

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Sabina GOLOB

**IZDELAVA IN KARAKTERIZACIJA
TERMOPLASTIČNIH KOMPOZITOV IZ
ODPADNEGA ALUMINIJEVEGA PRAHU**

Diplomsko delo

Beltinci, december 2023

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**IZDELAVA IN KARAKTERIZACIJA
TERMOPLASTIČNIH KOMPOZITOV IZ
ODPADNEGA ALUMINIJEVEGA PRAHU**

Diplomsko delo

Študent/-ka:	Sabina GOLOB
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor/-ica:	viš. pred. Silvester BOLKA

Beltinci, december 2023

IZJAVA

Podpisani/a Sabina Golob 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

Najlepše se zahvaljujem vsem, ki so mi kakor koli pomagali in me spodbujali pri pripravi diplomskega dela.

Največja zahvala gre predvsem družini in partnerju Timoteju, ki so mi ob težkih trenutkih stali ob strani in me spodbujali, da nisem obupala in sem dokončala diplomsko delo.

Posebna zahvala gre tudi mentorju viš. pred. Silvestru Bolki, za pomoč in koristne nasvete ter seveda za potrpežljivost. Zahvaljujem se tudi asist. Teji Pešl, za razlago grafov.

Zahvaljujem se podjetju Esnet, Špeli Vidic za prevod osnutka in lektoriranje diplomskega dela.

POVZETEK

Izdelava in karakterizacija termoplastičnih kompozitov iz odpadnega aluminijevega prahu

Namen diplomskega dela je bil ugotoviti, kako dodatek aluminijevega prahu vpliva na lastnosti pri določenih materialih. Prvotno smo nameravali narediti preizkušance iz PA, PLA in POM, z dodatki Al prahu v odstotkih 5 %, 15 % in 30 %. PA in Al prah se nista želela zmešati, kot bi želeli, pri višjih odstotkih, kot je 30 %, pa ostalih dveh materialov nismo mogli ekstrudirati, saj nam je zapikalo ekstrudirnega polža. Zato smo namesto aluminijevega prahu pri vsakem vzorcu dodali 1 % SMA (stabilizatorja). Uporabljeni metode in postopki so bili ekstrudiranje, sušenje vzorcev, brizganje vzorcev za določene preizkuse, upogibni in natezni preizkus, DMA, udarna žilavost, TGA, HOT DISC in FTIR. Ugotovili smo, da dodatek Al prahu izboljša lastnosti prav tako kot dodatek stabilizator SMA.

Ključne besede:

Kompoziti, odpadni aluminijev prah, karakterizacija, lastnosti, stabilizator.

SUMMARY

Production and Characterization of Thermoplastic Composites from Waste Aluminium Powder

The purpose of the diploma thesis was to determine how the addition of aluminium powder affects the properties of certain materials. We initially intended to make test pieces out of PA, PLA and POM, adding 5 %, 15 % and 30 % of Al powder. The PA and Al powder did not mix as well as we had hoped; in the case of higher percentages, such as 30 %, we were unable to extrude the other two materials because the extruder screw was jammed. So, we added 1 % of SMA (stabilizer) to each sample instead of aluminium powder. We used the following methods and procedures: extrusion, sample drying, sample injection for specific tests, the bending and tensile test, DMA, impact strength, TGA, HOT DISC, and FTIR. It has been determined that the addition of AL powder improves the properties of materials, as does the addition of the SMA stabilizer.

