

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Marko ROŽIČ

**OPTIMIZACIJA PROCESNIH PARAMETROV
STISKANJA TERMOPLASTIČNIH MATERIALOV**

Magistrsko delo

Slovenj Gradec, september 2022

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

OPTIMIZACIJA PROCESNIH PARAMETROV STISKANJA TERMOPLASTIČNIH MATERIALOV

Magistrsko delo

Študent:	Marko ROŽIČ
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	doc. dr. Iztok ŠVAB
Somentor:	viš. pred. mag. Andrej GLOJEK

Slovenj Gradec, september 2022

IZJAVA

Podpisani Marko Rožič izjavljam, da:

- je bilo predloženo magistrsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom,
- predloženo magistrsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršne koli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- magistrsko delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika: podjetja ISOKON, d. o. o.

ne sme biti javno dostopno do 30. 9. 2024

Po preteku časovno omejenega javnega dostopa v skladu s 1. odstavkom 21. člena in 23. členom Zakona o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 16/2007-UPB in spremembe) dovoljujem, da se zgoraj navedeno magistrsko delo shrani v Knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve magistrskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi magistrsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Ob koncu pisanja magistrske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju, doc. dr. Iztoku Švabu in somentorju, viš. pred. mag. Andreju Glojeku, za strokovno pomoč, vodenje in vse nasvete pri izdelavi magistrskega dela.

Prav tako se iskreno zahvaljujem podjetju Isokon, d. o. o., ki mi je omogočilo študij in izvedbo eksperimentalnega dela ter podjetju Sitor, d. o. o., za možnost uporabe prototipne hidravlične stiskalnice.

Na koncu bi se rad zahvalil še svoji družini, ki mi je v času študija stala ob strani in me podpirala.

POVZETEK

Optimizacija procesnih parametrov stiskanja termoplastičnih materialov

Polimerni materiali so zaradi svojih izjemnih lastnosti dandanes skorajda nepogrešljivi v našem vsakdanjem življenju. Najdemo jih praktično na vsakem koraku, prisotni pa so tudi v skoraj vseh industrijskih panogah. Polimerne materiale lahko predelujemo z različnimi tehnologijami, med katerimi je tudi tehnologija stiskanja, ki omogoča homogeno strukturo in odlične mehanske lastnosti končnih proizvodov. Namen magistrskega dela je bil optimirati obstoječe procesne parametre stiskanja termoplastičnih materialov s pomočjo novih inovativnih pristopov, kot je predgretje materiala in vakuumsko stiskanje ter na ta način skrajšati čas obstoječih ciklov stiskanja, zmanjšati porabo energije, okoljske vplive, povečati kapaciteto strojev in s tem tudi konkurenčnost podjetja. V okviru magistrskega dela smo preučevali različne reološke, mehanske in toplotne lastnosti vzorcev ter primerjali vpliv posamezne metode optimizacije na končne lastnosti stiskanih plošč. Ugotovili smo, da lahko s predgretjem materiala čase obstoječih ciklov stiskanja skrajšamo za več kot 15 %, pri tem pa se bistveno ne spremenijo končne lastnosti stiskanih plošč, pri večini vzorcev so se vrednosti E-modula in udarne žilavosti celo povečale. Rezultati numeričnih simulacij se v veliki meri skladajo z eksperimentalnimi rezultati stiskanja, saj smo pri eksperimentalnem testiranju dobili podobne temperature stiskane plošče, hladilnega medija in orodja hidravlične stiskalnice, primerljivi pa so tudi skrčki stiskane plošče.

Ključne besede:

Optimizacija procesnih parametrov, vakuumsko stiskanje, hidravlična stiskalnica, termoplastični materiali, simulacije, Autodesk Moldflow Insight (AMI), polietilen (PE), polipropilen (PP), mehanske lastnosti.

SUMMARY

Compression molding process parameters optimization of thermoplastic materials

Due to their exceptional properties polymeric materials are nowadays almost indispensable in our everyday life. They can be found practically at every step as they are present in almost all fields of industry. Polymeric materials can be processed using various technologies including compression molding technology, which enables a homogeneous structure and excellent mechanical properties of the final products. The purpose of the master thesis was to optimize the existing process parameters of the compression molding of thermoplastic materials with new innovative approaches, such as material preheating and vacuum compression molding and in this way shorten the time of existing compression molding cycles, reduce energy consumption, environmental impacts, increase the capacity of machines and also the competitiveness of the company. In the master thesis various rheological, mechanical and thermal properties of the samples and compared the impact of each optimization method on the final properties of pressed sheets were studied. We found that by preheating the material the time of the existing compression molding cycles can be shortened by more than 15 % and this does not significantly change the final properties of the pressed sheets, for most samples the values of the E-module and the impact strength even higher. The results of the numerical simulations are largely in agreement with the experimental results of compression molding, since at the experimental work similar temperatures of the pressed sheet, the cooling medium and the mold of the hydraulic press were obtained, and the shrinkage of the pressed sheet is also comparable.

Keywords:

Process parameters optimization, vacuum compression molding, hydraulic press, thermoplastic materials, simulations, Autodesk Moldflow Insight (AMI), polyethylene (PE), polypropylene (PP), mechanical properties.

KAZALO

1 UVOD	1
1.1 Opis splošnega področja dela	1
1.2 Cilji in hipoteze ter omejitve magistrskega dela	2
1.3 Metode magistrskega dela	2
1.4 Opis strukture magistrskega dela	3
2 TEORETIČNI DEL	4
2.1 Splošno o polimerih	4
2.2 Polimerizacija	6
2.3 Delitev polimerov	9
2.3.1 Termoplasti (plastomeri)	10
2.3.2 Duromeri	15
2.3.3 Elastomeri	15
2.4 Tehnologije predelave polimernih materialov	16
2.4.1 Ekstrudiranje	16
2.4.2 Brizganje	18
2.4.3 Stiskanje	19
2.5 Numerične simulacije	23
2.5.1 Autodesk Moldflow Insight (AMI)	23
3 EKSPERIMENTALNI DEL	24
3.1 Uporabljeni materiali	24
3.2 Priprava vzorcev	25
3.2.1 Predgretje in vakuumsko stiskanje PPH	25
3.2.2 Predstiskanje s pomočjo vložnih orodij	30
3.2.3 Dvojno polnjenje materiala	33
3.3 Simulacije stiskanja termoplastičnega materiala	35
3.4 Metode preiskav	40
3.4.1 Reološke lastnosti	40
3.4.2 Toplotne lastnosti	40
3.4.3 Mehanske lastnosti	41
4 REZULTATI IN DISKUSIJA	43
4.1 Primerjava lastnosti stiskanih plošč s predgretjem materiala in vakuumom	43
4.2 Parametri simulacij stiskanja	59
4.3 Potencialni prihranki posamezne optimizacije in stroški investicije	65
4.3.1 Predgretje in vakuumsko stiskanje PPH	65
4.3.2 Predstisk s pomočjo vložnih orodij	66
4.3.3 Dvojno polnjenje materiala	66
5 SKLEP	68
SEZNAM LITERATURE IN VIROV	70

SEZNAM SLIK _____	72
SEZNAM TABEL _____	74
SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV _____	75
SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC _____	76

1 UVOD

1.1 Opis splošnega področja dela

Nenehen razvoj in potreba po novih materialih v vseh industrijskih področjih sta pripomogla k temu, da so polimerni materiali vedno bolj uporabljeni v našem vsakdanjem življenju. Lahko jih najdemo praktično na vsakem koraku in v vseh vejah industrije, bodisi kot embalažo za različne izdelke in hrano, komponente v avtomobilih, elektronski opremi, tekstilu in obutvi ter različnih izdelkih za vsakodnevno uporabo. Polimerni materiali se uporabljajo tudi kot izolacijski materiali v gradbeništvu, živilski, papirni, kozmetični industriji, transportu, proizvodnji povišnega, športu, elektro industriji ter ne nazadnje tudi v različnih naprednih aplikacijah ter biomedicini.

Ker je torej proizvodnja in predelava polimernih materialov v porastu, zaradi odličnih lastnosti pa se v prihodnje napoveduje še večje povpraševanje in njihova uporaba, je smiselno razmišljati o alternativnih polimernih materialih ter inovativnih pristopih proizvodnje in predelave polimernih materialov, s pomočjo katerih bi pripomogli k bolj trajnostni proizvodnji in manjšemu vplivu na okolje.

Znano je, da so termoplasti zaradi svojih odličnih predelovalnih lastnosti najbolj razširjeni in uporabljeni polimerni materiali, saj se zlahka preoblikujejo, imajo relativno nizko ceno, možno pa jih je tudi reciklirati in ponovno uporabiti v procesu proizvodnje oziroma predelave. Termoplasti imajo širok razpon lastnosti in imajo v odvisnosti od materiala odlično kemično in temperaturno stabilnost ter dobre mehanske lastnosti, prav tako pa so široko uporabni na različnih industrijskih področjih.

Za predelavo termoplastov se največ uporabljajo tehnologije, kot so ekstrudiranje, brizganje, toplo oblikovanje oziroma termoformiranje, pihanje in stiskanje (sintranje). Ker se za predelavo polimernih materialov lahko porabijo velike količine električne energije ter drugih energentov, pa je smiselno razmišljati tudi o optimizaciji obstoječih tehnologij in parametrov ter o uvedbi novih, inovativnih pristopov, ki bi pomembno vplivali na bolj ekonomično proizvodnjo in predelavo polimernih materialov ter imeli manjši vpliv na okolje.

Stiskanje je postopek predelave polimernih materialov, pri katerem se termoplastični material v obliki prahu, granul, kosmičev ali drugih oblik pod visokimi tlaki in temperaturo stiska v polproizvod ali končni proizvod. Največkrat gre za plošče, ki so namenjene za nadaljnjo strojno obdelavo ali pa za končne izdelke z že oblikovano strukturo in obliko. Postopek stiskanja je primeren predvsem za materiale, ki imajo visoko molekulsko maso, prednost pa je predvsem v možnosti izdelave plošč večjih debelin in dimenzij. Polimerni proizvodi, ki so proizvedeni s stiskanjem, imajo odlične mehanske lastnosti in minimalne notranje napetosti, homogeno strukturo ter izrazito stabilno obliko.

1.2 Cilji in hipoteze ter omejitve magistrskega dela

Namen magistrskega dela je optimizacija procesnih parametrov stiskanja termoplastičnih materialov, s katero bi pripomogli k bolj ekonomični predelavi termoplastov, povečali trenutne kapacitete strojev ter pripomogli k bolj trajnostni predelavi polimernih materialov. Z optimizacijo parametrov bi lahko pomembno vplivali na količino porabljene energije na enoto proizvedenega polimernega materiala, znižali lastno ceno proizvodov ter posledično dosegli večjo konkurenčnost podjetja na trgu.

Glavni cilj magistrskega dela je skrajšati obstoječe cikle stiskanja termoplastičnih materialov za vsaj 5 % ter ugotoviti, kako optimizacija s predgretjem materiala in vakuumskim stiskanjem vpliva na skrajšanje ciklov, na končne lastnosti stiskanih plošč ter kakšne so prednosti in slabosti omenjene tehnologije, stroški povezani z implementacijo v serijsko proizvodnjo ter morebitne omejitve.

Predpostavljamo, da je možno s predgretjem termoplastičnega materiala in vakuumskim stiskanjem skrajšati obstoječe cikle stiskanja termoplastičnih plošč, s tem prihraniti količino porabljene energije na enoto proizvedenega izdelka in povečati kapaciteto stroja, hkrati pa se s tem obstoječe mehanske in druge lastnosti izdelka ne poslabšajo. Prav tako pa predpostavljamo, da je možno različne parametre, ki so pridobljeni s pomočjo numeričnih simulacij, uporabiti pri eksperimentalnem delu na hidravličnih stiskalnicah v serijski proizvodnji.

Omejitev magistrskega dela lahko predstavlja implementacija vakuumskega stiskanja na hidravlično stiskalnico večjih dimenzij, ob dilataciji zaradi različnih temperatur bata stiskalnice in orodja bi namreč lahko prišlo do popuščanja vakuuma in posledično takšna tehnologija ne bi bila izvedljiva v serijski proizvodnji.

1.3 Metode magistrskega dela

V okviru magistrskega dela smo najprej zbrali, pregledali in preučili obstoječo literaturo s področja polimerov, bolj podrobno termoplastov, stiskanja termoplastičnih materialov, simulacij in možnih optimizacij procesov, pripravili različne vzorce stiskanih plošč, za namene numeričnih simulacij pripravili model laboratorijske stiskalnice in stiskane plošče ter izvedli simulacije stiskanja plošče iz termoplastičnega materiala.

Različne parametre optimizacije smo eksperimentalno testirali na prototipni laboratorijski vakuumski stiskalnici HS1-013 podjetja SITOR, d. o. o. in različnih hidravličnih stiskalnicah podjetja ISOKON, d. o. o. ter preverili morebitne stroške povezane z implementacijo posamezne metode v serijsko proizvodnjo stiskanih plošč, analizirali morebitne omejitve ter ovrednotili potencialne prihranke, ki bi jih določena optimizacijska metoda lahko prinesla.

Dodatno smo s pomočjo programskega orodja Autodesk Moldflow Insight (AMI) izvedli še numerične simulacije stiskanja termoplastičnega materiala in preverili, ali bi v prihodnje optimizacijo procesnih parametrov s pomočjo numeričnih simulacij lahko uporabili tudi v praksi v serijski proizvodnji, kar bi predstavljalo odlično alternativo trenutnemu eksperimentalnemu testiranju, ki zahteva veliko več časa, prav tako pa so prisotni tudi višji stroški takšnega testiranja.

Različni parametri so bili testirani s termoplastičnim materialom, in sicer so bili izvedeni eksperimentalni preizkusi z različnimi vrstami polietilena (PE) in polipropilena (PP). Preizkusi so bili izvedeni s polietilenom visoke molekulske mase (PE HMW), polietilenom zelo visoke molekulske mase (PE UHMW) ter homopolimer polipropilenom (PPH) različnih karakteristik in dobaviteljev, ki jih za proizvodnjo stiskanih plošč uporabljamo v podjetju ISOKON, d. o. o. Meritve posameznih lastnosti materiala (indeks tečenja taline, termična analiza) in stiskanih plošč (natezna trdnost, udarna žilavost, modul elastičnosti) so bile opravljene na laboratorijski opremi podjetij ISOKON, d. o. o. in ISOSPORT GmbH.

1.4 Opis strukture magistrskega dela

V magistrskem delu je v teoretičnem delu najprej analizirana in predstavljena obstoječa literatura s področja polimernih materialov, še posebej termoplastov, predstavljene so različne tehnologije za predelavo polimernih materialov ter podrobneje opisana tehnologija stiskanja. Opisane so tudi numerične simulacije in možnosti njihove uporabe ter predstavljena programska oprema Autodesk Moldflow Insight (AMI), s katero so bile izvedene numerične simulacije stiskanja termoplastičnega materiala.

V eksperimentalnem delu so predstavljeni različni materiali, ki so bili uporabljeni pri eksperimentalnih preizkusih, ter njihove lastnosti. Opisan je postopek priprave vzorcev stiskanih plošč ter različne metode preiskav, ki so se izvedle za karakterizacijo posameznih lastnosti vzorcev. Predstavljeni so možni načini optimizacije različnih procesnih parametrov stiskanja termoplastičnih materialov, ki jih predelujemo v podjetju ISOKON, d. o. o. ter v sodelovanju s podjetjem SITOR, d. o. o., ki je proizvajalec hidravličnih stiskalnic za gumarsko industrijo ter industrijo polimernih materialov, testirane nove tehnologije predelave termoplastov, kot je tehnologija predgretja materiala in vakuumskega stiskanja, opisan pa je tudi postopek priprave modelov in izvedbe numeričnih simulacij stiskanja termoplastičnega materiala.

V nadaljevanju je predstavljen vpliv tehnologije predgretja in vakuumskega stiskanja na mehanske in druge lastnosti stiskanih plošč, predstavljene so še dodatne možnosti optimizacije, rezultati numeričnih simulacij stiskanja ter možnost njihove uporabe v praksi, morebitni stroški, povezani z implementacijo posamezne metode v serijsko proizvodnjo, analizirane morebitne omejitve ter ovrednoteni možni prihranki, ki bi jih lahko določena metoda prispevala k izboljšanju procesov in večji konkurenčnosti podjetja.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Splošno o polimerih

Polimeri, kot jih je leta 1833 poimenoval švedski kemik Berzelius, so spojine, ki jih lahko srečamo praktično na vsakem koraku v vsakdanjem življenju. So makromolekule, ki so sestavljene iz ponavljajočih se strukturnih enot z nizko molsko maso, ki jih imenujemo monomeri, ti pa so med seboj povezani s kovalentno kemijsko vezjo. Monomeri so lahko preprosti s samo enim ali več atomi, lahko pa so bolj zapletene strukture, ki vsebujejo večje število atomov. Sestavljeni so iz različnih elementov, med katerimi so najpomembnejši predvsem ogljik, vodik, kisik, dušik in halogeni. Ker monomeri predstavljajo ogromen razred molekul, jih običajno razvrstimo v številne podskupine, kot so sladkorji, alkoholi, amini, akrili in epoksidi. Monomeri se pridobivajo predvsem iz fosilnih goriv, kot so nafta, premog in zemeljski plin, lahko pa tudi iz obnovljivih virov, kot so razna rastlinska olja. Poznamo naravne in sintetične monomere. Najpomembnejši sintetični monomeri so nenasičeni ogljikovodiki, kot sta eten in propen, iz katerih se sintetizirajo polietileni in polipropileni, zelo pomembni pa so tudi akrilni monomeri, kot so akrilna kislina, metil metakrilat in akrilamid. Najpomembnejši naravni monomeri pa so glukoza, ki se z glikozidno vezjo veže v škrob, celulozo in glikogen, aminokisliline, ki polimerizirajo v beljakovine in nukleotidi v celičnih jedrih, iz katerih nastajajo nukleinske kisline, od katerih je najbolj znana deoksiribonukleinska kislina (DNK) [1-3].

Beseda polimer izhaja iz grških besed "poly", kar pomeni mnogo in "meros", kar pomeni del. V prenesenem pomenu bi torej lahko rekli, da so polimeri sestavljeni iz mnogo delov. Polimeri so osnovni gradniki življenja že od vsega začetka, saj so sestavni del celic živali, rastlin, ljudi in ostalih organizmov, kljub temu pa se je njihovo resnično razumevanje in uporabnost začela šele sredi 20. stoletja z razvojem polimernih materialov, brez katerih si življenja dandanes skorajda ne moremo predstavljati. Polimeri predstavljajo čiste produkte, ki nastanejo pri procesu polimerizacije, medtem ko o polimernih materialih govorimo takrat, ko imamo tehnično uporabne materiale z vsemi dodatki za izboljšanje prvotnih lastnosti polimerov [3-5].

Naravne polimere, kot so polisaharidi (škrob, celuloza), polipeptidi (volna, svila, usnje), naravni kavčuk, proteini, encimi, peptidi in razne naravne smole, že vrsto let uporabljamo za hrano, gradbene materiale, ogrevanje, za proizvodnjo oblačil in obutve ter drugih proizvodov, naravno usnje, ki se pridobi s strojenjem živalskih kož, pa je prvi poznani modificirani naravni polimer in se uporablja že od pradavnine. Drugi modificirani naravni polimeri so se začeli pojavljati v 19. stoletju z nitriranjem in acetiliranjem celuloze, najbolj značilen predstavnik pa je bombaž. Sintetični oziroma umetni polimeri so rezultat raziskav različnih kemikov v 19. in 20. stoletju, njihova komercializacija pa se je začela po letu 1839, ko je Charles Goodyear izumil postopek vulkanizacije, s pomočjo katerega je iz neuporabnega naravnega kavčuka pripravil gumo.

Industrija polimernih materialov se je nato začela leta 1868 s sintezo celuloznega nitrata, razlog za to pa je bilo pomanjkanje slonovine, iz katere so izdelovali biljardne kroglice. John Wesley Hyatt je zato zmešal piroksin iz bombaža, ki je naravni polimer in dušikovo kislino s kafro. Rezultat je bil celulozni nitrat, ki ga je sam poimenoval celuloid. Prva polimerna masa umetnega izvora je nastala dobra štiri desetletja pozneje, leta 1909, ko je dr. Leo Hendrick Baekeland razvil fenol formaldehid, ki je vir najrazličnejših polimernih materialov še danes. Razvoj drugih polimerov, kot so celulozni acetat, polivinilklorid, polivinilacetat in poliamid, pa je sledil po letu 1920 [3, 4].

Razvoj polimernih materialov, ki je bil do dvajsetih let prejšnjega stoletja zelo počasen, je nato dobil velik zagon. Prva generacija umetnih polimerov je bila rezultat empiričnih dejavnosti, glavni poudarek pa je bil na kemični sestavi, pri čemer strukturi ni bilo posvečene velike pozornosti. Obsežne raziskave so nato privedle do prvega razumevanja strukturnega koncepta polimerov, da so ti sestavljeni iz dolgih verig oziroma mreže kovalentno vezanih molekul. Nemški kemik Staudinger je leta 1924 uvedel pojem makromolekule in postavil teorijo, da so polimeri visokomolekularne spojine, ki nastanejo s povezovanjem velikega števila nizkomolekularnih spojin oziroma monomerov, ti pa so med seboj povezani s kovalentnimi vezmi, ameriški kemik Carothers pa je odkril poliamid, njegove temeljne raziskave so znatno prispevale k razjasnitvi narave polimerov, njegova klasifikacija polimerov kot kondenzacijskih ali adicijskih polimerov pa obstaja še danes. Po boljšem razumevanju narave polimerov se je število polimernih proizvodov med letoma 1925 in 1950 izjemno povečalo [3, 4].

Razcvet je področje polimerov doživelo v času pred in po 2. svetovni vojni, iskanje materialov za pomoč pri obrambnih prizadevanjih je namreč povzročilo velik zagon novih raziskav, polietilen, ki je danes eden od najpomembnejših polimernih materialov na svetu pa je bil razvit zaradi potreb po kakovostnejših izolacijskih materialih za namene, kot je na primer radarski kabel. V šestdesetih in sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so bili uvedeni termoplastični poliestri, nitrilne smole in tako imenovani visoko temperaturni polimerni materiali (polifenilen sulfid, polieter sulfon), ki so bili prvotno razviti za potrebe vesoljske in letalske industrije. Zaradi boljšega razumevanja povezave med strukturo polimerov in njihovimi lastnostmi, uvedbo novih polimerizacijskih tehnik in večje razpoložljivosti novih in cenejših monomerov so se nato začeli razvijati polimerni materiali, ki so bili razviti za točno določeno aplikacijo, s specifičnimi lastnostmi in večjo ekonomsko vrednostjo [3].

Polimerne materiale lahko dandanes najdemo praktično na vsakem koraku in so skoraj nepogrešljivi v našem vsakdanjem življenju. Srečujemo jih pod imenom »plastika ali plastični materiali« in uspešno zamenjujejo konvencionalne materiale, kot so steklo, les, kovine, keramika. Prednosti polimernih materialov pred tradicionalnimi materiali so predvsem nižja gostota (približno 1000 kg/m^3), odpornost proti koroziji, izjemne elektroizolacijske lastnosti, nizka toplotna prevodnost, lažja predelava in oblikovanje, možnosti recikliranja in nižja cena.

Pomanjkljivosti polimernih materialov pa so predvsem slabša toplotna obstojnost, gorljivost, nagnjenost k degradaciji ali krhkost v primeru izpostavljenosti vremenskim vplivom. Polimerni materiali se lahko proizvajajo v trdni obliki, v obliki vlaken, pene, folije, raznih premazov ali lepil. Najdemo jih v vseh vejah industrije, bodisi kot embalažo za različne izdelke in hrano, komponente v avtomobilih, letalstvu, ladjedelništvu, elektronski opremi, tekstilu in obutvi ter različnih proizvodih za vsakodnevno uporabo. Polimerni materiali se uporabljajo tudi kot izolacijski materiali v gradbeništvu, živilski, papirni, kozmetični industriji, kmetijstvu, transportu, proizvodnji pohištva, športu, elektro industriji ter nenazadnje tudi za različne napredne aplikacije ter v biomedicini [3, 4].

2.2 Polimerizacija

Polimeri nastanejo s pomočjo kemijske reakcije, ki jo imenujemo polimerizacija. Pri polimerizaciji se monomeri med seboj povežejo s kovalentnimi kemijskimi vezmi in tvorijo polimerne verige oziroma makromolekule. Polimerizacija poteka z zaporednimi reakcijami, ki lahko potečejo tudi med dimeri, trimeri ali katerokoli drugo molekularno vrsto v reakcijski zmesi. Število ponavljajočih se enot v polimerni verigi imenujemo stopnja polimerizacije in določa dolžino polimerne molekule, označujemo jo z oznako DP (degree of polymerization), molska masa posameznega polimera pa je enaka zmnožku stopnje polimerizacije in molske mase ponavljajoče se enote. Produkte z nizko stopnjo polimerizacije (do 10) in posledično nizko molekularno maso imenujemo oligomeri (fenolni, epoksidni, sečninski duromeri) in imajo običajno nezaželene toplotne in mehanske lastnosti. Nekateri monomeri, kot je na primer formaldehid, lahko polimerizirajo že pri zelo nizkih temperaturah ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pri visokih stopnjah polimerizacije in makromolekulah z višjim številom strukturnih enot pa govorimo o polimerih. Za nastanek polimerov morajo biti monomeri dva ali večfunkcionalni, v primeru, ko je funkcionalnost monomerov enaka 2, so polimeri linearni, če je funkcionalnost višja od 2, pa so polimeri razvejane ali zamrežene strukture. Polimerizacije, pri katerih ne nastajajo stranski produkti, imenujemo poliadacije, polimerizacije, pri katerih nastaja stranski produkt, kot je na primer voda, pa imenujemo polikondenzacije. Glede na vrsto reakcije ločimo dve osnovni vrsti polimerizacije [3, 4]:

1. Verižna (adicijska) polimerizacija je pomembna industrijska metoda za pripravo polimerov in vključuje dodajanje nenasičenih molekul v hitro rastočo polimerno verigo. Monomeri običajno vsebujejo dvojne ali trojne vezi ogljik-ogljik, glavna veriga polimera pa je po navadi sestavljena samo iz ogljikovih atomov. Najpogostejše nenasičene spojine, ki sodelujejo pri verižni polimerizaciji, so poliolefini (PE, PP), polivinilklorid (PVC) in polistiren (PS). Ločimo radikalsko in ionsko verižno polimerizacijo, ki se nadalje deli še na anionsko in kationsko polimerizacijo. Zaradi reakcijskih pogojev, kot je odsotnost vode in kisika, se omenjeni ionski polimerizaciji v industriji ne uporabljata prav pogosto, sta pa primerna postopka za polimerizacijo monomerov, ki jih ni mogoče polimerizirati s prostimi radikali.

Pri radikalski verižni polimerizaciji z nenasičeno molekulo monomera reagira aktivno mesto na koncu verige, po koncu reakcije pa se aktivno mesto obnovi. Naraščajoči polimer pri radikalski verižni polimerizaciji je prosti radikal, polimerizacija pa poteka preko verižnega mehanizma. Verižno polimerizacijo povzroči dodajanje reagentov za tvorbo prostih radikalov ali ionskih iniciatorjev. Radikalska polimerizacija etena poteka pri visokih tlakih in temperaturah (do 300 °C), večina drugih radikalskih polimerizacij pa ne zahteva tako visokih tlakov in temperatur. Ker je v teh polimerizacijah težje nadzirati potek reakcije, so posledično bolj razvejane polimerne verige, prav tako pa je težje nadzirati tudi dolžino posamezne verige, saj se rast verige lahko naključno prekine, kadar trčita dve reaktivni verigi. Molska masa polimera je pri verižnih polimerizacijah enaka zmnožku stopnje polimerizacije in molske mase monomera. Za pridobivanje polimera z visoko in enakomerno molekulsko maso se uporabljajo različne metode za boljši nadzor polimerizacijskega procesa in odvajanja nastale reakcijske toplote, postopki pa vključujejo polimerizacijo v emulziji, suspenziji, v raztopini ali z obarjanjem. Z omenjenimi metodami se lahko izboljšata polidisperznost in molekulska masa polimera, hkrati pa lahko te metode povzročijo dodatne postopke, kot je na primer ločevanje produkta in topila. Pri verižni polimerizaciji poteka več reakcij, in sicer iniciacija, propagacija, terminacija in prenos verige [3, 4, 6].

Iniciacija (začetek): Pri iniciaciji se tvori aktivno mesto na molekuli monomera. To se lahko zgodi spontano z absorpcijo ultravijolične svetlobe, toplote ali z obsevanjem z visoko energijo. Najpogosteje sprožitev polimerizacije prostih radikalov povzroči dodajanje majhnih količin iniciatorjev, ki sprožijo rast polimerne verige in hkrati vplivajo na hitrost polimerizacije. Inicijator je običajno šibka organska spojina, ki se lahko razgradi s pomočjo toplote ali z obsevanjem, pri tem pa dobimo proste radikale oziroma molekule, ki vsebujejo atome z neparnimi elektroni. Tipične organske spojine, ki jih je mogoče razgraditi s pomočjo toplote so dialkil peroksidi, hidroperoksidi, diacilperoksidi in azo spojine. Primer fotokemično inducirane tvorbe prostih radikalov je razgradnja azo-bisizobutironitrila z vidno svetlobo s kratko valovno dolžino ali skoraj ultravijoličnim sevanjem pri temperaturah do 0 °C, kjer ne pride do termične iniciacije. Pri polimerizaciji prostih radikalov v vodnem mediju se razgradnja močno pospeši s prisotnostjo redukcijskega sistema, metoda iniciacije prostih radikalov pa se imenuje redoks iniciacija. Inicijacija, ki je posledica toplotne razgradnje organskih spojin, je primerna samo za polimerizacijo pri sobni ali višjih temperaturah, povečana hitrost tvorbe prostih radikalov v redoks reakcijah pa omogoča polimerizacijo tudi pri relativno nižjih temperaturah. Kot je že bilo omenjeno, lahko polimerizacijo prostih radikalov nekaterih monomerov sprožimo s segrevanjem ali izpostavljanjem monomerov svetlobi ali visoko energijskemu obsevanju, kot so rentgenski žarki, γ -žarki in α -žarki. Visoko energijsko obsevanje monomerov se lahko izvede bodisi v razsutem stanju ali tudi v raztopini. Pri izbiri iniciatorja za polimerizacijo prostih radikalov sta pomembna parametra, ki ju je potrebno upoštevati temperaturno območje, ki se uporablja za polimerizacijo in reaktivnost nastalih radikalov. Prisotnost nekaterih pospeševalnikov ter narava monomera namreč pogosto vpliva na samo hitrost razgradnje iniciatorjev.

Proces iniciacije prostih radikalov ne zahteva strogega izključevanja atmosferske vlage, lahko pa ga zavirajo nekatere snovi, kot je na primer kisik. Za monomere, kot sta stiren in metilmetakrilat, ki so bolj dovzetni za inhibicijo se iniciacijske reakcije izvajajo v kontrolirani atmosferi brez prisotnosti kisika, običajno z dušikom.

Propagacija (rast verige): Med propagacijo se iniciranemu monomeru v hitrem zaporedju dodaja druge monomere. Propagacija torej poteka z adicijo na tisoče monomernih enot na aktivno mesto rastoče verige polimera in vključuje dodajanje prostega radikala na dvojno vez monomera ter regeneracijo drugega radikala. Aktivno mesto se posledično neprestano seli na konec rastoče polimerne verige. Propagacija se nadaljuje, dokler se naraščajoči verižni radikal ne deaktivira z verižno terminacijo ali prenosom.

Terminacija (zaključek): Pri terminaciji se rast polimerne verige zaključi, rastna aktivnost polimernega verižnega radikala se prekine z reakcijo z drugim prostim radikalom v sistemu, aktivnega mesta ni več. Do terminacije lahko pride zaradi reakcije polimernega radikala z iniciacijskim radikalom, postopek pa je mogoče nadzorovati z ohranjanjem nizke stopnje iniciacije. Reakciji pri terminaciji, ki sta pomembni za proizvodnjo polimerov, sta kombinacija ali spajanje in disproporcionacija. Pri spajanju dve rastoči polimerni verigi reagirata in uničita medsebojno rastno aktivnost, medtem ko se pri disproporcionaciji labilen atom, običajno vodik prenese iz enega polimernega radikala na drugega. Reakcije spajanja tvorijo en sam polimer, pri disproporcionaciji pa dobimo dva polimera iz dveh reakcijskih polimernih verižnih radikalov. Prevladujoča terminacijska reakcija je odvisna od narave monomera in temperature polimerizacije. Ker disproporcionacija zahteva energijo za prekinitev kemičnih vezi, je bolj izrazita pri visokih temperaturah, medtem ko reakcija spajanja prevladuje pri nižjih temperaturah.

Verižni prenos: Polimerizacija, ki je sestavljena iz iniciacije, propagacije in terminacije po navadi vključuje še četrti korak, ki se imenuje verižni prenos. Pri verižnem prenosu se rastoča polimerna veriga prekine s prenosom aktivnega mesta z makromolekule na drugo predhodno neaktivno molekulo, ki je lahko monomer, polimer, iniciator, molekula topila ali druge molekule, ki so namerno ali nenamerno vnesene v reakcijsko zmes, rast verige pa se lahko tam ponovno začne. Reakcije verižnega prenosa ne povzročajo ustvarjanja ali uničevanja obstoječih radikalov, zato njihovo število ostaja ves čas nespremenjeno, se pa z verižnim prenosom znižuje molska masa polimera in povečuje polidisperznost, v primeru prenosa na polimer pa lahko povzroči razvejanje.

