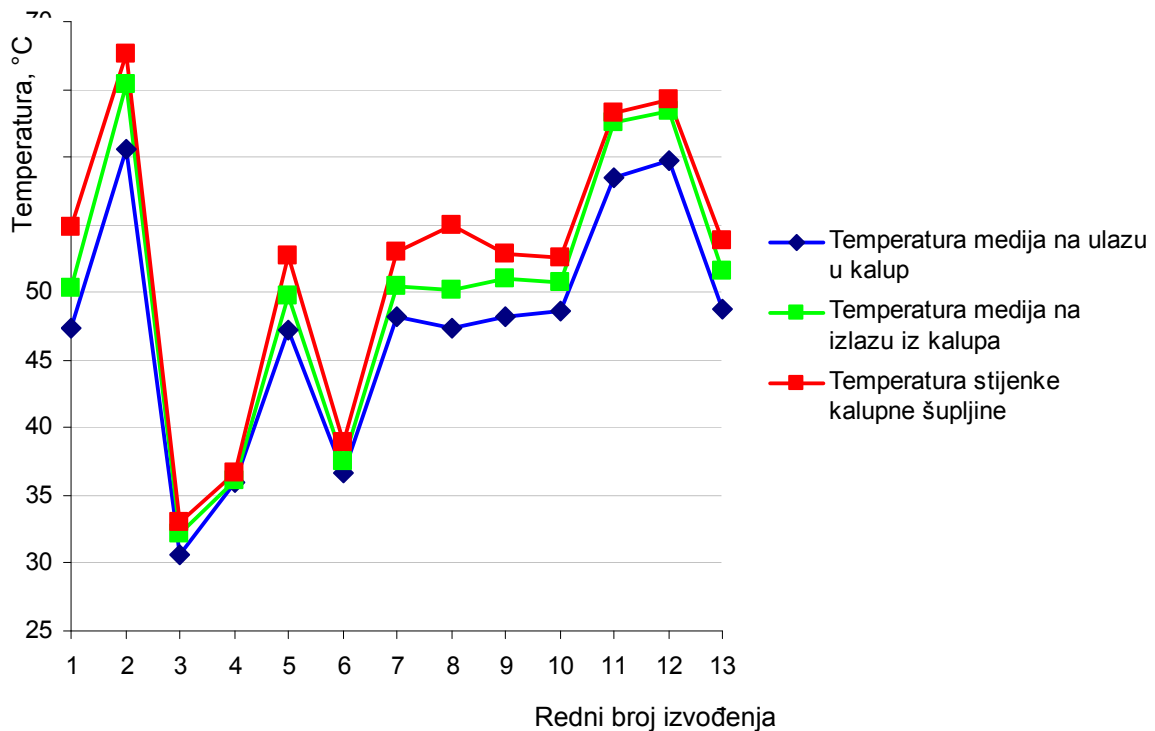


5.8. Tijek promjene temperature stijenke kalupne šupljine

Tablica 5.5. Vrijednosti dodirne temperatura  $T_D$  i temperature u trenutku otvaranja kalupa  $T_{OK}$ 

Stanje	Dodirna temperatura, $T_D$ °C	Temperatura u trenutku otvaranja kalupa, $T_{OK}$ °C
11	55,450	54,120
6	67,795	67,490
5	33,898	32,144
3	39,620	38,146
8	53,348	52,213
1	37,998	39,468
10	53,715	52,495
7	55,423	54,381
9	53,209	52,085
12	53,021	52,117
4	63,557	62,815
2	64,498	63,948
13	54,469	53,192

Na slici 5.9 prikazan je dijagram svih stanja pokusa i temperatura. Na ordinati prikazane su temperature medija i srednja temperatura stijenke kalupne šupljine, dok je na apcisi redni broj izvođenja pokusa.



Slika 5.9. Dijagram temperatura stijenke kalupne šupljine i temperatura medija na ulazu i izlazu iz kalupa za svih 13 stanja pokusa

### Statistička obradba podataka, *DesignExpert*.

Uz pomoć programskog paketa *DesignExpert* dobila se matematička ovisnost temperature stijenke kalupne šupljine u ovisnosti o temperaturi medija i dopunskom vremenu hlađenja. U tablici 5.6 prikazani su rezultati obradbe u *DesignExpert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.6. Rezultati analize varijance

		Suma kvadrata odstupanja <i>Sum of Squares</i>	Stupnjevi slobode <i>Degrees of freedom</i>	Srednji kvadrat odstupanja <i>Mean square</i>	Varijabla <i>F</i> <i>F value</i>	Rizik odbacivanja hipoteze $H_0$ <i>Risk of rejection of <math>H_0</math></i>
<b>Model</b>		1302,19	5	260,44	221,88	< 0,0001
	X	1271,88	1	1271,88	1083,55	< 0,0001
	Y	5,09	1	5,09	4,34	0,0758
	X <sup>2</sup>	24,77	1	24,77	21,11	0,0025
	Y <sup>2</sup>	0,15	1	0,15	0,13	0,7308
	XY	0,37	1	0,37	0,32	0,5901
<b>Ostatak</b> <i>Residual</i>		8,22	7	1,17		
<b>Odtupanje od modela</b> <i>Lack of fit</i>		4,70	3	1,57	1,78	0,2895
<b>Pogreška</b> <i>Pur error</i>		3,52	4	0,88		
<b>Ukupno</b> <i>Cor Total</i>		1310,41	12			

Pregled standardnog odstupanja, aritmetičke sredine i koeficijenta determiniranosti o modelu prikazuje tablica 5.7, dok se oznake faktora nalaze u tablici 5.8.

