

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Jure DOBNIK

**ŠTUDIJA IN OPTIMIZACIJA PROCESNIH
PARAMETROV PRI 3D-TISKU IN NJIHOV VPLIV
NA OBRATOVANJE POLIMERNIH ZOBNIKOV**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, september 2024

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

ŠTUDIJA IN OPTIMIZACIJA PROCESNIH PARAMETROV PRI 3D-TISKU IN NJIHOV VPLIV NA OBRATOVANJE POLIMERNIH ZOBNIKOV

Diplomsko delo

Študent:	Jure DOBNIK
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	doc. dr. Matija HRIBERŠEK
Somentor:	asist. Janez SLAPNIK

Slovenj Gradec, september 2024

IZJAVA

Podpisani Jure Dobnik izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvalil bi se rad mentorju doc. dr. Matiju Hriberšku za vso njegovo strokovno pomoč, znanje in vodenje pri izdelavi diplomskega dela. Prav tako bi se rad zahvalil asist. Janezu Slapniku za pomoč pri izvajanju eksperimentalnega dela in za pomoč pri diplomskem delu.

Zahvalil bi se tudi družini za vso podporo, spodbudo in finančno pomoč med študijem.

POVZETEK

Študija in optimizacija procesnih parametrov pri 3D-tisku in njihov vpliv na obratovanju polimernih zobnikov

V diplomskem delu smo proučevali vpliv parametrov 3D-tiska poliamida (PA) 6 z ogljikovimi vlakni (angl. Carbon Fibre (CF)) na mehanske lastnosti, termične lastnosti ter na življenjsko dobo zobnikov. Cilj je bil, da optimiramo delovanje zobnika in raziščemo vpliv procesnih parametrov na delovanje zobnika. Proučevali smo vpliv števila zunanjih plasti, toplotne obdelave in višine plasti 3D-tiska. Najprej smo natisnili epruvete, ki smo jim karakterizirali mehanske in termične lastnosti z upogibnim preizkusom, dinamično mehansko analizo (DMA), diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) in termogravimetrično (TGA) analizo. Zobnike smo testirali na preizkuševališču in merili temperaturo v kontaktu med zobniško dvojico s pomočjo infrardeče termo kamere. Povečanje števila zunanjih plasti iz treh na štiri je poslabšalo dobo trajanja zobnikov iz 110.133 ciklov na 10.967 ciklov. Toplotna obdelava je tudi negativno vplivala na dobo trajanja zobnikov in zmanjšala življenjsko dobo zobnikov za 107.100 ciklov. Večja višina plasti pri 3D-tisku pa je povečala dobo trajanja zobnikov. Zobnik natisnjen z višino sloja 0,2 mm je deloval za 280.933 ciklov več kot zobnik z višino sloja 0,1 mm. Najvišjo življenjsko dobo (365.400 ciklov) je dosegel zobnik toplotno neobdelan zobnik s tremi zunanjimi plastmi in višino plasti tiskanja 0,2 mm.

Ključne besede:

3D-tisk, procesni parametri, optimizacija, življenjska doba, polimerni zobniki.

SUMMARY

Study and optimization of process parameters in 3D printing and their influence on the operation of polymer gears

In the thesis, the influence of 3D printing parameters of polyamide (PA) 6 with carbon fibre (CF) on the mechanical properties, thermal properties and lifetime of gears was investigated. The aim was to optimise the gear performance and to investigate the influence of the process parameters on the gear performance. The influence of the number of outer layers, the heat treatment and the height of the 3D-printing layer was investigated. First, we printed tubes, which were characterised for mechanical and thermal properties by bending test, dynamic mechanical analysis (DMA), differential dynamic scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). The gears were tested on a test bench and the contact temperature between the gear pair was measured using an infrared thermal camera. Increasing the number of outer layers from three to four degraded the lifetime of the gears from 110,133 cycles to 10,967 cycles. The heat treatment also had a negative effect on the lifetime of the gears and reduced the lifetime of the gears by 107 100 cycles. However, the higher layer height of the 3D-printing increased the lifetime of the gears. A gear printed with a layer height of 0,2 mm lasted 280 933 cycles longer than a gear with a layer height of 0,1 mm. The gear with the highest lifetime (365,400 cycles) was the unheat-treated gear with three outer layers and a printing layer height of 0,2 mm.

Keywords:

3D print, process parameters, optimization, lifetime, polymer gears.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Hipoteze ali trditve	1
2	TEORETIČNI DEL	2
2.1	Polimerni zobniki	2
2.1.1	Evolventno ozobje	3
2.1.2	Mehanske lastnosti	4
2.1.3	Termične lastnosti	5
2.1.4	Termoplasti za zobnike	5
2.1.5	Dodatki	6
2.2	Poliamidi	6
2.2.1	PA 6	7
2.2.2	Aplikacije poliamida 6	7
2.3	Ogljikova vlakna	9
2.4	Dodajalne tehnologije – ekstruzija materiala	10
2.4.1	Izdelava s spajanjem filamentov	11
2.4.2	Procesni parametri	13
2.4.3	Hitrost tiskanja	13
2.4.4	Višina plasti	13
2.4.5	Gostota polnjenja	13
2.4.6	Rastrski kot	14
2.4.7	Orientacija 3D-tiska	14
2.4.8	Temperatura ekstrudiranja	14
2.4.9	Struktura v polnilu	14
2.5	Toplotna obdelava	14
3	EKSPERIMENTALNI DEL	15
3.1	Material	15
3.2	3D-tisk	15
3.3	Upogibni preizkus	18
3.4	Dinamična mehanska analiza (DMA)	19
3.5	Termogravimetrična analiza (TGA)	19
3.6	Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)	20
3.7	Preizkuševališče – testiranje na dobo trajanja zobnikov	20
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	23
4.1	Optimizacija procesa	23
4.1.1	Vpliv temperature na mehanske lastnosti	23
4.1.2	Vpliv orientacije 3D-tiska na mehanske lastnosti	25
4.1.3	Vpliv toplotne obdelave na mehanske lastnosti	27
4.2	Dinamična mehanska analiza (DMA)	29
4.3	Termogravimetrična analiza (TGA)	30
4.4	Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)	31

4.5	Preizkušanje zobnikov – testiranje na dobo trajanja	31
4.5.1	Vpliv zunanje plasti in toplotne obdelave	32
4.5.2	Vpliv višine plasti	34
5	SKLEP	36
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	37
	SEZNAM SLIK	41
	SEZNAM TABEL	43
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	44
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	45
	PRILOGE	46
	Priloga 1: Momentna tabela	46
	Priloga 2: TGA-grafi	47
	Priloga 3: DSC-grafi	48

1 UVOD

Polimerni zobniki se zaradi tihega delovanja, nizke gostote, odpornosti proti koroziji, sposobnosti dušenja vibracij, nizke specifične teže in cene večinoma uporabljajo v tekstilni, živilski, industriji bele tehnike in avtomobilski industriji [1]. Svetovni trg plastičnih zobnikov je bil leta 2023 ocenjen na 419 milijonov EUR (450 milijonov USD), do leta 2030 pa naj bi zrastel na približno 745 milijonov EUR (800 milijonov USD) [2]. Najprej so se polimerni zobniki uporabljali kot poceni nadomestek za kovinske zobnike, predvsem pri potrošniških izdelkih, kot so npr. tiskalniki. Ker so oblikovalci in inženirji nenehno premikali meje, so se polimerni zobniki začeli uporabljati v različnih aplikacijah za prenos moči, tudi v izdelkih, kjer je bilo potrebno zagotavljati visoko zmogljivost komponent s stališča mehanskih, toplotnih in obrabnih karakteristik [3].

Polimerni zobniki se običajno proizvajajo oz. predelujejo s postopkom brizganja končnega zobnika oz. s postopkom odrezavanja (odvalnega frezanja) valjastega surovca [4]. Vedno bolj pa razvoj stremi k uporabi dodajalne izdelave (angl. Additive Manufacturing (AM)), oziroma z 3D-tiska. To je postopek nanašanja materiala plast za plastjo. Gre za dvostopenjski postopek, kjer se najprej z metodami računalniško podprtega načrtovanja (angl. Computer Aided Design (CAD)) izdela 3D računalniški model, ki se nato 3D natisne. Pri 3D-tisku izbira parametrov bistveno vpliva na dinamično zmogljivost in lastnosti polimernih zobnikov, zato je vedno več raziskav usmerjenih v proučevanje in vpliv parametrov na lastnosti 3D-tiskanih zobnikov [5,6].

Razvoj inženirskih polimernih materialov za zahtevne aplikacije je povzročil večjo uporabo le-teh v tehnologijah dodajalne proizvodnje. To je imelo pozitiven vpliv na hitrejši odziv razvojnih oddelkov v podjetjih s stališča razvoja izdelkov z dodano vrednostjo, kot so na primer zobniki. Visoka stopnja natančnosti izdelave prototipov ob uporabi zmogljivih materialov je rezultirala k zmanjševanju razvojnih časov izdelkov, saj so tehnologije in materiali omogočali dobro simulacijo realnih serijskih kosov, kar je prispevalo k racionalizaciji stroškov razvoja izdelkov in hitrejši vpeljavi končnih produktov na trg.

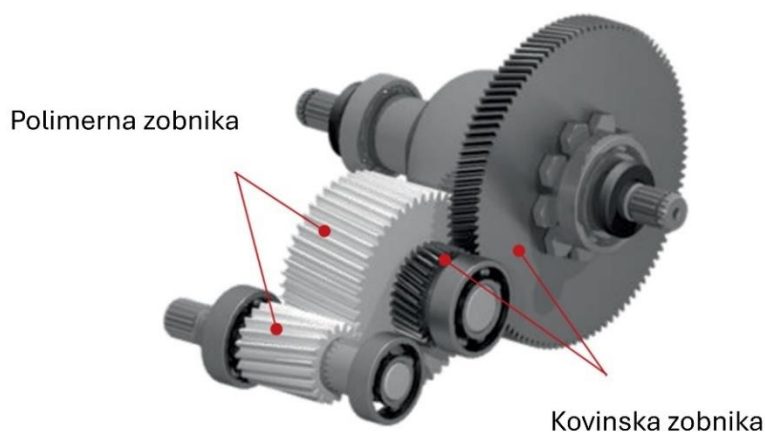
1.1 Hipoteze ali trditve

- Predpostavljamo, da obstaja optimalna temperatura 3D-tiska in da bodo pri horizontalni orientaciji 3D-tiska boljše mehanske lastnosti.
- Predvidevamo, da bo toplotna obdelava povečala mehanske in termične lastnosti.
- Pričakujemo, da bo večja višina plasti pri 3D-tisku imela pozitiven vpliv na daljšo dobo trajanja zobnikov.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Polimerni zobniki

V zadnjih letih so se vedno več začeli uporabljati polimerni materiali na področju zobniških aplikacij z namenom, da se izkoristi odlične lastnosti polimerov. Pri tem je pomembno povedati, da polimeri niso alternativa kovinskim materialom, ampak imajo svoja področja uporabe. Na začetku so bili polimerni zobniki uporabljeni v nezahtevnih strojniških aplikacijah, kjer niso bili podvrženi visokim mehanskim in termičnim obremenitvam. Z razvojem in optimizacijo izdelkov je prišlo do razvoja inženirskih in visoko zmogljivih polimerov (polioksimetilen (POM), PA 6, PA 66, polietereeterketon (PEEK)), ki so vsebovali dodatke, s katerimi so se izboljšale mehanske, termične in tribološke lastnosti polimera. To je omogočilo uporabo polimernih kompozitnih zobnikov v bolj zahtevna področja uporabe, kot so pogonski sistemi za manipulacijo vrat, inteligentni sistemi za avtomatizirano manipulacijo senčil, inovativni aktuatorji za avtomatizirano manipulacijo loput v prezračevalnih sistemih in razvoj pogonskih sistemov za električno mobilnost, ki je prikazan na sliki 1 [1].



Slika 1: Sistem za električno mobilnost [7].

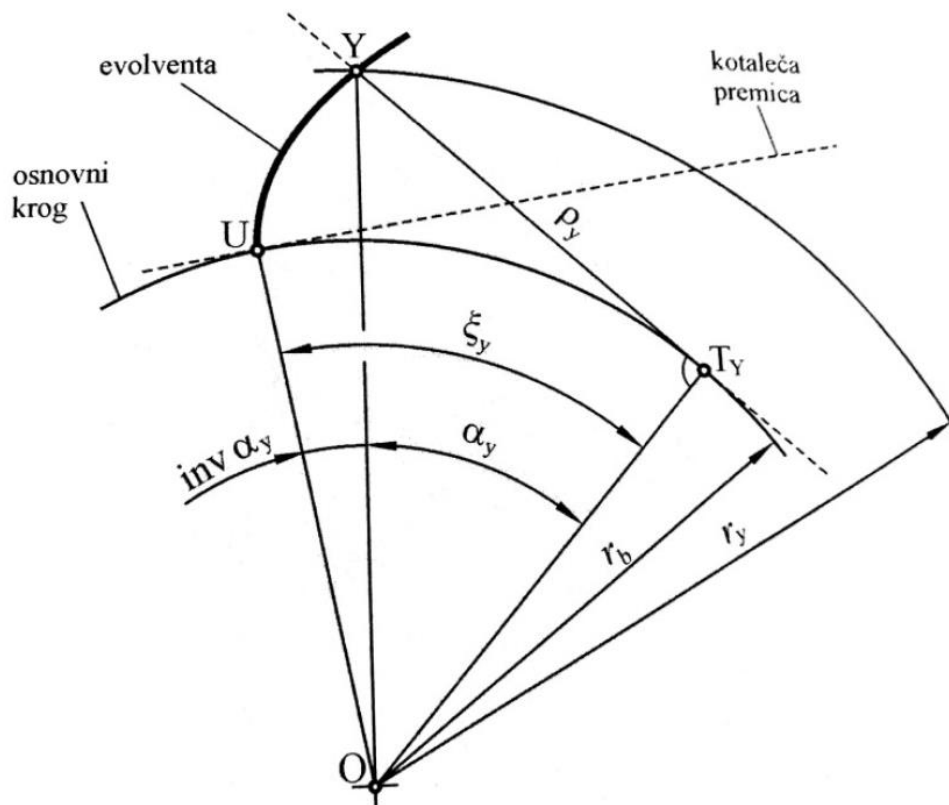
Na mehanske lastnosti osnovnih plastičnih materialov lahko vpliva nastajanje praznin, medtem ko obnašanje pri predelavi (krčenje, notranje napetosti, temperatura brizganja) povzroča slabše kakovostne razrede. Plastični zobniki imajo nekatere slabše lastnosti, npr. nižjo dovoljeno nosilnost in temperaturne omejitve, težave s krčenjem, zaradi česar so manjše dosegljive tolerance za oblikovane zobnike, ter občutljivost polimernih materialov na vlago. Težko je doseči podoben razred tolerance in dimenzijsko stabilnost kot pri proizvodnji kovin, kar je posledica večjega toplotnega raztezanja kot pri kovinah. Trenutno ne obstaja mednarodnega standarda ISO za

načrtovanje polimernih zobnikov. V raziskovalnih in industrijskih okoljih se najpogosteje uporablja smernica za načrtovanje polimernih zobnikov, imenovana VDI2736 (del 1–4) [8], ki povzema teoretične osnove polimernih materialov, ki so primerni za zobnike, kot tudi postopek izračuna nosilnosti zobnikov. V preteklih desetletjih se zazna občutno povečanje raziskovalno-razvojnih aktivnosti v smeri aktualiziranja omenjenih tehničnih smernic, kar dokazuje velik potencial področja in možnost nadaljnjih izboljšav ter uvedba mednarodnega standarda v prihodnosti [3].

Pri dimenzioniranju aplikacije treba izbrati primerno polimerno materialno kombinacijo za zobniški par, ki je odvisna od obremenitev, geometrijskih pogojev itd. Z izvajanjem raziskav na področju polimernih (kompozitnih) zobnikov je možno izboljšati poznavanje polimernih gradiv in pridobiti konkurenčno prednost razvojnih institucij, kar v osnovi pomeni skrajšanje faze prototipiranja in prihranek pri stroških v razvojni fazi. Takšne raziskave zajemajo meritve temperatur na ozobju s termo kamerami in karakterizacijo dinamične trdnosti – Woehlerjevi diagrami polimernih (kompozitnih) materialov. Izpopolnjena materialna baza omogoča natančnejši izračun realne pogonske aplikacije [1].

2.1.1 Evolventno ozobje

Najpogosteje uporabljena profila pri zobnikih sta evolventno in cikloidno. V tej diplomski nalogi smo 3D-tiskali in preizkušali zobnike z evolventnim ozobjem. Evolventni zobniki so tudi najbolj razširjeni zobniki. Pri evolventnem zobniku so profili zob kot evolvente kroga [9]. Evolventno funkcijo dobimo s kotaljenjem premice po osnovnem krogu. Dolžina krožnega loka je enaka odseku kotaleče se premice, kot vidimo na sliki 2 [10].



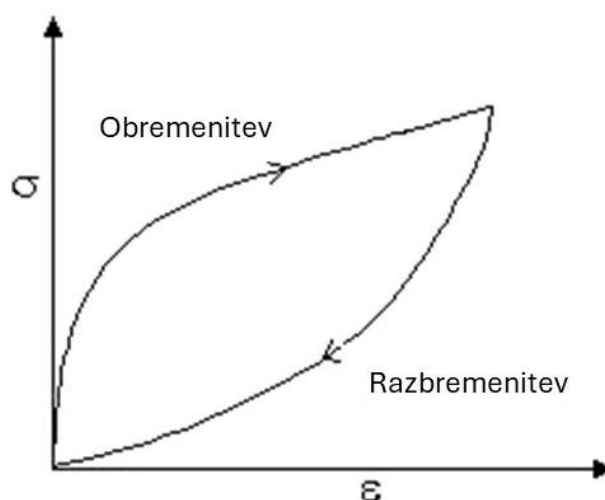
Slika 2: Evolventna funkcija [10]

Vsakemu evolventnemu zobniku lahko določimo število zob, normalni modul, kot poševnosti, koeficient profilnega pomika in vpadni kot normalnega profila. Debelina zoba je definirana kot dolžina loka na razdelnem krogu med levo in desno bočnico istega zoba. Za izračun medosne razdalje in kinematičnih krogov potrebujemo tudi vpadni kot radialnega profila na kinematičnem krogu. Pri ozobju brez profilnega pomika je kinematični premer enak premeru razdelnega kroga. Pri ubiranju dveh zobnikov je pomembna medosna razdalja [10].