Keywords:

Composites, waste aluminium powder, characterization, properties, stabilizer.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNI DEL	2
2.1	Polimerni kompoziti	2
2.1.1	Splošno o polimernih kompozitih	2
2.1.2	Sestavine in zgradba polimernih kompozitov	2
2.1.3	Lastnosti polimernih kompozitov	3
2.1.4	Vrste polimernih kompozitov	3
2.1.5	Postopki izdelave polimerih kompozitov	4
2.2	Polioksimetilen	8
2.2.1	Lastnosti	9
2.2.2	Uporaba	9
2.2.3	Predelava	10
2.3	Polimlečna kislina	10
2.3.1	Lastnosti	12
2.3.2	Uporaba	12
2.3.3	Predelava	12
2.4	Aluminijev prah	12
2.5	Kompatibilizator SMA	13
3	EKSPERIMENTALNI DEL	14
3.1	Uporabljeni materiali	14
3.2	Priprava vzorcev	14
3.3	Metode dela	15
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	17
4.1	Natezni preizkus	17
4.2	Upogibni preizkus	19
4.3	DMA	20
4.4	CHARPY TEST	23
4.5	TGA	24
4.6	HOT DISC	25
4.7	FTIR	26
5	SKLEP	30
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	32
	SEZNAM SLIK	34
	SEZNAM TABEL	35
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	36
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	37
	PRILOGE	38

Priloga 1: Rezultati nateznega preizkusa	38
Priloga 2: Rezultati upogibnega preizkusa	46

1 UVOD

Kompoziti zavzemajo na splošno precej veliko področje. So zelo razširjeni predvsem v športni industriji, navtiki in letalstvu, saj zagotavljajo zelo toge in predvsem lahke izdelke. Pojem kompozit se nanaša na material, ki je sestavljen iz dveh ali več faz. Predstavljajo kombinacijo polimerov in nepolimernih sestavin. Poznamo polnjene polimerne kompozite, kjer so delci polnila vgrajeni v polimerno matrico, in binarne kompozite, ki jih modificiramo z drugimi polimeri; takrat uporabljamo pojem večkomponentni polimerni kompoziti. Njihova uporaba se iz leta v leto večja, saj so zmogljivejši od navadnih polimerov. Njihovi stroški oblikovanja so nižji kot stroški za material. Zato morajo njihove uporabne lastnosti upravičiti toliko večje stroške materiala. Nastali so predvsem kot zamenjava za kovine, z namenom, da ne bi imeli bistveno nižje trdnosti in ne bi razpadali, a bi bili ob tem lažji in predvsem cenejši. Poznamo različne vrste polimernih kompozitov in svet vedno bolj teži k novejšim in izboljšanim kompozitom, zato se bomo v diplomskem delu posvetili kompozitom, ki vsebujejo dodatek odpadnega aluminijevega prahu [1–3].

Cilji, hipoteze in omejitve

Namen diplomskega dela je bil raziskati lastnosti PA, POM in PLA z različnimi odstotki dodanega aluminijevega prahu (– Al prah) ter z dodatkom kompatibilizatorja SMA. Predvsem nas je zanimalo, kako se jim izboljšata toplotna prevodnost in kompatibilnost, kadar jim dodamo SMA in Al prah.

Glavni cilj diplomskega dela je bil ugotoviti, kako se bodo materialom spremenile lastnosti z dodatkom Al prahu in kompatibilizatorja SMA.

Sprotni cilji diplomskega dela so bili:

- določiti, katere lastnosti se pripravljenim vzorcem spremenijo,
- določiti, katere lastnosti se poslabšajo ali izboljšajo in
- določiti njihovo uporabnost.

Predpostavili smo, da je z dodatkom toplotno prevodnega polnila možno izboljšati toplotno prevodnost kompozitov. Predpostavili smo, da se bo z dodatkom SMA izboljšala kompatibilnost. Predpostavili smo, da se bodo materialu, zaradi omenjenega dodatka, nekoliko poslabšale mehanske lastnosti, predvsem žilavost materiala.

