

Računalna simulacija postupka injekcijskog prešanja plastomera

Šimunić, Nikola

Undergraduate thesis / Završni 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:654434>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-03**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Nikola Šimunić

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Nikola Šimunić

Zagreb, 2009.

Fakultet strojarstva i brodogradnje
Povjerenstvo za diplomske i završne ispite

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, uz potrebne konzultacije i korištenje navedene literature.

NIKOLA ŠIMUNIĆ

Zagreb, 2009.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. INJEKCIJSKO PREŠANJE	2
2.1. Općenito o postupku	2
2.2. Tijek procesa injekcijskog prešanja.....	3
3. KALUP ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE.....	4
3.1. Funkcija kalupa.....	4
3.2. Osnovni elementi kalupa za injekcijsko prešanje.....	4
3.2.1. Kućište kalupa.....	5
3.2.2. Kalupna šupljina	5
3.2.3. Uljevni sustav	7
3.2.4. Sustav za vađenje otpresaka	8
3.2.5. Sustav za temperiranje.....	8
3.2.6. Sustav za odzračivanje.....	9
3.2.7. Sustav za vođenje i centriranje.....	9
4. CAD MODEL OTPRESKA	10
4.1. CAD model	10
4.2. Odabir materijala	11
4.3. Polipropilen.....	13
4.3.1. Opći podaci.....	13
4.3.2. Osnovna svojstva.....	14
4.3.3. Uporabna svojstva.....	14
4.3.4. Primjena	14
5. ODREĐIVANJE PARAMETARA ULJEVNOG SUSTAVA ZA SIMULACIJU INJEKCIJSKOG PREŠANJA	16
5.1. Uvod.....	16
5.2. Određivanje broja kalupnih šupljina.....	16

5.3. Određivanje rasporeda kalupnih šupljina	17
5.4. Određivanje uljevnog sustava i ušća	17
5.5. Određivanje sustava za temperiranje	20
6. MOLDFLOW – PROGRAM ZA SIMULACIJU	22
6.1. Uvod	22
6.2. Kratki opis rada i mogućnosti programa	22
7. SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	25
7.1. Primjena simulacije na modelu	25
7.1.1. Traženje položaja ušća (Gate locator)	25
7.1.2. Punjenje jedne kalupne šupljine	26
7.2. Rezultati simulacije i interpretacija rezultata	28
7.2.1. Vjerojatnost popunjavanja kalupne šupljine (e. Confidence of fill)	28
7.2.2. Predviđanje kvalitete otpreska (e. Quality prediction)	29
7.2.3. Vrijeme popunjavanja kalupne šupljine (e. Fill time)	30
7.2.4. Pad tlaka u kalupnoj šupljini (e. Pressure drop)	31
7.2.5. Temperatura čela taljevine (e. Flow front temperature)	32
7.2.6. Linije spajanja (e. Weld line)	32
7.2.7. Zaostali zračni mjehuri (e. Air traps)	33
7.2.8. Vrijeme hlađenja (e. Cooling time)	34
7.3. Primjena simulacije na uljevnom sustavu	35
7.3.1. Modeliranje uljevnog sustava	35
7.3.2. Simulacija punjenja uljevnog grozda	41
7.4. Rezultati simulacije i interpretacija rezultata	42
7.4.1. Tečenje rastaljenog polimera (e. Plastic flow)	42
7.4.2. Vjerojatnost popunjavanja kalupnih šupljina (e. Confidence of Fill)	44
7.4.3. Predviđanje kvalitete otpreska (e. Quality prediction)	44
7.4.4. Vrijeme popunjavanja (e. Fill Time)	45
7.4.5. Pad tlaka u kalupnoj šupljini (e. Pressure drop)	46
7.4.6. Temperatura čela taljevine (e. Flow front temperature)	47
7.4.7. Linije spajanja (e. Weld line)	48

7.4.8. Zaostali zračni mjehuri (e. Air traps).....	49
7.4.9. Vrijeme hlađenja (e. Cooling time).....	50
7.5. Optimiranje uljavnog sustava	51
7.6. Ponovljena simulacija sa novim parametrima	54
7.7. Rezultati simulacije i interpretacija rezultata	54
7.7.1. Tečenje rastaljenog polimera (e. Plastic flow).....	54
7.7.2. Vjerojatnost popunjavanja kalupnih šupljina (e. Confidence of fill)	55
7.7.3. Pad tlaka u kalupnoj šupljini (e. Pressure drop)	56
7.7.4. Temperatura čela taljevine (e. Flow front temperature)	57
8. ZAKLJUČAK.....	58
LITERATURA	59

SAŽETAK

U radu je opisana problematika vezana uz postupak injekcijskog prešanja. Ukratko je dan opis postupka injekcijskog prešanja, te opis kalupa za injekcijsko prešanje. Također je obraćena pozornost na definiranje sustava potrebnog za provedbu simulacije popunjavanja kalupne šupljine, odnosno injekcijskog prešanja. U radu je dan opis CAD modela koji je korišten za simulaciju, te postupak odabira materijala za primjenu u simulaciji. Pri izradi CAD modela korišten je softverski paket *Catia V5 R18*. Iznijet je opis *Moldflow Mold Advisera*, programa koji je korišten za simulaciju, te opis njegovih mogućnosti pri korištenju.

U radu je načinjena simulacija injekcijskog prešanja i podijeljena je na faze koje olakšavaju njezino praćenje. Svaka faza simulacije opisana je zasebno i po potrebi komentirana. Izvršena je optimizacija rezultata prve simulacije pomoću *Moldflow Mold Advisera*, te je na kraju dana usporedba dobivenih rezultata.

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Veličina	Jedinica
p_{drop}	- pad tlaka	Pa
p_{max}	- maksimalni tlak	Pa
t	- vrijeme hlađenja	s
t_{av}	- prosječno vrijeme hlađenja	s
ϑ	- temperatura	°C
ϑ_{max}	- maksimalna temperatura	°C
ϑ_{min}	- minimalna temperatura	°C
γ	- smična brzina	s ⁻¹
γ_{max}	- maksimalna smična brzina	s ⁻¹
τ	- smično naprezanje	N/m ²
τ_{max}	- maksimalno smično naprezanje	N/m ²

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Presjek ubrizgavalice za injekcijsko prešanje plastomera	2
Slika 2.2. Ciklus injekcijskog prešanja	3
Slika 3.1. Elementi uljavnog sustava	7
Slika 4.1. 3D model četkice	10
Slika 4.2. p - v - ϑ dijagram za materijal Borealis PP HC115M.....	13
Slika 5.1. Položaj ušća dobiven pomoću <i>Moldflow Mold Advisera</i>	18
Slika 5.2. Položaj ušća na modelu.....	18
Slika 5.3. Položaj ušća na modelu (uvećano).....	18
Slika 5.4. Dijagram odlučivanja za načelno određivanje vrste uljavnog sustava i ušća kalupa.....	19
Slika 5.5. Dijagram odlučivanja za načelno određivanje sustava za temperiranje kalupa.....	21
Slika 6.1. Predviđanje kvalitete.....	23
Slika 6.2. Definiranje rasporeda kalupnih šupljina	24
Slika 7.1. Prikaz mjesta pogodnih za smještanje ušća	25
Slika 7.2. Prikaz mjesta pogodnih za smještanje ušća	25
Slika 7.3. Odabrani materijal u <i>Moldflow Mold Adviseru</i>	26
Slika 7.4. Odabrane temperature u <i>Moldflow Mold Adviseru</i>	27
Slika 7.5. Predviđanje punjenja kalupne šupljine	28
Slika 7.6. Predviđanje kvalitete otpreska	29
Slika 7.7. Vrijeme punjenja.....	31
Slika 7.8. Pad tlaka u kalupnoj šupljini.....	31

Slika 7.9. Temperatura čela taljevine	32
Slika 7.10. Linija spajanja materijala	33
Slika 7.11. Zaostali zrak u kalupnoj šupljini	34
Slika 7.12. Vrijeme hlađenja	34
Slika 7.13. Koordinate ušća.....	35
Slika 7.14. Odabir rasporeda kalupnih šupljina	36
Slika 7.15. Dobiveni raspored kalupnih šupljina	36
Slika 7.16. Koordinate sljubnice	37
Slika 7.17. Koordinate uljevka.....	37
Slika 7.18. Postavke uljevnih kanala.....	38
Slika 7.19. Postavke ušća	39
Slika 7.20. Postavke uljevka	39
Slika 7.21. Postavke hladila u sustavu za temperiranje.....	40
Slika 7.22. Model uljevnog sustava s hlađenjem	40
Slika 7.23. Odabir željene analize.....	41
Slika 7.24. Izvešće o završenoj analizi.....	42
Slika 7.25. Tok rastaljenog polimera	43
Slika 7.26. Tok rastaljenog polimera	43
Slika 7.27. Popunjenost kalupne šupljine.....	44
Slika 7.28. Predviđanje kvalitete.....	45
Slika 7.29. Vrijeme popunjavanja	46
Slika 7.30. Pad tlaka u uljevnom sustavu.....	47

Slika 7.31. Temperatura čela taljevine	48
Slika 7.32. Linije spajanja	49
Slika 7.33. Zaostali zrak u kalupnoj šupljini	50
Slika 7.34. Vrijeme hlađenja	51
Slika 7.35. Odabir željene analize	52
Slika 7.36. Opcija <i>Automatically size</i>	52
Slika 7.37. Ušće 1 i Ušće 2	53
Slika 7.38. Tok rastaljenog polimera	54
Slika 7.39. Tok rastaljenog polimera	55
Slika 7.40. Vrijeme punjenja	55
Slika 7.41. Pad tlaka	56
Slika 7.42. Temperatura čela taljevine	57

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Temeljni slučajevi rasporeda kalupnih šupljina	6
Tablica 4.1. Pregled najčešćih zahtjeva i važnijih svojstava polimernih materijala	12
Tablica 4.2. Svojstva polipropilena.....	15
Tablica 7.1. Vrijednosti i rasponi parametara za procjenu kvalitete	30
Tablica 7.2. Usporedba parametara uljevnog sustava (prije i nakon uravnoteženja).....	53

1. UVOD

U današnje vrijeme jedan od najvažnijih cikličkih postupaka prerade plastomera je injekcijsko prešanje. To je postupak brzog ubrizgavanja plastomerne taljevine u temperiranu kalupnu šupljinu i njezino skrućivanje u izradak.

Sve veća kompliciranost otpresaka i kontinuirani razvoj novih plastomera u današnje vrijeme učinili su postupak injekcijskog prešanja vrlo složenim. Budući da kalup za injekcijsko prešanje predstavlja središnji dio sustava za injekcijsko prešanje u posljednje vrijeme sve veća pažnja posvećuje se njegovoj razradi u početnim fazama, kako bi se kasnije pogreške svele na minimum. U velikoj mjeri kao pomoćna sredstva pri konstrukciji kalupa koriste se različiti računalni programi za simulaciju koji služe za predviđanje zbivanja u kalupnoj šupljini.

Cilj ovog rada je detaljna analiza problematike vezana uz postupak injekcijskog prešanja, te simulacija postupka injekcijskog prešanja na primjeru kalupa s većim brojem kalupnih šupljina u jednom od dostupnih programa za simulaciju.

2. INJEKCIJSKO PREŠANJE

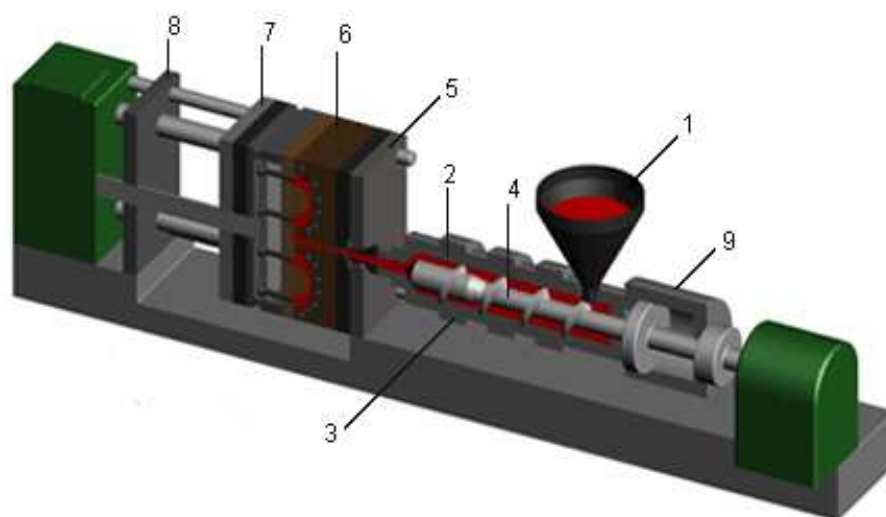
2.1. Općenito o postupku

Injekcijsko prešanje polimera je ciklički postupak praoblikovanja ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu.[1]

Polimer poprima oblik kalupne šupljine te hlađenjem postaje podoban za vađenje iz kalupa. Otpresci mogu biti različitih veličina i stupnja kompliciranosti. Nekad je osnovno načelo ubrizgavanja bilo ubrizgavanje klipom, a danas se ubrizgavanje vrši pomoću pužnog vijka (slika 2.1).

Sustav za injekcijsko prešanje sačinjavaju: [1]

- ubrizgavalica
- kalup
- temperiralo kalupa



Slika 2.1. Presjek ubrizgavalice za injekcijsko prešanje plastomera; [2]

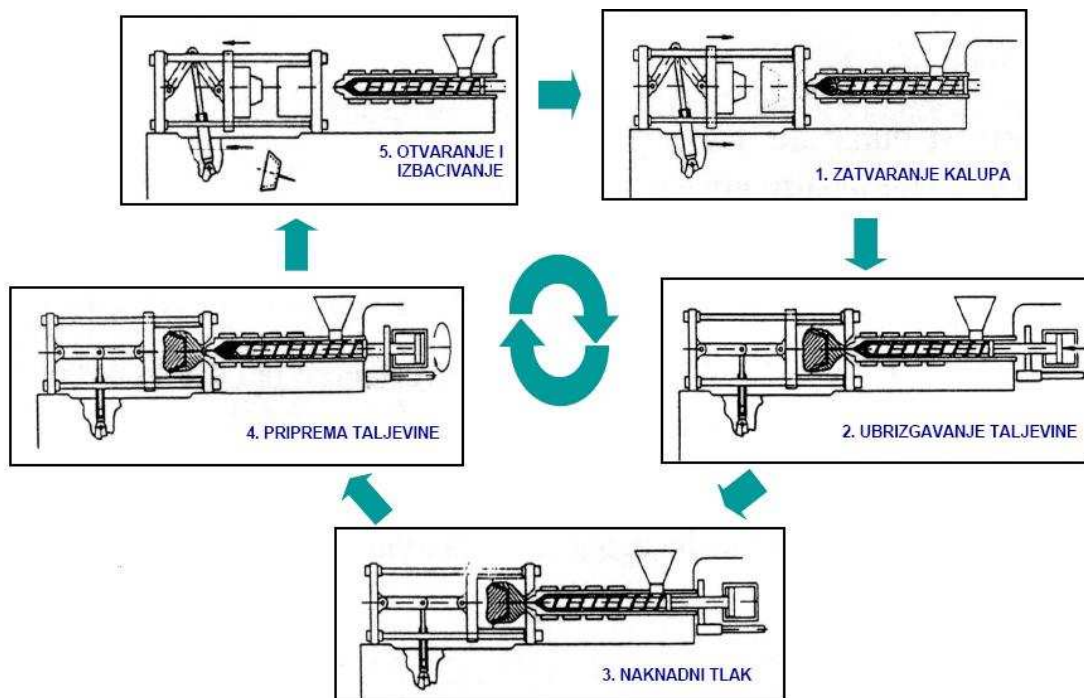
1 – lijevak, 2 – cilindar za taljenje, 3 – grijala, 4 – pužni vijak, 5 – nepomični nosač kalupa, 6 – kalup, 7 – pomični nosač kalupa, 8 – uporišna ploča, 9 – hidraulički cilindar

2.2. Tijek procesa injekcijskog prešanja

Materijal kroz lijevak ulazi u zagrijani cilindar za taljenje gdje ga zahvaća pužni vijak. Vrtnjom pužnog vijka materijal se potiskuje prema vrhu pužnog vijka (cilindra za taljenje).

Pritom se kao posljedica javlja sila reakcije koja pužni vijak nastoji pomaknuti unatrag. Zbog toga je u cilindru ubrizgavalice potrebno ostvariti usporni pritisak. Prije nego započne ubrizgavanje potrebno je primaknuti mlaznicu jedinice za pripremu taljevine i ubrizgavanje tako da nalegne na otvor uljevnog tuljca kalupa. Pužni vijak u toj fazi djeluje kao klip, te aksijalnim pomicanjem prema naprijed ubrizgava taljevinu u kalupnu šupljinu. Tijekom ubrizgavanja pužnom se vijku mora blokiranjem spriječiti vrtinja.

Završetak ubrizgavanja je kada su sve kalupne šupljine po mogućnosti istodobno popunjene, pritisak ubrizgavanja snizi se na naknadni pritisak, koji sprječava povratak taljevine iz kalupne šupljine. Pri injekcijskom prešanju naknadni pritisak djeluje do trenutka kad se spojno mjesto između kalupne šupljine i uljevnog sustava ušća toliko ohladi i očvrsne da više nije moguć protok taljevine kroz ušće. Potom se pužni vijak ponovno počne okretati i uvlačiti polimer u zonu cilindra za taljenje pripremajući taljevinu za sljedeći ciklus.[3]



Slika 2.2. Ciklus injekcijskog prešanja [4]

3. KALUP ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE

3.1. Funkcija kalupa

Funkciju kalupa za injekcijsko prešanje moguće je definirati kao praoblikovanje ili strukturiranje materijala u zadani makrogeometrijski oblik i kakvoću površine polimerne tvorevine. Temeljna zadaća kalupa je ispunjenje te funkcije. Kalup mora osigurati prihvaćanje taljevine i njeno hlađenje do postizanja oblika otpreska.

3.2. Osnovni elementi kalupa za injekcijsko prešanje

Kalup koji je i sam kompliciran i kompleksan sustav u injekcijskom prešanju smatra se podsustavom sustava za injekcijsko prešanje plastomera. Podsustavi koji čine kalup sposobnim za ispunjenje osnovnih parcijalnih funkcija su: [3]

- kućište kalupa
- kalupna šupljina
- uljevni sustav
- sustav za vađenje otpreska
- sustav za temperiranje
- sustav za odzračivanje
- sustav za vođenje i centriranje.

3.2.1. Kućište kalupa

Kućište kalupa za injekcijsko prešanje čini slog ploča i elemenata za njihovo povezivanje, koji zajedno čine nosivu konstrukciju kalupa. [3]

Na oblik i dimenzije kućišta najviše utječu oblik i dimenzije otpreska, predviđena količina proizvodnje te stupanj automatizacije.

Kućište svojom izvedbom mora osigurati jednostavno i sigurno pričvršćenje na ubrizgavalicu, te preuzeti sve sile koje djeluju na kalup. Sile mogu biti unutarnje (tlak taljevine u kalupnoj šupljini i sila uzgona) i vanjske (sila zatvaranja kojom djeluje jedinica za zatvaranje ubrizgavalice).

Prema izvedbi kućišta kalupa mogu biti: [3]

- pravokutna
- okrugla
- posebna

3.2.2. Kalupna šupljina

Kalupna šupljina je prazan prostor što ga zatvaraju pomični i nepomični dijelovi kalupa i u nju se ubrizgava polimer potrebne smične viskoznosti. Temeljni slučajevi rasporeda kalupnih šupljina prikazani su u tablici 3.1.


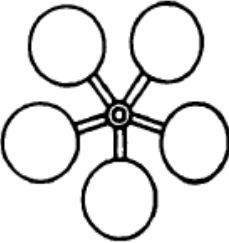
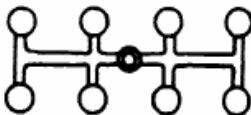
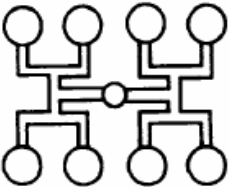
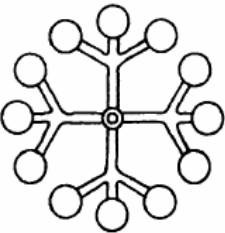
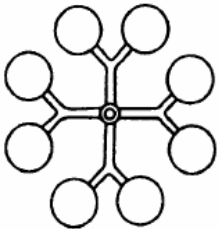
S obzirom na broj otpresaka koji se istodobno prešaju i broj mjesta ubrizgavanja razlikuju se sljedeći načini ubrizgavanja:

- a) izravno ubrizgavanje – primjenjuje se kod kalupa s jednom kalupnom šupljinom te se uljevni sustav sastoji samo od uljevka
- b) posredno ubrizgavanje – najčešće se primjenjuje kod kalupa s više kalupnih šupljina ili kalupa s jednom kalupnom šupljinom ako se ubrizgava na više mjesta

Pri raspodjeli kalupnih šupljina u kalupu teži se tome da uljevni put do kalupnih šupljina bude što kraći i jednak za sve kalupne šupljine. Osnovni uvjeti kojih se treba pridržavati pri optimalnom rasporedu kalupnih šupljina su:

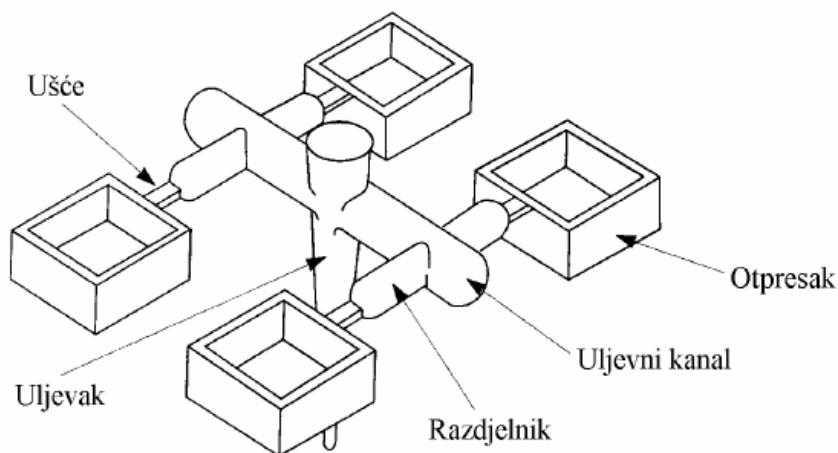
- potrebno je ostvariti najbolji mogući raspored radi postizanja minimalne veličine kalupa
- uljevni sustav treba što kraćim putem povezati mlaznicu ubrizgavalice s kalupnom šupljinom
- potrebno je ostvariti simetričan raspored kalupnih šupljina zbog zatvaranja kalupa.