2.1.2 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti plastike niso odvisne le od materiala, temveč tudi od proizvodnih in delovnih pogojev. Za zobnike so pomembne naslednje lastnosti: meja plastičnosti, temperaturni linearni razteznostni koeficient, razteznost materiala, Poissonovo število, udarna žilavost, upogibna trdnost in natezna trdnost. Pri načrtovanju je treba upoštevati delovno temperaturo, saj se molekulske vezi slabijo z naraščanjem temperature. Pomembno je tudi upoštevati vrsto in trajanje obremenitve. Pri statični obremenitvi se plastični del nenehno deformira, drsi. Pri določeni stalni deformaciji se napetost sčasoma zmanjša in material se sprosti. Pri dinamičnem obremenjevanju se trdnost zmanjšuje z naraščanjem števila ciklov obremenitve. Veliko število ciklov ali veliki raztezki povzročijo dodatno zmanjšanje lastnosti zaradi viskoelastičnega obnašanja materiala in toplote, ki pri tem nastane. Zato je zelo pomembno, da ima

material zadosten modul elastičnosti, da je dovolj tog in dimenzijsko stabilen. Prav tako so pomembni tudi natezna trdnost, upogibna trdnost in udarna žilavost. Slednja pozitivno vpliva na odpornost proti cikličnemu utrujanju. Na krivulji napetosti in deformacije (slika 3) opazimo histerezo, pri čemer je površina v zanki enaka energiji, izgubljeni med ciklom obremenitve. Polimeri z amorfno strukturo vežejo nase več vlage kot polimeri s kristalno strukturo. Večji delež vlage v polimeru zniža modul elastičnosti in trdnost, zviša pa žilavost, raztezek pri pretrgu in raztezek na meji plastičnosti [3].



Slika 3: Histereza na krivulji napetosti in deformacije [11]

2.1.3 Termične lastnosti

Temperaturno odvisne dimenzijske deformacije vplivajo na kakovost prenosa gibanja med pogonskima komponentama. Dodatki, kot so steklena vlakna, povečajo trdnost in posledično zmanjšajo toplotne linearne deformacije. Toplotna prevodnost polimerov je veliko nižja od prevodnosti kovin, kar povzroča težave pri odvajanju toplote. Dodatki z dobro toplotno prevodnostjo, kot so grafit in kovinski dodatki, lahko izboljšajo toplotno prevodnost, vendar je vpliv kovinskih dodatkov v procesu prenosa energije abraziven. Z mazivi lahko izboljšamo pogoje trenja na bokih zobov, kar nato povzroči nižje temperature v coni ubiranja. Za ohranjanje lastnosti materiala pri visokih delovnih temperaturah je znan tudi postopek toplotne stabilizacije [3].

2.1.4 Termoplasti za zobnike

Polimere delimo v 3 glavne skupine (slika 4): osnovne polimere, inženirske polimere ter visoko zmogljive polimeri. Za inženirske aplikacije se uporabljajo napredni polimerni materiali z boljšimi mehanskimi, toplotnimi in električnimi lastnostmi v primerjavi z osnovnimi polimeri. Ti materiali lahko prenesejo težje obremenitve in se lahko uporabljajo v zahtevnih aplikacijah. Najpogostejši materiali za zobnike so poliamidi (PA 46, PA 66, PA 12 in PA 6), POM, polibutilen tereftalat (PBT) in polietilen visoke gostote

(HDPE). Nekateri visoko zmogljivi, toplotno odporni in temperaturno stabilni materiali so PEEK in poliimidi (PI) [12].



Slika 4: Razporeditev polimerov [13]

2.1.5 Dodatki

Polimerom, ki se uporabljajo v aplikacijah, ki zahtevajo visoko nosilnost, visoko temperaturno odpornost in nizko trenje, je treba izboljšati mehanske lastnosti. V procesu ojačitve polimernih zobnikov na rezultate vplivata material polnila in delež polnila [14].

Polimeri, kot so POM, PEEK, PA, se uporabljajo za polimerne matrice. Polnilo je lahko anorgansko ali organsko in lahko izboljša odpornost proti obrabi, modul elastičnosti ter trdoto. Anorganska polnila, kot so baker (Cu), bakrov sulfid (CuS) in silicijev karbid (SiC), lahko izboljšajo vezavo med prenosno folijo in kovinskim ustreznikom s PEEK. Vendar pa organska polnila, kot so ogljikova in steklena vlakna, vplivajo tako na kemijske kot na mehanske lastnosti. Spreminjanje deleža polnila prav tako vpliva na lastnosti polimernega kompozita [14].

2.2 Poliamidi

PA so polimeri, ki vsebuje ponavljajoče se amidne (-CO-NH-) vezi. Spadajo med inženirske termoplaste. Lahko jih najdemo v naravi ali pa se jih proizvede sintetično. Naravno prisotni poliamidi so beljakovine. Sintetično proizvedeni poliamidi, kot so najloni in aramidi, se uporabljajo v avtomobilski industriji, prometu, elektrotehniki, elektroniki in potrošniških izdelkih [15].

Proizvodnja različnih vrst poliamidov se razlikuje glede na monomerne enote. Poznamo dve glavni vrsti poliamidov: alifatske in aromatske (aramidi). Glede na njihovo kristaliničnost so lahko amorfni ali delnokristalinični. Vsak ima edinstvene

lastnosti, zaradi katerih je primeren za različne aplikacije in neprimeren za druge. Alifatski poliamidi imajo najbolj vsestranske lastnosti. V njih ni aromатов, kar omogoča veliko prožnost, žilavost in enostavno obdelavo. Kljub temu imajo v primerjavi ostalimi PA manjšo odpornost proti toploti in kemikalijam. PA 6 spada med alifatske poliamide. Medtem imajo aromatski poliamidi znaten delež aromatskih obročev v svoji molekularni strukturi. Zaradi tega imajo visoko toplotno stabilnost in kemijsko odpornost. Posledično so tudi togi in razmeroma krhki. Izbira pravega poliamida je ključnega pomena pri načrtovanju aplikacij [16].

2.2.1 PA 6

PA 6 je vsestranski sintetični polimer s širokim spektrom uporabe. Zaradi svojih edinstvenih lastnosti je primeren za različne industrije. Je eden od najbolj razširjenih poliamidov na svetu. Sintetizira se s polimerizacijo kaprolaktama z odpiranjem obroča. Tališče PA 6 je 223 °C. PA 6 ima v normalnih pogojih odlično kemijsko stabilnost. Odporen je proti večini kemikalijam, vključno s kislinami in organskimi topili. Ima zmerno sposobnost absorpcije vode. Lahko absorbira vlago iz okolice, kar lahko vpliva na njegovo dimenzijsko stabilnost in mehanske lastnosti. Vendar ima PA 6 v primerjavi z drugimi poliamidi manjšo absorpcijo vode, zaradi česar je primernejši za nekatere aplikacije. PA 6 izkazuje dobro toplotno stabilnost. Prenese lahko povišane temperature in je zato primeren za aplikacije, kjer se zahteva dobra toplotna obstojnost. PA 6 ima tudi dobro odpornost na ultravijolično (UV) sevanje. Vendar lahko dolgotrajna izpostavljenost sončni svetlobi povzroči razgradnjo in razbarvanje materiala. Za povečanje njegove UV-stabilnosti se lahko PA 6 dodajo dodatki. PA 6 je po svoji naravi vnetljiv in se v stiku s plamenom rad topi. Za izboljšanje odpornosti na gorenje se PA 6 dodajo dodatki, ki zavirajo gorenje (zaviralci gorenja) [17].

2.2.2 Aplikacije poliamida 6

PA 6 je zaradi svojih odličnih lastnosti postal priljubljena izbira v različnih industrijah. Pogosto se uporablja v tekstilni industriji. Primer je prikazan na sliki 5. Običajno ga najdemo pri proizvodnji oblačil, spodnjega perila in športnih oblačil. Tkanine iz vlaken poliamida 6 so znane po odlični elastičnosti, odpornosti proti obrabi in odvajanju vlage, zato so idealne za športna oblačila in opremo na prostem [17].



Slika 5: Primer PA 6 v tekstilni industriji [18]

PA 6 se zaradi visoke trdnosti in odpornosti na toploto uporablja v avtomobilski industriji (slika 6). Pogosto se uporablja pri izdelavi za pokrove motorjev, posode za gorivo, sesalnih kolektorjev, zobnikov, ležajev in različnih drugih sestavnih delov. Lahka narava PA 6 prispeva k večji učinkovitosti porabe goriva, hkrati pa ohranja strukturno celovitost. PA 6 je odličen izolacijski material in se uporablja v električni in elektronski industriji. Uporablja se za izdelavo izolacij kablov, konektorjev, stikal in vtičnic. Zaradi žilavosti in bariernih lastnosti je PA 6 najprimernejši material za embalažno industrijo. Običajno se uporablja za izdelavo folij, posod, steklenic, kozarcev in embalaže za živila. Odpornost PA 6 na udarce, vlago in kemikalije zagotavlja zaščito in ohranjanje blaga [17].



Slika 6: Primer PA 6 v avtomobilski industriji [19]

Zaradi svoje dobre sposobnosti dušenja vibracij je PA 6 primeren za izdelavo strojnih delov in komponent. Prav tako se PA 6 uporablja v medicinski industriji zaradi dobre

biokompatibilnosti, trdnosti in odpornosti na kemikalije pri postopku sterilizacije. Uporablja se za proizvodnjo kirurških šivov, katetrov in medicinskega tekstila [17].

2.3 Ogljikova vlakna

Ogljikova vlakna, ki jih lahko vidimo na sliki 7, so vlakna z vsebnostjo ogljika 90 % ali več. Proizvajajo se s termično pretvorbo organskih vlaken z manjšo vsebnostjo ogljika, kot je poliakrilonitril (PAN), ki vsebuje več tisoč filamentov s premerom med 5 in 10 μm . Glavne prednosti ogljikovih vlaken v primerjavi z drugimi vlakni so visoka natezna trdnost, visoka togost, nizka gostota, zelo dobra kemijska odpornost in toplotna prevodnost. Te prednosti se lahko kombinirajo z ustreznim polimernim materialom, ki deluje kot matrica. To omogoča odlične mehanske lastnosti kompozitnih delov, izdelanih iz obeh materialov. Kompoziti imajo lahko zelo visoke mehanske lastnosti v primerjavi s kovinami, kot so aluminij ali drugi kompoziti, ojačeni z vlakni. Glavne industrije, kjer se uporabljajo polimeri, ojačani z ogljikovimi vlakni, vključujejo letalsko, avtomobilsko industrijo, vetrne turbine, šport in prosti čas ter gradbeništvo. Predvsem so se uveljavili v avtomobilski industriji, zaradi lahkih konstrukcij, ki zmanjšujejo porabo energije [20].



Slika 7: Ogljikova vlakna [21]

Kot pove že ime, ogljikova vlakna vsebujejo več kot 90 % ogljika. Drugi element je dušik, ki ga je mogoče najti v komercialno dostopnih ogljikovih vlaknih v razponu med 3 % in 7 %. Preostali element v ogljikovih vlaknih je kisik, ki ga je < 1 %. Zaradi oksidativne površinske obdelave vlaken ga najdemo predvsem na površini vlaken. Omogoča boljši oprijem premazov na vlakna in nazadnje na matrico, kar zagotavlja boljše lastnosti vlaken v kompozitnih materialih. Na atomski ravni je razporeditev ogljikovih atomov podobna razporeditvi atomov grafita v šesterokotni atomski strukturi. V grafitu so šesterokotne plasti homogeno vzporedno zložene druga na drugo, tako da tvorijo kristalno krhko snov, plasti pa se zaradi majhnih medmolekulskih Van der Waalsovih sil lahko premikajo druga proti drugi. V ogljikovih vlaknih so šesterokotne

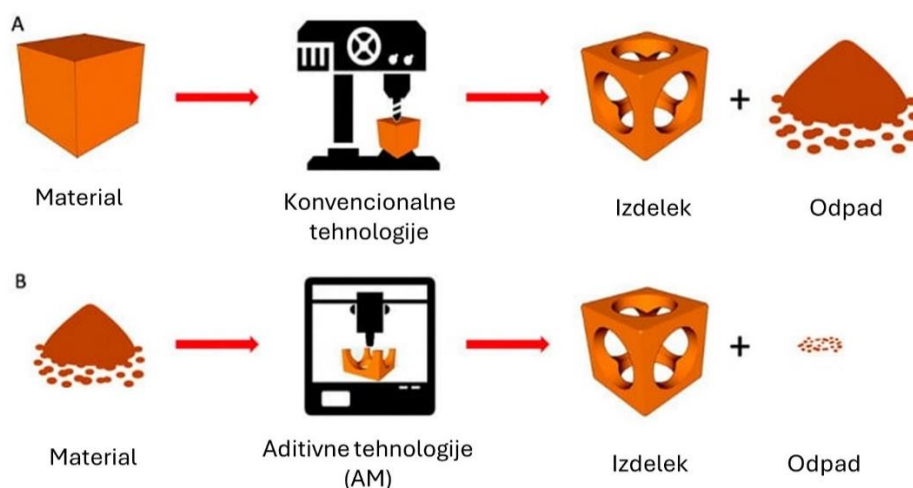
plasti razporejene v veliko bolj amorfni strukturi, ki se med seboj valjajo in zlagajo. Ta amorfna struktura daje ogljikovim vlaknom edinstvene materialne lastnosti z visoko natezno trdnostjo in visoko togostjo [20].

Zaradi dinamičnih, toplotnih, elektromagnetnih, električnih in kemijskih lastnosti so ogljikova vlakna idealna izbira za visoko zmogljive aplikacije. Morda so najpomembnejše lastnosti ogljikovih vlaken mehanske in dinamične lastnosti, s tem pa je povezana visoka trdnost in visok modul. Molekule ogljika imajo zelo visoko trdnost vezi, kar ima za posledico izjemno visoko trdnost in modul vzdolžno na os vlakna. Med plastmi osnovnih ravnin obstajajo le Van der Waalsove vezi, ki so veliko šibkejše, kar ima za posledico veliko manjšo trdnost in modul vzdolž te osi. Zelo visoke trdnosti in modula ni mogoče doseči hkrati. Modul se običajno poveča z zvišanjem temperature karbonizacije, kar poveča stopnjo kristaliničnosti plasti grafitnega tipa. S povečano kristaliničnostjo so vlakna bolj občutljiva na napake, kar ima na koncu za posledico manjšo trdnost. Značilna natezna trdnost visoko zmogljivih vlaken je med 3000 MPa in 6000 MPa. Modul elastičnosti pa se giblje med 250 GPa in 500 GPa. Vrednosti so manjše od teoretično pričakovanih vrednosti zaradi pomanjkljivosti v kemijski strukturi in nehomogenosti pri spajanju plasti. Tipična gostota vlaken je trenutno med 1,7 g/cm³ in 2,0 g/cm³. Zaradi nizke gostote in močnih mehanskih lastnosti v kompozitnih materialih so idealna zamenjava za kovine. Posebej pomembne so postale v letalski in vesoljski industriji, kjer je potrebna nizka teža. V primerjavi z drugimi organskimi vlakni imajo ogljikova vlakna tudi zelo nizko stopnjo lezenja, saj je mreža zelo močna. Imajo tudi odlične lastnosti dušenja vibracij, ki so pogosto potrebne pri visoko zmogljivih aplikacijah, kjer se uporabljajo močne oscilacijske moči. Kemijska struktura ogljikovih vlaken in njihov makroskopski amorfni značaj na koncu povzročita tudi manjšo utrujenost v primerjavi z drugimi vlakni. V primerjavi z organskimi vlakni so kemijsko zelo inertna in imajo visoko odpornost proti kislinam in organskim topilom. V primerjavi s kovinami ne povzročajo korozije in zagotavljajo dolgoročno vzdržljivost in zanesljivost izdelanih delov. Tudi nizka toplotna prevodnost je v primerjavi s kovino koristna za določene aplikacije. Kar zadeva elektromagnetne in električne lastnosti, imajo ogljikova vlakna nizko absorpcijo rentgenskih žarkov, so nemagnetna in imajo visoko električno prevodnost [20].

2.4 Dodajalne tehnologije – ekstruzija materiala

Ekstruzija materiala (MEX) je po standardu ASTM dodajalna tehnologija, ki je opredeljena kot postopek AM, pri katerem se material ekstrudira skozi šobo in selektivno nanaša sloj na sloj. Ekstrudiranje termoplastov je zelo priljubljeno, zaradi svoje združljivosti z različnimi polimeri ter njihove razširljivosti in robustnosti izvajanja. Ekstruzija materiala se večinoma izvaja z neprekinjenim vnosom termoplastičnega filamenta, ki se zmehča v grelnem bloku ekstruderja in se nanaša skozi šobo. Takšni sistemi so po standardu ASTM znani pod imenom izdelava s spajanjem filamentov (angl. Fused filament fabrication (FFF)) ali pod komercialnim imenom modeliranje s spajanjem slojev (angl. Fused Deposition Modeling (FDM)) [22]. V primerjavi s

konvencionalnimi tehnikami izdelave ima AM več izrazitih prednosti; možnost izdelave delov z bolj zapleteno geometrijo, brez potrebe po orodjih in brez odpadnega materiala [23]. Na sliki 8 je prikazan proces konvencionalnih in dodajalnih tehnologij ter razlik med njima.