Pri diplomskem delu smo največ težav pričakovali s kompvdiranjem materialov, ki so vsebovali večji delež Al prahu.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Polimerni kompoziti

2.1.1 Splošno o polimernih kompozitih

Kompozit je sestavljen material, ki nastane s kombinacijo materialov, ki se razlikujejo po sestavi in obliki z namenom pridobitve novega materiala s specifičnimi lastnostmi. Sestavine v kompozitu ohranijo svojo identičnost tako, da jih lahko fizično identificiramo, ob čemer med njimi obstaja medfazna površina oziroma nastane medfaza. S pojmom polimerni kompozit definiramo material, ki predstavlja kombinacijo polimerov in nepolimerov, medtem ko so mešanice polimerov med seboj kemijsko spojene. Polnjeni polimerni kompoziti pa predstavljajo materiale, kjer so delci polnila vgrajeni v polimerno matrico. Kadar binarne kompozite še dodatno modificiramo z drugimi polimeri, po navadi uporabimo izraz večkomponentni polimerni kompoziti. Kompoziti so nastali kot zamenjava za kovine, z namenom, da ne bi imeli bistveno nižje trdnosti in ne bi razpadali, a bi bili ob tem lažji in predvsem cenejši. V primerjavi z ostalimi materiali imajo številne prednosti. Razvrščamo jih v dve skupini. Prva skupina so široko uporabni in ceneni polimerni kompoziti, medtem ko v drugo skupino spadajo visoko tehnološki polimerni kompoziti, ki jih predvsem uporabljajo v dejavnostih, kjer so potrebni tehnološko zahtevni materiali. V začetku inženiringa kompozitov je veljalo prepričanje, da dodatek polnila v polimerno matrico predvsem zniža ceno kompozita v primerjavi s čistim polimerom. V današnjem času obstaja mnenje, da dodatek polnila v matrico ni več pogojen s ceno, saj vgrajevanje polnila povzroči spremembe v materialu. Te spremembe so lahko koristne, lahko pa povzročijo nezaželene učinke [1].

2.1.2 Sestavine in zgradba polimernih kompozitov

Polimerni kompoziti so sestavljeni iz polimerne matrice, ojačevala, polnila, jedrnih materialov, lepil, kompatibilizatorjev in modifikatorjev mehanskih lastnosti. Med ojačevala spadajo razna vlakna (npr. aramidna, polietilenska, jeklena, bakrena, ogljikova, steklena ...). Vlakna, ki se uporabljajo za izdelavo kompozitnih materialov, imajo visoko togost in natezno trdnost, toda nižjo razteznost ter so bolj občutljiva na vpliv manjših razpok, ki jim poslabšajo trdnost in žilavost. Poznamo več vrst vlaken: sintetična polimerna vlakna, keramična vlakna, ogljikova vlakna, vlakna z visoko trdnostjo (high tenacity ali HT-vlakna) za kompozite, med katere spadajo steklena in karbonska vlakna, polimerna, naravna, bazaltna vlakna [1].

Ob dodatkih polnil v polimerno matrico se ne zniža samo cena polimera, ampak to tudi vpliva na gostoto materiala, izboljša optične, površinske, termične, električne in mehanske lastnosti. Z dodatki polnil lahko izboljšamo kemijsko odpornost.

Med najbolj uporabljena polnila spadata talk in kalcijev karbonat. Pogosto se uporabljajo še wollastonit, kratka in dolga steklena vlakna, steklene kroglice, sljuda in lesna moka [1].

Kompatibilizacija je v širšem pomenu vsak fizikalni ali kemijski proces modifikacije medfazne površine ali nastanek medfaznega sloja, kar vodi do preprečevanja ločitve faz v večkomponentnih polimernih sistemih. Večina polimerov je med seboj nemešljiva in nekompatibilna, zato v ta namen uporabljamo kompatibilizatorje oziroma dodatke, ki izboljšajo kompatibilnost polimerov ter na ta način izboljšajo morfologijo in končne lastnosti mešanic. Ločimo tri glavne skupine kompatibilizatorjev, ki so: blok ali cepljeni kopolimeri, nereaktivni polimeri, ki vsebujejo polarno skupino, in reaktivni funkcionalni polimeri [4].

2.1.3 Lastnosti polimernih kompozitov

Lastnosti kompozitnega materiala se razlikujejo od lastnosti posameznih materialov, ki ga tvorijo. Značilnost kompozitov je, da njihove lastnosti presegajo lastnosti osnovnih materialov zaradi njihovega medsebojnega vpliva v novonastalem materialu. V praksi je večina kompozitov sestavljena iz osnovnega materiala (matrice) in armature (utrditvenega materiala), ki poveča trdnost in togost.