Tablica 3.1. Temeljni slučajevi rasporeda kalupnih šupljina [5]

		PREDNOSTI	NEDOSTACI
ZVJEZDASTI RASPORED			
Neuravnoteženi	Uravnoteženi	Isti put tečenja do svih kalupnih šupljina. Povoljan raspored za vađenje, naročito kod kalupa s mehaničkim odvrtanjem navojne jezgre.	Ograničen broj kalupnih šupljina. Kod većeg broja kalupnih šupljina veliki je utrošak materijala (ići na redni raspored).
			
REDNI RASPORED			
Neuravnoteženi	Uravnoteženi	Mogući veći broj kalupnih šupljina nego kod zvjezdastog rasporeda. Kod većeg broja kalupnih šupljina razdjelnici su kraći nego kod zvjezdastog rasporeda (manji utrošak materijala).	Nejednolik put tečenja do svih kalupnih šupljina. Istovremeno punjenje kalupnih šupljina je moguće samo uz različite presjke razdjelnika i/ili ušća (korekcija poprečnog presjeka ušća).
			
SIMETRIČNI RASPORED			
Neuravnoteženi	Uravnoteženi	Isti put tečenja do svih kalupnih šupljina. Nije potrebna korekcija poprečnog presjeka ušća.	Veliki obujam uljavnog sustava, veliki otpad. Preporučuje se primjena vrućeg uljavnog sustava.
			

3.2.3. Uljevni sustav

Uljevni sustav čine jedna ili više uljevnih kanala povezanih u cjelinu koja će lakše i brže provesti polimernu taljevinu do kalupne šupljine pa praobliskovanje otpreska. [3]



Slika 3.1. Elementi uljevnog sustava [5]

Pri injekcijskom prešanju razlikuju se sljedeće vrste uljevnih sustava:

- hladni uljevni sustav
 - topli uljevni sustav
- a) Hladni uljevni sustav – materijalni izlaz iz kalupa sastoji se od otpreska i uljevnog sustava. Takav uljevni sustav omogućuje jednoličan i siguran sustav bez zastoja, osobito je značajan kod jako razvedenih kanala i otpresaka većeg obujma te nema smetnje kod zaostajanja uljevka i potrebe za odvajanjem otpreska od uljevnog sustava. Slikom 3.1 prikazani su elementi uljevnog sustava [3]
- b) Topli uljevni sustav – primjena kalupa s vrućim uljevnim sustavom omogućuje sniženje troškova proizvodnje, te se zbog brojnih prednosti sve češće primjenjuje i omogućuje brzu i potpunu automatizaciju. [3]

3.2.4. Sustav za vađenje otpresaka

Sustav za vađenje otpresaka može biti vrlo raznolikih izvedbi tj. može biti sastavni dio kalupa ili može djelovati izvana kao dio dodatne opreme.

Prema načinu djelovanja mogu se podijeliti na: [3]

- mehaničke
- hidrauličke
- mješovite

Pri injekcijskom prešanju plastomera najčešća su izbacivala s mehaničkim sustavom za vađenje otpresaka, sljedećih oblika: [3]

- 1) Izbacivala štapićastog oblika
- 2) Izbacivala oblika puškice
- 3) Izbacivala tanjurastog oblika
- 4) Pločasta skidala

3.2.5. Sustav za temperiranje

Sustavom za temperiranje kalupu se dovodi ili odvodi toplina potrebna za postizanje propisanog temperaturnog polja u kalupu.

Pod temperiranjem se podrazumijeva postizanje zadane temperature stijenke kalupne šupljine, bez obzira dovodi li se ili odvodi pri tome toplina. Pravilna izmjena topline u kalupu odlučujuće utječe na trajanje i odvijanje ciklusa injekcijskog prešanja. [3]

Osnovno načelo je optimiranje temperaturne razlike između taljevine i temperature stijenke kalupne šupljine. Općenito je moguće razlikovati podtlačno i pretlačno temperiranje kalupa. Pri injekcijskom prešanju najčešće se za temperiranje kalupa koristi medij za temperiranje (plin, vodena para, ulje, voda i voda s dodacima). [5]

3.2.6. Sustav za odzračivanje

Kod ciklusa injekcijskog prešanja zbog zaostalog zraka u kalupnim šupljinama potrebno je osigurati sustav za odzračivanje, jer zaostali zrak može uzrokovati: [3]

- pregrijanje taljevine, posebice na liniji spajanja
- vidljivu liniju spajanja tankostjenih otpresaka
- nepopunjenost tankostjenih otpresaka
- odstupanje dimanzija otpreska

Odzračivanje se najčešće vrši kroz provrte za vođenje izbacivala. Kod kružnih otpresaka odzračivanje se vrši pomoću polukružnih kanala na sljubnici kalupa. U pravilu otvore za odzračivanje treba postaviti na ono mjesto koje će taljevina posljednje popuniti. Mjesto odzračivanja moguće je ustanoviti na temelju iskustva ili simuliranjem punjenja kalupne šupljine. [3]

3.2.7. Sustav za vođenje i centriranje

Sustav za vođenje i centriranje je bitan kako bi se osiguralo što točnije nalijeganje jednog dijela kalupa na drugi. Razlikuju se sustav za vanjsko i unutarnje centriranje. [3]

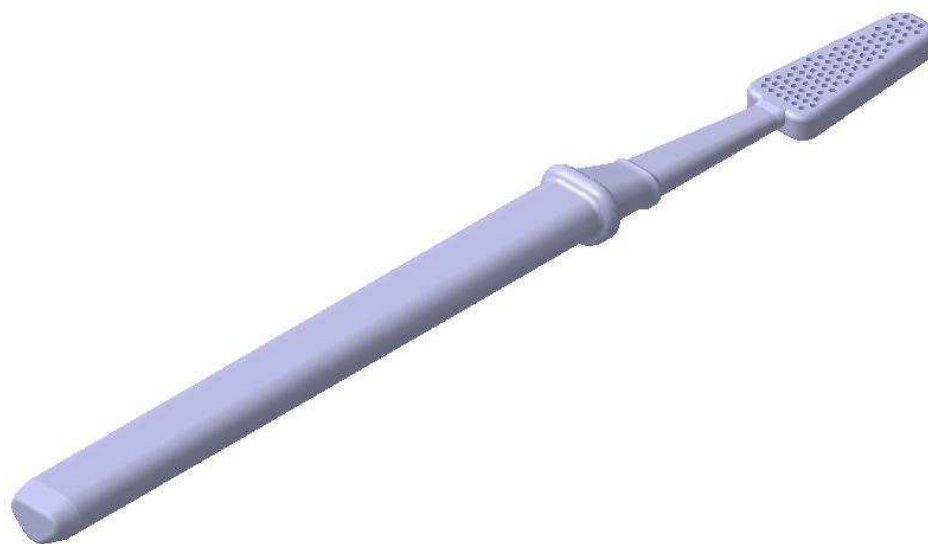
Sustav za unutarnje vođenje i centriranje služi za vođenje i centriranje kalupnih ploča, te ostalih elemenata kalupa pri otvaranju i zatvaranju.

Vanjsko centriranje važno je radi točnog pozicioniranja na nosače kalupa ubrizgavalice, a izvodi se pomoću prstena za centriranje.

4. CAD MODEL OTPRESKA

4.1. CAD model

U okviru ovog rada potrebno je simulirati injekcijsko prešanje otpreska u kalup s većim brojem kalupnih šupljina. Kako model za simulaciju nije definiran u samome zadatku, odlučeno je da se razvije novi model higijenske četkice za zube. U programskom paketu *Catia V5 R18* načinjen je 3D model koji se ubacuje u *Moldflow Mold Adviser*. Na slici 4.1 prikazan je 3D model četkice. Iako je većina četkica na tržištu višekomponentna, zbog složenosti postupka simulacije koristit će se model koji je u cijelosti izrađen od samo jednog polimera.



Slika 4.1. 3D model četkice

4.2. Odabir materijala

Prilikom razvoja novoga proizvoda potrebno je voditi računa o brojnim zahtjevima na proizvod od strane korisnika. Veliku ulogu u razvoju novog proizvoda ima odabir materijala, koji izravno utječe na buduća mehanička i uporabna svojstva proizvoda.

Svojstva se definiraju kao reakcije, promjene stanja ili druge pojave u materijalu izazvane djelovanjem raznih (unutarnjih i vanjskih) čimbenika. Polimerne materijale moguće je opisati velikim brojem značajki. Pri tom opisu razlikuju se unutarnja (intrinzična, vlastita, stvarna, prava) svojstva, proizvodna svojstva (proizvodnja, transport i skladištenje, obrada i dorada, uporaba, te otpadna i reciklična svojstva), te svojstva proizvoda. Navedene kategorije svojstava u čvrstoj su međusobnoj vezi. Dok su unutarnja svojstva i proizvodna svojstva uvijek vezana za tvar, odnosno materijal, svojstva proizvoda vezana su za objekt, ona ovise o veličini i obliku proizvoda. [7]

Temeljni koraci pri izboru materijala su: [7]

- definiranje zahtjeva
- predizbor (izbor više materijala koji zadovoljavaju postavljene zahtjeve)
- izbor optimalnog materijala (na temelju detaljnije analize svojstava materijala i cijene)

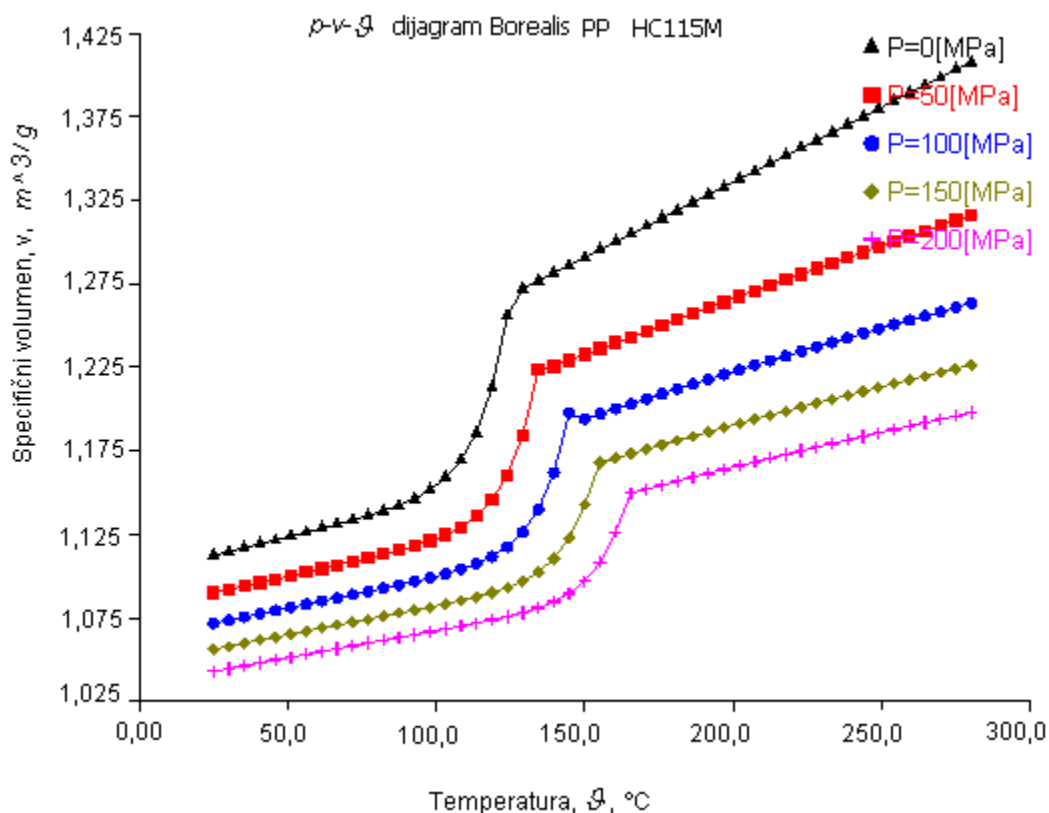
U tablici 4.1. dan je pregled najčešćih zahtjeva i važnijih svojstava polimernih materijala.

Tablica 4.1. Pregled najčešćih zahtjeva i važnijih svojstava polimernih materijala [7]

SVOJSTVA
Svojstva na koja se ne može bitno utjecati konstrukcijskim oblikovanjem proizvoda
Gustoća Prozirnost (proziran, poluproziran, neproziran) Kvaliteta površine Toplinska provodnost Toplinska rastezljivost Toplinska postojanost Temperaturne granice primjene (najviša i najniža temperatura) Temperatura omekšavanja (platomeri – metoda po Vicat-u) Temperatura postojanosti oblika (duromeri – metoda po Martensu) Kemijska postojanost Postojanost prema UV – zračenju Otpornost na gorenje Tarna svojstva (faktor trenja, otpornost na trošenje) Cijena
Svojstva koja između ostalog bitno ovise o obliku proizvoda
Mehanička svojstva Čvrstoća Modul elastičnosti Prekidno istezanje Žilavost Tvrdća Svojstva povezana s preradom materijala i/ili izradom proizvoda Preradbena svojstva

Odabrani materijal trebao bi imati dobro uravnotežena kemijska i mehanička svojstva. Trebao bi biti kemijski inertan, tj. mora biti otporan na slabe kiseline i lužine i ne smije bubriti u dodiru s vodom. Poželjna je dobra elastičnost, relativno mala gustoća i niska cijena.

Kao materijal za izradu odabran je polipropilen trgovačkog naziva *Borealis PP HC115M* (homopolimer) koji u velikoj mjeri zadovoljava tražena svojstva, dovoljno je žilav, a ujedno i dovoljno fleksibilan. Kemijski i toplinski je postojan. Na slici 4.2. prikazan je p - v - ϑ dijagram materijala Borealis PP HC115M.



Slika 4.2. p - v - ϑ dijagram za materijal Borealis PP HC115M

4.3. Polipropilen

4.3.1. Opći podaci

Polipropilen pripada skupini široko primjenjivih kristalastih plastomera koji posjeduju dobro uravnotežena kemijska, toplinska, mehanička i električna svojstva, a lako se prerađuje. Sintetiziraju se pomoću Ziegler – Natta katalizatora koji omogućuju dobivanje pravilne strukture (izotaktne i sindiotaktne). Uglavno se prerađuje injekcijskim prešanjem, puhanjem i toplim oblikovanjem. [7]

4.3.2. Osnovna svojstva

Polipropilen ima najnižu gustoću od svih polimera ($\rho = 900 \text{ kg/m}^3$). Osim toga ovaj plastomer se u usporedbi s polietilenom odlikuje višom čvrstoćom i višim modulom elastičnosti. Nedostatak mu je to što postaje krhak već malo ispod $0 \text{ }^\circ\text{C}$. [7]

4.3.3. Uporabna svojstva

Uporabna svojstva polipropilena uglavnom ovise o tipu polimera (homopolimer ili blok kopolimer), molekularnoj masi i njezinoj razdiobi, morfološkoj građi (kristalnost), dodacima (punilima i ojačalima) te parametrima prerade. Homopolimerni tipovi su postojani prema deformaciji, visoke su krutosti i rastezne čvrstoće, tvrdoće površine i dobre žilavosti pri sobnim temperaturama i slabe otpornosti prema starenju, nepravilno im je stezanje u kalupnoj šupljini i teško se lijepe. Kopolimeri imaju izvrsnu žilavost. Općenito polopropilen ima malu gustoću, prihvatljivu cijenu, dobra mehanička, toplinska i električna svojstva, izvrsnu temperaturnu postojanost i veliku elastičnost. Posebni tipovi postojani su prema UV zračenju i samogasivi su. [7]

4.3.4. Primjena

Polipropilen se primjenjuje za izradu tehničkih dijelova i to pri višim opterećenjima nego polietilen. Velike su mogućnosti variranja svojstava i primjene obzirom na mogućnosti miješanja i proizvodnje kompozita. Tako se od propilena izrađuju industrijski dijelovi elektro i elektronske industrije, kemijskih postrojenja, šuplja tijela, cijevi, spremnici, dijelovi armatura, dijelovi postojani prema vrućoj vodi, igračke, posude u kućanstvu, tehnički dijelovi strojeva za pranje posuđa i rublja, u tekstilnoj i automobilskoj industriji (unutarnje uređenje automobila – razne obloge), u građevinarstvu, zrakoplovnoj industriji, za razna pakovanja (ambalaža) itd. U tablici 4.2. prikazana su svojstva polipropilena. [7]

Tablica 4.2. Svojstva polipipilena [7]

SVOJSTVO	Mjerna jedinica	Iznos
Modul elastičnosti	N/mm ²	1100 do 1300
Granica razvlačenja	N/mm ²	32 do 37
Istezanje na granici razvlačenja	%	12 do 16
Istezljivost (Prekidno istezanje)	%	600
Temperatura omekšavanja po VICATu	° C	90 do 100
Područje taljenja kristalita	° C	155 do 165
Specifični otpor prolaza	Ωcm	10 ¹⁶
Dielektričnost	F/m	2,3
Dielektrični faktor gubitaka	-	0,0002 do 0,0007
Čvrstoća proboja	KV/mm	100

5. ODREĐIVANJE PARAMETARA ULJEVNOG SUSTAVA ZA SIMULACIJU INJEKCIJSKOG PREŠANJA

5.1. Uvod

Iako u okviru ovog rada nije predviđena konstrukcija kalupa, za definiranje parametara pri simulaciji postupka injekcijskog prešanja potrebno je okvirno odrediti neke osnovne značajke, kao što su: broj kalupnih šupljina, raspored kalupnih šupljina, sustav za temperiranje, uljevni sustav i položaj ušća.

5.2. Određivanje broja kalupnih šupljina

Postoji nekoliko kriterija na temelju kojih se određuje optimalni broj kalupnih šupljina: [5]

- stvarni broj kalupnih šupljina koji ovisi o veličini serije
- kvalitetni broj kalupnih šupljina koji se određuje na temelju kvalitete proizvoda
- planski broj kalupnih šupljina na temelju roka isporuke proizvoda
- tehnički broj kalupnih šupljina određen na temelju karakteristika ubrizgavalice
- ekonomičan broj kalupnih šupljina na temelju troškova izrade proizvoda

Ukoliko nije strogo definiran od strane naručitelja, broj kalupnih šupljina u praksi se najčešće određuje na temelju iskustva, i to prema upotrijebljenom materijalu, prema geometriji i veličini serije otpreska.

Za ovaj slučaj veličine serije, karakteristike ubrizgavalice, troškovi i rokovi isporuke nisu bitni pa nisu razmatrani. U obzir će se uzeti samo broj kalupnih šupljina koji se određuje na temelju kvalitete proizvoda. S osvrtnom na kvalitetu i pretpostavljajući da će broj kalupnih šupljina osigurati zadovoljavajuću kvalitetu, broj kalupnih šupljina odabran je proizvoljno i on iznosi osam kalupnih šupljina.

5.3. Određivanje rasporeda kalupnih šupljina

Kod određivanja rasporeda kalupnih šupljina nastoji se postići raspored koji će najbolje iskoristiti obujam kalupa, ujedno uzimajući u obzir da putovi tečenja polimera budu što kraći. Odabran je neuravnoteženi redni raspored.

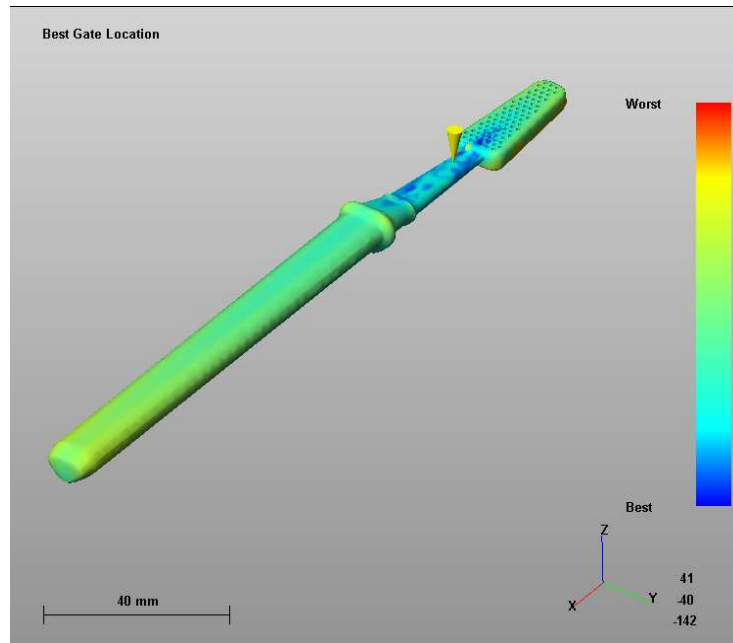
5.4. Određivanje uljavnog sustava i ušća

Kod odabira uljavnog sustava i ušća prvo je potrebno odrediti o kojem se tipu uljavnog sustava radi, da li se koristi topli ili hladni uljevni sustav.

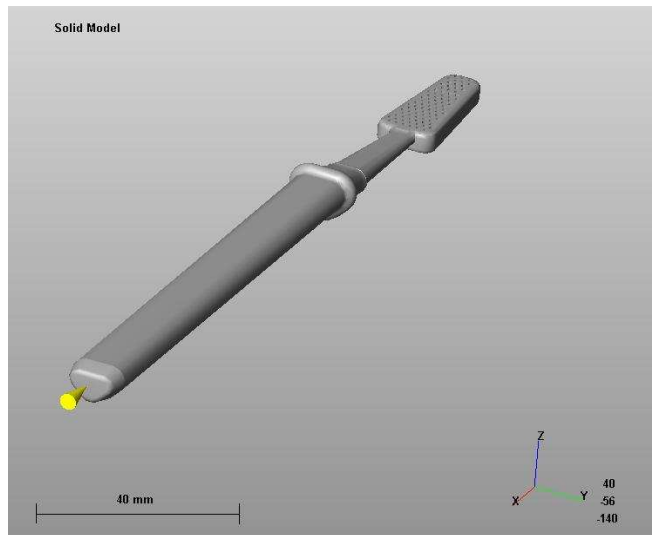
Na temelju analiza o vrstama uljavnog sustava i ušća načinjen je dijagram odlučivanja (slika 5.4.) u kojem pune linije vode do najpovoljnijeg i/ili najčešćeg načelnog rješenja, dok isprekidane linije ukazuju na mogućnost postojanja drugog rješenja, koje je manje povoljno ili rjeđe u upotrebi. [5]

Odabran je čvrsti uljevni sustav s običnim točkastim ušćem.