2. Stopenjska (kondenzacijska) polimerizacija poteka med molekulami z reaktivnimi funkcionalnimi skupinami. Po navadi se povezujeta dve vrsti molekul z dvema enakima funkcionalnima skupinama, redkeje pa ena vrsta molekul z dvema različnima funkcionalnima skupinama. Stopenjska polimerizacija poteka postopno ter vključuje vrsto reakcij, pri katerih lahko med sabo kadarkoli reagirata dve vrsti molekul (monomeri, dimeri, trimeri ali katerakoli druga molekularna vrsta v reakcijski zmesi), kar vodi do nastanka makromolekul.

V primeru, ko stopenjska polimerizacija vsebuje samo eno vrsto monomera, govorimo o tako imenovani A-B stopenjski polimerizaciji. Monomer v tem primeru vsebuje dve različni funkcionalni skupini (hidroksilno in karboksilno), možne pa so tudi intramolekularne reakcije. V primeru, ko imamo polimerizacijo z več vrst molekul in enakimi funkcionalnimi skupinami, pa govorimo o A-A/B-B stopenjski polimerizaciji. Molska masa polimera pri stopenjskih polimerizacijah je enaka zmnožku stopnje polimerizacije in polovici vsote molskih mas dveh monomerov z različnima funkcionalnima skupinama, ali pa molski masi monomera z obema funkcionalnima skupinama, pri čemer pa moramo odšteti molsko maso stranskega produkta, ki je v večini primerov voda (H_2O). Večina stopenjskih polimerizacij vključuje klasično kondenzacijsko reakcijo, kot je na primer esterifikacija, ki poteče med karboksilno kislino in alkoholom [3, 4].

Stopenjske polimerizacije lahko razdelimo v dve glavni kategoriji, in sicer imenujemo polikondenzacije vse tiste reakcije, pri katerih nastaja stranski produkt, reakcije, pri katerih stranski produkt ne nastaja, pa imenujemo poliadacije. V nasprotju z adicijskimi polimeri, ki nastajajo pri verižni polimerizaciji strukturna enota polimerov pri stopenjski polimerizaciji kemijsko ni enaka strukturi začetnih monomerov. Glavne razlike med verižno in stopenjsko polimerizacijo so prikazane v tabeli 1 [3].

Tabela 1: Glavne značilnosti verižne in stopenjske polimerizacije [3, 4]

Verižna polimerizacija	Stopenjska polimerizacija
Rast verige poteka s hitro adicijo monomera na enega izmed aktivnih centrov.	Rast verige poteka z reakcijo med dvema reaktivnima skupinama monomerov ali drugih molekulskih vrst.
Koncentracija monomera se med reakcijo zmanjšuje počasi in enakomerno.	Koncentracija monomerov hitro pade, pri stopnji polimerizacije 10 je prisotnost monomerov manjša od 1 %.
Molska masa se med polimerizacijo bistveno ne spreminja.	Molska masa med polimerizacijo postopoma narašča, hitro naraste šele pri visokih konverzijah.
Reakcijska mešanica vsebuje molekule monomera, polimer z visoko molsko maso in rastoče polimerne verige.	V reakcijski zmesi je veliko število različnih vrst molekul z različno molsko maso.
Čas polimerizacije ne vpliva na molsko maso polimera ampak samo na konverzijo.	Za visoko konverzijo in molsko maso je potreben dolg čas polimerizacije in visoke temperature (150 - 250 °C).
Aktivacijska energija iniciacije je lahko mnogo večja kot aktivacijska energija propagacije.	Aktivacijska energija je enaka pri vseh stopnjah polimerizacije.

2.3 Delitev polimerov

Polimere lahko razdelimo na več različnih načinov. Lahko jih delimo glede na njihov izvor, strukturo (obliko makromolekul, urejenost polimernih verig), vrsto polimerizacije, vrsto ponavljajočih se enot, področje uporabe, toplotne lastnosti in druge načine.

Glede na izvor ločimo polimere na organske ali anorganske, naravne in sintetične polimere. Naravni anorganski polimeri so na primer glina, azbest, silikati kalija, magnezija ali aluminija, med naravne organske polimere pa uvrščamo celulozo, lignin, škrob, beljakovine, encime, naravni kavčuk in smole, proteine (volno, svilo, usnje), keratin in mnoge druge. Glede na obliko makromolekul so lahko polimeri linearni, razvejani, lestvasti ali zamreženi. Oblika je odvisna predvsem od funkcionalnosti monomerov in njihove reakcije pri polimerizaciji. Dvofunkcionalni monomeri lahko z drugimi strukturnimi enotami vzpostavijo samo dve povezavi, posledično pa tako dobimo linearno zaporedje povezav, pri čemer nastane linearni polimer. Reakcije med več funkcionalnimi molekulami lahko povzročijo nelinearne povezave, v nekaterih primerih se tako rast polimerne verige konča, še preden se ta poveže z drugo verigo, posledično pa nastanejo razvejane polimerne molekule. V drugih primerih se lahko med seboj kemično povezujejo rastoče polimerne verige, pri čemer dobimo zamrežen polimer. Linearni in razvejani polimeri so običajno pri normalnih temperaturah topni v topilu, medtem ko zamreženi polimeri niso topni. Zamreženi polimeri imajo na splošno večjo stabilnost in so bolj togi [3, 4].

Glede na urejenost polimernih verig v trdnem stanju ločimo polimere na amorfne in kristalinične polimere. Pri ohlajanju iz taline v trdno obliko se molekule med seboj privlačijo in se nagibajo k čim večjemu združevanju z najmanjšo možno potencialno energijo. Pri amorfni polimerih so verige neurejene in prepletene med seboj, medtem ko se pri kristaliničnih polimerih verige zlagajo v lamele in so urejene. Urejenost polimernih verig lahko opišemo s stopnjo kristaliničnosti, ki predstavlja delež kristaliničnosti celotnega polimera in se lahko giblje od nekaj odstotkov do približno 90 %, odvisno predvsem od pogojev kristalizacije. Kristalinični polimeri so na primer PE, polietilen tereftalat (PET), politetrafluoroetilen (PTFE), PP, poliamid (PA), polioksimetilen (POM), polikarbonat (PC), med amorfne polimere pa uvrščamo PS, PVC, polimetilmetakrilat (PMMA), akrilonitril butadien stiren (ABS). Kot je opisano že v podpoglavju o polimerizaciji, polimere glede na vrsto polimerizacije delimo na verižne polimere, ki se sintetizirajo s pomočjo verižne polimerizacije in stopenjske polimere, ki nastanejo pri stopenjski polimerizaciji [3, 4].

Polimere lahko razvrstimo tudi glede na vrsto ponavljajočih se enot, in sicer govorimo o homopolimerih takrat, ko so sestavljeni iz ene vrste monomera in kopolimerih, ko so polimeri sestavljeni iz več vrst monomerov. Glede na področja uporabe lahko polimere razdelimo na polimerne materiale (plastika), lepila, vlakna, premaze, pene in druge oblike. Polimere lahko razdelimo tudi glede na njihove toplotne lastnosti, in sicer jih delimo na termoplaste, duromere in elastomere [3, 4].

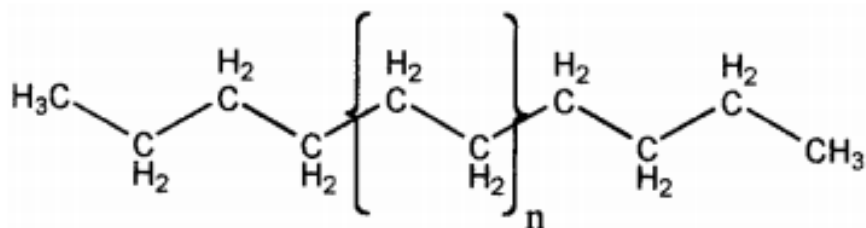
2.3.1 Termoplasti (plastomeri)

So linearni ali razvejani, taljivi polimeri, ki se zlahka preoblikujejo pri višjih temperaturah. Po ohlajanju se strdijo in zadržijo obliko, zato jih lahko enostavno in večkratno preoblikujemo.

Termoplaste prav tako lahko mehansko recikliramo, recikat pa se lahko ponovno vrača v proces in znova uporabi pri procesu predelave. Običajno lahko termoplasti prenesejo več zaporednih ciklov gretja in ohlajanja, ne da bi se pri tem spremenila njihova struktura in mehanske lastnosti. Glede na urejenost polimernih verig jih delimo na kristalinične termoplaste z večjo ali manjšo stopnjo kristaliničnosti oziroma pravimo, da so lahko kristalinični ali delno kristalinični ter amorfne termoplaste z neurejenimi polimernimi verigami. Med termoplaste uvrščamo večino polimernih materialov, najbolj zastopani pa so predstavljeni v nadaljevanju [3, 4].

Polietilen (PE)

Polietilen je po obsegu proizvodnje in uporabe najbolj razširjen sintetični polimer. Sintetiziramo ga iz etena, ki se s pomočjo krekiranja pridobiva iz nafte ali zemeljskega plina. Glede na kemijsko sestavo je polietilen najenostavnejši polimer, molekula je sestavljena iz dolgih verig kovalentno povezanih atomov ogljika, na vsak atom ogljika je vezan par vodikovih atomov, na koncih verige pa je metilna skupina. Molekulska struktura polietilena je prikazana na sliki 1 [4, 7].



Slika 1: Molekulska struktura polietilena [7]

Polietilen lahko sintetiziramo z različnimi postopki. Visokotlačni postopek je namenjen za proizvodnjo polietilena nizke gostote (LDPE) in različnih kopolimerov. Sinteza poteka s pomočjo radikalske oziroma verižne polimerizacije pri visokih tlakih (100-300 MPa) in visokih temperaturah (150-300 °C). Inicijatorji pri visokotlačnih postopkih so lahko organski peroksidi ali kisik. Nizkotlačni postopki so primerni za proizvodnjo polietilena visoke gostote (HDPE), linearnega polietilena nizke gostote (LLDPE) in polietilena z zelo visoko molsko maso (UHMW PE). Sinteza pri nizkotlačnih postopkih poteka po mehanizmu koordinativne polimerizacije, pri kateri sodelujejo Ziegler-Natta katalizatorji, metalloceni ali kromovi oksidi. Nizkotlačni postopki potekajo pri nizkih tlakih (do 20 MPa) in nižjih temperaturah (do 180 °C), sinteza pa običajno poteka v raztopini, suspenziji ali v plinski fazi [4, 7].

Zaradi enostavne strukture lahko polietilen kristalizira, stopnja kristaliničnosti pa je odvisna predvsem od razvejanosti polimernih verig in se giblje med 40 in 90 %. Komercialni polietilen ima gostoto med 910 in 980 kg/m³, popolnoma kristalinični pa nad 1000 kg/m³. Mehanske lastnosti so odvisne predvsem od stopnje kristaliničnosti, boljše mehanske lastnosti pa dosega polietilen z višjo stopnjo kristaliničnosti (HDPE).

Z gostoto polietilena linearno narašča tudi modul elastičnosti, povečuje se trdota, slabša pa je udarna žilavost. Na mehanske lastnosti vpliva tudi molska masa. Polietilen je odporen na večino kemikalij, izjema so le oksidativne kisline in halogeni. Obstojen je v vodi, pri sobni temperaturi pa je obstojen tudi proti vsem topilom, pri temperaturah nad 100 °C se topi le v nekaterih ogljikovodikih in kloriranih topilih [4, 7].

Polietilen je uporaben pri temperaturah nad steklastim prehodom (nad -40 °C) in pod temperaturo tališča, ki je odvisna predvsem od vrste polietilena in se giblje med 110 in 140 °C. Najpogostejša postopka za predelavo polietilena sta ekstrudiranje in injekcijsko stiskanje oziroma brizganje, uporabljajo pa se še tudi druge tehnologije, kot so na primer stiskanje, pihanje in termoformiranje. Polietilen se uporablja za najrazličnejše proizvode in aplikacije, njegova prednost pa je predvsem v delnokristalinični morfologiji, ki jo lahko nadzorujemo s spreminjanjem molekulske zgradbe in procesnih spremenljivk. Prav tako lahko s spreminjanjem molekulske mase, vrste in pa vsebnosti komonomera uravnavamo trdnost in druge fizikalne lastnosti polietilena. PE material, ki je primeren za večino industrijskih procesov, je tako mogoče ustvariti z nadzorom povprečne molekulske mase, razvejanosti polimernih verig ter nadzorom procesa pred in med samo kristalizacijo. S tem dobimo material, ki je prilagojen za določeno aplikacijo z želenimi mehanskimi in drugimi lastnostmi. Polietilenu lahko pred in med samo predelavo dodamo razne dodatke in barvila, ki se zaradi nepolarnosti in posledično slabše mešljivosti polietilena dodajajo v obliki koncentrata («master-batch»). Z ekonomskega vidika daje nizka cena polietilenu konkurenčno prednost pred ostalimi polimernimi in drugimi materiali, zato je polietilen eden izmed najbolj razširjenih in uporabljenih polimernih materialov. Uporablja se za proizvodnjo raznih folij, vlaken, cevi, embalaže, prevlek za žice in kable, pene, plošč, v prehranski in papirni industriji, medicini in drugih industrijskih panogah [4, 7].

Ločimo več različnih tipov polietilena [4, 7]:

Polietilen nizke gostote (LDPE): Zaradi radikalske narave visokotlačnega procesa vsebuje veliko število dolgih in kratkih polimernih verig, je razvejen in žilav material z gostoto med 910 in 930 kg/m³. Številne kratke polimerne verige pripomorejo k manjši stopnji kristaliničnosti, ki je nižja kot pri drugih PE in znaša 45-55 %. To ima za posledico bolj prožen material z nižjo temperaturo tališča, ki je običajno med 105 in 115 °C. LDPE je uporaben v temperaturnem območju med -50 in 80 °C, uporablja pa se predvsem za proizvodnjo različne embalaže, folij, vrečk, talnih oblog ter drugih proizvodov. Zaradi odličnih reoloških lastnosti se lahko kot dodatek za izboljšanje procesnih lastnosti dodaja k drugim manj prožnim polietilenskim materialom, kot sta na primer LLDPE in HDPE.

Polietilen visoke gostote (HDPE): Ima gostoto med 940 in 970 kg/m³. Sestavljen je iz linearnih polimernih verig, ki omogočajo visoko stopnjo kristaliničnosti, ki je po navadi med 70 in 90 %. HDPE ima visok modul elastičnosti in nizko prepustnost, je bolj trd in kemično obstojen, temperatura tališča pa je okoli 135 °C.

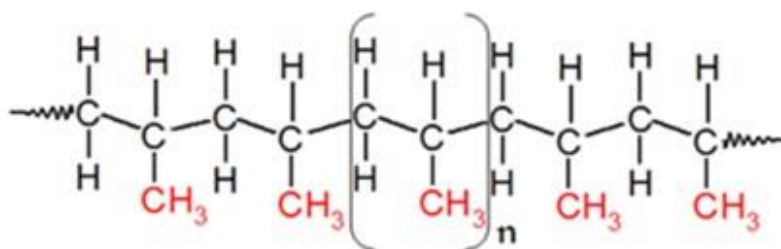
HDPE se uporablja v temperaturnem območju od -50 do 80 °C in je primeren predvsem za aplikacije, kot so različni rezervoarji za kemikalije, zaradi prepustnosti, odpornosti proti koroziji in dobre togosti pa se uporablja tudi za proizvodnjo različnih cevi in rezervoarjev za vodo, plin in kanalizacijo. Zaradi dobre natezne trdnosti se uporablja za različne nosilne vrečke, uporaben pa je tudi za proizvodnjo zabojev, palet, veder, plastenk, igrač, pohištva, zabojnikov za smeti in drugih proizvodov. Nizka temperatura steklastega prehoda omogoča njegovo uporabo pri nižjih temperaturah v hladilnikih in zmrzovalnikih, kot je na primer različna embalaža za živila in posode za sladoled.

Linearni polietilen nizke gostote (LLDPE): Je razvejen PE s kratkimi stranskimi verigami, ki je izjemno žilav ter hkrati trden in odporen na udarce. Je kopolimer etilena ter med 5 in 10 % višjega olefina, kot sta na primer 1-buten in 1-heksen z visoko stopnjo kristaliničnosti (do 70 %). Gostota LLDPE je od 915 do 940 kg/m³, temperatura tališča pa približno 115 °C. LLDPE se uporablja v številnih aplikacijah v živilski industriji, za izolacijo različnih žic in kablov, cevi in plošč, kjer ni zahtevana togost polietilena visoke gostote. Uporablja se tudi pri proizvodnji različnih igrač, zabojnikov, pregrad in ostalih proizvodov, kjer je potrebna prožnost materiala v kombinaciji z žilavostjo. Polietileni z zelo nizko gostoto so podskupina LLDPE, pri katerih je vsebnost komonomera tako velika, da je kristalizacija v veliki meri zatrta. Omenjeni materiali imajo za posledico nizko stopnjo togosti in visoko prosojnost, uporabljajo pa se predvsem za medicinske namene in v plenica za dojenčke.

Polietilen z zelo visoko molsko maso (UHMW PE): Vsebuje zelo dolge polimerne verige in ima visoko molsko maso, ki je običajno med $3\text{-}9 \cdot 10^6$ g/mol. Je delnokristalinični polimerni material s stopnjo kristaliničnosti okoli 45 %, gostoto približno 940 kg/m³ in temperaturo tališča nad 135 °C. Zaradi daljših polimernih verig ima med vsemi termoplasti največjo udarno trdnost. Uvrščamo ga med inženirske polimere, odporen je proti obrabi in degradaciji, številnim kemikalijam in organskim topilom, ima nizko absorpcijo vlage ter nizek koeficient trenja. Uporablja se za številne aplikacije, kjer je zahtevana odpornost proti obrabi, kemična odpornost, drsnost ali majhno trenje, kot so različni obrabni deli, tesnila, ležaji. Veliko se uporablja tudi v avtomobilski industriji, industriji pohištva, športu, vojaški industriji in drugih panogah.

Polipropilen (PP)

Polipropilen je takoj za polietilenom drugi najbolj uporabljen polimerni material, njegova komercialna uporaba pa se je začela leta 1957. Je termoplast z linearnimi molekulami, ki nastane s polimerizacijo propena, ki ga dobimo s krekiranjem zemeljskega plina ali nafte. Od polietilena se razlikuje predvsem po stranskih metilnih skupinah (-CH₃). Molekulska struktura polipropilena je prikazana na sliki 2 [3, 4, 8].



Slika 2: Molekulska struktura polipropilena [9]

Polimerizacija polipropilena je nizkotlačni postopek, ki poteka v šaržnih ali kontinuiranih reaktorjih in deluje pri temperaturah med 45 in 85 °C ter tlaku do 20 bar. Polimerizacija PP ne poteka po mehanizmu verižne polimerizacije s prostimi radikali, ampak z uporabo koordinativnih katalizatorjev (Ziegler-Natta katalizatorji, metaloceni). Polipropilen lahko tvori tri osnovne verižne strukture oziroma lahko glede na razporeditev stranskih metilnih skupin vzdolž polimerne verige ločimo tri vrste taktičnosti, in sicer izotaktično, sindiotaktično in ataktično obliko. Pri izotaktični obliki so vse metilne skupine na eni strani ogljikove verige, pri sindiotaktični obliki so metilne skupine razporejene v izmeničnem vzorcu, pri ataktični obliki pa so metilne skupine razporejene naključno [4, 8].

Običajno komercialni polipropilen vsebuje do 90 % izotaktičnega PP, molekule izotaktičnega polipropilena pa zavzemajo konformacijo vijačnice, kar omogoča visoko kristaliničnost in dobre mehanske lastnosti. Stopnja kristaliničnosti je ponavadi med 50 in 70 %, z gostoto od 900 do 910 kg/m³ pa je PP eden izmed široko uporabljenih termoplastičnih materialov z najmanjšo gostoto. Polipropilen ima visoko temperaturo tališča, ki je okrog 170 °C, temperatura steklastega prehoda amorfne faze pa je pri -20 °C. Z višjim deležem amorfne faze se slabšajo mehanske lastnosti polipropilena, viskoznost taline in dimenzijska stabilnost, prav tako pa na mehanske lastnosti pomembno vpliva tudi molska masa in njena porazdelitev. Po lastnostih je PP podoben HDPE, le da ima višjo natezno trdnost in je manj elastičen. Slaba lastnost PP je nižja udarna žilavost, ki pride do izraza predvsem pri nižjih temperaturah in jo lahko izboljšamo s kopolimerizacijo z etilenom (5-20 %) ali z elastomernimi dodatki, kot je na primer etilen-propilen-dien termer (EPDM) [4, 8].

Območje uporabe PP je med 0 in 110 °C, zaradi reaktivnega vodika na terciarnem C atomu pa je občutljiv na oksidacijo, zato ni obstojen proti UV svetlobi in močnim oksidantom. PP je odporen proti vodi, mazivom, anorganskim kemikalijam in večini organskih topil, ataktični PP pa se uporablja tudi kot dodatek asfaltu, bitumnu in raznim lepilom. V veliki meri se predeluje z brizganjem, ekstrudiranjem, stiskanjem, uporablja pa se predvsem za proizvodnjo razne embalaže, folij, zabojev, igrač, električnih in drugih proizvodov za vsakodnevno uporabo. Zaradi nizke cene in izjemnih mehanskih ter oblikovnih lastnosti se uporablja za proizvodnjo različnih delov v avtomobilski industriji, zaradi visoke kemijske in bakterijske odpornosti je prisoten v medicini, uporablja pa se tudi za proizvodnjo raznih rezervoarjev za kemikalije, cevi, plošč ter drugih proizvodov [4, 9].

Med termoplaste uvrščamo še nekatere druge polimerne materiale, kot so: polivinilklorid (PVC), politetrafluoroetilen (PTFE), polistiren (PS), polimetilmetakrilat (PMMA), polioksimetilen (POM), polietilentereftalat (PET), polikarbonat (PC), poliamid (PA), poliuretan (PU) in druge [4].

2.3.2 Duromeri

Imajo visoko stopnjo zamreženosti in se pri povišanih temperaturah zamrežijo z uporabo dodatkov ali brez. So amorfni polimeri, ki so netopni, netaljivi, trdi in togi. Ker se pri povišanih temperaturah in uporabi termoreaktivnih snovi mrežasto prepletene molekule ob polimerizaciji združijo v trdno makromolekulo z amorfno strukturo, jih je praktično nemogoče ponovno oblikovati kot termoplaste. Po mehanski reciklaži jih lahko uporabimo kot polnila, kemijska reciklaža pa poteka z razgradnjo do monomerov. Značilni predstavniki duromerov so epoksidni, sečninski ali fenolni polimeri in poliuretanske pene. Med duromere uvrščamo polimerne materiale, kot so: fenol-formaldehidne smole (PF), sečninske smole, melaminske smole, epoksidne smole [4, 10].

2.3.3 Elastomeri

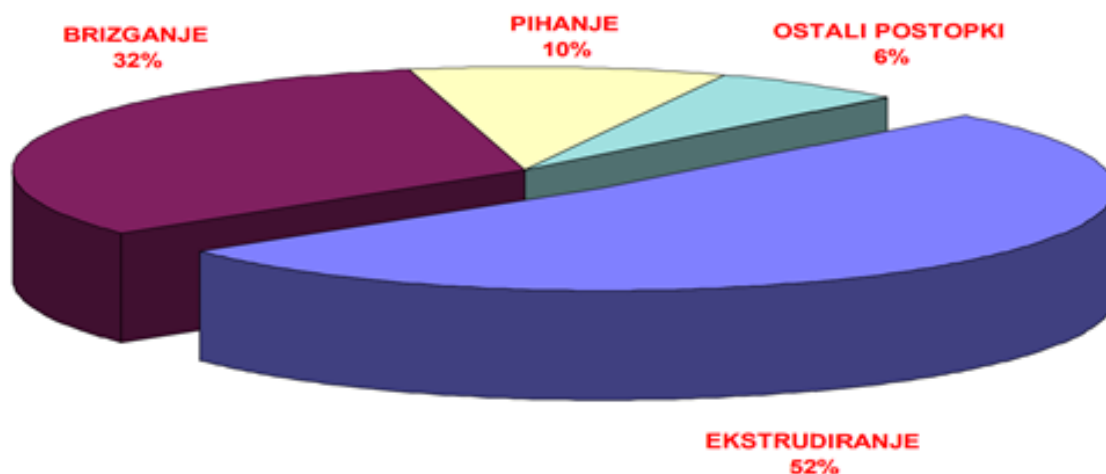
Polimere, ki imajo podobne lastnosti kot naravni kavčuk, imenujemo elastomeri. Pri elastomerih se nitaste makromolekule kavčuka med vulkanizacijo na redkih delih elastično povezujejo, kar jim omogoča visoko elastičnost. Kljub visoki elastičnosti pa molekule niso razdružljive in je nemogoče ponovno oblikovanje, podobno kot pri duromerih. Kemijska reakcija, s pomočjo katere zamrežimo linearne polimerne molekule, se imenuje vulkanizacija. Kot sredstvo za vulkanizacijo se največ uporablja žveplo in njegove spojine, reakcijo pa lahko pospešimo z dodajanjem različnih pospeševalcev, ki znižajo temperaturo vulkanizacije, povečajo hitrost reakcije in zmanjšajo potrebno količino žvepla. V odvisnosti od vrste kavčuka in vulkanizacijskega sredstva se temperatura vulkanizacije giblje med 130 in 180 °C. Z vulkanizacijo kavčuka nastane guma, ki je zelo čvrst material z visoko elastičnostjo v širokem temperaturnem območju [4, 5].

Poznamo naravni in sintetični kavčuk. Naravni kavčuk se pridobiva iz tako imenovanih dreves kavčukovcev, ki izločajo koloidno raztopino naravnega kavčuka v vodi (lateks), ki vsebuje približno 30 do 40 % suhe snovi. Naravni kavčuk ima boljšo natezno trdnost kot sintetični kavčuk in kristalizira pri temperaturi pod 10 °C. Gostota se spreminja glede na temperaturo in pri 20 °C znaša približno 934 kg/m³. Naravni kavčuk na zraku počasi oksidira zaradi prisotnosti dvojnih vezi, zato ga je potrebno stabilizirati z dodajanjem antioksidantov. Topnost kavčuka v topilih je slaba, izboljšamo pa jo lahko z znižanjem molske mase. Polimere, ki imajo podobne lastnosti kot naravni kavčuk in so pridobljeni s pomočjo sinteze imenujemo sintetični kavčuki, najbolj zastopani pa so naslednji: stiren-butadienski kavčuk (SBR), butadienski kavčuk (BR), kloroprenski kavčuk (CR) in etilen-propilenski kavčuk (EPDM) [4, 10].

2.4 Tehnologije predelave polimernih materialov

Polimerne materiale lahko v željeno končno obliko oziroma uporabne končne proizvode predelujemo z različnimi tehnologijami predelave. Za izbiro najbolj optimalnega polimernega materiala za določeno aplikacijo moramo najprej vedeti, kakšnim zahtevam glede na uporabo mora zadostiti material, kakšnim pogojem bo izpostavljen ter kakšne lastnosti mora imeti. Ko imamo izbran material se je treba odločiti, s kakšno tehnologijo predelave ga bomo predelali v želene končne proizvode ali polproizvode. Običajno obstaja za predelavo izbranega polimernega materiala v željen končni izdelek ali polizdelek več tehnik, glede na končno obliko proizvoda, izbiro materiala, proizvodnih zahtev, zmogljivosti in stroškov pa se moramo odločiti za najbolj optimalno tehnologijo predelave [3].

Na splošno ločimo visokotlačne postopke predelave polimernih materialov (brizganje, ekstrudiranje, stiskanje, pihanje) ter nizkotlačne postopke predelave (omakanje in napraševanje, vlivanje in nabrizgavanje, rotacijski in centrifugalni liv, nizkotlačni postopki za ojačane materiale). Poleg zgoraj naštetih tehnologij predelave polimernih materialov poznamo še nekatere druge tehnike, kot so kalandiranje, kaširanje, hladno preoblikovanje in toplo preoblikovanje oziroma termoformiranje, varjenje, lepljenje ter različne tehnike odvzemanja materiala. Najbolj razširjene tehnologije za predelavo polimernih materialov so predvsem ekstrudiranje, brizganje in pihanje. Na sliki 3 je prikazano kolikšen del proizvodnje glede na skupno maso proizvedenih proizvodov zavzema posamezna tehnologija predelave polimernih materialov [11, 12].



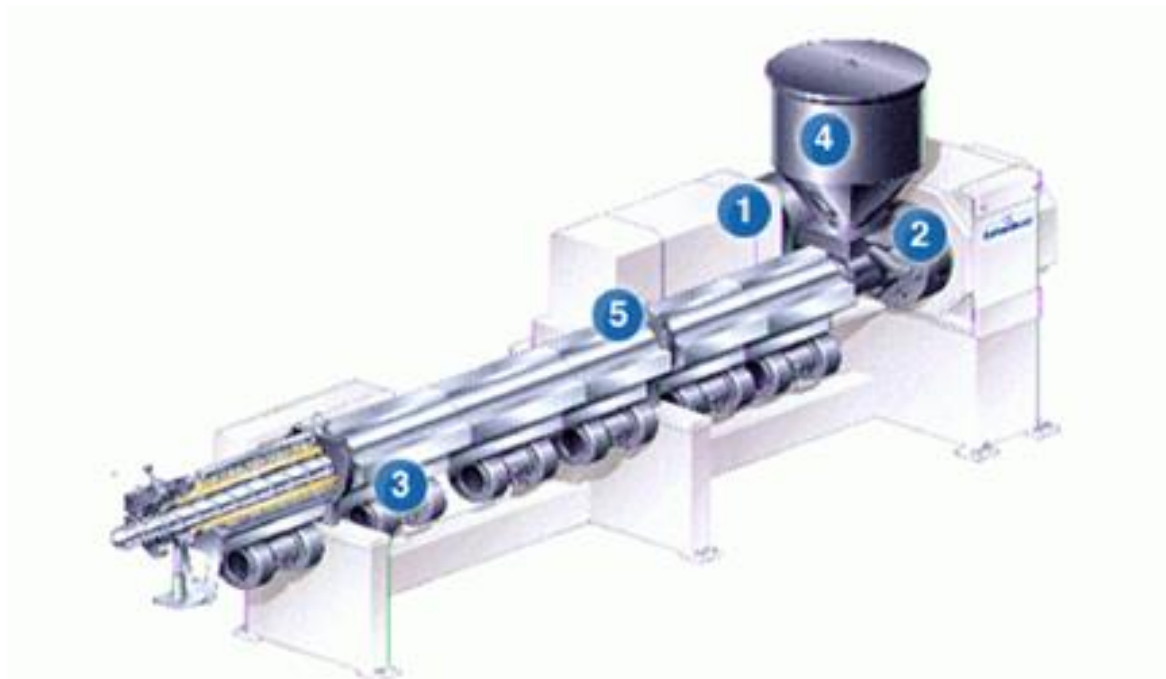
Slika 3: Masni delež posamezne tehnologije predelave polimernih materialov [12]

2.4.1 Ekstrudiranje

Ekstrudiranje je najbolj razširjena tehnologija predelave polimernih materialov in spada med visokotlačne postopke predelave. Je kontinuirani postopek, pri katerem se materiali v obliki prahu ali granul iz zalogovnikov dozirajo v ekstruder, kjer se zgostijo, premešajo, stalijo, homogenizirajo in kemijsko spremenijo.

Nato se s pomočjo polžnega transporterja ali bata iztiskajo skozi matrico oziroma orodje ekstruderja, ki ima obliko končnega proizvoda. Po ekstrudiranju skozi matrico se polimerni material ohladi s pomočjo vode ali olja, običajno pa so na ekstruder priključene še odrezovalne ali navijalne naprave. S pomočjo ekstrudiranja se lahko predelujejo vsi polimerni materiali, torej termoplasti, duroplasti in elastomeri [11, 13].

Na sliki 4 je predstavljena shema ekstruderja, ki je običajno sestavljen iz pogonske enote (označena s številko 1), transportnega dela s polžem (2), ki je hkrati tudi najpomembnejši del ekstruderja, s pomočjo katerega se polimerni material najprej dozira, nato se potiska naprej skozi cilinder, kjer se plastificira, na koncu pa se že staljeni polimerni material homogenizira in potiska skozi matrico. Pomembna sta predvsem dolžina in premer polža, saj njuno razmerje določa učinkovitost ekstruderja. S številko (3) je označen cilinder ekstruderja z grelnimi in hladilnimi conami, s pomočjo polža pa lahko v njem običajno dosežemo tlake med 70 in 350 barov. Ekstruder sestavlja še dozirni lijak (4), iz katerega se dozira material, odprtine za odvajanje plinov in neželenih snovi, ki nastajajo pri taljenju polimernih materialov (5), na koncu ekstruderja pa je nameščena še matrica oziroma šoba, ki daje končno obliko ekstrudiranega izdelka [3, 13].



Slika 4: Shema ekstruderja [13]

Poznamo več vrst ekstruderjev, in sicer batne ekstruderje, ki se običajno uporabljajo za ekstrudiranje termoplastov z zelo visoko viskoznostjo taline, polžne ekstruderje, ki so hkrati tudi najbolj razširjeni in so lahko sestavljeni iz enega ali več polžev in pa maxwell ekstruderje, pri katerih se polimerni materiali plastificirajo s pomočjo strižnega efekta. Ekstrudiranje se uporablja predvsem za proizvodnjo proizvodov s konstantnim prerezom, kot so razne žice in kabli, cevi, profilov za gradbeništvo in stavbno pohištvo, folij, raznih delov za avtomobilsko industrijo, plošč, vrvi in filamentov.

