

Razvoj kompozitne drvno-plastomerne školjke stolca i tehnologije njene izrade

Petek, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:636427>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Petek

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Karlo Petek

Zagreb, 2022.

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

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

Zahvaljujem tvrtki Prostoria na ukazanoj prilici i podršci tijekom mog obrazovanja. Također zahvaljujem djelatnicima tvrtke na susretljivosti i pomoći, a posebno zahvaljujem kolegama iz odjela Razvoj i odjela Tehnologije na prenesenom znanju i iskustvu, hvala na svim savjetima i pomoći oko izrade ovog rada.

Hvala obitelji, a posebno roditeljima na podršci tijekom studiranja, hvala na razumijevanju i strpljenju tijekom cijelog mog školovanja.

Posebno hvala mojoj djevojci Patriciji na bezuvjetnoj podršci, savjetima i razumijevanju. Hvala na saslušavanju svih mojih problema i dilema s kojima sam se susretao. Hvala na pruženoj ljubavi.

Karlo Petek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KARLO PETEK**

Mat. br.: 0035213720

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj kompozitne drvno-plastomerne školjke stolca i tehnologije njene izrade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of composite wooden-plastic chair shell and technology for it's manufacturing**

Opis zadatka:

Ušteda na resursima (materijalima), recikliranje i kružno gospodarstvo samo su neki od trendova današnjice općenito, pa tako i u industriji proizvodnje namještaja. Jedan od nusprodukata pri proizvodnji namještaja je drvena piljevina koju je moguće reciklirati na različite načine, a jedan od njih je vraćanje u proizvodni proces. Međutim, kako bi to bilo moguće, drvenu piljevinu je potrebno miješati s materijalom koji će je povezati. S druge strane u svijetu je također prisutan trend pritiska na plastičarsku industriju za primjenom rješenja prihvatljivih za okoliš. Jedno od rješenja koje je na raspolaganju je smješavanje drvene piljevine i plastomera u drvno-plastomerni kompozit i injekcijsko prešanje. U slučaju prelaska s proizvodnje drvenog namještaja na proizvodnju kompozitnog drvno-plastomernog namještaja konstruktoru proizvoda je omogućena veća sloboda u oblikovanju, zbog mogućnosti koje pruža injekcijsko prešanje, no pri tome valja prilagoditi i proizvod i parametre procesa drvno-plastomernom kompozitu.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- 1) Načiniti pregled primjene injekcijskog prešanja drvno-plastomernih kompozita u industriji namještaja.
- 2) Načiniti pregled najčešće primjenjivanih drvno-plastomernih kompozita za izradu dijelova namještaja injekcijskim prešanjem.
- 3) Opisati mogućnosti primjene računalne simulacije injekcijskog prešanja drvno-plastomernih kompozita.
- 4) Na konkretnom primjeru školjke stolca prikazati rekonstruiranje proizvoda pri prelasku s potpuno drvenog proizvoda na drvno-plastomerni kompozit načinjen injekcijskim prešanjem.
- 5) Opisati tehnološki proces injekcijskog prešanja školjke stolca injekcijskim prešanjem s izabranim drvno-plastomernim kompozitom (omjer drvene i plastomerne komponente), te načiniti računalnu simulaciju procesa prerade.
- 6) Donijeti zaključak o dobivenim rezultatima.

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

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. PRIMJENA INJEKCIJSKOG PREŠANJA U INDUSTRIJI NAMJEŠTAJA.....	3
2.1. Injekcijsko prešanje.....	3
3. DRVNO-PLASTOMERNI KOMPOZITI U INDUSTRIJI NAMJEŠTAJA	10
3.1. Dobivanje drvno-plastomernog kompozita.....	10
3.2. Drvna komponenta.....	12
3.2.1. Drvna vlakna.....	12
3.2.2. Drvno brašno	15
3.2.3. Aditivi	17
3.3. Prednosti i nedostaci drvno – plastomernih kompozita.....	18
3.4. Primjena i proizvodi drvno - plastomernih kompozita u industriji namještaja.....	19
3.5. Najčešće primjenjivani drvno-plastomerni kompoziti u industriji namještaja.....	22
4. RAČUNALNA SIMULACIJA PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	25
4.1. CAE („ <i>Computer Aided Engineering</i> “).....	25
4.2. Moldex3D.....	26
4.2.1. Ulazni parametri.....	26
4.2.2. Rezultati simulacije injekcijskog prešanja	29
4.3. CAD („ <i>Computer Aided Design</i> “).....	30
5. EKSPERIMENTALNI DIO	31
5.3.1. Presjek školjke stolca.....	36
5.3.2. Problem razdjelne linije i otvaranja kalupa.....	37
5.3.3. Provjera čvrstoće	41
5.3.4. Provjera dizajna	43
6. RAČUNALNA SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA ŠKOLJKE STOLCA	45
6.1. Simulacija injekcijskog prešanja u programskom alatu Moldex3D	45
6.1.1. Uvažanje 3D modela, definiranje atributa i generiranje mreže konačnih elemenata	45
6.1.2. Definiranje parametara procesa i materijala.....	46
6.2. Rezultati simulacije injekcijskog prešanja	47
6.2.1. Ispunjavanje kalupne šupljine	47
6.2.2. Balans ispunjavanja kalupne šupljine	47
6.2.3. Linije spajanja	48
6.2.4. Mjehurićavost.....	50

6.2.5. Smično naprezanje materijala	50
6.2.6. Sila držanja kalupa	51
6.2.7. Debljina otpreska.....	52
6.2.8. Zagrijavanje zbog viskoznosti.....	53
6.2.9. Učinak djelovanja naknadnog tlaka	54
6.2.10. Stezanje, vitoperenje i deformacija otpreska.....	57
6.2.11. Ulegnuća i usahline.....	58
6.3. Zaključak o tehnološnosti razmatrane školjke stolca.....	59
7. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA.....	61
PRILOZI.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Sustav za injekcijsko prešanje [2]	4
Slika 2.	Proces injekcijskog prešanja [3].....	4
Slika 3.	Veličina tržišta namještaja [4]	5
Slika 4.	Korištene tehnologije kod izrade stolca [5].....	6
Slika 5.	Klizač.....	7
Slika 6.	Prvi prototip kotačića za mehanizam vodilice	8
Slika 7.	Kotačići vodilice dobiveni obradom odvajanjem čestica i injekcijskim prešanjem	8
Slika 8.	Obraðeni komadi drva	10
Slika 9.	Otpad nastao obrađivanjem velike količine drva	10
Slika 10.	Proces dobivanja peleta drvno-plastomernog kompozita [8]	11
Slika 11.	Dobivanje drvnih vlakana [9].....	12
Slika 12.	Svojstva drvno-plastomernog kompozita ovisno o udjelu drvnih vlakna [10]	13
Slika 13.	Smanjenje drvnih vlakna pri injekcijskom prešanju [11].....	15
Slika 14.	Sitna piljevina prikupljena filtracijom.....	16
Slika 15.	Ekstrudirani profili drvno – plastomernog kompozita [16].....	20
Slika 16.	Klizači od polipropilena s 50% udjela drvene komponente [16]	20
Slika 17.	"Odger" stolac [17].....	21
Slika 18.	Injekcijsko prešanje školjke stolca "Odger" [18]	22
Slika 19.	Pojednostavljeni tijek konstruiranja proizvoda korištenjem softvera	26
Slika 20.	Razlika između plošne i obujamne analize punjenja kalupne šupljine [20].....	27
Slika 21.	Moguće analize u programu Moldex3D studio (za edukacijsku licencu)	28
Slika 22.	Rezultati simulacije u Moldex3D programskom alatu.....	29
Slika 23.	3D model stolca napravljen u programskom paketu SolidWorks	30
Slika 24.	Stolac „Oblikant“ tvrtke Prostorja [5]	31
Slika 25.	CNC izrezivanje konture školjke stolca „Oblikant“	32
Slika 26.	Presjek školjke stolca „Oblikant“	32
Slika 27.	Analiza nagiba početne konstrukcije.....	33
Slika 28.	Analiza nagiba s drugačijim kutom otvaranja	34
Slika 29.	Simulacija opterećenja na školjku	34
Slika 30.	Puknuće stolca	35
Slika 31.	Presjek A-A rekonstruirane školjke stolca	36
Slika 32.	Presjek C-C rekonstruirane školjke stolca.....	36
Slika 33.	Poželjni i nepoželjni nagibi ruba otpreska	37
Slika 34.	Rub modificirane školjke	37
Slika 35.	Razdjelna linija kod modificirane školjke	38
Slika 36.	Problem vađenja otpreska	38
Slika 37.	Usporedba dviju školjki.....	39
Slika 38.	Usporedba kutova vađenja iz kalupa dviju školjki.....	40
Slika 39.	Otpresak unutar kalupa.....	40
Slika 40.	Pomična i nepomična polovica kalupa	40
Slika 41.	Početni uvjeti simulacije	41
Slika 42.	Raspodjela faktora sigurnosti	42
Slika 43.	Elastična deformacija školjke.....	42
Slika 44.	Usporedba postojeće i modificirane školjke	43
Slika 45.	Problem postolja i prijedlog rješenja	43
Slika 46.	Definirani otpresak, uljevni sustav i kalup	45
Slika 47.	Ispunjavanje kalupne šupljine	47

Slika 48.	Popunjenost kalupne šupljine u trenutku početka djelovanja naknadnog tlaka	48
Slika 49.	Linija miješanja i linija zavara [22].....	49
Slika 50.	Linija spajanja kod injekcijskog prešanja razmatrane školjke stolca.....	49
Slika 51.	Moguća mjesta nastanka džepova zraka	50
Slika 52.	Smična naprezanja.....	51
Slika 53.	Sila držanja kalupa	52
Slika 54.	Debljina otpreska školjke nakon vađenja iz kalupa	52
Slika 55.	Temperature razmatrane školjke stolca	53
Slika 56.	Maksimalna temperatura razmatrane školjke stolca i uljevnog sustava.....	54
Slika 57.	Djelovanje naknadnog tlaka na razmatranu školjku stolca	55
Slika 58.	Očvršćivanje taljevine	55
Slika 59.	Primjer lošeg djelovanja naknadnog tlaka [22].....	56
Slika 60.	Uzrok loše raspodjele djelovanja naknadnog tlaka	56
Slika 61.	Stezanje otpreska razmatrane školjke.....	57
Slika 62.	Usporedba otpreska	58
Slika 63.	Vjerojatnost pojave usahlina i ulegnuća.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba injekcijskog prešanja i obrade odvajanjem čestica	7
Tablica 2. Duljine drvnih vlakna prije i nakon injekcijskog prešanja [11]	14
Tablica 3. Ovisnost mehaničkih svojstava kompozita polipropilena s 40% drvnog brašna o veličini čestica brašna [13].	16
Tablica 4. Utjecaj punila i aditiva na mehanička svojstva kompozita [13].	17
Tablica 5. Beobase 25 PPC INJ074.....	23
Tablica 6. WPC 1140 V01	23
Tablica 7. WPC 1160 V03	24
Tablica 8. Pregled ispunjenja zahtjeva za dizajnom stolca	44
Tablica 9. Karakteristike odabrane ubrizgavalice	46
Tablica 10. Postavke procesa	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
θ	$^{\circ}$	kut dviju fronti taljevine

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
CAD	„ <i>Computer aided design</i> “ - računalom potpomognuto konstruiranje
CAE	„ <i>Computer aided engineering</i> “ – računalom potpomognuto inženjerstvo
CAM	„ <i>Computer aided manufacturing</i> “ – računalom potpomognuta proizvodnja
CNC	„ <i>Computer numerical control</i> “ – računalno numeričko upravljanje
EBS	Etilen bis-stearamid
MAPP	(„ <i>Maleic anhydride-modified polypropylene</i> “) –polipropilen modificiran anhidridom maleinske kiseline.
OOČ	Obrada odvajanjem čestoca
PLA	Polilaktična kiselina
WPC	<i>Wood plastic composite</i> – drvno polimerni kompozit

SAŽETAK

Tema rada je primjena drvno-plastomernog kompozita u industriji namještaja korištenjem tehnologije injekcijskog prešanja. U radu je dana usporedna tehnologija prerade materijala u industriji namještaja. Također, opisani su drvno-plastomerni kompoziti te je dan pregled najkorištenijih kompozita, njihova svojstva i sastav.

Na primjeru školjke stolca prikazana je potrebna rekonstrukcija da bi se zadovoljila tehnološkičnost injekcijskog prešanja, zahtjevi dizajna i čvrstoće

Također, u radu se opisan proces injekcijskog prešanja školjke stolca od drvno-plastomernog kompozita kroz rezultate simulacije procesa. Rezultati simulacije podijeljeni su po karakterističnim svojstvima za proces injekcijskog prešanja, a za svako svojstvo je opisan utjecaj na proces i kvalitetu otpreska. Na kraju je dan zaključak o tehnološkičnosti rekonstruirane školjke stolca

Ključne riječi: injekcijsko prešanje, drvno – plastomerni kompozit, namještaj, stolac, računalna simulacija, razvoj i konstruiranje proizvoda.

SUMMARY

The subject of this thesis is the usage of wood plastic composites in the furniture industry using injection moulding. In thesis, comparison between multiple manufacturing processes in the furniture industry is given. Also, wood plastic composites are described, and a review of most used composites and their properties is given.

The shell of a chair is reconstructed to satisfy the needs of injection moulding process, design demands and overall strength.

Also, in the thesis, process of injection moulding of the chair shell from wood plastic composites is described. Results of simulations are divided by the properties of the process, and through every property effect on the process and the end product is explained.

In the end, reconstruction of the chair shell is reviewed.

Key words: injection moulding, wood plastic composite, chair, computer simulation, design and development.

1. UVOD

Injekcijsko prešanje je tehnologija koja omogućava kratko vrijeme izrade nekog proizvoda s velikom iskoristivošću materijala (otpad je minimalan – uljevni sustav) te je zbog toga proizvod izrađen injekcijskim prešanjem često jeftiniji od proizvoda napravljenog nekom drugom tehnologijom (obradom odvajanjem čestica, oblikovanjem deformiranjem itd.). No, iako se postiže niska cijena proizvoda, injekcijsko prešanje iziskuje velika početna ulaganja u odnosu na ostale tehnologije. Kako bi se dobio kvalitetan proizvod, odnosno otpresak, potrebno je izdvojiti vrijeme za razradu proizvoda, alata i postupka, a samo konstruiranje iziskuje znanje i iskustvo konstruktora.

Današnjom tehnologijom i dostupnim računalnim programima moguće je simulirati proces injekcijskog prešanja te dobiti uvid u moguće poteškoće i sam način ponašanja cijelog procesa, kako bi se po potrebi, proizvod mogao doraditi, odnosno, razviti da bude tehnološki prihvatljiv i izvediv. Takvom tehnologijom omogućeno je konstruktoru da već u fazi razvijanja proizvoda uvidi moguće probleme te ih spriječi mijenjanjem dizajna, a samim time se štedi vrijeme i mogući troškovi koji bi nastali kod izrade tehnološki ne optimiranog proizvoda.

U današnje vrijeme, problem kod injekcijskog prešanja predstavlja materijal – plastomeri. Zbog lošeg ljudskog upravljanja, plastika se smatra materijalom koji nije ekološki prihvatljiv, pa je zbog toga, proizvod načinjen od ne reciklirane plastike na tržištu u lošijoj poziciji od nekih drugih proizvoda koji su načinjeni od „zelenijih“ materijala.

Ovaj diplomski rad rađen je u suradnji s tvrtkom Prostoria koja proizvodi visoko kvalitetni dizajnerski namještaj, koji se izrađuje obradom drva te se dobiva nusprodukt – drvena piljevina. Takva piljevina se smatra otpadom i prodaje se dalje proizvođačima drvenih peleta. Kada bi se ta piljevina, koja se smatra otpadom, uspjela iskoristi za neki novi proizvod, postigla bi se potpuna cirkularnost proizvoda, te bi se takav proizvod smatrao „zelenim“ i imao bi dobru poziciju na tržištu. Spajanjem plastike, odnosno, plastomera koji ima neželjenu reputaciju proizvoda koji je loš za okoliš i drvene piljevine koja se smatra otpadom, moguće je dobiti proizvod, drvno-plastomerni kompozit, koji zbog injekcijskog prešanja postiže nisku cijenu izrade, a zbog korištenja otpadnih materijala takav proizvod postaje ekološki prihvatljiv.

Cilj ovog rada je istražiti drvno-plastomerne kompozite, njihovo dobivanje, primjenu, mehanička svojstva, prihvatljivost za okoliš te koliko su pogodni za injekcijsko prešanje. Također, na primjeru školjke stolca prikazat će se potrebna prilagodba proizvoda, kako bi isti bio pogodan za injekcijsko prešanje, a da se pritom zadovolji dizajn, izgled površine i potrebna mehanička svojstva.

2. PRIMJENA INJEKCIJSKOG PREŠANJA U INDUSTRIJI NAMJEŠTAJA

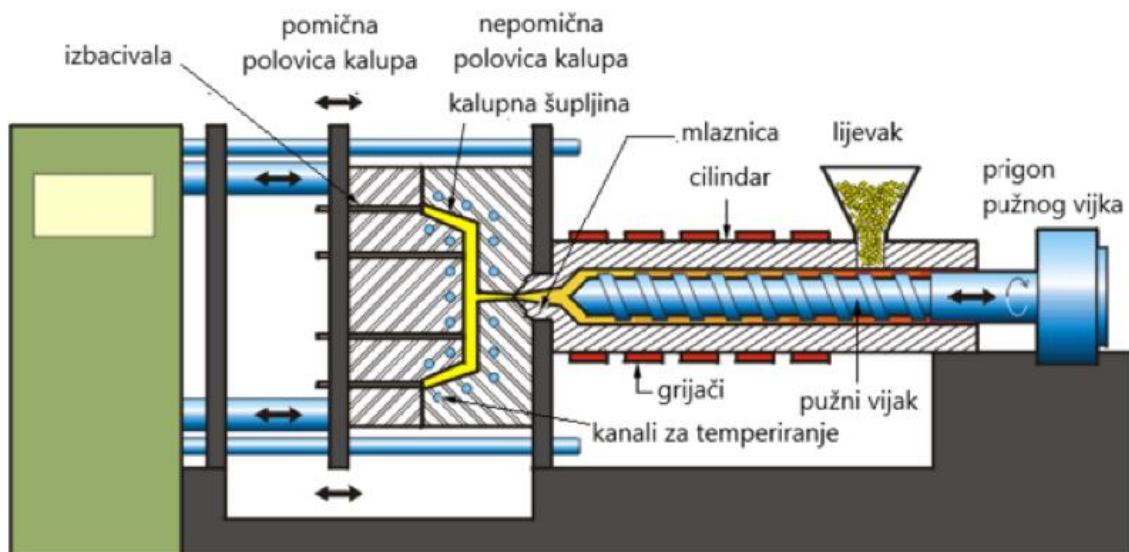
2.1. Injekcijsko prešanje

Injekcijsko prešanje najvažniji je ciklički postupak preradbe polimera. Injekcijsko prešanje plastomera pripada postupcima praoblikovanja ili pravljenja čvrstog tijela od bezobličnih tvari, pri čemu se postiže povezanost među česticama, stvara se građa materijala. Općenito, injekcijsko prešanje plastomera definira se kao ciklički postupak praoblikovanja ubrizgavanjem plastomerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje ubrizgavalice u temperiranu kalupnu šupljinu. Tvorevina, otpresak, postaje hlađenjem podobna za vađenje iz kalupne šupljine. [1]

Na slici 1. je prikazan osnovni sustav za injekcijsko prešanje.

Takav sustav sastoji se od:

- Lijevka s granulatom
- Cilindra za ubrizgavanje
- Prigona pužnog vijka
- Grijača
- Pužnog vijka
- Mlaznice
- Nepomične i pomične stezne ploče
- Kalupa
- Vodilica
- Potisnog cilindra i pumpe
- Izbacivala.

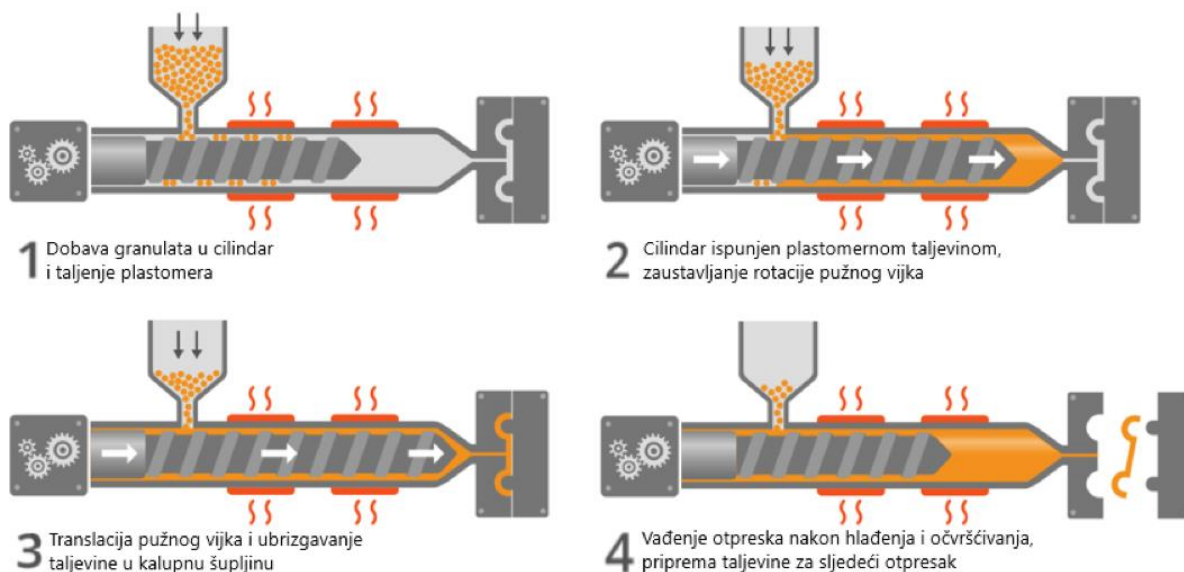


Slika 1. Sustav za injekcijsko prešanje [2]

Početni, odnosno sirovi materijal u procesu injekcijskog prešanja jest granulat. Taj granulat prolazi kroz cilindar u kojemu omekšava te se s pomoću pužnog vijka i cilindra za ubrizgavanje velikom brzinom i pod velikim pritiskom ubrizgava u kalupnu šupljinu gdje se oblikuje u željeni proizvod, te se nakon očvršćivanja vadi iz kalupa.

Takav ciklus traje relativno kratko i ima veliku iskoristivost materijala, te zbog toga, proizvod napravljen injekcijskim prešanjem često ima manju cijenu izrade od proizvoda napravljenih drugim tehnologijama.

Na slici 2. prikazan je proces injekcijskog prešanja.