Tablica 5.7. Statistički podaci

Standardno odstupanje <i>Standard deviation</i>	Aritmetička sredina <i>Mean</i>	Koeficijent determiniranosti <i>Coefficient of determination</i>
1,08	52,18	2,08

Tablica 5.8. Oznake faktora

X	Y
Temperatura medija, °C	Dopunsko vrijeme hlađenja, s

Model se za slučaj temperiranja medijem i dopunskog vremena hlađenja (za varijablu temperatura stijenke kalupne šupljine) može opisati sljedećom jednadžbom:

$$\hat{y} = 53,44 + 17,83X - 0,80Y - 3,77X^2 - 0,15Y^2 + 0,43XY \quad (5.3)$$

gdje je:

X= temperatura medija za temperiranje

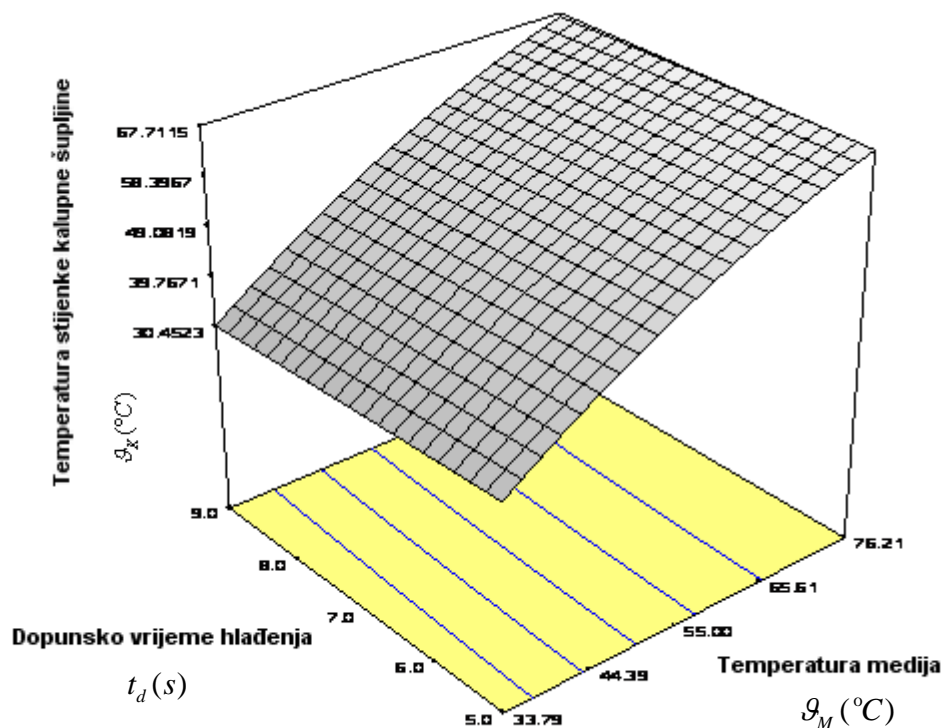
Y= dopunsko vrijeme hlađenja (vrijednosti X i Y upisuju se u kodiranom obliku).

Primjer:

Za X=70 °C i Y=5 s

Očekivana vrijednost temperature stijenke kalupne šupljine iznositi će 64,322°C

Slika 5.10 prikazuje ovisnost temperature stijenke kalupne šupljine o promjenama temperature medija i dopunskog vremena hlađenja. Iz dijagrama je vidljivo da dopunsko vrijeme hlađenja ne utječe na temperaturu stijenke kalupne šupljine. Temperatura medija kao što je i razumljivo povisuje temperaturu stijenke kalupne šupljine.



Slika 5.10. Dijagram ovisnosti temperature stijenke kalupne šupljine o temperaturi medija i dopunskom vremenu hlađenja

### Zaključak pokusa

Kroz pokuse s promjenom zadanih parametara, temperature medija i dopunskog vremena hlađenja došlo se do sljedećih spoznaja. Mjerenjem dimenzija i mase otpreska ne remeti se dimenzijska stabilnost otpreska.

Promjenom parametara dopunskog vremena hlađenja ne utječe se na temperaturu stijenke kalupne šupljine.



Promjenom temperature medija mijenja se i temperatura stijenke kalupne šupljine. To ukazuje da za određenu temperaturu stijenke kalupne šupljine temperiranjem uz pomoć temperirala tu temperaturu moguće je i ostvariti. U Prilogu 8 prikazane su vrijednosti dimenzija i mase otpresaka , te dijagrami temperature medija i temperature stijenke kalupne šupljine.

## 6. ZAKLJUČAK

Predmet analize diplomskog rada je temperiranje kalupa za injekcijsko prešanje polimera. Uspješno temperiranje kalupa ovisi o mnogo elemenata sustava. Svi elementi sustava za injekcijsko prešanje utječu na kvalitetu otpreska te međusobno zavise jedan o drugome. Zbog toga samo pravilno sastavljen sustav za injekcijsko prešanje plastomera uz optimalno podešene parametre preradbe može rezultirati proizvodnjom dimenzijski stabilnih otpresaka visoke kvalitete.

U kalupu ne postoji jedinstvena temperatura kalupa, već postoji temperaturno polje koje karakterizira određen broj temperatura. Temperatura stijenke kalupne šupljine, ukupno gledajući, smatra se najutjecajnijim parametrom preradbe injekcijskim prešanjem na svojstva otpreska. Zbog toga temperatura medija za temperiranje predstavlja jedan od izravno podesivih parametara s pomoću kojih je moguće podešavanje temperaturnog polja u kalupu.

Za potpuno razumijevanje izmjene topline u kalupima potrebna su znanja o toplinskim procesima preradbe polimera i njihovim toplinskim svojstvima. Također je potrebno poznavanje mehaničkih i toplinskih svojstava materijala od kojih su izrađeni dijelovi kalupnih šupljina.

Rezultati pokusa pokazuju da promjene parametara temperature medija za temperiranje i dopunskog vremena hlađenja ne utječu na dimenzijsku stabilnost otpreska. Dimenzije i mase otpreska zanemarivo su se promijenili. Dopunsko vrijeme hlađenja ne utječe na temperaturu stijenke kalupne šupljine. Promjenom temperature medija za temperiranje mijenja se i temperatura stijenke kalupne šupljine. Što znači da temperiranjem uz pomoć temperirala moguće ostvariti određenu temperaturu stijenke kalupne šupljine.

Na temelju ne promijenjenih dimenzija i mase otpreska može se reći da temperiranje stijenke kalupne šupljine tijekom injekcijskog prešanja polistirenom PS BX 3740 nije bilo nužno. Također, polistiren spada u grupu amorfnih plastomera koji nisu toliko

podložni promjenama temperature stijenke kalupne šupljine. Međutim, to se ne može sa sigurnošću reći jer nisu ispitana mehanička svojstva otpreska.