Slika 8: Razlike v procesu med konvencionalnimi in dodajalnimi tehnologijami [24]

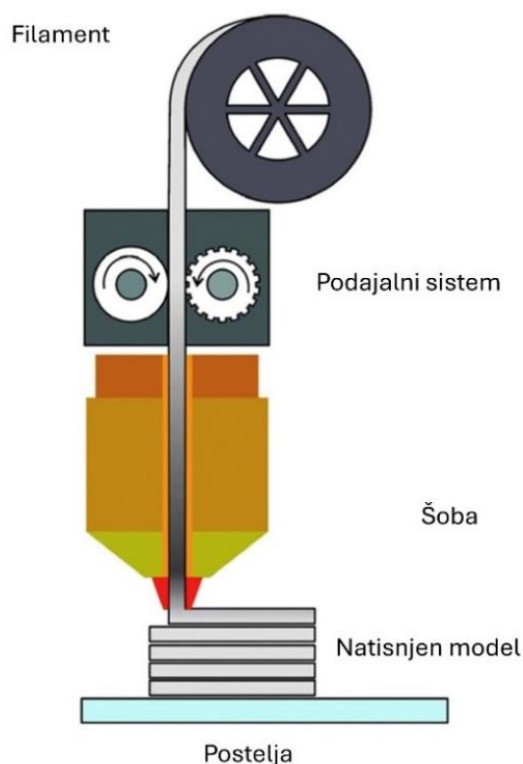
AM je vse bolj priljubljena v aplikacijah, kot sta hitra izdelava prototipov in komercialna proizvodnja delov. Obstajajo različne tehnologije AM, kot so stereolitografija (SLA), selektivno lasersko sintranje (SLS), FFF itd. [25]. Postopki AM in 3D-tiskanja postajajo vse bolj priljubljeni. 3D-tiskanje je tehnologija izdelave dejanskih predmetov neposredno iz računalniških modelov, pri kateri se nanaša material sloj po sloj in je zato drugačna od klasičnih tehnologij izdelave, kjer se uporabljajo postopki odnašanja materiala. 3D-tiskanje, pod katero spada tehnologija FFF, se je prvič uveljavilo zaradi načina hitre izdelave prototipov. 3D-tiskanje je bilo ustvarjeno za pomoč pri uresničevanju zamisli inženirjev. Omogoča izdelavo natisnjenih delov. Z uporabo je 3D-tiskanje pripomoglo k veliko napredkom v razvoju izdelkov. Zmanjšuje čas in stroške razvoja izdelka. Vendar se trenutno še ni uveljavil v proizvodnji [5]. Aplikacije 3D-tiskanja so običajno primerne za relativno majhne proizvodne količine, majhne velikosti in zapletene zasnove. Na splošno velja, da je 3D-tiskanje stroškovno učinkovito, če je obseg proizvodnje pod 1000 enot v primerjavi z brizganjem plastike. Poleg tega toplotna prevodnost filamentov za 3D-tiskanje prav tako vpliva na lastnosti izdelka, saj lahko poveča ali zmanjša kakovost spajanja med posameznimi plastmi [6].

2.4.1 Izdelava s spajanjem filamentov

FFF je pomembna dodajalna tehnologija, zaradi številnih koristnih lastnosti [22]. Osnovni princip FFF-tehnologije je prikazan na sliki 9. Staljeni material se iztisne skozi šobo in se nanaša v plasteh. Glavni sestavni del te tehnologije je ekstruder, v katerem material dovajamo preko filamenta ali granulata. Ta se stali v grelnem bloku. Nato se staljeni material nanese na delovno platformo s pomočjo šobe. FFF-tehnologija je

preprosta, prilagodljiva in omogoča majhne previse. To je najcenejša tehnologija 3D-tiskanja. Pri 3D-tiskanju na osnovi FFF-tehnologije je bilo opravljenih veliko raziskav za izboljšanje procesnih parametrov za boljšo površinsko kakovost in izboljšanje mehanskih, toplotnih in električnih lastnosti [26].

FFF je eden najpogostejše uporabljenih postopkov AM. Na splošno se za izdelavo delov uporabljajo termoplasti in njihovi kompoziti. Raziskovalci si še vedno prizadevajo razviti nove materiale za filamente za boljše lastnosti. V avtomobilski industriji se postopek FFF uporablja za izdelavo funkcionalnih delov, saj se lahko natisnejo kompleksni deli z nadzorovano maso. V zadnjih letih se je pojavilo tudi veliko možnosti za uporabo FFF na področju medicine. Na medicinskem področju je povpraševanje po razvoju izdelkov po meri veliko, saj vsak pacient potrebuje edinstvene vsadke, orodja, podporna vodila in proteze. Postopek FFF je primeren za izdelavo izdelkov po meri z visoko učinkovitostjo in natančnostjo ob nizkih stroških. Na splošno se za zajem anatomije pacienta za ogrodja in vsadke uporablja računalniška tomografija (CT). Zbirke podatkov CT se lahko uporabijo za razvoj 3D modela, ki ga potem lahko uporabimo za 3D-tiskanje. Poleg zgoraj navedenih aplikacij se postopek FFF uporablja tudi v različnih realnih aplikacijah. Edinstvene značilnosti postopka FFF so tiskanje kompleksnih delov, nadzor teže s prilagajanjem gostote polnila, zmanjšanje stroškov, povečanje trdnosti z izbiro struktur polnila in povečanje dimenzijske natančnosti [27].



Slika 9: Prikaz izdelave s spajanjem filamentov [28]

Prednosti FFF-tehnologije so možnost izdelave konceptualnih, funkcionalnih prototipov, ter končnih izdelkov. Omogoča izbiro različnih gostot zapolnitve notranjosti predmeta. Vse bolj se širi izbor materialov s specifičnimi lastnostmi. Filament lahko

preprosto zamenjamo in enostavno odstranimo podpore. Natiskane kose lahko preprosto naknadno obdelujemo. 3D-tiskalnike in ostale pomožne naprave se lahko enostavno vzdržuje. Slabosti FFF-tehnologije pa so natančnost izdelave. Pri konvencionalnih postopkih imamo zaenkrat še vedno boljšo kakovost izdelkov. Prav tako je kakovost površine veliko boljša, saj so pri FFF-tehnologiji opazni prehodi med sloji. Krožni presek filamenta ovira natančno izdelavo kotnih struktur. Imamo omejeno hitrost izdelave in problem te tehnologije je tudi parcialno krčenje izdelka zaradi hitrega segrevanja in ohlajanja [28].

2.4.2 Procesni parametri

Parametri postopka FFF pomembno vplivajo tudi na lastnosti, kot so hrapavost površine, dimenzijska natančnost in mehanske lastnosti. Obstaja veliko parametrov, ki vplivajo na lastnosti, kakovost izdelave delov in učinkovitost postopka. Pomembni parametri so hitrost tiskanja, debelina plasti, orientacija, kot rastra, vzorec polnila, gostota polnila, temperatura tiskanja. Zgoraj omenjeni parametri so nekateri, ki jih je mogoče nadzorovati, vendar so odvisni od sistema AM, ki je uporabljen za izdelavo. Ta parametra sta premer šobe in temperatura posteljice [29].

2.4.3 Hitrost tiskanja

Hitrost tiskanja je predstavljena kot hitrost gibanja šobe med nanašanjem filamenta na strukturo. Hitrost tiskanja je natančno sorazmerna s časom, ki ga potrebujemo pri tiskanju. Ima prevladujoč vpliv na kakovost sestavnega dela. Po drugi strani pa je vpliv hitrosti tiskanja nepomemben pri tiskanju tanjših plasti [29].

2.4.4 Višina plasti

Višina plasti je predstavljena kot višina vsake natisnjene plasti. Višina plasti je vedno manjša od premera šobe, kar pomeni, da je največja višina plasti, ki jo je mogoče doseči enaka premeru konice šobe. Ta parameter je odvisen od premera ali vrste uporabljene šobe [29].

2.4.5 Gostota polnjenja

Količina materiala, natisnjenega na sestavni del, se imenuje gostota polnjenja. Odstotek polnilnega materiala je neposredno povezan z gostoto. Na tribološke lastnosti tiskanega elementa neposredno vpliva gostota polnila. Manjša gostota ima velik vpliv na lastnosti, čeprav gostejša komponenta zagotavlja boljše lastnosti, vendar je za to potrebnega več časa, stroškov in materiala za izdelavo komponente [29].

2.4.6 Rastrski kot

Rastrski kot označuje pot nanašanja materiala po x osi v uporabljenem stroju vzdolž delovne platforme. Rastrski kot je lahko kjer koli med 0 in 90. Večinoma se rastrski kot določi glede na x-os [29].

2.4.7 Orientacija 3D-tiska

Orientacija tiskanja pojasnjuje, kako je izdelek oz. model postavljen v prostoru glede na tri glavne osi obdelovalnega stroja, in sicer x, y in z [29].

2.4.8 Temperatura ekstrudiranja

Temperatura, ki se vzdržuje znotraj ogrevalne šobe, dokler se material ne ekstrudira, je znana kot temperatura ekstrudiranja. Ta parameter močno vpliva na viskoznost materiala. Višja temperatura ekstrudiranja vpliva tudi na lastnosti dela. Idealno temperaturo je treba ohraniti, saj vpliva na viskoznost filamenta, kar lahko vpliva na kakovost izdelka. Ko se material ekstrudira skozi šobo, se temperatura z začetne temperature zniža na temperaturo v komori, kar povzroči notranje napetosti. Notranje napetosti povzročijo deformacije na midslojih, kar lahko privede do okvare izdelanega sestavnega dela [29].

2.4.9 Struktura v polnilu

Notranja struktura sestavnega dela se nanaša na strukturo zapolnitve komponente, ki se tiska s FFF. Struktura je lahko šesterokotna, pravokotna, satovje, linearna, diamantna itd. Šesterokotna struktura je najpogostejše uporabljena pri postopku FFF [29].

2.5 Toplotna obdelava

Toplotna obdelava izvira iz metalurgije, uporabna praksa pa je postala predvsem zaradi izboljšanja duktilnosti in moči jekla. Podobno lahko toplotna obdelava pri 3D-tiskanju znatno poveča mehanske lastnosti izdelkov. Gre za postopek, ki vključuje segrevanje izdelka in nato ohlajanje v nadzorovanem okolju. Postopek toplotne obdelave je sestavljen iz treh stopenj, ki sledijo dvigu temperature materiala: okrevanje, ponovna kristalizacija in rast zrn. To zmanjša notranjo napetost v materialu, kar zagotavlja močnejši izdelek [30]. Drug pomemben učinek na izdelek je povečanje debeline kristalov v smeri verige pri segrevanju delnokristaliničnih polimerov nad določeno temperaturo. Te spremembe je mogoče izmeriti z elektronsko mikroskopijo in rentgenskim sipanjem pod majhnim kotom [31]. Toplotna obdelava tako izboljša mehanske lastnosti 3D-tiskanega izdelka. Izdelku daje večjo natezno trdnost, večjo togost in večjo temperaturno odpornost [30].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Material

V diplomski nalogi smo uporabili PA 6, ojačan z 20 % CF. Njegovo trgovsko ime je Polymaker – PolyMide™ PA6-CF. Premier filamenta znaša 1,75 mm. Ker je PA zelo higroskopičen material, smo pred 3D-tiskanjem material sušili pri 80 °C.

3.2 3D-tisk

Pri optimizaciji procesa smo najprej natisnili epruvete, ki smo jim okarakterizirali mehanske in termične lastnosti, da bi material bolje spoznali in popisali proces parametrov pri 3D-tisku. S pridobljenimi rezultati smo lahko predvidevali sposobnost materiala na utrujanje, kar je ključna karakteristika, ki ji je podvržen zobnik med svojim delovanjem.

Za izdelavo epruvet smo uporabili tiskalnik Tmaker BIGFoot Pro 500 DUAL, ki je prikazan na sliki 10. Vsi vzorci (slika 11) so bili natisnjeni na grelno površino pri 35 °C brez podpor. Temperatura tiskanja se je spreminjala, da bi analizirali vpliv temperature na mehanske lastnosti. Temperature šobe so bile 270 °C, 280 °C in 290 °C. Vzorci so označeni tako, da je v najprej naveden material, nato vrednost temperature tiska (na primer PA6CF270 predstavlja poliamid z ogljikovimi vlakni, natisnjen pri temperaturi 270 °C). Hitrost tiskanja je bila 20 mm/s, vzorci pa so bili natisnjeni s 100-odstotnim polnjenjem. Vzorci so bili najprej natisnjeni vertikalno v orientaciji XYZ, višina plasti pa je bila 0,2 mm. Hlajenja nismo uporabljali. Po analizi temperature ekstrudiranja, smo preverili še vpliv orientacije 3D-tiska na mehanske lastnosti. Vsi parametri so ostali isti, razen, da smo tiskali navpično v XYZ-orientaciji pri temperaturi 270 °C.



Slika 10: Tumaker B500 DUAL

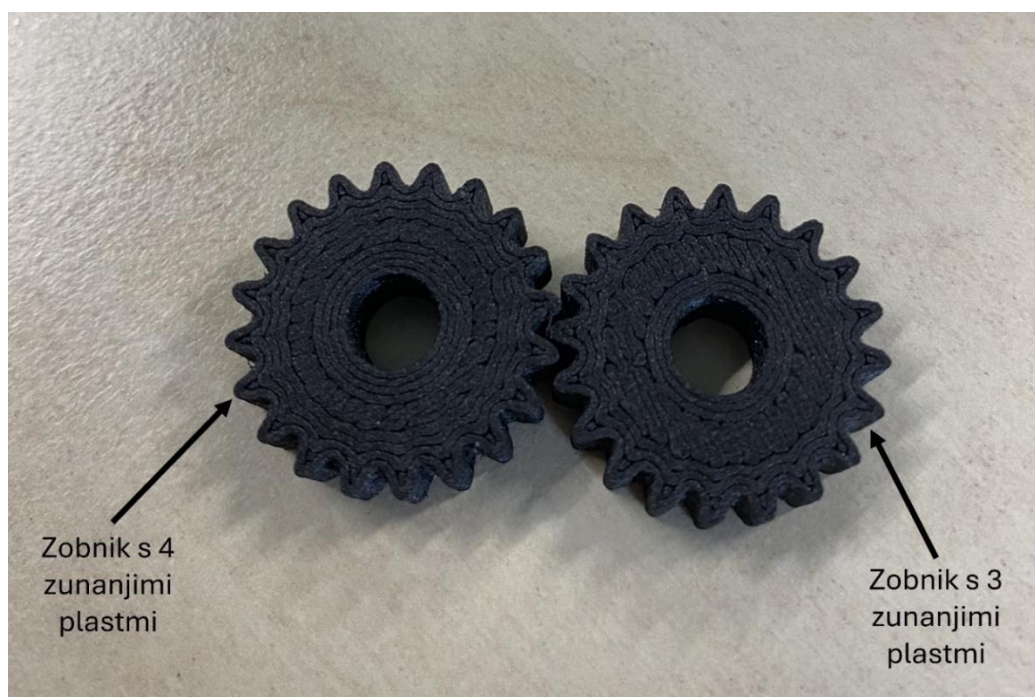


Slika 11: a) Epruveta za upogibni preizkus, b) Epruveta za DMA

Po optimizaciji procesa, smo začeli s 3D-tiskanjem zobnikov (slika 12). Vsi vzorci so bili natisnjeni na grelno površino pri 35 °C brez podpor. Parametri so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Parametri 3D-tiskanja zobnikov

Parametri	Vrednost
Temperatura šobe	270 °C
Gostota polnjenja	50 %
Višina plasti	0,2 mm
Hitrost tiskanja	20 mm/s
Orientacija 3D-tiska	horizontalno
Struktura	Celotno čebelje satje
Rastrski kot	0 °

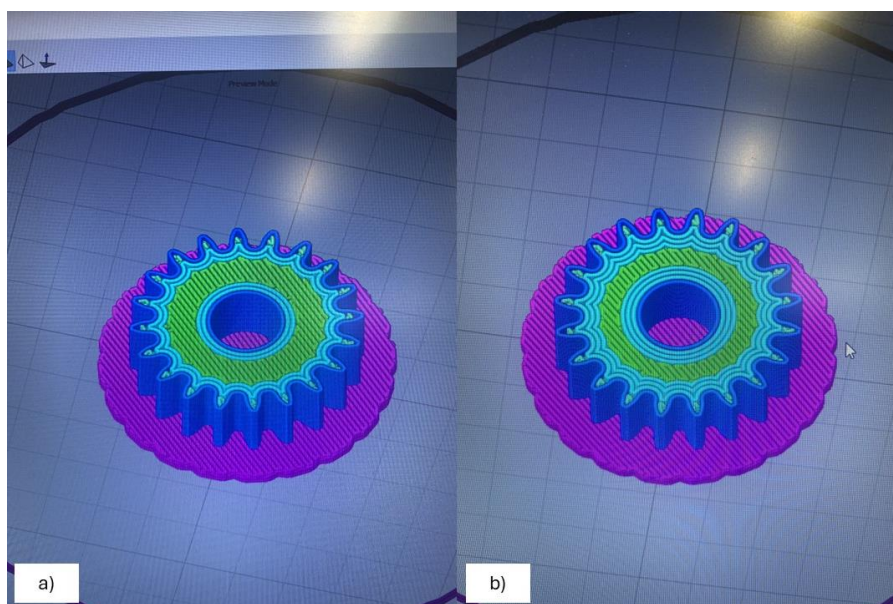


Slika 12: 3D-natisnjeni zobniki

Natisnili smo 7 različnih vzorcev, ki so prikazani v tabeli 2. Najprej smo natisnili 2 različna zobnika. Razlika med njima je bila v zunanjih plasteh. Pri prvem zobniku smo imeli 3 zunanje plasti (ZP3), pri drugem pa 4 (ZP4), kot prikazuje slika 13. Polovico vzorcev smo toplotno obdelali (TO) pri 160 °C za 2 uri. Nato smo 3D natisnili zobnike s 3 zunanji plasti, ki so se razlikovali v višini plasti (VS) (0,1 mm, 0,2 mm in 0,3 mm). Vse vzorce smo kondicionirali, da so vsi imeli enako vlažnost. S tem smo želeli doseči, da smo dobili primerljive rezultate med zobniki.