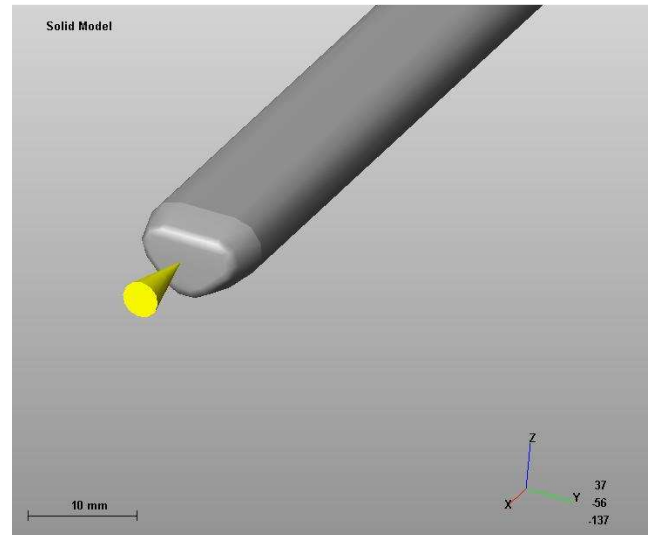
U poglavlju 7.1.1 *Traženje položaja ušća (Gate locator)* opisan je odabir i dobiven položaj ušća pomoću *Moldflow Mold Advisera* (slika 5.1.). Program predlaže smještanje ušća na vratu četkice, no zbog estetskih i konstrukcijskih razloga ušće će se smjestiti na vrhu drške četkice (slika 5.2.). Položaj ušća označen je žutim stošcem.



Slika 5.1. Položaj ušća dobiven pomoću *Moldflow Mold Advisera*

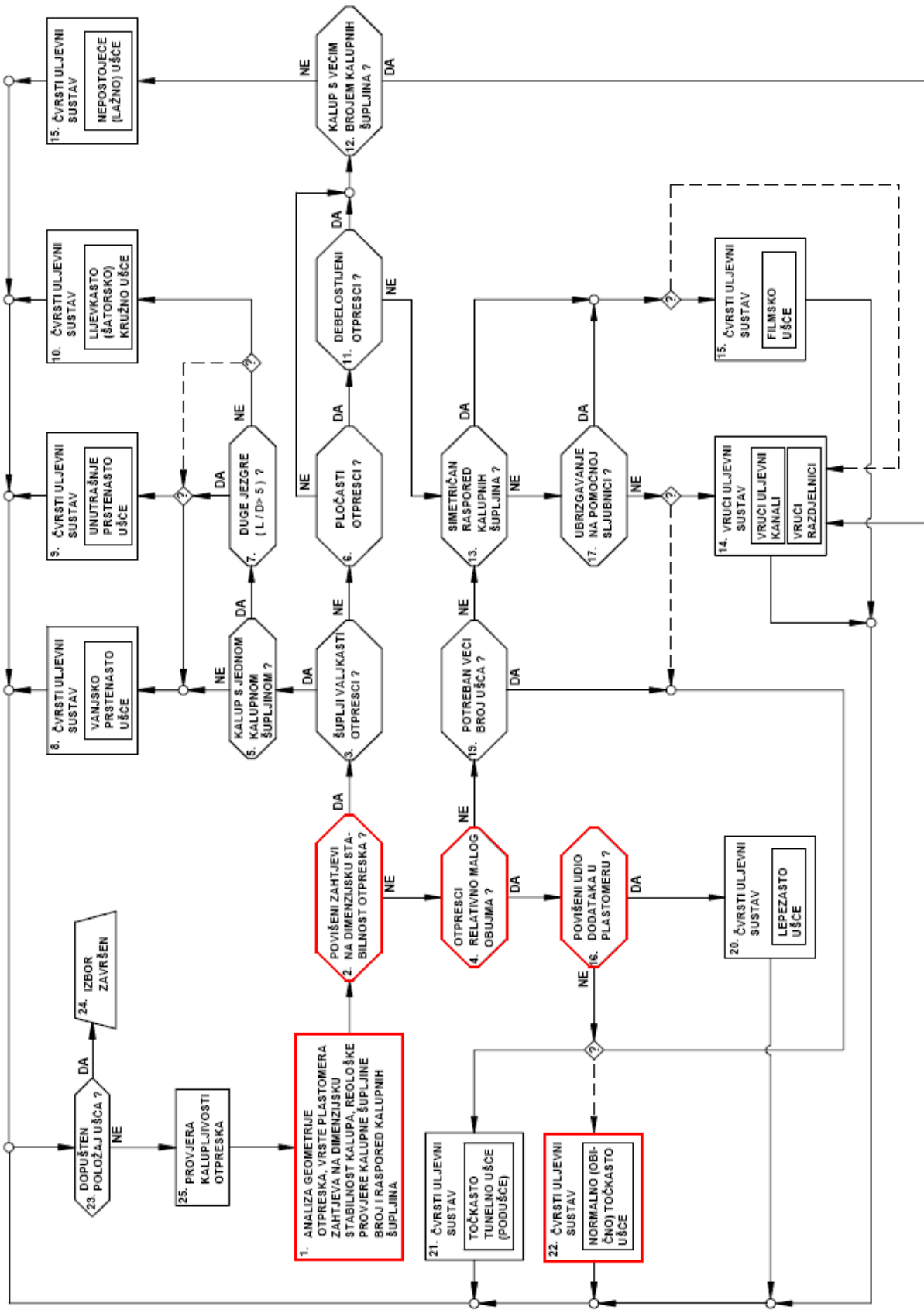


Slika 5.2. Položaj ušća na modelu



Slika 5.3. Položaj ušća na modelu (uvećano)

Prateći tok dijagrama odlučivanja za određivanje vrste uljavnog sustava i ušća kalupa. Izabran je čvrsti uljevni sustav, te normalno (obično) točkasto ušće.

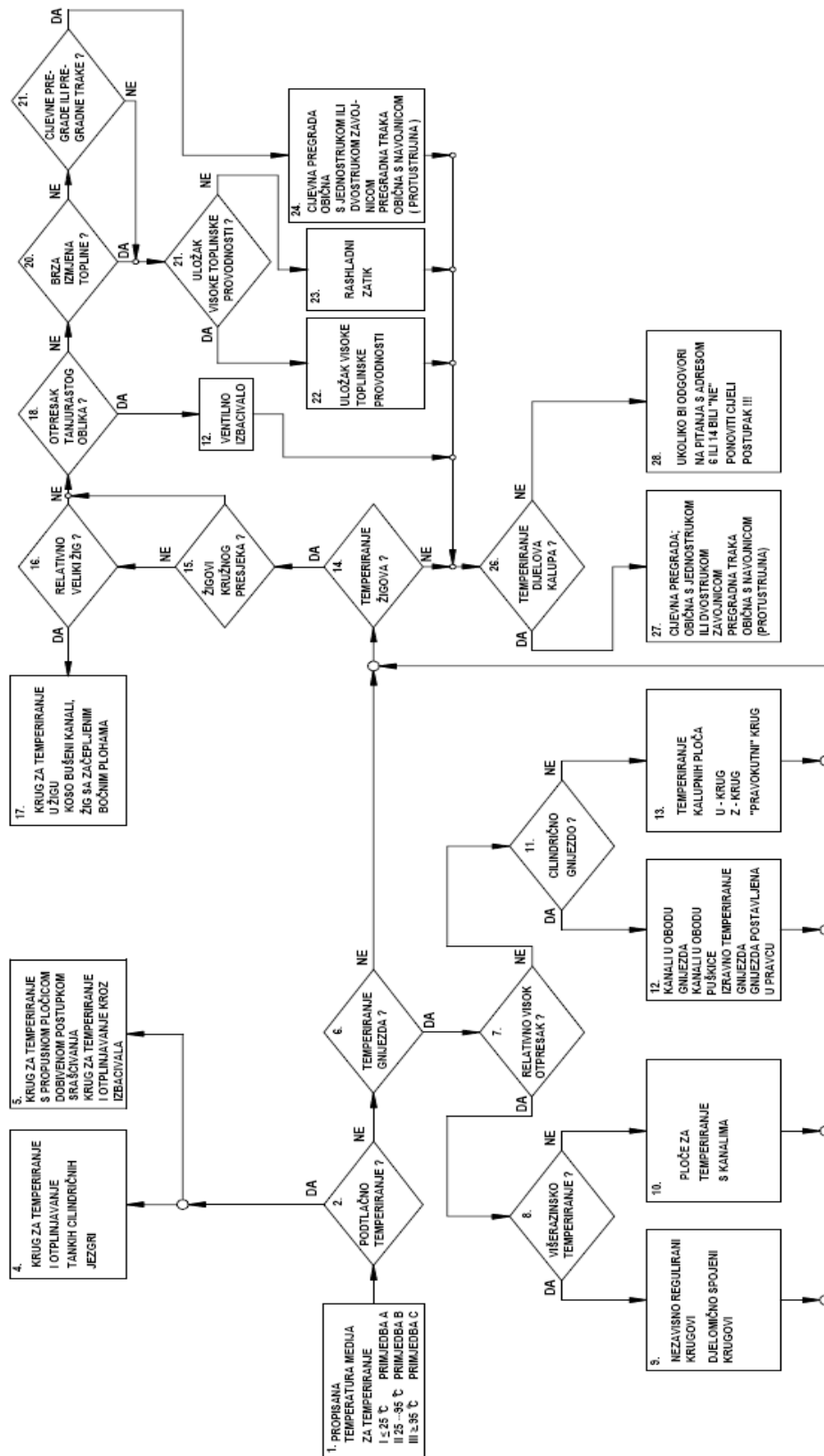


Slika 5.4. Dijagram odlučivanja za načelno određivanje vrste uljevnog sustava i ušća kalupa [5]

5.5. Određivanje sustava za temperiranje

U ovom koraku potrebno je odrediti način temperiranja kalupa, te načelno odrediti položaj kanala za temperiranje. Za načelno određivanje sustava za temperiranje koristi se dijagram odlučivanja (slika 5.5.) .

Sustav za temperiranje kalupa biti će iskreiran pomoću *Cooling System Wizarda* u *Moldflow Mold Adviseru*, te se neće određivati pomoću dijagrama odlučivanja.



Slika 5.5. Dijagram odlučivanja za načelno određivanje sustava za temperiranje kalupa [6]

6. MOLDFLOW – PROGRAM ZA SIMULACIJU

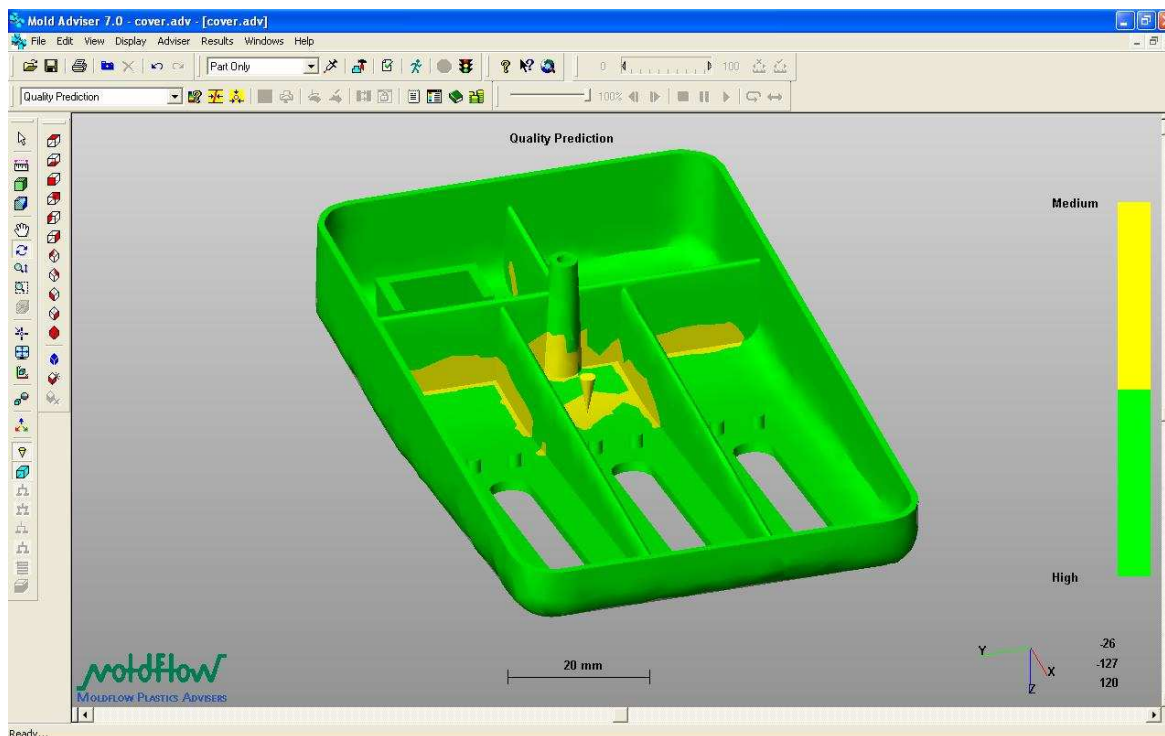
6.1. Uvod

Kako bi alati za CAE analize bili uistinu korisni moraju pružiti upotrebljive informacije na temelju kojih se donose konstrukcijska rješenja. *Moldflow Plastics Adviser* (MPA) omogućuje korisnicima da predvide i rješe probleme koji se javljaju kod procesa injekcijskog prešanja još u ranim fazama razvoja proizvoda i kalupa. *Moldflow Mold Adviser* je modul koji omogućuje simulaciju toka polimera u kalupnoj šupljini i uljevnom sustavu, a ujedno na taj način dopušta optimiranje kalupa s jednom ili više kalupnih šupljina kako bi se izbjegla naknadna dorada kalupa i smanjili troškovi.

6.2. Kratki opis rada i mogućnosti programa

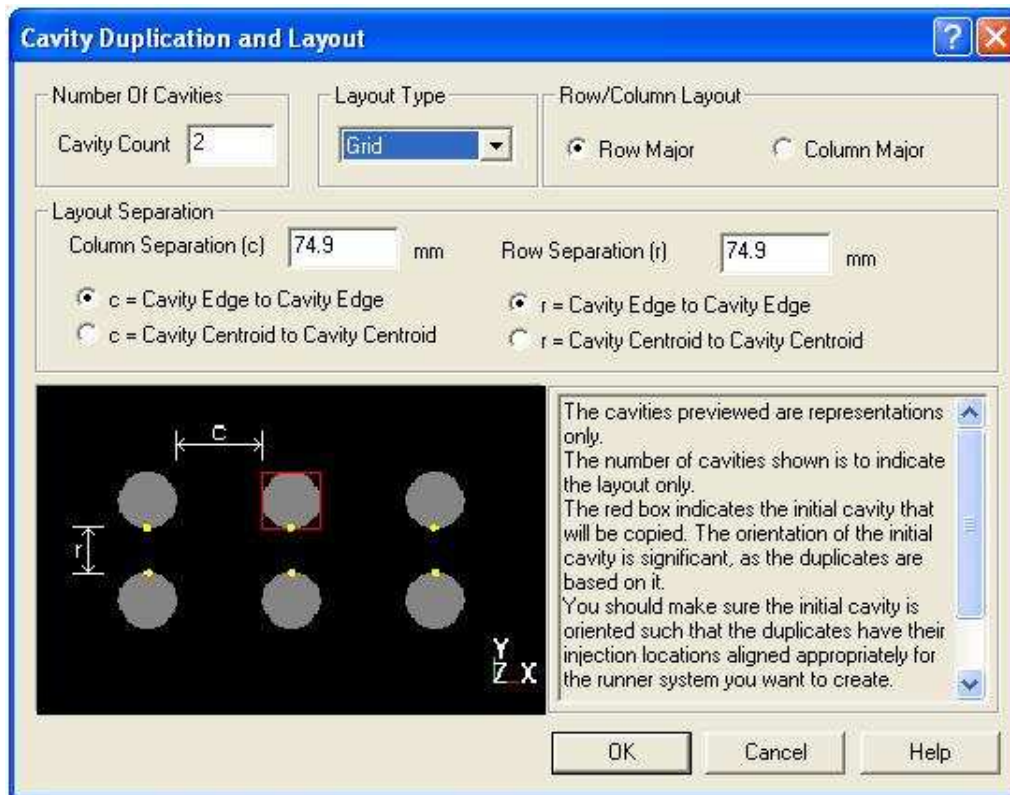
Prije nego što se konstruktori upuste u izradu kalupa trebali bi provjeriti hoće li proizvod iz kalupa zadovoljiti kvalitetom. *Moldflow Mold Adviser* korisnicima omogućuje upotrebu alata s kojima je moguće utvrditi kvalitetu izradaka u kalupima s jednom ili više kalupnih šupljina. Polazna točka u svakoj simulaciji je model otpreska izrađen u CAD programu (*Catia, ProE, SolidWorks ...*) koji se jednostavno spremi u odgovarajućem formatu (.stl, .adv, ...) i zatim otvori u *Moldflow Mold Adviser-u*. [8,9]

Analiziranjem samog modela mogu se utvrditi najpogodnija mjesta za položaj ušća, te mjesta na kojima je moguće zaostajanje zraka u kalupu, gdje će trebati osigurati mjesto za odzračivanje ili promijeniti položaj ušća i sl. Ukoliko nije moguće zadovoljiti potrebnu kvalitetu potrebno je u određenim okvirima izmijeniti geometriju modela kako bi se postignuli zadovoljavajući rezultati. Na slici 6.1. prikazana je predviđena kvaliteta dobivena simulacijom. Područja obojena zelenom bojom su zadovoljavajuće kvalitete, dok su žuta ona u kojima kvaliteta nije na zadovoljavajućoj razini.[8,9]



Slika 6.1. Predviđanje kvalitete

Nakon što se postigne zadovoljavajuća kvaliteta izradka započinje se s konstruiranjem uljevnog sustava, definiranjem točnog položaja ušća, identificiraju se područja koja će trebati više ili manje hladiti, itd. Nakon orijentacije modela unutar *Moldflow Mold Adviser-a* određuje se potrebni broj kalupnih šupljina, njihov raspored, te međusobna udaljenost (slika 6.2.). Potreban broj kalupnih šupljina može se utvrditi npr. prema količini potrebne proizvodnje. [8,9]



Slika 6.2. Definiranje rasporeda kalupnih šupljina

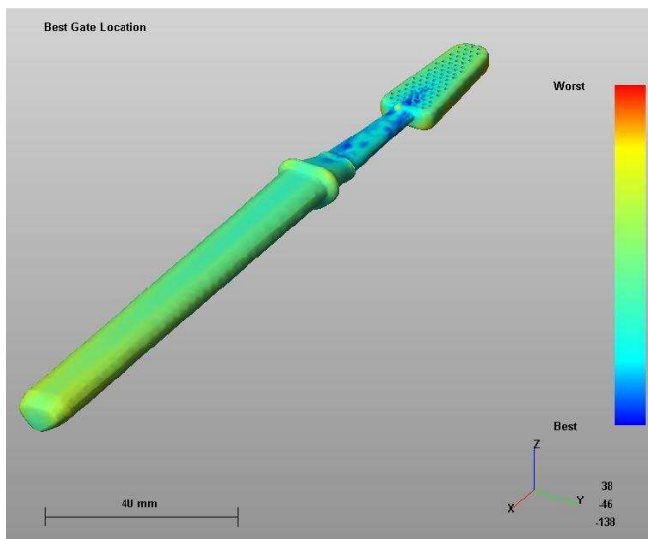
Sljedeći korak je definiranje dimenzija kalupa te procjena minimalne veličine kalupnih ploča koje su potrebne za smještanje određenog broja kalupnih šupljina. Također se definiraju oblik i dimenzije elemenata uljevnog sustava (ušća, topli ili hladni uljevni sustav...). Korisniku je omogućeno da ručno (dio po dio) modelira uljevni sustav ili ga program može modelirati automatski uzimajući u obzir optimalne veličine pojedinih elemenata kako bi se povećala produktivnost, a ujedno i smanjili troškovi. *Moldflow Mold Adviser* će nastojati generirati prirodno uravnoteženi uljevni sustav, što znači da se sve šupljine pune u isto vrijeme i pod istim tlakom. Prednost takvog uljevnog sustava je jednaka kvaliteta svih otpresaka u jednom ciklusu. Ukoliko nije moguće postići prirodno uravnoteženi uljevni sustav, korisnik će morati mijenjati parametre uljevnog sustava dok se ne postigne uravnoteženo stanje. [8,9]

7. SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

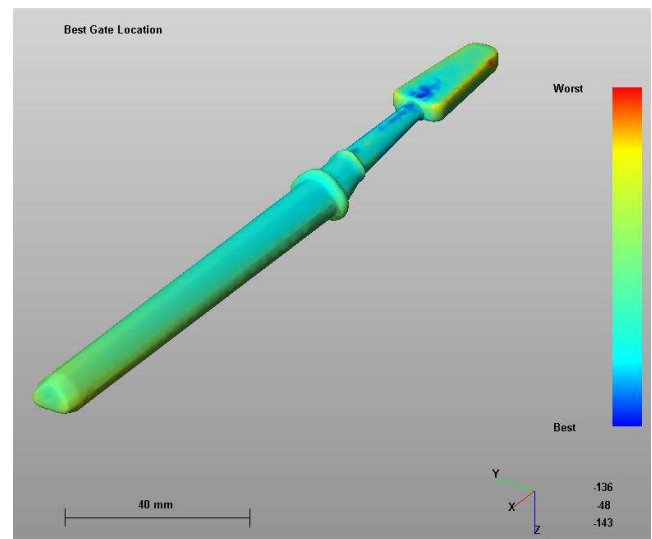
7.1. Primjena simulacije na modelu

7.1.1. Traženje položaja ušća (Gate locator)

Prije nego započne simulacija na modelu potrebno je definirati položaj ušća, tj. mjesto na kojem se polimer ubrizgava u kalupnu šupljinu. *Moldflow Mold Adviser* u svojim postavkama sadrži opciju koja omogućava automatski pronalazak ušća na zadanom modelu. *Moldflow Mold Adviser* najpogodniji položaj ušća na modelu utvrđuje na temelju uravnoteženosti toka materijala, u obzir uzima svojstva odabranog materijala, ali ne i geometrijsku kompleksnost modela. Na slikama 7.1. i 7.2. dan je prikaz modela četkice i mjesta položaja ušća dobivena simulacijom. Plavom bojom označena su područja koja su najpogodnija za položaj ušća, a crvenom ona najlošija. Iz prikaza je vidljivo da su plavom bojom označena područja na vratu i glavi četkice što i nije najpogodnije mjesto za ušće zbog konstrukcijskih razloga, te na temelju toga možemo zaključiti kako simulacija ne daje uvijek rezultate koji se nužno poklapaju sa poželjnim estetskim i konstrukcijskim rješenjima.