Kako bi se dobili precizniji podaci utjecaja temperiranja na svojstva plastomernog otpreska predlaže se provedba ispitivanja mehaničkih svojstva.

## 7. LITERATURA

- [1] [www.wisegeek.com](http://www.wisegeek.com)
- [2] [www.catalog.com.hk/tatming/index.html](http://www.catalog.com.hk/tatming/index.html)
- [3] [wikimedia.org/wiki/File:Injection\\_moulding\\_process](http://wikimedia.org/wiki/File:Injection_moulding_process)
- [4] Igor Čatić: Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb 1985.
- [5] Igor Čatić, Friedrich Johannaber: Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb 2004.
- [6] Igor Čatić: Proizvodnja polimernih tvorevina, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb 2006.
- [7] M. Šercer, I. Čatić: Vođenje procesa injekcijskog prešanja plastomera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1986.
- [8] Ana Rogić, Igor Čatić: Injekcijsko prešanje polimera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb 1996.
- [9] [www.plastma.net/www.plastma.net](http://www.plastma.net/www.plastma.net)
- [10] Prospektni materijal tvrtke Engel
- [11] [www.sz-metal.si](http://www.sz-metal.si)
- [12] Prospektni materijal tvrtke Piovan
- [13] [www.ni.com](http://www.ni.com)
- [14] Myers, R. H., Montgomery, D. C.: Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [15] Del Vecchio, R. J.: Understanding Design of Experiments: A Primer for Technologists, Carl Hanser Verlag, Munich, 1997.
- [16] Alvarez, L. F.: Design optimization based on genetic programming, University of Bradford, UK, 2000.

## 8. PRILOZI

Tablica 8.1. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 1*

Temperatura medija: 40 °C Dopunsko vrijeme hlađenja: 5,0 s				
Redni broj otpreska	Duljina otpreska mm	Širina otpreska mm	Visina otpreska mm	Masa otpreska g
1	100,81	58,45	10,14	9,04
2	100,87	58,48	10,12	9,03
3	100,81	58,48	10,12	9,04
4	100,79	58,47	10,12	9,02
5	100,77	58,46	10,13	9,04

Tablica 8.2. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 2*

Temperatura medija: 70 °C Dopunsko vrijeme hlađenja: 5,0 s				
Redni broj otpreska	Duljina otpreska mm	Širina otpreska mm	Visina otpreska mm	Masa otpreska g
1	100,78	58,49	10,12	9,01
2	100,77	58,50	10,10	9,03
3	100,79	58,48	10,12	9,03
4	100,80	58,46	10,11	9,04
5	100,79	58,48	10,12	9,03

Tablica 8.3. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje*

<b>Temperatura medija: 40 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 9,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,74	58,42	10,14	9,02
2	100,79	58,48	10,14	9,00
3	100,71	58,48	10,12	9,01
4	100,79	58,43	10,12	9,00
5	100,77	58,45	10,12	9,01

Tablica 8.4. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 4*

<b>Temperatura medija: 70 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 9,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,81	58,48	10,12	9,04
2	100,83	58,51	10,13	9,04
3	100,80	58,50	10,12	9,03
4	100,80	58,48	10,13	9,03
5	100,81	58,48	10,12	9,04

Tablica 8.5. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 5*

<b>Temperatura medija: 33,8 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 5,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,75	58,42	10,12	9,01
2	100,74	58,42	10,13	9,00
3	100,77	58,45	10,13	9,03
4	100,76	58,43	10,12	9,02
5	100,77	58,44	10,12	9,01

Tablica 8.6. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 6*

<b>Temperatura medija: 76,2 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 7,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,73	58,46	10,13	9,01
2	100,71	58,43	10,14	9,00
3	100,74	58,47	10,12	9,00
4	100,73	58,46	10,12	9,01
5	100,73	58,45	10,13	9,01

Tablica 8.7. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 7*

<b>Temperatura medija: 55 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 4,2 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska G</b>
1	100,82	58,51	10,13	9,03
2	100,83	58,50	10,14	9,03
3	100,70	58,51	10,12	9,02
4	100,79	58,49	10,13	9,02
5	100,80	58,51	10,13	9,03

Tablica 8.8. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 8*

<b>Temperatura medija: 55°C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 9,8 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,73	58,46	10,13	9,01
2	100,71	58,43	10,14	9,01
3	100,78	58,45	10,12	9,02
4	100,77	58,46	10,12	9,02
5	100,75	58,45	10,12	9,02



Tablica 8.9. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 9*

<b>Temperatura medija: 76,2 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 7,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,73	58,46	10,13	9,03
2	100,71	58,43	10,14	9,02
3	100,74	58,47	10,12	9,03
4	100,73	58,46	10,12	9,03
5	100,73	58,45	10,13	9,02

Tablica 8.10. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 10*

<b>Temperatura medija: 55 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 7,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,78	58,45	10,12	9,01
2	100,77	58,45	10,12	9,02
3	100,79	58,46	10,13	9,02
4	100,80	58,46	10,12	9,02
5	100,80	58,47	10,13	9,03

Tablica 8.11. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 11*

<b>Temperatura medija: 55 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 7,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,79	58,48	10,12	9,00
2	100,78	58,47	10,11	9,01
3	100,79	58,47	10,12	9,01
4	100,79	58,48	10,12	9,02
5	100,77	58,47	10,12	9,02