Slika 2. Proces injekcijskog prešanja [3]

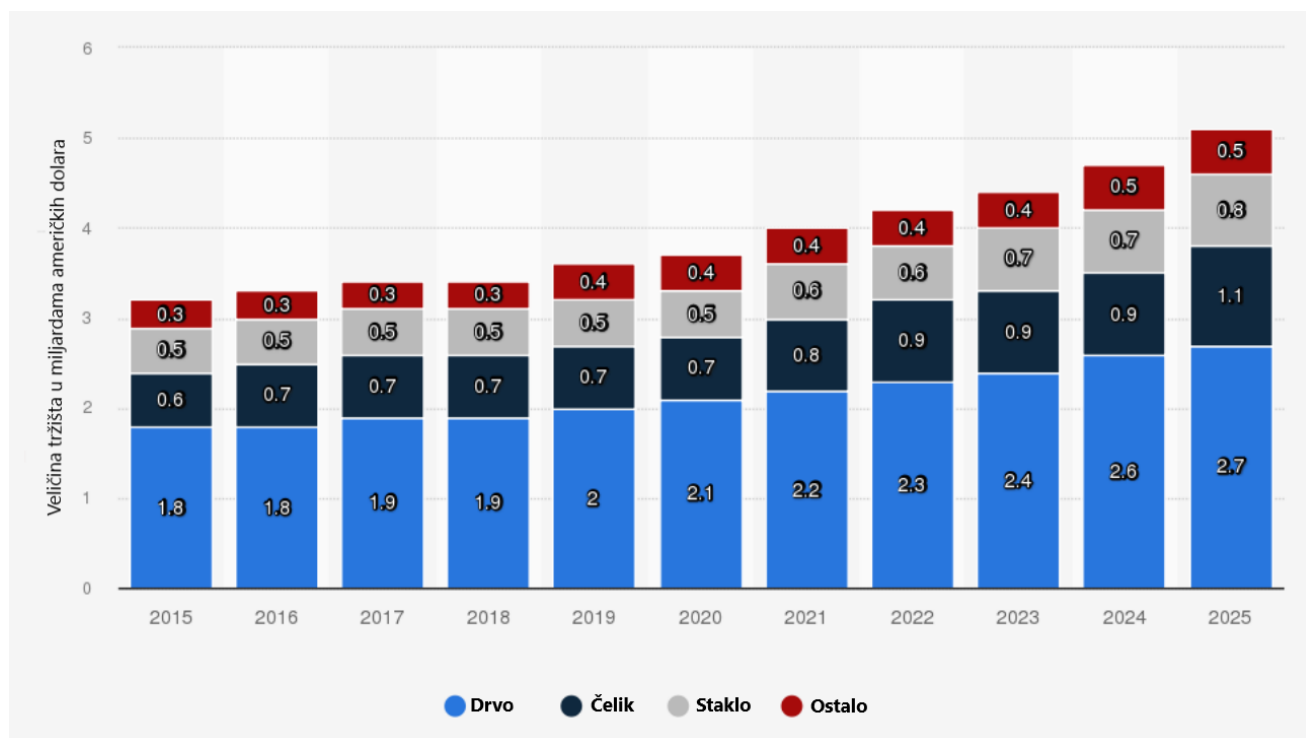
2.2. Usporedba injekcijskog prešanja i ostalih postupaka u industriji namještaja

U industriji namještaja, dominantna tehnologija je obrada odvajanjem čestica.

Ostali procesi prerade materijala koji se koriste su:

- Zavarivanje
- Lijepljenje
- Oblikovanje deformiranjem (savijanje)
- Injekcijsko prešanje
- Aditivna proizvodnja.

Na slici 3. prikazana je veličina tržišta namještaja u SAD-u. Iz studije se može zaključiti da je drvo najkorišteniji materijal, što potvrđuje tvrdnju da je obrada odvajanjem čestica dominantna tehnologija. Studija je rađena 2019., a podaci prikazani za godine 2020. – 2025. su predviđanja kako će se tržište kretati.



Slika 3. Veličina tržišta namještaja [4]

Iako su plastomeri, slabo zastupljen materijal, odnosno injekcijsko prešanje slabo zastupljena tehnologija u industriji namještaja, bitno je reći kako velika većina namještaja ima barem jedan dio izrađen od plastomera, i to upravo injekcijskim prešanjem. Injekcijsko prešanje se kao postupak koristi u industriji namještaja kod izrade čitavih proizvoda (npr. plastični

stolac), kod izrade klizača (svaki komad namještaja koristi klizače, a plastomeri su zbog svojih svojstava idealan izbor za izradu klizača, dok injekcijsko prešanje osigurava nisku cijenu) te kod izrade ne zahtjevnih ležajnih mjesta.

Na slici 4. prikazan je stolac tvrtke Prostorja te su za pojedine dijelove označene tehnologije, odnosno, način izrade.



Slika 4. Korištene tehnologije ekod izrade stolca [5]

Iako jedva vidljiv, klizač na ovakvome stolcu je neophodan, a injekcijsko prešanje omogućuje veoma nisku cijenu tog dijela. Za usporedbu, kada bi se takav dio (slika 5.) radio obradom odvajanjem čestica, on bi bio otprilike 20 puta skuplji nego kod izrade injekcijskim prešanjem, što bi se u konačnici očitovalo u cijeni proizvoda, odnosno, stolca u ovom slučaju.



Slika 5. Klizač

U tablici 1. prikazane su prednosti i nedostaci injekcijskog prešanja u odnosu na obradu odvajanjem čestica, točnije, glodanje i tokarenje.

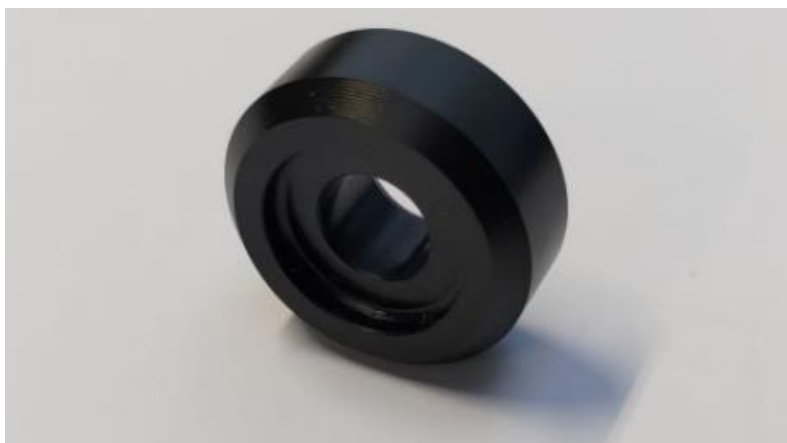
Tablica 1. Usporedba injekcijskog prešanja i obrade odvajanjem čestica

Injekcijsko prešanje	Obrada odvajanjem čestica (glodanje, tokarenje)
Jeftini proizvodi	Poskupljuje proizvod
Velika početna ulaganja (stroj + kalup)	Stroj je skup ali bez dodatnih ulaganja moguće izrađivati više različitih dijelova dok se kod injekcijskog prešanja za svaki dio mora izrađivati kalup
Bez mogućnosti naknadnog mijenjanja proizvoda	Moguće revidirati proizvod
Potrebna veća količina proizvoda da se kalup isplati	Isplative značajno manje serije u odnosu na injekcijsko prešanje
Kratko vrijeme izrade	Duže vrijeme izrade u odnosu na injekcijsko prešanje
Dobra iskoristivost materijala	Loša iskoristivost materijala

2.3. Primjer poboljšanja proizvodnje izradom dijelova injekcijskim prešanjem

Pošto obrada odvajanjem čestica omogućuje izradu više različitih dijelova istim alatima, ta je tehnologija idealna za izradu prototipova za razliku od injekcijskog prešanja koje iziskuje ulaganja u alate, odnosno, kalupe. Ovo pogotovo vrijedi u industriji namještaja, gdje je cilj što brže doći do funkcionalnog prototipa.

Na slici 6. prikazan je prvi prototip kotača vodilice mehanizma za otvaranje garniture „Klaster“ tvrtke Prostorja.



Slika 6. Prvi prototip kotačića za mehanizam vodilice

Riječ je o jednostavnom proizvodu koji je dobiven obradom odvajanjem čestica od šipke poliacetala. Nakon izrade prvog prototipa garniture uvidjeli su se nedostaci takvog mehanizma te se vođenje doradilo, a kotačić izmijenio. Upravo obrada odvajanjem čestica omogućava brzu i jednostavnu izradu novog prototipa bez troškova ulaganja. Osim obrade odvajanjem čestica, brzu izradu prototipa omogućuje i aditivna proizvodnja koja u ovome slučaju nije korištena zbog nedostupnosti.



Slika 7. Kotačići vodilice dobiveni obradom odvajanjem čestica i injekcijskim prešanjem

Slika 7. prikazuje revidirani kotačić vodilice. Prvo je izrađen lijevi kotačić na slici i to obradom odvajanjem čestica, nakon toga se taj kotačić pokazao uspješnim u vodilici mehanizma i nije bilo potrebe za daljnjim rekonstrukcijama kotačića.

Nakon što je konstrukcija kotačića jasno definirana, krenulo se u izradu alata za injekcijsko prešanje. Naime, isti takav kotačić s konstrukcijom prilagođenom za injekcijsko prešanje (slika 7. – desni kotačić) ispunjava istu svrhu s manjom proizvodnom cijenom.

Dakle, iz navedenog primjera vidljivo je kako se obrada odvajanjem čestica koristi kod izrade prvih prototipova, odnosno u situacijama kada se očekuju česte promjene ili dorade proizvoda zbog niskih potrebnih ulaganja, dok se na injekcijsko prešanje prelazi kad postoji jasno definirani proizvod za koji se ne očekuje daljnja promjena ili dorada zbog potrebnih ulaganja u alat, odnosno, kalup.

Prelazak na injekcijsko prešanje pojeftinjuje proizvod, omogućava izradu velikih serija te u ovome slučaju oslobađa tokarski stroj koji nekom drugom proizvodu može stvoriti veću dodanu vrijednost.

3. DRVNO-PLASTOMERNI KOMPOZITI U INDUSTRIJI NAMJEŠTAJA

3.1. Dobivanje drvno-plastomernog kompozita

U industriji namještaja glavni materijal je drvo, a obradom drva stvara se određena količina otpada (slika 8. i 9.). Iskorištavanjem tog otpada smješavanjem s plastomernom komponentom dobiva se drvno-plastomerni kompozit koji može biti pogodan za injekcijsko prešanje. Na taj način moguće je izrađivati proizvode sa smanjenim negativnim utjecajem na okoliš po povoljnoj cijeni.



Slika 8. Obradjeni komadi drva



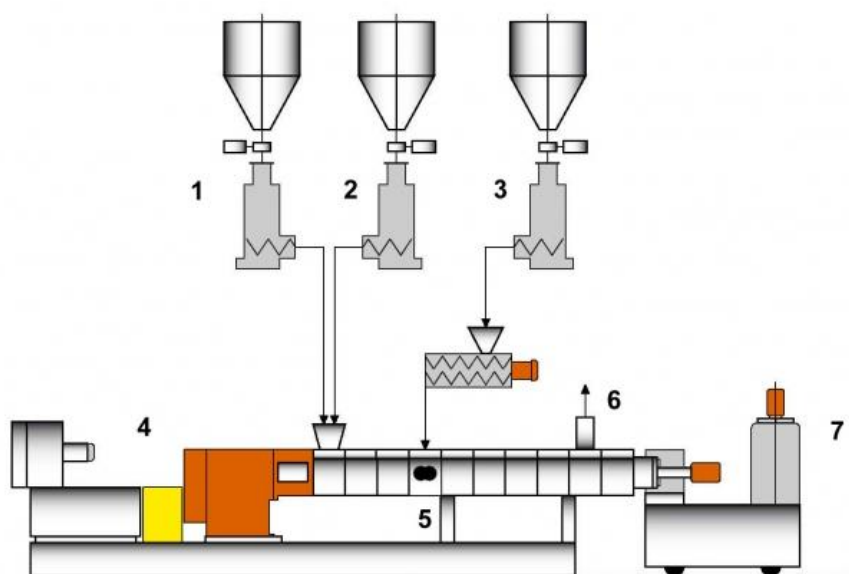
Slika 9. Otpad nastao obrađivanjem velike količine drva

Drvno – plastomerni kompoziti su plastomeri koji sadrže određen postotak drvnog „brašna“ (fino mljevena piljevina) ili kratkih vlakna. Takva mješavina, odnosno kompozit, umanjuje nedostatke pojedinih materijala s ciljem isticanja dobrih svojstava. Pa tako drvena vlakna ojačavaju materijal, dok plastomer služi za povezivanje ojačala, te pridonosi svojstvima poput sprječavanja upijanja vlage i UV stabilizaciji.

Dio procesa dobivanja peleta drvno-plastomernog kompozita je sušenje drvnih vlakana ili brašna kako bi se smanjio udio vlage koji nepovoljno utječe na kvalitetu peleta, a samim time na kvalitetu otpreska. Prisutnost vlage izaziva poroznost, smanjuje gustoću materijala i povećava upijanje vlage gotovog kompozita [6].

Pošto drvo degradira pri temperaturi višoj od 200 °C (ovisno o vrsti drva), nužno je koristiti polimere koji se mogu obrađivati pri temperaturama ispod 200 °C – polietilen, polipropilen, polivinil klorid. Također, kao matrica mogu se koristiti i neki biorazgradivi polimeri poput polilaktične kiseline (PLA). [7]

Peleti drvno-plastomernih kompozita dobivaju se tako da se u ekstruder (najčešće dvopužni) dozira željena količina plastomerne komponente, aditiva i osušene drvene komponente. U ekstruderu se komponente zagrijavaju i spajaju, a na izlazu se dobiva jednoličan materijal koji se peletizira (reže na manje komadiće). Slika 10. prikazuje takav proces.



1) Doziranje polimera 2) Doziranje aditiva 3) Doziranje drvene komponente 4) Dvopužni ekstruder 5) Pužni vijci 6) Izlaz plinova 7) Peletizator

Slika 10. Proces dobivanja peleta drvno-plastomernog kompozita [8]

3.2. Drvna komponenta

Drvo je prirodan materijal i građeno je od prirodnih polimera – lignina, celuloze i hemiceluloze. Nije osjetljivo na promjenu temperature, ali je vrlo sklono upijanju vlage i podložno biodegradaciji. Što se tiče mehaničkih svojstava, drvo ima višu čvrstoću i krutost od polimera te je prikladno kao punilo ili ojačalo. [7]

Postoje dvije vrste faze drva koje se mogu koristiti kao komponenta u drvno-plastomernom kompozitu. To su drvno brašno i drvna vlakna.

3.2.1. Drvna vlakna

Drvna vlakna dobivaju se rafiniranjem drvenih strugotina nastalih obradom drva. U procesu rafiniranja drvo se izlaže povišenom tlaku i temperaturi te se mijenjaju njegova kemijska svojstva i sadržaj vode. Dobivenim vlaknima se zatim dodaje aditiv koji služi za bolje umrežavanje i interakciju s polimernom matricom.

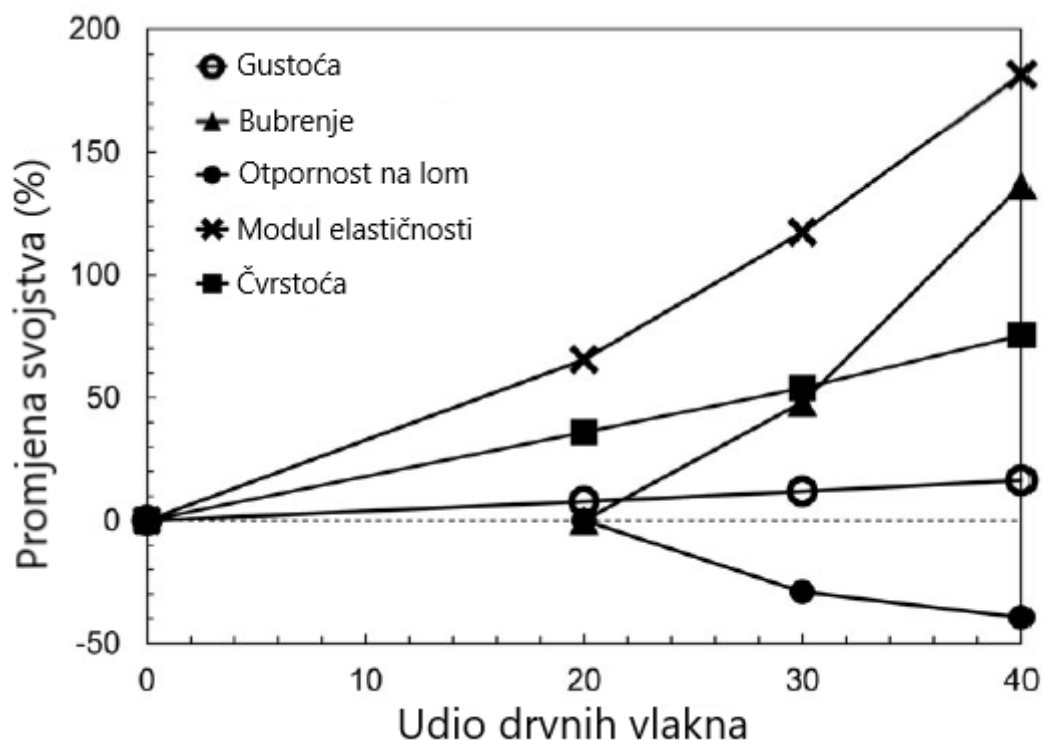


Slika 11. Dobivanje drvnih vlakana [9]

Uobičajeni omjer duljine i promjera kod drvnih vlakana iznosi 24:1 (duljina/promjer) [7].

Kod upotrebe drvnih vlakana može se postići visok stupanj ojačanja. Ovisno o udjelu drvene komponente mijenjaju se mehanička svojstva kompozita. Povećavanjem udjela drvnih vlakana u drvno-plastomernom kompozitu dolazi do povećanja čvrstoće, krutosti i granice razvlačenja, no dolazi do smanjenja duktilnosti i povećanja krhkosti.

Na slici 12. prikazana je ovisnost gore spomenutih svojstava o udjelu drvnih vlakana.



Slika 12. Svojstva drvno-plastomernog kompozita ovisno o udjelu drvnih vlakna [10]

Graf potvrđuje da doista dolazi do ranije spomenutih promjena mehaničkih svojstava, no, ukazuje i na opasnost bubrenja kod povišenog udjela drvene faze, pa je izuzetno bitno kontrolirati udio vlage u drvu jer ona dovodi do povećanog upijanja vlage gotovog kompozita. Bubrenje je jedan od razloga zbog kojeg se ne preporučuje korištenje udjela drvene tvari većeg od 65%.

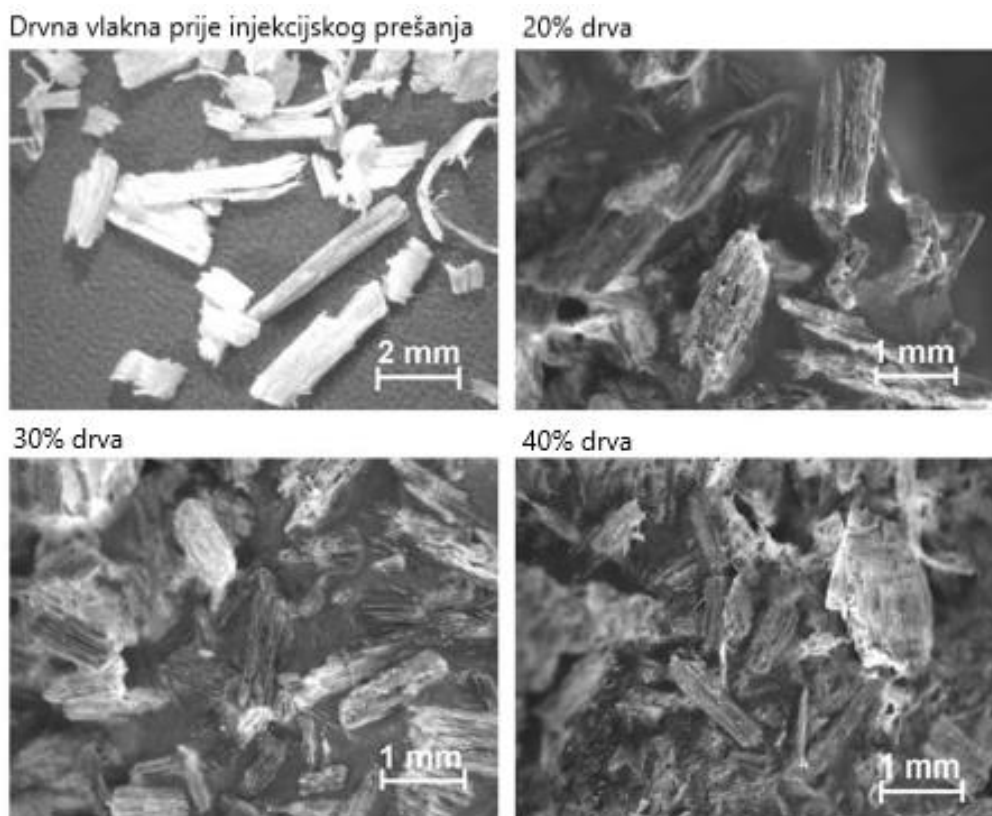
Osim bubrenja, kod povećanja udjela drvnih vlakana dolazi do porasta viskoznosti polimerne taljevine što otežava protok i samu preradu materijala. Problem visoke viskoznosti se obično rješava povećanjem temperature prerade, no u ovom slučaju, to je nemoguće pošto se drvo degradira pri višim temperaturama. Zbog toga se pribjegava korištenju aditiva koji olakšavaju preradu.

Tijekom procesa injekcijskog prešanja prolaskom materijala kroz pužni vijak ubrizgavaluce i uljevni sustav kalupa dolazi do degradacije vlakana u matrici kompozita. U tablici 2. prikazana je usporedba duljine drvnih vlakna prije i nakon injekcijskog prešanja u ovisnosti o udjelu drvnih vlakana u kompozitu.

Tablica 2. Duljine drvnih vlakna prije i nakon injekcijskog prešanja [11]

Početna duljina vlakna u kompozitu [mm]	$2,2 \pm 0,8$
Duljina vlakna nakon injekcijskog prešanja kompozita s 20 % udjela drvnih vlakna [mm]	$1,0 \pm 0,4$
Duljina vlakna nakon injekcijskog prešanja kompozita s 30 % udjela drvnih vlakna [mm]	$0,8 \pm 0,3$
Duljina vlakna nakon injekcijskog prešanja kompozita s 40 % udjela drvnih vlakna [mm]	$0,7 \pm 0,3$

Iz podataka se može zaključiti kako je s povećanjem udjela drvnih vlakana u kompozitu smanjenje vlakana tijekom procesa injekcijskog prešanja veće. U istraživanju [11] se navodi kako su se vlakna smanjivala u oba smjera (longitudinalno i transverzalno), odnosno, navodi se kako je omjer duljine i širine ostao isti, što upućuje na to da do smanjenja vlakana dolazi uslijed velikih pritiska prisutnih kod injekcijskog prešanja. Na slici 13. prikazana su vlakna prije i nakon injekcijskog prešanja u ovisnosti o udjelu drvene faze u kompozitu.