Tabela 2: Tabela vzorcev 3D-natisnjenih zobnikov

Vzorec	Število zunanjih plasti	Višina sloja	Toplotna obdelava
PA6-CF_ZP3_VS0,2+TO	3	0,2	DA
PA6-CF_ZP3_VS0,2	3	0,2	NE
PA6-CF_ZP4_VS0,2+TO	4	0,2	DA
PA6-CF_ZP4_VS0,2	4	0,2	NE
PA6-CF_ZP3_VS0,1	3	0,1	NE
PA6-CF_ZP3_VS0,2	3	0,2	NE
PA6-CF_ZP3_VS0,3	3	0,3	NE



Slika 13: Prikaz deponiranja slojev za zobnik: a) s tremi zunanji plasti, b) s štirimi zunanji plasti

3.3 Upogibni preizkus

Z upogibnim preizkusom upogibamo preizkušane z določeno hitrostjo in pri tem merimo nastalo silo. Običajno se izvaja za določanje elastičnosti ali odpornosti materiala proti zlomu. Cilj upogibnega preizkusa ni obremenitev materiala do porušitve, ampak deformacija vzorca v določeno obliko [32].

Preizkušanje materiala omogoča določitev elastičnosti, upogibne trdnosti, lomne trdnosti in odpornosti na lom. Te lastnosti se uporabijo za ugotavljanje, ali bo material odpovedal pod pritiskom. Če se material začne lomiti ali pa se popolnoma zlomi med preizkusom, se domneva, da bo material odpovedal tudi med uporabo v primeru podobne obremenitve. Upogibni test se uporablja za določanje mehanskih lastnosti jekla, plastike, lesa, papirja, keramike in drugih materialov [32,33].

Vse vzorce smo testirali na Shimadzu AG-X plus 10 kN napravi (slika 14) za testiranje mehanskih lastnosti, in sicer po standardu ISO 178:2011(16). Razdalja med podporami je bila 64 mm. Hitrost pomika čeljusti je bila nastavljena na 2 mm/min.



Slika 14: Trgalni stroj za upogibni preizkus

3.4 Dinamična mehanska analiza (DMA)

DMA je tehnika termične analize, ki meri lastnosti materialov, ko se ti deformirajo pod periodično obremenitvijo. Dinamične mehanske lastnosti se nanašajo na odziv materiala, ko je izpostavljen periodični sili. Te lastnosti se lahko izrazijo z dinamičnim modulom, modulom izgub in faktorjem izgub. Ta preizkus je uporaben za ocenjevanje relaksacije napetosti in lezenja polimerov. To je pomembna metoda, s katero določimo elastični modul materiala in njegove značilnosti mehanskega dušenja ali razprševanja energije v odvisnosti od frekvence in temperature. Ta preizkus se izvaja z vibriranjem vzorca in spreminjanjem uporabljene frekvence [34].

Vzorci smo merili na dinamičnem mehanskem analizatorju Perkin Elmer DMA 8000. Test smo izvajali od začetni temperaturi 25 °C do 160 °C, amplitudi 0,02 mm, hitrosti segrevanja 2 °K/min, in frekvenci 1 Hz. Pridobili smo meritve dinamičnega E modula, modula izgub in faktorja izgub.

3.5 Termogravimetrična analiza (TGA)

Z uporabo TGA se določuje sprememba mase in hitrost spremembe mase vzorca, kot funkcija temperature, časa in atmosfere. Najpogosteje se TGA uporablja za

preučevanje sestave kompleksnih materialov in napovedovanje njihove termične stabilnosti preko kontinuiranega spremljanja mase vzorca med kontrolirano spremembe temperature in/ali atmosfere [35].

Vzorci smo testirali na Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorci smo segrevali od 25 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 K/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa 10 min pri 550 °C v kisikovi atmosferi (20 mL/min).

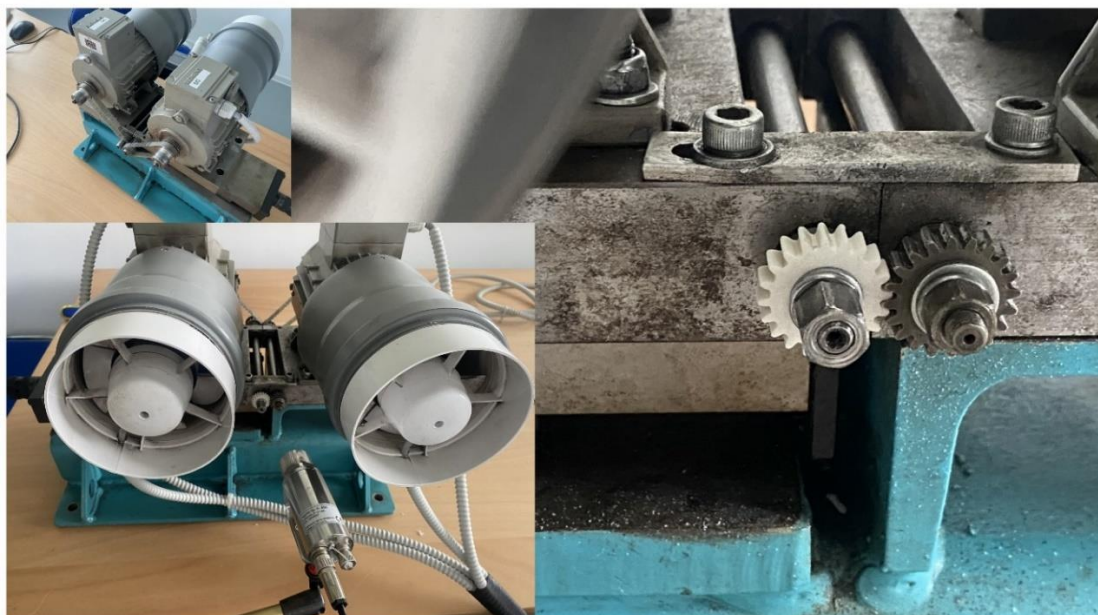
3.6 Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)

Diferenčna dinamična kalorimetrija je metoda, s katero se določujeta količina toplote, ki se absorbira ali se sprosti zaradi sprememb v strukturi materiala, ter temperatura, pri kateri je ta sprememba nastala. Glede na to, da je rezultat vsake strukturne spremembe povezan s toploto, je področje uporabe DSC zares ogromno. Tehnika je nepogrešljiva tako na stopnji začetnega razvoja izdelkov kot tudi kontrole kakovosti končnih proizvodov [36].

Vzorci smo testirali na Mettler Toledo DSC 2. Teste smo izvajali v N₂ atmosferi s pretokom 20 ml/min. Vzorci smo najprej temperirali na 25 °C 5 min; sledilo je segrevanje z 10 K/min od 25 °C do 260 °C, nato izotermni segment pri 260 °C 5 min in ohlajanje od 260 °C do 25 °C z -10 °K/min. Nato so se vsi segmenti še enkrat ponovili.

3.7 Preizkuševališče – testiranje na dobo trajanja zobnikov

Preizkuševališče zobnikov je prikazano na sliki 15. Preizkuševališče je sestavljeno iz ogrodja na katerem sta nameščena dva štiripolna asinhrona elektromotorja s kletko. Za odvajanje odvečne toplote so na zadnji strani motorjev pritrjeni ventilatorji. Moč se od motorjev do gredi prenaša preko jermenov. Hitrost obeh motorjev nadzorujejo frekvenčni pretvorniki. To omogoča izvajanje obremenitve z ustvarjanjem razlike v frekvenci vzbujanja motorjev. Prvi motor poganja pogonsko preko prenosa, na kateri je bil nameščen kovinski zobnik, drugi motor pa gnano gred zavira, na kateri je bil polimerni kompozitni zobnik. Krmilni sistem vključuje števec časa. Frekvenčna pretvornika omogočata zaustavitev preskuševališča, ko se polimerni kompozitni zobnik poruši. Običajno se testira pri različnih momentih (najmanj treh) s tremi ponovitvami, da se pridobi podatke o ciklični trdnosti (upogibni korenski napetosti) materiala [12].



Slika 15: Preizkuševališče za testiranje zobniških dvojic

Testiranje zobnikov se je izvajalo pri standardnih pogojih s temperaturo 23 °C in relativno vlago 50 %. Za pogonski zobnik smo uporabili kovinski zobnik iz 42CrMo4, ki je bil poboljšán in žarjen (angl. quenched and tempered (QT)) (slika 16). Eksperimenti so bili izvedeni na obremenitveni točki – momentu 1,5 Nm. Testirali smo pri zelo visokem momentu, zato da testi niso bili predolgi. Na osnovi doseženih ciklov lahko hitro dobimo informacijo, ali je testirani material primeren za zobniško aplikacijo. Imamo tudi relevantno primerjalno bazo testiranih podobnih materialov, ki se bodo primerjali z materialom, obravnavanim v diplomskem delu. Momente smo nastavili v skladu s tabelo, ki je v prilogi 1 (slika 34). Podatki v tabeli so pridobljeni s pomočjo predhodnega umerjanja preizkuševališča z laserskim žarkom, kjer so se predhodno merile torzijske deformacije pri poljubno specificiranih frekvencah vrtenja gredi. Vrtilno hitrost smo prebrali iz momentne tabele in je bila 1400 min⁻¹. Pri tem smo z infrardečo termo kamero merili temperaturo v coni ubiranja med obema zobnikoma. Uporabili smo računalniški program za vizualizacijo temperature.



Slika 16: 3D-natisnjen zobnik PA6-CF s 42CrMo4+QT

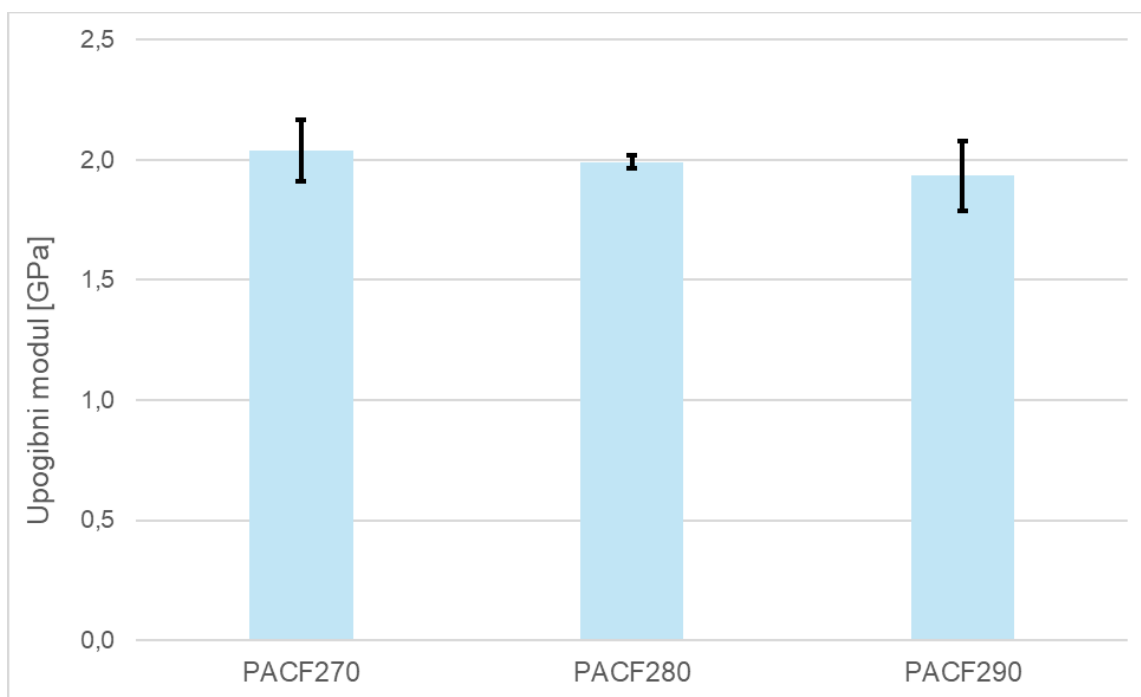
4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Optimizacija procesa

4.1.1 Vpliv temperature na mehanske lastnosti

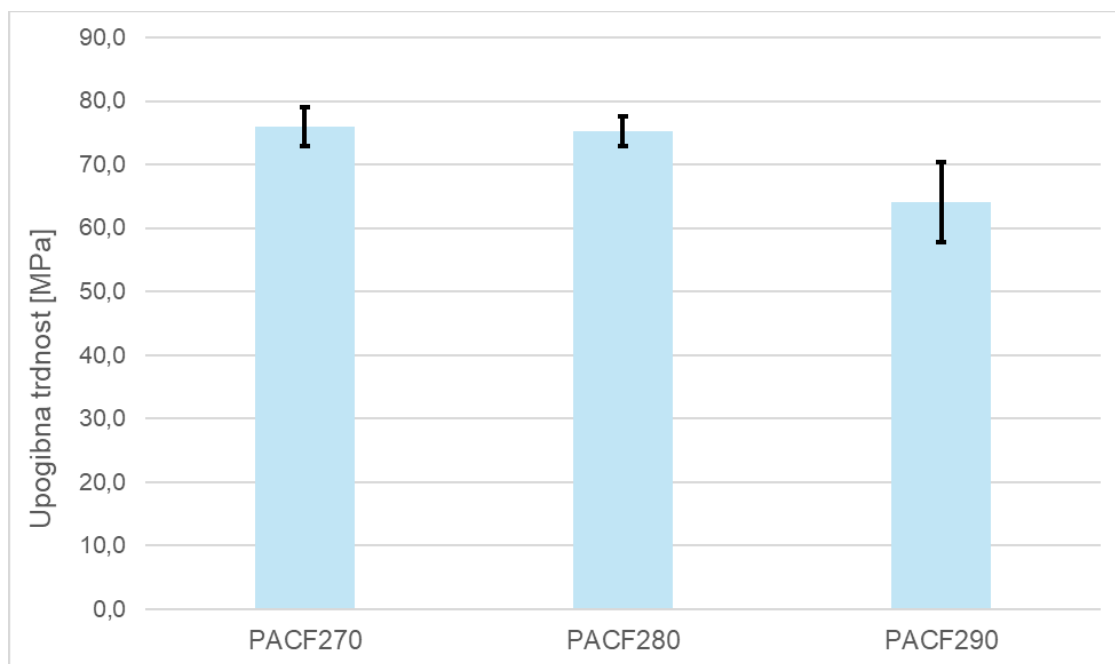
Vpliv temperature smo izvajali, da bi našli ustrezno temperaturo 3D-tiska. Napačna temperatura je lahko vzrok za velike težave pri pretoku filamenta in adheziji materiala. Zaradi nizke temperature so zelo pogoste težave s slabo adhezijo med sloji in pojava vrzeli. Nasprotno pa prekomerna temperatura povzroča slabo površino izdelka in degradacijo materiala [37]. Zato smo iskali optimum, kjer bodo mehanske lastnosti materiala najboljše.

Na slikah 17, 18 in 19 so prikazani rezultati upogibnega preizkusa vzorcev pri 3 različnih temperaturah tiskanja. Najboljše mehanske lastnosti smo izmerili pri 3D-tiskanju s temperaturo 270 °C in 280 °C. Upogibni modul je znašal okoli 2 GPa, z razlikami med posameznimi vzorci v okviru standarde napake (interval napak).



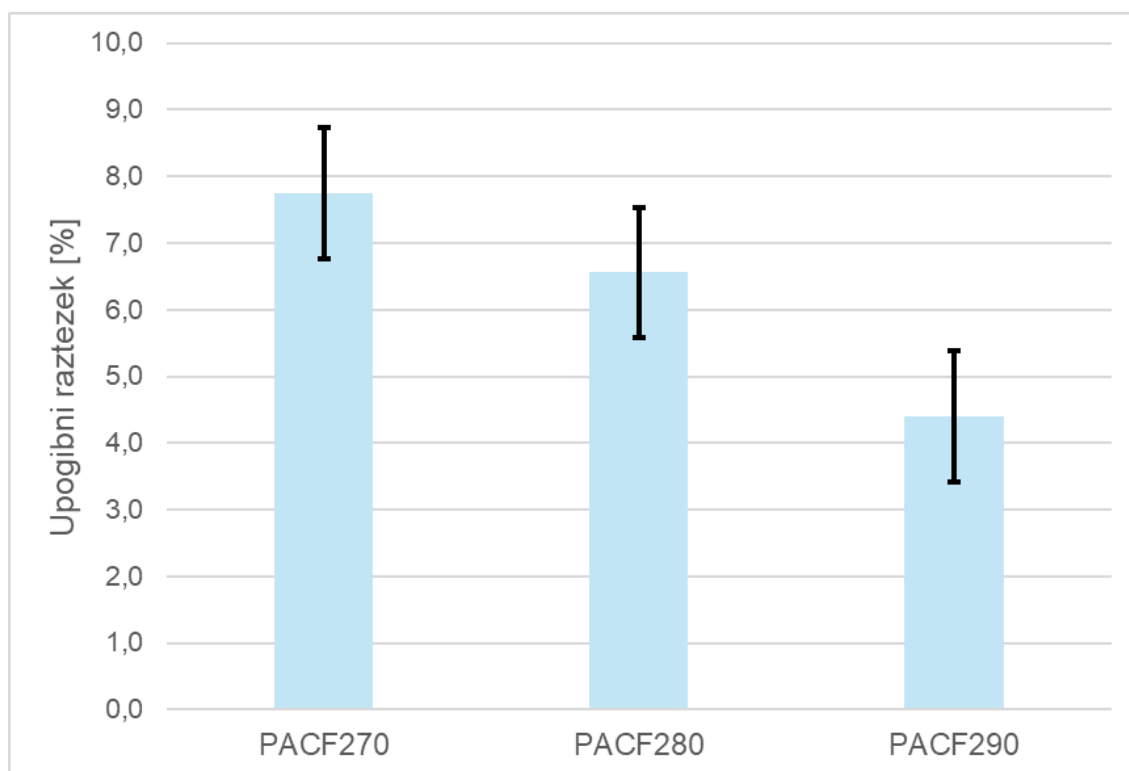
Slika 17: Upogibni modul - vpliv temperature

Upogibna trdnost (slika 18) je bila pri temperaturi 270 °C 75,9 MPa. Pri temperaturi 280 °C je bila vrednost v okviru standardne napake, medtem ko se je pri temperaturi 290 °C upogibna trdnost znatno zmanjšala.



Slika 18: Upogibna trdnost - vpliv temperature

Upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti je znašal pri PACF270 7,8 %. Pri PACF280 in PACF290 se je upogibni raztezek znižal na 6,6 % in 4,4 %.