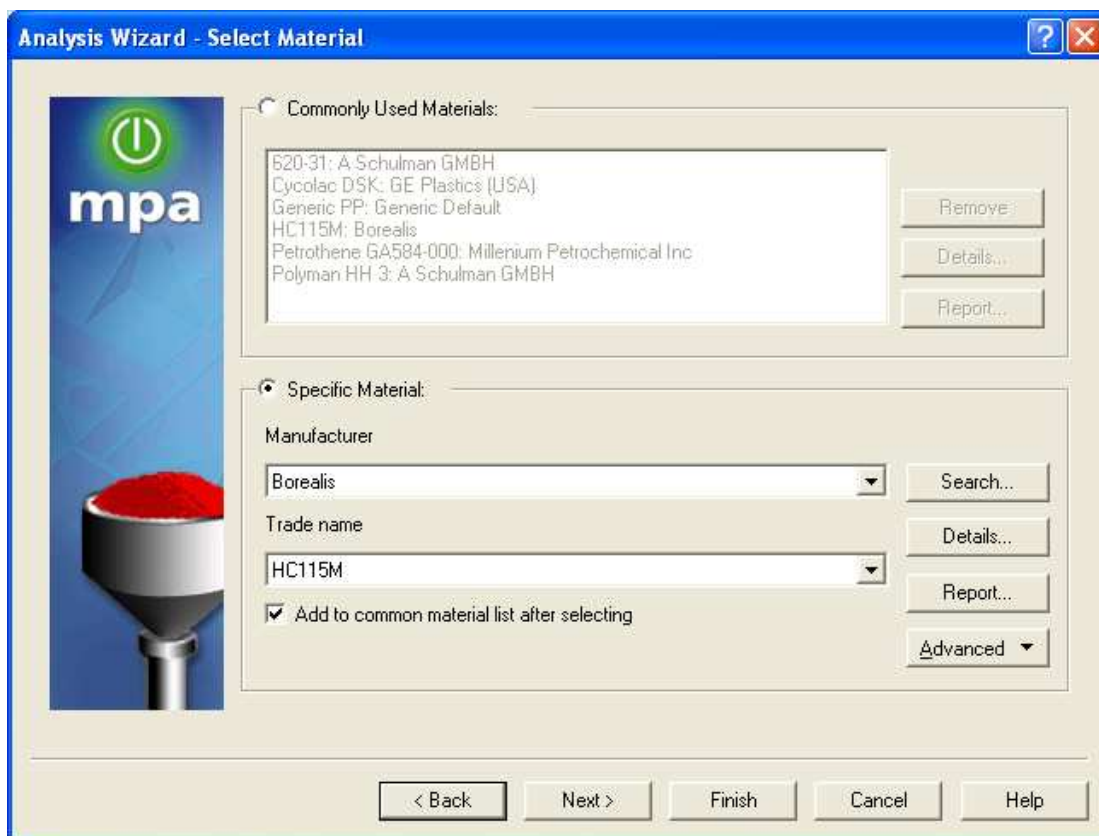
Slika 7.1. Prikaz mjesta pogodnih za smještanje ušća



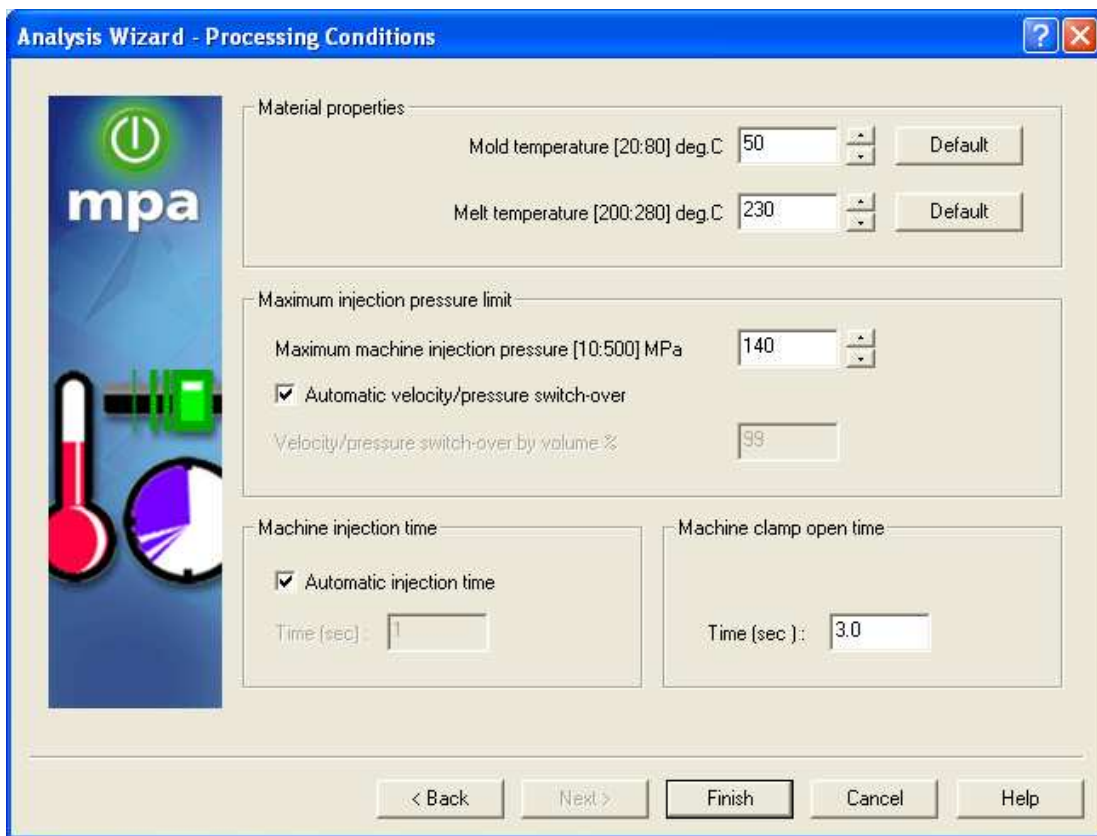
Slika 7.2. Prikaz mjesta pogodnih za smještanje ušća

7.1.2. Punjenje jedne kalupne šupljine

Nakon odabira područja za smještanje ušća potrebno je provesti ostale analize, kako bi se utvrdilo hoće li polimer u potpunosti popuniti kalupnu šupljinu i kakva će biti kvaliteta dobivenog otpreska. Rezultati analiza vjerojatnost popunjavanja kalupne šupljine (*Confidence off fill*) i predviđanja kvalitete proizvoda (*Quality prediction*) mogu poslužiti kao dobar početak za provjeru i utvrđivanje kritičnih mjesta u kalupnoj šupljini (zaostajanje zraka, pad tlaka, raspored temperatura...). Prije početka simulacije potrebno je definirati parametre, tj. materijal, temperaturu taljenja, temperaturu kalupa, te tlak ubrizgavanja. Za vrijednosti parametara uzete su preporučene vrijednosti za odabrani materijal iz *Moldflow Mold Advisera*. Odabrani parametri prikazani su na slici 7.3 i na slici 7.4. [9]



Slika 7.3. Odabrani materijal u *Moldflow Mold Adviseru*

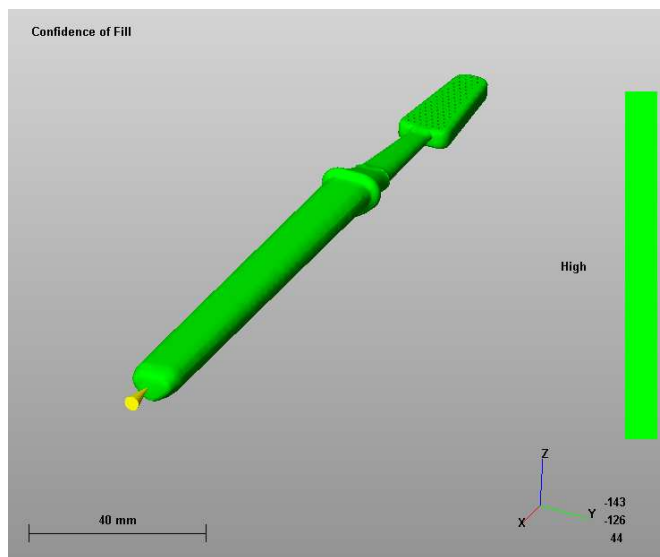


Slika 7.4. Odabrane temperature u *Moldflow Mold Adviser*

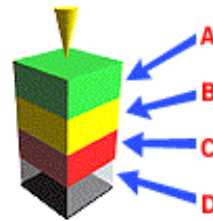
7.2. Rezultati simulacije i interpretacija rezultata

7.2.1. Vjerojatnost popunjavanja kalupne šupljine (e. Confidence of fill)

Analiza „dobrote popunjavanja“ kalupne šupljine utvrđuje mogućnost potpunog popunjenja kalupne šupljine, tj. hoće li polimer u potpunosti popuniti kalupnu šupljinu. Predviđanje se temelji na temperaturama i tlakovima postignutim u kalupnoj šupljini. Zelena boja označava da će kalupna šupljina u potpunosti biti popunjena (slika 7.5). [9]



Legenda:

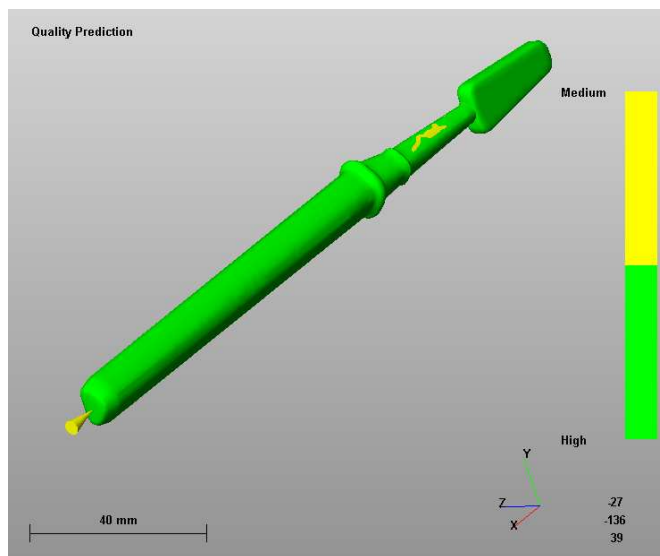


- A** – popunit će u potpunosti
- B** – mogućnost nepopunjavanja kalupne šupljine u potpunosti, moguća nezadovoljavajuća kvaliteta otpreska
- C** – teško za punjenje
- D** – polimer neće popuniti kalupnu šupljinu

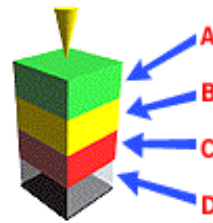
Slika 7.5. Predviđanje punjenja kalupne šupljine

7.2.2. Predviđanje kvalitete otpreska (e. *Quality prediction*)

Procjena kvalitete donosi se na temelju pet parametara: temperature čela taljevine, pada tlaka, vremena hlađenja, smične brzine i smičnog napreznja. Za svako mjesto u kalupnoj šupljini procjenjuje se ovih pet veličina, te na temelju njihovih iznosa *Adviser* daje rezultate o budućoj kvaliteti. Ako su svi parametri u zadovoljavajućem rasponu veličina, kvaliteta će biti dobra i prikazuje se zelenom bojom na modelu (slika 7.6.). Ukoliko samo jedna od veličina odstupa od traženih vrijednosti smatra se da kvaliteta neće zadovoljiti, te su ta područja prikazana žutom ili crvenom bojom. U tablici 7.1. prikazani su rasponi veličina prema kojima se procjenjuje buduća kvaliteta. [9]



Legenda:



- A** – visoka kvaliteta
- B** – smanjena kvaliteta
- C** – niska kvaliteta
- D** – polimer neće ni popuniti kalupnu šupljinu

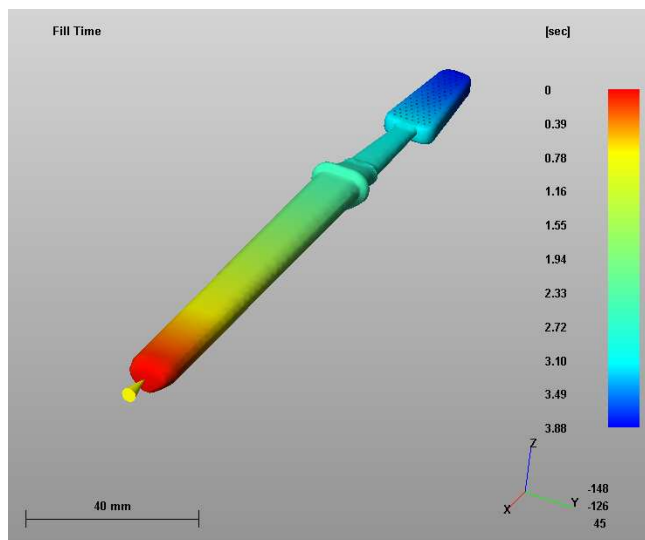
Slika 7.6. Predviđanje kvalitete otpreska

Tablica 7.1. Vrijednosti i rasponi parametara za procjenu kvalitete [9]

PARAMETAR	ZADOVOLJAVA	PRIHVATLJIVO	NEPRIHVATLJIVO	
Temperatura čela taljevine	Temperatura čela taljevine nalazi se u području između min. i maksimalne temperature koja je preporučena u bazi materijala	$\vartheta_{\min} < \vartheta < \vartheta_{\max}$	$\vartheta_{\min} < \vartheta < (\vartheta_{\max} + 5 \text{ }^{\circ}\text{C})$	$\vartheta > (\vartheta_{\max} + 5^{\circ}\text{C})$
Pad tlaka	Pad tlaka mora biti manji od $0,8 P_{\max}$ (tlak ubrizgavanja)	$p_{\text{drop}} < (0,8 p_{\max})$	$(0,8 p_{\max}) < p_{\text{drop}} < p_{\max}$	$p_{\text{drop}} \geq p_{\max}$
Vrijeme hlađenja	Vrijeme hlađenja mora biti manje od $1,5 t_{\text{av}}$ (prosječno vrijeme hlađenja za dani model)	$t < 1,5 t_{\text{av}}$	$1,5 t_{\text{av}} < t < 5 t_{\text{av}}$	$t > 5 t_{\text{av}}$
Smična brzina	Smična brzina mora biti manja od navedene maksimalne	$\gamma < \gamma_{\max}$	$\gamma_{\max} < \gamma < 2 \gamma_{\max}$	$\gamma > 2 \gamma_{\max}$
Smično naprezanje	Smično naprezanje mora biti manje od navedenog maksimalnog	$\tau < \tau_{\max}$	$\tau_{\max} < \tau < 2 \tau_{\max}$	$\tau > 2 \tau_{\max}$

7.2.3. Vrijeme popunjavanja kalupne šupljine (e. Fill time)

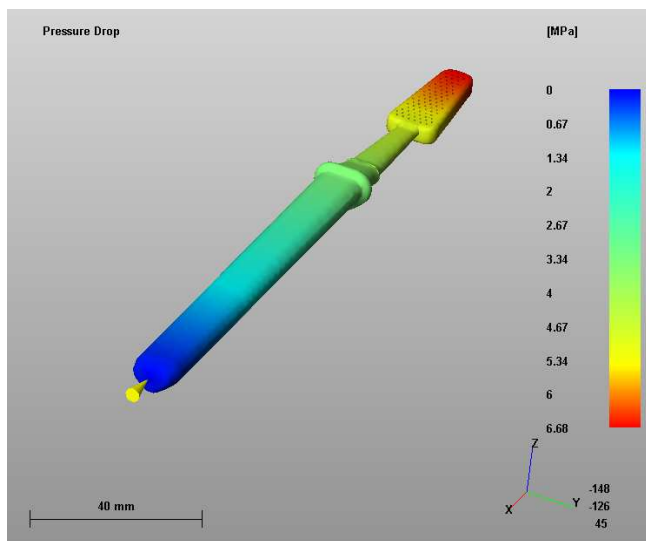
Analiza pokazuje koji se dijelovi kalupne šupljine popunjavaju u isto vrijeme. Područja koja se prva pune prikazana su crvenom bojom, a ona koja se pune posljednja plavom bojom (slika 7.7.). Primarna upotreba ove analize je utvrđivanje pune li se svi uljevni kanali taljevinom u isto vrijeme što je bitno kod uravnoteživanja uljavnog sustava, naime ako se svi elementi uljavnog sustava pune u isto vrijeme veća je mogućnost da će sustav biti dobro uravnotežen. [9]



Slika 7.7. Vrijeme punjenja

7.2.4. Pad tlaka u kalupnoj šupljini (e. Pressure drop)

Analiza pada tlaka pokazuje pad tlaka u kalupnoj šupljini. Crveno su obojena mjesta gdje dolazi do najvećeg pada tlaka, a plavo ona koja se nalaze bliže ušću (manji pad tlaka), (slika 7.8.). Ukoliko se dogodi da tlak padne ispod nazivnog tlaka ubrizgavanja može se dogoditi da polimer ne popuni kalupnu šupljinu u potpunosti. Ako polimer ne bi popunio kalupnu šupljinu postoji nekoliko opcija pomoću kojih se može doći do zadovoljavajućih rezultata:

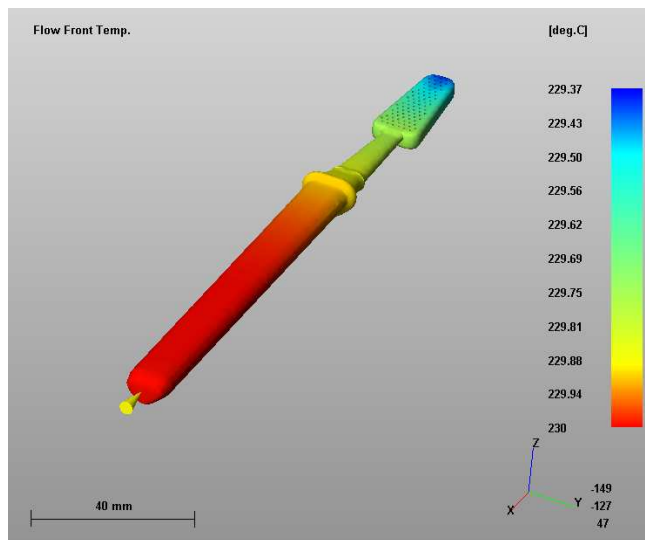


- povećanje tlaka ubrizgavanja
- promjena položaja ušća na modelu
- promjena geometrije modela
- izbor drugačijeg materijala
- povećanje temperature taljenja.

Slika 7.8. Pad tlaka u kalupnoj šupljini

7.2.5 Temperatura čela taljevine (e. Flow front temperature)

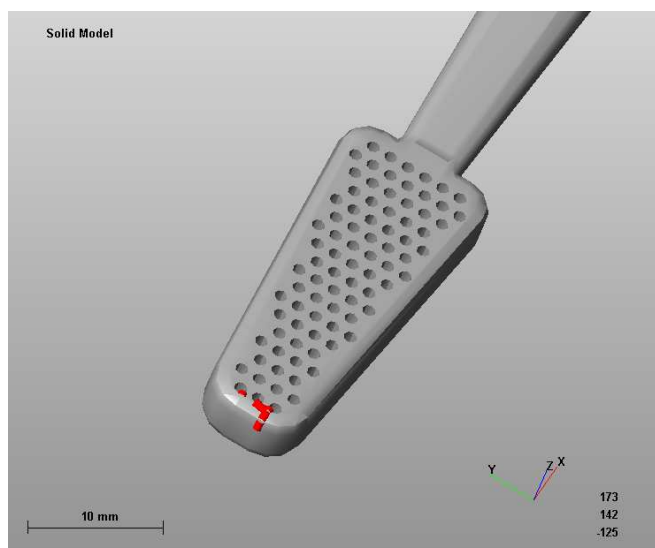
Kod ove analize različito obojena područja predstavljaju temperaturu polimera u danoj točki pri popunjavanju kalupne šupljine. Na slici 7.9. vidljiv je očit pad temperature u smjeru toka taljevine za vrijeme popunjavanja kalupne šupljine. Ukoliko je temperatura preniska, npr. kod tankostjenih otpresaka može se dogoditi da polimer ne popuni cijelu kalupnu šupljinu. Ako bi pak temperatura materijala bila previsoka može doći do degradacije materijala te do oštećenja na površini otpreska.[9]



Slika 7.9. Temperatura čela taljevine

7.2.6. Linije spajanja (e. Weld line)

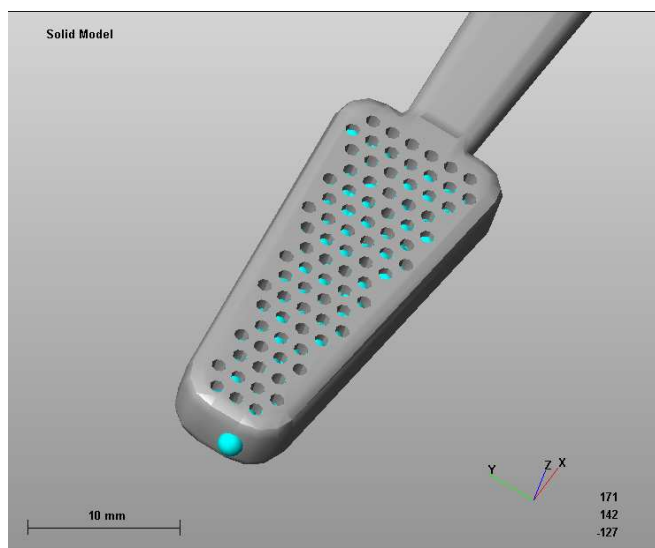
Linije spajanja nastaju na mjestima gdje se spajaju dva toka taljevine (slika 7.10.). Orijentacija molekula polimera na linijama spajanja okomita je na tok materijala. Na linijama spajanja često dolazi do pada mehaničkih svojstava materijala i nisu estetski prihvatljive, pa ih se nastoji što izbjeći. Ukoliko linije spajanja nije moguće izbjeći treba ih pokušati smjestiti u područja gdje imaju što manji utjecaj. Sprečavanje nastanka linija spajanja moguće je izvesti promjenom mjesta ušća ili primjenom nekog drugog materijala pogodnijih svojstava. [9]



Slika 7.10. Linija spajanja materijala

7.2.7. Zaostali zračni mjehuri (e. Air traps)

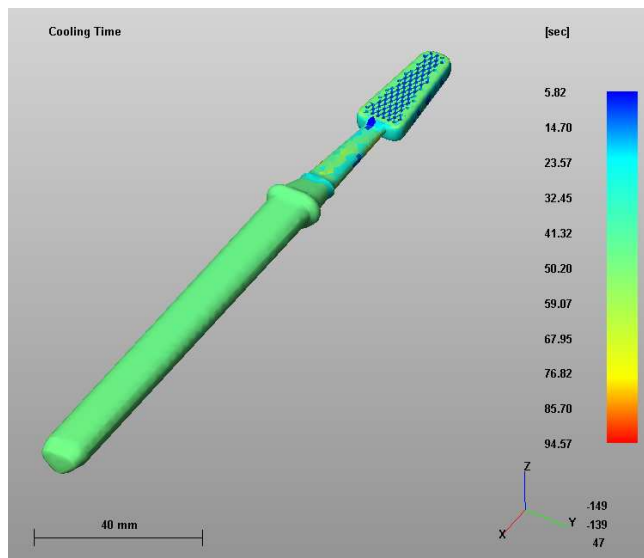
Ovom analizom moguće je utvrditi područja u kalupnoj šupljini gdje je moguće zaostajanje zraka. Zračni džepovi prikazani su u obliku plavih mjehurića (slika 7.11.). Na slici je vidljivo kako se u području gdje su rupice nalazi puno zaostalog zraka što bi moglo predstavljati ozbiljan problem pri izradi kalupa. Zaostali zrak u kalupnoj šupljini vrlo je nepoželjan, jer sprječava potpuno popunjavanje kalupne šupljine što rezultira estetskim nedostacima na površini otpreska. U ekstremnim slučajevima temperatura zraka može narasti do tog stupnja da dođe do zapaljenja materijala u kalupu. Zarobljeni zrak u kalupnoj šupljini može se izbjeći promjenom položaja ušća ili pogodnim sustavom za odzračivanje.