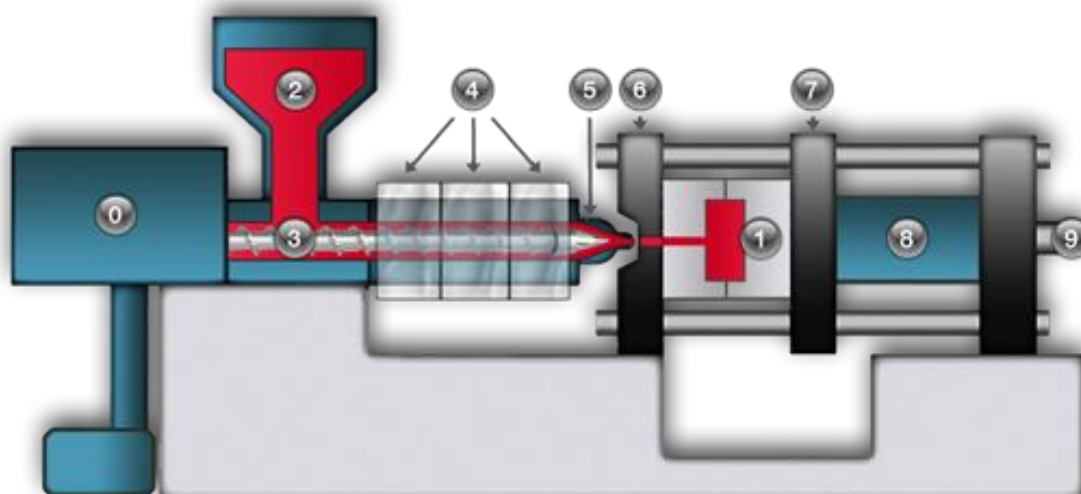
S pomočjo ekstrudiranja lahko osnovne polimerne materiale tudi kompavndiramo, kar pomeni, da jim med postopkom ekstrudiranja dodajamo razne aditive, stabilizatorje, barvila, polnila, maziva in druge dodatke. Možno je tudi koekstrudiranje, pri katerem je v proces vključenih več ekstruderjev in omogoča hkratno večslojno ekstrudiranje dveh ali več različnih materialov oziroma barv [3, 11, 13].

2.4.2 Brizganje

Brizganje je visokotlačni postopek za predelavo, s katerim se glede na število proizvodov proizvede največ proizvodov iz polimernih materialov. Brizgalni stroji omogočajo izdelavo različnih proizvodov, ki lahko tehtajo od nekaj miligramov do skoraj 100 kilogramov in so lahko raznovrstnih oblik. Brizganje se glede na uporabljen material običajno izvaja pri temperaturah med 200 in 400 °C in visokih tlakih, ki lahko dosežejo 1000 barov. S tehnologijo brizganja se lahko predelujejo termoplasti, duroplasti in elastomeri, postopek je običajno visoko avtomatiziran, naknadna obdelava izdelka pa v večini primerov ni potrebna [12, 13].

Brizgalni stroji so sestavljeni iz zapiralnega dela, na katerega je nameščeno orodje ter brizgalnega dela s pripadajočim cilindrom in polžem. Na sliki 5 lahko vidimo shemo brizgalnega stroja. Pogonski motor, ki poganja polža za transport materiala skozi cilindri do brizgalne šobe, je označen s številko (0).

Pri brizganju se polimerni material najprej skozi dozirni lijak (2) dozira v cilindri (3), kjer se s pomočjo cilindra, ki ima nameščene grelce (4) stali in plastificira. Staljeni polimerni material se nato s pomočjo polža skozi šobo (5) in dolivne kanale potiska v brizgalno orodje (1), ki je nameščeno na fiksno (6) in premikajočo (7) ploščo brizgalnega stroja. Brizgalni stroj je sestavljen še iz zapiralne enote (8), s pomočjo katere se orodje odpira in zapira, izmetalne enote (9), ki služi za izmetavanje končnega izdelka iz orodja ter ločene temperirne naprave za uravnavanje temperature [11-14].



Slika 5: Shema brizgalnega stroja [14]

Postopek brizganja je razdeljen na več različnih faz, in sicer se najprej orodje s pomočjo zapiralne enote zapre, nato poteka zapolnjevanje, pri katerem se staljeni polimerni material s pomočjo polža skozi šobo vbrizga v orodje, dokler se orodna votlina ne zapolni. Sledi naknadni tlak, pri katerem se v orodje doda primanjkljaj mase, ki nastane zaradi skrčkov pri ohlajanju in traja, dokler se ne strdi ustje dolivnega sistema. Ko je proces naknadnega tlaka zaključen, sledi ohlajanje izdelka, na koncu pa se orodje odpre in se izdelek s pomočjo izmetalne enote izmeče iz orodja [13, 15].

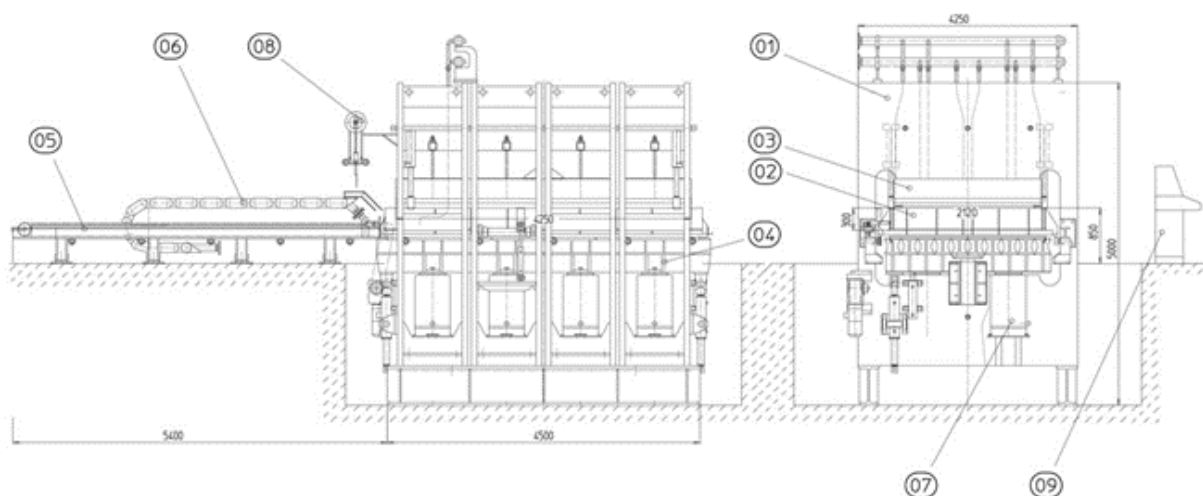
Tehnologija brizganja je primerna za masovno proizvodnjo kot tudi za izdelavo prototipnih primerkov, z njo pa lahko izdelujemo zelo zapletene oblike končnih proizvodov. Postopek se v večini primerov uporablja za predelavo termoplastov, ekonomičnost pa je odvisna predvsem od števila ciklov v določenem času, na kar najbolj vpliva čas hlajenja izdelka v orodju, ki je odvisen od debeline stene izdelka. Brizgalni stroji se med seboj ločijo predvsem po zapiralni sili, ki je lahko od 200 kN pri manjših laboratorijskih napravah, pa vse do 100.000 kN pri velikih industrijskih strojih. Prednosti tehnologije brizganja so velike proizvodne zmogljivosti, visoka stopnja avtomatizacije, manj naknadne obdelave in dimenzijska stabilnost izdelkov ter majhna količina odpadkov, slabost pa so predvsem visoki stroški orodja. S postopkom brizganja se proizvajajo različni deli za avtomobilsko in elektro industrijo, embalaža, razna ohišja strojev in naprav, zamaški, posode, etuiji ter različni proizvodi za vsakdanjo uporabo [11, 13, 15].

2.4.3 Stiskanje

Stiskanje spada med visokotlačne postopke za predelavo polimernih materialov in velja za enega izmed najstarejših postopkov za masovno proizvodnjo polimernih proizvodov in polproizvodov. Tehnologija je primerna predvsem za proizvodnjo plošč in drugih proizvodov iz materialov, ki imajo visoko stopnjo kristaliničnosti, veliko molekulsko maso in visoko viskoznost. Hidravlične stiskalnice za stiskanje so relativno preprosti stroji, orodje pa je v grobem sestavljeno iz dveh glavnih delov, in sicer bata orodja, ki ima enostavno cilindrično obliko ter modela orodja, ki ima končno obliko izdelka. Stiskalnice lahko dosegajo različne zapiralne sile, ki so lahko pri manjših testnih stiskalnicah s prosto postavljenimi orodji med 50 in 80 kN, pri večjih industrijskih stiskalnicah z ogrođjem in vodili pa med 150 kN in 100 MN [3, 11, 16].

Na sliki 6 lahko vidimo preprosto shemo hidravlične stiskalnice za stiskanje termoplastov, ki je sestavljena iz kovinskega ogrođja (1), na katerega je pritrjen bat orodja (3), pripadajoči odpiralni cilindri (8) ter grelni in hladilni kanali. V jami pod površino tal so nameščeni hidravlični cilindri (7), ki služijo za zapiranje stiskalnice in delujejo s pritiskom vertikalno navzgor. Nad hidravličnimi cilindri je nameščena dvizna miza (4), nad mizo pa je inštaliran model orodja (2), ki je lahko ogrevan direktno ali indirektno in ga lahko s pomočjo transportne naprave (5) ter vozička za poravnavo (6) zapeljemo iz stiskalnice ali pa nazaj v njo.

Stranice oziroma okvirji modela orodja so lahko ogrevani in hlajeni, kar omogoča izdelavo debelejših plošč do debeline približno 150 mm. Zraven je še komandni pult (9) za upravljanje stiskalnice [11, 17].



Slika 6: Shema hidravlične stiskalnice [17]

Hidravlična stiskalnica ima poleg zgoraj naštetega še hidravlični agregat, ki ga lahko vidimo na sliki 7 ter pripadajoče črpalke za nemoteno delovanje hidravličnih cilindrov, potrebna pa sta še ločena sistema za ogrevanje in ohlajanje medija, ki potuje po grelnih in hladilnih kanalih stiskalnice (termo olje, voda).



Slika 7: Hidravlična stiskalnica s transportno progo in hidravličnim agregatom [17]

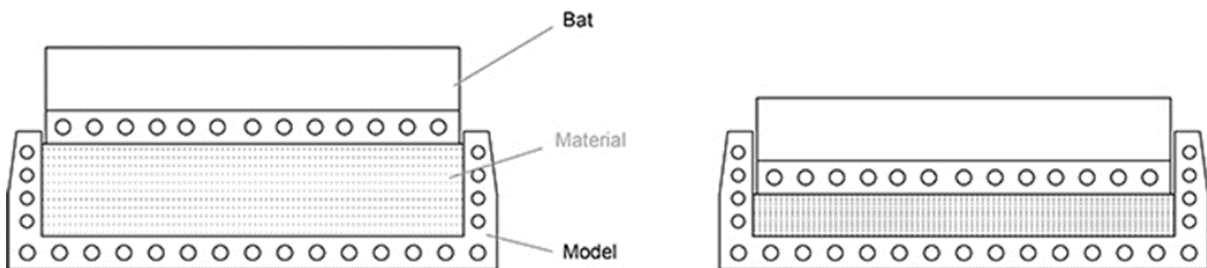
Proces stiskanja običajno poteka tako, da se predhodno odtehtana količina materiala, ki je v obliki prahu, granul ali kosmičev nasuje v odprti model orodja, ki se predhodno zapelje iz stiskalnice na transportno progo, ki je prikazana na sliki 7. Material se po nasutju v orodje poravna s pomočjo ročnih ali avtomatskih poravnalok, kot je prikazano na sliki 8, orodje pa se nato zapelje nazaj v hidravlično stiskalnico.

Nato se začne cikel stiskanja pod določenimi parametri (hitrost zapiranja stiskalnice, čas, tlak, temperatura), ki se razlikujejo glede na posamezen tip materiala in debelino proizvoda oziroma polproizvoda.



Slika 8: Polnjenje orodja z materialom [17]

Cikel stiskanja lahko traja približno eno uro za tanjše izdelke, lahko pa tudi dan ali dva (48 ur) za na primer PP plošče debeline okoli 150 mm. Cikel stiskanja je običajno razdeljen na 3 faze, in sicer je najprej na vrsti predstiskanje, pri katerem material v orodju predstisnemo z določenim tlakom in s tem dosežemo bolj kompaktno maso materiala v orodju oziroma povečamo gostoto nasutega materiala. Na sliki 9 lahko vidimo postopek predstiskanja, pri katerem se material v modelu orodja s pomočjo bata stisne do določenega tlaka.



Slika 9: Predstiskanje materiala v orodju [17]

Po fazi predstiskanja sledi faza gretja, ki je odvisna predvsem od debeline proizvoda oziroma polproizvoda in traja, vse dokler material ne doseže temperature tališča oziroma da dobimo talino po celotnem prerezu orodja.

Po fazi gretja sledi še faza ohlajanja, ki traja, dokler se stiskan proizvod ne ohladi na zahtevano temperaturo. Stiskanje pod določenimi tlaki se izvaja celoten cikel, tako v fazi gretja kot v fazi hlajenja, tlaki pa so odvisni predvsem od tipa materiala in časa trajanja posamezne faze, običajno imamo ob začetku gretja nižje tlake, ki se do konca ogrevanja še zmanjšujejo, v fazi hlajenja pa začnejo tlaki naraščati in naraščajo vse do konca cikla, ko lahko dosežejo vrednost približno 300 barov. Po končanem ciklu stiskanja se stiskalnica s pomočjo odpiralnih cilindrov odpre, orodje pa se zapelje na transportno progo, kjer se stiskan proizvod s pomočjo vakuumskih prijemal ali drugih priprav izvzame iz orodja.

S tehnologijo stiskanja lahko stiskamo plošče z gladko površino brez strukture, lahko pa s pomočjo raznih vložnih orodij, ki se predhodno vstavijo v orodje stiskalnice dobimo tudi druge končne proizvode ter polproizvode z želeno obliko ali površinsko strukturo. Prednosti tehnologije stiskanja so predvsem dobre izotropne mehanske lastnosti, homogena struktura, stabilna oblika in minimalne notranje napetosti polproizvodov, ki so zelo primerni za naknadno strojno obdelavo ter možnost izdelave proizvodov večjih dimenzij. S stiskanjem se lahko proizvajajo plošče različnih debelin in dimenzij, ki se uporabljajo za oblaganje v transportu in prehrabni industriji, filtriranje v papirni in kemični industriji, proizvodnjo ograj, rezervoarjev, začasnih cest in delovnih ploščadi, ali pa se iz njih z naknadno strojno obdelavo izdelujejo različni izdelki za strojogradnjo (vodila, zobniki, puše, polži), avtomobilsko industrijo in gradbeništvo [17].

Na sliki 10 lahko vidimo nekatere proizvode, ki jih lahko proizvedemo s pomočjo tehnologije stiskanja in z naknadno strojno obdelavo.



Slika 10: Proizvodi, ki so proizvedeni s pomočjo tehnologije stiskanja [17, 18]

2.5 Numerične simulacije

S pomočjo računalniško podprtega inženirstva, ki ga poimenujemo tudi s kratico CAE (Computer Aided Engineering) in označuje programsko opremo za računalniške simulacije in testiranje je mogoče dandanes izvesti različne numerične simulacije, ki so nam v pomoč pri načrtovanju in optimizaciji procesov, raznih proizvodov, strojev in naprav ter pri razumevanju in reševanju realnih problemov. Numerična simulacija je pravzaprav iterativna metoda, s pomočjo katere lahko z eksperimentiranjem na ustreznem modelu realnega objekta preučujemo različne funkcionalne lastnosti in pojave. Numerične simulacije nam tako omogočajo, da lahko proizvod ali proces v virtualnem okolju razvijemo v obliki simulacijskega modela ter nato s simulacijo izračunamo, kaj se bo dogajalo z našim proizvodom, do kakšnih procesov bo prihajalo v naših napravah ter na ta način različne parametre tudi optimiramo [19, 20].

Z numeričnimi simulacijami lahko v relativno kratkem času razvijemo in testiramo različne prototipe ali procese ter tako pridemo do optimalnih rešitev, simulacije pa so zelo koristne tudi v primerih, ko je izvajanje pravega eksperimenta oziroma testa prenevarno, zahteva preveč časa, ni izvedljivo z ekonomskega vidika ali pa je testiranje preprosto nemogoče. Programska oprema za simulacije je običajno validirana na testnih primerih, vsak uporabnik pa je dolžan dobljene simulacijske rezultate v primerih, kjer je to mogoče preveriti in potrditi še s primernimi eksperimentalnimi preizkusi [19, 20].

2.5.1 Autodesk Moldflow Insight (AMI)

Programska oprema Autodesk Moldflow je namenjena za simulacije ter validacijo in optimizacijo proizvodov oziroma procesov in je hkrati vodilna svetovna zbirka programov za poglobljeno simulacijo in potrditev načrtov za različne proizvode ter orodja za proizvodnjo. Programska oprema je namenjena predvsem za tehnologijo brizganja, napredna simulacijska orodja in poenostavljen uporabniški vmesnik pa nam pomagajo pri reševanju različnih proizvodnih izzivov, kot so skrčki proizvodov, učinkovitost hladilnih kanalov ter optimizacija proizvodnih ciklov. Programska oprema je sestavljena iz dveh temeljnih programov, in sicer Moldflow Synergy, ki omogoča pripravo modelov za različne proizvode in orodja ter Moldflow Insight, ki zagotavlja končne preračune simulacij [21].

Simulacije se običajno izvajajo v treh fazah in sicer je najprej potrebno načrtovanje proizvoda, sledi načrtovanje in konstruiranje orodja, na koncu pa je treba definirati še parametre procesa predelave. Programska oprema Autodesk Moldflow omogoča podrobno validacijo, analizo in optimizacijo proizvodov, orodja ali tehnološkega postopka, prednosti pa so predvsem hitra in preprosta priprava modelov, možne naknadne spremembe geometrije, obsežna baza podatkov o materialih, ustvarjanje poročil in analiz z vključenimi slikami in animiranimi deli, možnost zaznavanja napak in njihovih vzrokov, orodja za optimizacijo zagonskih časov in zmanjšanje časov naknadne obdelave, simulacije kompleksnih izdelkov ter specialnih tehnologij [21].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Za namen eksperimentalnega dela magistrske naloge smo uporabili različne tipe termoplastičnih materialov (PE in PP), ki jih v podjetju Isokon, d. o. o. uporabljamo za proizvodnjo različnih plošč, ki so proizvedene s pomočjo tehnologije stiskanja in so navedeni v tabeli 2.

V okviru testiranja tehnologije predgretja in vakuumskega stiskanja smo uporabili dva različna materiala PPH, medtem ko smo za testiranje preostalih možnosti optimizacije obstoječih proizvodnih procesov poleg materiala PPH uporabili še material PE, in sicer tri različne vrste (PE z zelo visoko molekulsko maso, PE visoke gostote in recikliran PE visoke gostote).

Tabela 2: Pregled uporabljenih materialov

Material	Osnovne karakteristike materiala
PPH-1	MFI: 0,29 g/10 min (230 °C / 21,6 N) Gostota: 0,90 g/cm ³ Polipropilen homopolimer namenjen za proizvodnjo tlačnih cevi in komponent v kemični industriji. Ima povečano hidrostatično trdnost in dobro kemično stabilnost. Je v obliki granul in sive barve.
PPH-2	MFI: 0,31 g/10 min (230 °C / 21,6 N) Gostota: 0,90 g/cm ³ Polipropilen homopolimer namenjen predvsem za ekstrudiranje. Vsebuje antioksidant in ima visoko toplotno stabilnost. Je v obliki granul in v naravni barvi.
UHMW PE	Gostota: 0,93 g/cm ³ Linearni polietilen z zelo visoko molekulsko maso primeren za stiskanje najrazličnejših proizvodov. Ima visoko odpornost proti abraziji, dobro udarno trdnost in nizek koeficient trenja. Je v obliki prahu in v naravni barvi.
HDPE	MFI: 1,92 g/10 min (190 °C / 216 N) Gostota: 0,95 g/cm ³ Polietilen visoke gostote primeren za proizvodnjo embalaže za transport nevarnih snovi. Ima dobro udarno trdnost in kemično odpornost. Je v obliki prahu in v naravni barvi.
HDPE R	MFI: 0,49 g/10 min (190 °C / 50 N) Gostota: 0,95 g/cm ³ Recikliran polietilen visoke gostote. Je v obliki granul in črne barve.

3.2 Priprava vzorcev

3.2.1 Predgretje in vakuumsko stiskanje PPH

Različni vzorci, s pomočjo katerih smo analizirali tehnologijo predgretja in vakuumskega stiskanja termoplastičnih materialov, so bili pripravljene na laboratorijski hidravlični stiskalnici HS1-013 podjetja Sitor, d. o. o., ki je prikazana na sliki 11 in omogoča izdelavo stiskanih plošč s pomočjo vakuuma, s katerim lahko v orodju hidravlične stiskalnice dosežemo nizek zračni tlak.

Prototipna stiskalnica HS1-013 je prva takšna izdelana hidravlična stiskalnica na svetu, poleg standardne predelave termoplastičnih materialov s pomočjo tehnologije stiskanja pa omogoča še vakuumsko stiskanje.



Slika 11: Laboratorijska hidravlična stiskalnica HS1-013 [17]

Tehnične karakteristike stiskalnice HS1-013 so predstavljene v tabeli 3.

Tabela 3: Tehnične karakteristike stiskalnice HS1-013 [17]

Dosežena vrednost absolutnega vakuuma	Do 65 mbar
Specifični tlak	Max. 1000 N/cm ²
Maksimalna temperatura	260 °C
Notranje mere modela orodja (d*š*v)	1050 x 550 x 140 mm
Hitrost zapiranja	9 mm/s
Hitrost potiskanja	0 – 1 mm/s
Hitrost odpiranja	0 – 15 mm/s
Sila stiskanja	5775 kN
Sila odpiranja	200 kN
Premer hidravličnega cilindra	320 mm
Priključna moč stiskalnice	118 kW

V okviru eksperimentalnega dela magistrske naloge so se izdelali trije testni vzorci plošč debeline 60 mm, ki so bili stisnjeni iz materiala PPH-1 in šest vzorcev debeline 70 mm, ki so bili stisnjeni iz materiala PPH-2. Količina materiala, ki se je uporabila za stiskanje posameznega vzorca, je bila 31,25 kg za plošče debeline 60 mm oziroma 37 kg za plošče debeline 70 mm.

Tehnologija predgretja materiala se je testirala ob stiskanju materiala PPH-1, medtem ko se je ob stiskanju materiala PPH-2 poleg predgretja materiala testiralo še stiskanje z uporabo vakuuma. Na ta način smo hoteli ugotoviti, za koliko časa lahko v primeru predgretga materiala skrajšamo obstoječe proizvodne cikle stiskanja ter ali omenjena tehnologija predgretja materiala in vakuumskega stiskanja vpliva na mehanske, toplotne in vizualne lastnosti stiskanih plošč.

Da bi dobili ustrezne primerjalne čase ciklov stiskanja smo najprej iz obeh uporabljenih vhodnih materialov PPH stisnili po eno vzorčno ploščo, ki je bila proizvedena z uporabo obstoječe tehnologije stiskanja, brez predgretga materiala in vakuumskega stiskanja in nam je predstavljala referenčni vzorec. Vse naslednje vzorce smo nato izdelali s pomočjo predgretja materiala na različne temperature, pri nekaterih vzorcih, ki so bili stisnjeni iz materiala PPH-2, pa smo poleg predgretja materiala v tehnologijo stiskanja vključili še uporabo vakuuma.

Vse vzorce, ki so se izdelali v okviru testiranja tehnologije predgretja termoplastičnega materiala in vakuumskega stiskanja lahko najdemo v tabeli 4.

Tabela 4: Seznam pripravljenih vzorcev

Št. vzorca	Debelina vzorca [mm]	Uporabljen material	Režim stiskanja	Čas gretja [min]	Čas hlajenja [min]	Skupni čas cikla [min]
1	60	PPH-1	Brez predgretja materiala in brez vakuumu	295	200	495
2	60	PPH-1	S predgretjem materiala na 100 °C in brez vakuumu	270	200	470
3	60	PPH-1	S predgretjem materiala na 110 °C in brez vakuumu	265	200	465
4	70	PPH-2	Brez predgretja materiala in brez vakuumu	460	280	740
5	70	PPH-2	S predgretjem materiala na 90 °C in brez vakuumu	360	280	640
6	70	PPH-2	S predgretjem materiala na 90 °C in z vakuumom	360	280	640
7	70	PPH-2	S predgretjem materiala na 110 °C in brez vakuumu	350	280	630
8	70	PPH-2	S predgretjem materiala na 120 °C in brez vakuumu	330	280	610
9	70	PPH-2	S predgretjem materiala na 120 °C in z vakuumom	345	280	625

Predgretje materiala se je izvedlo s pomočjo testnega sušilnika XD21 proizvajalca Moretto, ki je prikazan na sliki 12 in je trajalo med 12 in 18 ur, odvisno od želene temperature, na katero smo želeli predgreti material. Namenski sušilnik za polimerne materiale je sestavljen iz izoliranega zalogovnika s prostornino 100 litrov in pripadajoče sušilne enote z dvema sušilnima celicama, s pomočjo katerih lahko material posušimo in segrejemo na želeno temperaturo s pomočjo suhega in vročega zraka. Naprava ima lastno turbino za generiranje zraka, ki omogoča pretok vse do 60 m³/h zraka.

S pomočjo frekvenčnega regulatorja naprava samodejno spreminja hitrost turbine in tako ustvarja točno določeno količino suhega zraka, ki je potrebna za posamezen tip materiala ter njegovo trenutno porabo (kg/h). Sušilnik omogoča predgretje materiala do temperature 150 °C, z dodatno grelno enoto na zalogovniku pa je možno predgretje tudi do temperature 200 °C. Priključna moč sušilnika znaša 4,7 kW.



Slika 12: Testni sušilnik Moretto XD21

Iz materiala PPH-1 so se pripravili trije različni vzorci plošč debeline 60 mm, in sicer prvi vzorec brez predgretja materiala, preostala dva vzorca pa s predgretjem materiala na temperaturo 100 °C oziroma 110 °C. Vsi trije vzorci so bili stisnjeni brez uporabe vakuumu. Na ta način smo hoteli ugotoviti, ali je možno material, ki je predgret na višjo temperaturo od temperature zmečkaišča materiala, ki za omenjen material PPH-1 znaša 91 °C (B50, 50N, ISO 306) s pomočjo tehnologije stiskanja stisniti brez uporabe vakuumu in pri tem dobiti ustrezen vzorec stiskane plošče brez prisotne poroznosti in s primerljivimi mehanskimi in toplotnimi lastnostmi.

Program stiskanja za material PPH-1, katerega čas gretja se je prilagodil glede na temperaturo materiala v sredini nasipne višine, lahko vidimo v tabeli 5. Vsi ostali parametri stiskanja (čas hlajenja, tlaki, nastavljene temperature grelnih plošč in okvirjev stiskalnice) so bili enaki za vse tri vzorce.

Tabela 5: Program za stiskanje vzorčnih plošč PPH-1 debeline 60 mm

Št. koraka	Čas koraka [min]	Režim delovanja	Temp. plošče [C°]	Temp. okvirja [C°]	Tlak [N/cm ²]
1	2	PREDSTISK	120	120	248
2	5	GRETJE	205	135	83
3	10	GRETJE	205	135	83
4	90	GRETJE	205	135	76
5	75	GRETJE	205	135	76
6	55	GRETJE	205	195	69
7	60	GRETJE	205	200	55
8	5	HLAJENJE	180	195	69
9	5	HLAJENJE	160	185	83
10	5	HLAJENJE	140	180	110
11	10	HLAJENJE	120	170	159
12	10	HLAJENJE	110	160	207
13	15	HLAJENJE	100	140	276
14	15	HLAJENJE	80	130	330
15	20	HLAJENJE	70	105	386
16	25	HLAJENJE	50	90	386
17	25	HLAJENJE	40	75	386
18	35	HLAJENJE	40	65	386
19	15	HLAJENJE	40	45	386
20	15	HLAJENJE	40	40	386
Skupni čas programa: 8 h 17 min					

Nato smo iz materiala PPH-2 pripravili še šest različnih vzorcev oziroma plošč debeline 70 mm. Prva vzorčna plošča iz materiala PPH-2 je bila proizvedena brez predgretja materiala in brez vakuum, za vse preostale vzorčne plošče pa se je nato uporabil material, ki je bil predhodno segret na različne temperature med 90 in 120 °C, dodatno pa se je pri dveh vzorcih v kombinaciji s predgretjem materiala testiralo še stiskanje z uporabo vakuum.

S pomočjo vakuumske črpalke, ki je priključena na prototipno stiskalnico HS1-013, smo v orodju stiskalnice skozi celoten cikel stiskanja vzdrževali nizek zračni tlak oziroma vakuum, katerega vrednosti so znašale približno -930 mbar (relativni vakuum). Na ta način smo želeli ugotoviti, kako uporaba vakuum v kombinaciji s predgretjem materiala in tehnologijo stiskanja vpliva na končne mehanske in toplotne lastnosti stiskanih plošč ter ali je uporaba omenjene tehnologije smiselna v serijski proizvodnji stiskanja termoplastičnih materialov.

Program stiskanja za material PPH-2, katerega čas gretja se je ustrezno prilagodil glede na temperaturo materiala v sredini nasipne višine, je prikazan v tabeli 6. Vsi ostali parametri stiskanja (čas hlajenja, tlaki, nastavljene temperature grelnih plošč in okvirjev stiskalnice) so bili enaki za vse vzorce.

Tabela 6: Program za stiskanje vzorčnih plošč PPH-2 debeline 70 mm

Št. koraka	Čas koraka [min]	Režim delovanja	Temp. plošče [C°]	Temp. okvirja [C°]	Tlak [N/cm²]
1	2	PREDSTISK	130	130	248
2	5	GRETJE	200	130	90
3	125	GRETJE	200	130	90
4	70	GRETJE	200	130	90
5	105	GRETJE	200	130	76
6	65	GRETJE	200	200	62
7	90	GRETJE	200	200	41
8	5	HLAJENJE	195	195	55
9	10	HLAJENJE	185	185	76
10	10	HLAJENJE	180	180	97
11	15	HLAJENJE	170	170	152
12	20	HLAJENJE	160	160	193
13	20	HLAJENJE	140	140	276
14	25	HLAJENJE	130	130	331
15	30	HLAJENJE	105	105	386
16	35	HLAJENJE	90	90	386
17	20	HLAJENJE	75	75	386
18	25	HLAJENJE	65	65	386
19	45	HLAJENJE	45	45	386
20	20	HLAJENJE	40	40	386
Skupni čas programa: 12 h 22 min					

3.2.2 Predstiskanje s pomočjo vložnih orodij

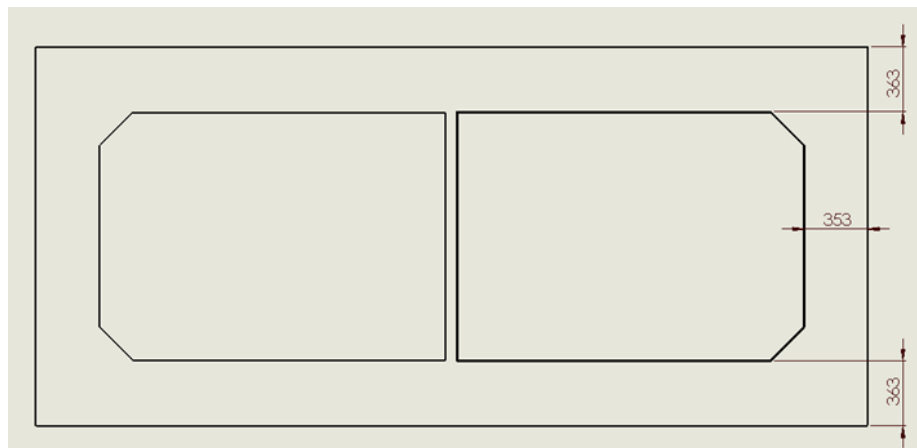
Predstiskanje s pomočjo vložnih orodij je tehnologija stiskanja, pri kateri lahko s pomočjo kovinskih vložnih orodij različnih oblik predstisnemo različne oblike stiskanih proizvodov in polproizvodov iz polimernih materialov. Na ta način lahko bistveno zmanjšamo količino porabljenega polimernega materiala za posamezen proizvod, prav tako pa se skrajšajo časi naknadne strojne obdelave stiskanih surovcev.

Poizkusi so bili izvedeni na dveh različnih proizvodih, ki jih proizvajamo v podjetju Isokon, d. o. o. in sicer na različnih ploščah, ki se uporabljajo v papirni in filtrirni industriji ter po stiskanju zahtevajo še naknadno strojno obdelavo na CNC strojih. Poizkusi so se izvedli na stiskalnici SH-06 z dimenzijami orodja 2050 x 4550 mm, uporabili pa smo material UHMW PE in PPH-2, iz katerih smo stisnili po eno vzorčno ploščo.

PE plošča debeline 35 mm

Za testiranje so se izdelala namenska aluminijasta vložna orodja, s pomočjo katerih smo dosegli želeno predstisnjeno obliko stiskane plošče. Uporabljen je bil material UHMW PE. Polnjenje orodja ter sam proces stiskanja smo izvedli v štirih fazah, in sicer smo najprej na dno orodja stiskalnice vstavili spodnji del vložnega orodja, v razmiku glede na orodje stiskalnice, kot prikazuje slika 13.