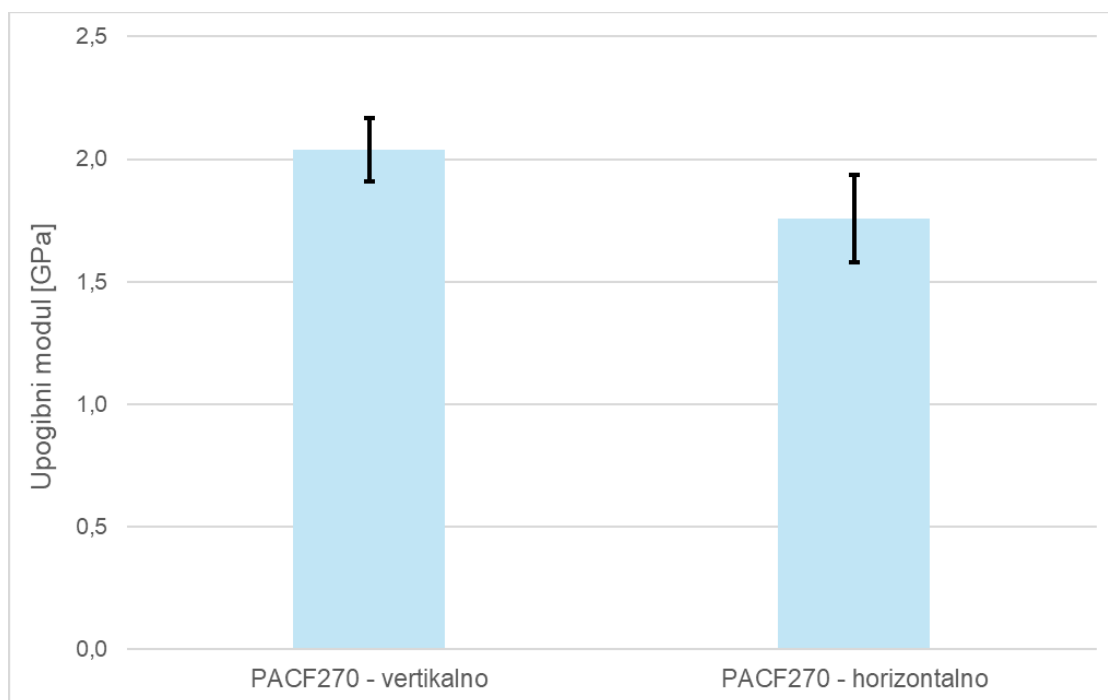
Slika 19: Upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti - vpliv temperature

Sklepamo, da se je pri višji temperaturi material že začel degradirati in s tem izgubljati mehanske lastnosti. Za 3D-tisk smo izbrali temperaturo 270 °C, ker smo pri njej izmerili najboljše mehanske lastnosti.

4.1.2 Vpliv orientacije 3D-tiska na mehanske lastnosti

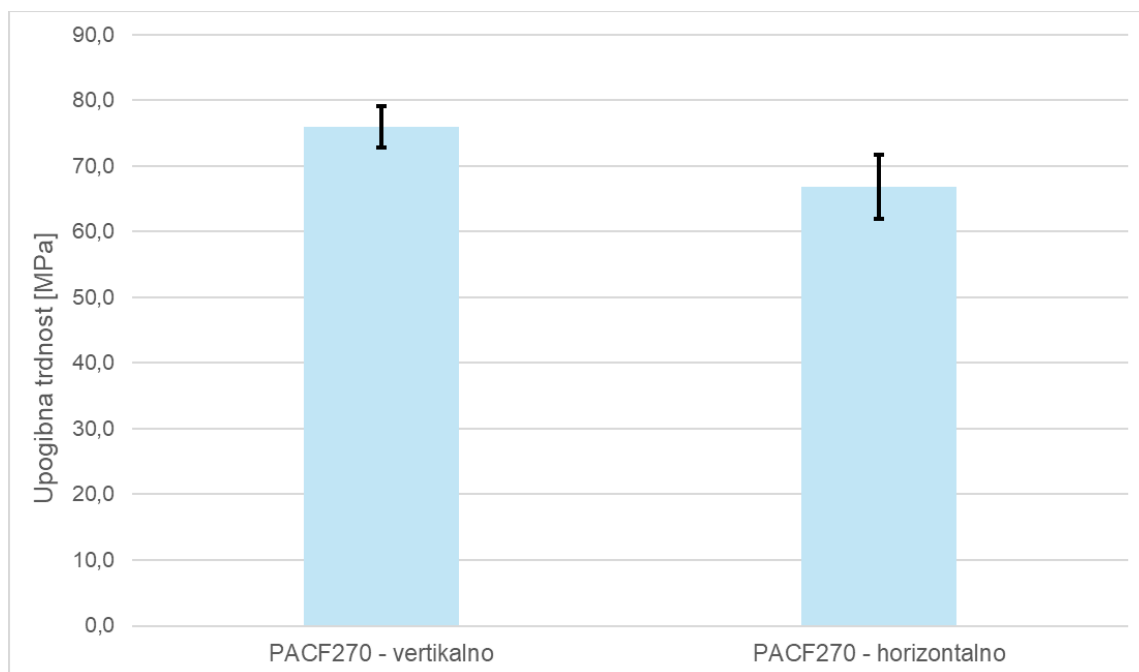
Orientacija 3D-tiska lahko vpliva na natančnost, hitrost, trdnost in kvaliteto površine. Vsi 3D-tiskani deli imajo vidne linije plasti, vendar so plasti nepravilne orientacije bolj vidne. Orientacija vpliva tudi na hitrost tiskanja, saj zmanjšuje ali povečuje število potrebnih slojev. Več slojev pomeni nižjo hitrost tiskanja, zato lahko pravilna orientacija skrajša čas tiskanja. 3D-tiskani deli so bolj robustni v X-Y smeri kot v Z smeri. Vendar lahko s pravilno orientacijo zapolnimo vrzeli in povečamo trdnost. Večinoma je navpična gradbena plast najšibkejša. S pravilno usmeritvijo delov se lahko izognemo potrebnim podporam in zmanjšamo hitrost tiskanja in zapletenost dela [38]. Nas je predvsem zanimalo, kako orientacija 3D-tiska vpliva na mehanske lastnosti.

Na slikah 20, 21 in 22 lahko vidimo, kako orientacija 3D-tiska vpliva na mehanske lastnosti. Upogibni modul se je zmanjšal iz 2,03 GPa na 1,76 GPa pri horizontalni orientaciji izdelave. Kar pomeni, da je togost izdelkov višja pri izdelavi v vertikalni smeri.



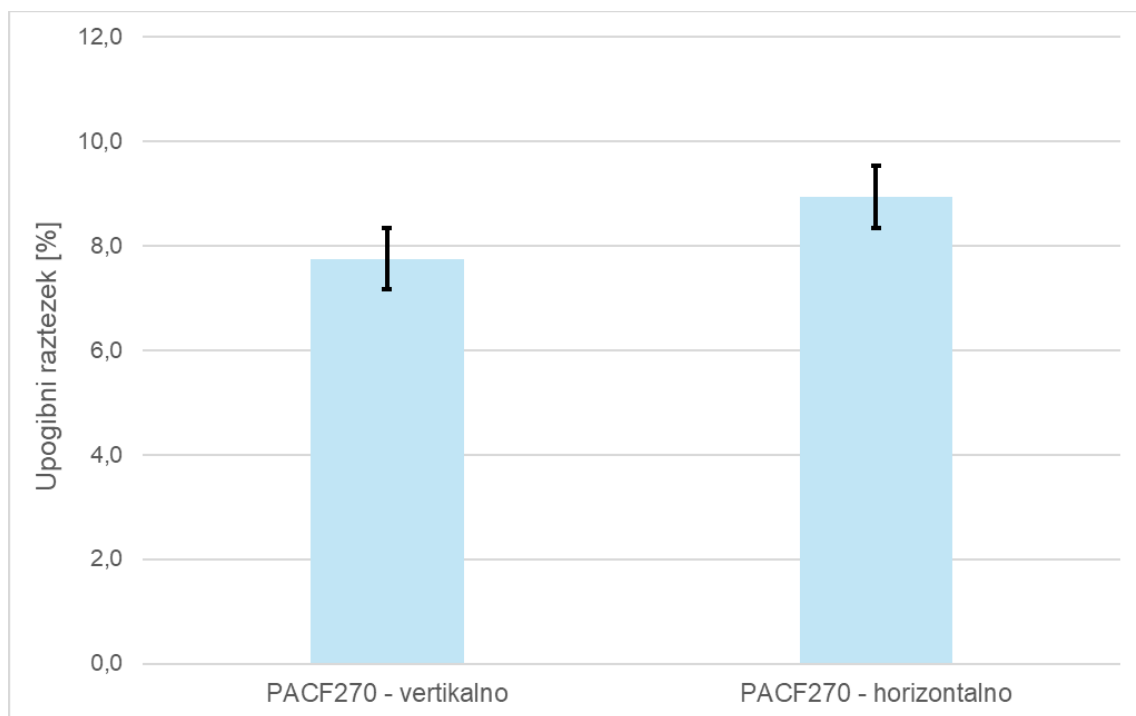
Slika 20: Upogibni modul - vpliv orientacije 3D-tiska

Upogibna trdnost se je znižala v horizontalni smeri 3D-tiska. Padla je iz 75,9 MPa na 66,8 MPa, kot prikazuje slika 21.



Slika 21: Upogibna trdnost - vpliv orientacije 3D-tiska

Upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti se je zvišal iz 7,8 % na 8,9 % pri horizontalni orientaciji 3D-tiska (slika 22).



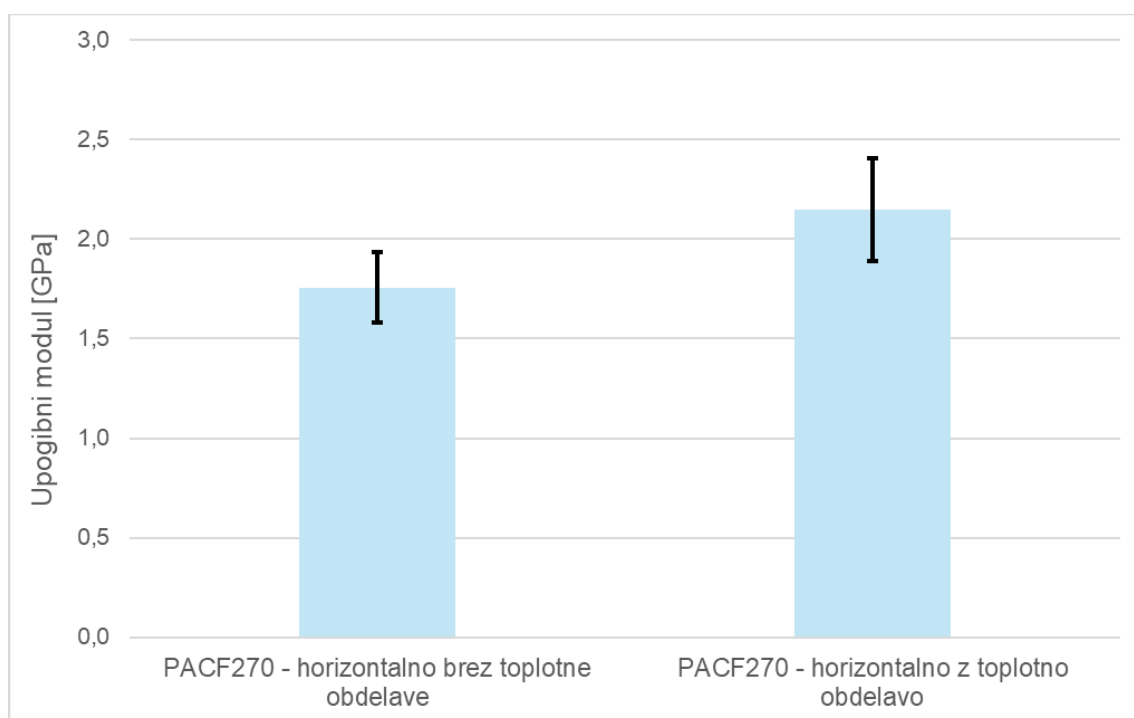
Slika 22: Upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti - vpliv orientacije 3D-tiska

Pričakovali smo, da bodo lastnosti boljše pri 3D-tisku epruvete v horizontalni smeri, zaradi odsotnosti midslojev v smeri obremenitve. Sklepamo, da je nižja togost in trdnost epruvet tiskanih v horizontalni smeri posledica višjih notranjih napetosti, saj je v X-Y smeri večji volumen materiala.

4.1.3 Vpliv toplotne obdelave na mehanske lastnosti

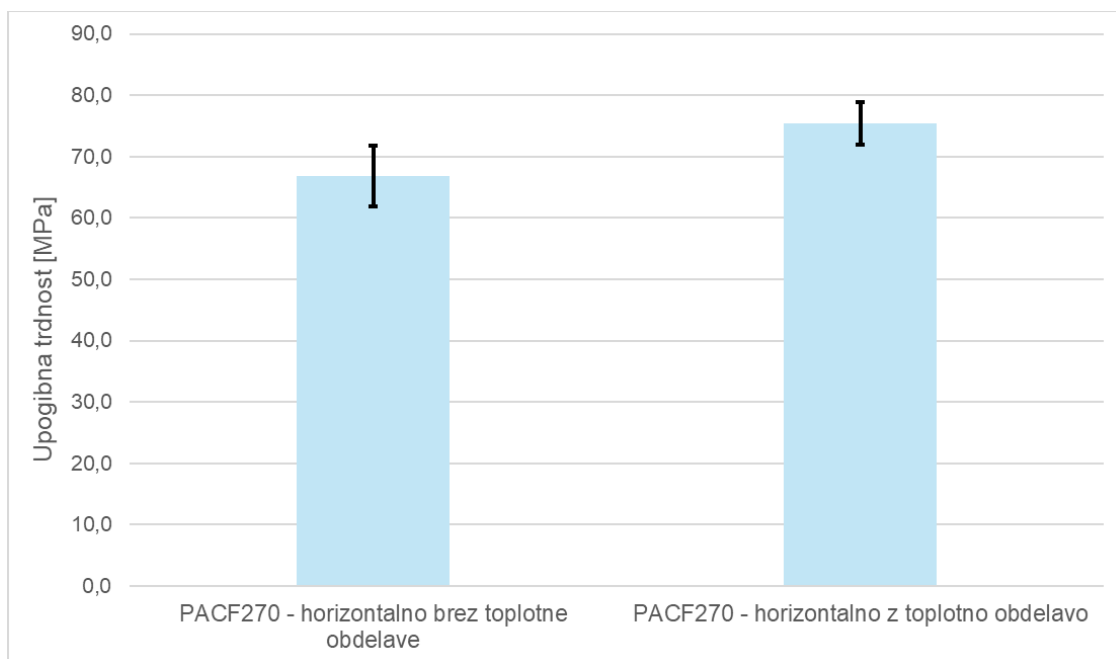
Toplotna obdelava zmanjša notranje napetosti v izdelku in izboljša mehanske lastnosti. Lahko se izvaja pri ali nad temperaturo steklastega prehoda (T_g). Trajanje pa se lahko giba od nekaj sekund do več sto ur. Toplotna obdelava učinkuje tako, da polimerni verige pri povišanih temperaturah difundirajo, s čimer se izboljša medfazna adhezija. Pri delnokristaliničnih polimerih, toplotna obdelava povzroči dokončno kristalizacijo in izboljša mehanske lastnosti [39].

S toplotno obdelavo se je upogibni modul povečal iz 1,76 GPa na 2,15 GPa, kot je razvidno iz slike 23.



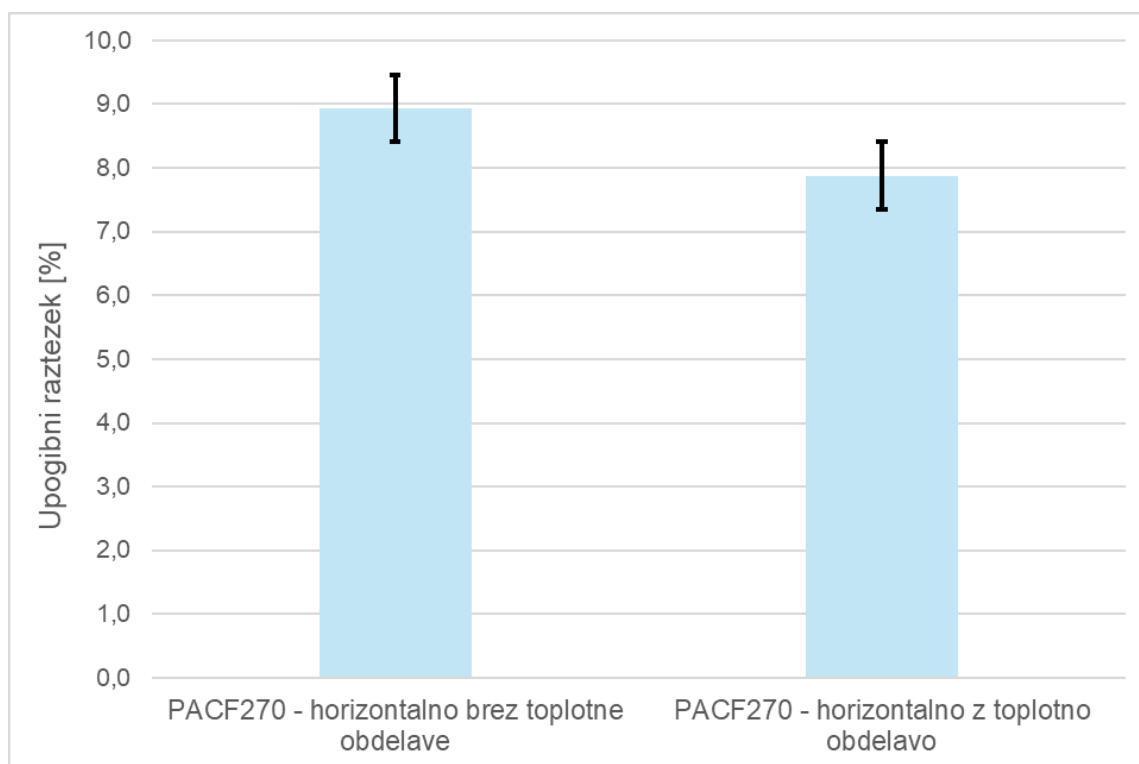
Slika 23: Upogibni modul - vpliv toplotne obdelave

Upogibna trdnost se je prav tako povečala z toplotno obdelavo (slika 24) iz 66,8 MPa na 75,4 MPa.