Slika 7.11. Zaostali zrak u kalupnoj šupljini

7.2.8. Vrijeme hlađenja (e. *Cooling time*)

Vrijeme hlađenja je vrijeme koje prođe između popunjavanja kalupne šupljine rastaljenim polimerom i izbacivanja gotovog otpreska iz kalupa. Iz slike 7.12. vidljivo je da se otpresak hladi skoro jednolično. Najbrže se hlade dijelovi manjih dimenzija (rupice), dok se drška četkice hladi sporije. Sa slike se vidi da je otpresku potrebno oko 55 sekundi za hlađenje.

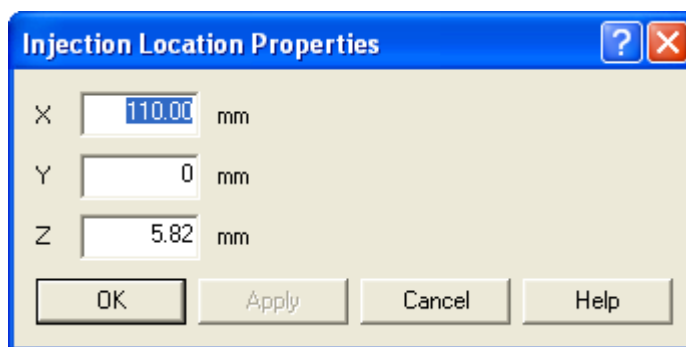


Slika 7.12. Vrijeme hlađenja

7.3. Primjena simulacije na uljevnom sustavu

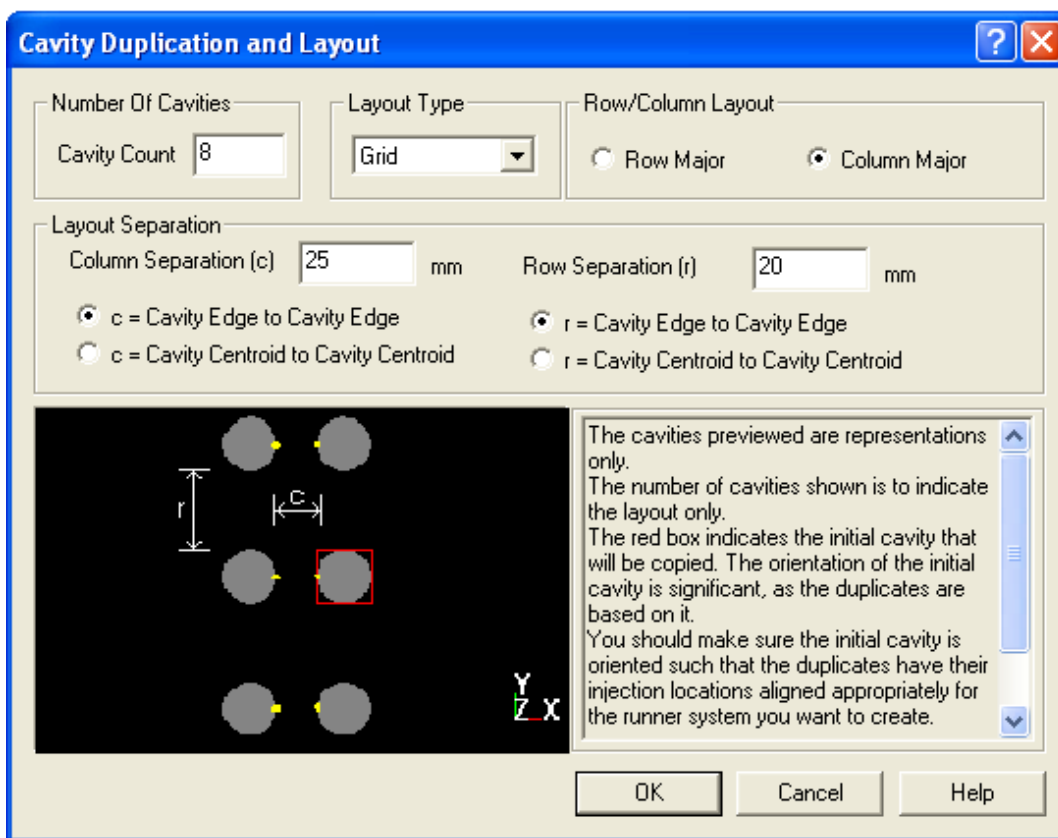
7.3.1. Modeliranje uljavnog sustava

U poglavlju 4.4 *Određivanje uljavnog sustava i ušća* određeno je da će se ušće smjestiti na početku drške četkice. Kako bi se moglo započeti s modeliranjem uljavnog sustava potrebno je u koordinatnom sustavu definirati točan položaj ušća. Pomoću koordinata očitanih iz programskog paketa *Catia V5 R18* definiran je točan položaj ušća (slika 7.13.).

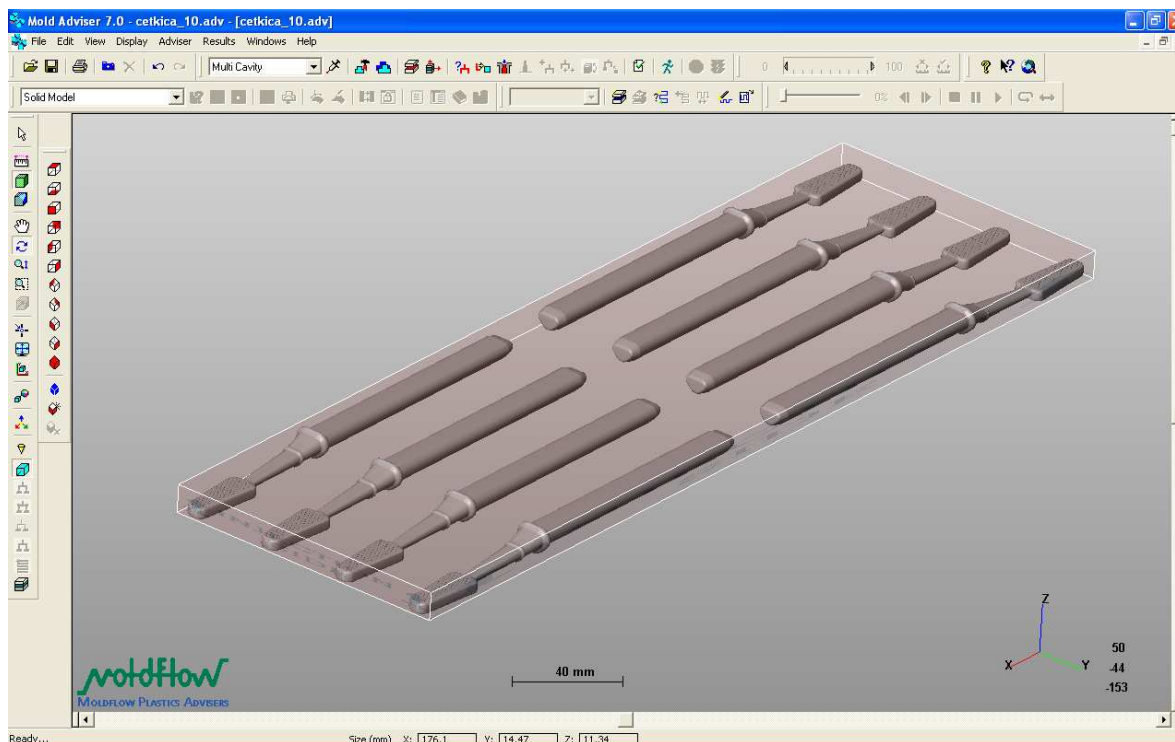


Slika 7.13. Koordinate ušća

Nakon što je definirano ušće, potrebno je ući u modul *Multy Cavity* gdje se definira raspored i broj kalupnih šupljina unutar kalupa (slika 7.14). U poglavlju 4.2 *Određivanje broja kalupnih šupljina* definirano je osam kalupnih šupljina. Dobiveni raspored prikazan je na slici 7.15.

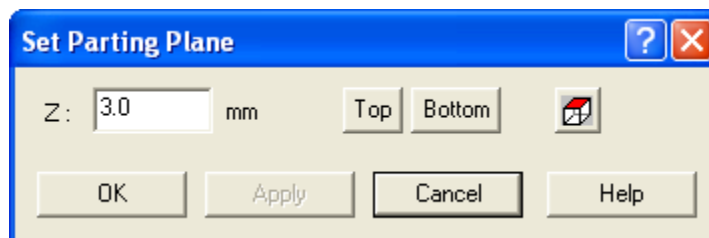


Slika 7.14. Odabir rasporeda kalupnih šupljina



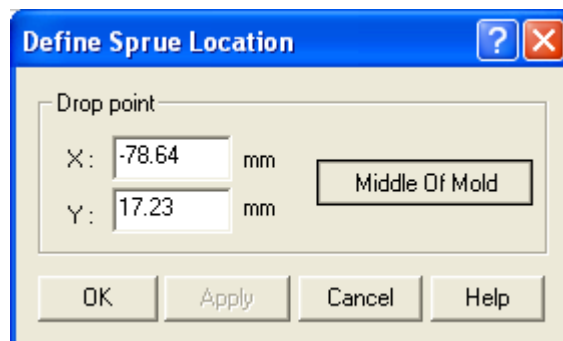
Slika 7.15. Dobiveni raspored kalupnih šupljina

Prije početka modeliranja uljevnog sustava potrebno je definirati z - koordinatu sljubnice, tj njenu udaljenost od xy ravnine u $Oxyz$ koordinatnom sustavu. Z – koordinata sljubnice očitana je iz programskog paketa *Catia V5 R18*, a na slici 7.16. prikazan je njezin iznos.

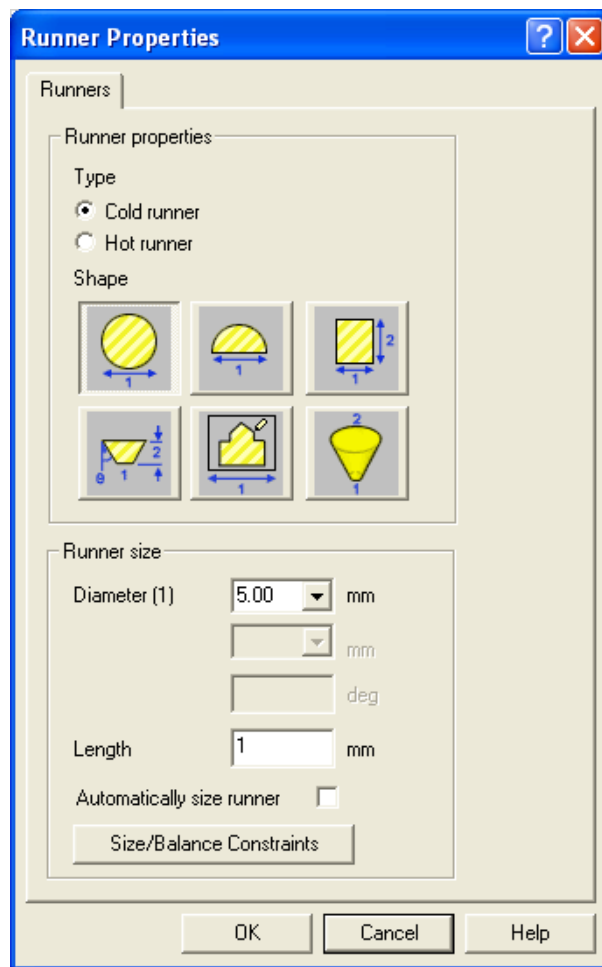


Slika 7.16. Koordinate sljubnice

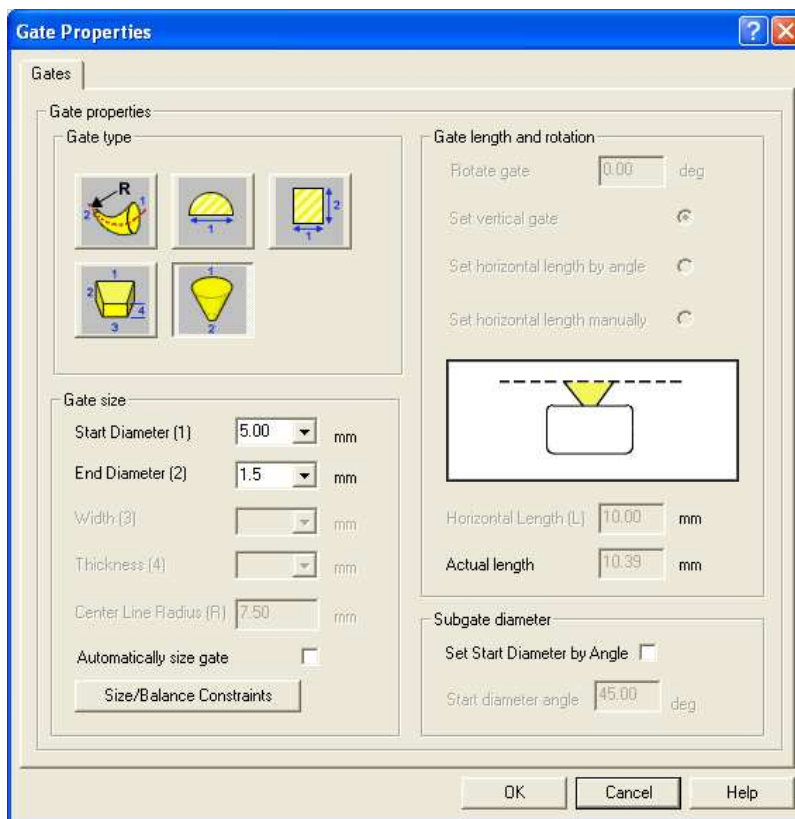
Pri početku modeliranja uljevnog sustava prvo se definira položaj uljevka (slika 7.17.), a zatim se modeliraju uljevni kanali, razdjelnici, ušća i sustav za temperiranje. Njihovi parametri prikazani su na slikama 7.18, 7.19, 7.20 i 7.21. Po završetku modeliranja dobije se model prikazan slikom 7.22.



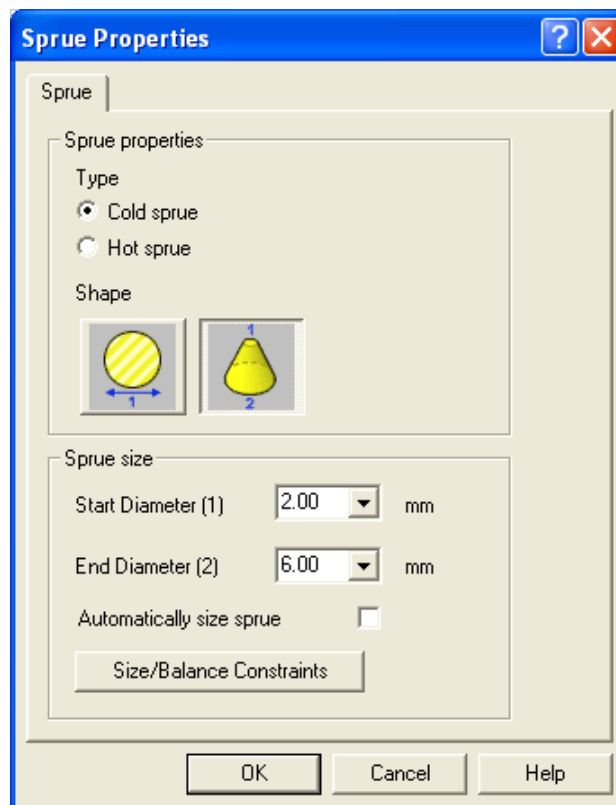
Slika 7.17. Koordinate uljevka



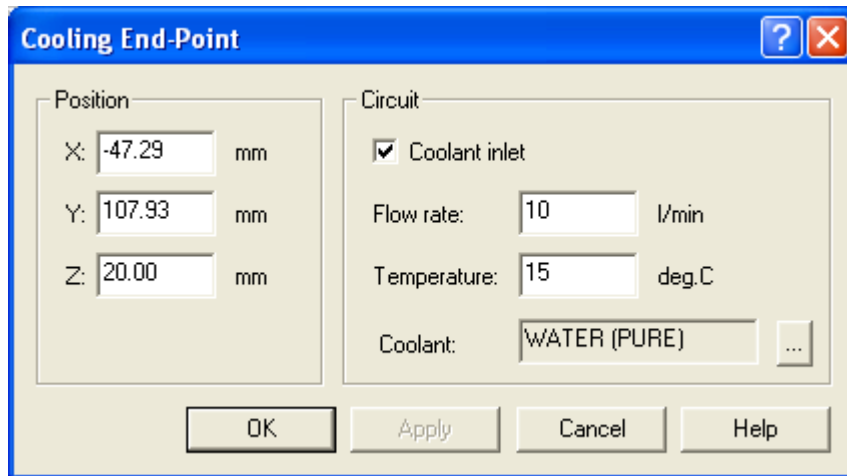
Slika 7.18. Postavke uljevnih kanala



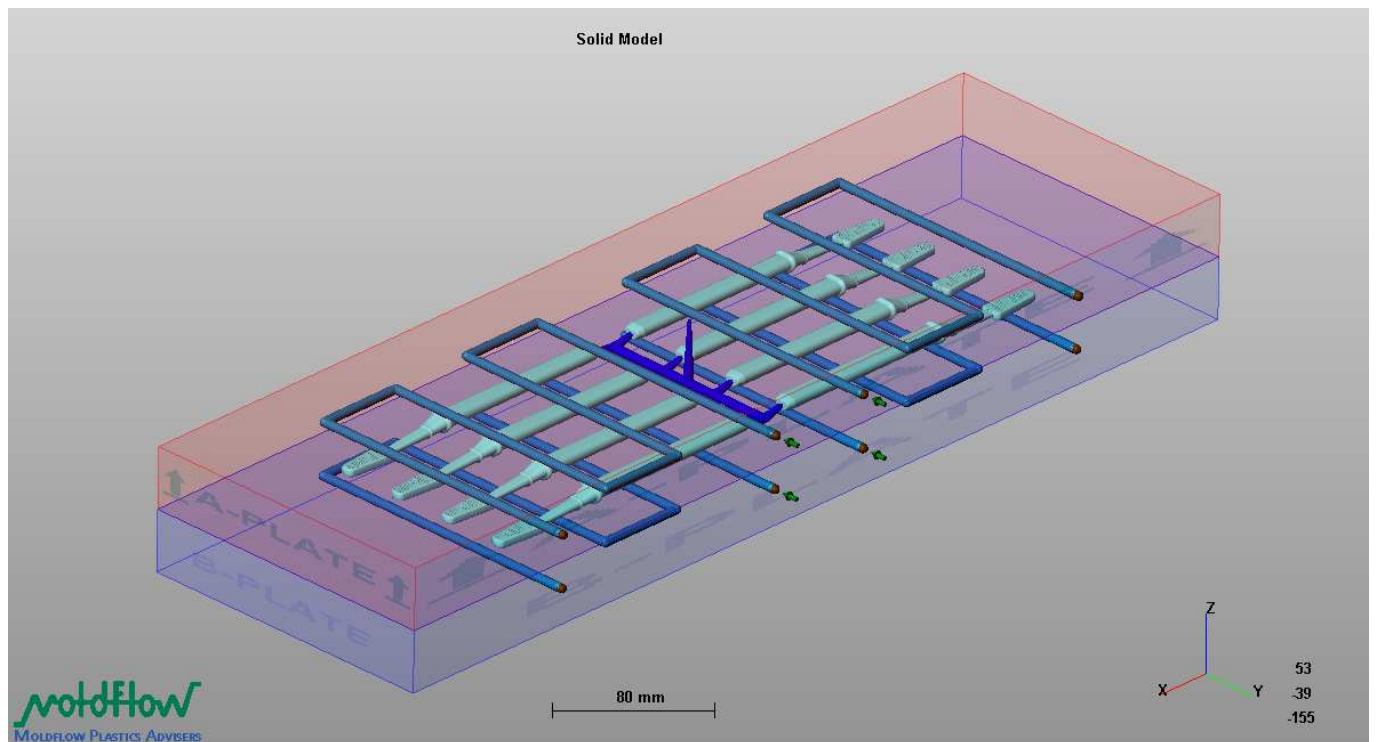
Slika 7.19. Postavke ušća



Slika 7.20. Postavke uljevka



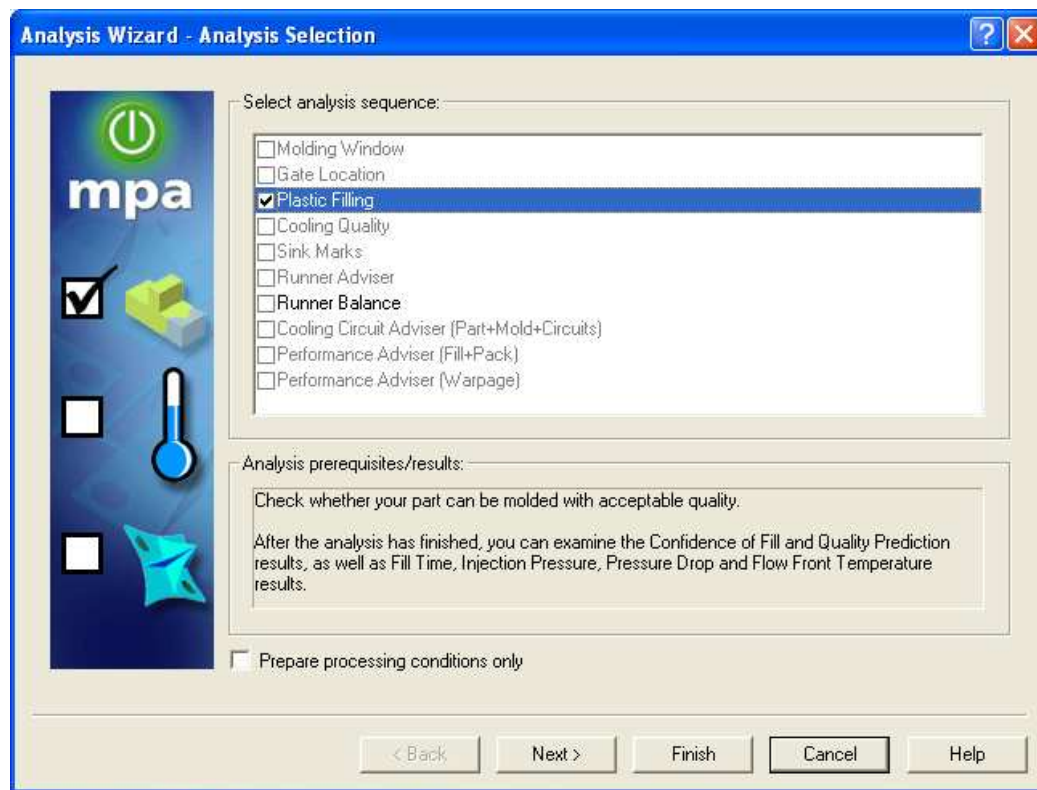
Slika 7.21. Postavke hladila u sustavu za temperiranje