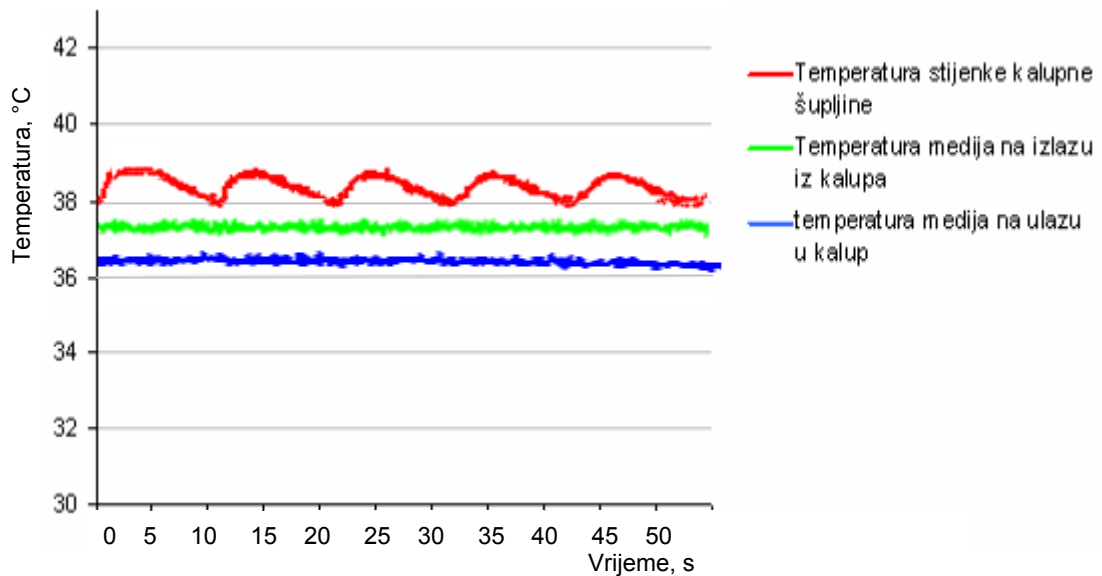
Tablica 8.12. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 12*

<b>Temperatura medija: 55 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 7,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,76	58,46	10,12	9,00
2	100,79	58,48	10,12	9,02
3	100,78	58,48	10,12	9,01
4	100,79	58,47	10,11	9,02
5	100,77	58,47	10,11	9,01

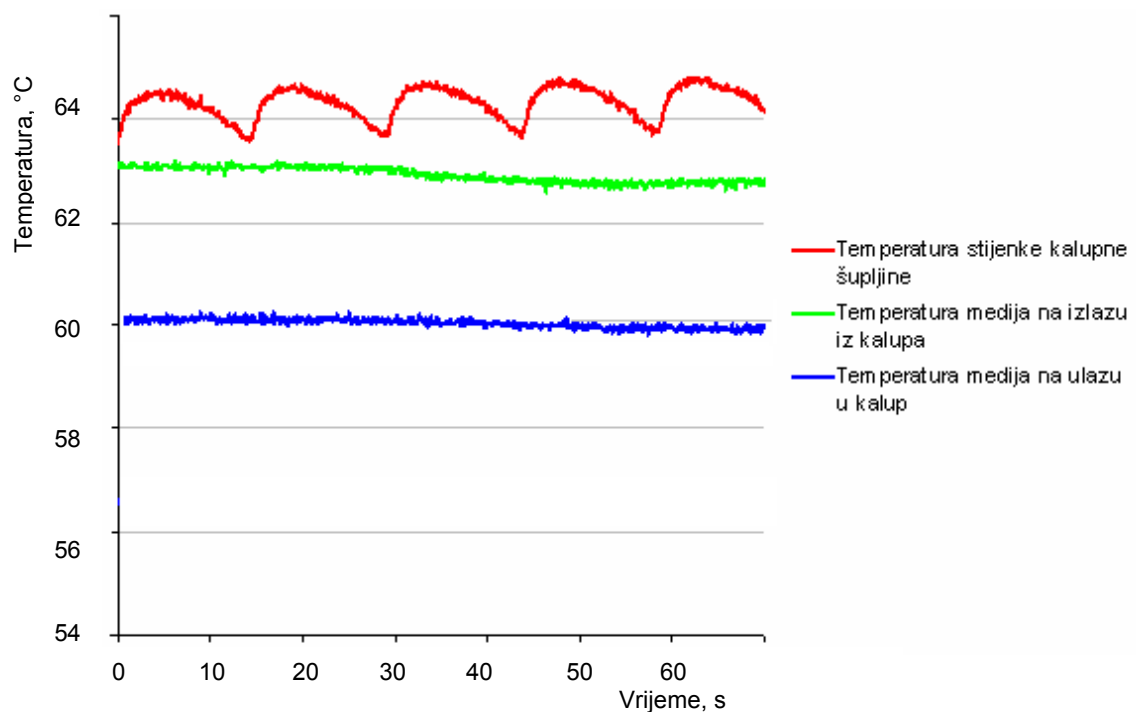
Tablica 8.13. Rezultati određivanja dimenzija i mase otpresaka, *Stanje 13*

<b>Temperatura medija: 55 °C</b>				
<b>Dopunsko vrijeme hlađenja: 7,0 s</b>				
<b>Redni broj otpreska</b>	<b>Duljina otpreska mm</b>	<b>Širina otpreska mm</b>	<b>Visina otpreska mm</b>	<b>Masa otpreska g</b>
1	100,78	58,46	10,11	9,01
2	100,79	58,47	10,11	9,02
3	100,77	58,47	10,12	9,01
4	100,78	58,48	10,12	9,01
5	100,78	58,48	10,12	9,01

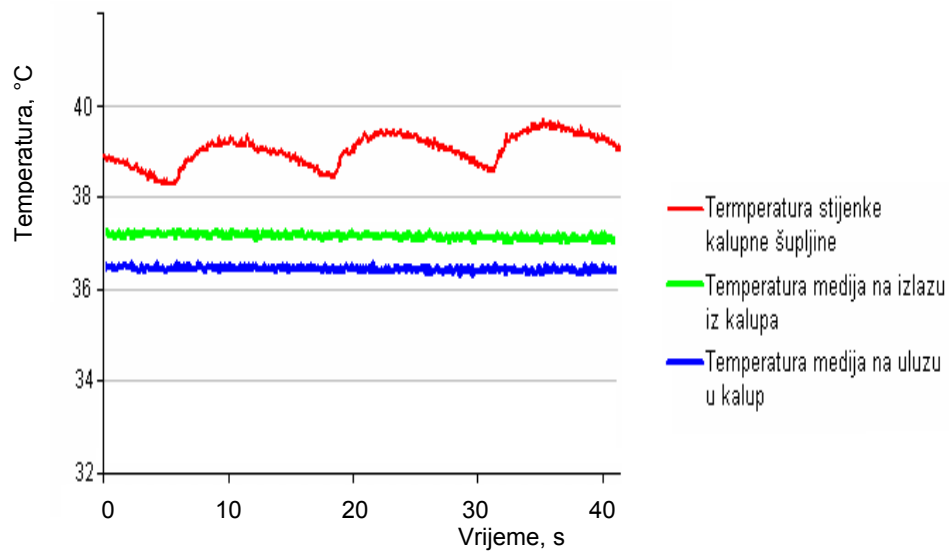
### Grafički prikaz temperature medija i temperature stijenke kalupne šupljine za stanja pokusa