Slika 24: Upogibna trdnost - vpliv toplotne obdelave

Toplotna obdelava pa je znižala upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti iz 8,9 % na 7,9 %.



Slika 25: Upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti - vpliv toplotne obdelave

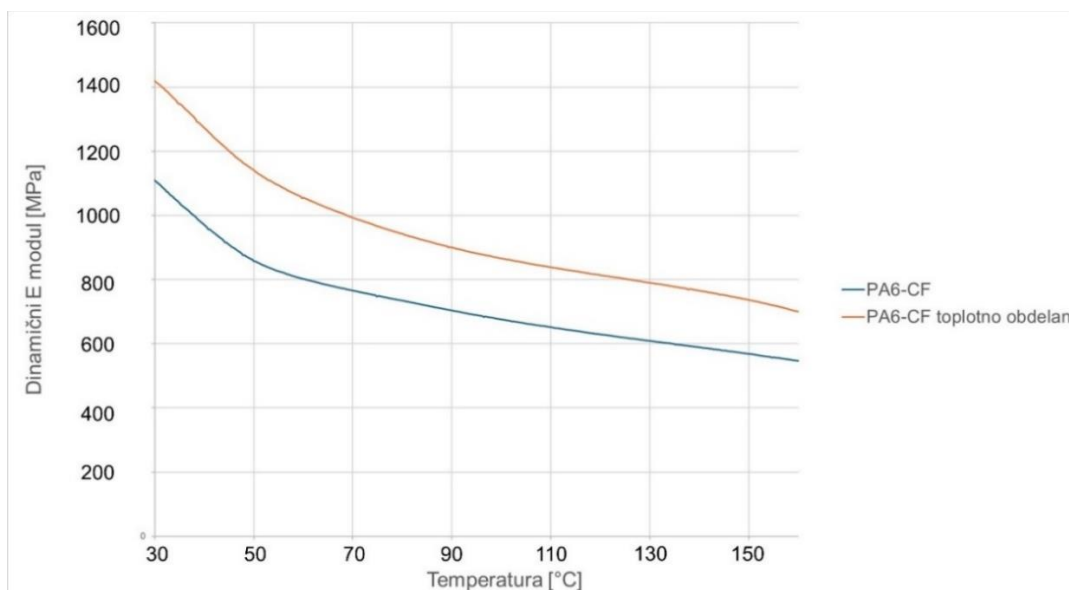
Kot smo pričakovali, je toplotna obdelava zmanjšala notranje napetosti in izboljšala mehanske lastnosti.

4.2 Dinamična mehanska analiza (DMA)

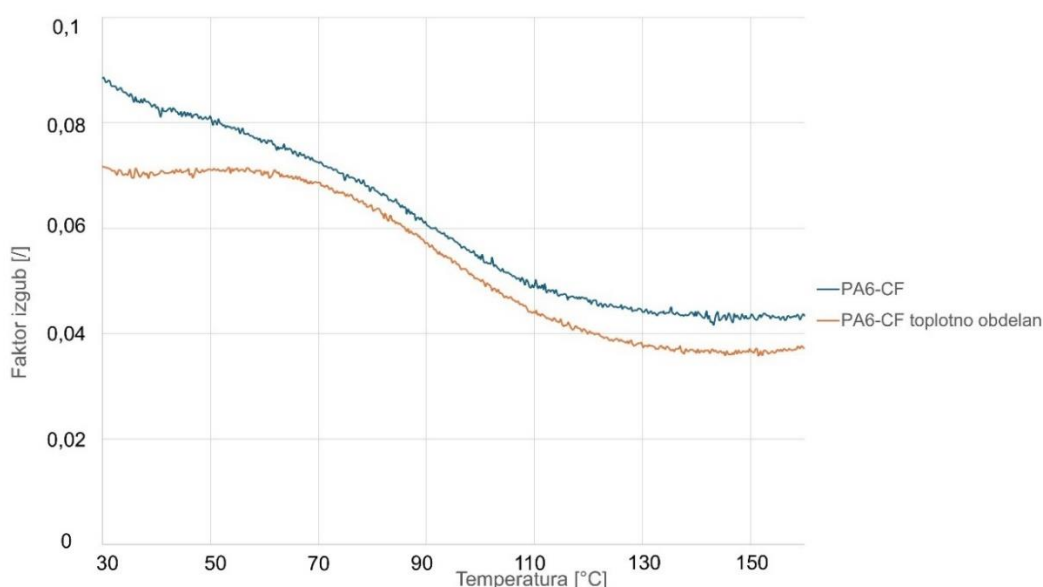
V tabeli 3 so prikazani rezultati DMA. Dinamični E modul vzorcev se niža z naraščajočo temperaturo. Tako neobdelan, kot tudi toplotno obdelan vzorec imata podobno obliko krivulje dinamičnega E modula v odvisnosti od temperature. Dinamični E modul se je povečal pri toplotnem obdelanem PA6-CF iz 1,11 GPa na 1,42 GPa pri 30 °C. Toplotno obdelan vzorec je imel višji dinamični E modul za podobno raven skozi celotno temperaturno območje (razvidno iz slike 26). T_g nismo uspeli določiti, saj modul izgub in faktor izgub nista izražala izrazitega vrha. Predpostavljamo, da se je dinamični E modul pri toplotni obdelavi zvišal kot posledica hladne kristalizacije (večji delež amorfne faze in nižji prosti volumen). Faktor izgub je za malenkost nižji pri toplotnem obdelanem vzorcu (slika 27). Modul izgub je bil večji pri toplotnem obdelanem kompozitu. Iz rezultatov sklepamo, da je dinamični E modul večji in faktor izgub manjši pri toplotnem obdelanem PA6-CF, zaradi manjših notranjih napetosti in višje kristaliničnosti.

Tabela 3: DMA - zbrani rezultati

		PA6-CF	PA6-CF toplotno obdelan
Dinamični E modul (GPa)	Pri 30 °C	1,11	1,42
	Pri 80 °C	0,73	0,94
	Pri 130 °C	0,61	0,79
Modul izgub (GPa)	Pri 30 °C	0,10	0,10
	Pri 80 °C	0,05	0,06
	Pri 130 °C	0,03	0,03
Faktor izgub (I)	Pri 30 °C	0,09	0,07
	Pri 80 °C	0,07	0,06
	Pri 130 °C	0,04	0,04



Slika 26: Dinamični E modul



Slika 27: Faktor izgub

4.3 Termogravimetrična analiza (TGA)

Iz rezultatov v tabeli 4 lahko vidimo, da toplotna obdelava ni vplivala na temperaturo degradacije (T_d). Določili smo tudi primerljiv delež razpada (ΔY), delež saj in ostanek po žarjenju, za katerega predpostavljamo, da je v večini sestavljen iz ogljikovih vlaken. Glede na podatke proizvajalca bi morali vzorci vsebovati 20 % ogljikovih vlaken, vendar smo izmerili rahlo nižji delež (19,0 % in 19,5 %), kar je lahko tudi posledica delnega razpada ogljikovih vlaken v kisikovi atmosferi pri 550 °C. Toplotno obdelan vzorec je nase vezal za 1 % manj vlage. Sklepamo lahko, da toplotna obdelava bistveno ne vpliva na razpad polimera med TGA analizo. TGA termogrami so v prilogi 2 (slika 35 in 36).

Tabela 4: TGA - zbrani rezultati

Vzorec	T_d (°C)	ΔY (%)	Saje (%)	Ostane po žarjenju (%)	Vlaga (%)
PA6-CF	458,3	77,36	3,15	19,49	3,2
PA6-CF toplotno obdelan	458,1	78,28	2,71	19,01	2,3

4.4 Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)

V tabeli 5 so rezultati DSC. Bistveno razliko smo pričakovali, da toplotno obdelan vzorec ni bi smel imeti hladne kristalizacije, ker je že med toplotno obdelavo dokončno kristaliziral. Kljub temu, je imel toplotno obdelan vzorec bolj izrazit eksotermni vrh med prvim segrevanjem, ki je običajno posledica hladne kristalizacije. To lahko vidimo v prilogi 3 (slika 37 in 38). Bolj izrazit eksotermni vrh pri prvem segrevanju toplotnega vzorca je lahko tudi posledica različnih stikov vzorcev in merilnega lončka, saj pri prvem segrevanju material nestaljen, kar posledično oteži prenos toplote. Pri toplotnem obdelanem vzorcu smo tako med prvim, kot tudi drugim segrevanjem izmerili višjo stopnjo kristaliničnosti. Temperatura tališča (T_m) je znašala 224,7 °C pri PA6-CF, medtem ko je bila T_m pri toplotno obdelanem PA6-CF 217,8 °C. T_g pri drugem segrevanju je pri obeh vzorcih znašal med 53 °C in 54 °C, temperatura kristalizacije (T_c) pa 189 °C. Sprememba entalpije (ΔH_m) pri segrevanju je bila večja pri toplotnem obdelanem PA6-CF, medtem ko je bila sprememba entalpije pri kristalizaciji (ΔH_c) večja pri PA6-CF.

Tabela 5: DSC - zbrani rezultati

Vzorec	T_g (°C) - drugo segrevanje	T_m (°C) - prvo segrevanje	Kristaliničnost (%) - prvo segrevanje	ΔH_m (J/g) - prvo segrevanje	T_m (°C)	Kristaliničnost (%)	T_c (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_c ohlajanja (J/g)
PA6-CF	53,1	224,7	19,7	38,71	224,7	25,2	188,5	46,4	46,4
PA6-CF toplotno obdelan	53,8	222,4	21,5	40,47	217,8	27,1	188,7	52,9	44,1

Karakterizacijo materiala smo izvajali, da bi optimizirali procesne pogoje in za razumevanje, kaj bi lahko bil vzrok za boljšo oz. slabšo dobo trajanja zobnikov.

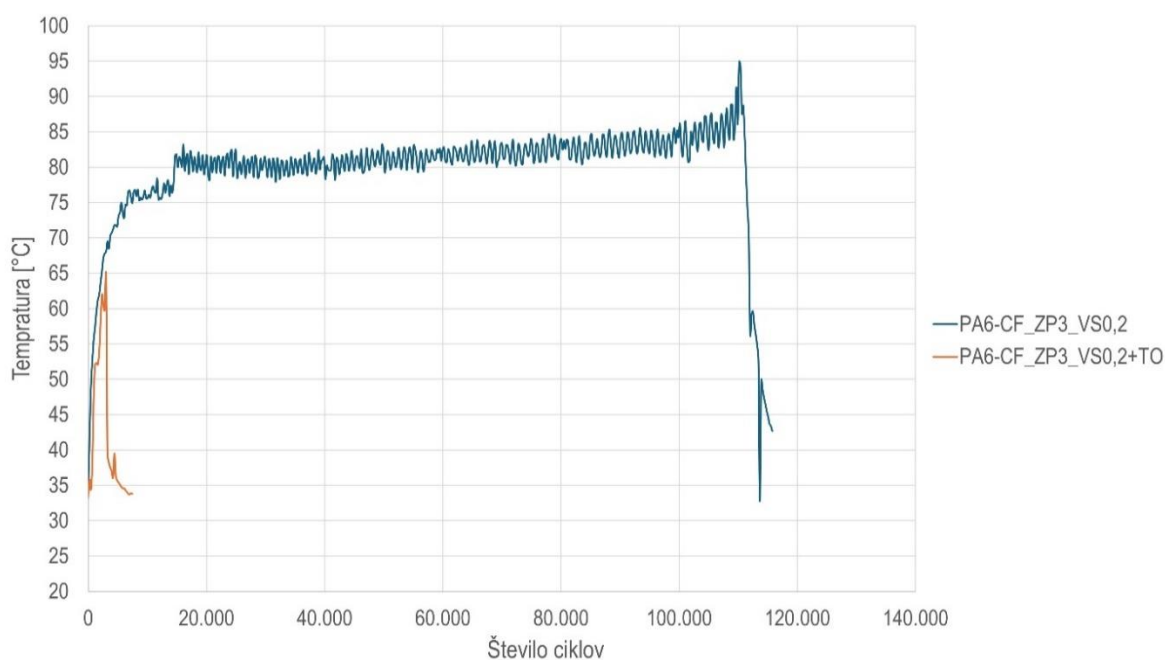
4.5 Preizkušanje zobnikov – testiranje na dobo trajanja

3D natisnjene zobnike smo preizkušali na preizkuševališču za testiranje zobniških dvojic (slika 15). Med testiranjem se je merilo temperaturo v stiku med zobniško dvojico s pomočjo infrardeče termo kamere. Iz posnetih podatkov se je izrisal temperaturni diagram v odvisnosti od doseženih ciklov/vrtljajev polimernega kompozitnega zobnika.

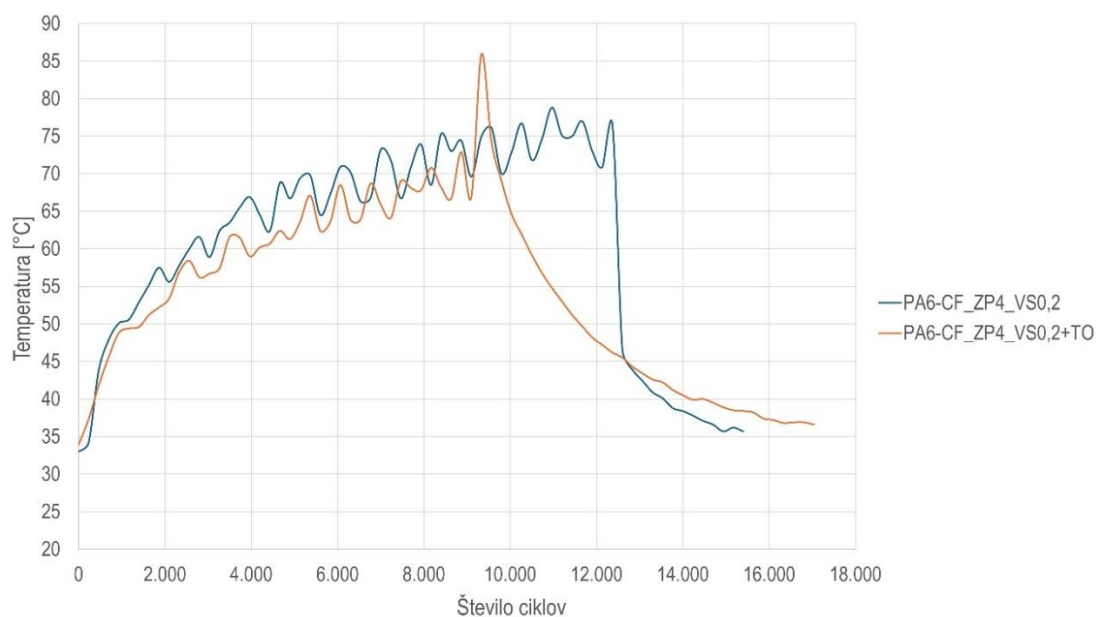
Število ciklov se je preračunalo na osnovi časa trajanja testa in vrtilne hitrosti polimernega kompozitnega zobnika.

4.5.1 Vpliv zunanje plasti in toplotne obdelave

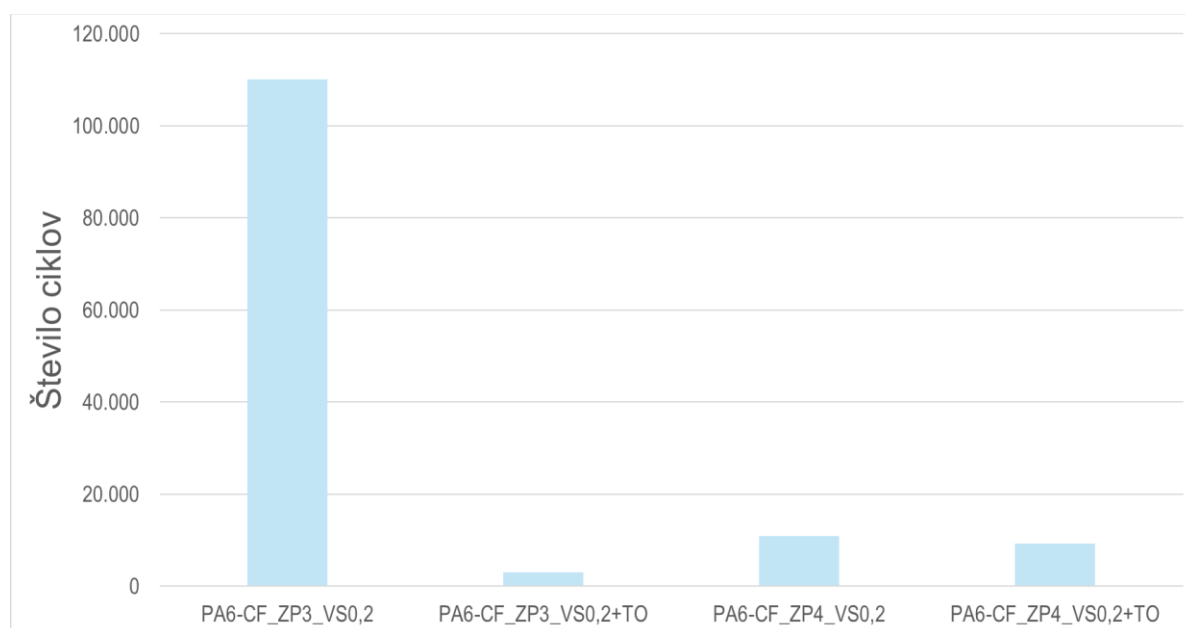
Na sliki 28 in 29 lahko vidimo, da je toplotna obdelava zmanjšala dobo trajanja zobnikov. Vzrok bi lahko bila termična degradacija materiala, kajti pri zobnikih je navada, da želimo imeti žilavo jedro. Prav tako je povečanje zunanje plasti zmanjšalo dobo trajanja. Pri 4 zunanjih plasteh se je število ciklov zmanjšalo za 101.733 (slika 30). Temperatura, pri kateri se je porušil zobnik s 4 zunanjimi plastmi, je bila 79 °C pri 10.967 ciklih, medtem ko se je zobnik s 3 zunanjimi plastmi stabiliziral okoli 80 °C in je deloval 110.133 ciklov ter se porušil pri 95 °C.