Slika 7.22. Model uljevnog sustava s hlađenjem

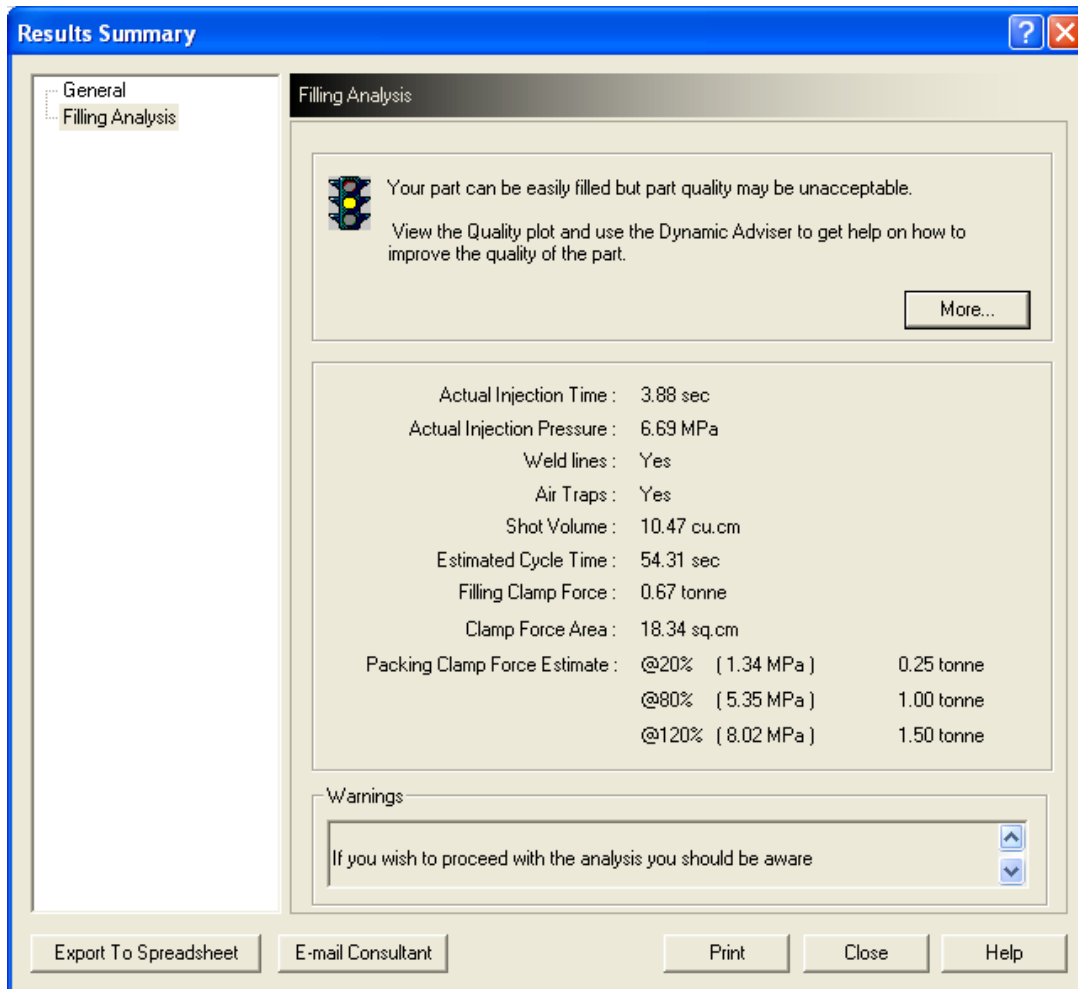
7.3.2. Simulacija punjenja uljavnog grozda

Postupak odabira materijala, te definiranja temperatura i tlakova za provedbu simulacije opisan je u poglavlju 7.1.2 *Punjenje jedne kalupne šupljine* i potpuno je isti te se neće posebno razmatrati u ovom poglavlju. Za pokretanje simulacije mora se uključiti *Analysis Wizard* i u njemu definirati koju analizu želimo pokrenuti (slika 7.23.). Nakon odabira *Plastic Filing* pritiskom na gumb *Finish* pokreće se analiza.



Slika 7.23. Odabir željene analize

Na slici 7.24 prikazan je sažetak izvješća o završetku simulacije punjenja uljenog sustava i kalupnih šupljina. Iz izvješća se izravno može iščitati vrijeme za koje polimer popuni kalupnu šupljinu, vrijeme trajanja ciklusa, problemi koji se javljaju, kao na primjer linije spajanja i mjehurići zaostalog zraka. U nastavku su izloženi svi rezultati i po potrebi komentirani.



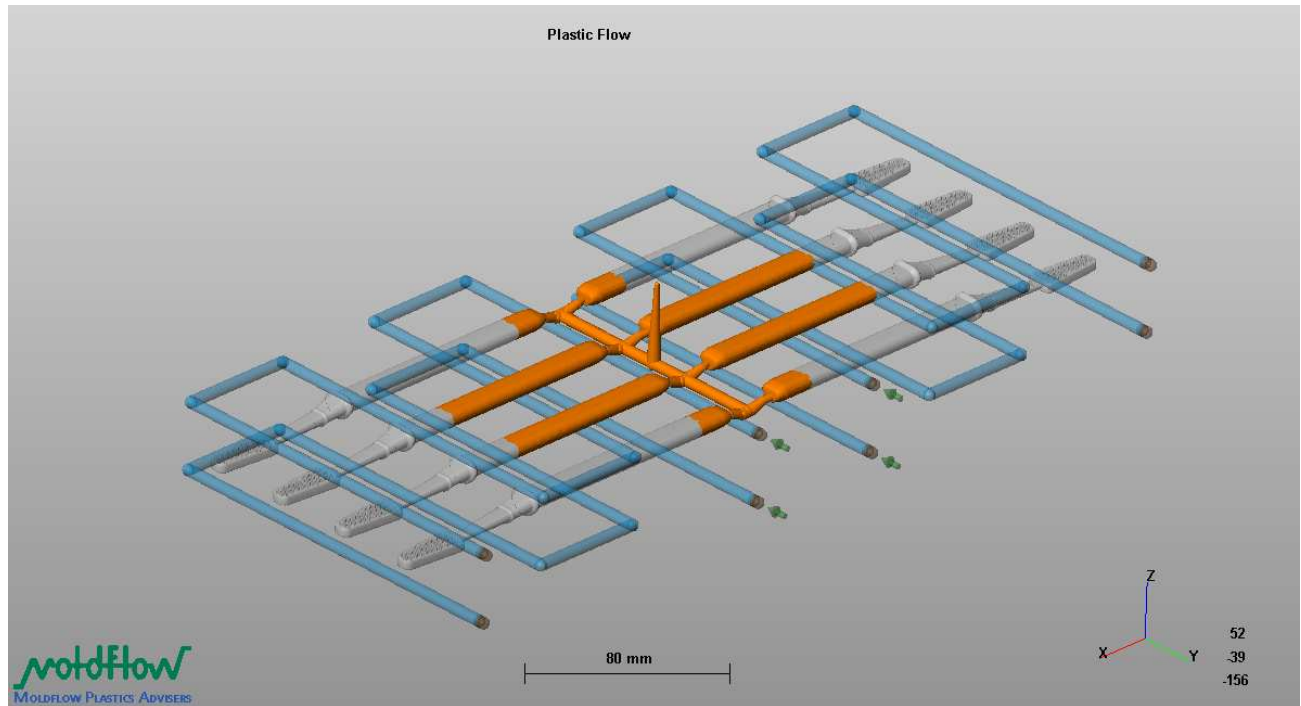
Slika 7.24. Izvješće o završenoj analizi

7.4. Rezultati simulacije i interpretacija rezultata

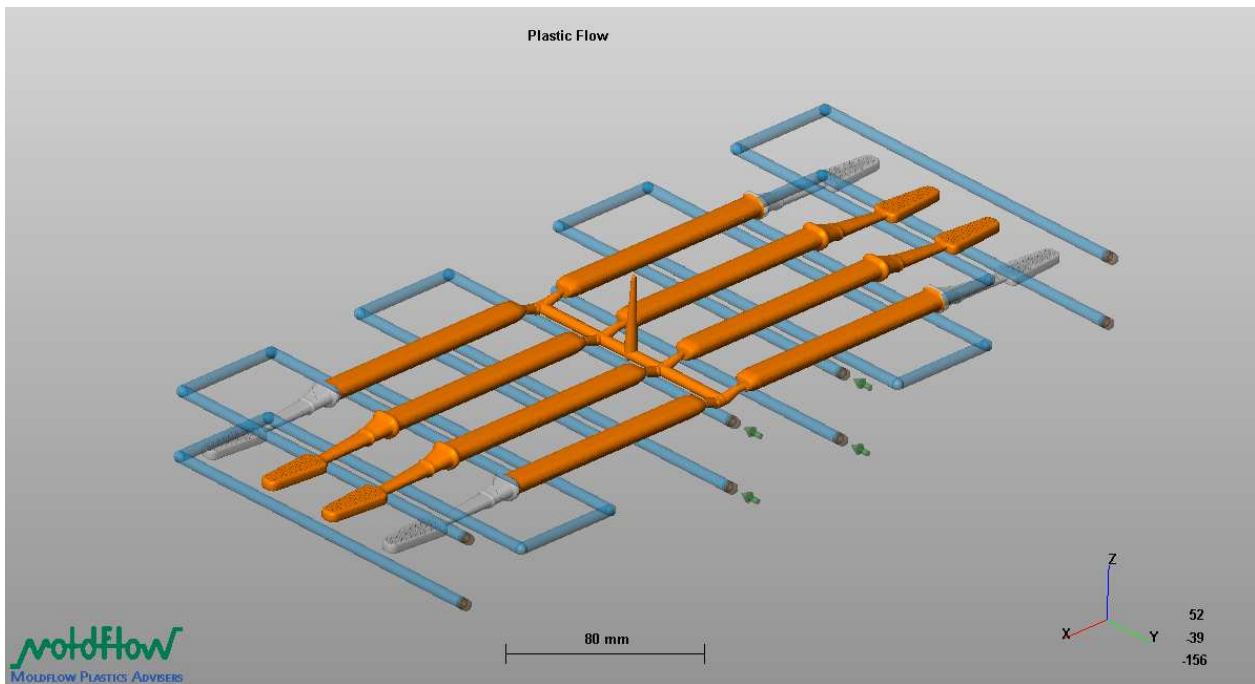
7.4.1. Tečenje rastaljenog polimera (e. *Plastic flow*)

Plastic Flow prikazuje tok rastaljenog polimera kroz uljevni sustav i popunjavanje kalupnih šupljina. Taljevina je prikazana narančastom bojom. Na slikama 7.25 i 7.26 prikazan je postupni tok

taljevine i popunjavanje kalupnih šupljina. Očito je da se sve kalupne šupljine neće popuniti u isto vrijeme, što znači da sustav nije u potpunosti uravnotežen.



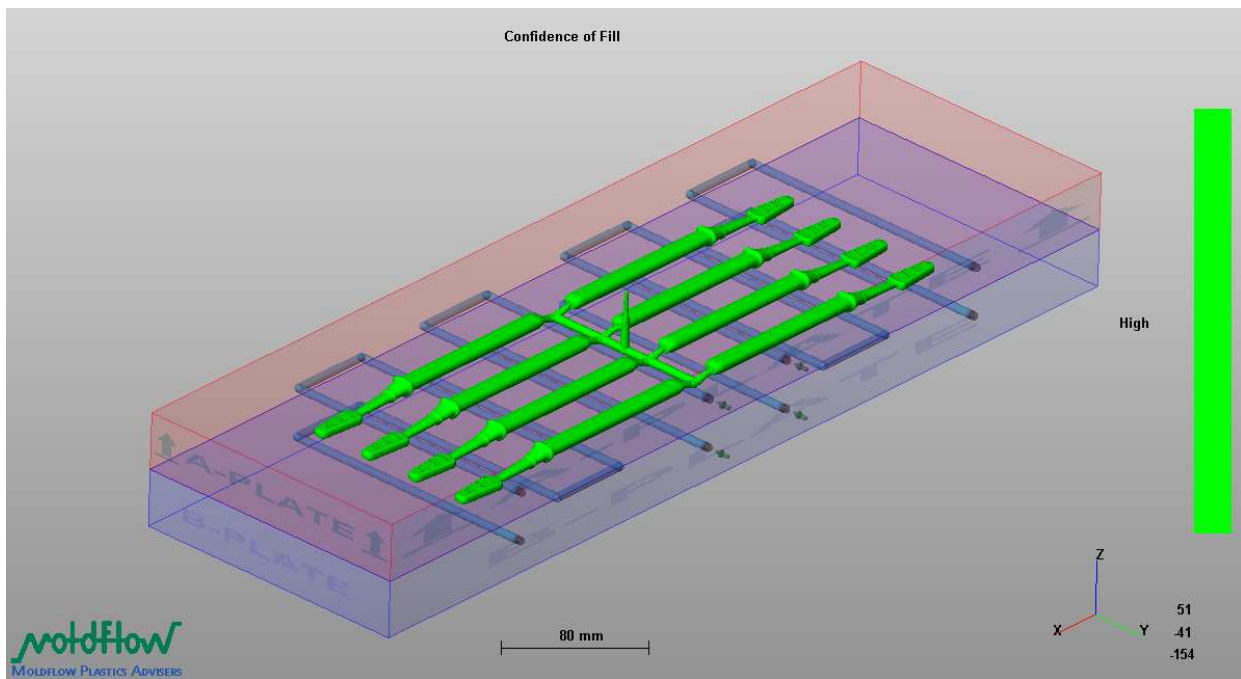
Slika 7.25. Tok rastaljenog polimera



Slika 7.26. Tok rastaljenog polimera

7.4.2. Vjerojatnost popunjavanja kalupnih šupljina (e. Confidence of Fill)

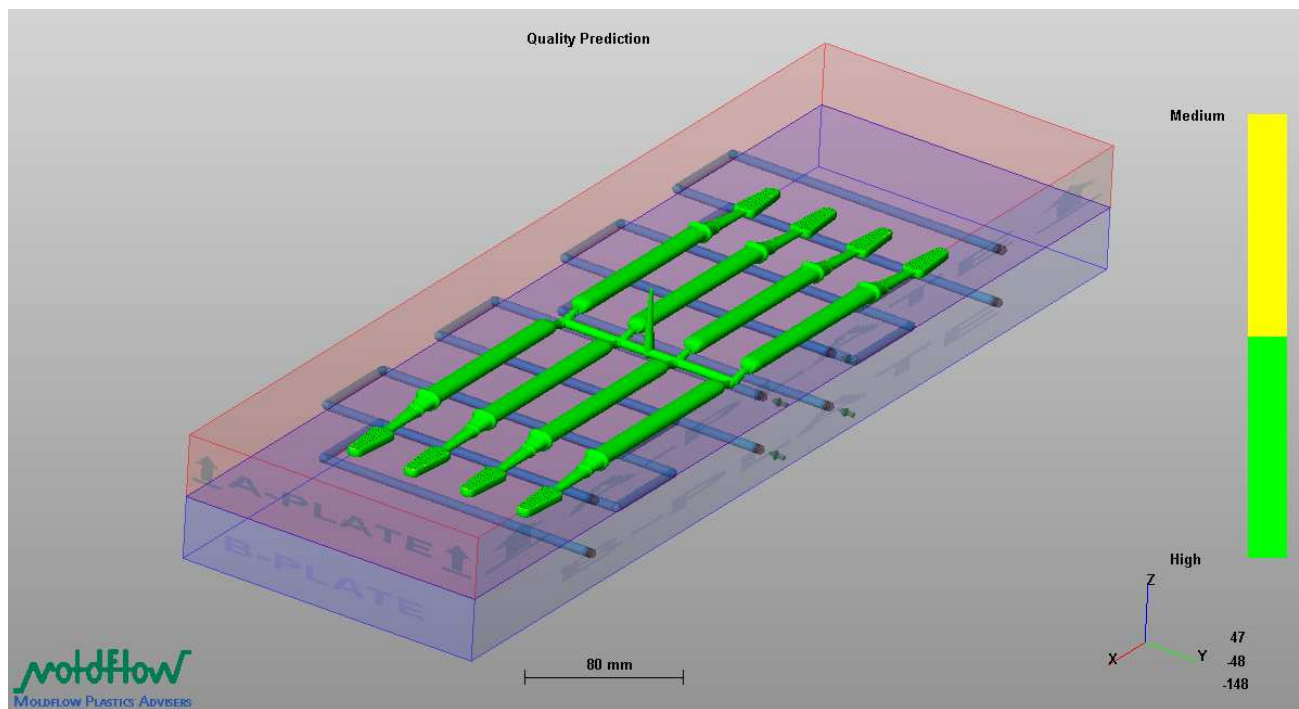
Na slici 7.27. prikazan je model kalupa sa svih osam kalupnih šupljina. Sve kalupne šupljine u potpunosti su obojene zelenom bojom, što znači da će materijal bez većih problema popuniti kalup.



Slika 7.27. Popunjenost kalupne šupljine

7.4.3. Predviđanje kvalitete otpreska (e. Quality prediction)

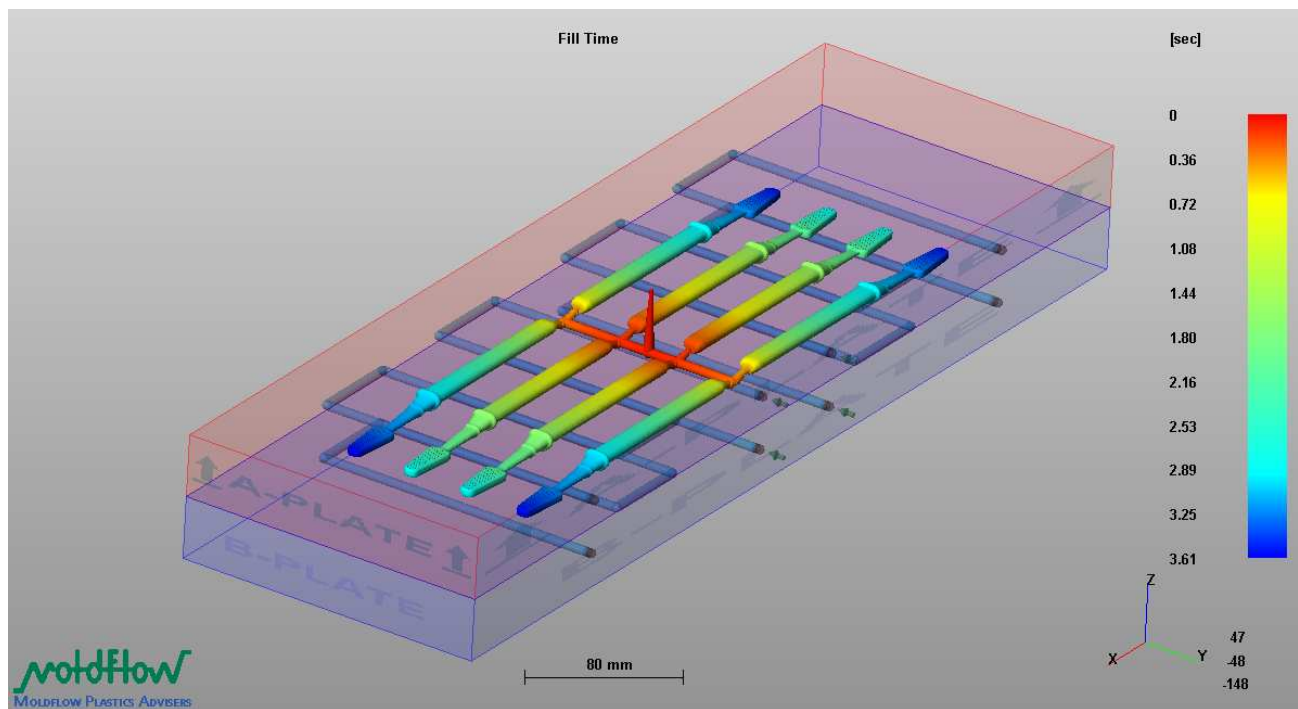
Sa slike 7.28. vidljivo je da će kvaliteta otpresaka biti visoka. Na modelima nema velikih područja koja su obojena žutom bojom koja bi ukazivala na smanjenu kvalitetu. Ako i postoje žuta područja, toliko su mala da se sa sigurnošću mogu zanemariti.