Slika 13. Smanjenje drvnih vlakna pri injekcijskom prešanju [11]

3.2.2. Drvno brašno

Termin drvno brašno donekle je višeznačan i odnosi se na drvo svedeno na sitne, razdvojene čestice, veličinom, izgledom i strukturom najsličnije brašnu žitarica [12].

Drvno brašno se karakterizira veličinom čestica, odnosno, veličinom otvora u situ kojim se sortira brašno. Uobičajena veličina čestica drvnog brašna je od 180 do 840 μm [7].

Drvno brašno je jeftinija opcija u usporedbi s drvnim vlaknima jer zahtjeva manje dodatne obrade te je lako dostupna. Zbog toga, drvno brašno se koristi kao punilo u plastici što povećava krutost kompozita, no, ne pridonosi njegovoj čvrstoći kao što je slučaj s drvnim vlaknima.

Na slici 14. prikazana je drvena piljevina koja se može smatrati drvnim brašnom zbog svoje fine strukture i male veličine čestica. Piljevina je prikupljena usisavanjem i filtracijom drvene prašine kod obrade drva u tvornici namještaja.



Slika 14. Sitna piljevina prikupljena filtracijom

Tablica 3. prikazuje ovisnost mehaničkih svojstava kompozita polipropilena s 40% drvnog brašna o veličini čestica drvnog brašna, prilagođeno iz [13].

Tablica 3. Ovisnost mehaničkih svojstava kompozita polipropilena s 40% drvnog brašna o veličini čestica brašna [13].

Prosječna veličina čestice [mm]	Rastezna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Istezanje [%]	Savojna čvrstoća [MPa]	Modul savijanja [GPa]	Udarni rad loma [J/m]
0,513	21,7	3,20	2,27	38,7	2,69	22,3
0,215	25,5	3,61	2,27	42,6	3,15	19,7
0,128	24,9	3,47	2,29	42,9	3,00	18,7
0,064	24,3	3,46	2,11	41,4	2,89	16,0

Iz tablice je vidljivo kako veličina čestice nema značajniji utjecaj na mehanička svojstva, osim na udarni rad loma koji raste s veličinom čestica.

3.2.3. Aditivi

Kako bi se osigurala što bolja svojstva kompozita i mogućnost njihove prerade, nužni su aditivi. Takvi aditivi mogu služiti za usporavanje gorenja, smanjenje viskoznosti, bolje umrežavanje s matricom i sl.

Najkorištenije vrste aditiva su:

- Aditivi za bolje umrežavanje s matricom
- Lubrikanti
- Bojila.

U istraživanju [13] napravljeni su kompoziti s i bez aditiva za bolje umrežavanje s matricom te su se ispitivala svojstva dobivenih kompozita – tablica 4. U tablici 4. je prikazana usporedba mehaničkih svojstava kompozita polipropilena s drvnim brašnom i drvnim vlaknima (20 %) uz dodatak aditiva za poboljšanje umrežavanja s matricom.

Kao aditiv za bolje umrežavanje se koristio MAPP („*Maleic anhydride-modified polypropylene*“) – to je polipropilen modificiran anhidridom maleinske kiseline.

Tablica 4. Utjecaj punila i aditiva na mehanička svojstva kompozita [13]

Materijal punila	Rastezna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Istezanje [%]	Savojna čvrstoća [MPa]	Modul savijanja [GPa]	Udarni rad loma [J/m]
Drvno brašno	25,8	2,23	4,4	43,0	1,84	19,5
Drvno brašno + MAPP	29,4	2,35	4,1	46,9	1,90	19,1
Drvna vlakna	26,2	2,27	4,2	42,9	1,88	20,8
Drvna vlakna + MAPP	37,0	2,31	4,9	52,2	1,91	22,5
Polipropilen	28,5	1,53	5,9	38,3	1,19	20,9

Iz podataka je vidljivo kako je dodavanje drvnih vlakana znatno ojačalo materijal. Dodavanjem vlakana povećali su se modul elastičnosti i modul savijanja.

Također je vidljivo kako je dodavanje aditiva značajno utjecalo na svojstva kompozita s drvnim vlaknima ojačavajući vezu između vlakana i polipropilenske matrice. Rezultat toga su poboljšanja u rasteznoj i savojnoj čvrstoći kompozita.

Veća poboljšanja čvrstoća opažaju se kod kompozita s drvnim vlaknima zbog bolje sposobnosti prenošenja opterećenja s matrice na vlakna nego kod uzorka s drvnim brašnom (bolji omjer duljine i širine kod vlakana).

Može se zaključiti kako su drvena vlakna prikladnija za ojačavanje materijala, a drveno brašno je, zbog svoje niske cijene dobar materijal za punilo koji ne ojačava polipropilensku matricu.

Osim aditiva za bolje umrežavanje s matricom, bitni su i aditivi za smanjenje viskoznosti, odnosno, lubrikanti. Kako s porastom udjela vlakana u kompozitu raste viskoznost, tako je sve veća potreba za dodavanjem lubrikanata koji omogućuju lakšu preradu i manju potrošnju energije. Drvno – plastomerni kompoziti koriste i do dva puta više lubrikanata od standardnih plastičnih materijala [14].

Materijali koji se dodaju kao lubrikanti su etilen bis-stearamid (EBS), cink stearat i parafinski vosak. No, valja biti oprezan kod korištenja lubrikanata, jer upotrebom metalnih stearata (sapuna) poništava se učinak aditiva za bolje umrežavanje s matricom. [14]

Također, kao aditiv se koriste i bojila, koja osiguravaju izgled vanjske površine proizvoda. Kod bojila se traži da budu otporna na izbjeljivanje i UV zračenja.

Plijesan i mrlje na nekim WPC proizvodima tjeraju proizvođače da razmotre antifungalne biocide koji štite plastičnu komponentu i održavaju njen površinski izgled, i/ili čuvaju drvenu komponentu od propadanja i smanjuju upijanje vlage. Pokazalo se da vremenske prilike i UV zračenje degradiraju površinu netretiranih WPC-a unutar nekoliko tjedana nakon izlaganja. Takvi proizvodi postanu svjetliji jer se obojeni ekstrakti i lignin iz drvenih vlakana uklanjaju kišom pa na mjestima, gdje je došlo do slabljenja drvenih vlakana i poremećaja plastomerne komponente, dolazi do promjene boje na površini. Također, vlaga može dovesti do gubitaka mehaničkih svojstava i stvaranju povoljnijeg okruženja za rast gljivica. [14]

3.3. Prednosti i nedostaci drvno – plastomernih kompozita

Kako je ranije spomenuto, drvena vlakna ojačavaju plastomernu matricu pa su tako jedna od prednosti bolja mehanička svojstva u usporedbi s neojačavanim plastomernim materijalom. Osim boljih mehaničkih svojstava, pošto se drvena komponenta dobiva iz otpada, i to otpada materijala koji se smatra obnovljivim – drva, drvno-plastomerni kompozit se smatra ekološki

prihvatljivim materijalom jer se zamjenjuje čak i do 65 % fosilne komponente. Bitno je naglasiti kako trošak izrade ne raste jer se koristi otpadni materijal.

Glavni nedostatak drvno-plastomernih kompozita jest zahtjevnija prerada u odnosu na čiste plastomerne materijale. Postupak injekcijskog prešanja je zahtjevniji te je potrebno znanje kako bi se proces optimirao i kako bi se izbjegle greške kod finalnog proizvoda.

Zagorijevanje materijala jedna je od najčešćih pojava kod injekcijskog prešanja drvno-plastomernih kompozita zbog udjela drva, odnosno, kako je ranije spomenuto, zbog degradiranja drva pri visokim temperaturama.

Također, drvno-plastomerni kompoziti su osjetljivi na smično naprezanje pa valja biti oprezan kod konstruiranja kalupa i odabira brzine ubrizgavanja. Povećana toplina zbog prevelike brzine punjenja kalupe šupljine uzrokuje pojavu pruga bogatih smolom na površini otpreska [15].

Osim dobrog optimiranja parametara injekcijskog prešanja, drvno – plastomerni kompoziti iziskuju dobru kvalitetu sirovine – npr. vlaga u peletima mora biti strogo kontrolirana kako bi se izbjegle nepoželjne posljedice opisane ranije u tekstu. Također, neophodno je tretirati sirovinu aditivima kako bi se dobila željena svojstva.

Većina mehaničkih svojstava u kompozitu je poboljšana u odnosu na čisti plastomerni materijal, no, valja napomenuti da su svojstva poput duktilnosti i udarnog rada loma kod drvno-plastomernog kompozita lošija (ovisno o količini i vrsti drvene faze).

3.4. Primjena i proizvodi drvno - plastomernih kompozita u industriji namještaja

Drvno – plastomerni kompoziti se za sada najčešće primjenjuju kod ekstrudiranja profila s vanjskom strukturom sličnom onoj od drva. Takvi profili se koriste za obloge kod terasa gdje su izloženi vanjskim utjecajima (kiša, sunce) jer su oni puno otporniji na takve uvjete za razliku od drva, a vanjska struktura im može biti vrlo slična drvu zbog drvene komponente u kompozitu.



Slika 15. Ekstrudirani profili drvno – plastomernog kompozita [16]

Osim ekstrudiranjem, mnogo proizvoda drvno-plastomernih kompozita izrađuje se injekcijskim prešanjem pa se tako ranije spomenuti klizači za namještaj mogu izrađivati injekcijskim prešanjem drvno-plastomernog kompozita. Takvi klizači većinom nemaju pretjerano velike zahtjeve za mehanička svojstva, pa se može, kao drvena komponenta koristiti drvno brašno koje je jeftino, a omogućava da proizvod (klizač), a samim time i dio namještaja na koji ide taj klizač, postane ekološki prihvatljiviji.



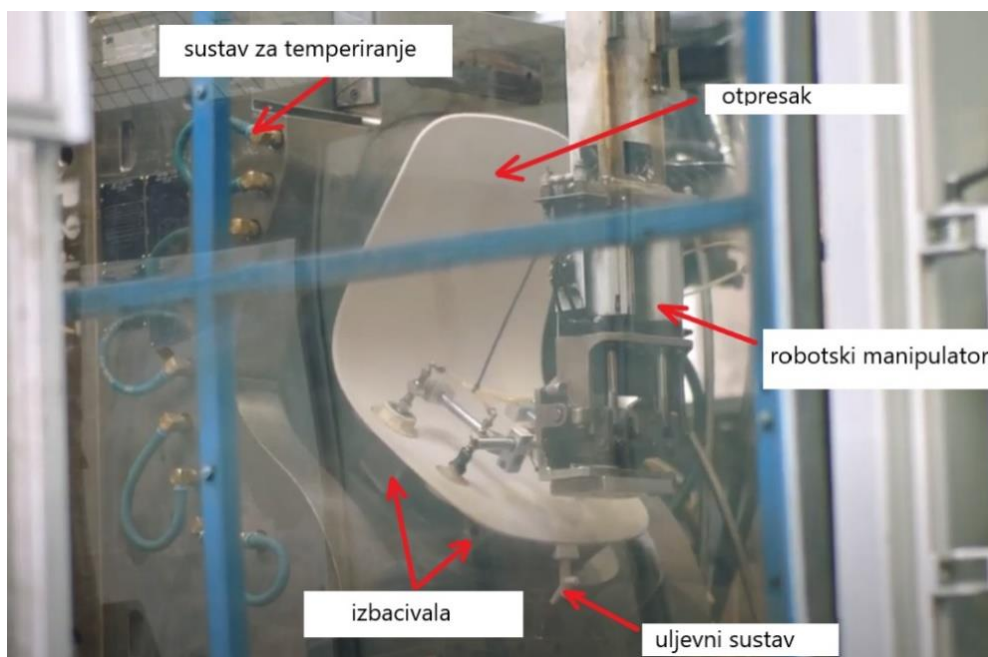
Slika 16. Klizači od polipropilena s 50% udjela drvene komponente [16]

U posljednje vrijeme, zbog razvijanja kompozita s drvnim vlaknima, a ne brašnom, dolazi do porasta broja proizvoda u industriji namještaja koji sadrže drvno-plastomerne kompozite. Dobar primjer takvog proizvoda je stolac čiji naslon i sjedište moraju izdržati određenu propisanu silu kako bi zadovoljili norme i ispunili uvjete za dobivanje potrebnih certifikata. Primjer takvog stolca je „Odger“ stolac tvrtke IKEA (slika 17).



Slika 17. "Odger" stolac [17]

„Odger“ stolac u potpunosti napravljen od drvno-plastomernog kompozita s 30 % udjela drvene faze. Sastoji se od školjke sjedala i postolja, a oba dijela se proizvode injekcijskim prešanjem. Na slici 18. vidljiv je dio kalupa s pomoću kojeg se izrađuje spomenuti stolac. Uz sam stroj i kalup, tu je i robotski manipulator koji omogućava automatsko vađenje otpreska po otvaranju kalupa. Cijeli proces je automatiziran i traje otprilike 4 – 5 minuta (ciklus izrade jednog otpreska).



Slika 18. Injekcijsko prešanje školjke stolca "Odger" [18]

3.5. Najčešće primjenjivani drvno-plastomerni kompoziti u industriji namještaja

Kao što je ranije spomenuto, drvo degradira pri temperaturi višoj od 200 °C pa je nužno koristiti polimere koji se mogu obrađivati pri temperaturama ispod 200 °C.

Nažalost, kako su se tek počeli razvijati drvno-plastomerni kompoziti visoke čvrstoće koji bi bili prigodni za primjenu u industriji namještaja, proizvođači malo otkrivaju u pogledu materijala od kojeg je proizvod ili dio proizvoda napravljen.

U svrhu istraživanja pogodnog materijala za izradu školjke stolca kontaktirano je troje proizvođača za preporuku takvog materijala, od kojih su dvoje ponudili materijale zadovoljavajućih svojstava. Ono što je zajedničko tim materijalima je da se kao plastomerna komponenta u oba slučaja koristi polipropilen, dok udio drvnih vlakana varira od 25 % do 60 % posto. U tablicama 5., 6. i 7. prikazani su materijali, njihov udio pojedinih faza, mehanička svojstva te informativne cijene (vrijedile početkom 2022. godine).

Tablica 5. Beobase 25 PPC INJ074

Tvrtka	Beologic
Naziv proizvoda	Beobase 25 PPC INJ074
Okvirna cijena po kilogramu	26 kn / 3,5 €
Sastav	25 % drvnih vlakana i 75 % PP + aditivi
Modul elastičnosti [MPa]	2950
Vlačna čvrstoća [MPa]	32
Udarni rad loma[kJ/m ²]	2,9
Indeks tečenja taljevine (230 °C/2,16 kg) [g/10 min]	22
Preporučene temperature prerade u pojedinim dijelovima	
Lijevak	40 – 60 °C
Zona dobave	165 – 175 °C
Zona kompresije	170 – 180 °C
Mlaznica	190 – 200 °C
Kalup	30 – 60 °C

Tablica 6. WPC 1140 V01

Tvrtka	Pacyga
Naziv proizvoda	WPC 1140 V01
Sastav	40 % drvnih vlakana i 60 % PP + aditivi
Modul elastičnosti [MPa]	3224
Vlačna čvrstoća [MPa]	45
Udarni rad loma[kJ/m ²]	13,9
Indeks tečenja taljevine (230 °C/2,16 kg) [g/10 min]	5-8
Preporučene temperature prerade	
Temperatura materijala	160 – 180 °C
Kalup	30 – 70 °C

Tablica 7. WPC 1160 V03

Tvrtka	Pacyga
Naziv proizvoda	WPC 1160 V03
Sastav	60 % drvnih vlakana i 40 % PP + aditivi
Modul elastičnosti [MPa]	5298
Vlačna čvrstoća [MPa]	48
Udarni rad loma [kJ/m ²]	12,7
Indeks tečenja taljevine (230 °C/2,16 kg) [g/10 min]	0,1 - 0,3
Preporučene temperature prerade	
Temperatura materijala	160 – 180 °C
Kalup	30 – 70 °C

Iz tablica se može vidjeti kako svojstva materijala mogu varirati ovisno o proizvođaču. Kako je ranije spomenuto, svojstva veoma ovise o aditivima i veličini drvnih vlakna te manipulacijom tih varijabli, proizvođač materijala može znatno utjecati na njegova svojstva.

Kada se uspoređuju mehanička svojstva dobivenih materijala, vidljivo je kako materijal s najvećim udjelom drvnih vlakana ima najviše vrijednosti rastezne čvrstoće i modula elastičnosti. Zbog toga, takav materijal se čini idealnim izborom za injekcijsko prešanje proizvoda kod kojeg postoje zahtjevi za boljim mehaničkim svojstvima – npr. stolac, stol, ležaljka. Također, vidljivo je kako materijali tvrtke Pacyga, odnosno, materijali s povišenim udjelom drvnih vlakana imaju znatno manji indeks tečenja taljevine u odnosu na predloženi materijal tvrtke Beologic (uzrok je količina i veličina drvnih vlakana).

Za oba materijala je preporučena temperatura prerade ispod 200 °C što je u skladu s tvrdnjom iz poglavlja 3.1. kako je nužno da se drvno-plastomerni kompoziti prerađuju pri temperaturama nižim od 200 °C kako bi se izbjegla degradacija drvene komponente.

Oba proizvođača materijala propisuju udio vlage u peletima ispod 0,2 % što također potvrđuje tvrdnje u ovome radu kako je vlaga izrazito bitan faktor kod prerade drvno-plastomernih kompozita. Proizvođači preporučuju sušenje peleta 2 – 8 sati pri temperaturi od 80 do 90 °C, a peleti se moraju čuvati pri temperaturama ispod 50 °C zaštićeni od UV svjetla, a jednom otvarane vreće materijala se moraju odmah iskoristiti ili propisno zatvoriti kako bi se spriječilo upijanje vlage.

4. RAČUNALNA SIMULACIJA PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Kod izrade velikih dijelova/proizvoda u industriji namještaja (stolac, stol, naslonjač) izrazito je bitno dobro konstruirati proizvod, odnosno, kalup jer su zahtjevi za kvalitetom površine visoki, a cijena materijala, tj. izrade kalupa izrazito visoka. Otprilike, cijena izrade kalupa za stolac kreće se od 100 000 do 300 000 € (ovisno o kompleksnosti površina, veličini stolca, proizvođaču itd.), a kalup može težiti i do nekoliko tona. Proces konstruiranja u današnje vrijeme je nezamisliv bez korištenja naprednih alata s pomoću koji se može simulirati proces injekcijskog prešanja. Osim tih alata, prijeko potrebni su CAD i CAM alati koji omogućavaju izradu 3D modela željenog proizvoda i kalupa.

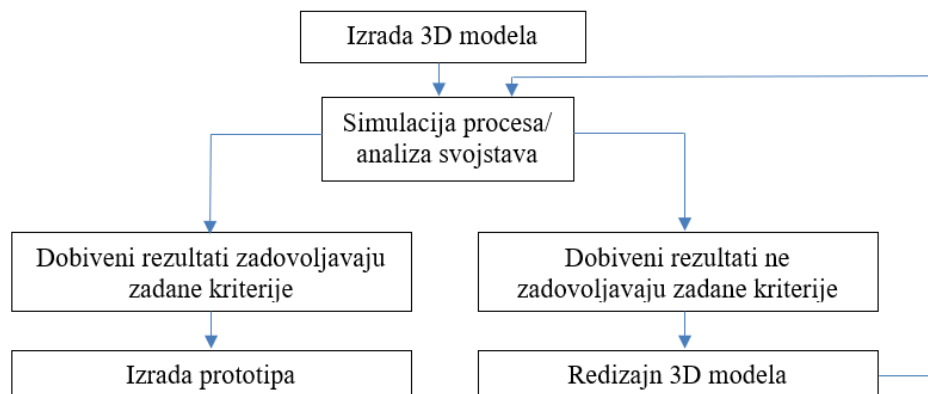
4.1. CAE („*Computer Aided Engineering*“)

CAE (inženjerstvo podržano računalom) je uporaba računalnog softvera za pomoć u zadacima inženjerske analize. Uključuje simulaciju, analizu i optimiranje proizvoda, procesa i proizvodnih alata.

Pod termin CAE spada više programskih alata koji služe za određena područja:

- Analiza opterećenja
- Analiza ponašanja fluida
- Analiza dinamike i kinematike objekata
- Analiza procesa lijevanja, prešanja, oblikovanja.

Standardni postupak kod korištenja CAE alata je izrada 3D modela, a zatim simulacija procesa. Rezultati simulacije se potom evaluiraju te se model po potrebi izmjenjuje kako bi se poboljšao dizajn, odnosno, proces izrade. Nakon redizajna, slijedi ponovna simulacija procesa kako bi se provjerilo, jesu li nedostaci uočeni u prvoj simulaciji doista uklonjeni redizajnom modela. Proces se ponavlja sve dok se ne dobije model sa željenom razinom tehnološkičnosti. Ovakvo korištenje softvera omogućuje brže i jeftinije razvijanje proizvoda, jer ne postoji potreba za fizičkim prototipovima nakon svakog redizajna.



Slika 19. Pojednostavljeni tijek konstruiranja proizvoda korištenjem softvera

4.2. Moldex3D

Moldex3D je CAE alat koji omogućava simulaciju procesa injekcijskog prešanja. S pomoću Moldex3D-a konstruktor alata može dobiti uvid u sve važne parametre procesa injekcijskog prešanja i vidjeti utjecaj ulaznih parametara i dizajna na dobiveni otpresak.

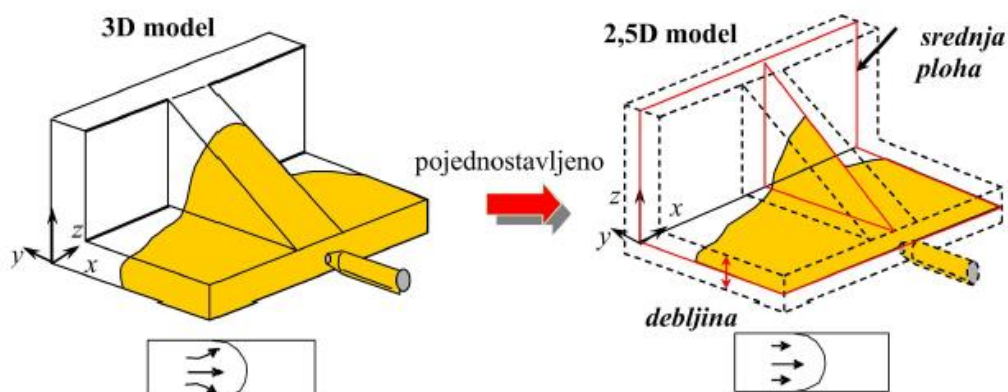
4.2.1. Ulazni parametri

Kako bi se izvršila simulacija procesa, potrebno je odrediti ulazne parametre.