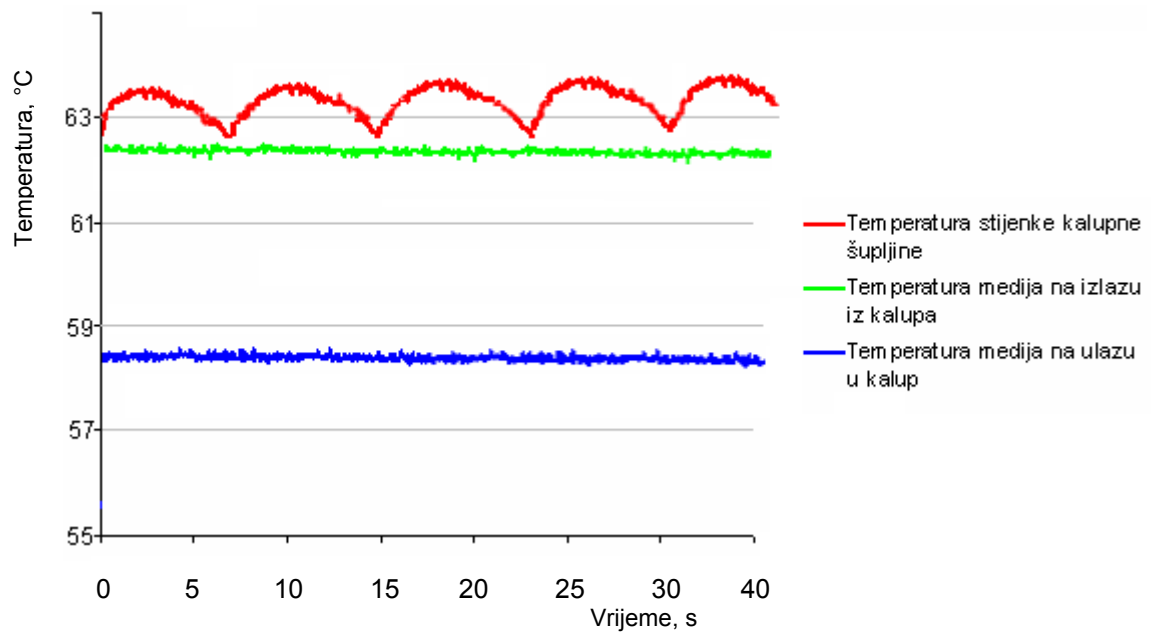
Slika 8.1. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 1*



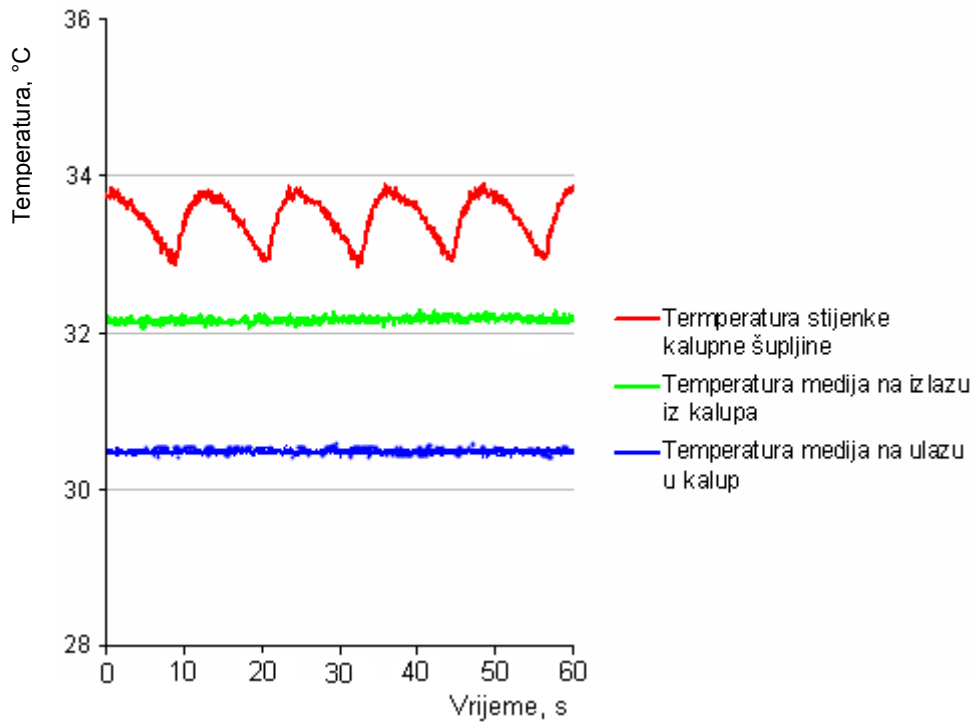
Slika 8.2. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 2*