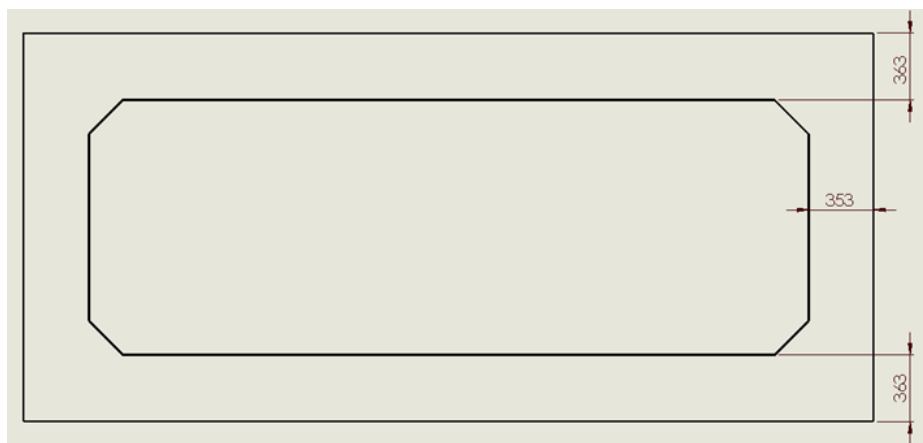
Spodnje vložno orodje je bilo zaradi oblike končnega proizvoda izdelano iz dveh enakih delov. Za zagotovitev ustrezne razporeditve vložnega orodja v orodju hidravlične stiskalnice smo si pomagali s pomočjo namenskih distančnikov.



Slika 13: Postavitev spodnjih vložnih delov glede na orodje stiskalnice

Nato smo v orodje stiskalnice nasuli 260 kg materiala UHMW PE, ki je potreben za stiskanje omenjene debeline plošče in ga naknadno s pomočjo namenske poravnalke ustrezno poravnali po celotni površini orodja hidravlične stiskalnice.

Kasneje smo na poravnani material, v razmiku glede na orodje stiskalnice, kot prikazuje slika 14 položili zgornji del vložnega orodja in začeli s procesom stiskanja. Zgornje vložno orodje je bilo zaradi oblike končnega proizvoda izdelano iz enega kosa.

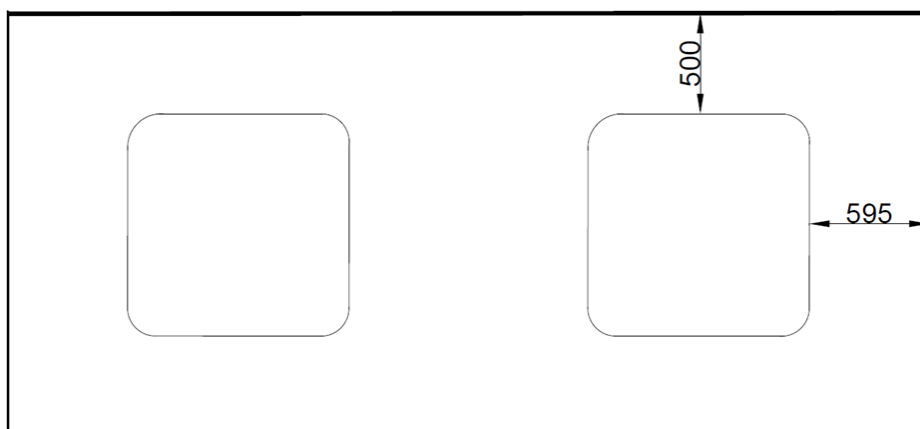


Slika 14: Postavitev zgornjega vložnega dela glede na orodje stiskalnice

PP plošča debeline 75 mm

Za namen testiranja so se izdelala namenska aluminijasta vložna orodja, s pomočjo katerih smo dosegli želeno predstisnjeno obliko stiskane plošče. Za testiranje je bil uporabljen material PPH-2.

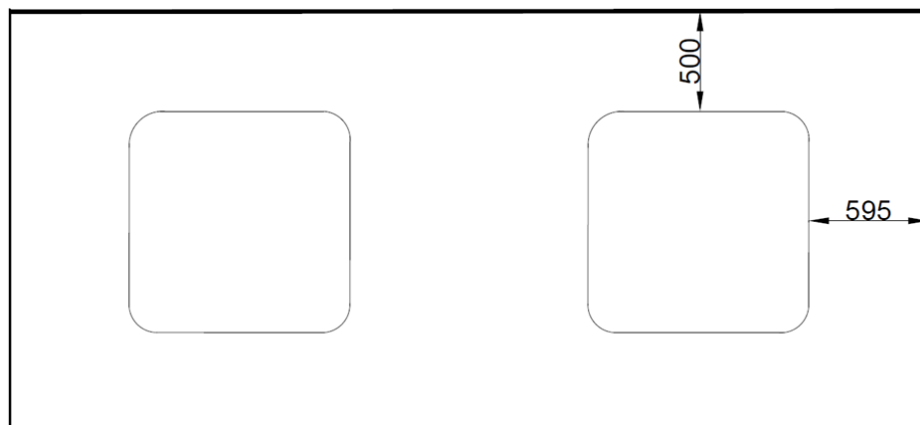
Polnjenje orodja ter proces stiskanja smo izvedli v štirih fazah, in sicer smo najprej na dno orodja hidravlične stiskalnice v razmiku glede na orodje, kot prikazuje slika 15 vstavili spodnji del vložnega orodja, ki je bilo zaradi oblike končnega proizvoda izdelano iz dveh delov. Za zagotovitev ustrezne razporeditve vložnega orodja v orodju hidravlične stiskalnice smo si pomagali s pomočjo namenskih distančnikov.



Slika 15: Postavitev spodnjega dela vložnega orodja v orodju stiskalnice

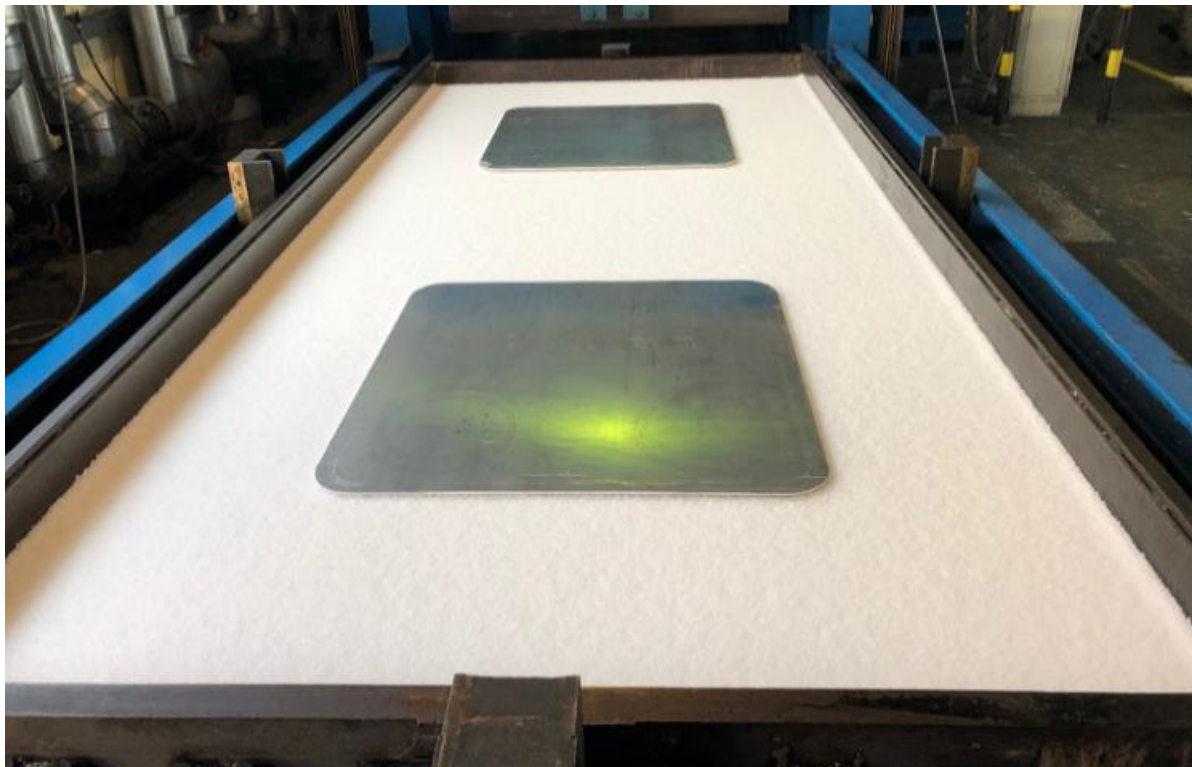
V orodje stiskalnice smo nato nasuli 690 kg materiala PPH-2, ki je potreben za stiskanje omenjene debeline plošče in ga ustrezno poravnali po celotnem orodju hidravlične stiskalnice.

Nato smo na poravnani material v razmiku glede na orodje, kot prikazuje slika 16, položili zgornji del vložnega orodja, ki je bilo zaradi oblike končnega proizvoda izdelano iz dveh enakih delov.



Slika 16: Postavitev zgornjega dela vložnega orodja v orodju stiskalnice

Na sliki 17 je prikazana končna postavitev zgornjega dela vložnega orodja, ki je postavljeno na predhodno poravnani material v orodju hidravlične stiskalnice.



Slika 17: Končna postavitev vložnega orodja na polimernem materialu

Po končanem vstavljanju zgornjega dela vložnega orodja v orodje hidravlične stiskalnice se je le ta zaprla in začel se je proces stiskanja.

3.2.3 Dvojno polnjenje materiala

Tehnologija dvojnega polnjenja materiala je tehnologija, pri kateri za proizvodnjo plošče poleg osnovnega materiala uporabimo še cenejši alternativni material oziroma material, ki je ekonomsko bolj upravičen. Glavni namen testiranja je bil preveriti možnost uporabe cenejšega alternativnega materiala (reciklata) ter materiala brez dodanih aditivov (barvila, UV stabilizatorja, antistatičnega sredstva) v notranjosti stiskane plošče, s čimer lahko znižamo proizvodne stroške in posledično lastno ceno izdelka, hkrati pa s tem postanemo konkurenčnejši na trgu.

V notranjosti plošče se je uporabil cenejši alternativni material oziroma material brez aditivov, obstoječi material z aditivi pa je bil samo ob robovih in na površini plošče.

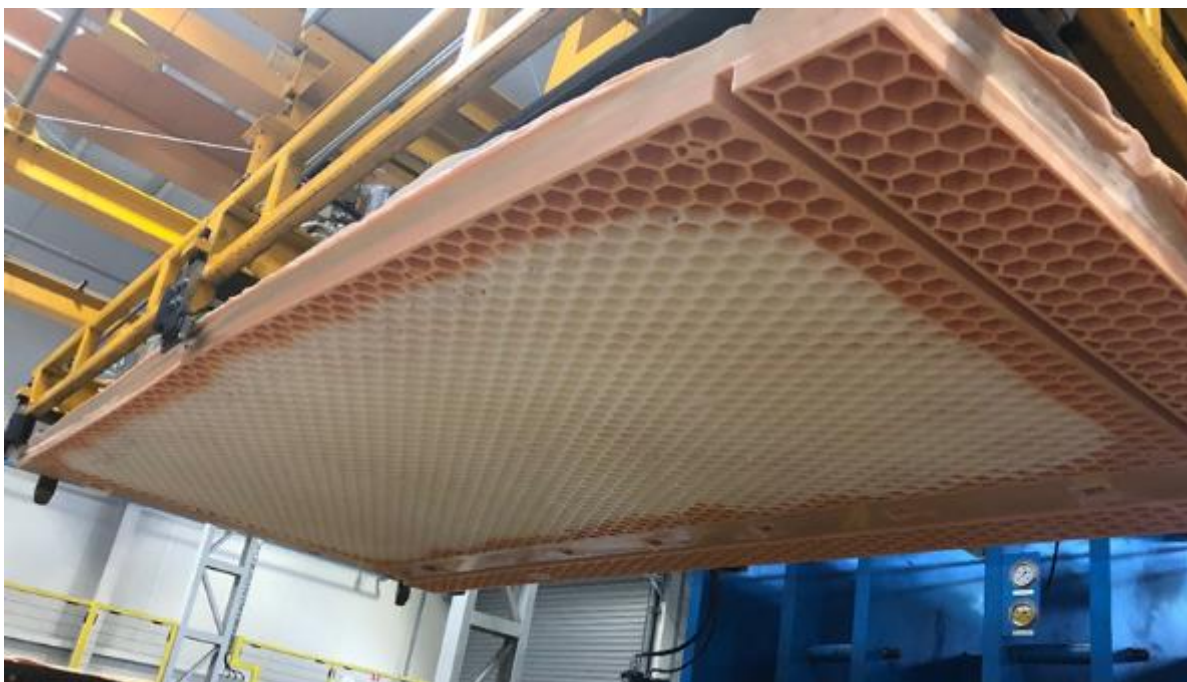
Testiranje je potekalo na stiskalnici SH-07 dimenzij 2200 x 4500 mm, uporabljen pa je bil obstoječi material HDPE z in brez pripadajočih aditivov ter alternativni material HDPE R. Testiranje je potekalo v dveh delih, in sicer smo najprej izvedli preizkus, kjer se je za nasip v notranjosti stiskane plošče uporabil obstoječi material brez aditivov, kasneje pa smo za nasip v notranjosti uporabili še recikliran alternativni material.

Uporaba obstoječega materiala brez aditivov

Pri testiranju smo uporabili kombinacijo ne mletega materiala HDPE brez aditivov, ter obstoječo mešanico enakega osnovnega materiala z vsemi aditivi (barvilom, UV stabilizatorjem, antistatičnim sredstvom).

Najprej smo v sredino orodja, približno 100 mm od roba nasuli 75 kg ne mletega materiala HDPE brez aditivov. Material smo nato ročno s pomočjo namenske poravnalke poravnali ter na robove in vrh dodali še preostalih 110 kg enakega osnovnega materiala z vsemi pripadajočimi aditivi. Dodani material z aditivi smo nato poravnali in zaprli orodje, ter začeli s procesom stiskanja.

Postopek smo nato ponovili še za drugo polovico plošče, tako da smo skupaj porabili 150 kg ne mletega materiala brez aditivov ter 220 kg materiala z aditivi. Na sliki 18 lahko vidimo končni izgled polovice stiskane plošče, kjer je v notranjosti uporabljen material brez aditivov, ob robovih pa je prvotni material s pripadajočimi aditivi.



Slika 18: Plošča z materialom brez uporabljenih aditivov

Uporaba alternativnega materiala

Pri omenjenem testiranju smo uporabili kombinacijo recikliranega alternativnega materiala HDPE R ter mešanice obstoječega osnovnega materiala HDPE z vsemi aditivi (barvilom, UV stabilizatorjem, antistatičnim sredstvom). Najprej smo v sredino orodja, približno 100 mm od roba nasuli 75 kg alternativnega materiala, ter ga nato ročno s pomočjo namenske poravnalke poravnali po orodju. Ob robovih ter na vrh smo nato dodali še preostalih 110 kg obstoječega materiala z vsemi pripadajočimi aditivi, ter dodani material dodatno poravnali, orodje zaprli in ga uvozili v hidravlično stiskalnico ter začeli s procesom stiskanja.

Postopek smo nato ponovili še za drugo polovico plošče tako, da smo skupaj porabili 150 kg recikliranega alternativnega materiala HDPE R ter 220 kg obstoječega materiala HDPE s pripadajočimi aditivi.

Na sliki 19 lahko vidimo končni izgled polovice stiskane plošče, kjer je v notranjosti uporabljen recikliran alternativni material HDPE R, ob robovih in na vrhu plošče pa je obstoječ material HDPE s pripadajočimi aditivi.



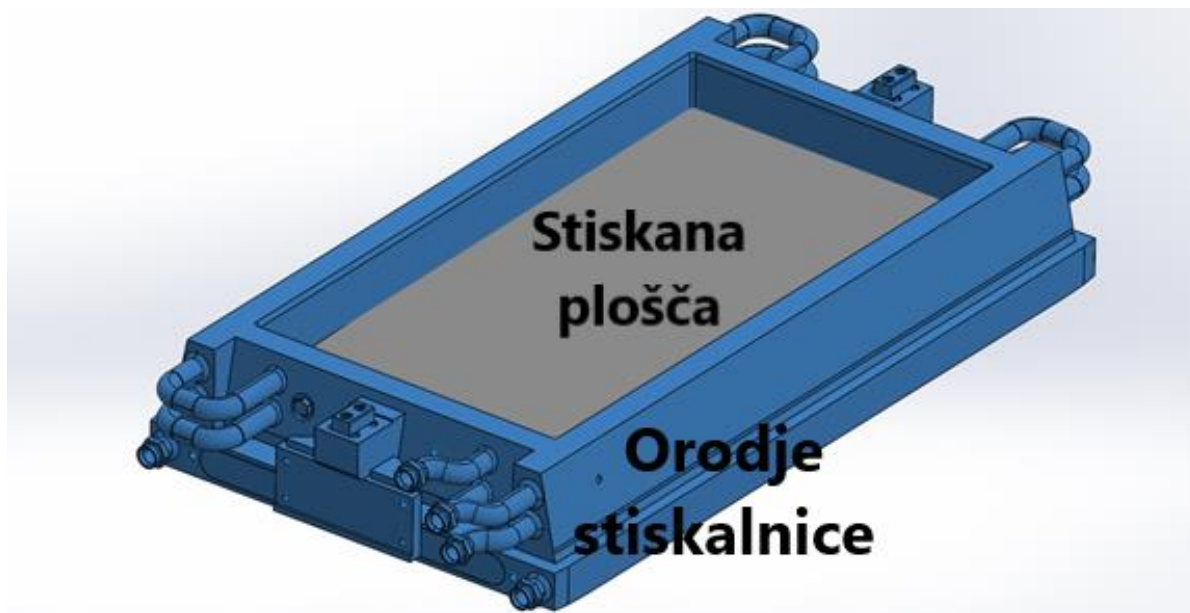
Slika 19: Plošča z uporabljenim recikliranim alternativnim materialom

3.3 Simulacije stiskanja termoplastičnega materiala

Numerične simulacije stiskanja termoplastičnega materiala smo izvedli s pomočjo programske opreme Autodesk Moldflow Insight, ki omogoča simulacijo in optimizacijo različnih proizvodnih tehnologij, izbranih parametrov, orodij ter končnih proizvodov. Program omogoča izvedbo simulacij polnjenja staljenega polimernega materiala v orodje hidravlične stiskalnice, stiskanja staljenega polimernega materiala, ohlajanja, naknadnega polnjenja ter analizo notranjih napetosti in skrčkov končnih proizvodov.

Simulacije smo izvedli s pomočjo vnaprej pripravljenih modelov orodja prototipne hidravlične stiskalnice HS1-013 ter stiskane plošče, za izvedbo simulacij pa smo izbrali enak material PPH-1, ki je bil predhodno uporabljen tudi za pripravo vzorcev, s katerimi se je testiralo predgretje termoplastičnega materiala. Na ta način smo hoteli ugotoviti, ali bi lahko v prihodnje različne parametre stiskanja optimirali tudi z uporabo numeričnih simulacij, s katerimi bi lahko posamezno optimizacijo izvedli v krajšem času kot obstoječa eksperimentalna testiranja, prav tako pa bi se s tem znižali tudi stroški testiranja. Postopek priprave simulacijskega modela, izbira zelene tehnologije in nastavitve različnih procesnih parametrov so predstavljene v nadaljevanju.

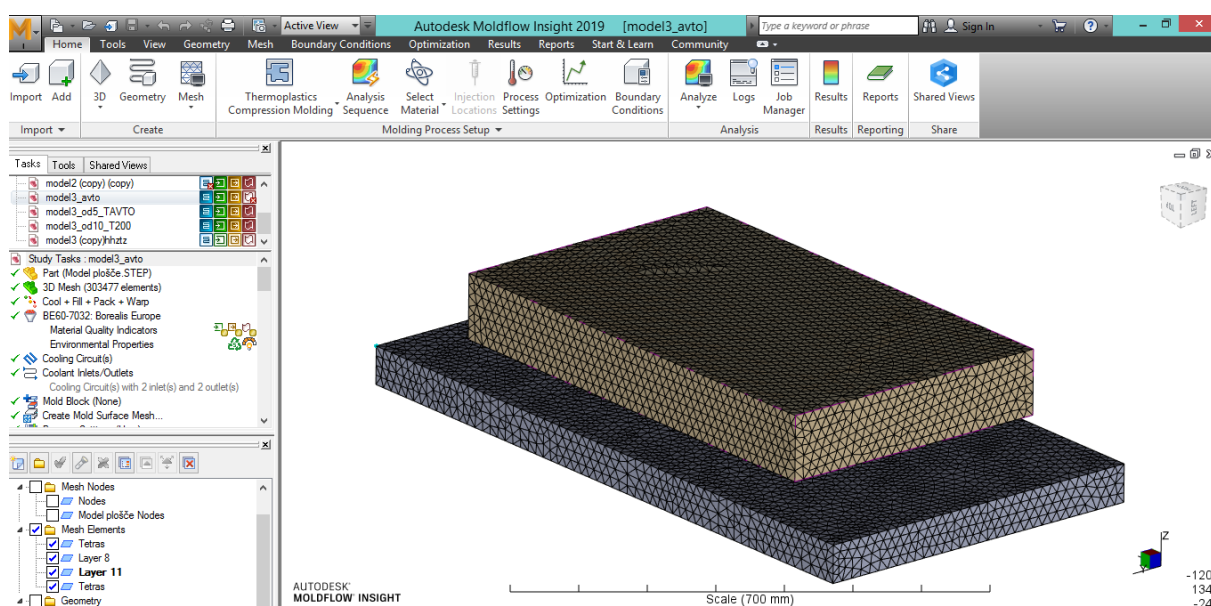
Najprej smo s pomočjo programa SolidWorks izdelali 3D model orodja hidravlične stiskalnice in 3D model stiskane plošče, ki sta prikazana na sliki 20.



Slika 20: 3D model orodja hidravlične stiskalnice in stiskane plošče

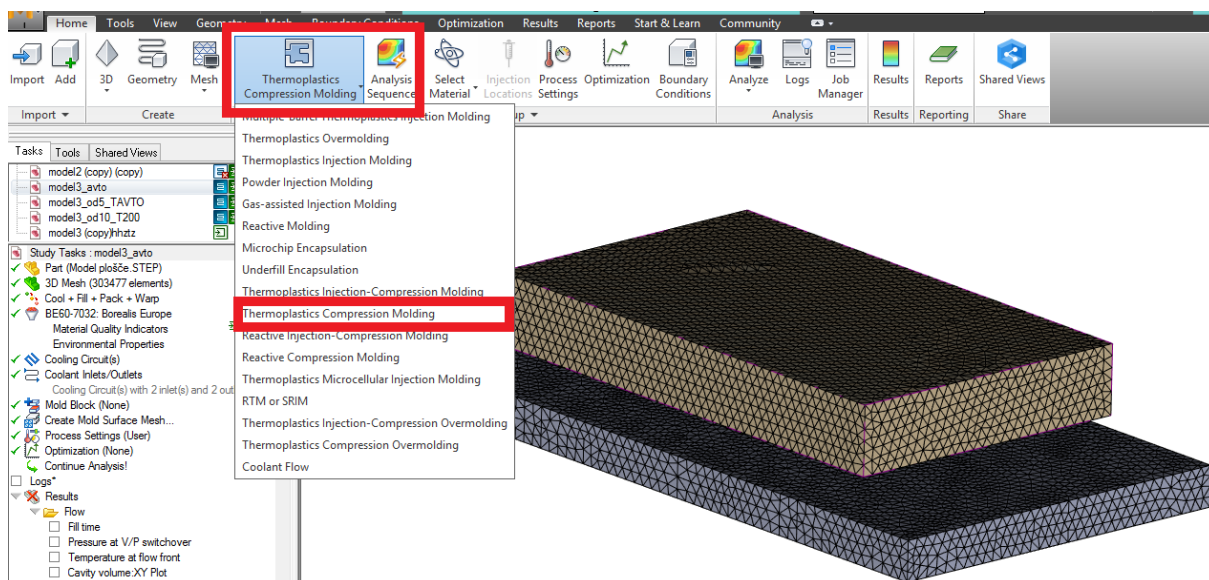
Dodatno smo izdelali še 3D model stiskane plošče s pripadajočim modelom taline termoplastičnega materiala pred začetkom stiskanja (tehnologija ekstrudiranja staljenega termoplastičnega materiala v orodje hidravlične stiskalnice).

V programski modul Autodesk Moldflow Synergy smo nato uvozili 3D model taline termoplastičnega materiala in stiskane plošče ter začeli s pripravo modela za izvedbo numeričnih simulacij. Najprej smo uvožen 3D model mrežili. Delovno okno programa in mrežni 3D model sta prikazana na sliki 21.



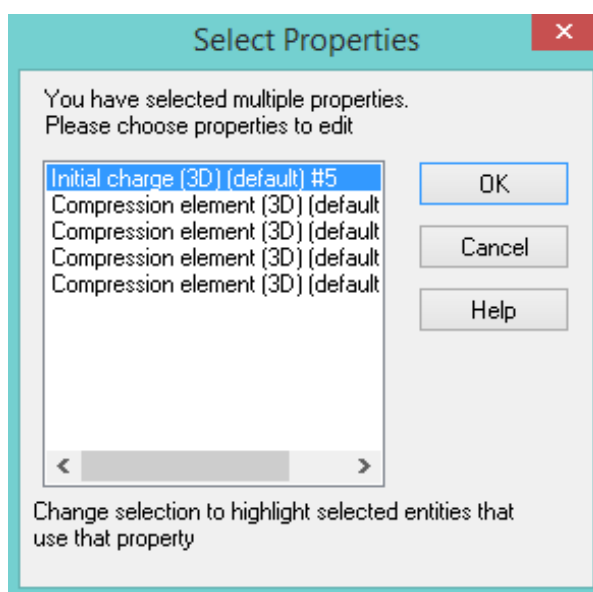
Slika 21: Delovno okno programa Moldflow in mrežni 3D model

V nadaljevanju smo izbrali tehnologijo predelave, v našem primeru tehnologijo stiskanja termoplastičnega materiala (Thermoplastics compression molding) ter definirali stopnje procesa stiskanja, ki bi jih želeli analizirati (polnjenje materiala v orodje, stiskanje, hlajenje, naknadno polnjenje, analiza skrčkov in notranjih napetosti). Na sliki 22 je prikazan postopek izbire želene tehnologije predelave in analiziranih stopenj procesa stiskanja.



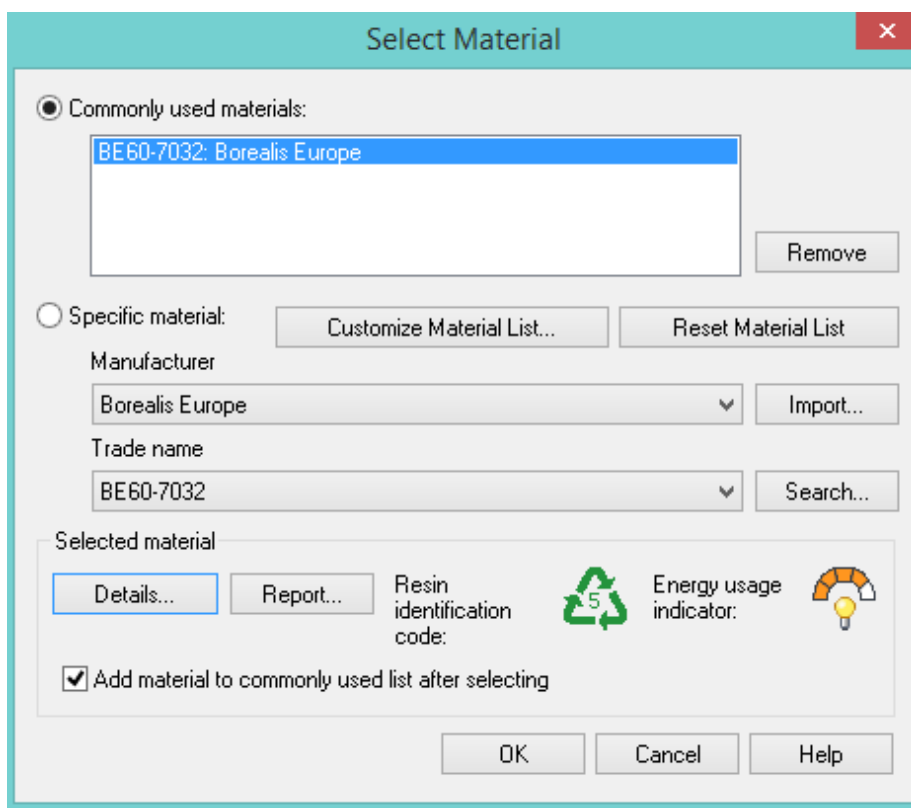
Slika 22: Izbira želene tehnologije predelave termoplastičnega materiala

Po izbrani tehnologiji predelave in definiranih stopnjah procesa, smo talino termoplastičnega materiala označili kot element začetnega polnjenja (3D Initial charge), stiskano ploščo pa kot element stiskanja (3D compression element), kar je prikazano na sliki 23. Definirali smo tudi, katere ploskve 3D modela stiskane plošče so stranske, katera ploskev v procesu stiskanja je fiksna in katera premična.



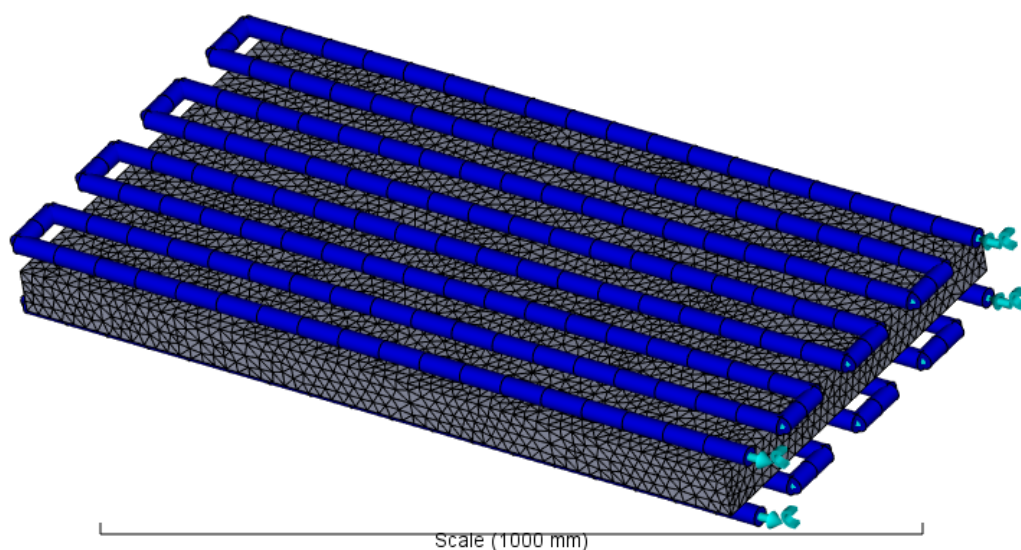
Slika 23: Določitev lastnosti elementov 3D modela

Kot je prikazano na sliki 24, smo v materialni knjižnici programa nato poiskali material PPH, ki je bil predhodno uporabljen tudi v eksperimentalnem delu magistrske naloge, ter določili manjkajoče termične ter mehanske lastnosti izbranega materiala.



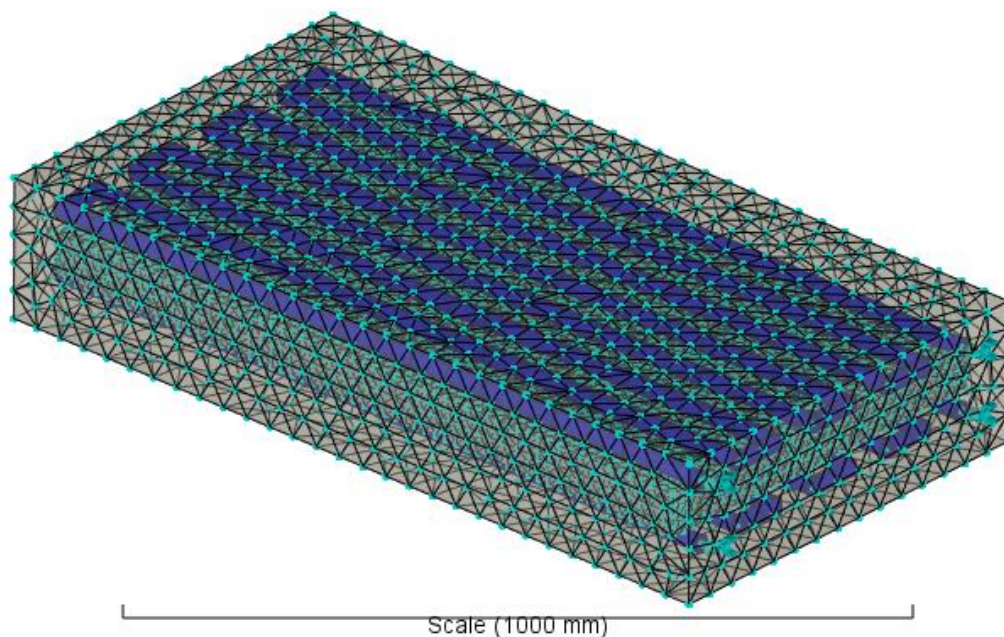
Slika 24: Izbira materiala stiskane plošče

Nato smo določili število, velikost in pozicijo hladilnih kanalov, ki so prikazani na sliki 25, definirali število in pozicije vhodov ter izhodov hladilnih kanalov ter vrsto in lastnosti hladilnega medija, ki se je uporabil za hlajenje.