Ključni ulazni parametri za simulaciju su:

- 3D model otpreska
- Uljevni sustav
- Sustav hlađenja
- Kalup
- Materijal
- Parametri procesa.

Jedan od osnovnih ulaznih parametara je 3D model. Nakon učitavanja 3D modela potrebno je definirati mrežu konačnih elemenata na modelu. Takva mreža može biti plošna ili trodimenzionalna mreža konačnih elemenata. Plošna mreža konačnih elemenata, tj. 2,5D simulacija je manje zahtjevnija za računalo, analiza je brža, a proces proračuna je robustan – manja mogućnost nastanka pogreške tijekom simulacije. Kod 2,5D simulacije izrada srednje plohe predstavlja najveću poteškoću pri 2,5D analizi, te zahtijeva i preko 80 % ukupnog vremena potrebnog za simulaciju. Kako je za neke geometrijske detalje vrlo teško identificirati srednju plohu, vrlo često se geometrija otpreska pojednostavljuje što predstavlja izvor netočnosti u rezultatima simulacije. [20]



Slika 20. Razlika između plošne i obujamne analize punjenja kalupne šupljine [20]

Pri uporabi 3D simulacije izbjegavaju se greške vezane uz generiranje srednje plohe, omogućena je analiza stvarnih pojava pri 3D tečenju taljevine, a osigurani su i točniji podatci o mikrostrukturi (efekti izvora tečenja, orijentacija vlakana, orijentacija molekula, stezanje i vitoperenje). Međutim 3D analiza zahtijeva jača računala i dulja vremena analize, a analiza grešaka na mreži daleko je zahtjevnija nego li pri 2,5D simulaciji. [19]

U programskom paketu Moldex3D za osnovnu simulaciju nije nužno definirati sustav hlađenja i kalup. Takva simulacija može poslužiti ako korisnik želi što bržu analizu koja može dati jednostavne rezultate poput pregleda punjenja kalupne šupljine. No, ako je cilj simulacije dobiti uvid u finalni oblik i moguće deformacije gotovog otpreska, onda je potrebno definirati kalup i sustav hlađenja, odnosno, realističan prijenos topline između otpreska i kalupa.

Materijal otpreska moguće je definirati s pomoću Moldex3D baze podataka. U Moldex3D bazi podataka nalazi se nekoliko stotina materijala koji imaju opisana sva potrebna svojstva prerade te se mogu koristiti za simulaciju procesa injekcijskog prešanja.

Parametre procesa moguće je podesiti na tri načina:

- CAE način rada
- Odabirom ubrizgavalice (po profilu)
- Odabirom ubrizgavalice (po vremenu punjenja).

Kod odabira CAE načina rada, odnosno, postavki, moguće je definirati parametre procesa neovisno o stroju. Dakle, korisnik sam definira parametre poput maksimalnog pritiska punjenja, naknadnog pritiska, vremena punjenja, profila protoka materijala, trenutka prelaska

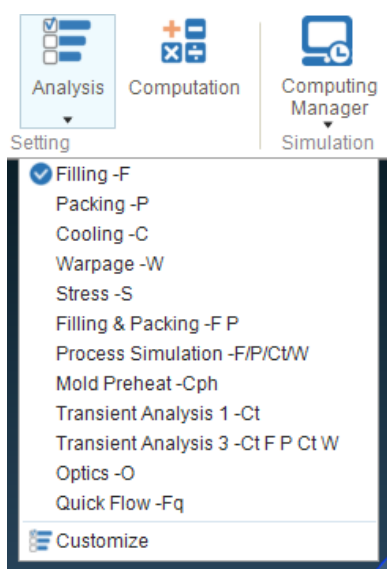
faze punjenja u fazu djelovanja naknadnog pritiska, trajanje naknadnog pritiska, temperature kalupa i ostalog.

Kod definiranja parametara procesa po ubrizgavalici (po profilu) korisniku se onemogućava izravno definiranje vremena punjenja već je ono definirano profilom protoka i postavkama naknadnog pritiska, a parametri procesa ovise o odabranoj ubrizgavalici iz Moldex3D baze podataka, a kod definiranja parametara procesa po ubrizgavalici (po vremenu punjenja) korisnik može definirati vrijeme punjenja, a ostali parametri deriviraju iz odabrane ubrizgavalice, profila protoka materijala i trenutka prijelaza iz punjenja u djelovanje naknadnog pritiska.

Nakon definiranja parametara procesa, korisnik ima izbor vrste analize koju želi provesti. Ovisno o odabiru, analiza može biti jednostavnija ili opširnija te će tako i utjecati na vrijeme potrebno za izračun pojedinih analiza. Na slici 21. vidljive su moguće analize koje nudiprogramski paket Moldex3D.

Tradicionalno, najčešće se koriste četiri analize:

- „*Filling*“ analiza omogućuje prikaz punjenja kalupne šupljine ovisno o vremenu, daje informacije o pritisku punjenja, temperaturi, brzini punjenja i slično
- „*Filling and packing*“ analiza daje prikaz utjecaja naknadnog pritiska na otpresak
- „*Transient analysis*“ analiza daje uvid u izgled gotovog otpreska
- „*Quick flow*“ je najbrža analiza koja daje prikaz ispunjavanja kalupne šupljine, ova analiza je najjednostavnija te se koristi u najranijim fazama analize proizvoda



Slika 21. Moguće analize u programu Moldex3D studio (za edukacijsku licencu)

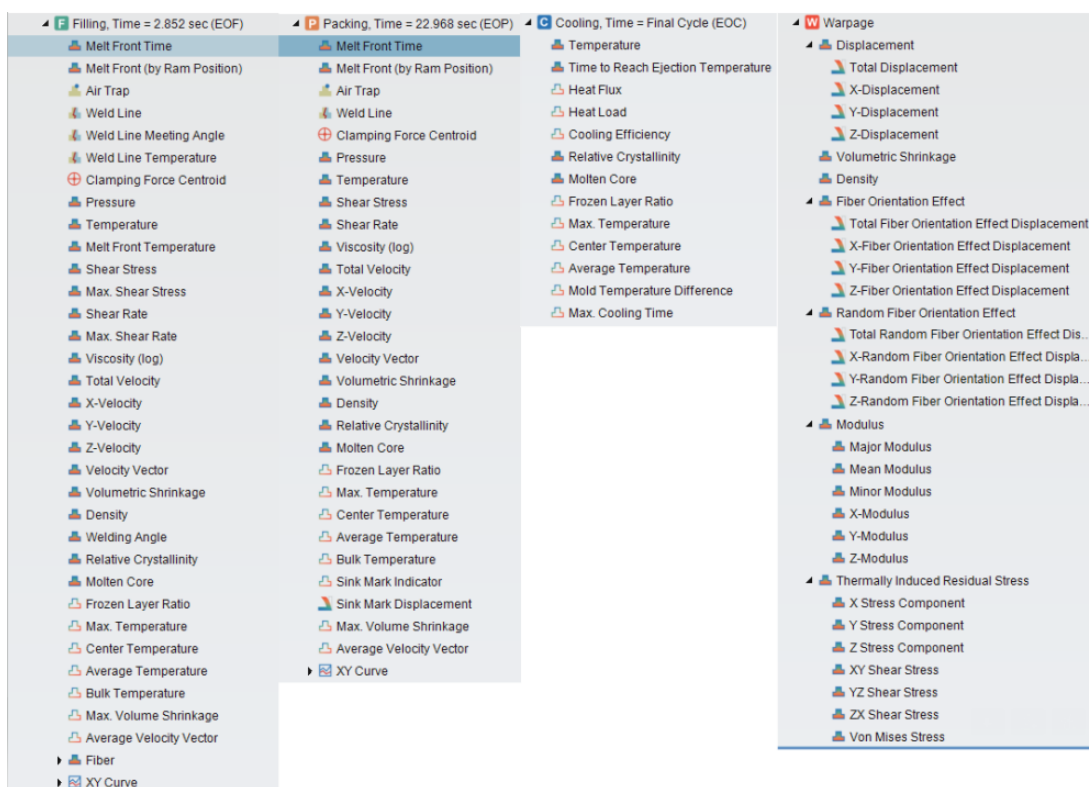
4.2.2. Rezultati simulacije injekcijskog prešanja

Ovisno o odabranoj analizi, rezultati simulacije mogu biti sažeti ili opširni. Rezultati su podijeljeni po analizama, pa se tako mogu promatrati zasebno faza punjenja, faza djelovanja naknadnog pritiska, faza hlađenja otpreska, analiza deformacije i ostalo.

Bitno je napomenuti da sami rezultati simulacije ne vrijede puno i nisu korisni bez kvalitetne interpretacije istih.

Neki od rezultata simulacije koje Moldex3D nudi su:

- Brzina punjenja kalupne šupljine i prikaz kretanja taljevine
- Identifikacija lokacija džepova zaostalog zraka
- Identifikacija lokacija linija spajanja
- Silu držanja kalupa
- Raspodjela temperature taljevine u vremenu
- Smično naprezanje materijala
- Volumensko skupljanje otpreska
- Orijentacija vlakana
- Pritisak na kalupnu šupljinu
- Mjesta ulegnuća.



Slika 22. Rezultati simulacije u Moldex3D programskom alatu

4.3. CAD („Computer Aided Design“)

CAD (oblikovanje s pomoću računala) je uporaba računalnog softvera u svrhu dizajniranja, konstruiranja i izrade tehničke dokumentacije.

Kao što je navedeno ranije, da bi se provela računalna simulacija, potreban je 3D model. Takav 3D model se izrađuje upravo na nekim od CAD softvera, odnosno, alata.

U počecima, CAD alati su bili ograničeni na stvaranje 2D crteža odnosno, tehničke dokumentacije, no napretkom u programiranju i hardveru u 70-tima dolazi do razvoja 3D modeliranja te se CAD alati sve više počinju koristiti u tu svrhu [21].

Danas su CAD alati usko povezani s proizvodnjom te sudjeluju gotovo u svim fazama razvijanja proizvoda poput dizajna, konstruiranja, analiza te izrade.

Neki od najpopularnijih CAD alata su:

- AutoCad
- SolidWorks
- Catia
- Invector
- Fusion 360.

Na slici 23. prikazan je 3D model stolca napravljen u programskom paketu SolidWorks.



Slika 23. 3D model stolca napravljen u programskom paketu SolidWorks

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada prikazan je pregled procesa konstruiranja, odnosno, prilagodbe školjke stolca kako bi se taj proizvod mogao injekcijski prešati. Kako bi se dizajn stolca prilagodio i optimirao za proces injekcijskog prešanja uvelike su korišteni ranije spomenuti programski alati – Moldex3D te Solidworks.

5.1. Početni dizajn stolca

U ovom praktičnom dijelu, razmatra se dizajn, odnosno, konstrukcija stolca „Oblikant“ tvrtke Prostorija koja se sastoji od drvene školjke te metalnog ili drvenog nožišta.

Na slici 24. prikazan je spomenuti stolac u mogućim konfiguracijama. U svakoj konfiguraciji radi se o istoj školjci (rađena od drva), dok se određena nožišta mogu mijenjati prema željama kupca.



Slika 24. Stolac „Oblikant“ tvrtke Prostorija [5]

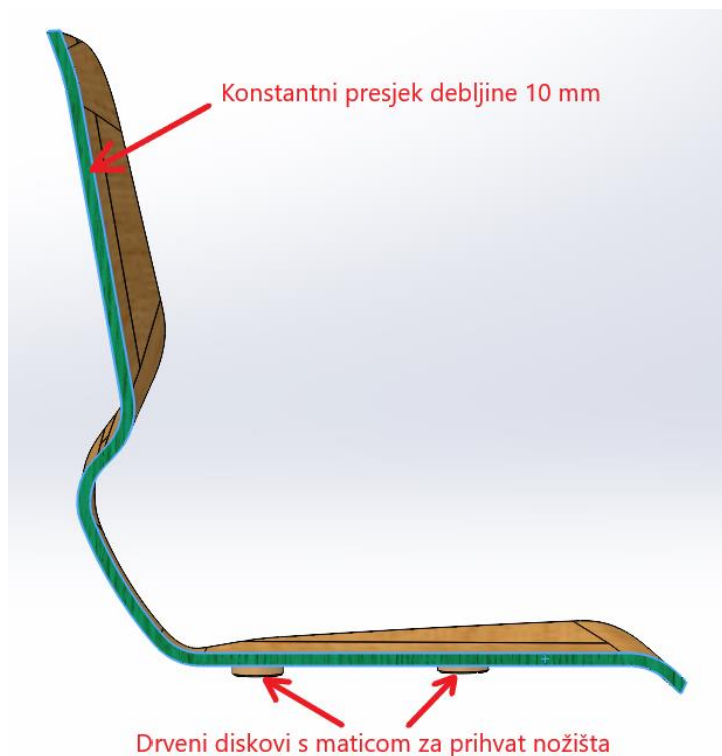
Školjka stolca radi se postupkom lijepljenja i savijanja više tankih slojeva drva te zatim CNC obrezivanjem zadanog oblika. Slika 25. prikazuje obradu savijenog drva kako bi se dobio željeni oblik.



Slika 25. CNC izrezivanje konture školjke stolca „Oblikant“

Školjka je u potpunosti konstruirana u programskom alatu SolidWorks korištenjem naprednih 3D površina te su na osnovi tih 3D modela rađeni i CAM programi za izrezivanje na slici.

Na slici 26. prikazan je presjek drvene školjke, koja ima presjek konstantne debljine od 10 mm, a za prihvat nožišta dodani su drveni diskovi koji imaju u sebi maticu za pritezanje nožišta s vijcima.

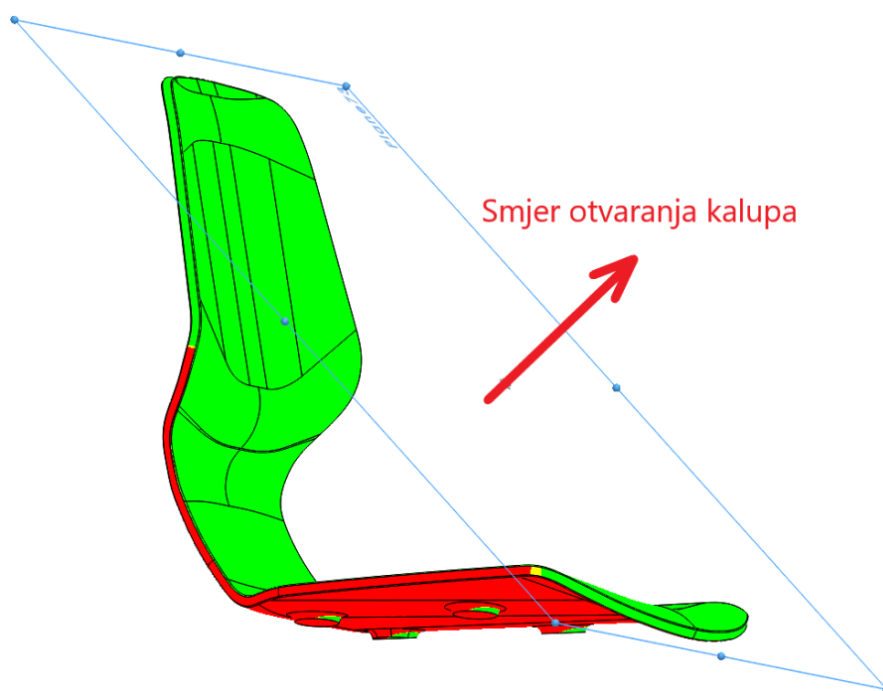


Slika 26. Presjek školjke stolca „Oblikant“

Ovakva konstrukcija školjke nije prikladna za injekcijsko prešanje zbog svojeg oblika, odnosno, nemogućnosti izvedbe kalupa i tehnoložnosti procesa.

Glavni nedostatak ovakvog dizajna (za izradu kalupa) jest promjenjiv rub školjke stolca. Naime, rub školjke stolca prelazi iz pozitivnog u negativni nagib i obrnuto što bi stvaralo nepovoljnu liniju razdvajanja na kalupu. Na slici 27. prikazana je analiza nagiba gdje zelena boja označuje pozitivan nagib u odnosu na smjer otvaranja kalupa, crvena boja označuje negativan nagib, a žuta boja označuje područje koje je neutralno u odnosu na smjer otvaranja kalupa. Dakle, zelena boja označuje jednu polovicu kalupa, a crvena drugu.

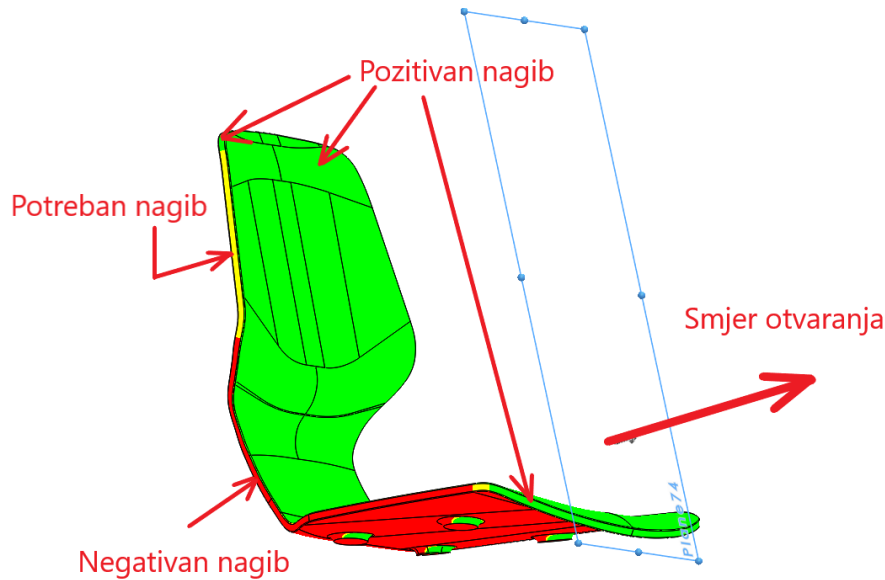
Linija razdvajanja se oblikuje na prijelazu iz pozitivnog u negativni nagib, te je poželjno da taj prijelaz bude ujednačen i da se polovice unutrašnjosti kalupa jasno razlikuju bez ispreplitanja, što kod ove konstrukcije nije slučaj.



Slika 27. Analiza nagiba početne konstrukcije

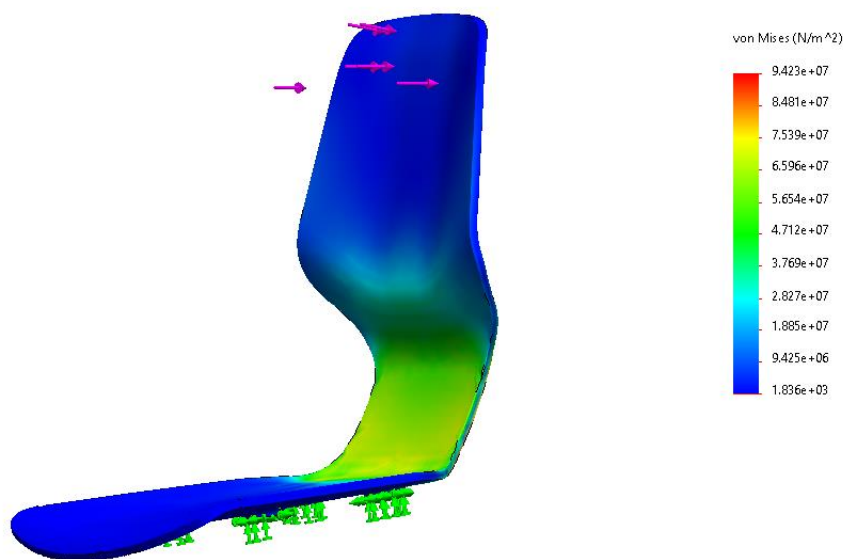
Ovakva linija razdvajanja nije poželjna u smislu izgleda proizvoda, jer će se na mjestima spajanja kalupa (prijelaz iz crvene u zelenu boju) pojaviti vidljiva linija kod gotovog proizvoda. Liniju koja se pojavljuje na spoju dvije polovice kalupa je nemoguće izbjeći, no potrebno je kontrolirati njezin položaj.

Promjenom smjera, odnosno kuta otvaranja kalupa mijenja se položaj razdjelne linije, dakle, mijenjanjem kuta otvaranja mijenja se mjesto prijelaza iz negativnog u pozitivni nagib ali se ne rješava problem konstrukcije kalupa (pozitivni i negativni nagibi se i dalje isprepliću, ali na drugim mjestima, nepovoljna razdjelna linija).



Slika 28. Analiza nagiba s drugačijim kutom otvaranja

Osim izvedivosti, kod konstruiranja proizvoda potrebno je imati na umu opterećenja koja će djelovati na proizvod. Na slici 29. prikazana je simulacija opterećenja na naslon u iznosu od 700 N.



Slika 29. Simulacija opterećenja na školjku

Iz simulacije je vidljivo kako je opterećenje najveće na dijelu školjke gdje sjedište prelazi u naslon. Rezultate simulacije potvrđuje i slika 30. gdje se drvena školjka odlomila na prijelazu iz sjedišta u naslon prilikom djelovanja prevelike sile na naslon.



Slika 30. Puknuće stolca

5.2. Zahtjevi dizajna stolca

Prilikom konstruiranja školjke koja bi bila tehnološki u procesu injekcijskog prešanja, postavljeni su zahtjevi od strane dizajnera stolca:

- Stolac prilagođen injekcijskom prešanju mora biti što sličniji trenutačnoj verziji
- Rub školjke stolca mora biti što tanji
- Linija razdvajanja mora ići uzduž ruba školjke stolca
- Stolac prilagođen injekcijskom prešanju mora odgovarati postojećim postoljima.

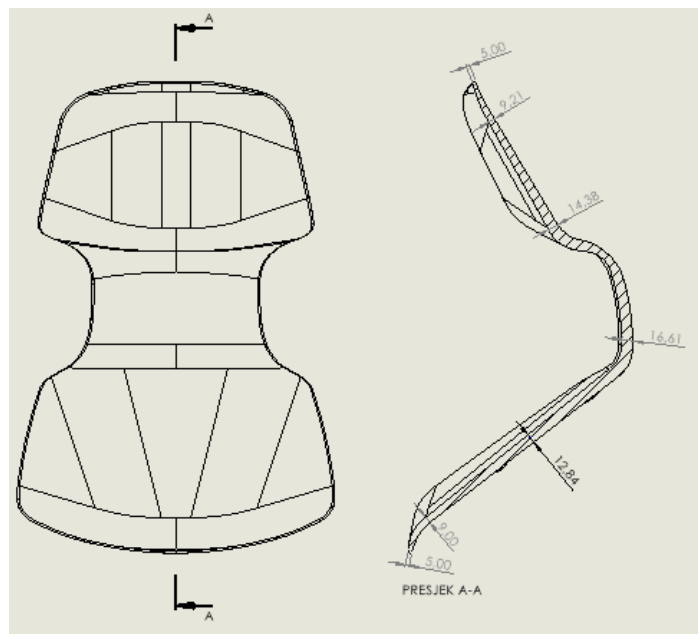
Osim zahtjeva na izgled, tvrtka Prostorja sav svoj namještaj šalje na testiranje, kako bi se ishodovao certifikat za moguće korištenje u osobnim ili javnim prostorima. Na ispitivanju po normi HRN EN 16139:2013. ispituje se sigurnost, čvrstoća te trajnost namještaja (u ovom slučaju stolca). Za potrebe ovog diplomskog rada, kod konstruiranja školjke stolca vodit će se računa o opterećenjima na naslon i sjedište koje mora stolac izdržati kako bi zadovoljio ispitivanje po normi HRN EN 16139:2013.