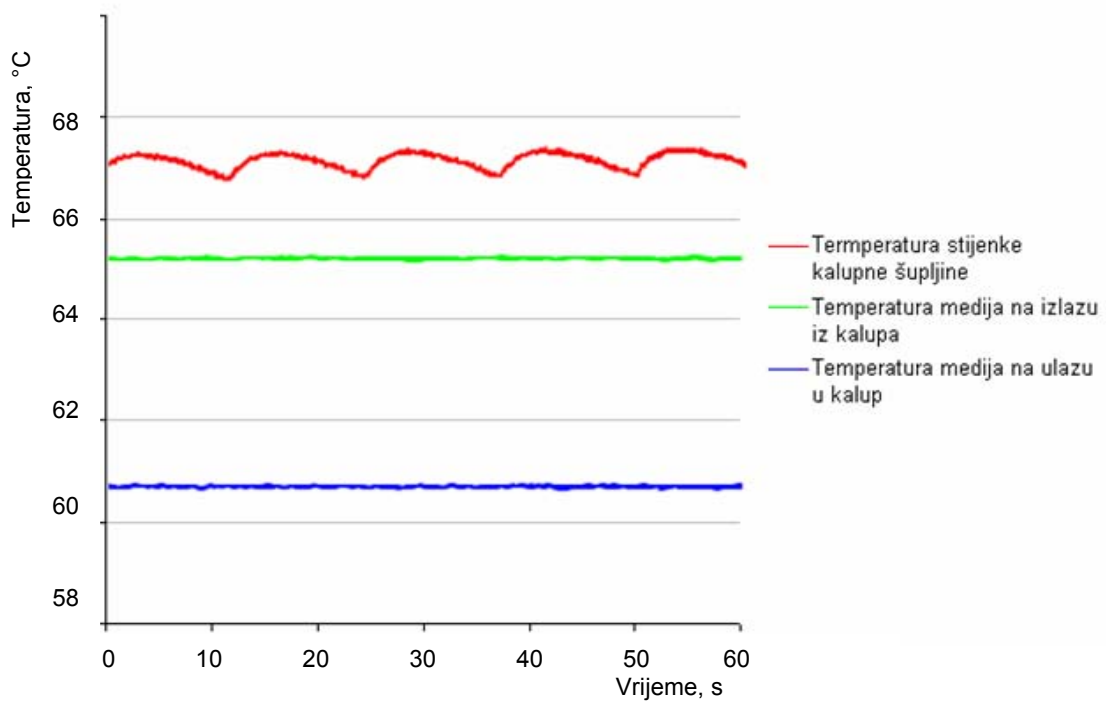
Slika 8.3. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenske kalupne šupljine, *Stanje 3*



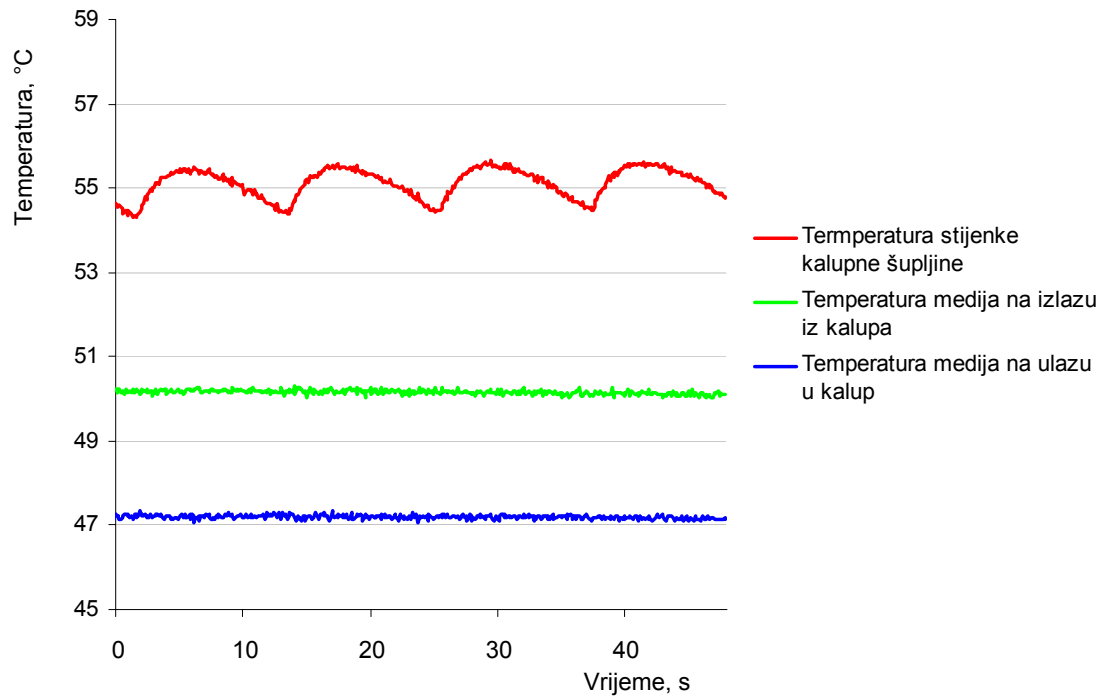
Slika 8.4. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenske kalupne šupljine, *Stanje 4*



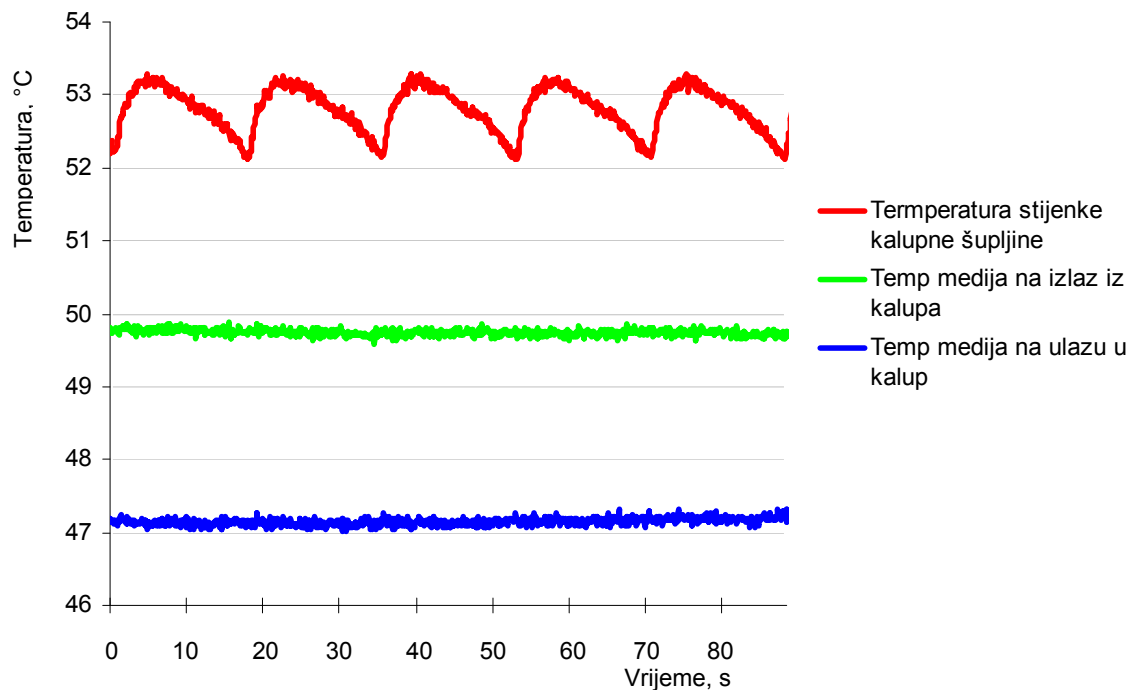
Slika 8.5. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 5*