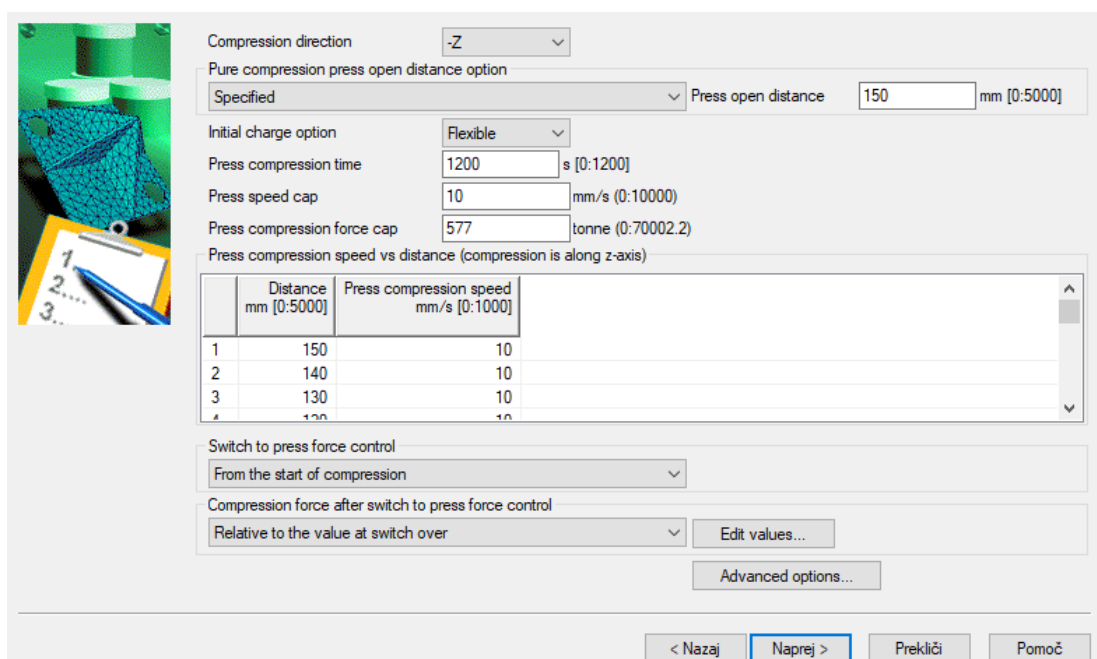
Slika 25: Določitev hladilnih kanalov

Dodatno smo določili še dimenzije in pozicijo orodja hidravlične stiskalnice okoli stiskane plošče, določili tip jekla, iz katerega je proizvedeno orodje ter orodje na koncu mrežili, kar je prikazano na sliki 26.



Slika 26: Mrežni model orodja hidravlične stiskalnice

Kot je prikazano na sliki 27, smo na koncu definirali še posamezne procesne parametre stiskanja termoplastičnega materiala (temperaturo taline, čas odpiranja orodja, čas stiskanja in hlajenja, začetno temperaturo orodja, smer stiskanja, silo stiskanja ter druge parametre). Na koncu smo izvedli še analizo nastavljenih parametrov, katerih rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 27: Nastavitev procesnih parametrov stiskanja

3.4 Metode preiskav

Različne lastnosti materialov, ki so bili uporabljeni pri eksperimentalnem delu magistrske naloge, smo preiskovali na laboratorijski opremi podjetja Isokon, d. o. o. in podjetja Isosport GmbH. Analizirali smo reološke, toplotne in mehanske lastnosti uporabljenih materialov in vzorcev, ki so bili pripravljene v okviru eksperimentalnega dela. Metode, ki smo jih uporabili za preiskavo različnih lastnosti materialov in vzorčnih plošč, so predstavljene v nadaljevanju.

3.4.1 Reološke lastnosti

Indeks tečenja taline (MFI – ang. Melt Flow Index) je metoda, s pomočjo katere lahko določimo sposobnost tečenja termoplastičnega polimera. Z omenjeno metodo lahko preverimo kakovost vhodnega materiala, primerjamo različne materiale pri razvoju novega proizvoda, ali pa analiziramo lastnosti določenega materiala za lažjo določitev parametrov pri različnih postopkih predelave. Rezultat meritve predstavlja količino mase, ki v določenem času, pri točno določeni temperaturi in obremenitvi steče skozi šobo preizkusne naprave in je izražen v g/10 min [22, 23].

Različne vzorce smo testirali po standardu ISO 1133, temperatura in obremenitev pa je bila odvisna od vrste polimernega materiala. Materiala PPH-1 in PPH-2 smo testirali pri temperaturi 230 °C in obremenitvi 2,16 kg, material HDPE pri temperaturi 190 °C in obremenitvi 21,6 kg, material HDPE R pa pri temperaturi 190 °C in obremenitvi 5 kg. Za vsak vzorec smo opravili meritev štirih paralelk ter na koncu izračunali povprečno vrednost.

3.4.2 Toplotne lastnosti

Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC) je metoda, s katero merimo količino energije oziroma toplote, ki jo vzorec porabi ali sprosti, medtem ko ga segrevamo oziroma ohlajamo ali pa ga vzdržujemo pri določeni temperaturi. Pri DSC analizi s kompenzacijo moči segrevamo vzorčno in referenčno celico ter spremljamo razliko toplotnega toka, ki ga dovajamo vzorcu in referenčni celici [23].

Določena temperatura v vzorcu povzroči spremembe v sestavi in strukturi, na ta način pa dobimo različne energetske prehode, ki jih pripadajoča programska oprema izriše v obliki DSC krivulje, ki predstavlja diagram toplotnega toka (Q), kot funkcije časa (t) in temperature (T) [23].

Za izvedbo meritev smo uporabili aparaturo NETZSCH DSC 200. Meritve smo izvajali v temperaturnem območju med 20 in 190 °C, s hitrostjo naraščanja temperature 20 °C/min. Iz grafov smo nato za posamezen vzorec razbrali in primerjali temperaturo tališča (T_m), talilno entalpijo (ΔH_m) ter na podlagi referenčne vrednosti talilne entalpije 100 % kristaliničnega PP, ki znaša 209 J/g [24] izračunali stopnjo kristaliničnosti posameznega vzorca.

Temperatura zmečičišča po Vicatu je metoda, s pomočjo katere lahko določimo temperaturo zmečičišča polimernih materialov, pri kateri igla točno določenih dimenzij prodre v vzorec na točno določeno globino pod dano obremenitvijo. Pri omenjeni temperaturi vzorec izgubi svojo stabilno obliko in se zmečiča [25].

Je standardni test, s katerim si lahko pomagamo pri izbiri ustreznega polimernega materiala za določeno aplikacijo ter pri načrtovanju različnih proizvodov. Med testiranjem je igla ploske oblike, ki je obremenjena s točno določeno maso v neposrednem stiku z vzorcem, le ta pa je potopljen v oljno kopel za boljši prenos toplote [25].

Meritve smo opravili po standardu DIN EN ISO 306, za testiranje pa smo uporabili vzorce dimenzij 4 x 10 x 10 mm. Hitrost naraščanja temperature v oljni kopeli je znašala 120 °C/h, obremenitev pa je bila 10 oziroma 50 N. Temperaturo zmečičišča za posamezen vzorec smo določili pri razdalji, ko je igla prodrla 1 mm v globino vzorca. Za vsak vzorec smo izmerili tri paralelke ter na koncu izračunali povprečno vrednost.

3.4.3 Mehanske lastnosti

Modul elastičnosti (E-modul), natezna trdnost, raztezek pri pretrgu so mehanske lastnosti materialov, ki jih lahko določimo s pomočjo nateznega preizkusa. Pri nateznem preizkusu je preizkušanelec v vzdolžni smeri, torej enoosno obremenjen z določeno napetostjo oziroma silo, ki enakomerno narašča. Skozi meritve beležimo silo v odvisnosti od raztega preizkušancea, ki jo lahko nato kasneje pretvorimo v napetost v odvisnosti od raztezka, ki predstavlja razmerje med začetno in končno dolžino preizkušancea [23].

Oblika preizkušancev pri nateznem testu je odvisna predvsem od standarda, po katerem izvajamo meritve, največkrat pa se preizkušanci pripravijo s pomočjo brizganja, stiskanja ali z mehansko obdelavo [23].

Meritve smo izvajali v skladu s standardom ISO 527, na napravi Shimadzu Autograph AGS, ki je prikazana na sliki 28 in ima merilno območje med 10N in 10kN, ter s hitrostjo pomika 1 mm/min pri določanju E modula oziroma 50 mm/min za določanje ostalih nateznih lastnosti. Za vsak vzorec smo izmerili 5 paralelek ter na koncu izračunali povprečno vrednost.



Slika 28: Testna naprava Shimadzu Autograph AGS

Udarne žilavost nam pove, kako je preizkušani material odporen na udarce, pri analizi pa merimo količino energije, ki je potrebna za lom preizkušanca. Pri polimernih materialih se lahko pripravi preizkušavec z zarezo, ki je v obliki črke U ali V, lahko pa je tudi brez zareze. Udarne žilavost lahko merimo po Charpyju ali Izodu, pri obeh metodah pa je oblika preizkušanca enaka, razlika je le v obliki udarnega kladiva, hitrosti in pa načinu vpetja preizkušanca [23].

Preizkušavec najprej vstavimo v podporo, kladivo pa nato dvignemo v začetni položaj in ga spustimo, da udari v preizkušavec, ki se najprej deformira elastično, nato plastično, na koncu pa pride do loma preizkušanca. V nekaterih primerih se lahko zgodi, da do loma preizkušanca ne pride. Kladivo se ob prelomu preizkušanca dvigne nazaj na nasprotno stran, s pomočjo končnega kota pa kasneje izračunamo količino energije, ki je bila potrebna za zlom preizkušanca. Manjši kot je končni kot, več energije se je porabilo za zlom preizkušanca [23].

Rezultat se ponavadi izraža v količini absorbirane energije glede na površino preseka (J/m^2), udarna žilavost pa je zelo odvisna tudi od temperature, z višjo temperaturo se namreč po navadi večja tudi udarna žilavost, pri nižjih temperaturah pa so materiali bolj krhki in imajo posledično nižjo udarno žilavost [23].

Meritve udarne žilavosti smo izvedli po standardu ISO 179. Za merjenje udarne žilavosti različnih vzorcev smo pripravili preizkušance debeline 4 mm in dimenzij 10 x 80 mm z zarezo. Za vsak vzorec smo izmerili po 6 paralelk ter na koncu izračunali povprečno vrednost.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Primerjava lastnosti stiskanih plošč s predgretjem materiala in vakuumom

V magistrskem delu smo izvedli optimizacijo procesnih parametrov stiskanja materiala PPH s pomočjo predgretja materiala in vakuumskega stiskanja ter analizirali vpliv omenjene tehnologije na mehanske, toplotne in vizualne lastnosti stiskanih plošč. Rezultate meritev različnih testnih vzorcev smo primerjali z rezultati referenčnih vzorcev ter podali prednosti in pomanjkljivosti tehnologije stiskanja termoplastičnega materiala s predgretjem materiala in vakuumskim stiskanjem.

Pred predelavo smo z merjenjem MFI-ja in z DSC analizo analizirali oba vhodna materiala PPH. Vrednosti MFI in rezultati DSC analize so predstavljeni v tabeli 7.

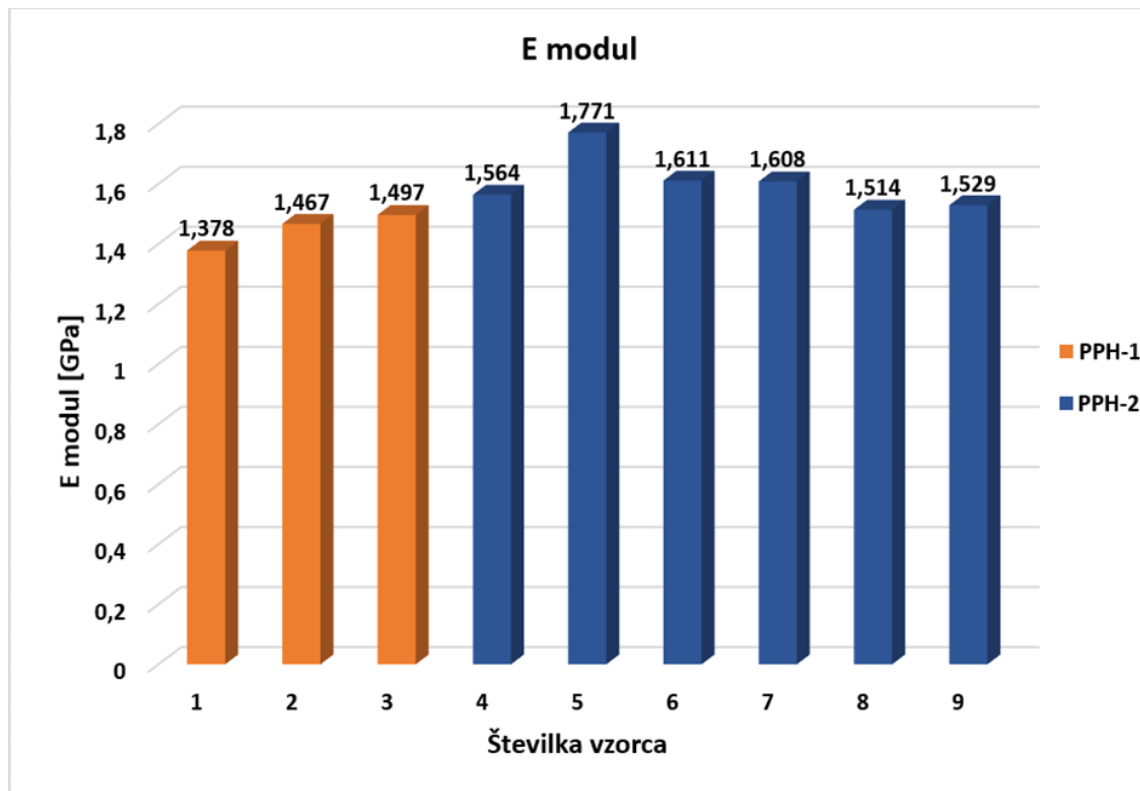
Tabela 7: Rezultati MFI in DSC analize vhodnega materiala PPH

Material	MFI [230 °C/21,6 N]	Stopnja kristaliničnosti [%]	Temperatura tališča [°C]
PPH-1	0,29	47,75	158,3
PPH-2	0,31	42,61	165,4

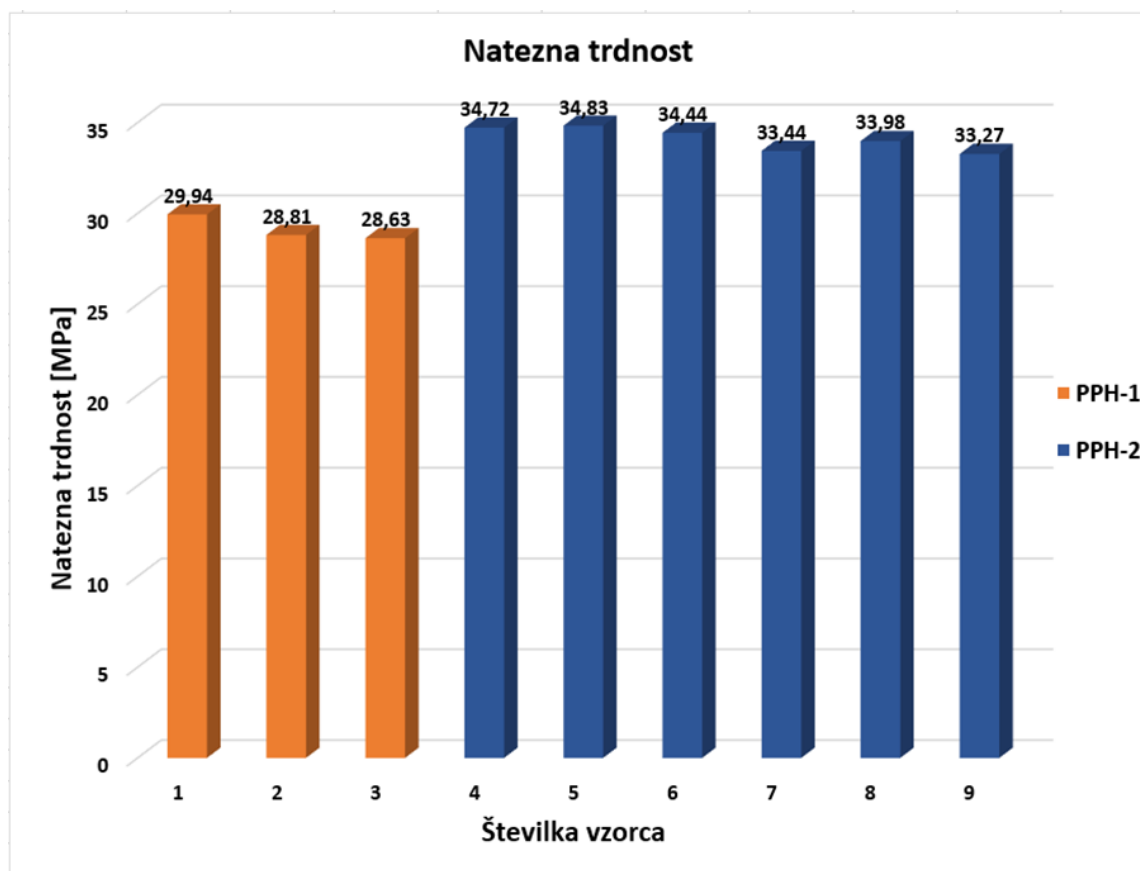
V nadaljevanju so na slikah od 29 do 37, prikazane povprečne izmerjene vrednosti posamezne mehanske oziroma toplotne lastnosti vzorčnih stiskanih plošč, ki smo jih pripravili v okviru eksperimentalnega dela ter analizirali s pomočjo različnih metod preiskav.

Rezultati vzorčnih plošč št. 1 do 3, ki so bile stisnjene iz materiala PPH-1 so prikazani s pomočjo stolpcev oranžne barve, medtem, ko so rezultati za plošče št. 4 do 9, ki so bile stisnjene iz materiala PPH-2 predstavljeni s stolpci modre barve. Referenčni vzorec za material PPH-1 predstavlja vzorčna plošča št. 1, referenčni vzorec za material PPH-2 pa predstavlja vzorčna plošča št. 4.

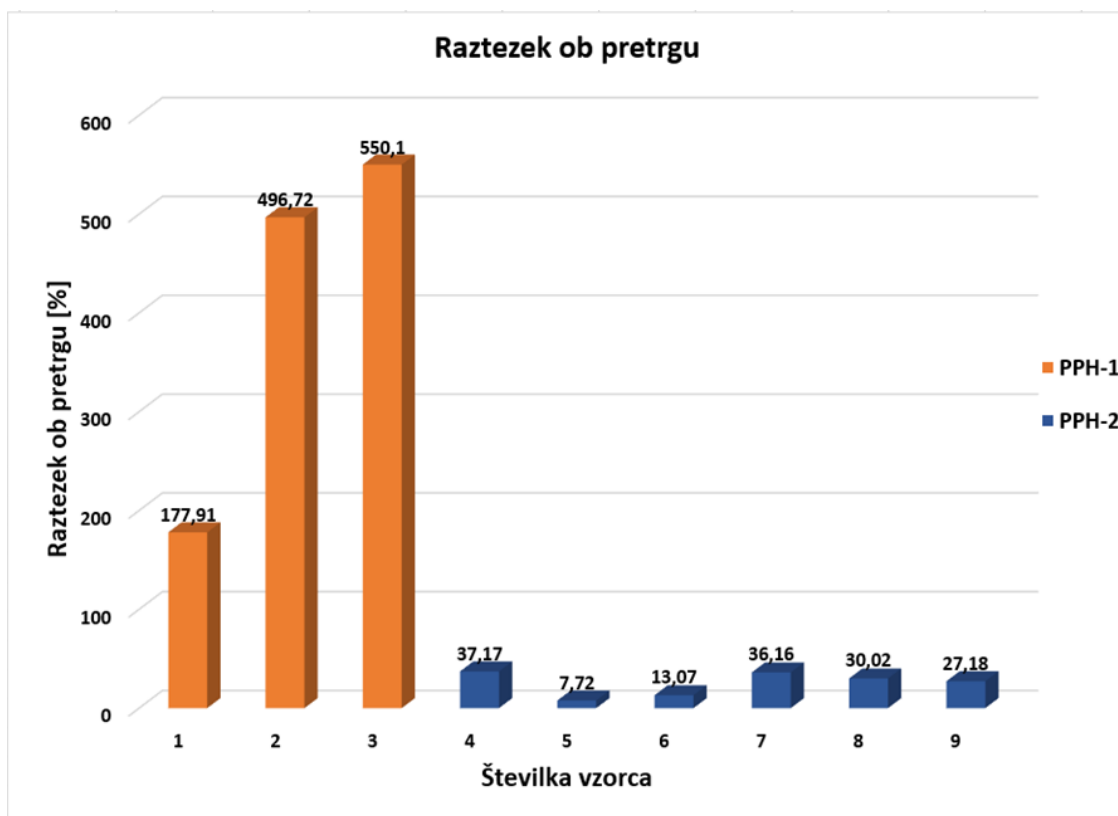
Vrednosti za E modul, natezno trdnost, raztezek ob pretrgu, udarno žilavost, raztezek na meji plastičnosti in temperaturo zmečičišča materiala pri različnih obremenitvah so izražene kot povprečje izmerjenih paralelk posamezne metode preiskave, medtem, ko sta stopnja kristaliničnosti in temperatura tališča izraženi kot enkratna meritev DSC analize posameznega vzorca.



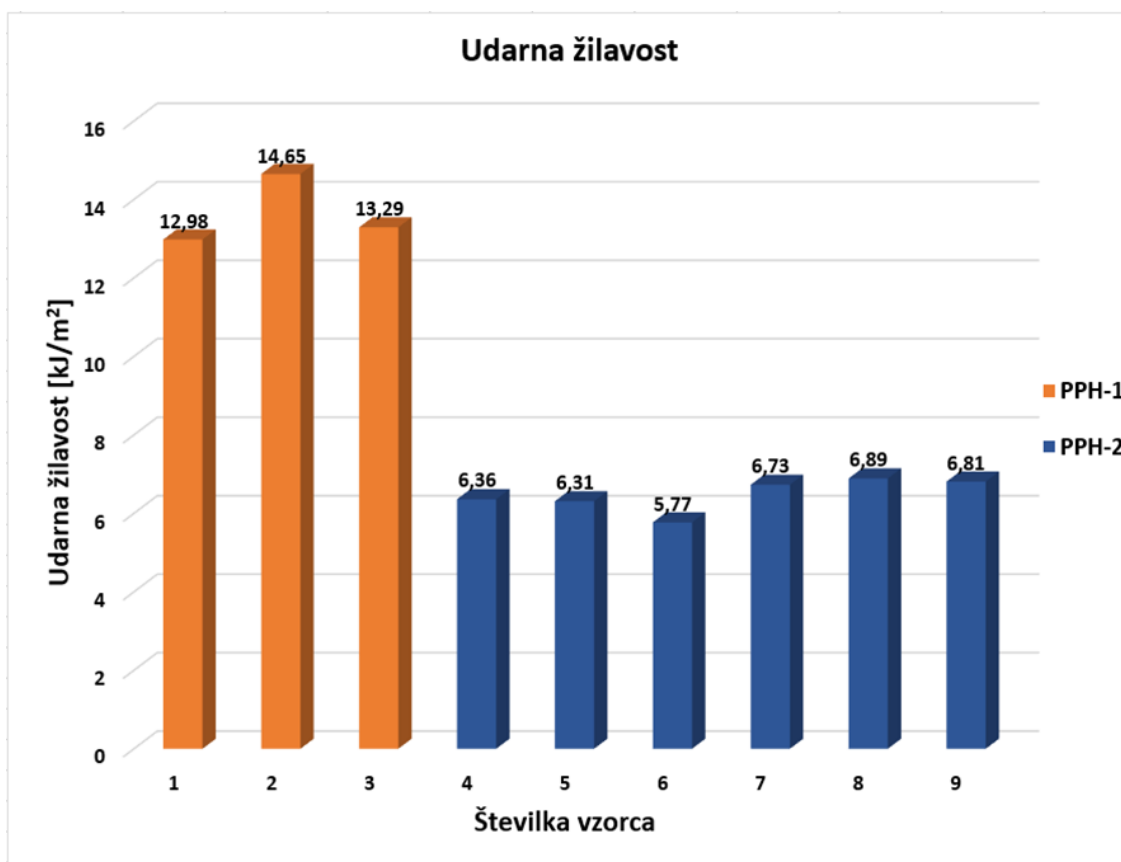
Slika 29: Rezultati meritev E modula



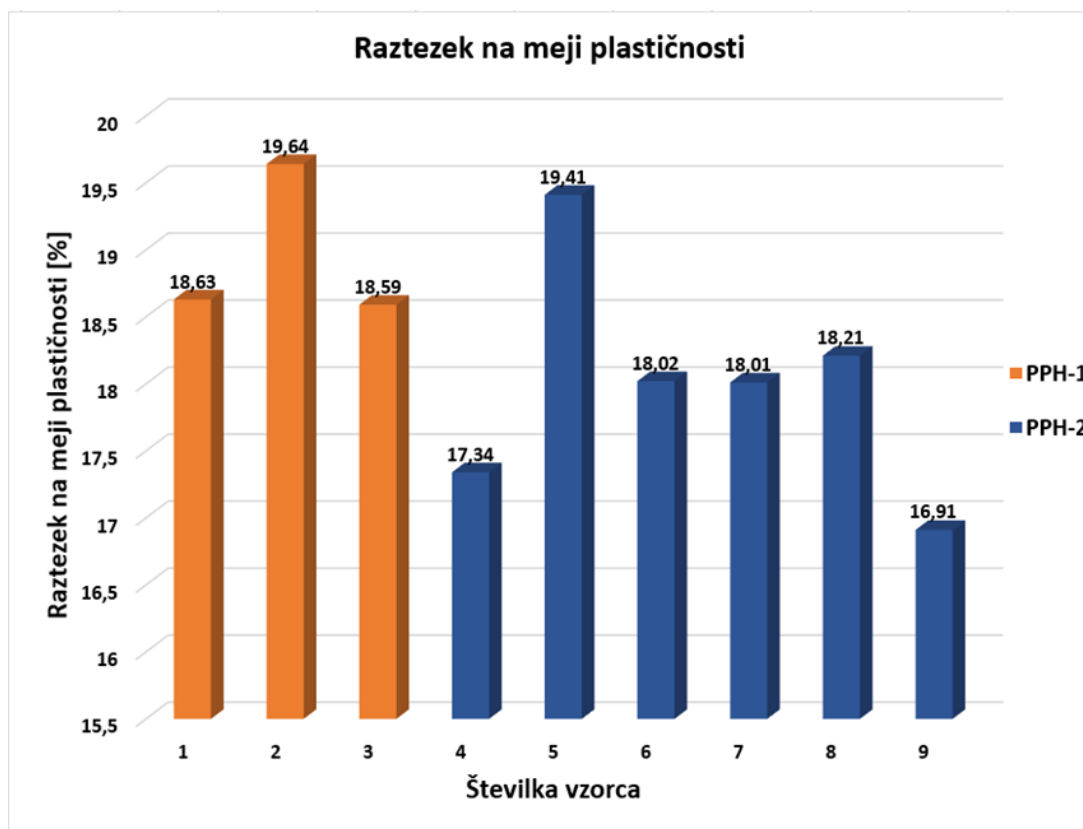
Slika 30: Rezultati meritev natezne trdnosti



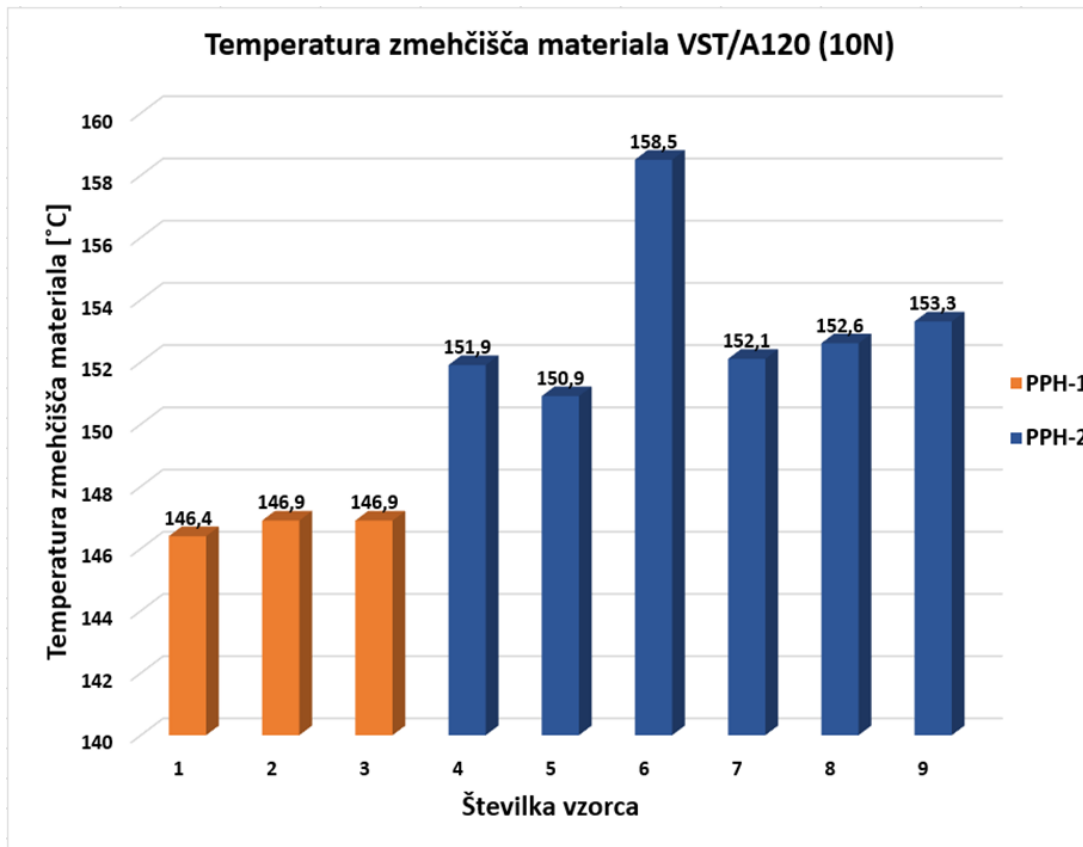
Slika 31: Rezultati meritev raztezka ob pretrgu



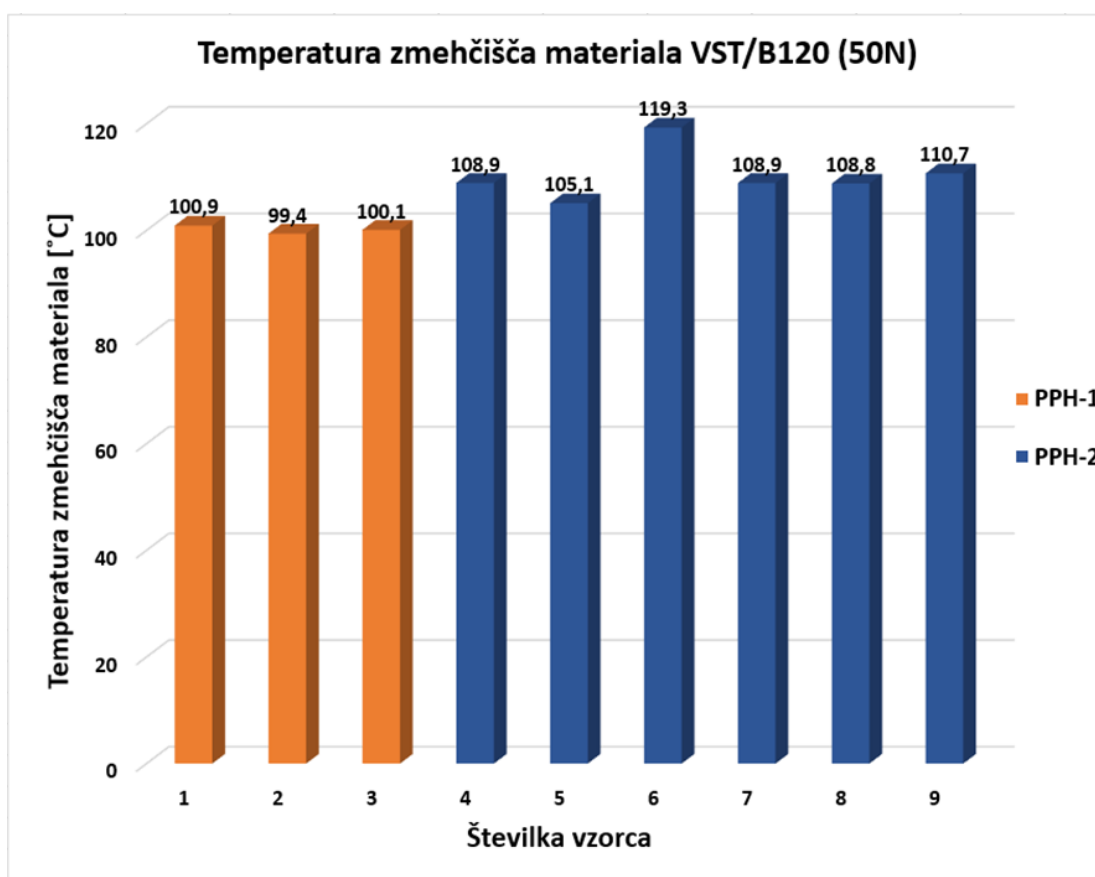
Slika 32: Rezultati meritev udarne žilavosti