5.3. Rekonstrukcija školjke stolca

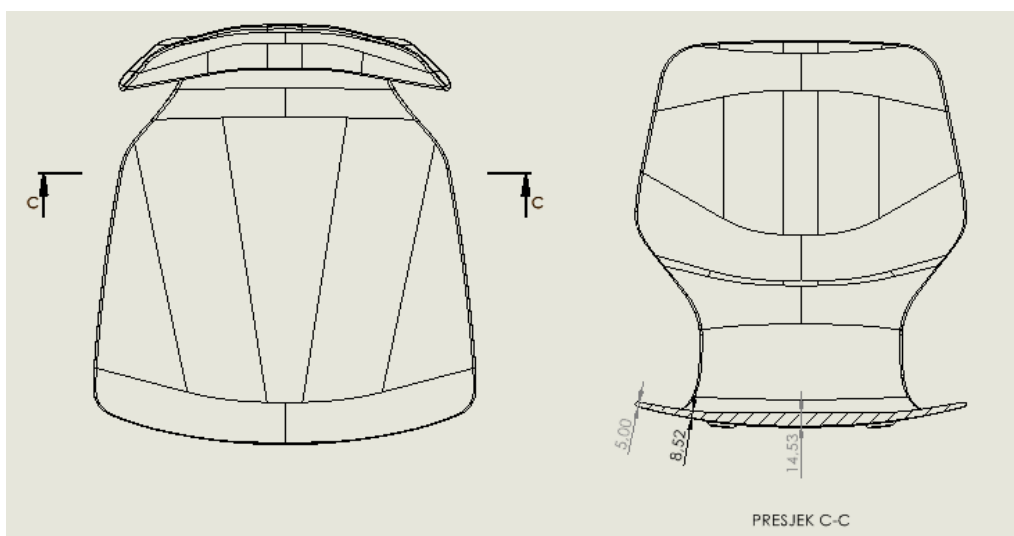
5.3.1. Presjek školjke stolca

Zbog zahtjeva na dizajn da rub stolca mora biti što tanji, prilagodio se presjek stolca. Kako bi stolac imao što tanji rub, a uz to održao prihvatljivu čvrstoću, presjek stolca se modificirao tako da u sredini bude deblji, a prema krajevima se sužava. Takav presjek omogućava prividno tanku školjku stolca bez degradiranja čvrstoće.

Na slikama 31. i 32. prikazani su presjeci prve verzije rekonstruirane školjke stolca.



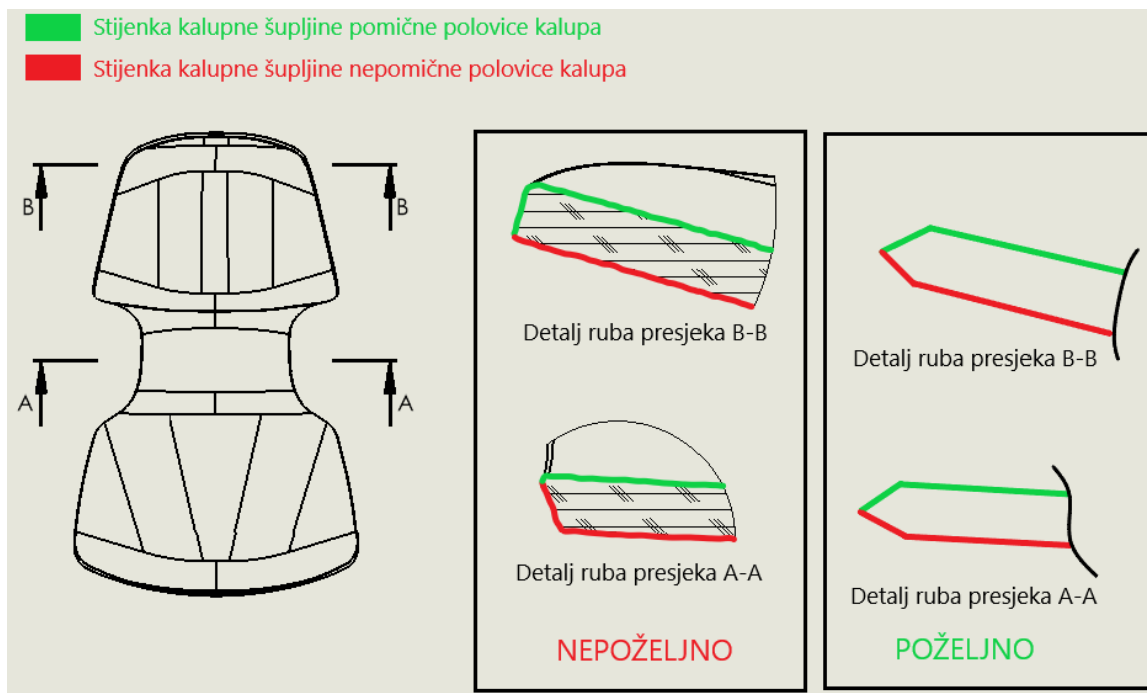
Slika 31. Presjek A-A rekonstruirane školjke stolca



Slika 32. Presjek C-C rekonstruirane školjke stolca

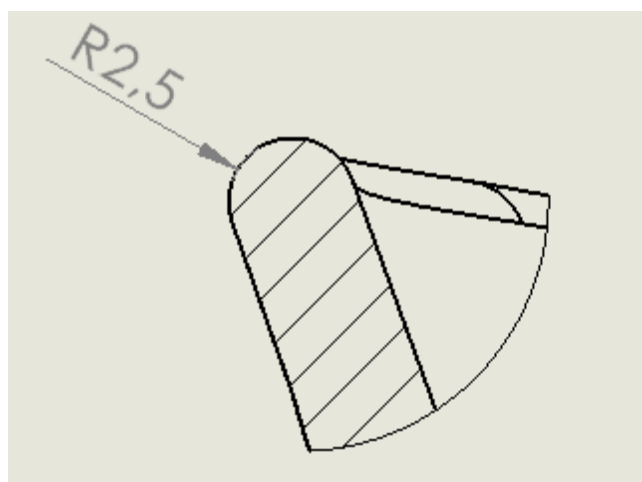
5.3.2. Problem razdjelne linije i otvaranja kalupa

Kao što je ranije spomenuto, rub ove školjke stolca je nepovoljan za injekcijsko prešanje zbog svojeg promjenjivog nagiba. Na slici 33. prikazani su pojednostavljeni slučajevi poželjnog i nepoželjnog nagiba ruba otpreska (trenutačna verzija školjke prije rekonstruiranja).



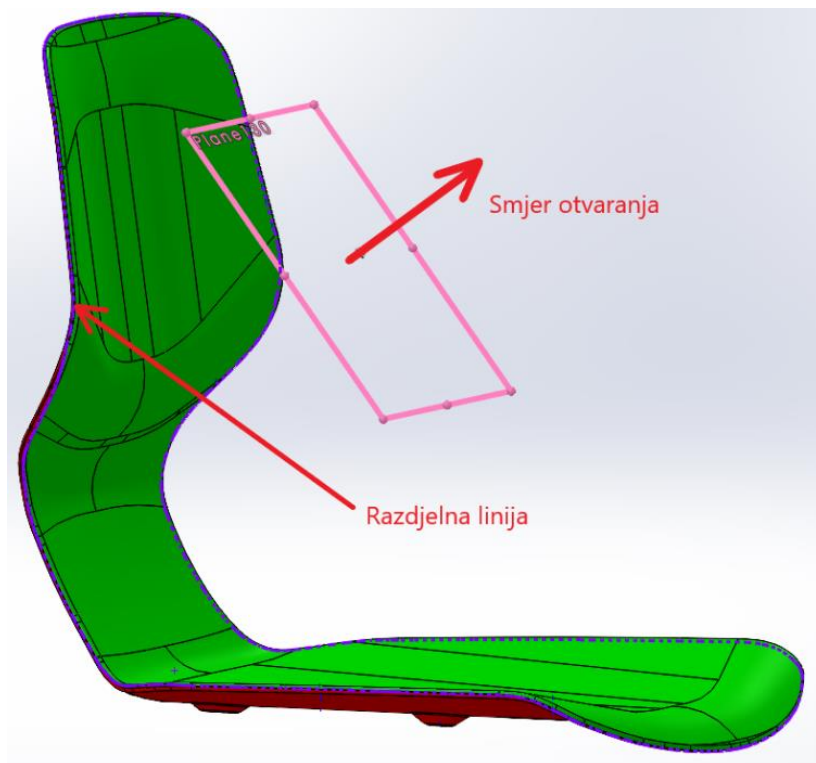
Slika 33. Poželjni i nepoželjni nagibi ruba otpreska

Kako bi se osigurao što povoljniji presjek, rub školjke je zaobljen. Zaobljenim rubom (slika 33.) postiže se uravnoteženija razdjelna linija, no zbog oblika školjke javljaju se problemi vađenja otpreska iz kalupa.



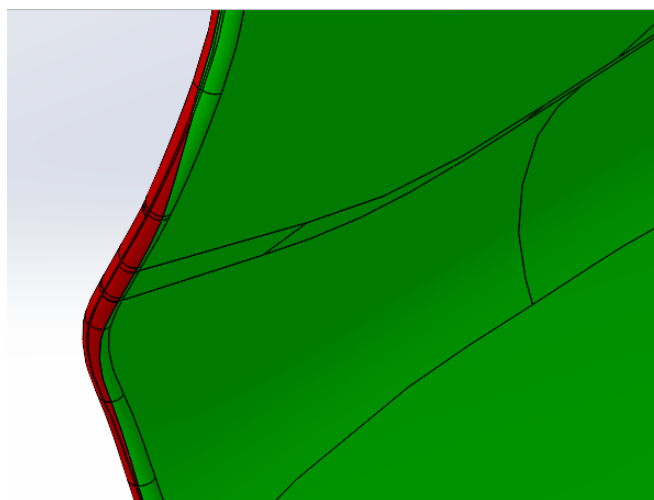
Slika 34. Rub modificirane školjke

Slika 35. prikazuje dobivenu razdjelnu liniju. Bitno je naglasiti da se razdjelna linija mijenja ovisno o odabranom smjeru, odnosno, kutu otvaranja.



Slika 35. Razdjelna linija kod modificirane školjke

Slika 36. prikazuje problem zbog kojeg ovaj otpresak još uvijek nije tehnološki. Naime, linija razdvajanja prelazi gotovo cijeli radijus ruba što znači da će polovica kalupa crvene boje na slici onemogućavati vađenje otpreska iz kalupa (otpresak će zapinjati za stijenku kalupne šupljine).

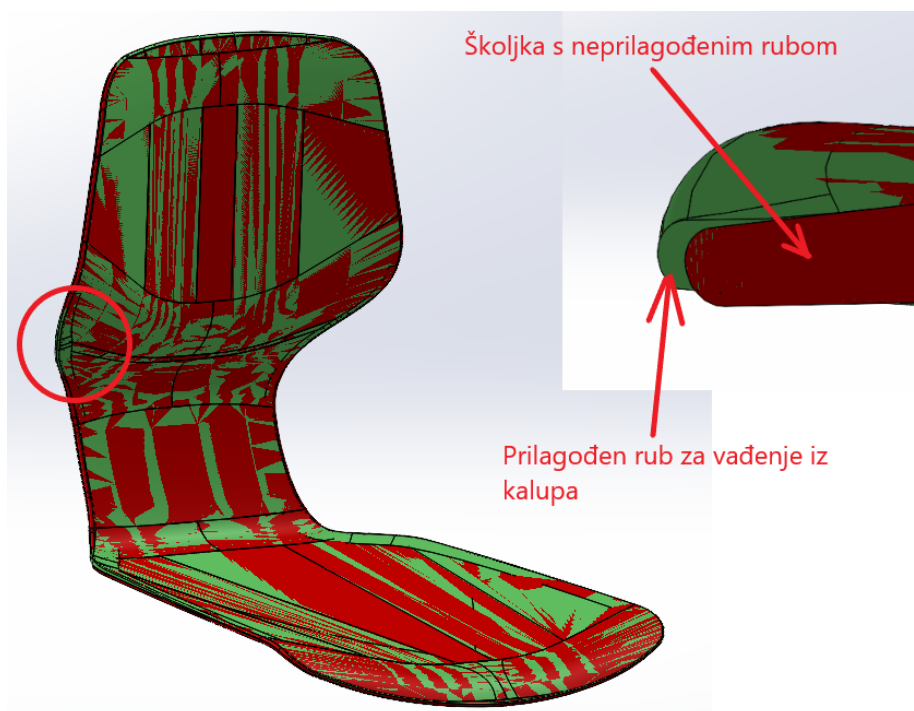


Slika 36. Problem vađenja otpreska

Linija razdvajanja ne mora nužno biti točno na sredini stijenke kako bi se omogućilo vađenje otpreska iz kalupne šupljine, jer vađenje ovisi i o smjeru tj. kutu otvaranja kalupa, no u ovom slučaju potrebno je dodatno modificirati školjku i odabrati drugačiji smjer, odnosno kut otvaranja kalupa kako bi se omogućilo vađenje otpreska iz kalupne šupljine.

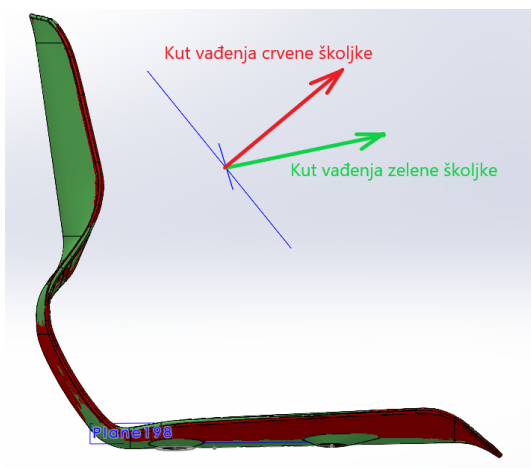
Problem vađenja otpreska iz kalupne šupljine riješen je modifikacijom oblika stolca i pronalaskom povoljnog kuta vađenja otpreska. Oblik je promijenjen tako da je prednja površina zajedno s rubom zaokrenuta prema naprijed.

Slika 37. prikazuje preklopljene školjke prije i nakon zakretanja ruba školjke. Zelenom bojom je prikazana školjka sa zaokrenutim rubom, a crvenom školjka s neprilagođenim rubom.



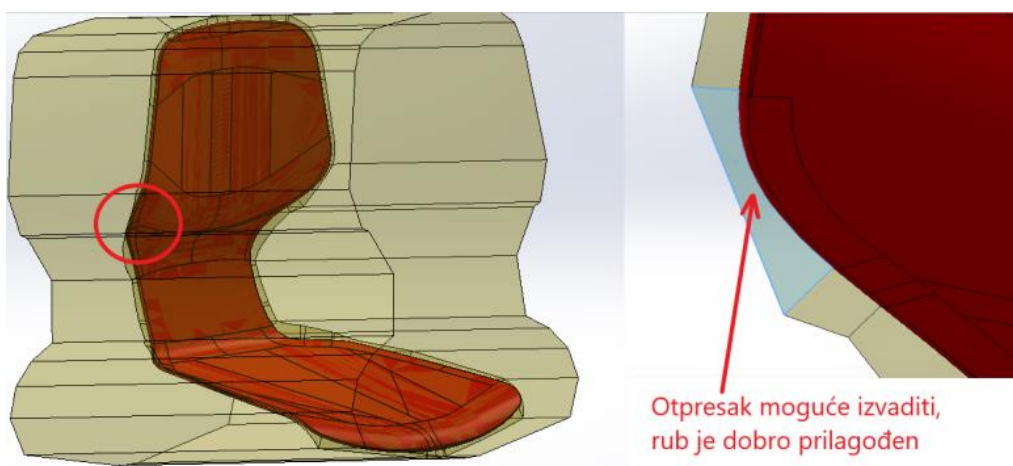
Slika 37. Usporedba dviju školjki

Slika 38. prikazuje usporedbu kutova vađenja iz kalupa dviju školjki.

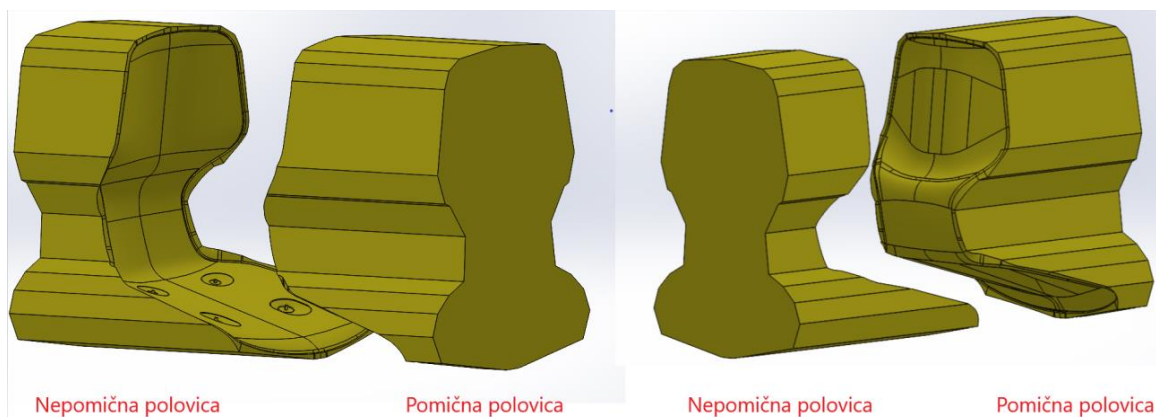


Slika 38. Usporedba kutova vadenja iz kalupa dviju školjki

U programskom alatu Solidworks, osim određivanja razdjelne linije kalupa, moguće je i generiranje kalupne šupljine, odnosno, polovica kalupa. Slika 39. prikazuje otpresak unutar kalupa i detalj prilagođenog ruba, dok slika 40. prikazuje pomični i nepomični dio kalupa.



Slika 39. Otpresak unutar kalupa



Slika 40. Pomična i nepomična polovica kalupa

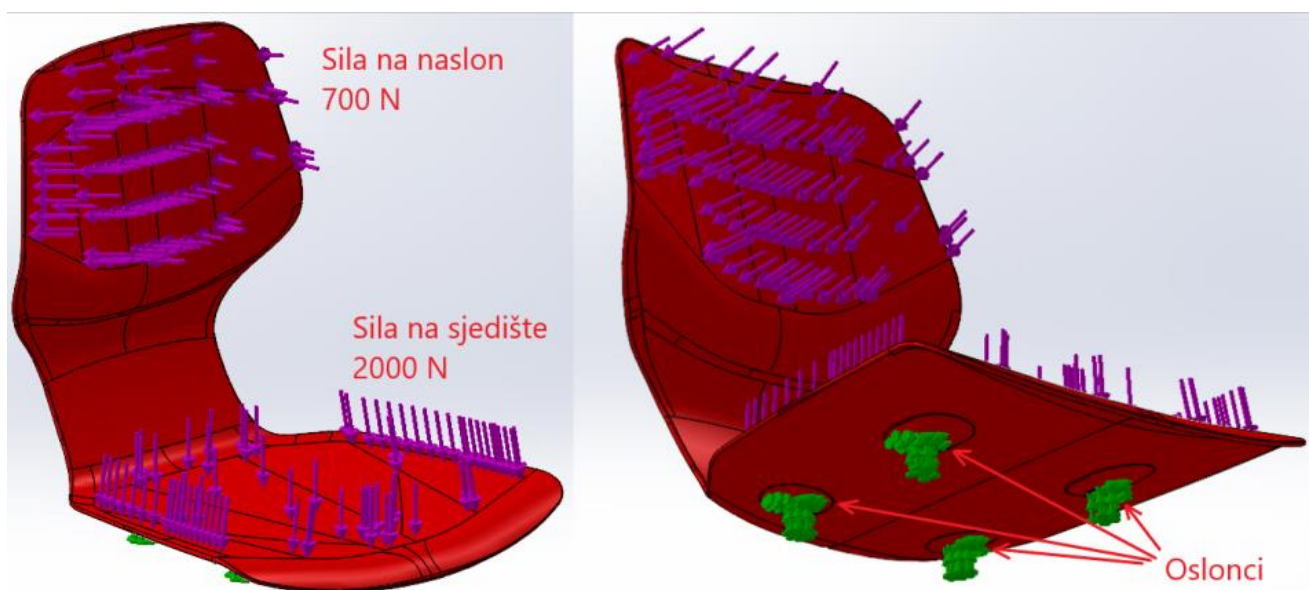
5.3.3. Provjera čvrstoće

Sada kada je definirana optimalna konstrukcija školjke stolca, potrebno je provjeriti zadovoljava li školjka uvjete čvrstoće.

Kao što je ranije spomenuto, za dobivanje certifikata za korištenje u javnim prostorima po normi HRN EN 16139:2013, između ostalog, stolac mora izdržati opterećenja na naslon u iznosu od 700 N, a na sjedište opterećenje u iznosu od 2000 N.

Za mehanička svojstva materijala u simulaciji koristili su se podaci o materijalu WPC 1160 V03 tvrtke Pacyga. Potrebno je napomenuti kako se rezultati ove simulacije trebaju smatrati isključivo orijentacijski zbog nemogućnosti potpunog definiranja mehaničkih svojstva materijala (proizvođač materijala ne nudi sva svojstva materijala potrebna za definiranje materijala u programskom alatu Solidworks, te je u simulaciji zanemaren utjecaj orijentiranosti vlakana, što u stvarnosti utječe na mehanička svojstva)

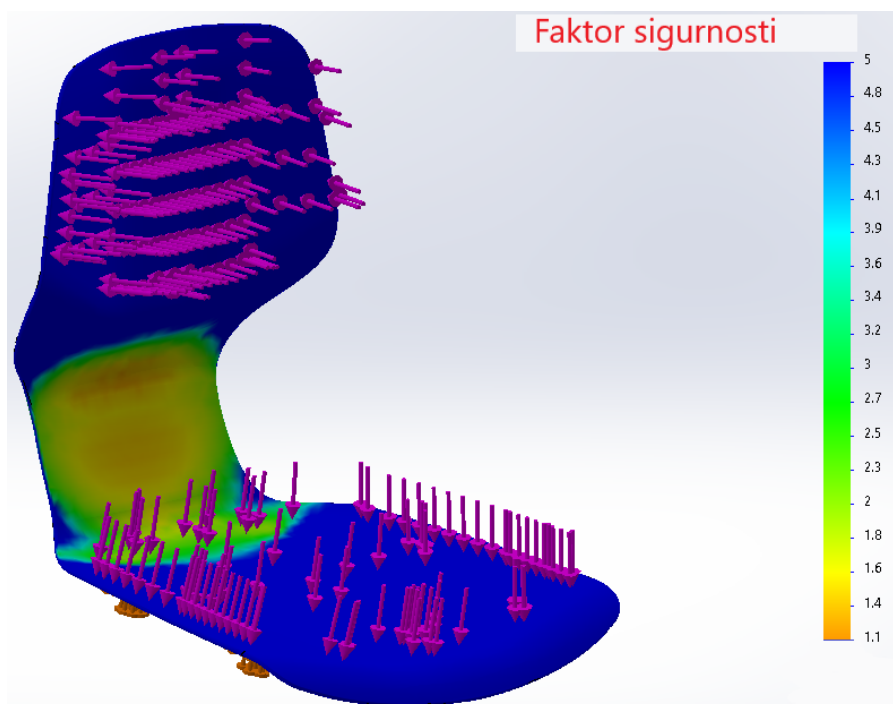
Na slici 41. prikazani su početni uvjeti - opterećenja na naslon i sjedište te oslonci. Kao oslonci korišteni su držači školjke koji prenose opterećenja na nožište stolca.