Slika 7.28. Predviđanje kvalitete

7.4.4. Vrijeme popunjavanja (*e. Fill Time*)

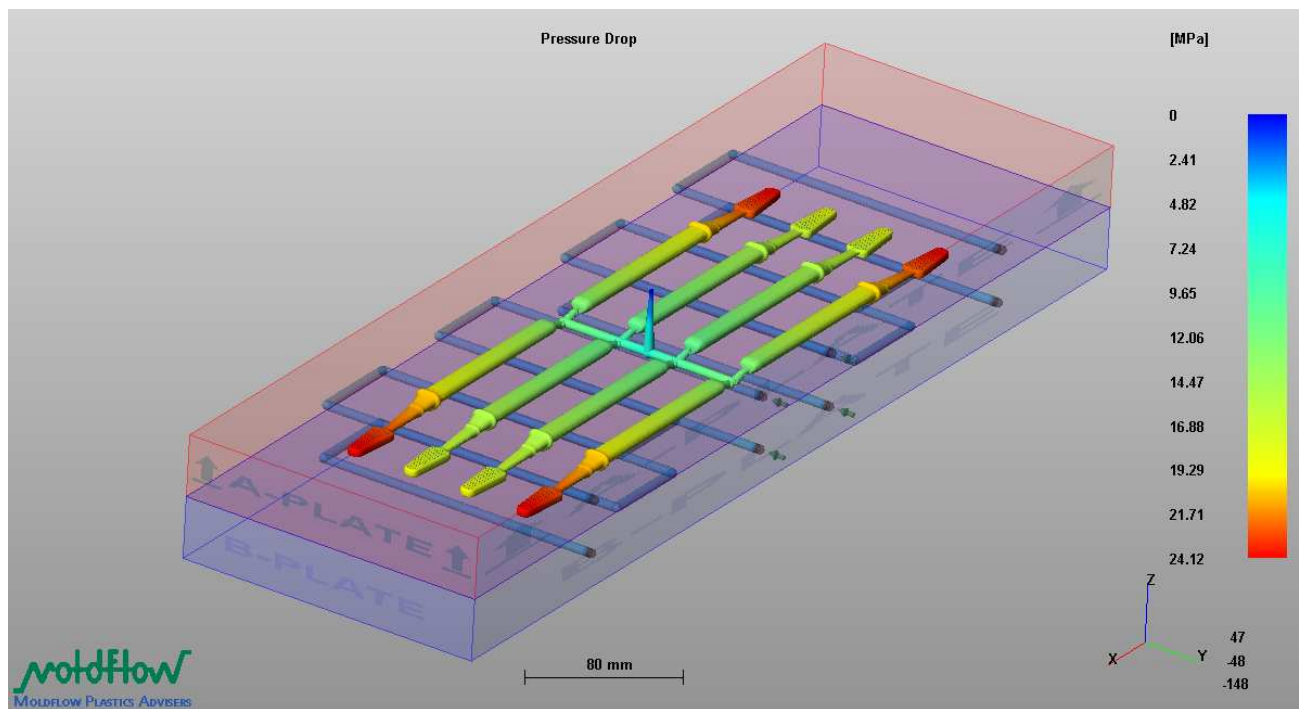
Analiza pokazuje koji se dijelovi kalupne šupljine popunjavaju u isto vrijeme. Područja koja se prva pune prikazana su crvenom bojom, a ona koja se pune posljednja plavom bojom. Primarna upotreba ove analize je utvrđivanje pune li se svi uljevni kanali taljevinom u isto vrijeme. Na slici 7.29. vidljivo je da se kalupne šupljine koje su bliže uljevku napune prije od krajnjih, što znači da uljevni sustav nije u potpunosti uravnotežen.



Slika 7.29. Vrijeme popunjavanja

7.4.5. Pad tlaka u kalupnoj šupljini (e. Pressure drop)

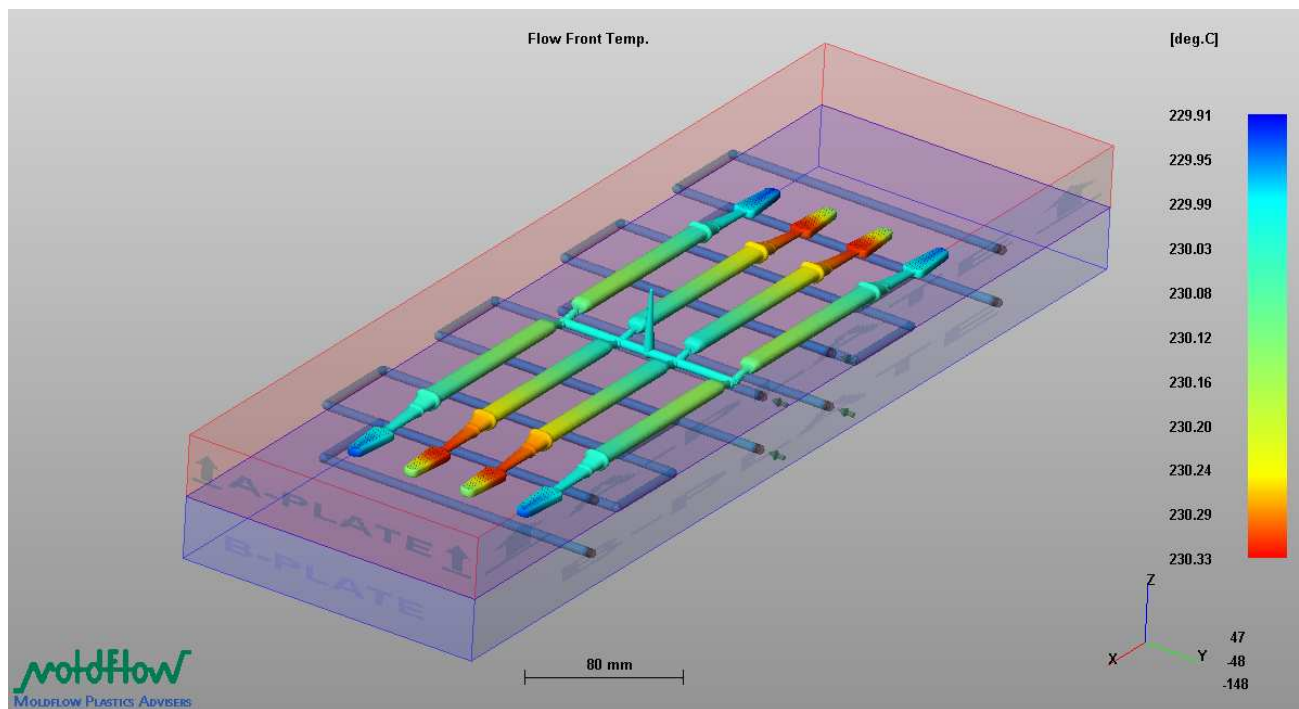
Na slici 7.30. crveno su obojena područja gdje dolazi do najvećeg pada tlaka, a plavo ona koja se nalaze bliže ušću (manji pad tlaka). Ukoliko se dogodi da tlak padne ispod nazivnog tlaka ubrizgavanja može se dogoditi da polimer ne popuni kalupnu šupljinu u potpunosti. Iz slike 7.30. je vidljivo da je najveći pad tlaka u krajnjim kalupnim šupljinama, ali se još uvijek nalazi pri zadovoljavajućim vrijednostima.



Slika 7.30. Pad tlaka u uljevnom sustavu

7.4.6. Temperatura čela taljevine (e. Flow front temperature)

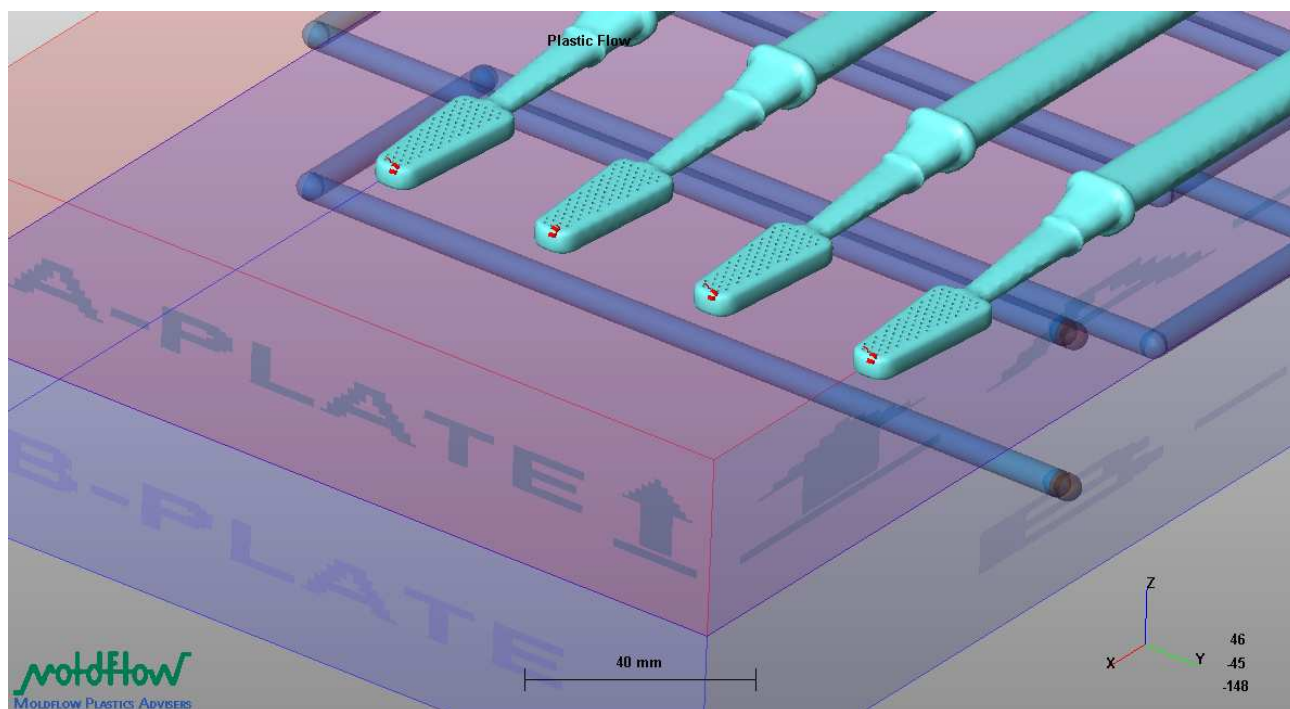
Na slici 7.31. vidljiv je očit pad temperature u smjeru toka taljevine za vrijeme popunjavanja kalupne šupljine. Ukoliko je temperatura preniska, na primjer kod tankostjenih otpresaka može se dogoditi da polimer ne popuni cijelu kalupnu šupljinu. Kod krajnjih kalupnih šupljina očituje se veći pad temperature pri ubrizgavanju polimera, no on je zanemariv jer razlika između najtoplijih i najhladnijih predjela iznosi tek 0,4 °C.



Slika 7.31. Temperatura čela taljevine

7.4.7. Linije spajanja (e. Weld line)

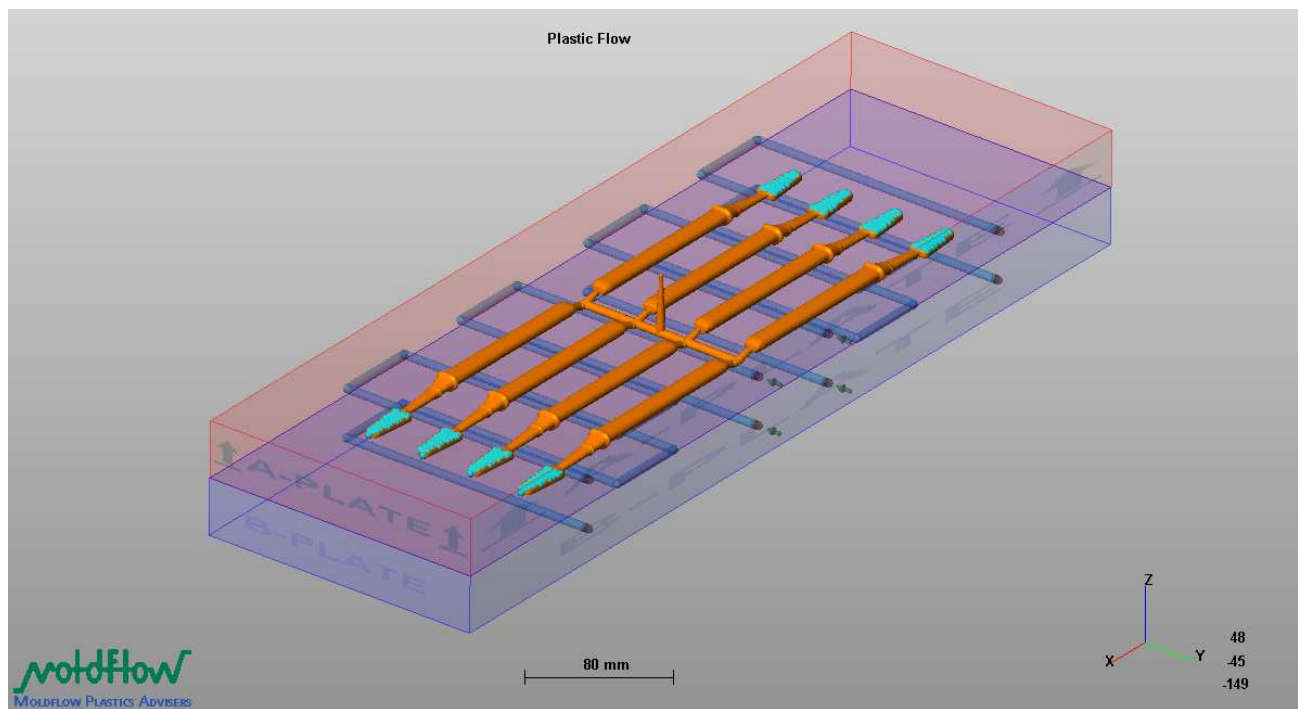
Linije spajanja nastaju na mjestima gdje se spajaju dva toka taljevine. Na slici 7.32. linije spajanja prikazane su crvenim linijama. Zbog mjesta na kojem se nalaze (kraj kalupne šupljine) i njihove veličine može se zaključiti kako će imati mali ili nikakav utjecaj na mehanička svojstva, a vjerojatno neće biti ni uočljive.



Slika 7.32. Linije spajanja

7.4.8. Zaostali zračni mjehuri (e. Air traps)

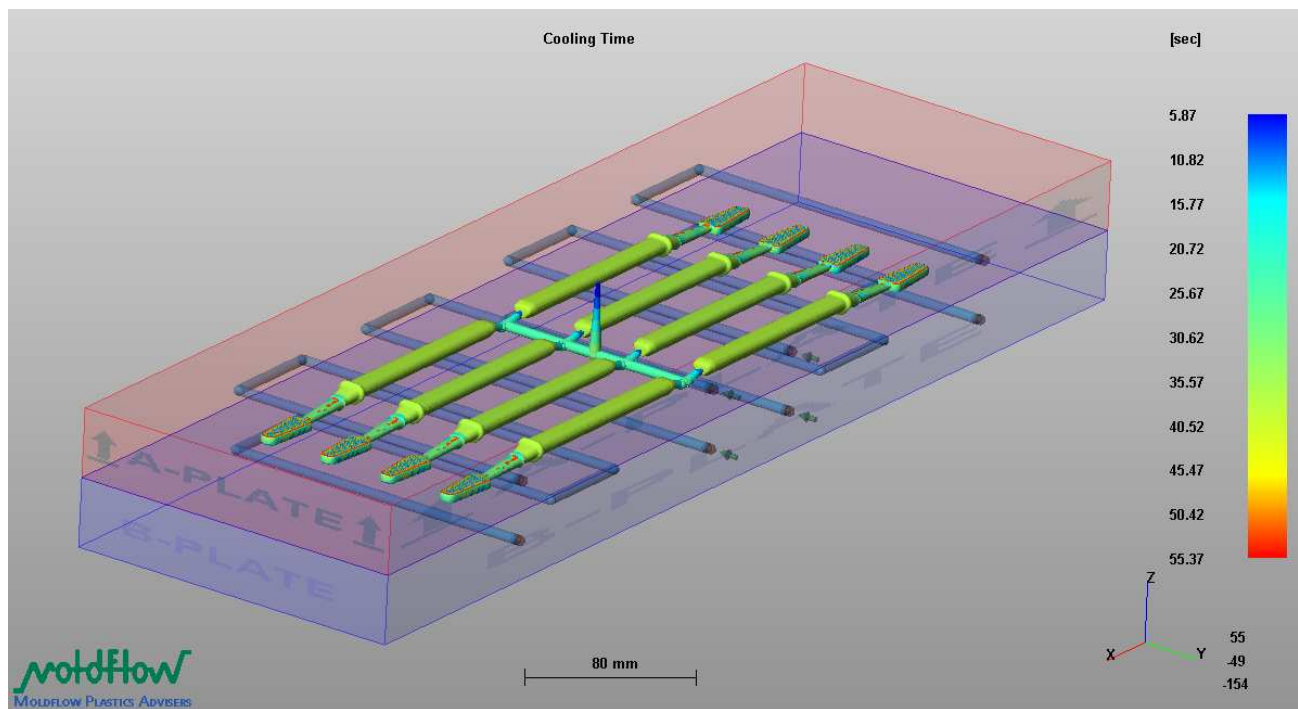
Na slici 7.33. zrak koji je zaostao u kalupnoj šupljini prikazan je u obliku plavih mjehurića. Na slici je vidljivo kako se u području gdje su rupice nalazi puno zaostalog zraka što bi moglo predstavljati ozbiljan problem pri procesu prešanja. Zaostali zrak u kalupnoj šupljini vrlo je nepoželjan i na temelju ovih rezultata već je vidljivo da će u tom području trebati osigurati mjesto za odzračivanje. Sa slike 7.31. vidljivo je da su temperature pri ubrizgavanju u tom području oko 230 °C, što znači da ako zrak ne bi napustio kalupnu šupljinu moglo doći do degradacije materijala ili čak do zapaljenja materijala u kalupu.



Slika 7.33. Zaostali zrak u kalupnoj šupljini

7.4.9. Vrijeme hlađenja (*e. Cooling time*)

Otpresci prikazani na slici 7.34. hlade se oko 55 sekundi i to gotovo jednolično, što je jako povoljno jer će svi otpresci u kalupu biti podjednake kvalitete. Na debljim presjecima otpresak se sporije i ravnomjernije hladi, dok se na suženim područjima (vrat) hladi neravnomjernije (područja različitih boja). Vrijeme hlađenja uvelike utječe na trajanje ciklusa injekcijskog prešanja te ga se nastoji smanjiti.



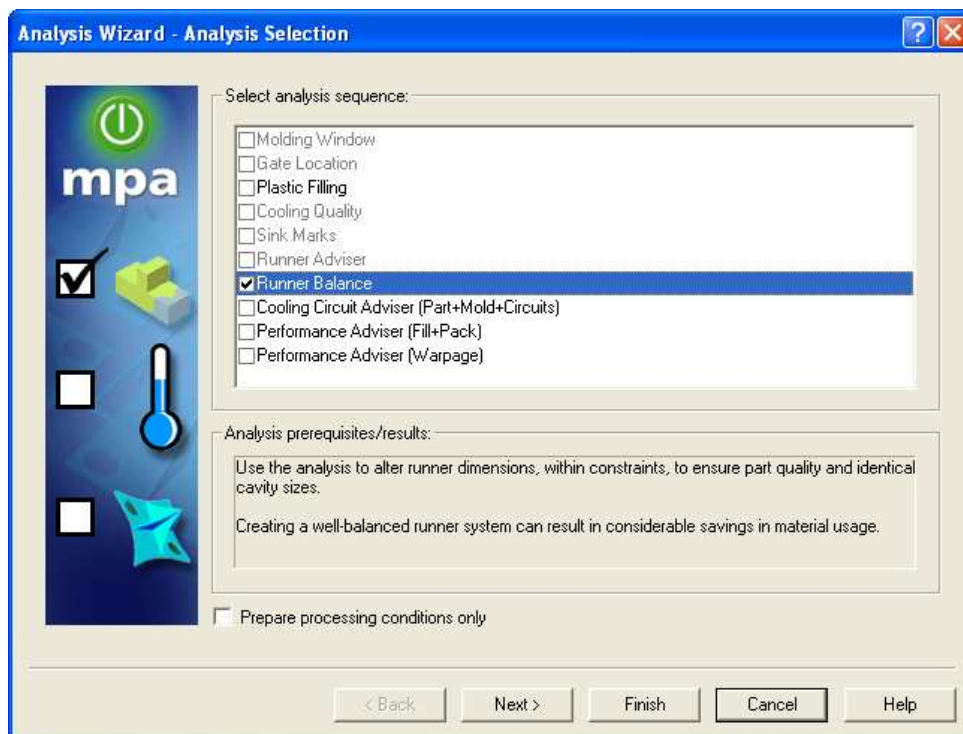
Slika 7.34. Vrijeme hlađenja

7.5. Optimiranje uljevnog sustava

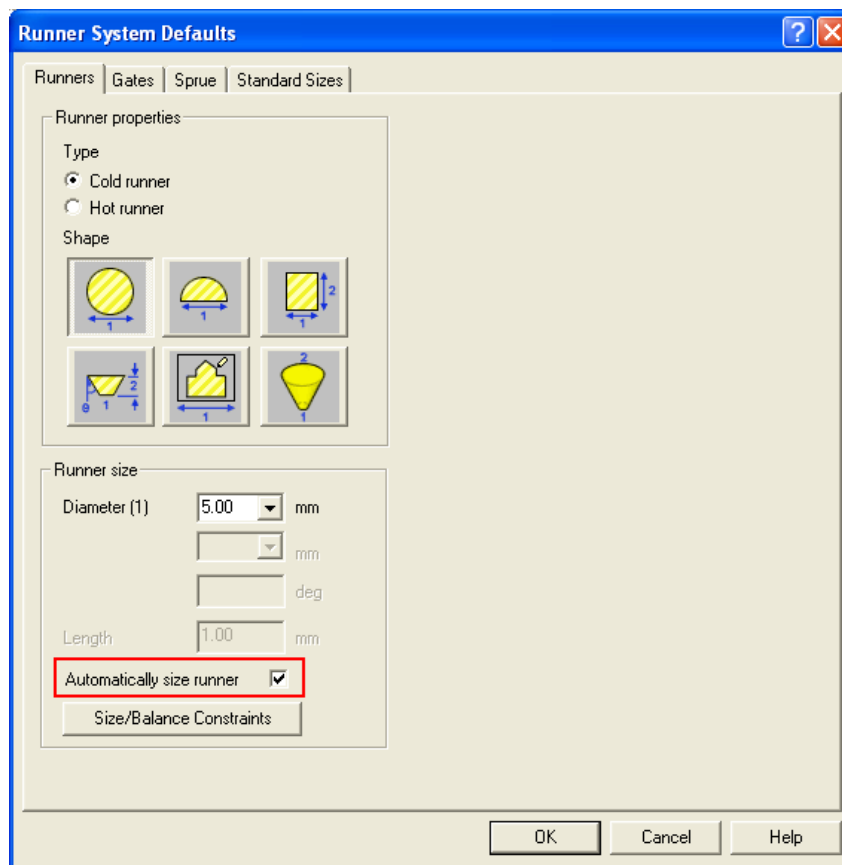
Nakon provedene analize tečenja rastaljenog polimera (*Plastic Fill*) i dobivenih rezultata, pokušat će se poboljšati rezultati na način da program sam pokuša uravnotežiti uljevni sustav promjenom parametara uljevnog sustava. Program na temelju rasporeda kalupnih šupljina, njihove geometrije i svojstava materijala izračunava optimalne parametre uljevnog sustava za postavljenu situaciju.

U *Analysis Wizardu* pokreće se simulacija uravnoteženje uljevnog sustava (*Runner Balance*) (slika 7.35.). U postavkama za definiranje ušća, uljevnih kanala i uljevka uključuje se opcija *Automatically size* (slika 7.36.).

Po završetku simulacije parametri uljevnog sustava su očitani iz *Moldflow Mold Advisera* te su tablično uspoređeni s početnima (tablica 7.2.).