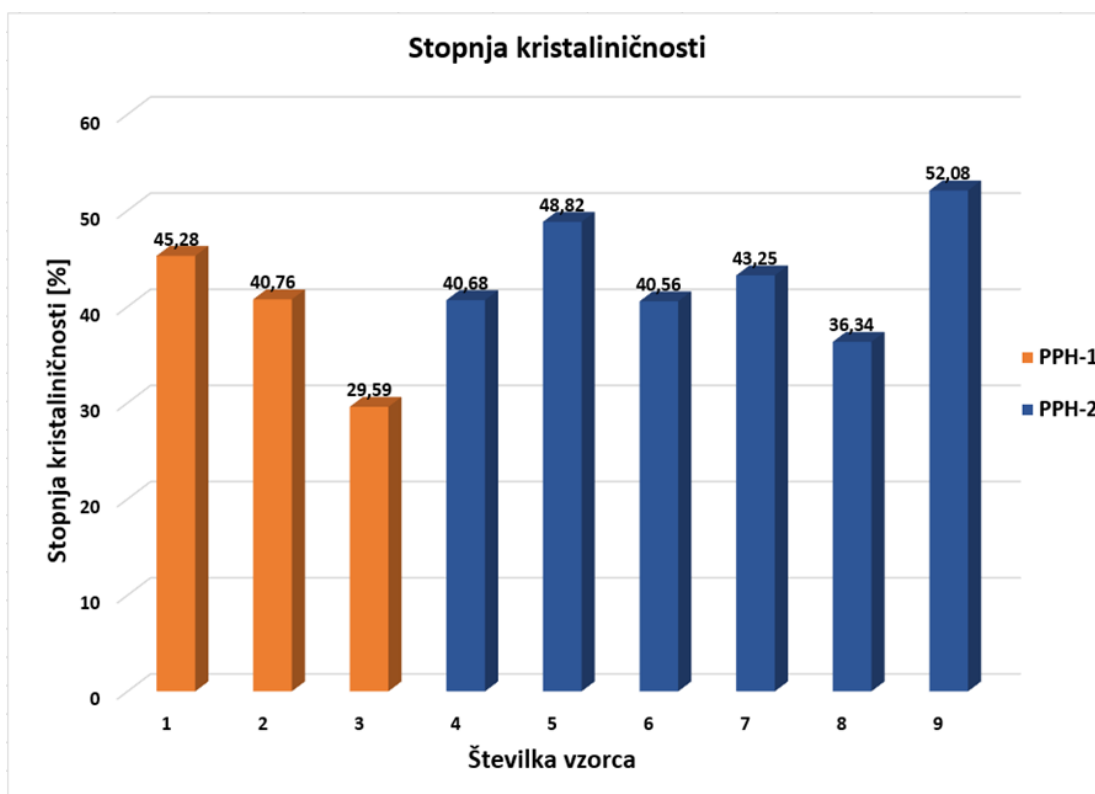
Slika 33: Rezultati meritev raztezka na meji plastičnosti



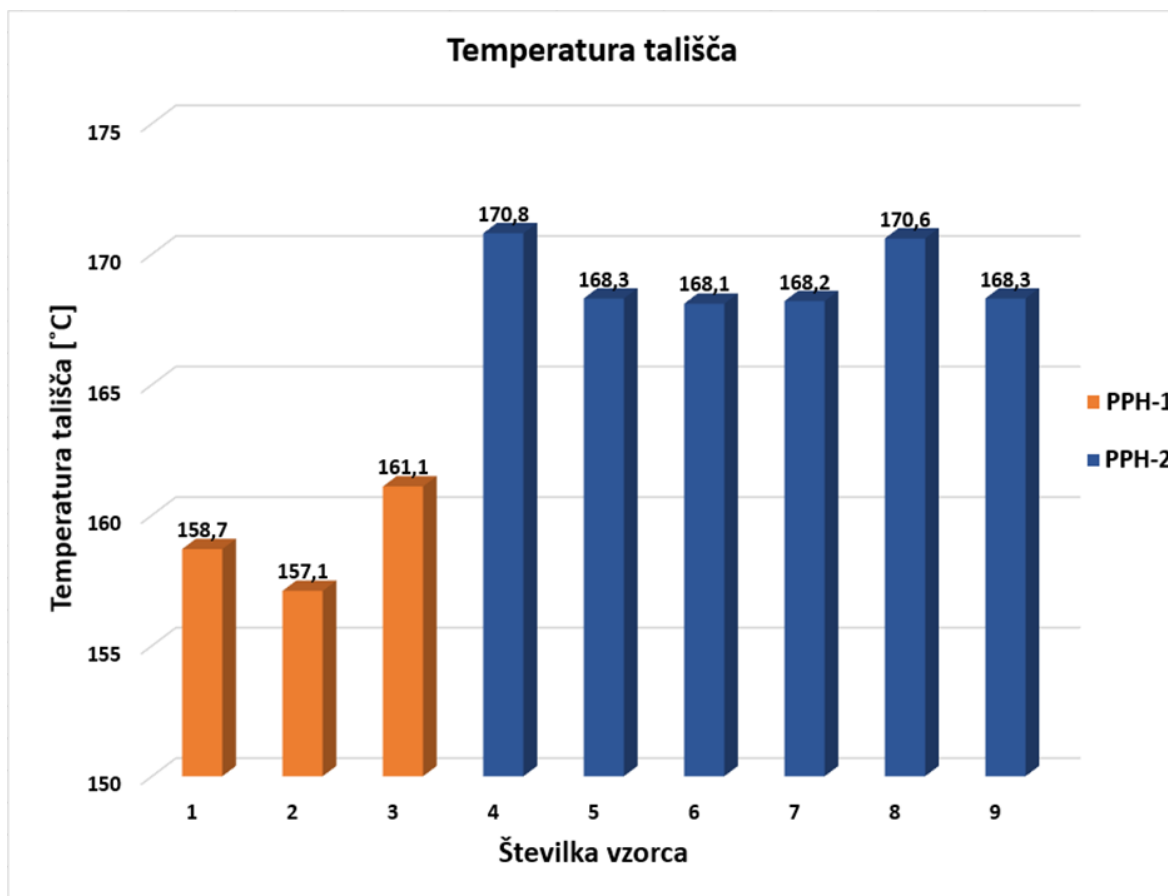
Slika 34: Rezultati meritev temperature zmečičja materiala VST/A120 (10N)



Slika 35: Rezultati meritev temperature zmečišča materiala VST/B120 (50N)



Slika 36: Rezultati meritev stopnje kristaliničnosti

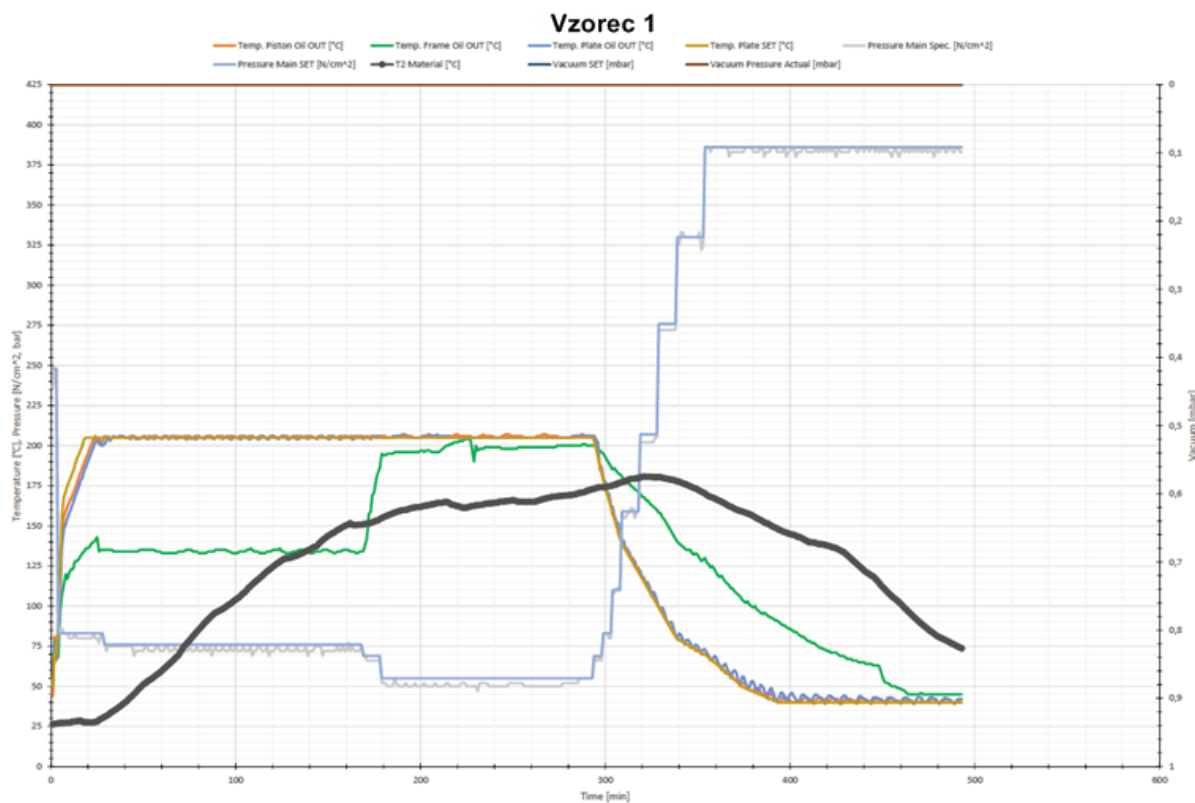


Slika 37: Rezultati meritev temperature tališča

Iz rezultatov preiskav različnih mehanskih in toplotnih lastnosti stiskanih vzorčnih plošč, ki so predstavljeni na slikah od 29 do 37 lahko razberemo, da so izmerjene vrednosti posamezne mehanske oziroma toplotne lastnosti vzorčnih plošč, ki so bile stisnjene iz enakega vhodnega materiala PPH-1 oziroma PPH-2 med seboj primerljive, kar potrjuje našo hipotezo, da je možno s predgretjem termoplastičnega materiala in vakuumskim stiskanjem skrajšati obstoječe proizvodne cikle stiskanja termoplastičnih materialov, s tem prihraniti količino porabljene energije na enoto proizvedenega izdelka, ter povečati kapacitete hidravličnih stiskalnic, hkrati pa se s tem obstoječe mehanske in toplotne lastnosti stiskanih plošč bistveno ne spremenijo.

Vzorčna plošča št. 1, ki se je stisnila iz materiala PPH-1, je bila stisnjena brez predgretja materiala in brez vakuumu. Na ta način smo dobili čas gretja, ki je potreben za proizvodnjo referenčnega vzorca z obstoječo tehnologijo stiskanja, in na osnovi katerega smo lahko kasneje ovrednotili za koliko časa lahko s pomočjo tehnologije predgretja materiala optimiramo obstoječe cikle stiskanja ter primerjali lastnosti stiskanih vzorčnih plošč iz materiala PPH-1.

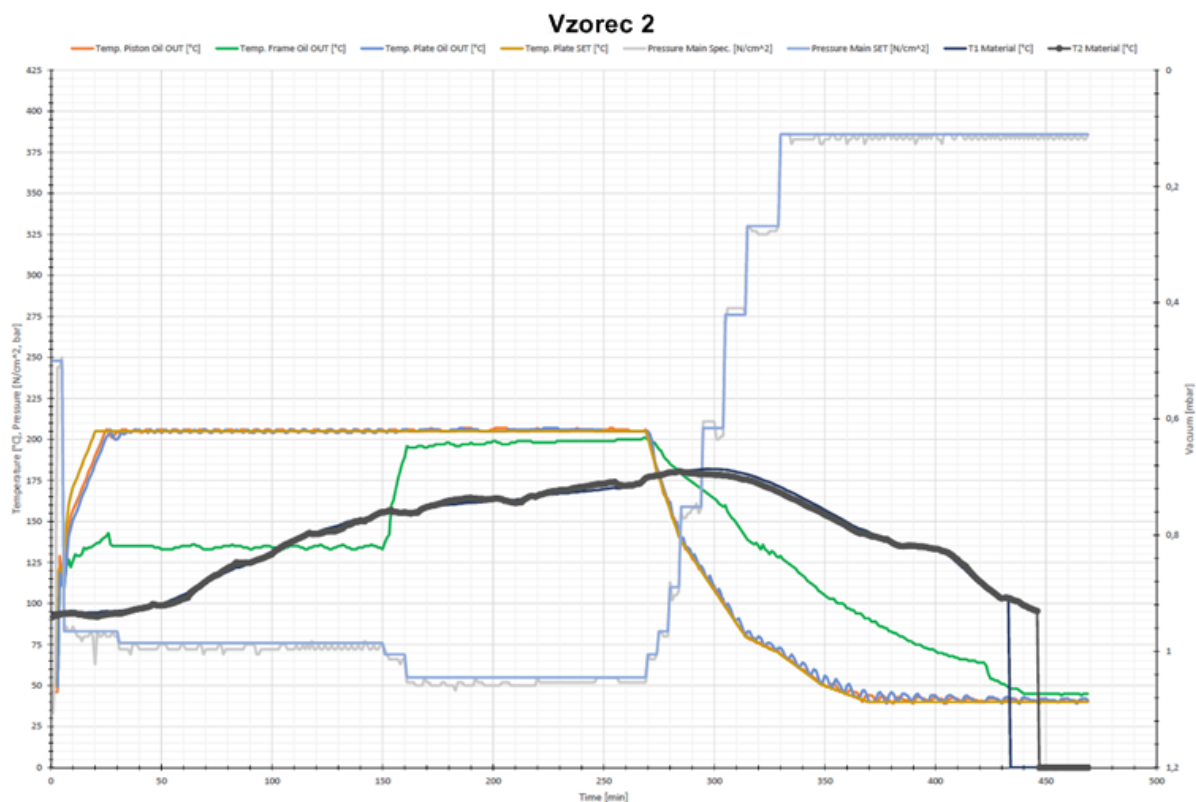
Kot lahko vidimo na sliki 38, je bila temperatura materiala ob nasutju v orodje hidravlične stiskalnice 25 °C, gretje plošče je trajalo 295 minut, hlajenje 200 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 495 minut.



Slika 38: Parametri stiskanja za vzorec 1

Vzorčna plošča 2, ki se je stisnila iz materiala PPH-1, se je izdelala s predgretjem materiala na temperaturo 100 °C in brez vakuuma. Kot lahko vidimo na sliki 39, je imel material po nasutju v orodje stiskalnice temperaturo 95 °C, kar pomeni, da se je temperatura materiala med manipulacijo materiala iz sušilnika za predgretje v orodje hidravlične stiskalnice znižala za 5 °C. Gretje plošče je trajalo 270 minut, hlajenje 200 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 470 minut.

S pomočjo predgretja materiala na temperaturo 100 °C smo torej v tem primeru za 25 minut oziroma slabih 10 % skrajšali čas gretja materiala v orodju hidravlične stiskalnice ter s tem povečali obstoječo kapaciteto stiskalnice.

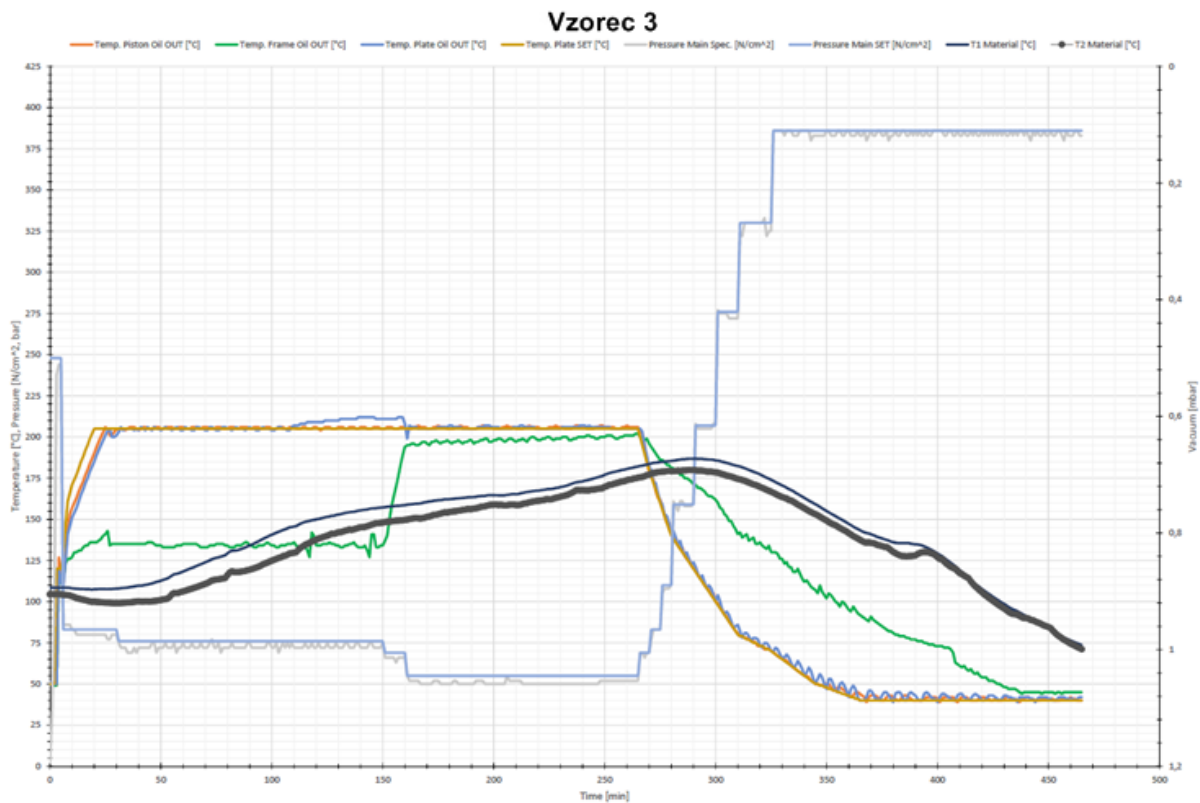


Slika 39: Parametri stiskanja za vzorec 2

Kot lahko razberemo iz rezultatov na slikah 29 do 37, so mehanske in toplotne lastnosti vzorčne plošče št. 2, ki je bila stisnjena s pomočjo predgretja materiala v veliki meri primerljive z referenčno vzorčno ploščo št. 1, ki je bila stisnjena brez predgretja materiala, kar pomeni, da predgretje materiala in posledično skrajšanje obstoječega cikla stiskanja ne vpliva na mehanske in toplotne lastnosti stisnanih plošč, lahko pa s predgretjem materiala pomembno vplivamo na čas cikla stiskanja ter s tem optimiramo obstoječ proizvodni proces. Pri izmerjenih vrednostih izstopa raztezek ob pretrgu, ki se je iz predhodnih 177,91 % povečal na 496,7 %.

Vzorčna plošča 3, ki smo jo stisnili iz materiala PPH-1, se je izdelala s predgretjem materiala na temperaturo 110 °C in brez vakuumu. Kot lahko vidimo na sliki 40, je imel material po nasutju v orodje stiskalnice temperaturo 105 °C. Gretje plošče je trajalo 265 minut, hlajenje 200 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 465 minut.

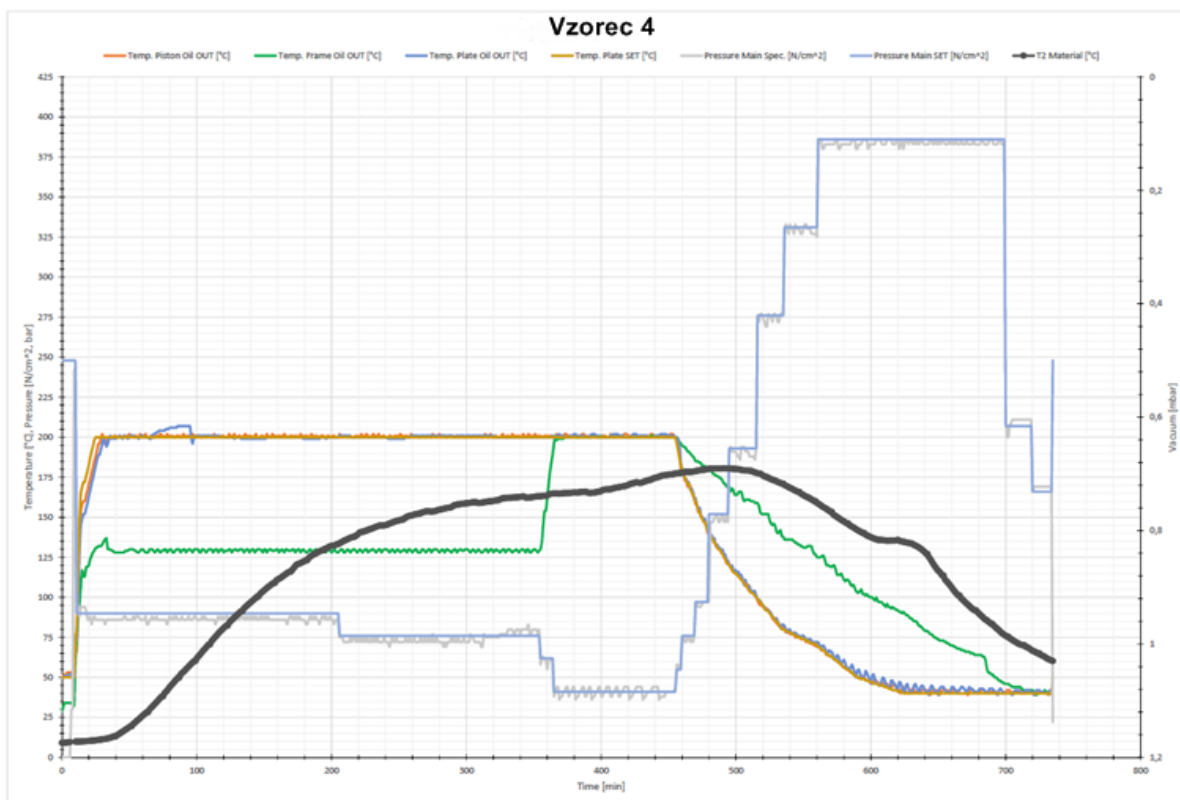
Podobno kot pri vzorčni plošči 2, se v primerjavi z referenčno vzorčno ploščo 1, ki je bila stisnjena brez predgretja materiala tudi pri vzorčni plošči 3 izmerjene vrednosti mehanskih in toplotnih lastnosti niso bistveno spremenile, malenkost so se izboljšale vrednosti E modula, raztezka ob pretrgu, udarne žilavosti in temperatura tališča. Izstopa predvsem raztezek ob pretrgu, ki se je iz predhodnih 177,91 % povečal na 550,1 %.



Slika 40: Parametri stiskanja za vzorec 3

Vzorčna plošča 4, ki se je stisnila iz materiala PPH-2, je bila stisnjena brez predgretja materiala in brez vakuuma. Na ta način smo dobili čas gretja, ki je potreben za proizvodnjo plošče z obstoječo tehnologijo stiskanja in služi kot referenca za preostale vzorčne plošče št. 5 do 9, ki so bile stisnjene iz materiala PPH-2 ter na osnovi katere smo lahko kasneje ovrednotili, za koliko časa lahko skrajšamo obstoječe cikle stiskanja v primeru uporabe tehnologije predgretja materiala in vakuumskega stiskanja plošč.

Kot je prikazano na sliki 41, je bila temperatura materiala ob nasutju v orodje stiskalnice 10 °C, gretje plošče je trajalo 460 minut, hlajenje 280 minut, skupno pa je cikel stiskanja v hidravlični stiskalnici trajal 740 minut.

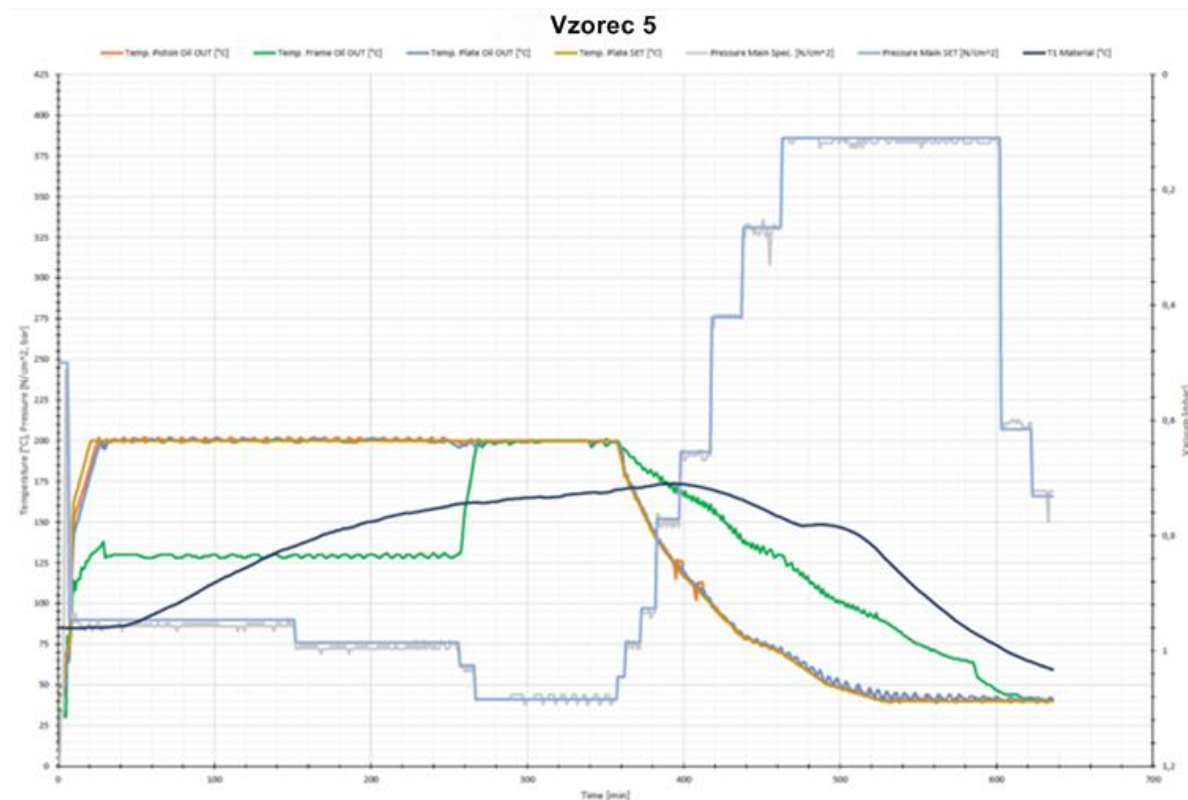


Slika 41: Parametri stiskanja za vzorec 4

Vrednosti različnih lastnosti vzorčne plošče 4, ki smo jih analizirali v okviru eksperimentalnega dela, so predstavljene na slikah od 29 do 37. Kot lahko razberemo je bila vrednost E modula 1,564 GPa, natezna trdnost je znašala 34,72 MPa, raztezek ob pretrgu je bil 37,17 %, raztezek na meji plastičnosti 17,34 %, udarna žilavost vzorca pa je znašala 6,36 kJ/m². Stopnja kristaliničnosti referenčne vzorčne plošče 4 je znašala 40,68 %, temperatura tališča pa 170,8 °C. Temperatura zmehčišča je pri obremenitvi 10 N znašala 151,9 °C, pri obremenitvi 50 N pa 108,9 °C.

Lastnosti referenčne vzorčne plošče št. 4, ki je bila stisnjena z obstoječo tehnologijo brez predgretja materiala in vakuumskega stiskanja, smo v nadaljevanju primerjali z vrednostmi ostalih vzorčnih plošč, ki so bile stisnjene s predgretjem materiala ter z uporabo vakuuma.

Vzorčna plošča 5, ki smo jo stisnili iz materiala PPH-2, se je izdelala s predgretjem materiala na temperaturo 90 °C in brez vakuuma. Kot lahko vidimo na sliki 42, je imel material po nasutju v orodje stiskalnice temperaturo 85 °C, kar pomeni, da se je temperatura med manipulacijo materiala iz sušilnika v orodje stiskalnice znižala za 5 °C, podobno kot pri preostalih vzorcih, kjer smo uporabili predgreti material. Skupno je gretje plošče trajalo 360 minut, hlajenje 280 minut, celoten cikel stiskanja pa je trajal 640 minut. S pomočjo predgretja materiala na temperaturo 90 °C smo torej za 100 minut oziroma slabih 22 % skrajšali čas gretja materiala v orodju hidravlične stiskalnice ter s tem povečali morebitno kapaciteto stiskalnice.



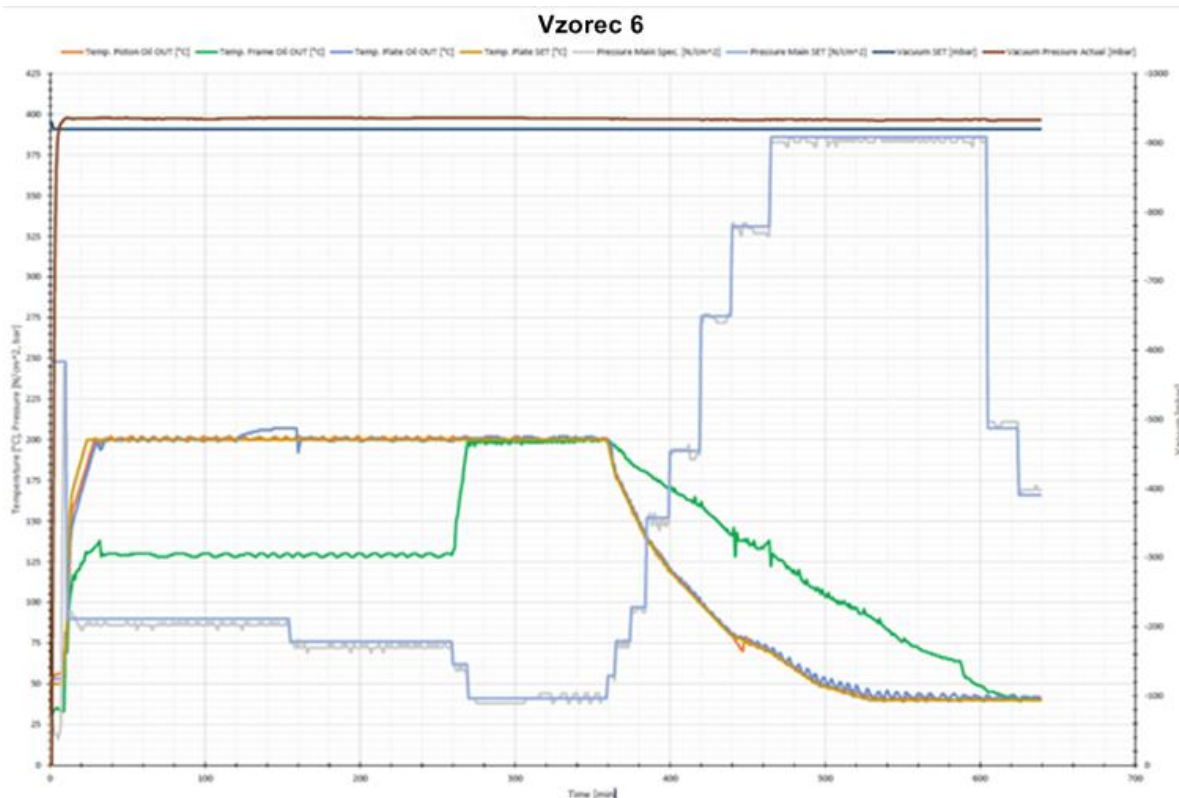
Slika 42: Parametri stiskanja za vzorec 5

Če primerjamo izmerjene vrednosti različnih lastnosti vzorčnih plošč 4 in 5 lahko vidimo, da so se v primerjavi z referenčnim vzorcem 4, ki je bil stisnjen brez predgretja materiala pri vzorcu 5, ki je bil stisnjen s pomočjo predgretja materiala, malenkostno zvišale vrednosti E modula, natezne trdnosti, raztezka na meji plastičnosti, višja pa je tudi stopnja kristaliničnosti.

Ostale vrednosti, kot so temperatura tališča in temperatura zmehčišča materiala pri različnih obremenitvah so se pri vzorcu 5 malenkost znižale, vrednosti udarne žilavosti pa sta skoraj enaki. Vrednosti mehanskih in toplotnih lastnosti vzorca 5 so torej primerljive z referenčnim vzorcem št. 4, kar pomeni, da predgretje materiala ne vpliva na mehanske in toplotne lastnosti stisanih plošč in potrjuje, da je tehnologija primerna za optimizacijo ciklov stiskanja materiala PPH.

Vzorčna plošča 6, ki je bila stisnjena iz materiala PPH-2 materiala, se je izdelala s predgretjem materiala in z uporabo vakuum. Material smo predgrel na temperaturo 90 °C, po nasutju v orodje stiskalnice pa je imel material začetno temperaturo 85 °C.

Na sliki 43 lahko vidimo vrednosti temperatur, tlaka in vakuum skozi celoten cikel stiskanja vzorčne plošče 6. Gretje plošče je trajalo 360 minut, hlajenje 280 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 640 minut.



Slika 43: Parametri stiskanja za vzorec 6

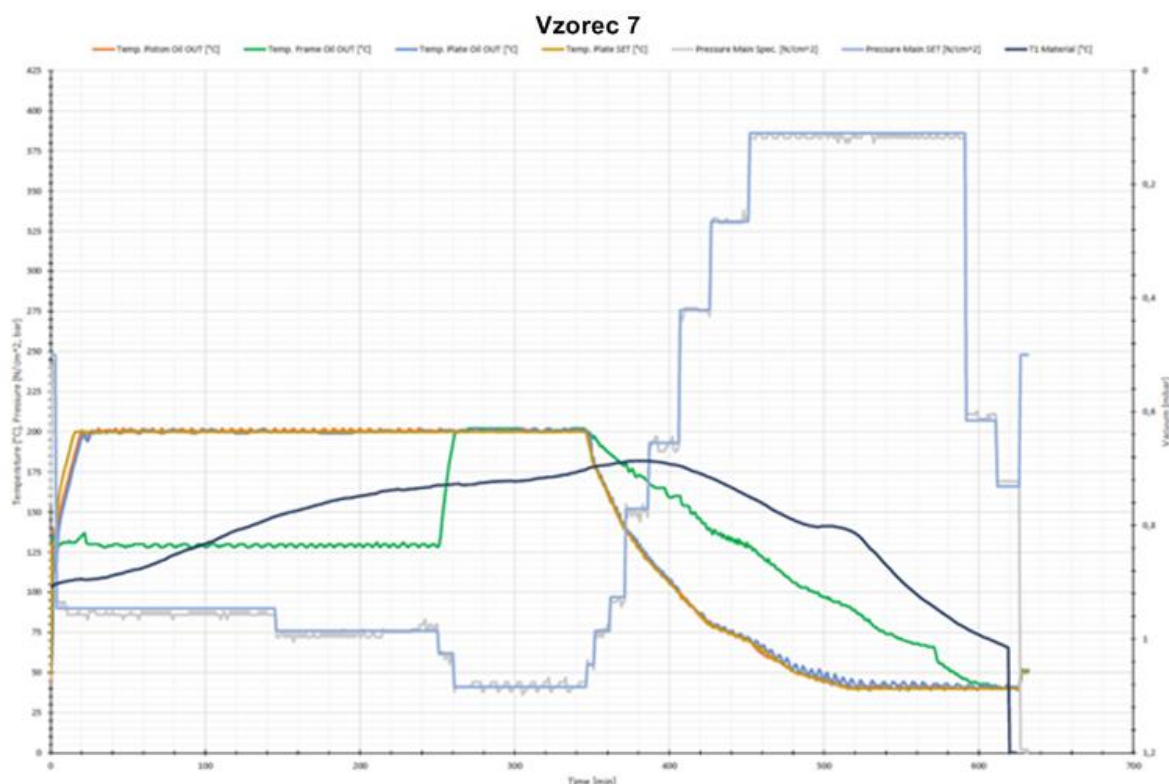
Vzorčna plošča 6 se je stisnila z enakimi parametri in s predgretjem materiala na enako temperaturo kot vzorčna plošča 5, dodatno pa se je ob stiskanju uporabil še vakuum.