Slika 41. Početni uvjeti simulacije

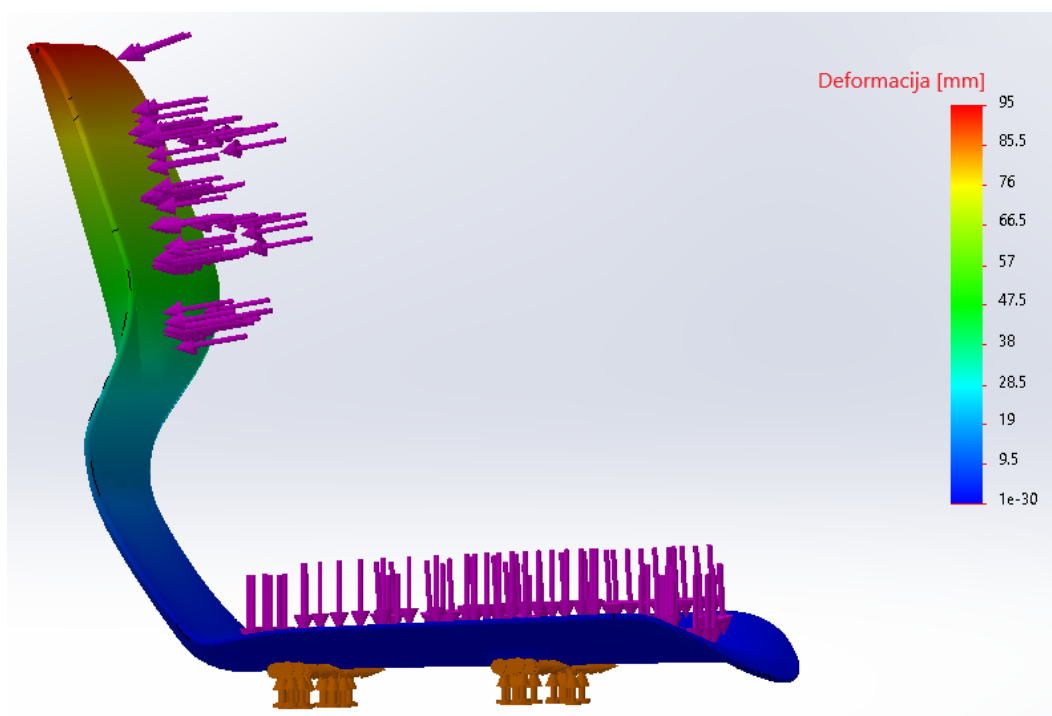
Na slici 42. prikazana je raspodjela faktora sigurnosti po školjci stolca.

Iz simulacije je vidljivo kako i dalje ostaje kritičan presjek kao i kod drvene školjke, a faktor sigurnosti u tom dijelu iznosi 1,1 što znači, da bi takva školjka izdržala silu na naslon u iznosu od 700 N, odnosno, da školjka zadovoljava uvjet čvrstoće.



Slika 42. Raspodjela faktora sigurnosti

Na slici 43. prikazana je elastična deformacija školjke. Iz simulacije, odnosno, slike vidljivo je da najveći pomak iznosi 95 milimetara u gornjem dijelu naslona što je očekivani rezultat. Trenutačna školjka od drva se ponaša vrlo slično u stvarnosti, što sugerira da su rezultati simulacije reprezentativni.

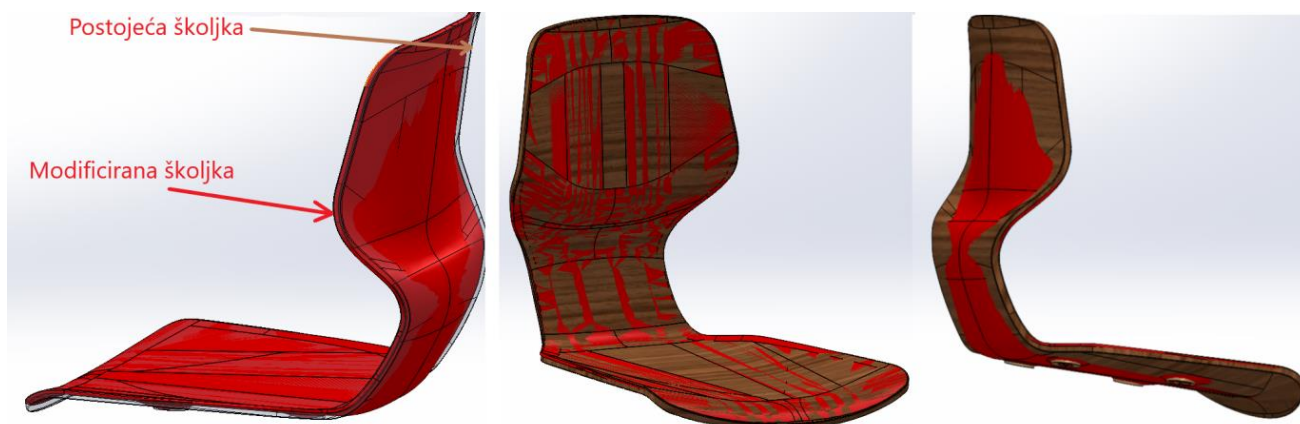


Slika 43. Elastična deformacija školjke

5.3.4. Provjera dizajna

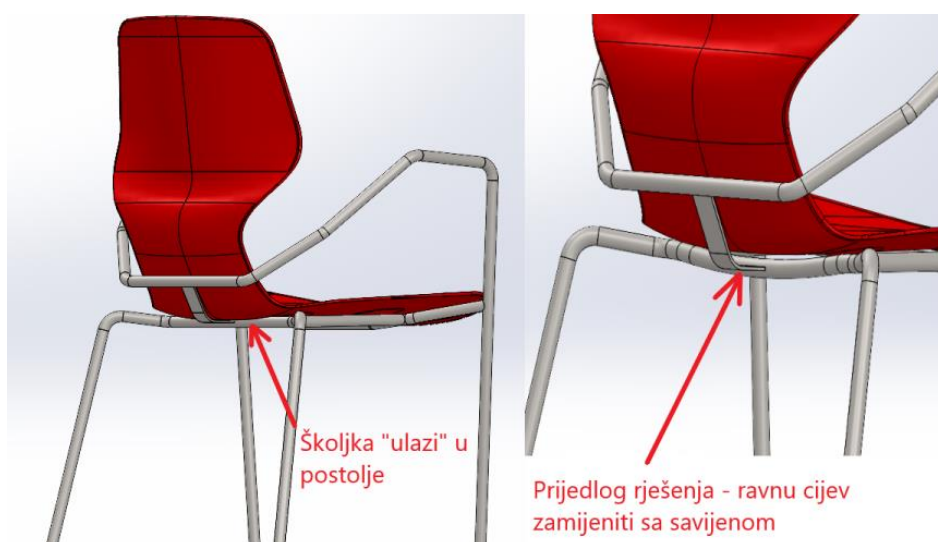
Neki od zahtjeva na dizajn stolca bili su da modificirana školjka bude što sličnija trenutnoj drvenoj verziji te da modificirana školjka odgovara postojećim postoljima stolca Oblikant.

Na slici 44. preklapljene su obje verzije školjki stolca (drvena i modificirana). Vidljivo je kako su ispunjeni zahtjevi za minimalnim izmjenama i tanjim rubom.



Slika 44. Usporedba postojeće i modificirane školjke

Osim izgleda, potrebno je provjeriti odgovara li modificirana školjka postojećim postoljima stolca Oblikant. Pošto se lokacija provrta, odnosno, matica za pričvršćivanje postolja nije mijenjala, na modificiranu školjku odgovaraju sva postolja stolca Oblikant, osim postolja s metalnim nogicama promjera 16 milimetara i rukonaslonima zbog povećane debljine školjke u središnjem presjeku u odnosu na trenutnu drvenu školjku. Kao moguće rješenje predlaže se izbacivanje tog postolja iz ponude ili modificiranje postolja. Na slici 45. prikazan je problem i prijedlog rješenja.



Slika 45. Problem postolja i prijedlog rješenja

Tablica 8. Pregled ispunjenja zahtjeva za dizajnom stolca

Zahtjev dizajna:	Ispunjen:
Modificirani stolac mora biti što sličniji trenutacnome	DA
Rub školjke stolca mora biti što tanji	DA
Linija razdvajanja mora ići uzduž ruba školjke stolca	DA
Modificirani stolac mora odgovarati postojećim postoljima	DJELOMIČNO
Čvrstoća stolca	DA

Iz tablice 8. vidljivo je da su zahtjevi dizajna ispunjeni pa je moguće prijeći na sljedeću fazu, odnosno, na simulaciju procesa injekcijskog prešanja u programskom alatu Moldex3D.

6. RAČUNALNA SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA ŠKOLJKE STOLCA

Kako bi se osigurala dobra kvaliteta otpreska, nužno je simulirati proces injekcijskog prešanja. Dobiveni rezultati simulacije mogu ukazati na eventualne probleme konstrukcije otpreska. Iako se dobrim optimiranjem parametara injekcijskog prešanja minimizira broj mogućih grešaka, konstrukcija kalupa, odnosno otpreska uvelike utječe na konačnu kvalitetu otpreska tj. proizvoda.

U sljedećim poglavljima bit će objašnjen proces injekcijskog prešanja kroz simulaciju u programskom paketu Moldex3D s naglaskom na osnovna svojstva koja se provjeravaju prilikom konstruiranja kalupa.

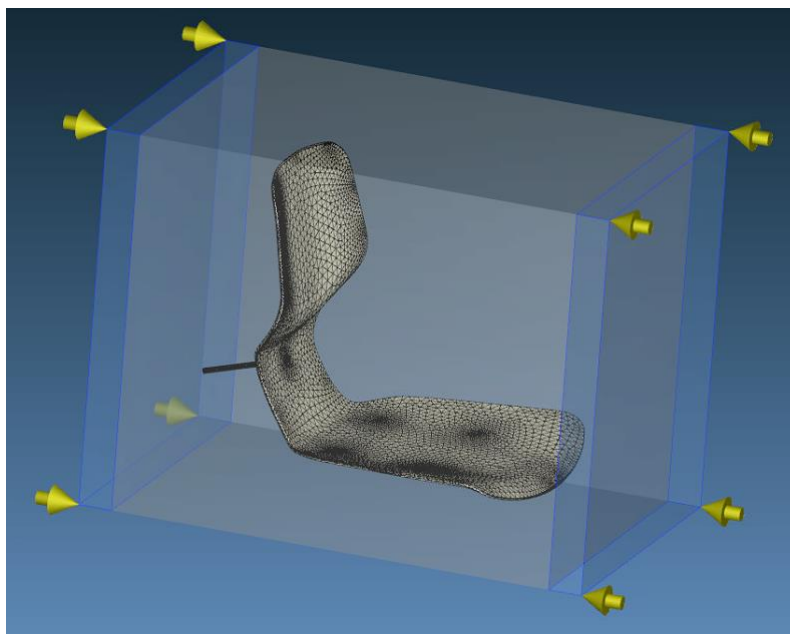
6.1. Simulacija injekcijskog prešanja u programskom alatu Moldex3D

6.1.1. Uvažanje 3D modela, definiranje atributa i generiranje mreže konačnih elemenata

Kao što je ranije spomenuto, jedan od ulaznih parametara za simulaciju procesa injekcijskoga prešanja jest 3D model otpreska. Dakle, u ovom slučaju, uvažava se rekonstruirana školjka stolca uz uljevni sustav (moguće ga je i dodati u Moldex3D-u).

Osim uvažanja modela, u Moldex3D-u će se generirati pojednostavljeni model kalupa s kanalima za reguliranje temperature kalupa, kako bi se dobio realističan prijenos topline između kalupa i otpreska.

Na slici 46. prikazani su otpresak sa generiranom mrežom i pojednostavljeni kalup.



Slika 46. Definirani otpresak, uljevni sustav i kalup

6.1.2. Definiranje parametara procesa i materijala

Parametri procesa (temperatura taljevine i kalupa, vrijeme punjenja i djelovanja naknadnog tlaka, vrijednost naknadnog tlaka) i odabir materijala značajno utječu na kvalitetu otpreska, tj. rezultate simulacije.

Odabrani materijal je „WPC 1160 V03“ tvrtke Pacyga (neka od svojstava materijala opisana su u tablici 7., poglavlje 3.5).

Ulazni parametri su postavljani po postavkama ubrizgavalice po profilu ubrizgavanja. Dakle, odabran je stroj iz baze podataka u programskom alatu Moldex3D na osnovi težine otpreska, odnosno, na osnovi potrebnog volumena ubrizgavanja.

Odabrana ubrizgavalica je KM1600MX-SP17200-135 tvrtke Krauss Maffei. U tablicama 8. i 9. prikazane su karakteristike ubrizgavalice i neki od korištenih parametara.

Tablica 9. Karakteristike odabrane ubrizgavalice

Proizvođač	Krauss Maffei
Naziv ubrizgavalice	KM1600MX-SP17200-135
Promjer pužnog vijka[mm]	135
Hod pužnog vijka [mm]	742
Maksimalni tlak [MPa]	178,4
Maksimalni protok taljevine [cm ³ /s]	1290
Maksimalna sila držanja [kN]	16320

Tablica 10. Postavke procesa

Vrijeme punjenja kalupa [s]	2,904
Preklapanje na naknadni tlak s obzirom na popunjenost kalupne šupljine [%]	98
Temperatura taljevine [°C]	190
Temperatura kalupa [°C]	50
Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka [s]	10

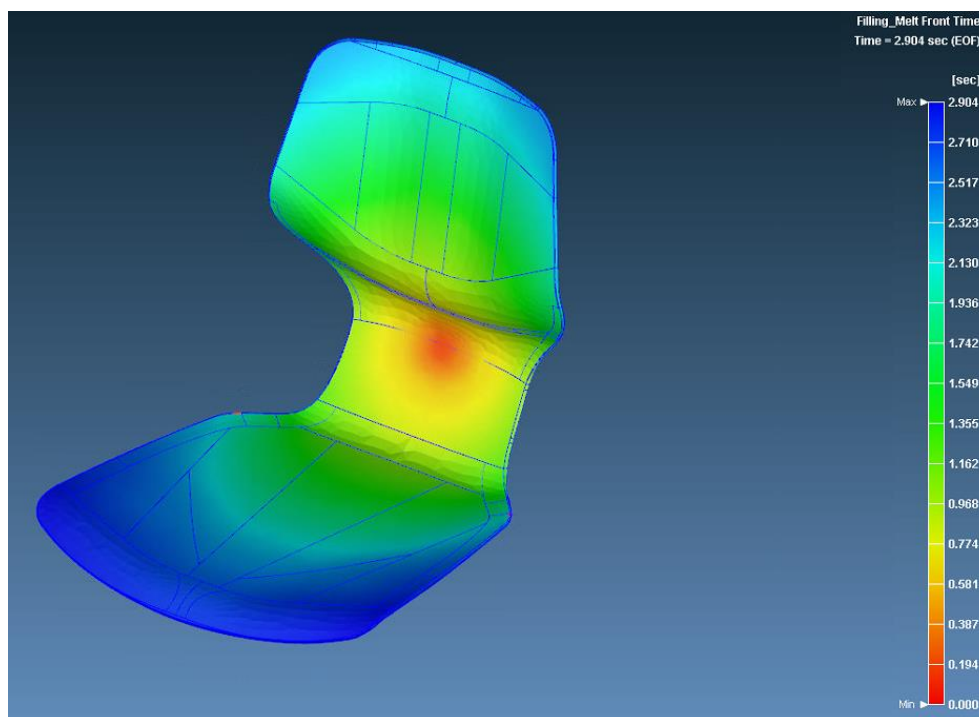
6.2. Rezultati simulacije injekcijskog prešanja

6.2.1. Ispunjavanje kalupne šupljine

Za uspješno injekcijsko prešanje potrebno je potpuno ispunjavanje kalupne šupljine taljevinom. U suprotnome, dobiva se neispravn otpresak čija geometrija se razlikuje od 3D modela.

Sekcija „Melt front time“ prikazuje ispunjenost kalupne šupljine te vrijeme potrebno za to.

U ovom slučaju injekcijskog prešanja školjke stolca, taljevina u potpunosti ispunjava kalupnu šupljinu, a vrijeme potrebno za to iznosi 2,904 sekundi (slika 47.)



Slika 47. Ispunjavanje kalupne šupljine

6.2.2. Balans ispunjavanja kalupne šupljine

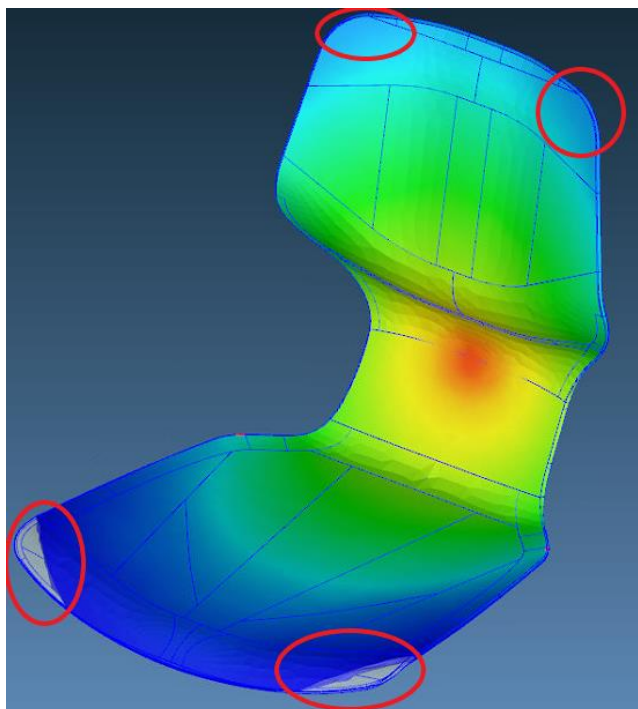
Osim potpuno ispunjene kalupne šupljine, a kako bi se izbjegli nagli porasti pritiska tijekom procesa, potrebno je imati na umu ujednačenost ispunjavanja kalupne šupljine.

Poželjno je da taljevina dolazi u rubne dijelove kalupne šupljine otprilike u isto vrijeme jer se tako optimira duljina puta kojeg prijeđe taljevina, te se tako osigurava minimalni potrebni pritisak ubrizgavanja.

Također, kada jedan kraj taljevine dođe u rubni dio kalupne šupljine, a drugi kraj još nije došao do rubnog dijela, dolazi do promjene momenta protoka što uzrokuje porast pritiska.

Dakle, neuravnoteženim popunjavanjem kalupne šupljine dolazi do potrebe za većim pritisacima ubrizgavanja što može uvjetovati primjenu jače/veće ubrizgavalice od planirane.

Slika 48. pokazuje popunjenost kalupne šupljine školjke kod 98% popunjenosti kalupa (trenutak početka djelovanja naknadnog tlaka).



Slika 48. Popunjenost kalupne šupljine u trenutku početka djelovanja naknadnog tlaka

Iz rezultata simulacije vidljivo je da nije postignuta optimalna ravnoteža popunjavanja kalupne šupljine, jer se gornji dio kalupne šupljine popuni prije nego što se popuni donji. Takvo popunjavanje će uzrokovati porast pritiska ubrizgavanja.

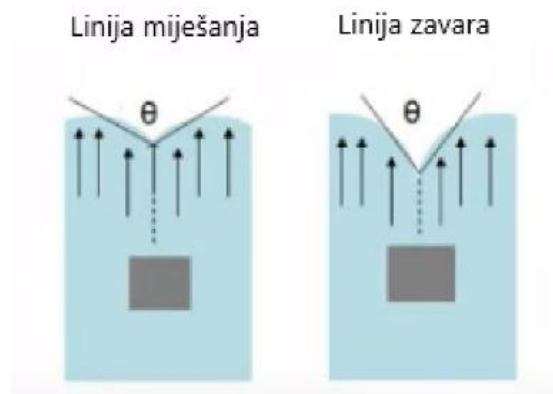
Bolja ravnoteža bi se postigla pomicanjem ušća uljevnog sustava, no, to bi uvjetovalo promjenu kuta vađenja otpreska prema kojemu je modificiran rub školjke.

Pošto ovakva neuravnoteženost ne dovodi do značajnih nedostataka na samome otpresku, u svrhu ovog diplomskog rada, smatrat će se prihvatljivim te će se nastaviti razmatranje konstrukcije školjke.

6.2.3. Linije spajanja

Linije spajanja formiraju se kada se dvije fronte taljevine tijekom injekcijskog prešanja spoje u jednu. Na mjestu spoja nastane linija zavora ili linija miješanja ovisno o kutu spajanja. Na slici 49. prikazana je razlika između tih linija.

Linije spajanja mogu uzrokovati nedostatke izgleda i strukture, a višom temperaturom prerade i većim naknadnim pritiskom njihov utjecaj se može umanjiti ili ukloniti.