Mehanske lastnosti polimernih kompozitov so odvisne od polnila ali ojačevala ter so določene z lastnostmi posameznih komponent v kompozitu, sestave, strukture in interakcij. Ključne mehanske lastnosti, ki določajo uporabnost polimernih materialov, so E modul (natezni ali upogibni), meja plastičnosti in udarna žilavost. Uporabne lastnosti polimernih kompozitov so v veliki meri odvisne od kompatibilnosti komponent v sistemu. V večini primerov medpovršinske interakcije določajo lastnosti kompozitov [1].

2.1.4 Vrste polimernih kompozitov

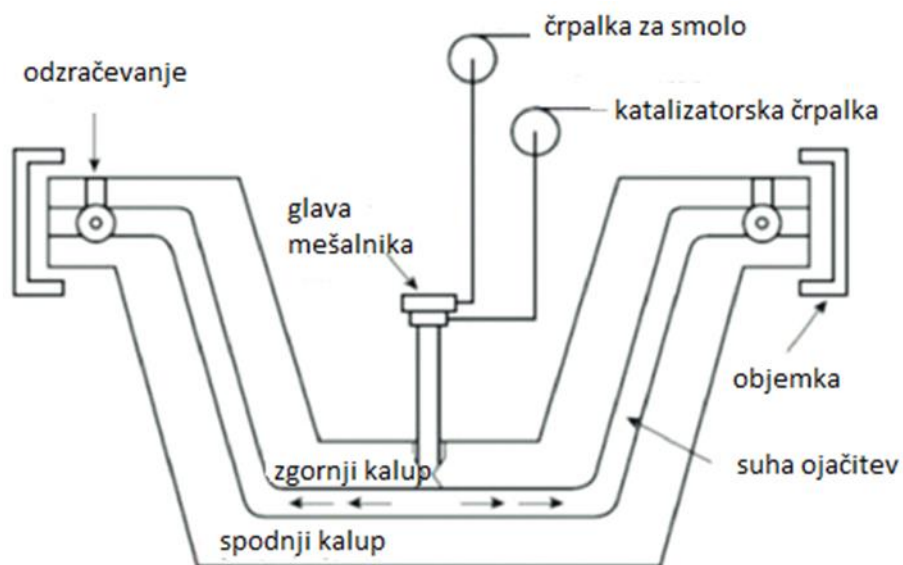
Poznamo tri osnovne vrste polimernih kompozitov, ki so termoplastični kompoziti, duroplastični kompoziti in polimerni nanokompoziti. Med termoplastične spadajo iPP/wollastonit kompoziti, duroplastični kompoziti so največkrat poliestrske smole, ojačane s steklenimi vlakni. Poznamo nanokompozite z nanoglino, nanokompozite z ogljikovimi cevkami in organsko-anorganske hibride.

2.1.5 Postopki izdelave polimerih kompozitov

RTM postopek (Resin transfer Moulding, injiciranje smole v gnezdo z armaturo) je skupno ime za več različnih načinov izdelave kompozitnih materialov. Večino RTM postopkov izdelave sestavljajo naslednje operacije:

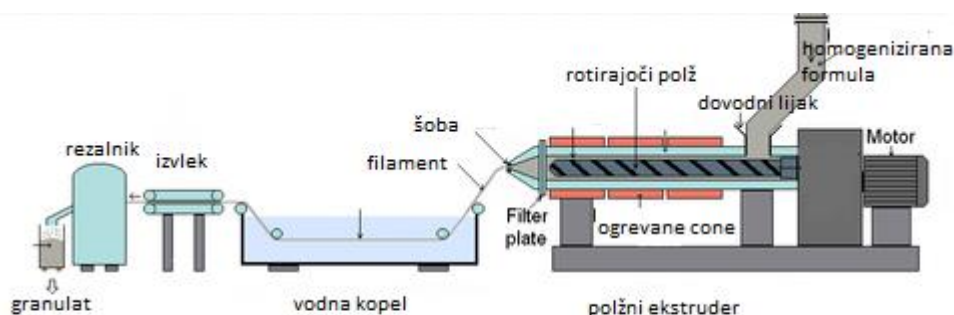
- čiščenje orodja oziroma kalupa,
- nanašanje ločilnega sredstva,
- nanašanje gelcoata,
- vstavljanje ojačitve,
- vstavljanje raznih drugih elementov,
- zapiranje kalupa,
- injiciranje,
- odpiranje kalupa in snemanje izdelka,
- končna obdelava izdelka.