Kot lahko primerjamo iz rezultatov na slikah od 29 do 37 se je s predgretjem materiala in uporabo vakuuma povišala vrednost raztezka ob pretrgu, prav tako pa sta višji tudi obe temperaturi zmečičišča materiala pri različnih obremenitvah. Raztezek ob pretrgu se je iz predhodnih 7,72 % povečal na 13,07 %, temperatura zmečičišča materiala pri obremenitvi 10 N se je zvišala za 7,6 °C, pri obremenitvi 50 N pa za 14,3 °C.

Vrednosti E modula, natezne trdnosti, udarne žilavosti in temperature tališča so malenkost nižje kot pri vzorcu 5, vendar se niso bistveno spremenile. Če primerjamo lastnosti vzorčnih plošč 5 in 6 ugotovimo, da so vrednosti mehanskih in toplotnih lastnosti med seboj primerljive, kar pomeni, da je uporaba vakuuma primerna za tehnologijo stiskanja termoplastičnih plošč.

Vzorčna plošča 7, ki smo jo stisnili iz materiala PPH-2, se je izdelala s predgretjem materiala na temperaturo 110 °C in brez vakuuma. Kot lahko vidimo na sliki 44, je temperatura materiala po nasutju v orodje znašala 105 °C, gretje plošče je trajalo 350 minut, hlajenje 280 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 630 minut.

Če primerjamo čas gretja vzorčnih plošč 5 in 7, smo s predgretjem materiala za dodatnih 20 °C višjo temperaturo čas gretja materiala v orodju hidravlične stiskalnice skrajšali še za dodatnih 10 minut.



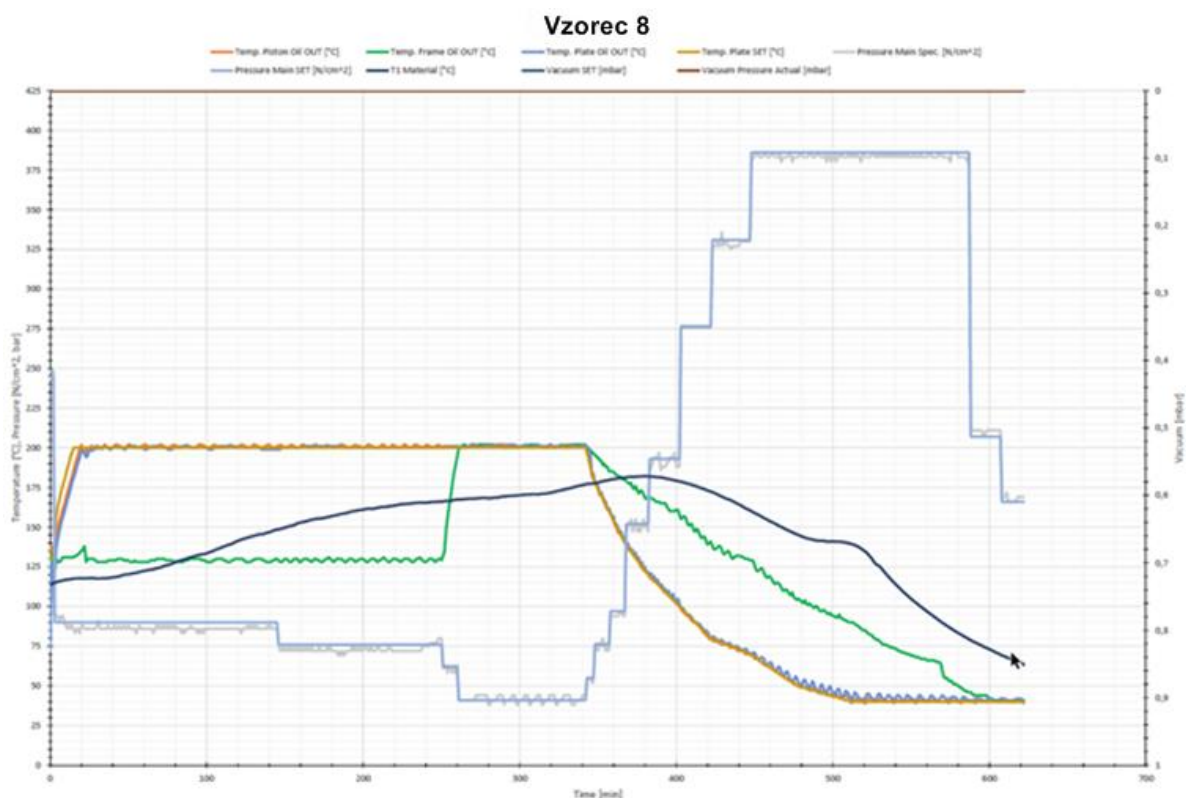
Slika 44: Parametri stiskanja za vzorec 7

V primerjavi z referenčno vzorčno ploščo 4, ki je bila stisnjena brez predgretja materiala, se je pri vzorčni plošči 7, s predgretjem materiala izboljšala večina preučevanih mehanskih in toplotnih lastnosti, ki so predstavljene na slikah 29 do 37.

Glede na izmerjene vrednosti mehanskih in toplotnih lastnosti vzorca 4 in 7, ki so med seboj primerljive, lahko še dodatno potrdimo, da je tehnologija predgretja materiala primerna za uporabo v proizvodnji stiskanih plošč, saj se z njo večina mehanskih in toplotnih lastnosti stiskanih plošč ne spremeni, s predgretjem materiala pa se skrajšajo obstoječi cikli stiskanja in poveča kapaciteta stiskalnic.

Vzorčna plošča 8, ki smo jo stisnili iz materiala PPH-2, se je izdelala iz materiala, ki je bil predgret na temperaturo 120 °C in brez vakuuma. Kot je prikazano na sliki 45, je imel material ob nasutju v orodje stiskalnice temperaturo 115 °C, gretje plošče je trajalo 330 minut, hlajenje 280 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 610 minut.

S predgretjem materiala na 120 °C se je še za dodatnih 20 minut skrajšalo gretje materiala v orodju hidravlične stiskalnice, skupno pa smo v primerjavi z referenčnim vzorcem št. 4, ki je bil stisnjen brez predgretja materiala čas gretja v stiskalnici skrajšali za 130 minut oziroma 28,3 %. Skupni čas cikla stiskanja se je skrajšal za 17,6 %.

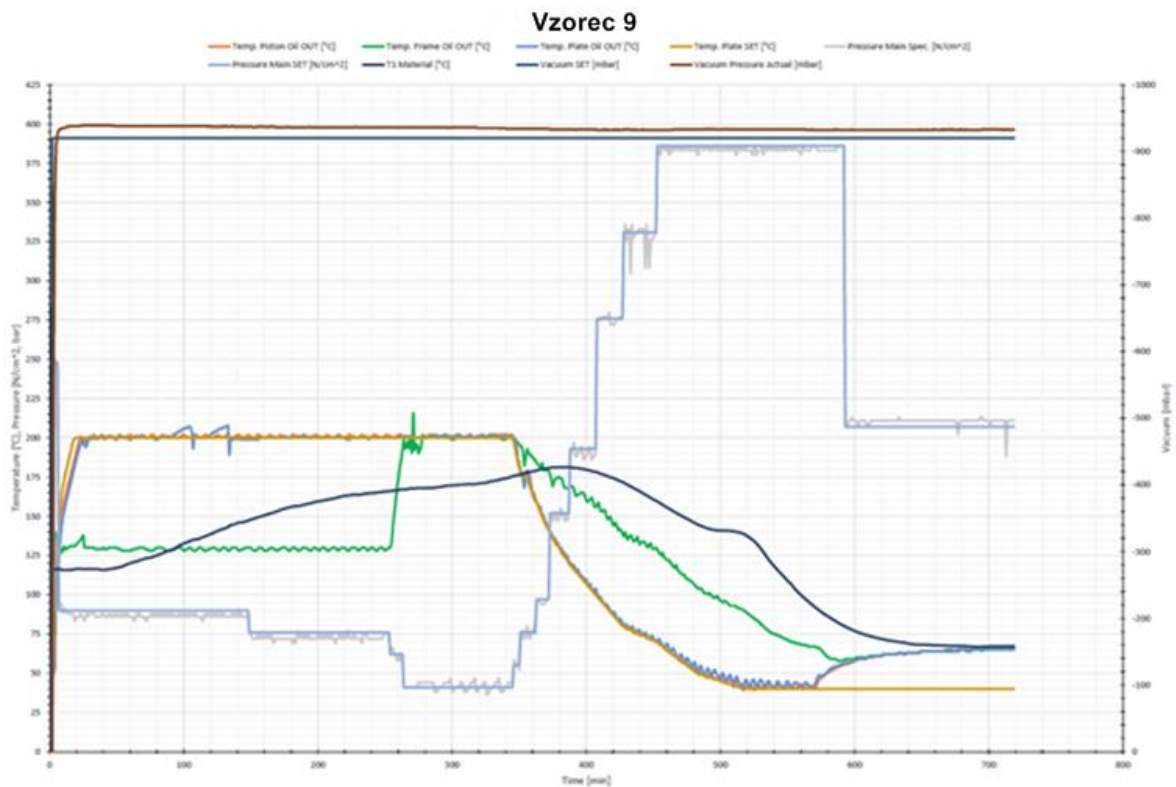


Slika 45: Parametri stiskanja za vzorec 8

Tudi pri vzorčni plošči 8 se je v primerjavi z referenčno vzorčno ploščo 4, ki je bila stisnjena brez predgretja materiala zvišala vrednost udarne žilavosti, višji pa sta tudi vrednosti raztezka na meji plastičnosti in temperatura zmehčišča materiala pri obremenitvi 10 N. Ostale vrednosti so se malenkost znižale oziroma so ostale skoraj nespremenjene. Kot lahko vidimo so tudi mehanske in toplotne lastnosti vzorca 8 primerljive z vrednostmi referenčnega vzorca, kar pomeni, da predgretje materiala bistveno ne vpliva na mehanske in toplotne lastnosti stiskanih plošč, lahko pa s predgretjem materiala skrajšamo čas obstoječih ciklov stiskanja.

Vzorčna plošča 9, ki smo jo stisnili iz materiala PPH-2, se je izdelala iz materiala, ki je bil predgret na temperaturo 120 °C in z uporabo vakuuma. Kot lahko vidimo na sliki 46, je imel material ob nasutju v orodje stiskalnice temperaturo 115 °C, gretje plošče je trajalo 345 minut, hlajenje 280 minut, skupno pa je cikel stiskanja trajal 625 minut.

Če primerjamo čas gretja vzorca 8 in 9, pri katerih je bil material predgret na enako temperaturo 120 °C, lahko opazimo, da se je pri vzorcu 9 gretje plošče v hidravlični stiskalnici podaljšalo za 15 minut. To lahko pripišemo vakuumu, ki je dober izolator, slabša pa je tudi toplotna prevodnost, zaradi česar smo za doseganje želene temperature materiala v notranjosti nasipne višine potrebovali več časa.



Slika 46: Parametri stiskanja za vzorec 9

Vzorčna plošča 9 se je stisnila z enakimi parametri in s predgretjem materiala na enako temperaturo kot vzorčna plošča 8, dodatno pa se je ob stiskanju uporabil še vakuum.

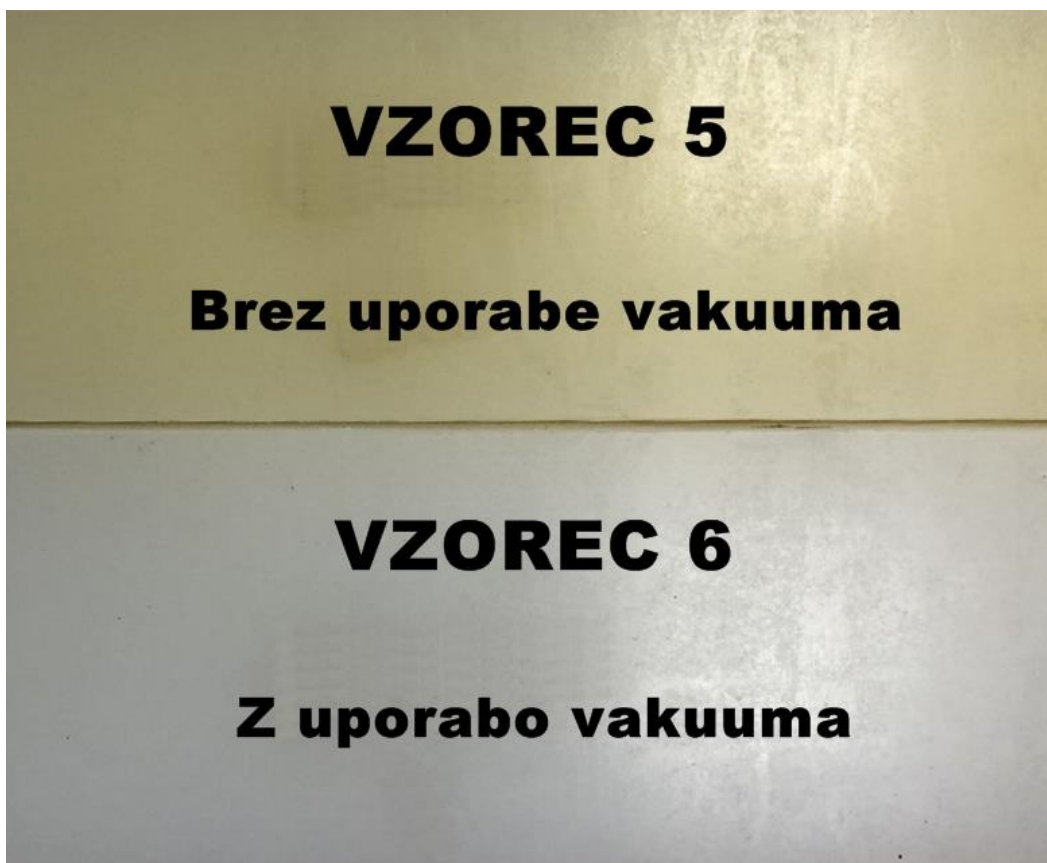
Kot lahko vidimo na slikah od 29 do 37, se je s predgretjem materiala in uporabo vakuuma malenkost izboljšala vrednost E modula, stopnja kristaliničnosti se je iz predhodnih 36,34 % zvišala na 52,08 %, višji pa sta tudi temperaturi zmehčišča materiala pri obeh obremenitvah 10 in 50 N.

Ostale vrednosti mehanskih in toplotnih lastnosti so malenkost nižje, ampak še vedno primerljive z vrednostmi referenčnega vzorca, kar še dodatno potrjuje, da tehnologija predgretja materiala in vakuumskega stiskanja bistveno ne vpliva na mehanske in toplotne lastnosti stisanih plošč, lahko pa z njo pomembno vplivamo na skrajšanje obstoječih proizvodnih ciklov stiskanja termoplastičnega materiala.

Iz rezultatov meritev različnih lastnosti stisanih plošč, ki so se proizvedle z uporabo predgretja materiala in vakuumskega stiskanja, lahko razberemo, da so se s predgretjem materiala pri večini vzorcev nekoliko izboljšale vrednosti udarne žilavosti. To je lahko posledica nižje stopnje kristaliničnosti, ki je odvisna tudi od procesnih parametrov predelave termoplastičnega materiala (tlaka, temperature, časa). Nižja stopnja kristaliničnosti je lahko posledica krajšega časa gretja, s čimer je na voljo manj časa, da se molekule uredijo, prav tako pa je bil material manj časa izpostavljen tlaku hidravlične stiskalnice.

Na vrednosti udarne žilavosti lahko vplivajo tudi praznine oziroma zračni mehurčki (mikroporoznost) v materialu, ki so lahko zaradi predgretja materiala, s čimer lahko odstranimo absorbirano vlago materiala iz ozračja, manj intenzivni. Prav tako so se pri večini vzorcev, ki so bili stisnjeni s predgretjem materiala izboljšale vrednosti E modula in raztezka na meji plastičnosti. E modul je povezan s temperaturo tališča, zato lahko opazimo, da ima material PPH-2, ki ima višjo temperaturo tališča tudi višje vrednosti E modula kot material PPH-1.

Pri vzorcih, kjer smo v proces stiskanja poleg predgretja materiala vključili še uporabo vakuuma, so se dodatno zvišale še temperature zmehčišča materiala pri obeh obremenitvah. K temu bi lahko pripomogla bolj homogena in kompaktna struktura materiala brez prisotnosti zraka med samim procesom predelave ter manjša mikroporoznost končne stiskane plošče. Prav tako smo opazili nižjo oksidacijo materiala, saj smo ob uporabi vakuuma proizvedli stiskane plošče, ki so bile bolj bele barve kot sicer, kar je prikazano na sliki 47.



Slika 47: Vizualna primerjava vzorcev stisnjenih brez in z vakuumom

Ugotavljamo, da so prednosti stiskanja s pomočjo predgretja materiala in uporabo vakuuma bolj homogena struktura, ki daje malenkostno boljše mehanske lastnosti stisnjenih plošč ter krajši časi zapiranja stiskalnice, saj so zaradi izsesanega zraka onemogočeni veliki pretoki zraka skozi režo med batom in modelom orodja, ki lahko povzročijo izpih materiala.

Ker nekateri materiali vsebujejo aditive, ki lahko ob prisotnosti visoke temperature in kisika oksidirajo, je z vakuumskih stiskanjem znatno zmanjšana možnost oksidacije in posledično degradacije materiala, prav tako pa lahko s takšnim pristopom stiskamo tudi zelo tanke plošče (do debeline 3 mm) ter optimiramo proizvodne cikle, kjer se pojavljajo problemi s prisotnostjo zraka v orodju hidravlične stiskalnice ali v materialu.

Slabost vakuuma je lahko nižja toplotna prevodnost, zaradi česar se lahko podaljša čas gretja materiala v orodju hidravlične stiskalnice, kar smo zaznali tudi v našem primeru, kjer se je ob uporabi vakuuma in enakih pogojih stiskanja ter predgretja materiala kot pri vzorcu 8, pri vzorcu 9 čas gretja materiala v stiskalnici podaljšal za 15 minut oziroma približno 5 % časa gretja.

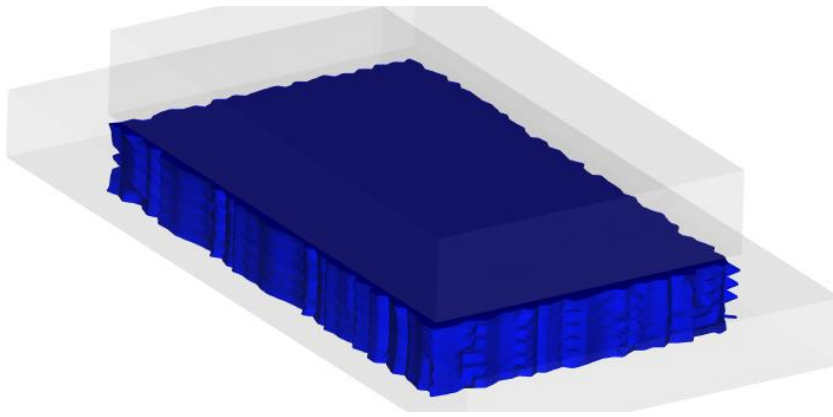
4.2 Parametri simulacij stiskanja

Za izvedbo simulacij smo v programskem vmesniku nastavili enake vrednosti posameznih procesnih parametrov stiskanja termoplastičnega materiala, kot so bili določeni v programu hidravlične stiskalnice pri eksperimentalnem delu ob stiskanju vzorčne plošče iz materiala PPH-1 brez predgretja in vakuumskega stiskanja.

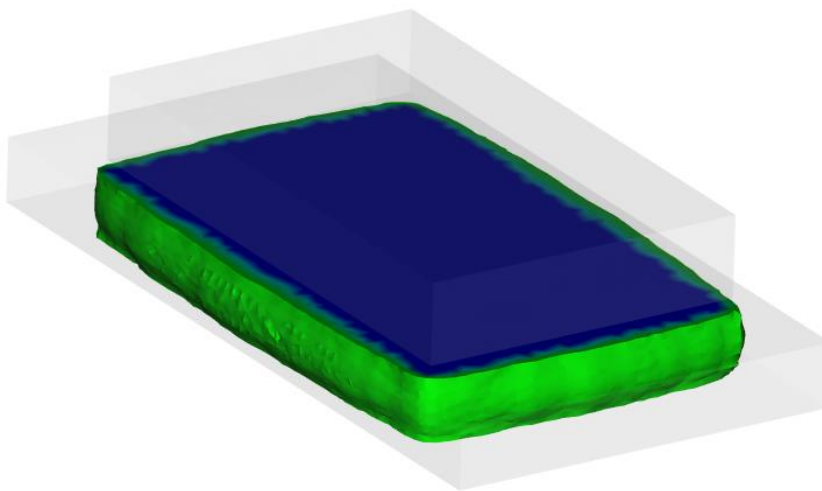
Programska oprema AMI omogoča simulacije tehnologije stiskanja po principu polnjenja (ekstrudiranja) in stiskanja že staljenega termoplastičnega materiala v orodje hidravlične stiskalnice ter naknadnega hlajenja, kar je drugačna tehnologija, kot je bila uporabljena pri eksperimentalnem delu magistrskega dela in katera se uporablja v serijski proizvodnji podjetja. Z omenjeno tehnologijo bi lahko v prihodnje optimirali obstoječe cikle stiskanja, saj gretje materiala v hidravlični stiskalnici ne bi bilo več potrebno, izvedlo pa bi se samo polnjenje staljenega termoplastičnega materiala v orodje hidravlične stiskalnice, stiskanje in hlajenje. S tem bi lahko obstoječe cikle stiskanja skrajšali za približno 60 %, kolikor znaša delež faze gretja, hkrati pa bi se s tem povečala kapaciteta stiskalnic.

Pri eksperimentalnem delu smo v orodje stiskalnice nasuli vhodni material PPH-1 v obliki granul, temperaturo tališča termoplastičnega materiala pa smo nato dosegli s pomočjo gretja v samem orodju hidravlične stiskalnice. Ker s pomočjo omenjene programske opreme takšnega tehnološkega postopka ni možno simulirati v celoti, smo lahko izvedli simulacijo samo nekaterih faz procesa.

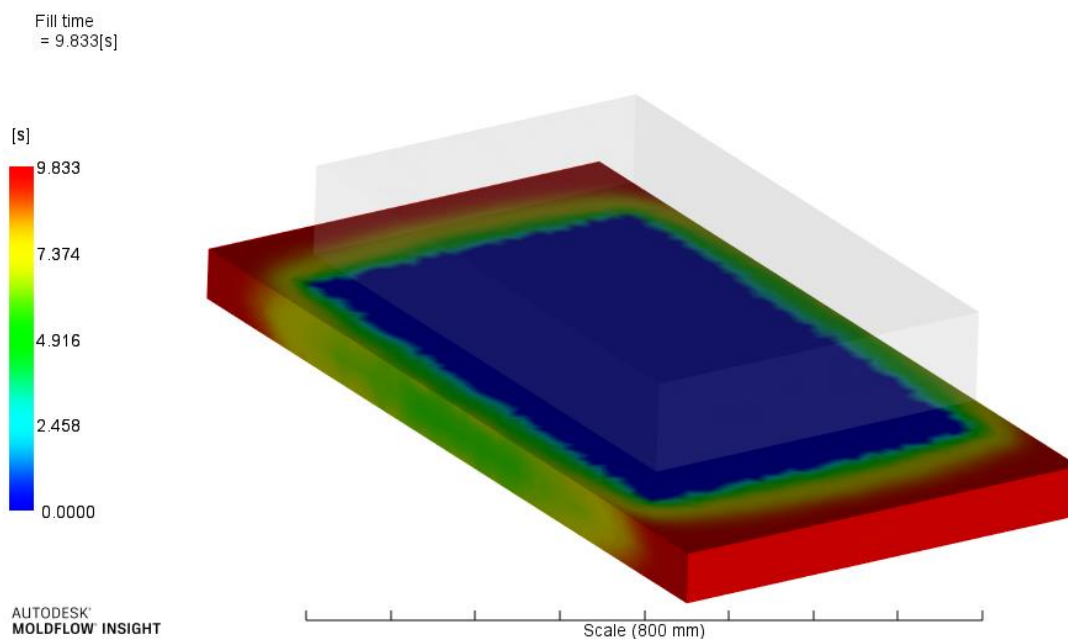
Numerične simulacije polnjenja staljenega termoplastičnega materiala PPH-1 v orodje hidravlične stiskalnice so prikazane na slikah od 48 do 50. Na sliki 48 je prikazan volumen staljenega termoplastičnega materiala v začetku faze polnjenja, na sliki 49 je volumen materiala na polovici časa polnjenja, na sliki 50 pa je prikazan volumen staljenega termoplastičnega materiala v orodju hidravlične stiskalnice po koncu faze polnjenja. Kot lahko razberemo iz rezultatov simulacij na sliki 50, polnjenje potrebne mase staljenega termoplastičnega materiala, za zahtevano končno debelino stiskane plošče v orodje stiskalnice, ob upoštevanih parametrih traja približno 10 s, v tem času se zapolni celotna orodna votlina.



Slika 48: Volumen staljenega termoplastičnega materiala v začetku polnjenja

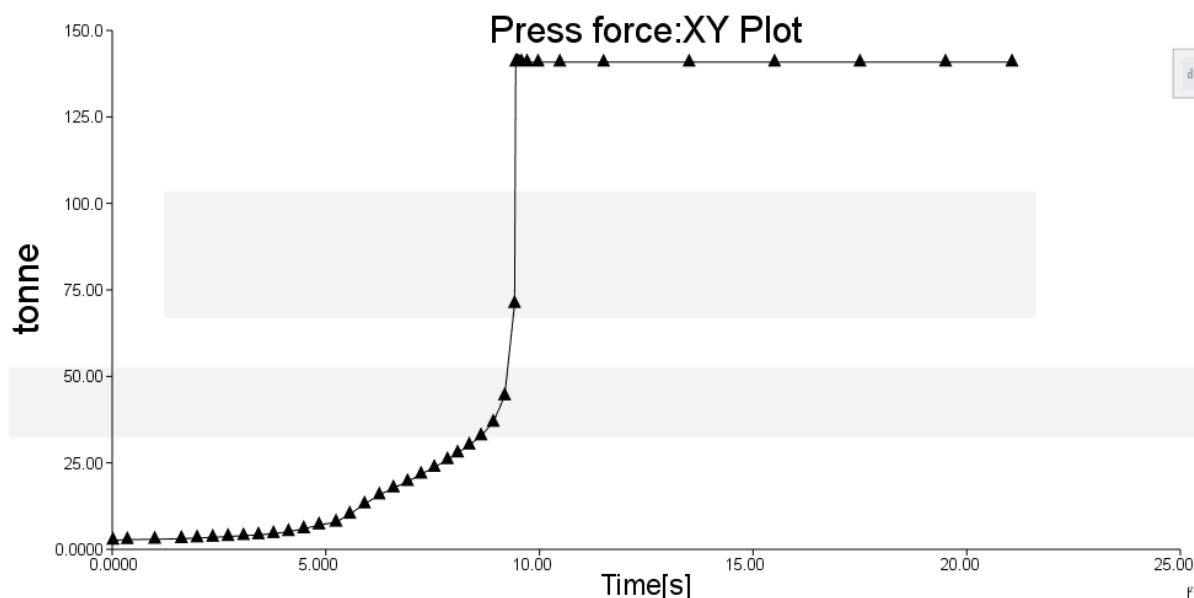


Slika 49: Volumen staljenega materiala na polovici časa polnjenja



Slika 50: Volumen staljenega termoplastičnega materiala po končanem polnjenju

Na sliki 51 lahko vidimo, kako skozi fazo polnjenja v odvisnosti od časa narašča zapiralna sila hidravlične stiskalnice, ki po končanem polnjenju doseže nastavljeno vrednost.



Slika 51: Zapiralna sila hidravlične stiskalnice

Rezultati postopka hlajenja, ki smo jih dobili s pomočjo numeričnih simulacij in so prikazani na sliki 52, so pokazali, da lahko ob upoštevanem času hlajenja 200 min, ki je bil nastavljen tudi pri eksperimentalnih testiranjih, staljeni polimerni material ohladimo iz prvotnih 200 °C na temperaturo, ki v nekaterih delih stiskane plošče doseže 25 °C. Najvišja temperatura na površini stiskane plošče po izvzemu iz orodja stiskalnice je 58,12 °C, povprečna temperatura stiskane plošče pa znaša 38,03 °C. Povprečna zunanja temperatura orodja hidravlične stiskalnice znaša 35,64 °C. Vrednosti so za približno 3 °C nižje, kot vrednosti izmerjene pri eksperimentalnem testiranju vendar so med seboj še vedno primerljive.

Summary of Cavity Temperature Results

```

=====
Part surface temperature - maximum           = 58.1178 C
Part surface temperature - minimum           = 25.1368 C
Part surface temperature - average           = 38.0320 C
Cavity surface temperature - maximum         = 58.2827 C
Cavity surface temperature - minimum         = 25.0684 C
Cavity surface temperature - average         = 37.6235 C
Average mold exterior temperature            = 35.6417 C
Heat removal through the outer boundaries    = 0.2213 kW
Maximum temperature                          = 200.0001 C
Minimum temperature                          = 25.0000 C

```

Slika 52: Rezultati simulacij hlajenja

Kot je prikazano na sliki 53, se temperatura hladilnega medija v hladilnih kanalih iz predhodnih 25 °C, kolikor znaša vhodna temperatura hladilnega medija, povprečno zviša za 6,45 °C, kar je primerljivo z vrednostmi v praksi, hitrost pretoka hladilnega medija čez hladilne kanale je 7,21 l/min, Reynoldsovo število (Re) pa znaša 1,3.

Coolant Temperatures

Inlet node	Coolant temp.	Coolant temp rise. over circuit	Heat removal over circuit
68289	25.0	6.451 C	1.711 kW
68448	25.0	6.451 C	1.712 kW
	Flowrate in/out	Reynolds No.	
	(lit/min)		
	7.212	1.3	

Slika 53: Temperature in lastnosti pretoka hladilnega medija

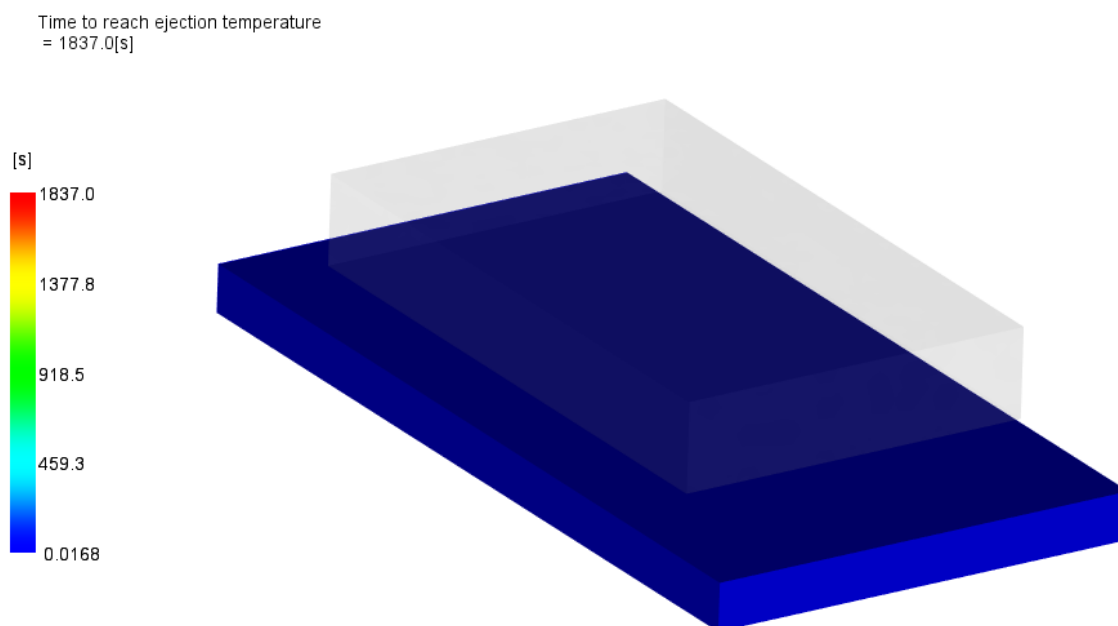
Temperatura tališča uporabljenega materiala PPH-1 znaša 434 K oziroma 161 °C, na sliki 54 pa je prikazano tudi, kakšen odstotek polimernega materiala je ohlajen ob koncu posameznega časovnega koraka hlajenja. Kot lahko vidimo, je 25 % mase ohlajene v 9. časovnem koraku, več kot polovica mase polimernega materiala pa je ohlajena v predzadnjem, 12. časovnem koraku.