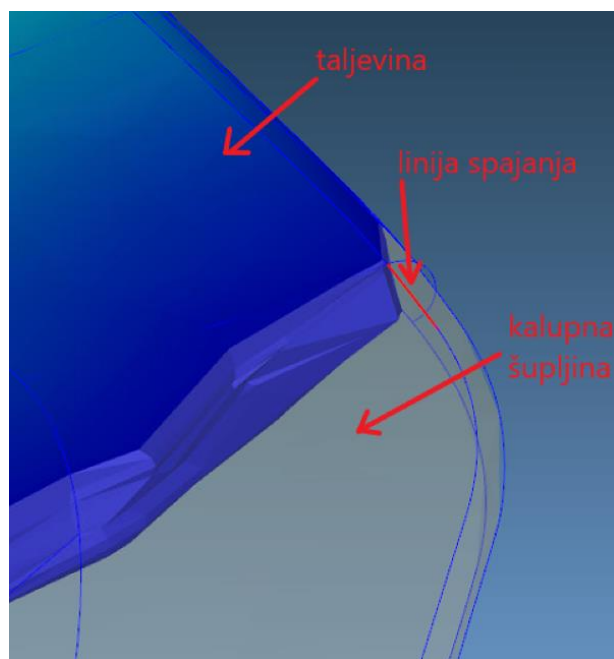


Slika 49. Linija miješanja i linija zavora [22]

Razlika između linija miješanja i linija zavora jest kut između dviju fronta taljevine. Ako je kut θ veći od 145° radi se o liniji miješanja, dok se linijom zavora smatra spoj dviju fronta pod kutom θ manjim od 145° . [22]

U slučaju injekcijskog prešanja razmatrane školjke, na mjestu sjedišta, uz rub, se pojavljuje linija spajanja (slika 50.), no pregledom protoka taljevine se ne uočava očito spajanje dviju fronta, a rezultat simulacije prikazuje kut spajanja u iznosu od 179° što se može zanemariti, odnosno, takva anomalija ne bi trebala imati utjecaj na izgled niti na čvrstoću školjke stolca.

Slika 50. prikazuje liniju spajanja (označena crvenom bojom) u trenutku nastanka.



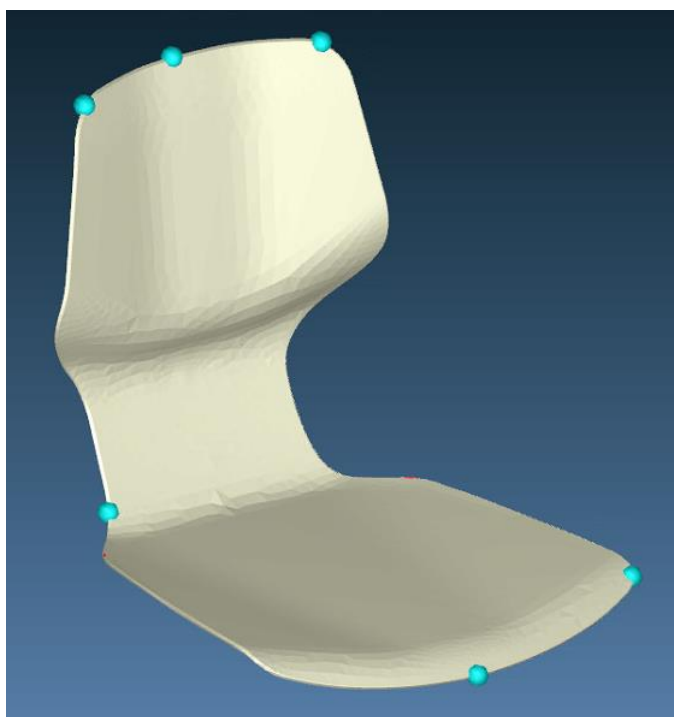
Slika 50. Linija spajanja kod injekcijskog prešanja razmatrane školjke stolca

6.2.4. Mjehurićavost

Mjehurićavost nastaje kada fronte taljevine okruže i zarobe mjehurić zraka u kalupnoj šupljini. Zarobljeni mjehurić zraka može uzrokovati nepotpuno popunjavanje kalupne šupljine te nedostatke u pogledu izgleda površine. Zarobljeni mjehurić zraka tijekom procesa se može zagrijati i uzrokovati tragove gorenja na otpresku.

Moldex3D u rezultatima simulacije prikazuje moguća mjesta nastanka džepova zraka, a na konstruktoru je da odluči koja mjesta zaista zahtijevaju odzračivanje.

Na slici 51. prikazana su plavom bojom moguća mjesta nastanka džepova zraka za otpresak razmatrane školjke stolca. Vidljivo je kako su moguća mjesta nastanka džepova zraka na liniji podjele kalupa pa se odzračivanje može postići odgovarajućom hrapavošću na sljubnici (ravnini podjele).

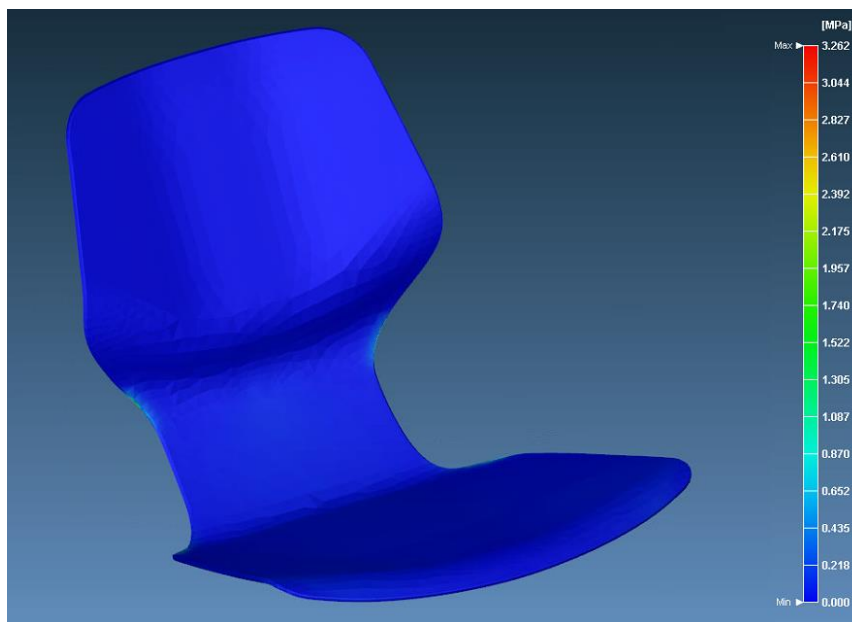


Slika 51. Moguća mjesta nastanka džepova zraka

6.2.5. Smično naprezanje materijala

Kao što je ranije spomenuto, drvno-plastomerni kompoziti su osjetljivi na smična naprezanja. Moldex3D nudi pregled intenziteta smičnih naprezanja ovisno o lokaciji u kalupnoj šupljini. Na smična naprezanja materijala tijekom injekcijskog prešanja utječu parametri poput temperature i brzine protoka taljevine. Osim parametara, na smična naprezanja materijala utječe konstrukcija otpreska pa je potrebno izbjegavati nagle promjene debljine i oblika presjeka.

Na slici 52. prikazana su smična naprezanja materijala ovisno o mjestu na kojem se nalaze.



Slika 52. Smična naprezanja

Iz rezultata simulacije vidljivo je da su smična naprezanja ujednačena kroz cijeli otpresak što je posljedica postepene promjene debljine, a ne nagle. Također, otpresak ne sadrži nagle promjene oblika.

6.2.6. Sila držanja kalupa

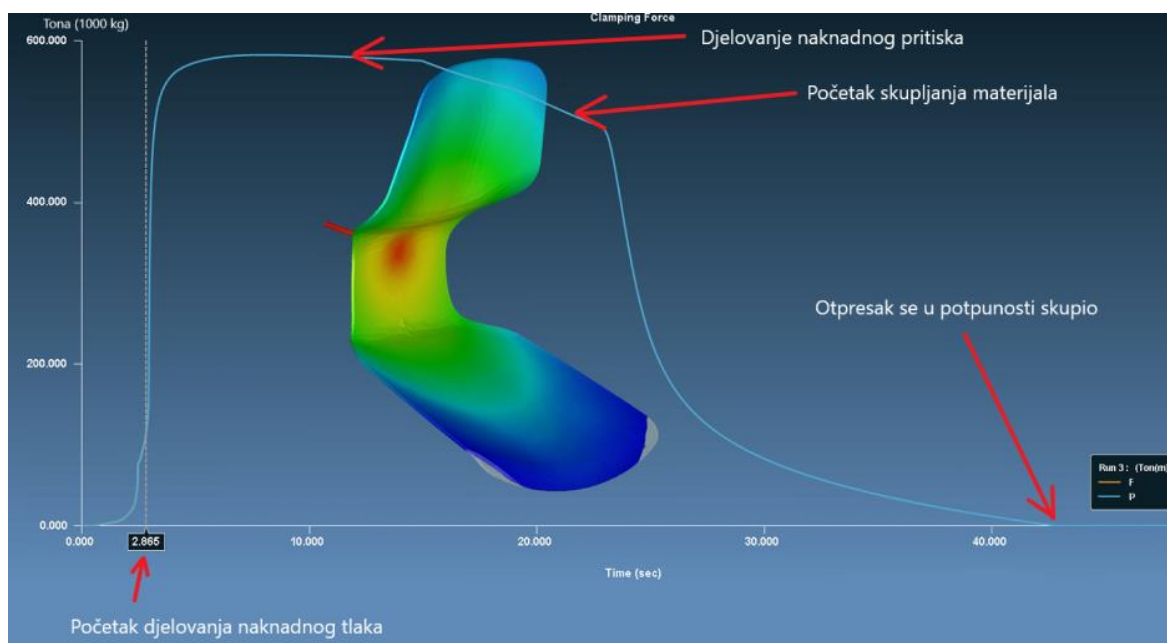
Sila držanja kalupa jest iznos sile koju osigurava ubrizgavalica, a koji je potreban da bi se dvije polovice kalupa držale stisnutima tijekom procesa injekcijskog prešanja.

Premala sila držanja može uzrokovati nedovoljno prijanjanje sljubnica što uzrokuje izlaz materijala na tim mjestima, a samim time i nezadovoljavajući otpresak (pojava srha na otpresku).

Također, sila držanja kalupa jedan je od parametara o kojima ovisi cijena ubrizgavalice, pa je bitno da odabrana ubrizgavalica može osigurati zahtijevanu silu držanja s određenim faktorom sigurnosti, ali je također bitno da se ubrizgavalica ne predimenzionira u pogledu potrebne sile držanja jer to povisuje njenu cijenu.

Na slici 53. prikazan je graf sile držanja u ovisnosti o vremenu.

U početku punjenja kalupne šupljine iznos potrebne sile držanja je veoma mali jer taljevina tek prolazi kroz uljevni sustav. S popunjavanjem kalupne šupljine i rastom pritiska raste i sila na polovice kalupa. S početkom djelovanja naknadnog pritiska dolazi do porasta sile držanja sve do početka skupljanja materijala, odnosno, otpreska. Skupljanjem materijala smanjuje se sila na polovice kalupa sve do trenutka kad se otpresak skupljanjem odvoji od kalupne šupljine.



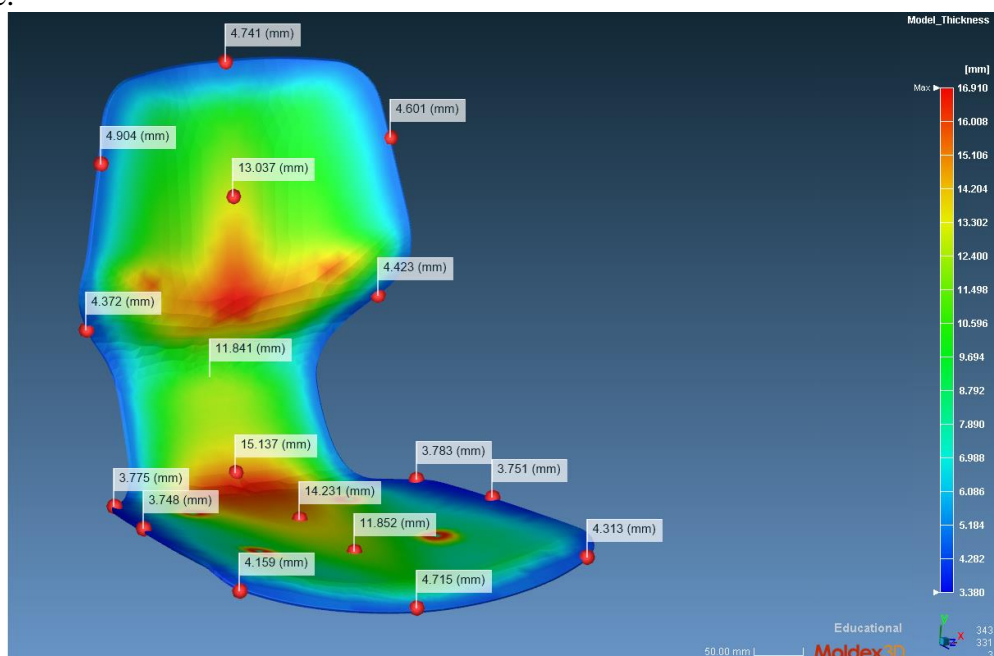
Slika 53. Sila držanja kalupa

6.2.7. Debljina otpreska

Jedan od ponuđenih rezultata jest debljina otpreska. Moldex3D nudi pregled debljine otpreska nakon vađenja iz kalupa.

Na slici 54. prikazana je razmatrana školjka stolca s debljinama ovisno o položaju. Također, odabrane su određene referentne točke koje prikazuju debljinu za odabranu lokaciju.

Na temelju prikazanih podataka moguće je skalirati 3D model kako bi se dobile željene debljine.



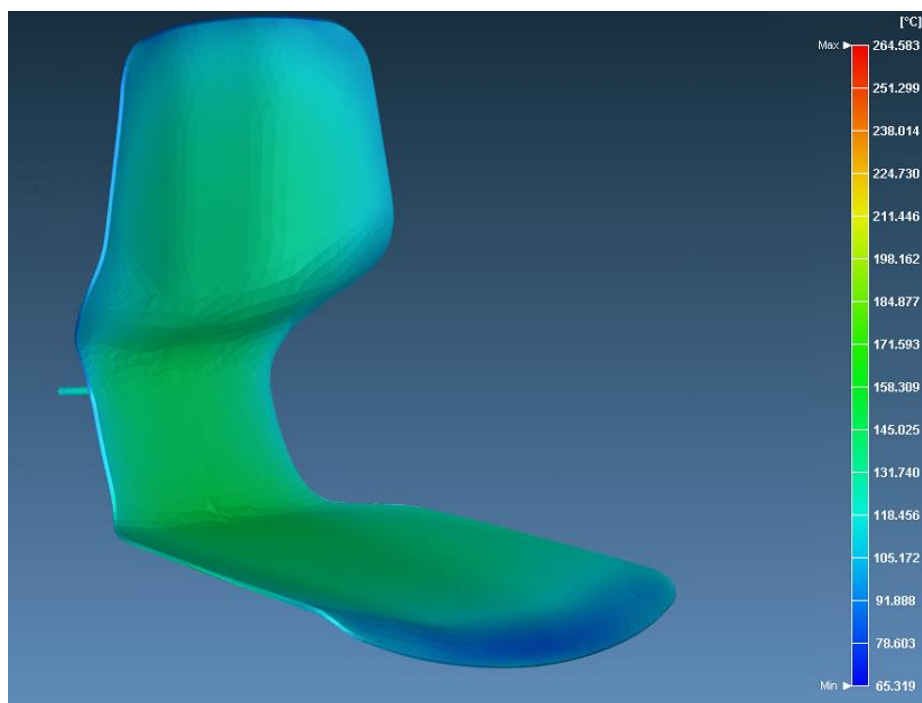
Slika 54. Debljina otpreska školjke nakon vađenja iz kalupa

6.2.8. Zagrijavanje zbog viskoznosti

Punjenjem kalupne šupljine taljevinom dolazi do trenja između očvrnutog i neočvrnutog sloja taljevine. Naime, kako se kalupna šupljina puni, sloj taljevine koji je u dodiru s stijenkama kalupne šupljine brže očvršćuje od unutarnjeg sloja taljevine, pa se javlja trenje između vanjskog i unutarnjeg dijela taljevine, odnosno, očvrstulog i neočvrstulog dijela.

Povećanim trenjem dolazi do zagrijavanja materijala i opasnosti od pregaranja. Kod drveno – plastomernih kompozita izrazito je bitno da se materijal ne pregrije kako ne bi došlo do degradiranja drvene komponente, što bi se očitovalo na površini otpreska.

Moldex3D nudi pregled porasta temperatura uslijed zagrijavanja zbog trenja taljevine. Slika 55. prikazuje temperature kod razmatrane školjke stolca.

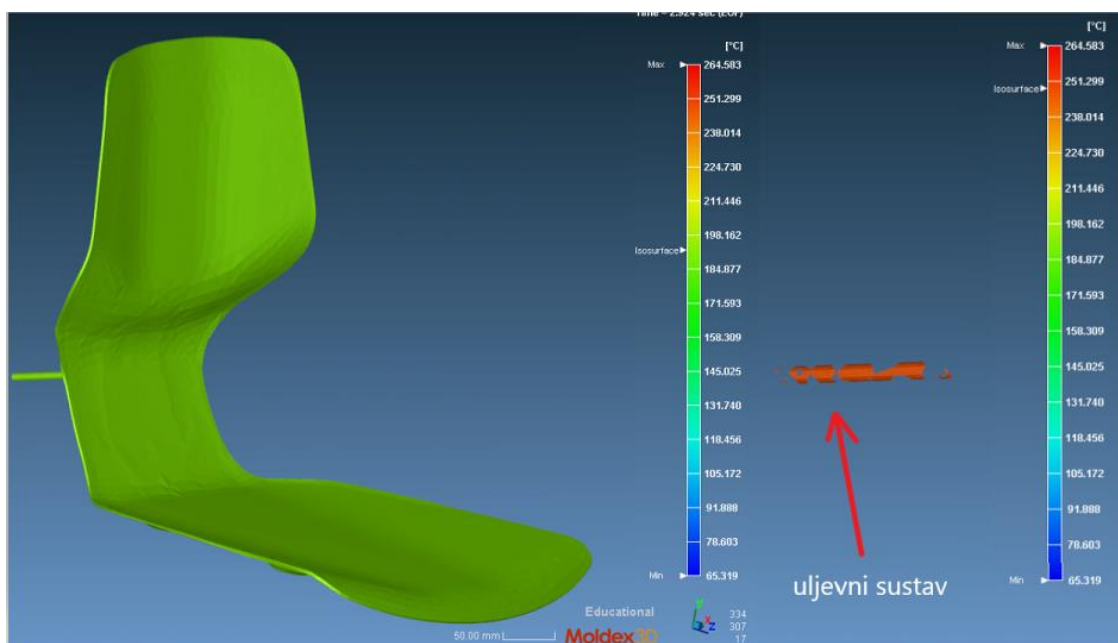


Slika 55. Temperature razmatrane školjke stolca

Na prvi pogled može se zaključiti da su temperature u području od 90 do 200 °C, što predstavlja opasnost od pregaranja. Osim toga, na skali je prikazana maksimalna temperatura u iznosu od 264 °C pa je potrebno to detaljnije istražiti.

Moldex3D ima mogućnost detaljnijeg prikaza temperatura pa je moguće detaljnije vidjeti gdje i u kojem iznosu se pojavljuju temperature taljevine. Pomicanjem klizača na skali s rezultatima, moguće je vidjeti područja koja su odabrane temperature.

Slika 56. prikazuje lokaciju maksimalne temperature i maksimalnu temperaturu otpreska školjke ne računajući uljevni sustav.



Slika 56. Maksimalna temperatura razmatrane školjke stolca i uljavnog sustava

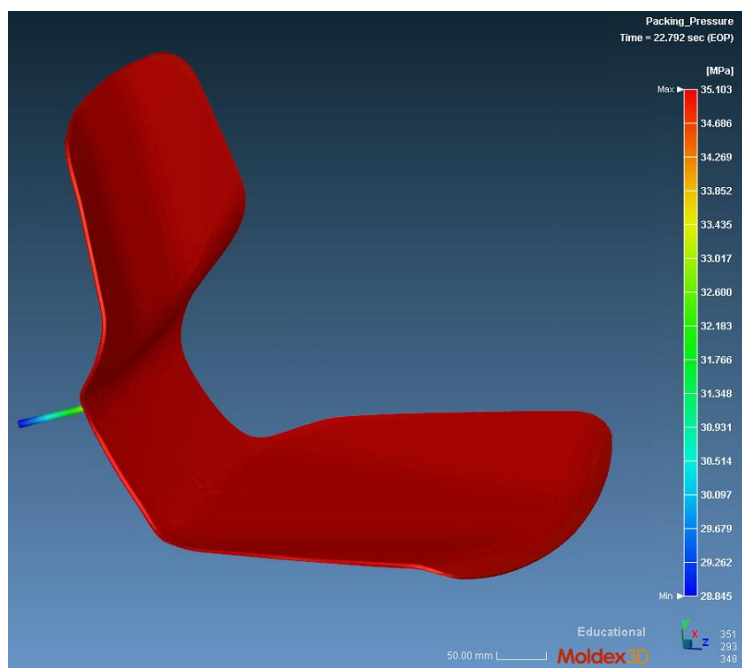
Iz rezultata simulacije vidljivo je da će maksimalna temperatura školjke stolca prilikom procesa injekcijskog prešanja iznositi otprilike 195 °C, a najviša temperatura u iznosu od 260 °C pojavit će se u uljevnom sustavu. Dakle, očekuje se da će kod injekcijskog prešanja dolaziti do pregaranja materijala, ali samo u dijelu ušća, što znači da će otpresak biti zadovoljavajuće kvalitete jer se pregaranje neće događati u otpresku školjke.

Ukoliko se kod proizvodnje pokaže da je i temperatura od 195 °C previsoka, potrebno je sniziti temperaturu prerade materijala.

6.2.9. Učinak djelovanja naknadnog tlaka

U idealnom slučaju naknadni tlak bi trebao djelovati jednoliko na cijeli otpresak. Tlak koji se narine na uljevni sustav može djelovati na otpresak samo preko neočvrnutog materijala. Kada taljevina u kalupnoj šupljini očvrzne, nemoguće je distribuirati pritisak na ostatak kalupne šupljine, npr. ako taljevina najprije očvrzne kod ušća dobije se koncentracija pritiska na tome mjestu jer je nemoguće dalje djelovati pritiskom kroz očvrsnuti materijal.

Slika 57. prikazuje raspodjelu pritiska kod djelovanja naknadnog tlaka na razmatranu školjku stolca.

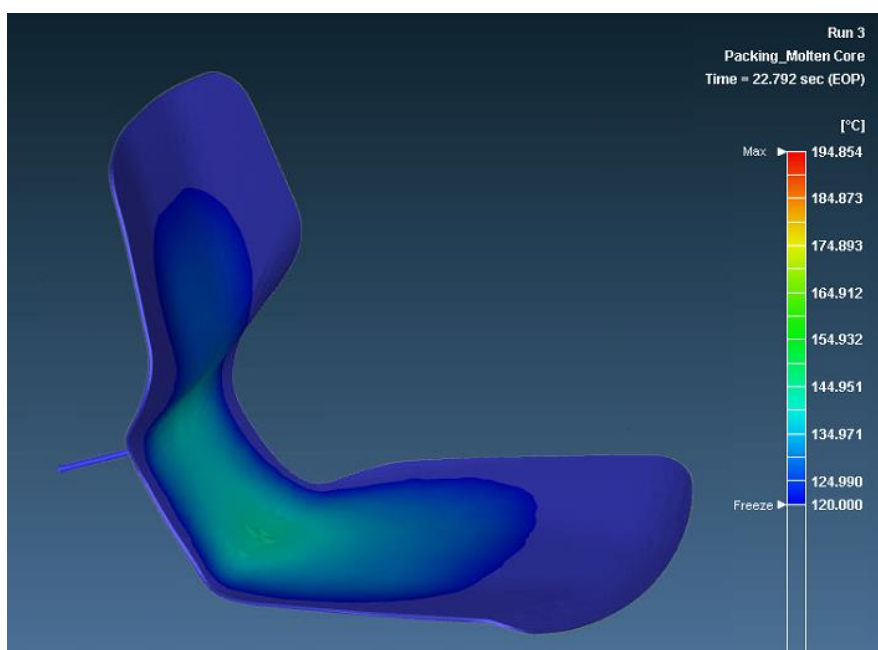


Slika 57. Djelovanje naknadnog tlaka na razmatranu školjku stolca

Iz slike je vidljivo kako naknadni tlak djeluje jednoliko po cijelom otpresku što je vrlo povoljno.