Skupna značilnost vseh RTM postopkov (slika 1) je, da smolo in vlakna povežemo šele v zadnji fazi izdelave kompozita. Prednosti RTM postopkov so: izdelamo lahko končno oblikovan izdelek, tako da naknadna obdelava ni potrebna, uporabimo lahko vse vrste vlaken in načinov prepletanja ojačitve. Uporabimo lahko številne vrste smol, le da pri zahtevah po nizki viskoznosti težko izpolnjujemo hkrati tudi zahteve po visoki žilavosti. Izdelujemo lahko zelo komplicirane oblike izdelkov [3,5–7].



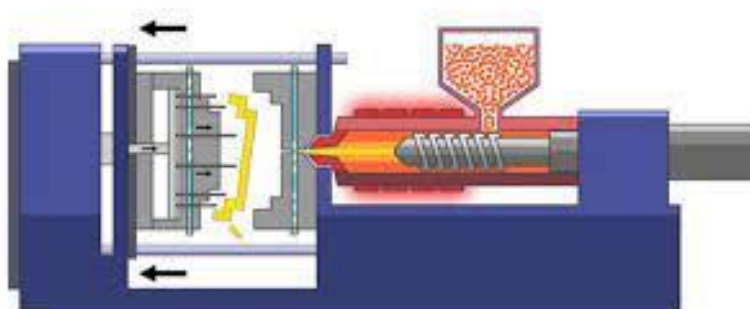
Slika 1: RTM proces [8]

Kompavndiranje (slika 2) je postopek priprave materialov s termoplastično matrico in različnimi dodatki. Mešanice polimerov in dodatkov se dozirajo preko lijaka v polža, po katerem material potuje vzdolž polža, ki se nahaja v ogrevanem cilindru, do šobe. Ekstrudirani material se vodi skozi vodno kopel v granulator, kjer se material granulira na želeno velikost [9].



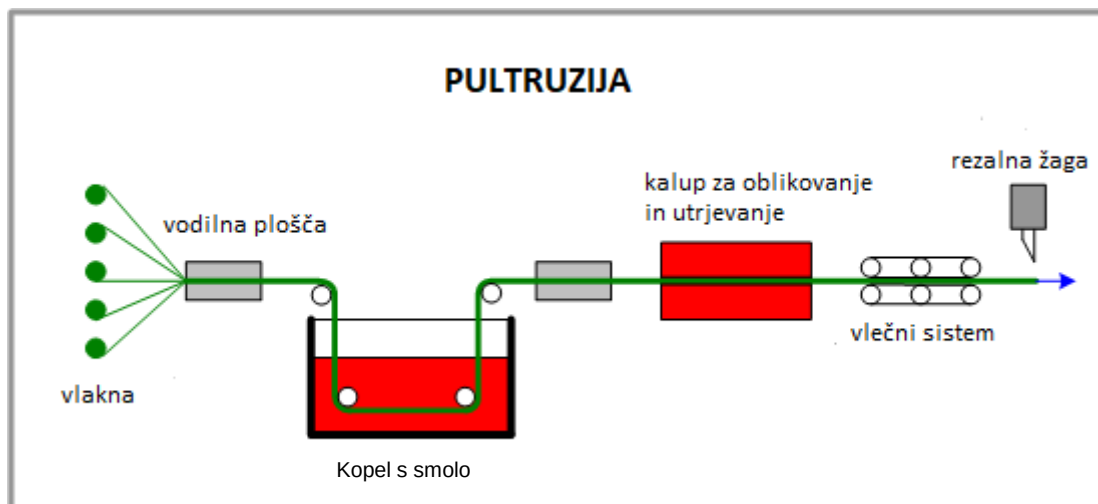
Slika 2: Linija za kompavndiranje [9]