Slika 28: Diagram temperature in obremenitvenih ciklov za PA6-CF_ZP3_VS0,2 in PA6-CF_ZP3_VS0,2+TO



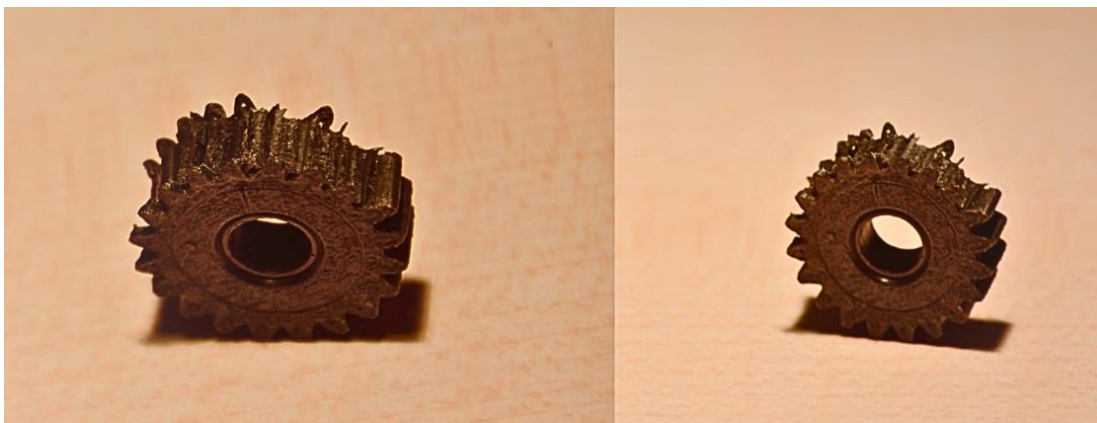
Slika 29: Diagram temperature in obremenitvenih ciklov za PA6-CF_ZP4_VS0,2 in PA6-CF_ZP4_VS0,2+TO



Slika 30: Doba trajanja pri momentu 1,5 Nm – vpliv zunanje plasti in toplotne obdelave

Najbolje je deloval toplotno neobdelan zobnik s 3 zunanjimi plastmi. Sklepamo, da imajo zobniki z nižjim številom plasti nižje notranje napetosti zaradi manjše količine materiala, kljub temu pa imajo dovolj visoko strukturno integriteto, da ustrezno prenesejo napetosti v korenu.

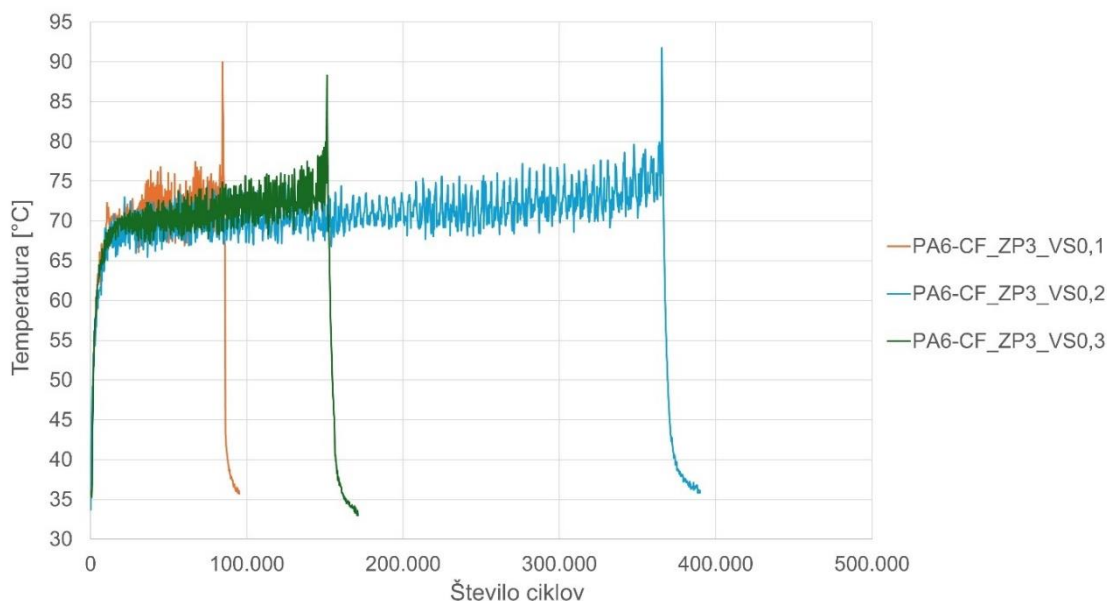
Na sliki 31 je prikazan primer porušenega zobnika. Pri vseh zobnikih smo imeli porušitev zaradi taljenja zob, kar je v skladu s pričakovanji, saj je bil apliciran moment na zobniško dvojico visok.



Slika 31: Primer porušenega zobnika

4.5.2 Vpliv višine plasti

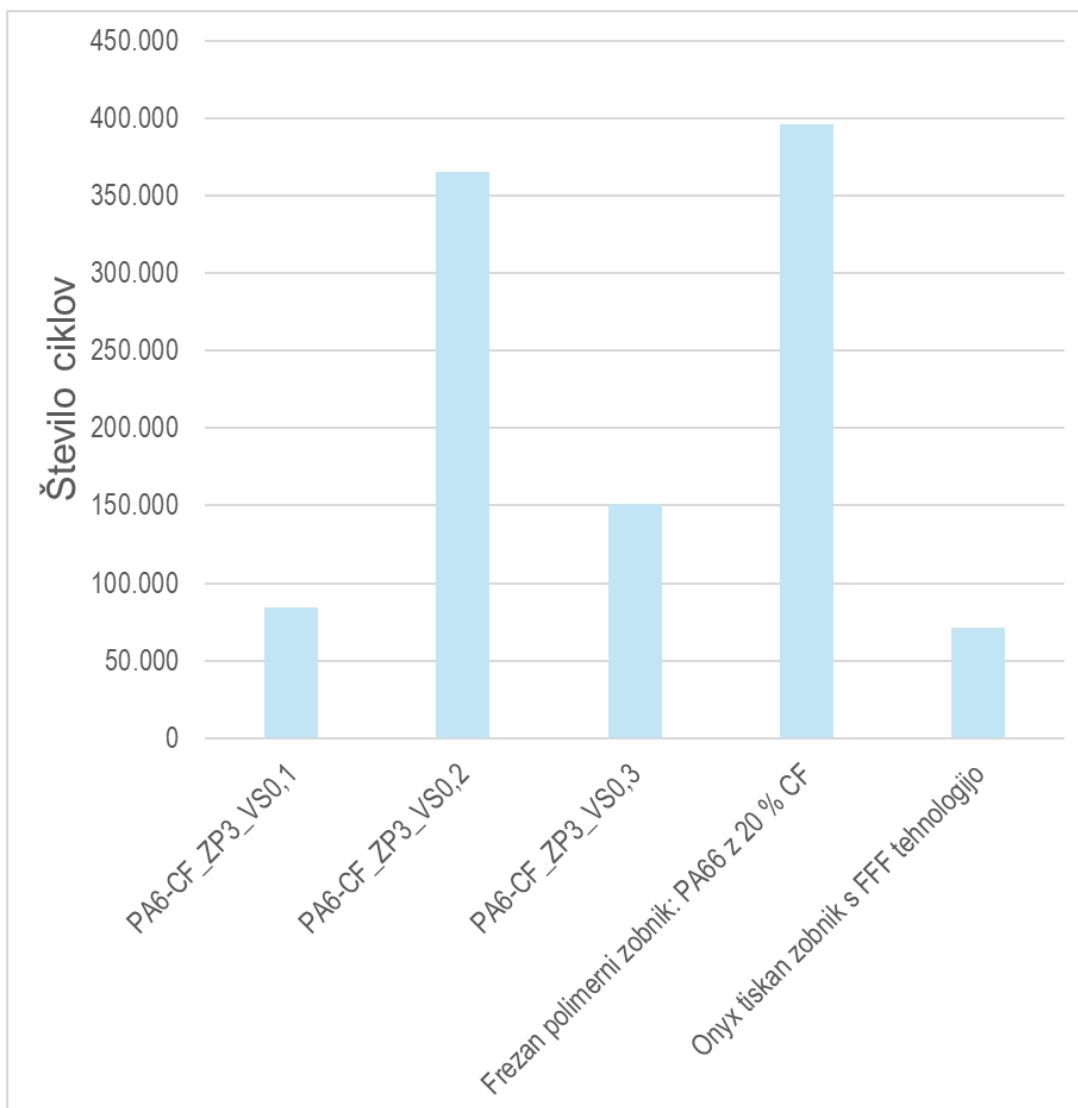
Na sliki 32 je prikazan graf, kako višina plasti nanosa materiala vpliva na doseženo dobo trajanja do porušitve zobnika. Za rezultate smo vzeli najboljše vzorce pri vsaki plasti. Pri višini plasti 0,2 mm je bil najboljši vzorec, ki je deloval 365.400 ciklov. Porušil se je pri temperaturi 92 °C. Najboljši vzorec z manjšim nanosom (0,1 mm) je deloval 84.467 ciklov in se porušil pri 90 °C. Vzorec z višino plasti 0,3 mm je deloval 151.200 ciklov do temperature 88 °C. Vzrok za porušitev zobnikov je tudi tu bil zaradi taljenja zob.



Slika 32: Diagram temperature in obremenitvenih ciklov za PA6-CF_ZP3_VS0,1; PA6-CF_ZP3_VS0,2 in PA6-CF_ZP3_VS0,3

Najboljše se je izkazal zobnik z višino plasti 0,2 mm, najslabše pa zobnik z višino plasti 0,1 mm (slika 33). Sklepamo, da je za optimalno delovanje zobnika potrebna ustrezna višina plasti, saj je v primeru nizke višine plasti veliko medstojev (šibke točke), v primeru visoke debeline plasti pa ima zobnik manj natančno geometrijo glede na 3D

model. PA6-CF_ZP3_VS0,3 je deloval bolje kot prvi testiran zobnik z višino plasti 0,2 mm, a slabše kot drugi testiran vzorec, zato bi lahko naredili še kakšno paralelko več, da bi potrdili rezultate.



Slika 33: Doba trajanja pri momentu 1,5 Nm – vpliv višine plasti 3D-tiska

Najboljšo dobo trajanja je dosegel zobnik s 3 zunanjimi plastmi + neobdelan z višino plasti tiskanja 0,2 mm. Doba trajanja je bila 365.400 ciklov. Zobnik smo primerjali s frezanim polimernim zobnikom PA66 z 20 % CF in Onyx tiskanim zobnikom s FFF-tehnologijo [40]. Frezan polimerni zobnik je bil za samo 30.797 ciklov boljši, medtem ko je bil naš 3D-tiskan zobnik veliko boljši od Onyx zobnika. Doba trajanja je bila skoraj 3 večja.

5 SKLEP

V diplomskem delu smo zbirali, pregledali in študirali literaturo s področja 3D-tiskanja in testiranja polimernih zobnikov. Spoznali smo postopke 3D-tiskanja ter študirali in optimizirali vpliv procesnih parametrov na mehanske in termične lastnosti ter na delovanje polimernega zobnika. Uporabili smo material, ki je bil za 20 % ojačan poliamid 6 (PA6) s karbonskimi vlakni (CF). Njegovo trgovsko ime je Polymaker – PolyMide™ PA6-CF. Na splošno smo želeli preveriti oz. oceniti material za zobnike. Specifično smo bili zainteresirani na vpliv procesnih parametrov na delovanje zobnika. Tekom diplomskega dela smo izvedli mehanske in termične karakterizacije material in delovanje zobnikov na preizkuševališču. Iz rezultatov smo primerjali in ugotavljali vpliv na lastnosti.

Ugotovili smo, da se začne pri višji temperaturi 3D-tiskanja (290 °C) material degradirati in smo s tem dobili slabše mehanske lastnosti. S tem smo tudi potrdili našo hipotezo, da obstaja optimalna temperatura 3D-tiska. Naslednja naša hipoteza je bila, da bo horizontalna orientacija 3D-tiska imela boljši vpliv na mehanske lastnosti. Ta hipoteza se ni izkazala za pravilno, saj so bile mehanske lastnosti v primeru horizontalne orientacije slabše. Mehanske lastnosti so se poslabšale. Sklepamo, da zaradi višjih skrčkov v materialu. Toplotna obdelava je pozitivno vplivala na mehanske lastnosti, kot smo tudi pričakovali. Zmanjšala je notranje napetosti, povišala kristaliničnost in izboljšala mehanske lastnosti. Toplotna obdelava je povečala dinamični E modul in znižala faktor izgub. Toplotno obdelan vzorec je imel višjo kristaliničnost pri obeh segrevanjih in nižje tališče.

Toplotna obdelava je negativno vplivala na dobo trajanja zobnikov. Sklepamo, da je vzrok termična degradacija materiala, kajti pri zobnikih želimo imeti žilavo jedro. Prav tako je povečanje zunanje plasti zmanjšalo dobo trajanja. Sklepamo, da imajo zobniki z nižjim številom plasti nižje notranje napetosti zaradi manjše količine materiala, kljub temu pa imajo dovolj visoko strukturno integriteto, da ustrezno prenesejo napetosti v korenu. Pri različnih višinah plasti 3D-tiska se je najboljšje izkazal zobnik z višino plasti 0,2 mm, najslabše pa zobnik z višino plasti 0,1 mm. Sklepamo, da je za optimalno delovanje zobnika potrebna ustrezna višina plasti, saj je v primeru nizke višine plasti veliko medslojev.

Rezultati eksperimentov so zelo vzpodbudni, saj je življenjska doba zobnikov, ki so bili 3D-tiskani pod optimalnimi pogoji primerljiva življenjski dobi frezanih zobnikov. To je tudi velik uspeh pri nadaljnjem raziskovanju. Čeprav je pri 3D-tisku slabša natančnost zobnika, so ostale lastnosti primerljive. Za nadaljnje raziskave bi bilo dobro preveriti še več parametrov, kot je hitrost tiskanja. Lahko bi naredili še več paralelk za potrditev rezultatov. V prihodnje bi bilo dobro tudi narediti podrobno analizo in primerjavo 3D-tiskanih zobnikov in brizganih - frezanih zobnikov.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] M. Hriberšek, S. Kulovec, Testiranje polimernih zobnikov in integracija materialnih podatkov za naprednejši preračun pogonskih aplikacij, Ventil Letnik 26 (2020) 436–442.
- [2] Verified market reports, Plastic Gears Market Size, Share & Growth | Report [2023-2030], (2024). <https://www.verifiedmarketreports.com/product/plastic-gears-market/> (accessed June 10, 2024).
- [3] G. Hlebanja, M. Hriberšek, M. Erjavec, S. Kulovec, Durability Investigation of plastic gears, MATEC Web of Conferences 287 (2019) 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928702003>.
- [4] M. Hriberšek, S. Kulovec, Preliminary Investigation of High Density Polyethylene Reinforced with Spruce and Beech Fibers for Power Transmission Technologies, Applied Composite Materials 30 (2023) 1453–1476. <https://doi.org/10.1007/S10443-023-10125-9/METRICS>.
- [5] K. V. Wong, A. Hernandez, A Review of Additive Manufacturing, ISRN Mechanical Engineering 2012 (2012) 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>.
- [6] Y. Zhang, K. Mao, S. Leigh, A. Shah, Z. Chao, G. Ma, A parametric study of 3D printed polymer gears, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107 (2020) 4481–4492. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05270-5>.
- [7] S. Reitschuster, C.M. Illenberger, T. Tobie, K. Stahl, Application of high performance polymer gears in light urban electric vehicle powertrains, Forschung Im Ingenieurwesen/Engineering Research 86 (2022) 683–691. <https://doi.org/10.1007/s10010-022-00592-0>.
- [8] VDI 2736, Thermoplastic gear wheels, Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [9] Mozimtec, MOZIMTEC, (2024). <http://www.mozimtec.de/a1.html> (accessed June 5, 2024).
- [10] J. Zaletel, Program za računanje bočne obremenitve evolventnih zobnikov, 2019.
- [11] L. Greer, J. Gwynne, S. Parker, S. Fraser, B. Barber, C. Best, D. Huds, Viscoelasticity and hysteresis, University of Cambridge (2008). <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bioelasticity/viscoelasticity-hysteresis.php> (accessed July 16, 2024).
- [12] M. Hribersek, M. Erjavec, G. Hlebanja, S. Kulovec, Durability testing and characterization of POM gears, Eng Fail Anal 124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105377>.