Tlak djeluje po cijelom otpresku zbog toga što se taljevina prvo očvršćuje na rubovima otpreska pa prema ušću, što znači da narinuti tlak na uljevni sustav može preko neočvrsnute taljevine djelovati na cijeli otpresak.

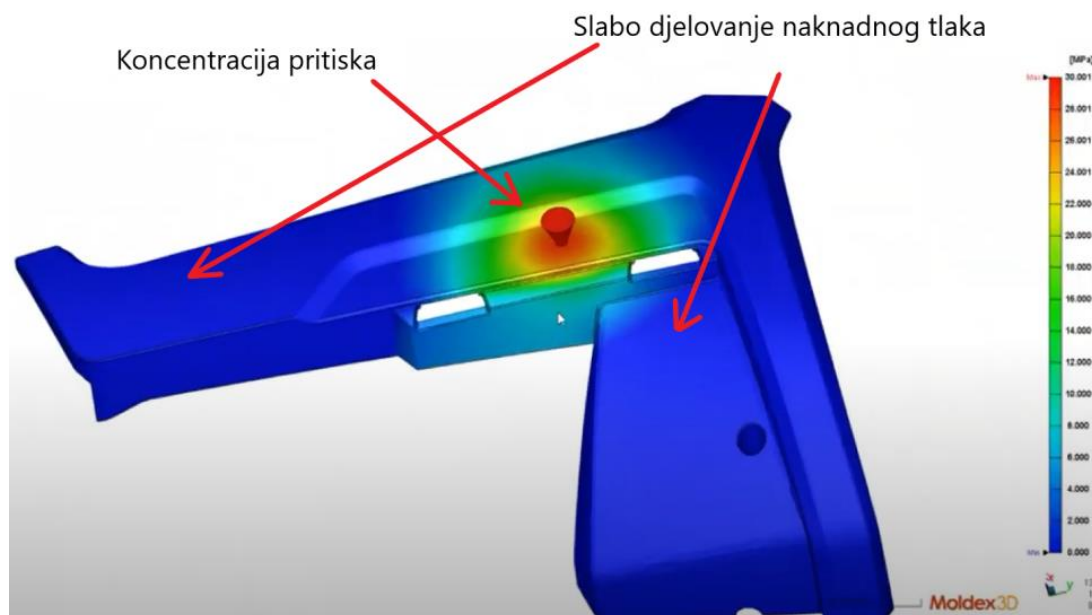
Slika 58. prikazuje pregled očvršćivanja taljevine u trenutku djelovanja naknadnog tlaka.



Slika 58. Očvršćivanje taljevine

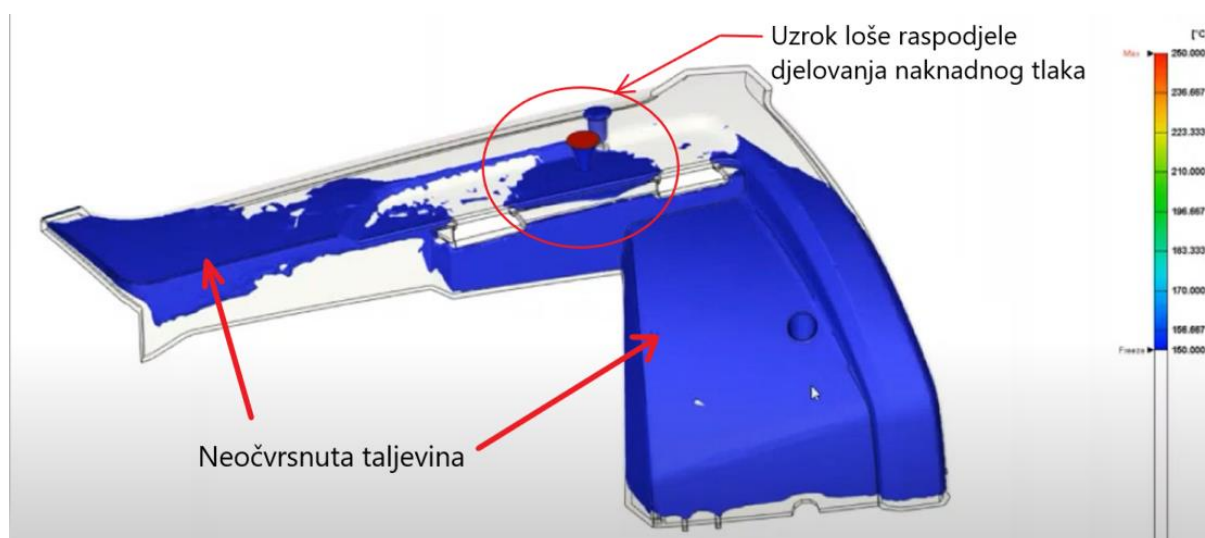
Bitno je napomenuti kako ovakav povoljan raspored očvršćivanja ovisi o temperaturama u poglavlju 6.2.8., gdje se postiže najviša temperatura taljevine upravo u uljevnom sustavu.

Kada to ne bi bio slučaj, odnosno, kada bi taljevina krajeva otpreska zbog povišenja temperature uslijed trenja imala veću temperaturu višu od taljevine na ušću, došlo bi do loše raspodjele pritiska naknadnog tlaka jer se pritisak ne bi mogao raspodijeliti po čitavom otpresku zbog očvršćivanja taljevine na ušću. Slika 59. prikazuje takav primjer.



Slika 59. Primjer lošeg djelovanja naknadnog tlaka [22]

Slika 60. prikazuje neočvrsnutu taljevinu u trenutku djelovanja naknadnog tlaka.



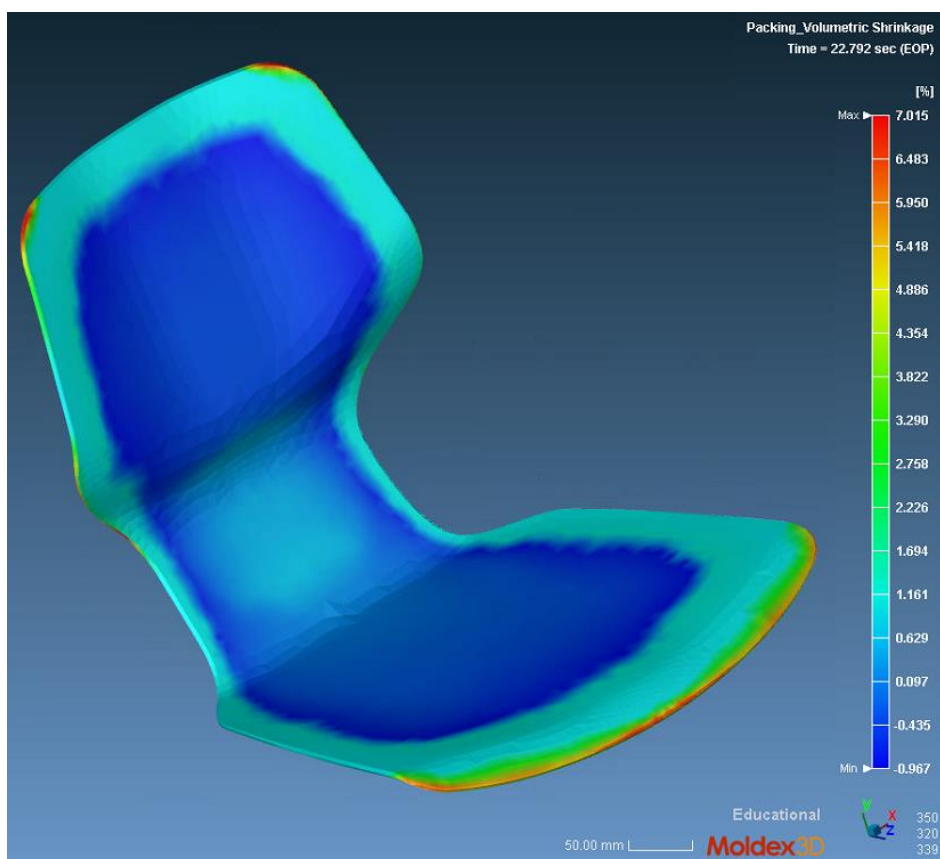
Slika 60. Uzrok loše raspodjele djelovanja naknadnog tlaka

Na slici 60. crvenom bojom je zaokružen uzrok loše raspodjele djelovanja naknadnog tlaka. Dakle, plavom bojom je prikazana neočvrsnuta taljevina, pa je vidljivo kako postoji očvrsnuti dio taljevine između područja ušća i krajeva otpreska. Takav očvrsnuti dio sprječava daljnje djelovanje naknadnog pritiska pa se taj pritisak koncentrira na označeno područje oko ušća.

Ovakva koncentracija pritiska predstavlja problem te uzrokuje deformiranje otpreska. Moguća rješenja su povišenje temperature materijala i smanjenje protoka materijala, kako bi se smanjila smična naprezanja na materijal, a samim time i povišenjetemperature zbog trenja.

6.2.10. Stezanje, vitoperenje i deformacija otpreska

Iznos naknadnog pritiska utječe na volumensko stezanje materijala pa tako Moldex3D nudi i prikaz volumenskog stezanja otpreska (slika 61.)

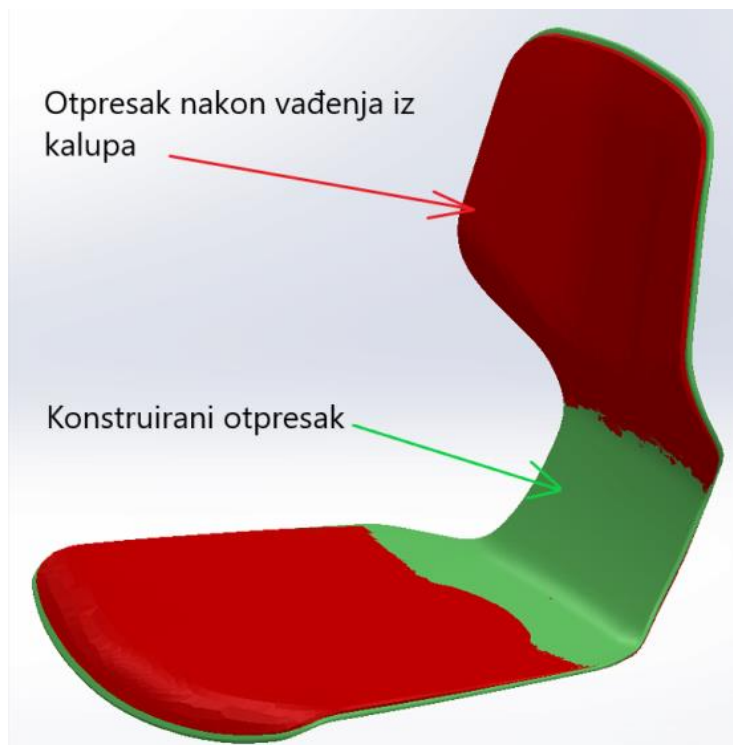


Slika 61. Stezanje otpreska razmatrane školjke

Iz rezultata je vidljivo kako dolazi do stezanja na rubovima školjke te do ekspanzije u području ušća što je rezultat djelovanja prevelikog naknadnog tlaka.

Neujednačeno volumensko stezanje može dovesti do vitoperenja i deformacije otpreska.

Moldex3D kao jedan od rezultata simulacije nudi i 3D model otpreska nakon injekcijskog prešanja, odnosno, model otpreska s djelovanjima vitoperenja, stezanja i deformacija.



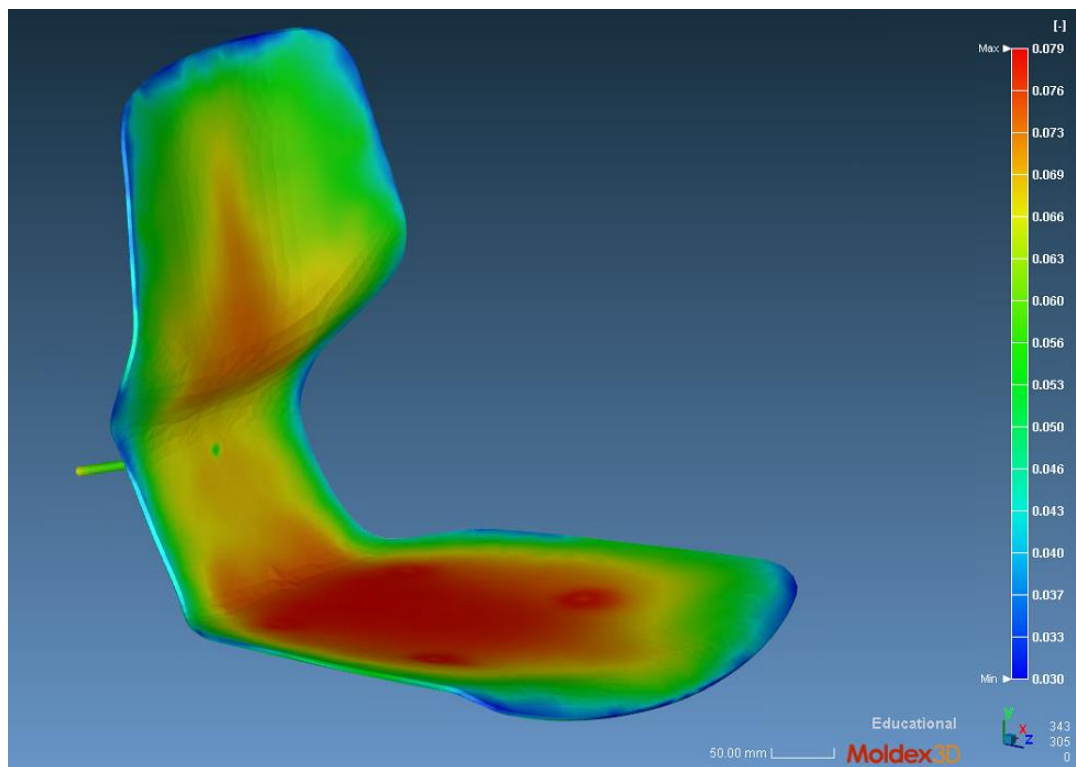
Slika 62. Usporedba otpreska

Iz usporedbe dvaju modela (slika 62.) vidljivo je kako će se otpresku uslijed vitoperenja i deformacija promijeniti kut sjedenja te smanjiti gabaritna dimenzija. No, vidljivo je kako taj utjecaj nije značajan, a može se kompenzirati konstruiranjem otpreska s naknadnim deformiranjem u vidu.

6.2.11. Ulegnuća i usahlina

Do ulegnuća i usahlina dolazi uslijed stezanja materijala kod debljih presjeka tijekom hlađenja. Pravilnim djelovanjem naknadnog tlaka (vrijeme djelovanja i iznos) osigurava se nadomještanje materijala kod stezanja pa se mogućnost pojave ulegnuća i usahlina smanjuje. Ostali parametri koji utječu na pojavu usahlina i ulegnuća su brzina ubrizgavanja taljevine, temperatura kalupa, temperatura taljevine.

Što se tiče konstrukcije kalupa, kod konstruiranja je preporučljiva ujednačena debljina stijenke jer će se deblja stijenka sporije hladiti, a samim time i jače skupljati od tanje stijenke. Slika 63. prikazuje mjesta i vjerojatnost pojave usahlina na razmatranom otpresku školjke stolca. Što je vrijednost bliža nuli to je manja mogućnost za pojavu usahlina i ulegnuća.



Slika 63. Vjerojatnost pojave usahlina i ulegnuća

Iz rezultata simulacije vidljivo je da je najveća opasnost od pojave usahlina na mjestu sjedišta školjke, no, vjerojatnost pojave je vrlo mala. U ovome slučaju, vjerojatnost pojave usahlina na mjestu sjedišta može se dodatno sniziti prilagođavanjem sustava za temperiranje.

6.3. Zaključak o tehnološnosti razmatrane školjke stolca

Razmatranjem prikazanih rezultata moguće je zaključiti kako je razmatrani otpresak školjke stolca moguće proizvesti injekcijskim prešanjem drveno – plastomernog kompozita bez pojave neželjenih svojstava.

Rezultati simulacije injekcijskog prešanja su optimalni, a dodatnim optimiranjem parametara i konstrukcije kalupa (kompenziranje deformacija i stezanja, optimiranjem sustava za temperiranjem) mogu se dodatno poboljšati.

Također, iz rezultata simulacije moguće je vidjeti potrebne zahtjeve za odabir stroja za injekcijsko prešanje. Neki od osnovnih svojstava ubrizgavalice za injekcijsko prešanje su volumen ubrizgavanja i moguća sila držanja kalupa.

Za razmatrani otpresak, na temelju rezultata simulacije potrebna je ubrizgavalica sa silom držanja kalupa iznad 8000 kN (sila uvećana za sigurnosni faktor) i volumenom, odnosno, masom ubrizgavanja u iznosu od 4,5 kg.

Također, kod odabira ubrizgavalice, važno je imati na umu potreban razmak vodilica za prihvat kalupa.

7. ZAKLJUČAK

Injekcijsko prešanje u industriji namještaja nije najzastupljenija tehnologija dobivanja proizvoda. No, implementacijom injekcijskog prešanja proizvodi se znatno pojeftinjuju, a vrijeme proizvodnje skraćuje.

Implementacijom drvo – plastomernih kompozita rješava se problem negativne percepcije na plastičarsku industriju, a proizvodu se omogućava bolji plasman na tržištu. Iako drvo-plastomerni kompoziti imaju svoje nedostatke u pogledu prerade (zahtjevniji te s manje prostora za greške za razliku od konvencionalnih plastomera), njihove prednosti poput uštede energije zbog prerade na nižim temperaturama, poboljšanja cirkularnosti proizvoda i boljeg utjecaja na okoliš (u odnosu na konvencionalne plastomerne materijale) čine ih primamljivim materijalom za primjenu u industriji namještaja. Upravo zbog svojih dobrih svojstava u pogledu utjecaja na okoliš, drvo-plastomerni kompoziti mogli bi postati sve korišteniji materijal u budućnosti.

U današnje vrijeme razvoj i konstrukcija proizvoda u industriji namještaja je nezamisliva bez korištenja CAD/CAM softverskih alata. Alati poput programskog Solidworks omogućuju konstruktoru da neki zadani proizvod konstruira, napravi CNC programe, tehničku dokumentaciju te omogućava lakšu predodžbu o proizvodu (3D model) i uvid u eventualne probleme kod proizvodnje.

U pogledu injekcijskog prešanja i prilagođavanja konstrukcije proizvoda za izvedbu injekcijskim prešanjem, softverski alati uvelike olakšavaju konstruiranje proizvoda svojim značajkama poput generiranja razdjelne linije. Time je omogućeno brže, sigurnije i jeftinije razvijanje proizvoda, a to pogotovo vrijedi za manje iskusne inženjere.

Također, veoma veliku ulogu imaju i softverski alati za simulaciju procesa injekcijskog prešanja poput programskog alata Moldex3D. Moldex3D omogućava konstruktoru uvid u sve moguće probleme te tako sprječava izradu neoptimiranog kalupa, odnosno proizvoda.

U ovome radu, upravo korištenje navedenih softverskih alata omogućilo je neiskusnom konstruktoru konstruiranje zadane školjke stolca, ukazivanje na moguće nedostatke i probleme te optimiranje procesa injekcijskog prešanja.

LITERATURA

- [1] I. Čatić: Uvod u proizvodnju polimernih tvorevina, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991
- [2] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-typical-injection-molding-machine-Source_fig1_277126772 – pristupljeno 12.11.2022
- [3] <https://injectionmouldingworld.com/3-basic-steps-of-the-injection-molding-process/> -pristupljeno 12.11.2022.
- [4] <https://www.statista.com/statistics/1060313/size-of-rta-furniture-market-us-by-material/> - pristupljeno 15.09.2022.
- [5] <https://www.prostoria.eu/hr/kolekcije/oblikant/oblikant-stolica/> - pristupljeno 15.09.2022.
- [6] Rede, V. Autorizitana predavanja iz kolegija Drvo i drvni kompoziti. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [7] V. Mazzanti, F. Mollica, A review od wood polymer composites rheology and its implications for processing. University of Ferrara, 2020.
- [8] <https://www.icmasg.com/products/compounding-masterbatch-systems/wpc-nfc-compounding/> - pristupljeno 2.10.2022.
- [9] <https://www.andritz.com/> - pristupljeno 4.10.2022.
- [10] S. Migneault , A. Koubaa, P. Perré (2014), Effect of Fiber Origin, Proportion, and Chemical Composition on the Mechanical and Physical Propertiesof Wood-Plastic Composites, Journal of Wood Chemistry and Technology

- [11] R. Gosselin, D. Rodrigue, B. Riedl, Injection Molding of Postconsumer Wood–Plastic Composites I: Morphology. *Journal of thermoplastic composite materials*, Vol. 19—November 2006.
- [12] N. Španić, V. Jambrečković, A. Antonović, Osnovni materijali za proizvodnju drvnoplastičnih kompozita. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [13] N.M. Stark, R.E. Rowlands, Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. University of Wisconsin, 2022.
- [14] <https://www.ptonline.com/articles/wood-filled-plastics-they-need-the-right-additives-for-strength-good-looks-and-long-life> - pristupljeno 11.10.2022.
- [15] <https://www.ptonline.com/articles/injection-molding-wood-plastic-composites> - pristupljeno 16.10.2022
- [16] <https://www.jeluplast.com/en/wpc/products/jeluplast/applications/> - pristupljeno 11.10.2022.
- [17] <https://www.ikea.com/hr/hr/p/odger-stolica-plava-00360002/> - pristupljeno 12.10.2022.
- [18] <https://www.youtube.com/watch?v=Yyb9WXVkBbc> - pristupljeno 12.10.2022.
- [19] Godec, D. Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2005
- [20] N.N.: Upute za uporabu računalnog programa Moldex 3D, CoreTech Systems, 2004.
- [21] Min Hou, CAD/CAM Integration Based on Machining Features for Prismatic Parts, University of Kansas
- [22] <https://www.youtube.com/watch?v=k1iM5xTSSGo&t=1231s> - pristupljeno 30.10.2022.

PRILOZI

I. CD-R disk