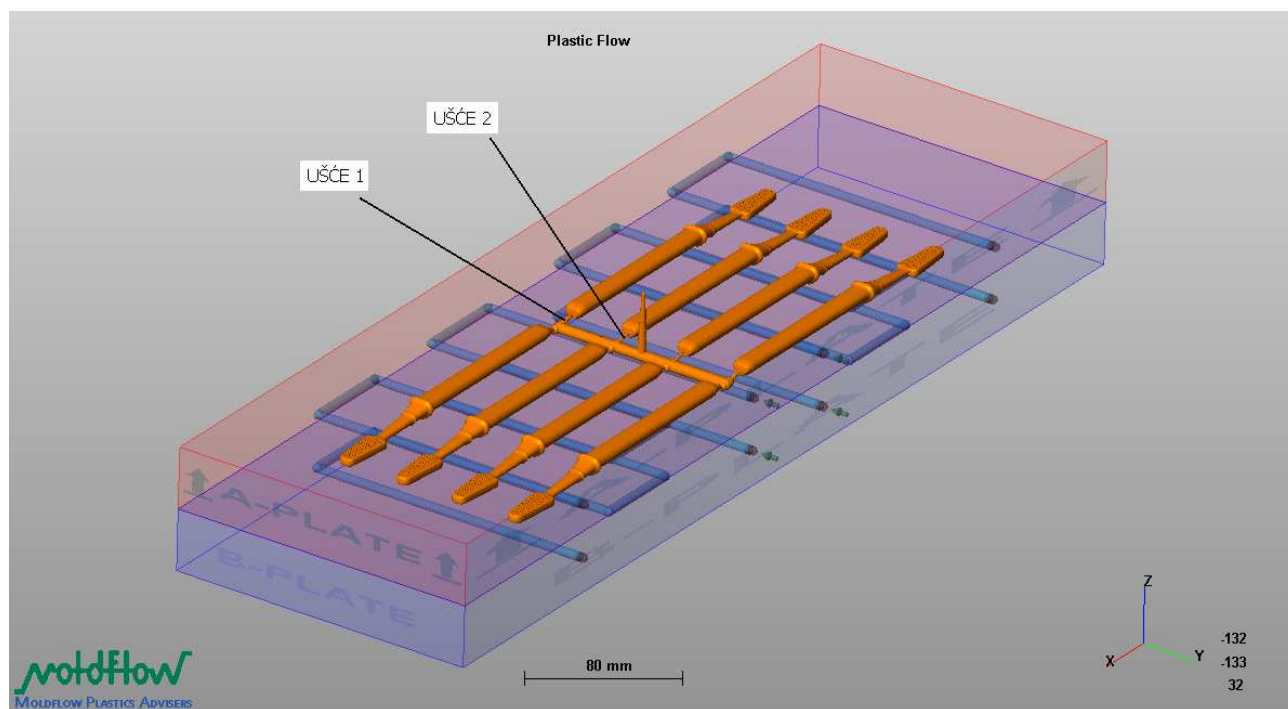
Slika 7.35. Odabir željene analize



Slika 7.36. Opcija *Automatically size*

Tablica 7.2. Usporedba parametara uljavnog sustava (prije i nakon uravnoteženja)

ELEMENTI ULJEVNOG SUSTAVA	VELIČINA, mm	POČETNE VRIJEDNOSTI PARAMETARA	NOVE VRIJEDNOSTI PARAMETARA
UŠĆE 1 (Gate)	d_1	5,0	3,20
	d_2	1,5	1,88
UŠĆE 2 (Gate)	d_1	5,0	1,8
	d_2	1,5	1,8
ULJEVAK (Sprue)	d_1	2,0	2,0
	d_2	6,0	5,17
ULJEVNI KANALI (Runners)	d	5,0	5,82



Slika 7.37. Ušće 1 i Ušće 2

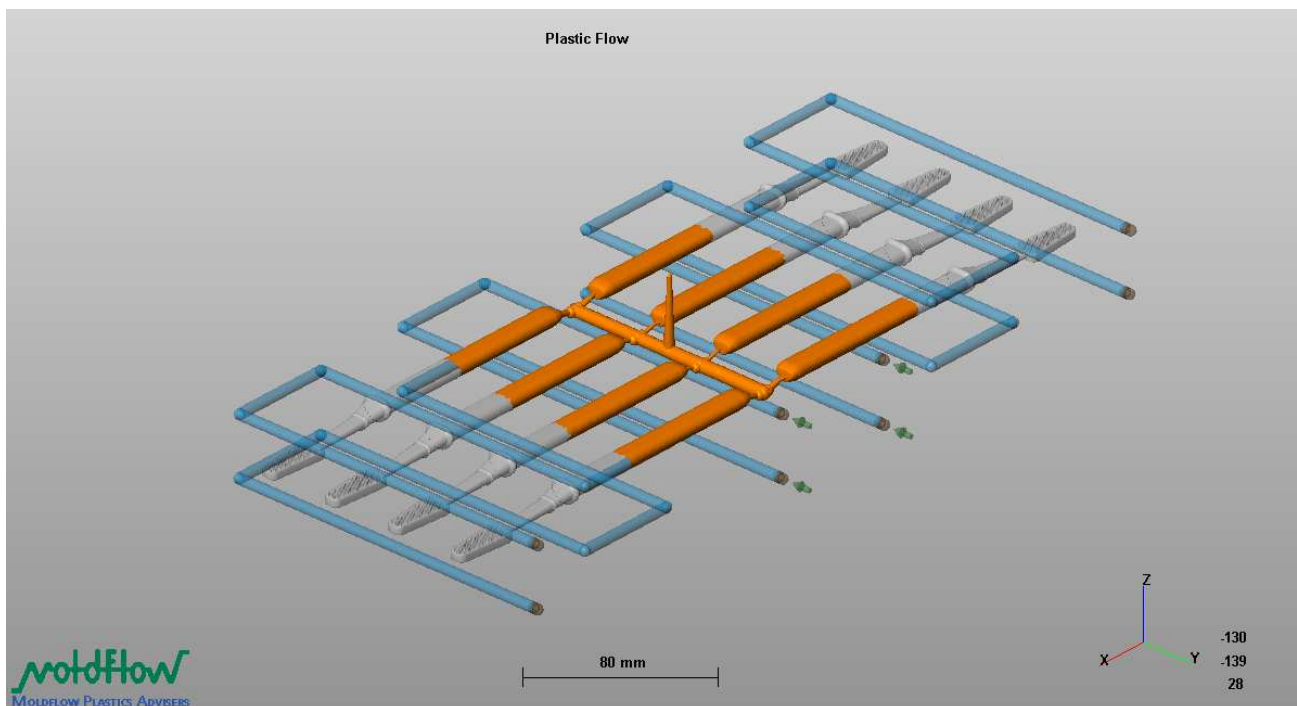
7.6. Ponovljena simulacija sa novim parametrima

Nakon optimiranja parametara uljavnog sustava provodi se nova simulacija sa dobivenim parametrima te se rezultati uspoređuju s prethodnom simulacijom. Za pokretanje simulacije uključuje se *Analysis Wizard* i u njemu se definira koja analiza se želi pokrenuti (slika 7.23.). Nakon odabira *Plastic Filing* pritiskom na gumb *Finish* pokreće se analiza. U okviru ove točke promatraju se samo rezultati *Plastic Flow*, *Fill Time*, *Pressure drop* i *Flow Front Temperature* jer se na temelju njih može zaključiti o kvaliteti budućih otpresaka. Iz analiza linije spajanja (*Weld Line*) i zaostali zračni mjehuri (*Air Traps*) ne saznaje se ništa novo, jer se radi o istim kalupnim šupljinama.

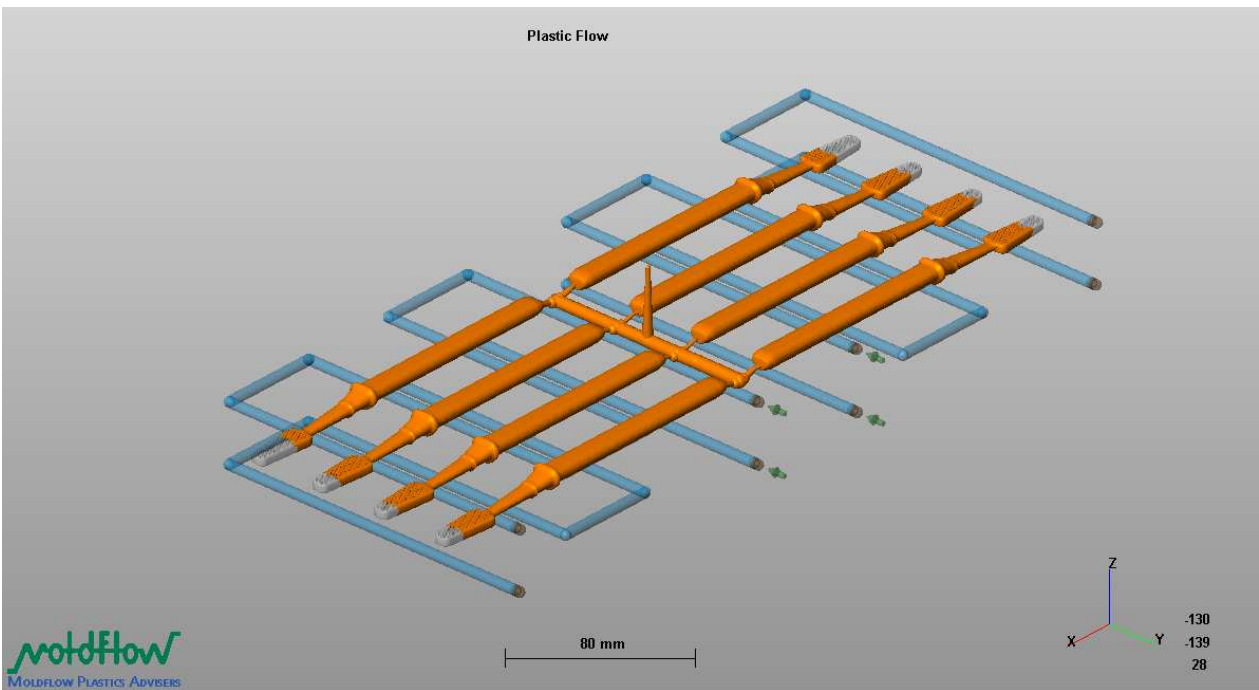
7.7. Rezultati simulacije i interpretacija rezultata

7.7.1. Tečenje rastaljenog polimera (e. *Plastic flow*)

Iz slika 7.38. i 7.39. vidljivo je da polimerna taljevina jednoliko popunjava sve kalupne šupljine. Već na temelju ovog rezultata mogli bi zaključiti kako je program dobro optimirao dimenzije uljavnog sustava.



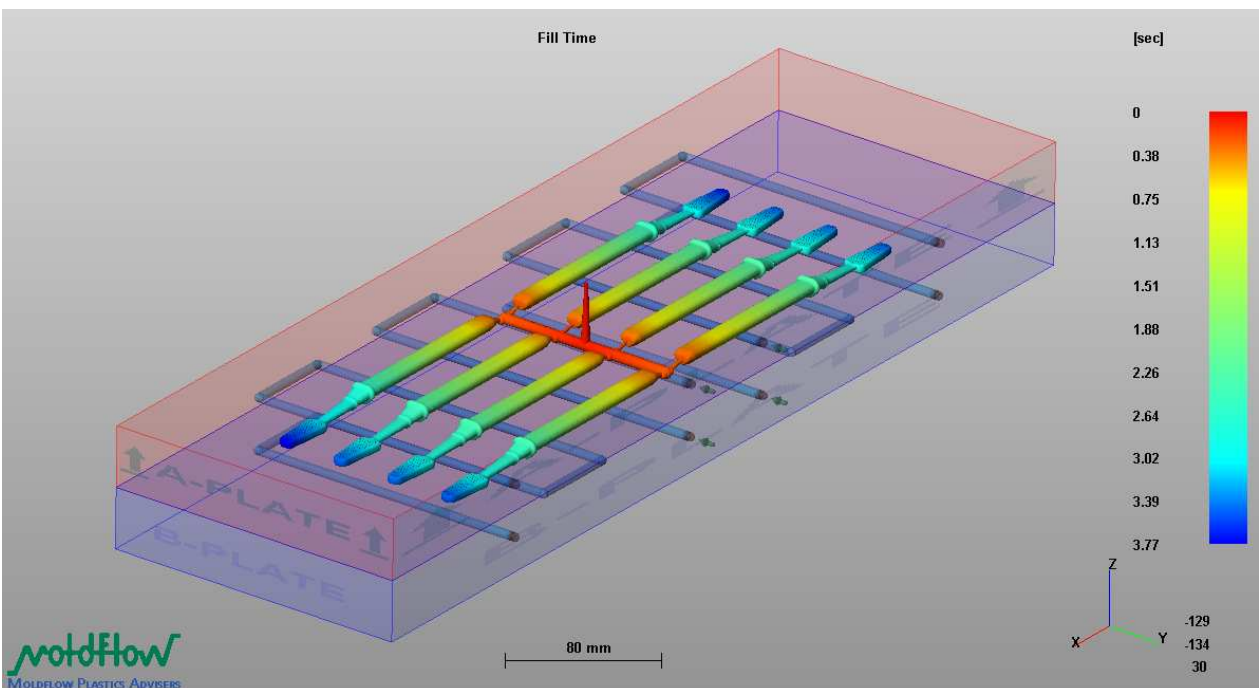
Slika 7.38. Tok rastaljenog polimera



Slika 7.39. Tok rastaljenog polimera

7.7.2. Vjerojatnost popunjavanja kalupnih šupljina (e. Confidence of fill)

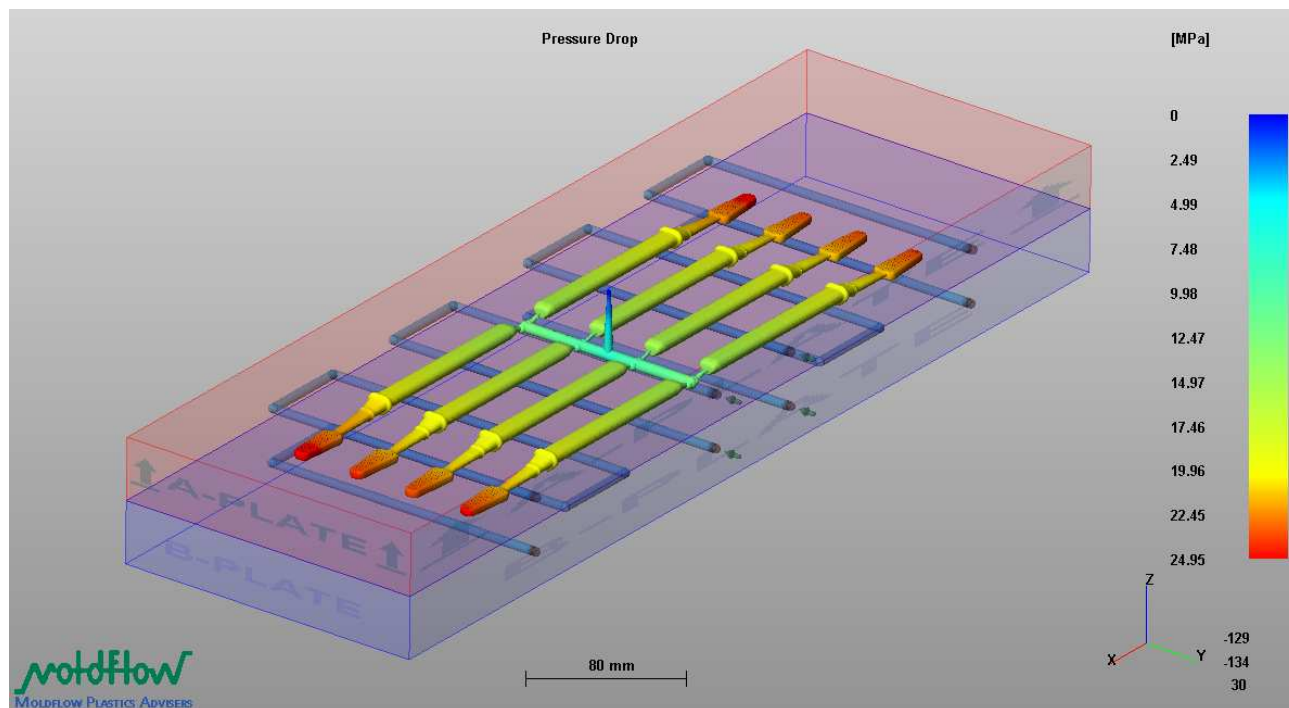
Sa slike 7.40. vidljivo je da se isti dijelovi kalupnih šupljina popunjavaju u isto vrijeme.



Slika 7.40. Vrijeme punjenja

7.7.3. Pad tlaka u kalupnoj šupljini (e. Pressure drop)

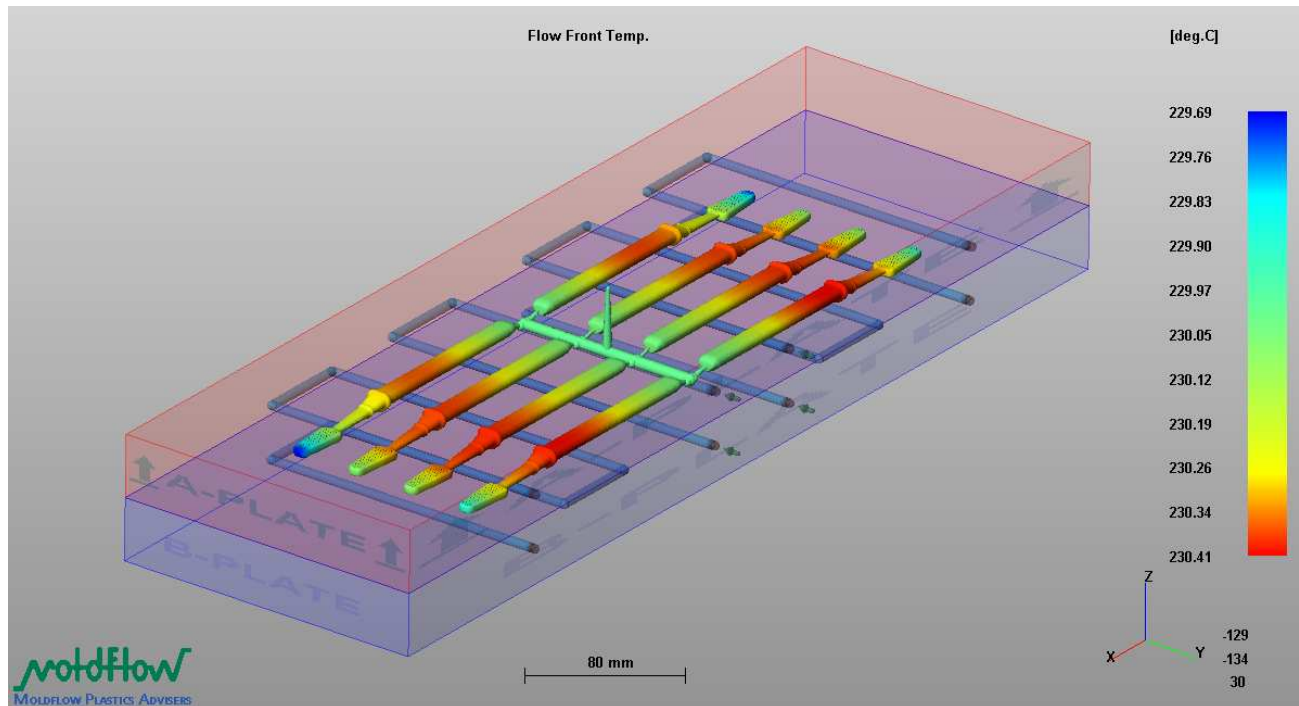
Sa slike 7.41. vidljivo je da je pad tlaka u svim kalupnim šupljinama jednak.



Slika 7.41. Pad tlaka

7.7.4. Temperatura čela taljevine (e. Flow front temperature)

Na slici 7.42. može se uočiti da su razlike u temperaturi između kalupnih šupljina vrlo male.



Slika 7.42. Temperatura čela taljevine

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti kako je program vrlo uspješno optimirao parametre uljevnog sustava. Smanjivanjem dimenzija ušća koja se nalaze bliže uljevku postignuto je ravnomjernije punjenje kalupnih šupljina, što je ujedno rezultiralo ujednačavanjem tlaka i temperature, te će opresci u jednom ciklusu biti podjednake mehaničke svojstava i dimenzija. Jako korisnim pokazala se analiza *Air Traps* koja upozorava na mjesta gdje se nakuplja potisnuti zrak nakon prolaska kroz kalupnu šupljinu. Analiza vrijeme hlađenja (*Cooling time*) vrlo je bitna zbog toga što se na temelju nje može otprilike procijeniti vrijeme trajanja ciklusa i ukazuje na područja koja treba dodatno hladiti ili zagrijavati.

8. ZAKLJUČAK

Postupci prerade polimera u današnje vrijeme postaju sve složeniji, pa tako i postupak injekcijskog prešanja. Izrada sve kompleksnijih otpresaka zahtjeva veliku pozornost konstruktora već u početnim fazama razrade kalupa. Uporabom računala pri konstruiranju i razvoju alata za injekcijsko prešanje uvelike se smanjuje vrijeme razrade, a ujedno se postiže viša ekonomičnost. Budući da je faza punjenja kalupne šupljine jedna od najkompliciranijih, za predviđanje zbivanja u kalupnoj šupljini u velikoj mjeri koriste se razni računalni programi. Analiza punjenja kalupne šupljine objašnjava mnoge parametre koji utječu na ponašanje taljevine tijekom ubrizgavanja i radi toga je vrlo važna. Za numerički proračun kalupa koristi se veliki broj računalnih programa, a jedan od njih je i *Moldflow*. S korisničkog aspekta dobre strane ovog računalnog programa su što omogućava vrlo brzu simulaciju punjenja kalupne šupljine. Uporaba je vrlo jednostavna i ne zahtijeva generiranje mreže konačnih elemenata (FEM). Rezultati simulacije mogu već u ranoj fazi razvoja kalupa dati vrlo korisne podatke o popunjenosti kalupne šupljine, razdiobi tlakova i temperatura u kalupnoj šupljini, pojavi linija spajanja i sl. Ovaj program pretežno se koristi za brzu analizu punjenja kalupne šupljine, te je za točnu analizu potrebno je načiniti potpunu analizu s generiranjem mreže konačnih elemenata.

LITERATURA

1. Čatić, I.: *Uvod u proizvodnju polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1990.
2. Custompart, <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>, 10.02.2009
3. Rogić, A. i Čatić, I.: *Injekcijsko prešanje polimera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1996.
4. Šercer, M. i Raos, P.: *Proizvodnja i primjena polimernih proizvoda*, Fakultet strojarstva i brodogradnje (Zagreb), Strojarski fakultet (Slavonski Brod), nastavni materijali
5. Marić, H.: *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
6. Godec, D. : *Magistarski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje
7. Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J. : *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006
8. Moldflow Corporation: *Moldflow White Paper*, Solutions for Mold Designers, http://www.moldflow.com/stp/pdf/mpa/WP_MPA_MoldAdviser.pdf, 10.02.2009
9. Moldflow: Računalni program – Mold Adviser 7.0, 2003