-
- [13] Rosa Plast, Production materials, (2024). <https://www.rosaplast.it/en/our-method/production-materials> (accessed June 5, 2024).
- [14] Y. Zhang, INTELLIGENT MANUFACTURING APPLIED TO ADDITIVE MANUFACTURED POLYMER GEARS, 2020.
- [15] Chemix Guru, Everything About Polyamide 6 You Should to Know (PA6 / Nylon 6), (2024). <https://www.chemixguru.com/polyamide-6/> (accessed May 28, 2024).
- [16] Omnexus, Polyamide (Nylon): Guide to PA6, PA66, PA11, PA12 Variants, (2024). <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon> (accessed May 28, 2024).
- [17] EuroPlas, Nylon 6: Definition, properties and common uses, (2024). <https://europlas.com.vn/en-US/blog-1/nylon-6-definition-properties-and-common-uses> (accessed May 28, 2024).
- [18] NICCA, Nylon | NICCA Textile Chemicals, (2024). <https://nctexchem.com/product/material/nylon/> (accessed May 28, 2024).
- [19] DSM, PSA PEUGEOT CITROËN CHOOSES AKULON® PA6 FROM DSM, (2024). https://pressreleasefinder.com/DSM_Engineering_Materials/DSMPR004/en/ (accessed May 28, 2024).
- [20] J. Pusch, B. Wohlmann, Carbon Fibers, in: Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications, Elsevier, 2018: pp. 31–51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.00002-5>.
- [21] Zoltek, What is Carbon Fiber? | ZOLTEK Corporation, (2024). <https://zoltek.com/carbon-fiber/what-is-carbon-fiber/> (accessed May 29, 2024).
- [22] M. Leary, Material extrusion, in: Design for Additive Manufacturing, Elsevier, 2020: pp. 223–268. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816721-2.00008-7>.
- [23] J. Slapnik, I. Pulko, R. Rudolf, I. Anžel, M. Brunčko, Fused filament fabrication of Nd-Fe-B bonded magnets: Comparison of PA12 and TPU matrices, Addit Manuf 38 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101745>.
- [24] Bitfab, What is additive manufacturing? Applications, technologies and benefits - Bitfab, (2024). <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/> (accessed July 16, 2024).
- [25] M. Periyasamy, R. Campbell, J.M. Mead, D.O. Kazmer, S. Banerjee, A. Mubasshir, L.A. Phaen, S. Kodra, A Novel Low-Temperature Extrusion Method for the Fused Filament Fabrication of Fluoroelastomer Compounds, Micromachines (Basel) 15 (2024) 582. <https://doi.org/10.3390/mi15050582>.
- [26] Krishnanand, S. Soni, M. Taufik, Design and assembly of fused filament fabrication (FFF) 3D printers, in: Mater Today Proc, Elsevier Ltd, 2020: pp. 5233–5241. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.627>.

- [27] A. Dey, I.N.R. Eagle, N. Yodo, A review on filament materials for fused filament fabrication, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5 (2021). <https://doi.org/10.3390/jmmp5030069>.
- [28] M. Hriberšek, 3D SKENIRANJE IN VZVRATNO INŽENIRSTVO - predstavitev, Fakulteta Za Tehnologijo Polimerov (2024).
- [29] G. Kaur, R.M. Singari, H. Kumar, A review of fused filament fabrication (FFF): Process parameters and their impact on the tribological behavior of polymers (ABS), in: *Mater Today Proc*, Elsevier Ltd, 2021: pp. 854–860. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.274>.
- [30] Azurefilm, Kaj je žarjenje: Izboljšajte svoje 3D tiske - AzureFilm, (2024). <https://azurefilm.com/sl/2024/03/28/kaj-je-zarjenje/> (accessed June 10, 2024).
- [31] E.W. Fischer, EFFECT OF ANNEALING AND TEMPERATURE ON THE MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF POLYMERS, 2009.
- [32] Admet, Tensile Test | ADMET, (2024). <https://www.admet.com/testing-applications/test-types/tension-testing/> (accessed May 29, 2024).
- [33] Testresources, Bend Test, (2023). <https://www.testresources.net/applications/test-types/bend-test/> (accessed May 29, 2024).
- [34] P.N. Khanam, M.A. Al-Maadeed, P.N. Khanam, Silk as a reinforcement in polymer matrix composites, *Advances in Silk Science and Technology* (2015) 143–170. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-311-9.00008-2>.
- [35] Labtim, Labtim - Termogravimetrična analiza TGA, (2024). <https://labtim.si/termicna-analiza/termogravimetricna-analiza-tga/> (accessed May 29, 2024).
- [36] Labtim, Labtim - Diferenčna dinamična kalorimetrija DSC, (2024). <https://labtim.si/termicna-analiza/diferencna-dinamicna-kalorimetrija-dsc/> (accessed May 29, 2024).
- [37] Azurefilm, 3D print quality: Mastering 3D printing temperature settings - AzureFilm, (2024). <https://azurefilm.com/2024/07/11/3d-printing-temperature-settings/> (accessed August 12, 2024).
- [38] Jakk, 6 Effects of Part Orientation on 3D Printed Parts - Additive-X, (2022). https://additive-x.com/blog/6-effects-of-part-orientation-on-3d-printed-parts/?srsId=AfmBOopf8qCgvatYIW3_GddWcjqtjoEK0QiVOos7d8Y13vwk5ldAsHp5 (accessed August 12, 2024).
- [39] W. Yu, X. Wang, X. Yin, E. Ferraris, J. Zhang, The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts, *Mater Des* 226 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111687>.
- [40] M. Hriberšek, S. Kulovec, A. Ikram, M. Kern, L. Kastelic, F. Pušavec, Technological optimization and fatigue evaluation of carbon reinforced

polyamide 3D printed gears, Heliyon 10 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34037>.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Sistem za električno mobilnost [7].	2
Slika 2: Evolventna funkcija [10]	4
Slika 3: Histereza na krivulji napetosti in deformacije [11]	5
Slika 4: Razporeditev polimerov [13]	6
Slika 5: Primer PA 6 v tekstilni industriji [18]	8
Slika 6: Primer PA 6 v avtomobilski industriji [19]	8
Slika 7: Ogljikova vlakna [21]	9
Slika 8: Razlike v procesu med konvencionalnimi in dodajalnimi tehnologijami [24]	11
Slika 9: Prikaz izdelave s spajanjem filamentov [28]	12
Slika 10: Tumaker B500 DUAL	16
Slika 11: a) Epruveta za upogibni preizkus, b) Epruveta za DMA	16
Slika 12: 3D-natisnjeni zobniki	17
Slika 13: Prikaz deponiranja slojev za zobnik: a) s tremi zunanjimi plastmi, b) s štirimi zunanjimi plastmi	18
Slika 14: Trgalni stroj za upogibni preizkus	19
Slika 15: Preizkuševališče za testiranje zobniških dvojic	21
Slika 16: 3D-natisnjen zobnik PA6-CF s 42CrMo4+QT	22
Slika 17: Upogibni modul - vpliv temperature	23
Slika 18: Upogibna trdnost - vpliv temperature	24
Slika 19: Upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti - vpliv temperature	24
Slika 20: Upogibni modul - vpliv orientacije 3D-tiska	25
Slika 21: Upogibna trdnost - vpliv orientacije 3D-tiska	26
Slika 22: Upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti - vpliv orientacije 3D-tiska	26
Slika 23: Upogibni modul - vpliv toplotne obdelave	27
Slika 24: Upogibna trdnost - vpliv toplotne obdelave	28
Slika 25: Upogibni raztezek pri maksimalni trdnosti - vpliv toplotne obdelave	28
Slika 26: Dinamični E modul	30
Slika 27: Faktor izgub	30
Slika 28: Diagram temperature in obremenitvenih ciklov za PA6-CF_ZP3_VS0,2 in PA6-CF_ZP3_VS0,2+TO	32
Slika 29: Diagram temperature in obremenitvenih ciklov za PA6-CF_ZP4_VS0,2 in PA6-CF_ZP4_VS0,2+TO	33
Slika 30: Doba trajanja pri momentu 1,5 Nm – vpliv zunanje plasti in toplotne obdelave	33
Slika 31: Primer porušenega zobnika	34
Slika 32: Diagram temperature in obremenitvenih ciklov za PA6-CF_ZP3_VS0,1; PA6-CF_ZP3_VS0,2 in PA6-CF_ZP3_VS0,3	34
Slika 33: Doba trajanja pri momentu 1,5 Nm – vpliv višine plasti 3D-tiska	35
Slika 34: Vrtilni momenti pri nastavitvi FR1 35 Hz	46
Slika 35: Graf TGA PA6-CF	47
Slika 36: Graf TGA PA6-CF toplotno obdelan	47
Slika 37: Graf DSC PA6-CF	48

Slika 38: Graf DSC PA6-CF toplotno obdelan

48

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Parametri 3D-tiskanja zobnikov	17
Tabela 2: Tabela vzorcev 3D-natisnjenih zobnikov	18
Tabela 3: DMA - zbrani rezultati	29
Tabela 4: TGA - zbrani rezultati	31
Tabela 5: DSC - zbrani rezultati	31

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

P - gostota (kg/m^3)

m - masa (kg)

T_g - temperatura steklastega prehoda ($^{\circ}\text{C}$)

T_m - temperatura tališča ($^{\circ}\text{C}$)

T_d - temperatura degradacije ($^{\circ}\text{C}$)

T_c - temperatura kristalizacije ($^{\circ}\text{C}$)

ΔH_m - sprememba entalpija pri segrevanju (J/g)

ΔH_c - sprememba entalpija pri kristalizaciji (J/g)

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

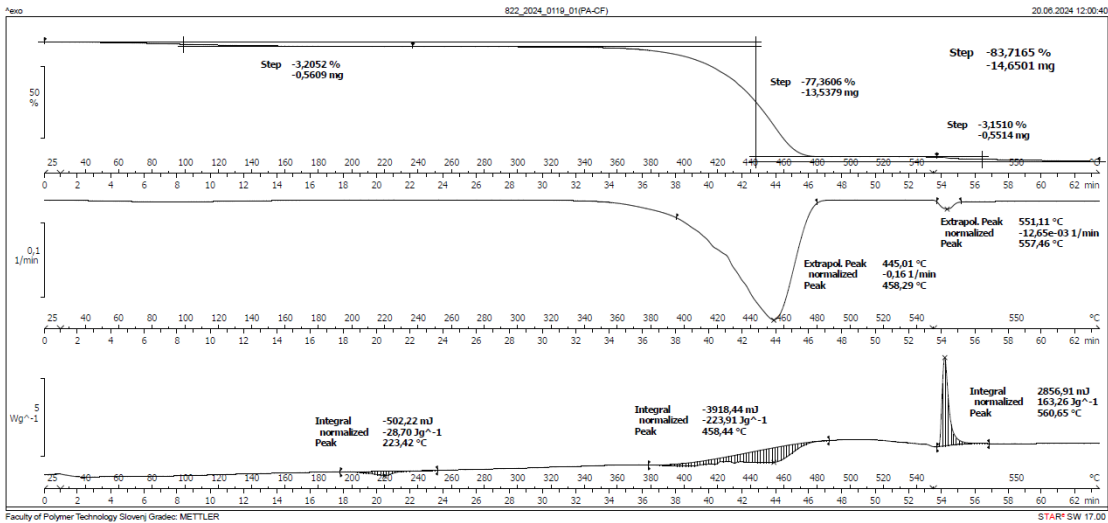
ISO - International Standard Organisation
FTPO - Fakulteta za tehnologijo polimerov
PVC - Polivinilklorid
POM - polioksimetilen
PA6 - poliamid 6
PA12 - poliamid 12
PA66 - poliamid 66
PA46 - poliamid 46
PEEK - polietereeterketon
PBT - polibutilentereftalat
HDPE - polietilen visoke gostote
PI - poliimid
Cu - baker
CuS - bakrov sulfid
SiC - silicijev karbid
UV - ultravijolično
PAN - poliakrilonitril
MEX - ekstruzija materiala
AM - dodajalna tehnologija
FFF - izdelava s spajanjem filamentov
FDM - modeliranje s spajanjem slojev
SLA - stereolitografija
SLS - selektivno lasersko sintranje
CT - računalniška tomografija
DMA - dinamična mehanska analiza
DSC - diferenčna dinamična kalorimetrija
TGA - termogravimetrična analiza
CF - ogljikova vlakna

PRILOGE**Priloga 1: Momentna tabela**

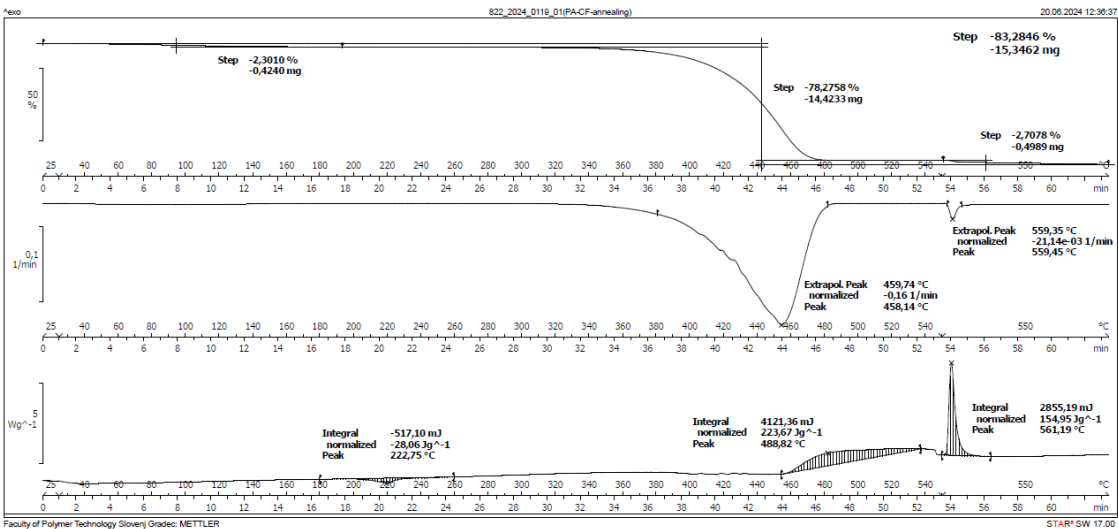
Nastavitev FR1: 35 Hz		
Vrtilni moment	Nastavitev FR2	Vrtilna frekvenca
T (Nm)	(Hz)	n (1/min)
0	35,00	1492
0,1	34,66	1485
0,2	34,35	1478
0,3	34,03	1470
0,4	33,72	1462
0,5	33,39	1454
0,6	33,06	1446
0,7	32,73	1437
0,8	32,38	1428
0,9	32,02	1418
1	31,64	1407
1,1	31,23	1395
1,2	30,81	1382
1,3	30,35	1368
1,4	29,86	1352
1,5	29,33	1335
1,6	28,77	1316
1,7	28,15	1294

Slika 34: Vrtilni momenti pri nastavitvi FR1 35 Hz

Priloga 2: TGA-grafi

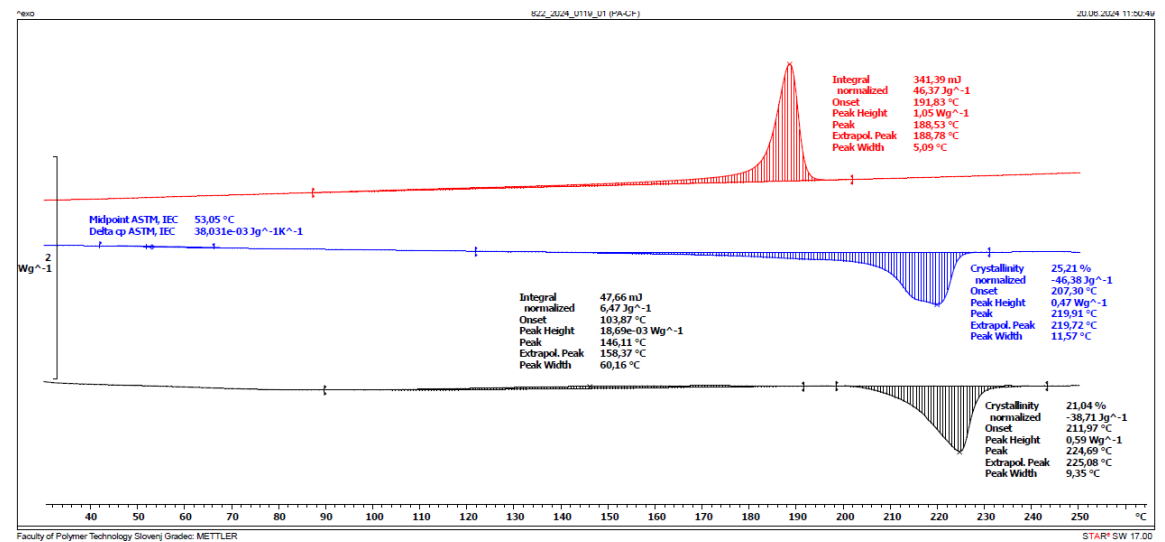


Slika 35: Graf TGA PA6-CF

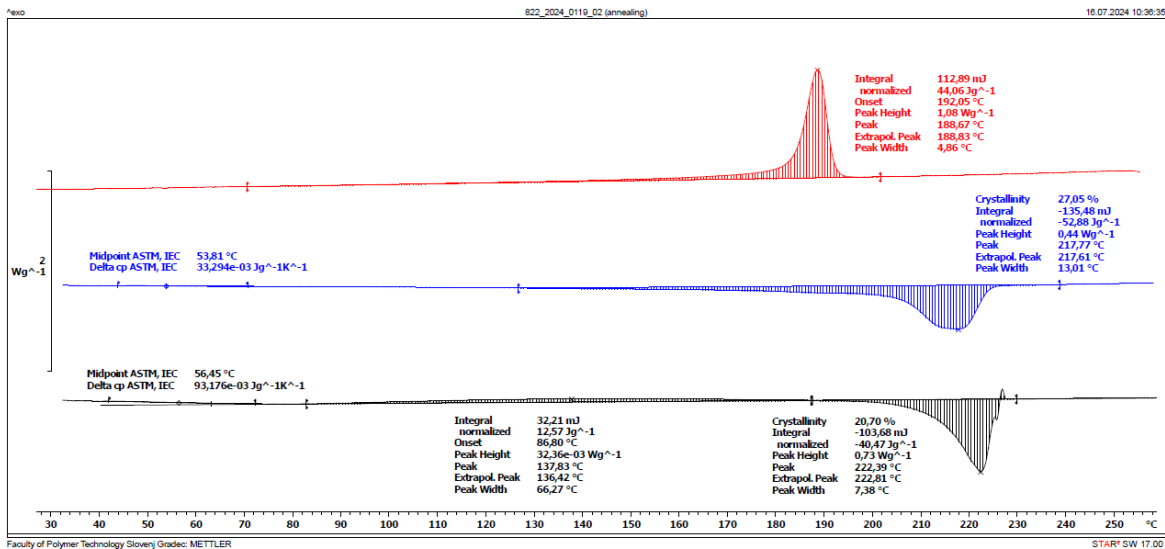


Slika 36: Graf TGA PA6-CF topotno obdelan

Priloga 3: DSC-grafi



Slika 37: Graf DSC PA6-CF



Slika 38: Graf DSC PA6-CF topotno obdelan