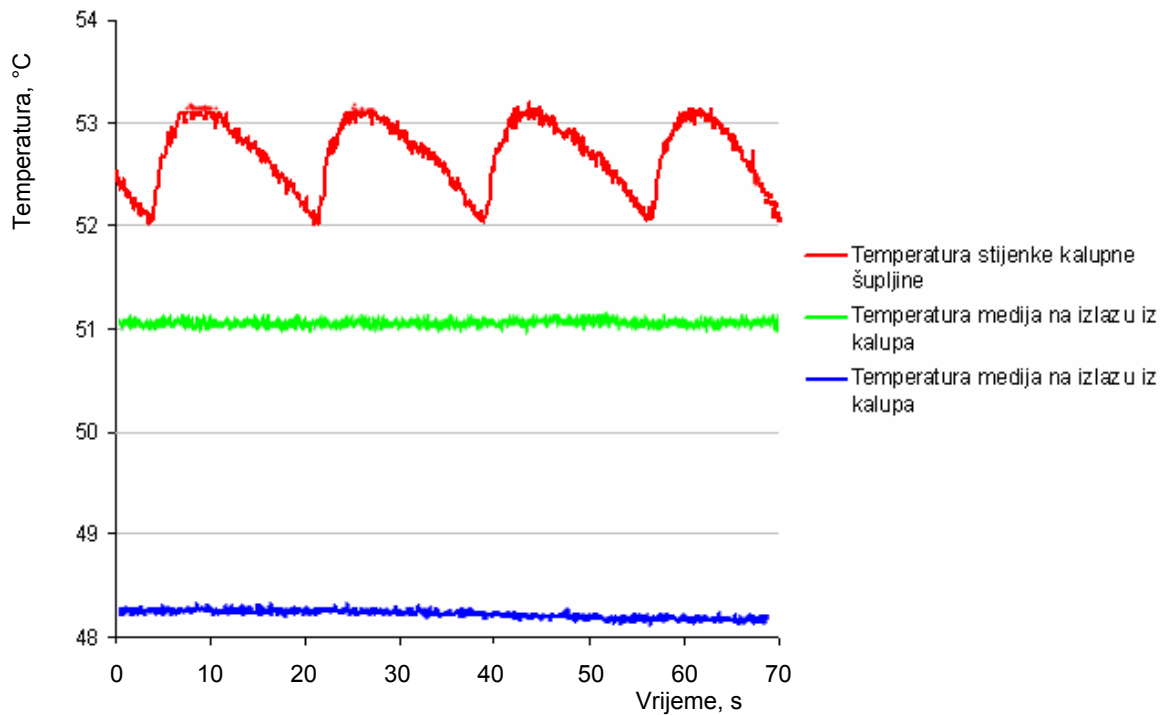
Slika 8.6. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 6*



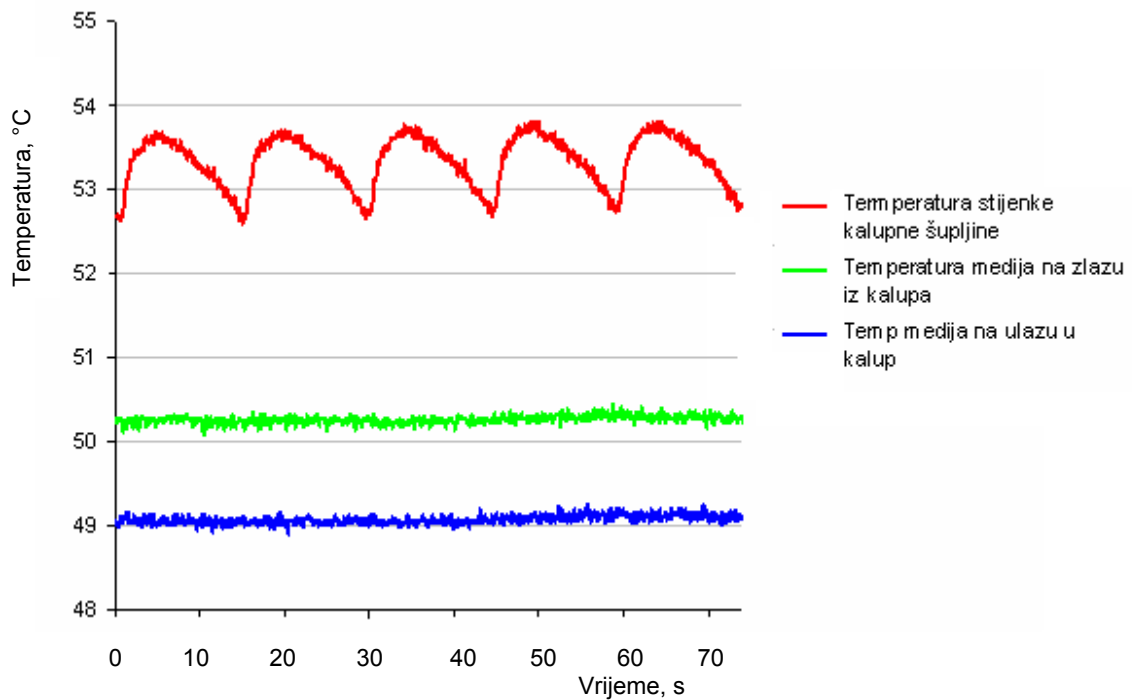
Slika 8.7. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 7*