Transition temperature =	434.0000 K		
b6 =	3.6750E-08 K/Pa	(%)Frozen	
Liquid phase	Solid phase		
b1m =	0.0013	b1s = 0.0012 m ³ /kg	7.31
b2m =	1.4060E-06	b2s = 7.2120E-07 m ³ /kg-K	7.73
b3m =	4.5364E+07	b3s = 4.9534E+07 Pa	8.35
b4m =	0.0067	b4s = 0.0103 1/K	12.84
		b7 = 0.0001 m ³ /kg	15.41
		b8 = 0.0524 1/K	16.60
		b9 = 3.1080E-09 1/Pa	23.06
Viscosity model:	Cross-WLF		24.09
	coefficients: n =	0.2709	26.35
	TAUS =	2.1604E+04 Pa	39.15
	D1 =	6.4518E+19 Pa-s	47.62
	D2 =	263.1500 K	64.85
	D3 =	0.0000 K/Pa	100.00
	A1 =	42.4530	
	A2T =	51.6000 K	

Slika 54: Temperatura tališča in odstotek ohlajene mase polimernega materiala

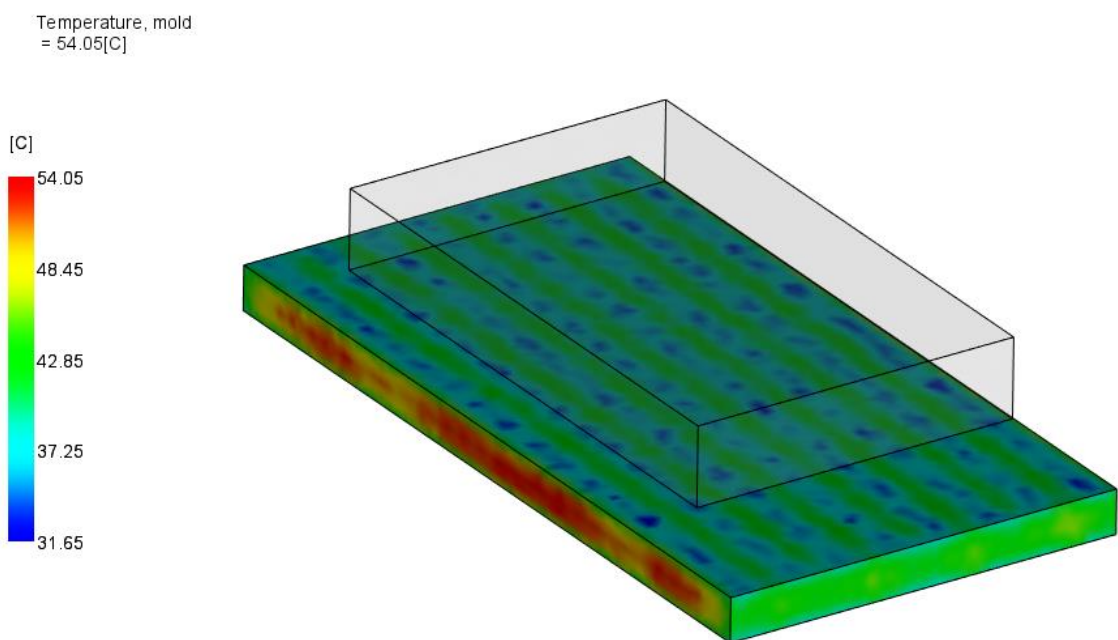
Na sliki 55 je prikazano, po kolikšnem času se doseže priporočena temperatura izmetavanja, ki za omenjen material PPH-1 znaša 110 °C. Kot lahko vidimo, se temperatura doseže po približno 30 min, kar se ujema z vrednostmi pri eksperimentalnih testiranjih, kjer smo omenjeno temperaturo dosegli v skoraj identičnem času.

Ker se v izogib naknadnim skrčkom in notranjim napetostim stiskane plošče iz orodja hidravličnih stiskalnic izvzemajo pri bistveno nižjih temperaturah, pa omenjena nastavitev ni primerna za tehnologijo stiskanja in bi jo bilo potrebno prilagoditi.



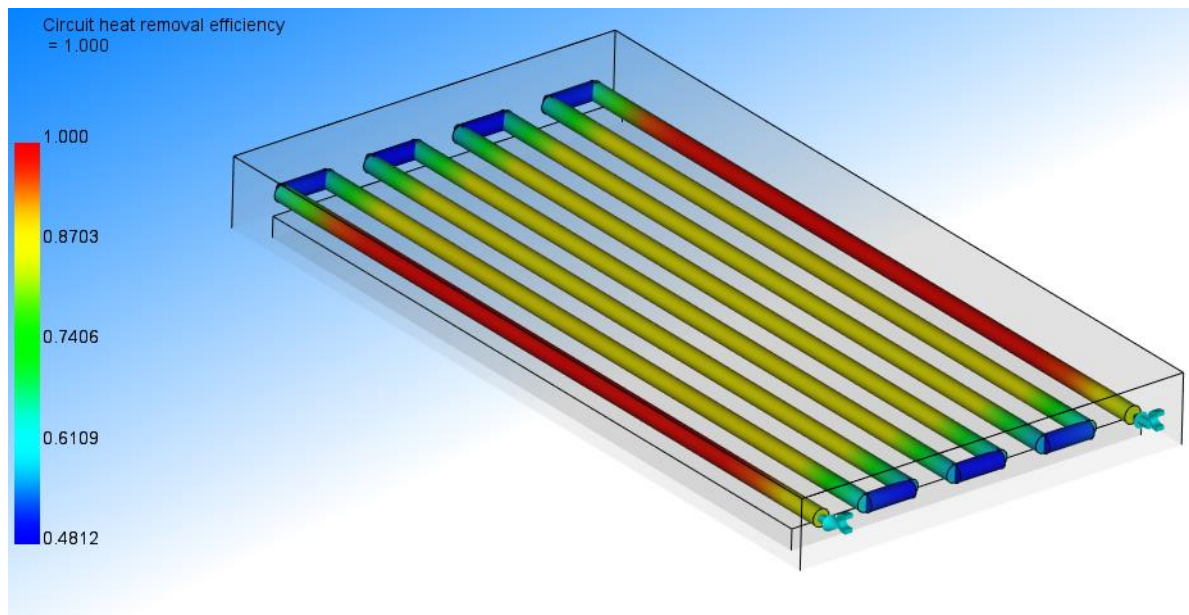
Slika 55: Potreben čas za doseg temperature izmetavanja

Programska oprema AMI omogoča tudi vizualizacijo rezultatov ter ustvarjanje poročil oziroma analiz z vključenimi slikami ter animiranimi deli, s čimer lahko posamezne faze procesa in pridobljene rezultate še lažje interpretiramo, kar je prikazano na slikah 56 in 57. Na sliki 56 lahko vidimo porazdelitev temperatur na površini orodja po koncu cikla stiskanja oziroma hlajenja.



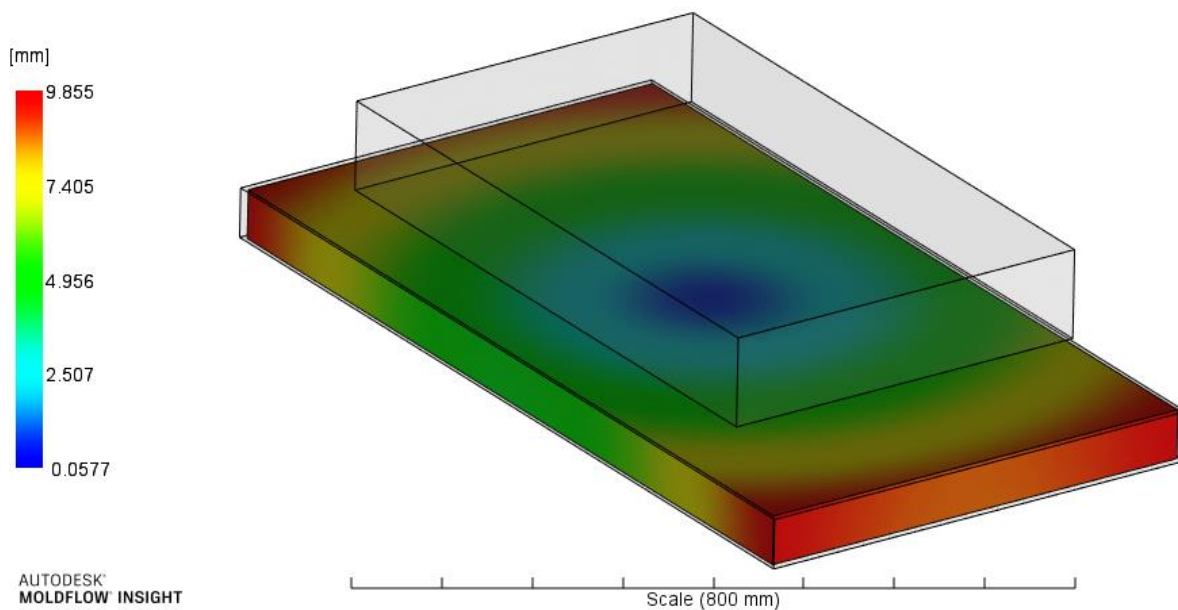
Slika 56: Porazdelitev temperatur na površini orodja stiskalnice po koncu hlajenja

Na sliki 57 je prikazana učinkovitost odvajanja toplote po posameznih segmentih hladilnih kanalov, ki nam je lahko v pomoč pri dimenzioniranju orodij.



Slika 57: Učinkovitost odvajanja toplote hladilnih kanalov

S pomočjo numeričnih simulacij s programsko opremo AMI lahko analiziramo tudi predelovalne skrčke, notranje napetosti in morebitno zvitost končnih proizvodov. Kot lahko vidimo na sliki 58 se pri začetni dolžini plošče 1050 mm in ob upoštevanih parametrih predelave pričakuje predelovalni skrček dolžine 9,855 mm, kar predstavlja približno 1 % dolžine plošče in je v skladu z vrednostmi v praksi.



Slika 58: Predelovalni skrček stiskane plošče

Napredna orodja in poenostavljen uporabniški vmesnik programa AMI nam lahko pomagajo pri različnih optimizacijah procesov ter reševanju proizvodnih izzivov, kot so skrajševanje časov ciklov, analizah različnih nastavitvev procesnih parametrov, uporabi in analizah različnih materialov, učinkovitosti posameznega hladilnega medija in hladilnih kanalov, analizi skrčkov in notranjih napetosti v proizvodih ter optimizaciji geometrije končnih proizvodov in orodij.

Rezultati, ki smo jih dobili s pomočjo numeričnih simulacij, so v veliki meri primerljivi z vrednostmi, dobljenimi pri eksperimentalnem delu. V prihodnje bi lahko numerične simulacije uporabili predvsem za optimizacijo in analizo tehnologije ekstrudiranja staljenega termoplastičnega materiala v orodje hidravlične stiskalnice in naknadnega stiskanja, optimizacijo faze hlajenja ciklov z obstoječo tehnologijo stiskanja ter analizo predelovalnih skrčkov in notranjih napetosti, simulacije pa so hkrati tudi veliko hitrejši in cenejši način optimizacije proizvodnih procesov.

Kljub vsemu pa je programska oprema AMI primernejša predvsem za tehnologijo brizganja, saj nekaterih faz tehnologije stiskanja, kot jo poznamo iz serijske proizvodnje stiskanih plošč v podjetju ni možno v popolnosti simulirati.

4.3 Potencialni prihranki posamezne optimizacije in stroški investicije

V nadaljevanju so predstavljeni potencialni prihranki, ki bi jih lahko dosegli ob uspešni implementaciji posamezne inovativne tehnologije v serijsko proizvodnjo stiskanih plošč ter ocenjeni stroški investicije, ki bi bila potrebna za izvedbo posamezne tehnologije.

4.3.1 Predgretje in vakuumsko stiskanje PPH

V fazi testiranja se je izkazalo, da lahko s predgretjem materiala na temperaturo 90 °C čas gretja skrajšamo za približno 18 %, s predgretjem na temperaturo 110 °C za približno 23 %, s predgretjem materiala na temperaturo 120 °C pa lahko čas gretja skrajšamo za več kot 28 % oz. celoten cikel stiskanja za približno 17 %. S tem lahko znižamo proizvodno ceno stiskanih plošč, prav tako pa povečamo tudi kapaciteto proizvodnje oz. količino proizvedenih plošč na letni osnovi.

Če upoštevamo, da lahko s pomočjo predgretja materiala čas gretja skrajšamo za okoli 28 %, to pomeni, da bi lahko pri serijski proizvodnji PPH plošč debeline 35 mm cikel skrajšali za približno 2 uri na ploščo, pri debelini 70 mm za približno 3 ure na ploščo, pri debelini 120 mm pa že za skoraj 6 ur na ploščo.

Ob upoštevanju proizvedenih količin posameznih plošč na letnem nivoju bi tako prihranek zaradi skrajšanja ciklov lahko znašal približno 15.500 €, dodatno pa bi lahko ob upoštevanju 17 % povečanja kapacitete stiskalnic ob stiskanju PPH plošč dosegli približno 197.500 € večji prihodek.

Oprema, ki bi jo potrebovali za predgretje potrebne količine termoplastičnega materiala za posamezen nasip (1.500 kg), je ocenjena na skupno vrednost 108.000 €. Donos naložbe (ang. ROI - return on investment) za omenjeno tehnologijo predgretja materiala tako znaša približno 51 %, kar pomeni, da bi se nam omenjena investicija lahko povrnila v časovnem obdobju dveh let.

Glavno omejitev omenjene tehnologije predgretja in vakuumskega stiskanja bi lahko predstavljala implementacija vakuuma na stiskalnice večjih dimenzij, ki so namenjene serijski proizvodnji, saj bi ob dilataciji orodja zaradi gretja in hlajenja lahko prišlo do popuščenja vakuuma, kar se je že zaznalo pri nekaterih predhodnih testih na prototipni laboratorijski stiskalnici HS1-013.

4.3.2 Predstisk s pomočjo vložnih orodij

S pomočjo tehnologije predstiskanja z vložnimi orodji bi lahko zmanjšali količino porabljenega materiala na posamezno stiskano ploščo ter dodatno skrajšali čase naknadne strojne obdelave stiskanih surovcev. S pomočjo vložnih orodij smo pri eksperimentalnem delu nasipe materiala pri surovcih debeline 35 mm zmanjšali iz predhodnih 350 kg na 260 kg, pri surovcih debeline 75 mm pa se je nasip materiala iz predhodnih 700 kg zmanjšal na 625 kg.

Glede na proizvedeno število posameznih plošč na letnem nivoju, bi lahko zaradi zmanjšanja količine porabljenega materiala ob upoštevanju njegove trenutne cene prihranili približno 74.500 €. Dodatno bi zaradi predstisnjenih oblik stiskanih plošč na letni osnovi za približno 148 ur skrajšali čase naknadne strojne obdelave, zaradi česar bi lahko prihranili dodatnih 5.920 €.

Skupna investicija za aluminijasta vložna orodja znaša 14.800 €, kar pomeni, da bi omenjeno investicijo upravičili že v dobrih dveh mesecih.

Omejitev tehnologije predstiskanja s pomočjo vložnih orodij lahko predstavljajo notranje napetosti v stiskanih ploščah, do katerih pride zaradi različnih debelin v prerezu stiskane plošče, posledično pa pri hlajenju prihaja do različnih skrčkov, zaradi česar je potrebno biti pri načrtovanju pozoren na samo geometrijo in debelino stiskanih plošč ter vložnih orodij.

4.3.3 Dvojno polnjenje materiala

Rezultati testiranja so pokazali, da bi lahko v prihodnje za proizvodnjo nekaterih plošč uporabljali cenejši alternativni material, ki bi se dodal v notranjost stiskane plošče. Na ta način bi lahko zmanjšali proizvodne stroške in posledično lastno ceno izdelka.

Glede na uporabljeno količino posameznega alternativnega materiala na ploščo (150 kg) lahko ugotovimo, da bi ob doseganju planiranega števila proizvedenih plošč (9.000 kos) na letni osnovi bili naslednji prihranki:

- **HDPE material brez aditivov:** $(150 \text{ kg} \times 0,29 \text{ €/kg} \times 9.000 \text{ kos}) = \mathbf{391.500 \text{ €}}$,
- **»Off grade« HDPE material brez aditivov:** $(150 \text{ kg} \times 0,42 \text{ €/kg} \times 9.000 \text{ kos}) = \mathbf{567.000 \text{ €}}$,
- **HDPE R material:** $(150 \text{ kg} \times 0,70 \text{ €/kg} \times 9.000 \text{ kos}) = \mathbf{945.000 \text{ €}}$.

V primeru dvojnega polnjenja materiala bi bila potrebna nadgradnja in dodatno programiranje obstoječe dozirne naprave stiskalnice, skupni strošek investicije pa je ocenjen na približno 35.000 €. To pomeni, da bi se nam omenjena investicija lahko povrnila že v dobrem mesecu.

Omejitev tehnologije z dvojnimi polnjenjem materiala lahko predstavlja neustrezen nasip in poravnava alternativnega materiala, zaradi česar lahko pride do pomešanja različnih materialov, kar bi se posledično odražalo v pojavu različnih barvnih lis na površini stiskanega proizvoda. Prav tako bi omejitev lahko predstavljal uporaba določenih reciklatov, saj zaradi manjših nasipnih gostot recikliranega materiala in posledično višjih nasipnih višin v orodje stiskalnice ne bi bilo možno nasuti zadostne količine materiala in ga ustrezno poravnati.

5 SKLEP

Namen magistrskega dela je bil optimizacija obstoječih procesnih parametrov stiskanja termoplastičnih materialov s pomočjo različnih inovativnih pristopov in tehnologij, ugotoviti, kako posamezna optimizacija vpliva na mehanske, toplotne in druge lastnosti stiskanih plošč ter kakšne so prednosti in pomanjkljivosti posamezne metode. S pomočjo tehnologije stiskanja smo z uporabo dveh različnih materialov PPH pripravili skupno devet vzorcev stiskanih plošč, na podlagi katerih smo testirali predgretje materiala in vakuumsko stiskanje, dodatno pa smo iz različnih tipov materiala PE in PPH pripravili še dva vzorca, s pomočjo katerih smo z uporabo različnih vložnih orodij optimirali količinsko porabo materiala ter dva vzorca, s katerima smo optimirali porabo aditivov in testirali uporabo alternativnega materiala.

Potrdila se je naša hipoteza, da se s predgretjem materiala in uporabo vakuuma končne lastnosti stiskanih plošč bistveno ne spremenijo. Rezultati preiskav različnih vzorcev so pokazali, da so se s predgretjem materiala pri večini vzorcev izboljšale vrednosti E modula, udarne žilavosti in raztezka na meji plastičnosti, pri vzorcih, kjer smo v proces stiskanja poleg predgretja materiala vključili še uporabo vakuuma, pa so se dodatno zvišale še temperature zmečkanišča materiala pri obeh obremenitvah, prav tako pa se je opazila še manjša oksidacija materiala, saj smo ob uporabi vakuuma dobili stiskane plošče, ki so bile bolj bele barve kot plošče, stiskane brez uporabe vakuuma.

Nekatere izmerjene vrednosti mehanskih in toplotnih lastnosti vzorcev, kjer smo opazili manjša odstopanja od ostalih vrednosti meritev, so lahko posledica eksperimentalne napake. S pomočjo predgretja materiala in vakuumskega stiskanja ob optimalnih ciklih torej ne prihaja do bistvenih odstopanj v mehanskih in toplotnih lastnostih stiskanih plošč, saj smo dobili primerljive rezultate.

Iz tega lahko zaključimo, da je tehnologija stiskanja s predgretjem materiala in vakuumskim stiskanjem primerna in uporabna metoda, ki bi jo lahko v prihodnosti uporabili v serijski proizvodnji stiskanih plošč ter s tem optimirali obstoječe procesne parametre stiskanja termoplastičnih materialov.

Dodatno smo v okviru magistrskega dela s pomočjo programske opreme Autodesk Moldflow Insight izvedli še numerične simulacije stiskanja termoplastičnega materiala ter ugotovili, da bi lahko v prihodnje optimizacijo in analizo nekaterih procesnih parametrov stiskanja izvedli tudi z uporabo simulacij, ki predstavljajo veliko hitrejši in cenejši način optimizacije. Sicer smo ugotovili, da programska oprema omogoča simulacijo samo nekaterih faz tehnologije stiskanja, kot jo poznamo iz serijske proizvodnje stiskanih plošč v podjetju, zato procesa stiskanja ni bilo možno simulirati v celoti, omenjena programska oprema pa je primerna predvsem za izvedbo simulacij tehnologije brizganja.

Dobljeni rezultati numeričnih simulacij se v veliki meri skladajo z eksperimentalnimi rezultati, saj smo pri eksperimentalnem testiranju dobili podobne temperature stiskane plošče, hladilnega medija in orodja hidravlične stiskalnice, primerljivi pa so tudi skrčki stiskane plošče. Kljub vsemu, bi bilo v prihodnje smiselno uporabo numeričnih simulacij še bolj podrobno preučiti ter testirati še nekatere druge procesne nastavitve in materiale, s čimer bi simulacijski model stiskanja termoplastičnega materiala še natančneje validirali in s tem dobili še bolj točne rezultate numeričnih simulacij.

Ugotovili smo, da bi lahko s predgretjem materiala obstoječe čase gretja pri stiskanju skrajšali za približno 28 %, celoten cikel stiskanja termoplastičnega materiala pa bi se lahko skrajšal za približno 17 %. S tem bi lahko povečali trenutno kapaciteto posamezne stiskalnice ter ob trenutnem obsegu proizvodnje letno prihranili približno 55.000 €. Poleg predgretja in vakuumskega stiskanja bi lahko z optimizacijo nasipov materiala z uporabo različnih vložnih orodij ter optimizacijo količinske porabe aditivov in uporabo različnih alternativnih materialov na letni osnovi prihranili še dodatnih 1.000.000 €, kar predstavlja velik potencialni prihranek, zato je smiselno razmisliti o implementaciji omenjenih tehnologij v serijsko proizvodnjo. Dodatno bi lahko v prihodnje cikle stiskanja optimirali z uporabo tehnologije ekstrudiranja staljenega termoplastičnega materiala v orodje hidravlične stiskalnice in numeričnimi simulacijami omenjene tehnologije stiskanja, s čimer bi lahko čase obstoječih ciklov skrajšali za približno 60 %.

Z implementacijo različnih inovativnih pristopov in tehnologij, ki smo jih obravnavali v magistrskem delu lahko v prihodnje pomembno vplivamo na skrajšanje obstoječih časov stiskanja termoplastičnih materialov in manjšo porabo vhodnih materialov v serijski proizvodnji. Na ta način povečamo kapacitete posameznih stiskalnic, zmanjšamo porabo energije in škodljive vplive na okolje, povečamo prihranke, hkrati pa s tem povečamo tudi konkurenčnost podjetja na trgu.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] A. M. Helmenstine, Monomer Definition and Examples, ThoughtCo. (2020). <https://www.thoughtco.com/definition-of-monomer-605375>.
- [2] Khan Academy, Introduction to macromolecules. [svetovni splet]. <https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/chemistry-of-life/introduction-to-biological-macromolecules/a/introduction-to-macromolecules>. [Datum dostopa: 15. 1. 2022].
- [3] R.O. Ebewe, Polymer science and technology, ScienceDirect. (2000). [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(95\)90127-2](https://doi.org/10.1016/0261-3069(95)90127-2).
- [4] M. Žigon, Uvod v polimere: zapiski predavanj. Ljubljana: Kemijski inštitut, 2006.
- [5] A. Glojek, Polimerni materiali: zapiski predavanj. Slovenj Gradec: Visoka šola za tehnologijo polimerov, 2008. https://studentski.net/gradivo/vis_srk_str_mat_sno_polimerni_materiali_01
- [6] A. Shrivastava, Introduction to Plastic Engineering. New York: Elsevier, 2018.
- [7] A. J. Peacock, Handbook of polyethylene, Structures, Properties and Applications. Texas: Exxon Chemical Company, 2000. [https://doi.org/10.1016/0167-188X\(89\)90104-3](https://doi.org/10.1016/0167-188X(89)90104-3).
- [8] J. Karger-Kocsis, T. Barany, Polypropylene Handbook, Morphology, Blends and Composites. Budapest: Faculty of Mechanical Engineering, 2018.
- [9] Omnexus, The Definitive Guide to Polypropylene (PP). [svetovni splet]. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>. [Datum dostopa: 16. 2. 2022].
- [10] A. Sever Škapin, Polimerni materiali. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije. <https://www.zag.si/ajax/DownloadHandler.php?file=1622>.
- [11] J. Navodnik, Plastik-Orodjar: priročnik, 3. dopolnjena izdaja. Velenje, 1998.
- [12] A. Glojek, Postopki predelave polimernih materialov: zapiski predavanj. Slovenj Gradec: Visoka šola za tehnologijo polimerov, 2008.
- [13] T. Pintarič, Predelava plastičnih mas. Novo mesto: Konzorcij šolskih centrov, 2017.
- [14] Orpal, O tehnologiji brizganja. [Svetovni splet]. <http://orpal.si/storitve/tehnologija-brizganja>. [Datum dostopa: 18. 3. 2022].
- [15] K. Kuzman, Polimeri in tehnologije predelave. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za preoblikovanje.
- [16] Moldex 3D, Compression Molding Technology and Its Application in Injection Molding, 2020.
- [17] Sitor, Stiskalnice za izdelavo plošč iz termoplastov: PP, PE, HDPE, UHMWPE. [Svetovni splet] <http://sitor.si/stiskalnice/hidravlicne-stiskalnice-za-izdelavo-ploc-iz-termoplastov-pp-pe-hdpe-uhmwpe/>. [Datum dostopa: 8. 4. 2022].
- [18] Isokon, Kotherm pressed sheets. [Svetovni splet]. <http://www.isokon.si/en/>. [Datum dostopa: 12. 4. 2022].
- [19] Z. Ren, M. Ulbin, M. Vesenjaka, Inženirske računalniške simulacije v

- konstrukterstvu: Univerzitetni učbenik. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2018.
- [20] B. Zupančič, Računalniška simulacija: Učbenik. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, 2012.
- [21] Autodesk, Plastic injection and compression mold simulation for design and manufacturing. [Svetovni splet]. https://www.autodesk.com/products/moldflow/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=15521ef7-b7e8-4f62-91a2-d9641bd8b0e8&us_st=autodesk%20moldflow%20insight. [Datum dostopa: 28. 5. 2022]
- [22] M. Fele, Študij večkratne mehanske reciklaže sistemov stirenski blokkopolimer/termoplast/olje: Magistrsko delo. Slovenj Gradec: Fakulteta za tehnologijo polimerov, 2018.
- [23] M. Žigon, Lastnosti in karakterizacija polimerov in polimernih materialov: zapiski predavanj. Slovenj Gradec: Fakulteta za tehnologijo polimerov, 2020.
- [24] K. S. K. Rao Patnaik, K. Sirisha Devi, V. K. Kumar, Non-isothermal Crystallization Kinetics of Polypropylene (PP) and Polypropylene (PP)/Talc Nanocomposite. ResearchGate, 2010.
- [25] Impact solutions, Vicat softening temperature. [Svetovni splet]. <https://www.impact-solutions.co.uk/plastic-testing/testing-capabilities-list/thermal-analysis/vicat-softening-temperature>. [Datum dostopa: 12. 6. 2022].

SEZNAM SLIK

Slika 1: Molekulska struktura polietilena	11
Slika 2: Molekulska struktura polipropilena	14
Slika 3: Masni delež posamezne tehnologije predelave polimernih materialov	16
Slika 4: Shema ekstruderja	17
Slika 5: Shema brizgalnega stroja	18
Slika 6: Shema hidravlične stiskalnice	20
Slika 7: Hidravlična stiskalnica s transportno progo in hidravličnim agregatom	20
Slika 8: Polnjenje orodja z materialom	21
Slika 9: Predstiskanje materiala v orodju	21
Slika 10: Proizvodi, ki so proizvedeni s pomočjo tehnologije stiskanja	22
Slika 11: Laboratorijska hidravlična stiskalnica HS1-013	25
Slika 12: Testni sušilnik Moretto XD21	28
Slika 13: Postavitev spodnjih vložnih delov glede na orodje stiskalnice	31
Slika 14: Postavitev zgornjega vložnega dela glede na orodje stiskalnice	31
Slika 15: Postavitev spodnjega dela vložnega orodja v orodju stiskalnice	32
Slika 16: Postavitev zgornjega dela vložnega orodja v orodju stiskalnice	32
Slika 17: Končna postavitev vložnega orodja na polimernem materialu	33
Slika 18: Plošča z materialom brez uporabljenih aditivov	34
Slika 19: Plošča z uporabljenim recikliranim alternativnim materialom	35
Slika 20: 3D model orodja hidravlične stiskalnice in stiskane plošče	36
Slika 21: Delovno okno programa Moldflow in mrežni 3D model	36
Slika 22: Izbira zelene tehnologije predelave termoplastičnega materiala	37
Slika 23: Določitev lastnosti elementov 3D modela	37
Slika 24: Izbira materiala stiskane plošče	38
Slika 25: Določitev hladilnih kanalov	38
Slika 26: Mrežni model orodja hidravlične stiskalnice	39
Slika 27: Nastavitev procesnih parametrov stiskanja	39
Slika 28: Testna naprava Shimadzu Autograph AGS	42
Slika 29: Rezultati meritev E modula	44
Slika 30: Rezultati meritev natezne trdnosti	44
Slika 31: Rezultati meritev raztezka ob pretrgu	45
Slika 32: Rezultati meritev udarne žilavosti	45
Slika 33: Rezultati meritev raztezka na meji plastičnosti	46
Slika 34: Rezultati meritev temperature zmečičišča materiala VST/A120 (10N)	46
Slika 35: Rezultati meritev temperature zmečičišča materiala VST/B120 (50N)	47
Slika 36: Rezultati meritev stopnje kristaliničnosti	47
Slika 37: Rezultati meritev temperature tališča	48
Slika 38: Parametri stiskanja za vzorec 1	49
Slika 39: Parametri stiskanja za vzorec 2	50
Slika 40: Parametri stiskanja za vzorec 3	51
Slika 41: Parametri stiskanja za vzorec 4	52
Slika 42: Parametri stiskanja za vzorec 5	53

Slika 43: Parametri stiskanja za vzorec 6	54
Slika 44: Parametri stiskanja za vzorec 7	55
Slika 45: Parametri stiskanja za vzorec 8	56
Slika 46: Parametri stiskanja za vzorec 9	57
Slika 47: Vizualna primerjava vzorcev stisnjenih brez in z vakuumom	58
Slika 48: Volumen staljenega termoplastičnega materiala v začetku polnjenja	60
Slika 49: Volumen staljenega materiala na polovici časa polnjenja	60
Slika 50: Volumen staljenega termoplastičnega materiala po končanem polnjenju...	60
Slika 51: Zapiralna sila hidravlične stiskalnice	61
Slika 52: Rezultati simulacij hlajenja.....	61
Slika 53: Temperature in lastnosti pretoka hladilnega medija	62
Slika 54: Temperatura tališča in odstotek ohlajene mase polimernega materiala	62
Slika 55: Potreben čas za doseg temperature izmetavanja.....	63
Slika 56: Porazdelitev temperatur na površini orodja stiskalnice po koncu hlajenja ..	63
Slika 57: Učinkovitost odvajanja toplote hladilnih kanalov	64
Slika 58: Predelovalni skrček stiskane plošče	64

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Glavne značilnosti verižne in stopenjske polimerizacije	9
Tabela 2: Pregled uporabljenih materialov	24
Tabela 3: Tehnične karakteristike stiskalnice HS1-013	26
Tabela 4: Seznam pripravljenih vzorcev	27
Tabela 5: Program za stiskanje vzorčnih plošč PPH-1 debeline 60mm	29
Tabela 6: Program za stiskanje vzorčnih plošč PPH-2 debeline 70mm	30
Tabela 7: Rezultati MFI in DSC analize vhodnega materiala PPH	43

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

Q - toplotni tok

t - čas

% - odstotek

$^{\circ}\text{C}$ - stopinja Celzija

T - temperatura

T_g - temperatura steklastega prehoda

T_m - temperatura tališča

MPa - megapascal

kg/m^3 - kilogram na kubični meter

kg - kilogram

g/mol - gram na mol

kN - kilo newton

MN - mega newton

mm - milimeter

mbar - milibar

N/cm^2 - newton na kvadratni centimeter

GPa - gigapascal

mm/s - milimeter na sekundo

kW - kilowatt

J/g - joule na gram

ΔH_m - sprememba talilne entalpije

Re - Reynoldsovo število

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

AMI - Autodesk Moldflow Insight
PE - polietilen
PP - polipropilen
PE HMW - polietilen visoke molekularne teže
PE UHMW - polietilen zelo visoke molekularne teže
PPH - polipropilen homopolimer
DNK - deoksiribonukleinska kislina
PVC - polivinilklorid
PS - polistiren
DP - stopnja polimerizacije
PET - polietilentereftalat
PTFE - politetrafluoroetilen
PA - poliamid
POM - polioksimetilen
PC - polikarbonat
PMMA - polimetilmetakrilat
ABS - akrilonitril butadien stiren
LDPE - polietilen nizke gostote
HDPE - polietilen visoke gostote
LLDPE - linearni polietilen nizke gostote
EPDM - etilen propilen dien monomer
PU - poliuretan
PF - fenol-formaldehidna smola
SBR - stiren-butadienski kavčuk
BR - butadienski kavčuk
CR - kloroprenski kavčuk
EPDM - etilen-propilenski kavčuk
CAE - Computer Aided Engineering
MFI - indeks tečenja taline
DSC - diferenčna dinamična kalorimetrija
ROI - return on investment