Slika 8.8. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 8*

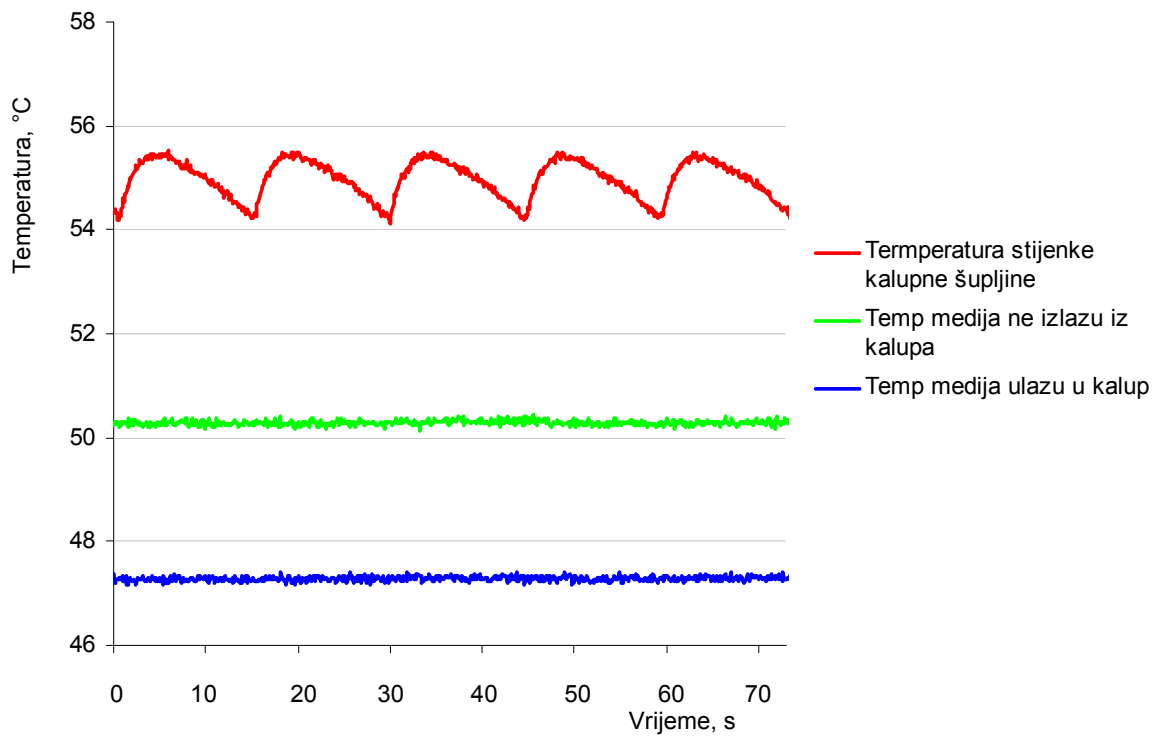


Slika 8.9. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 9*

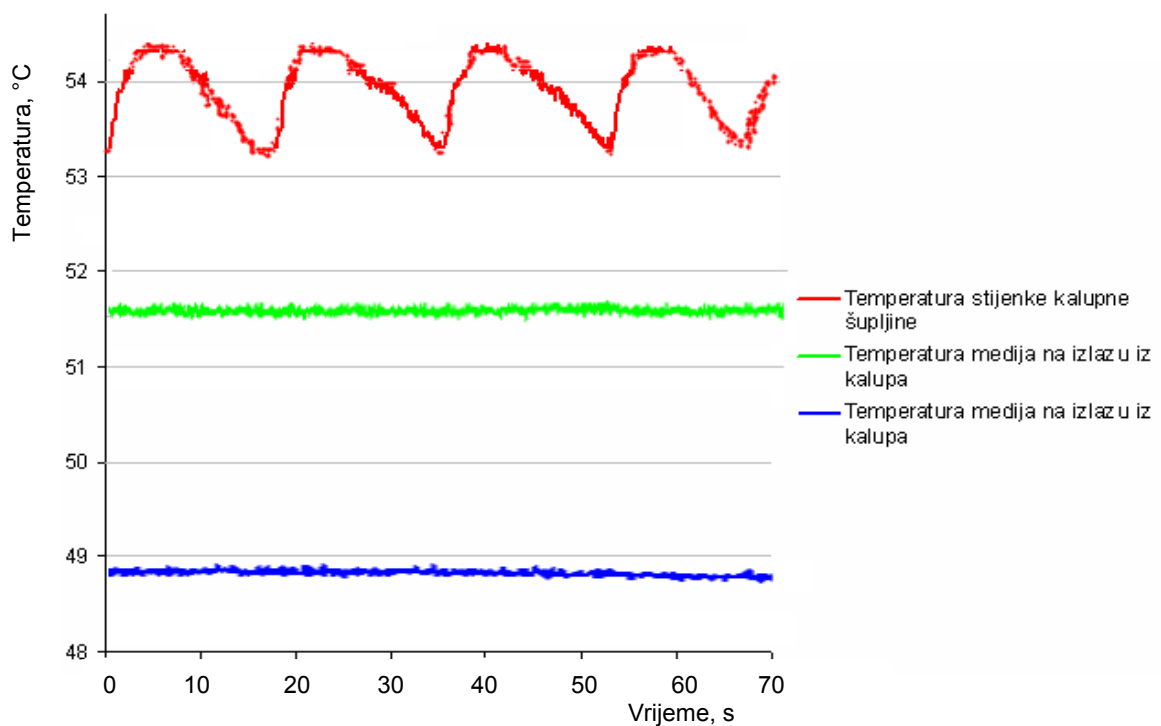


Slika 8.10. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 10*





Slika 8.11. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 11*



Slika 8.12. Dijagram temperature medija na ulazu i izlazu iz kalupa i temperature stijenke kalupne šupljine, *Stanje 12*