Brizganje (slika 3) je najbolj razširjen postopek, pri katerem s plastificirnim cilindrom in polžem stalimo in plastificiramo polimer za brizganje. Polimer vbrizgamo v orodje skozi dolivne kanale z vzdolžnim pomikom polža. Med ohlajevanjem polimera le tega za kompenzacijo skrčka z naknadnim tlakom dodatno brizgamo v orodno votlino. Ko se izdelek ohladi, polž z obračanjem in pomikanjem nazaj dozira v cilindar novo količino za brizg. Orodje, ki je za termoplaste hlajeno za elastomere in za duroplaste ogrevano, med tem odpremo, izmečemo izdelek in ponovno zapremo. Za brizganje lahko uporabljamo vse polimerne materiale.



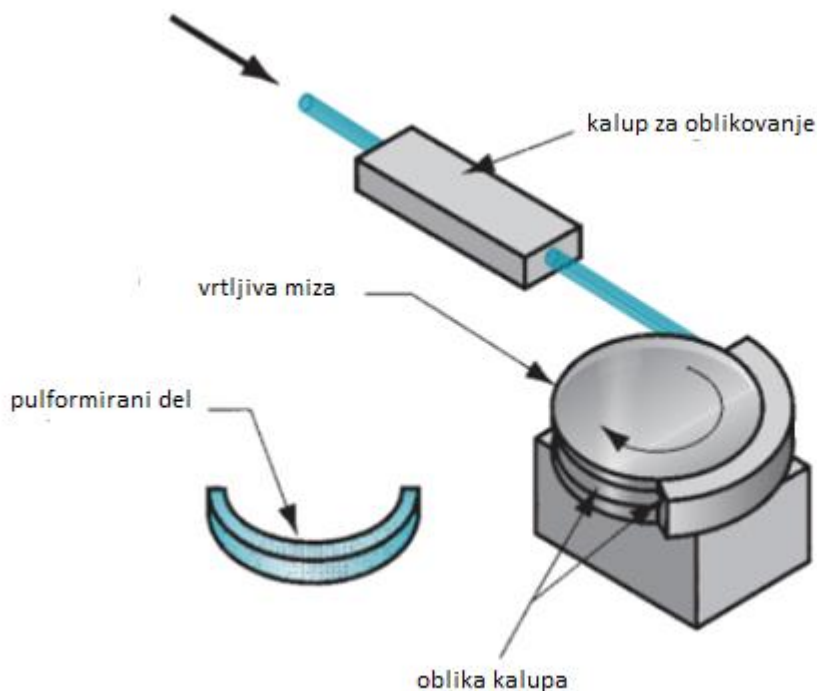
Slika 3: Brizgalni stroj [10]

Eden izmed postopkov je tudi pultruzija (slika 4). Velika prednost kompozitnih materialov, izdelanih s pultruzijo, pred kovinskimi zlitinami je v odpornosti proti koroziji. Uporaba teh kompozitov se veča in širi s področja zahtevnih in dragih izdelkov, kot so letala, avtomobili, čolni in športni rekviziti, na ostala področja, na primer za izdelavo profilov za mostove. Glavna prednost pultruzije je relativno nizko vlaganje v stroje in orodja. Pultruzija je izdelava kompozitnega materiala z vlečenjem v umetno smolo omočenih snopov ojačitvenih vlaken skozi votlico. Pultrudirani profili se uporabljajo za dele avtobusov, tovornih vozil, na primer za karoserije, okvire oken in vrat, električno opremo, smučarske in ribiške palice [5,11,12].



Slika 4: Postopek pultruzije [13]

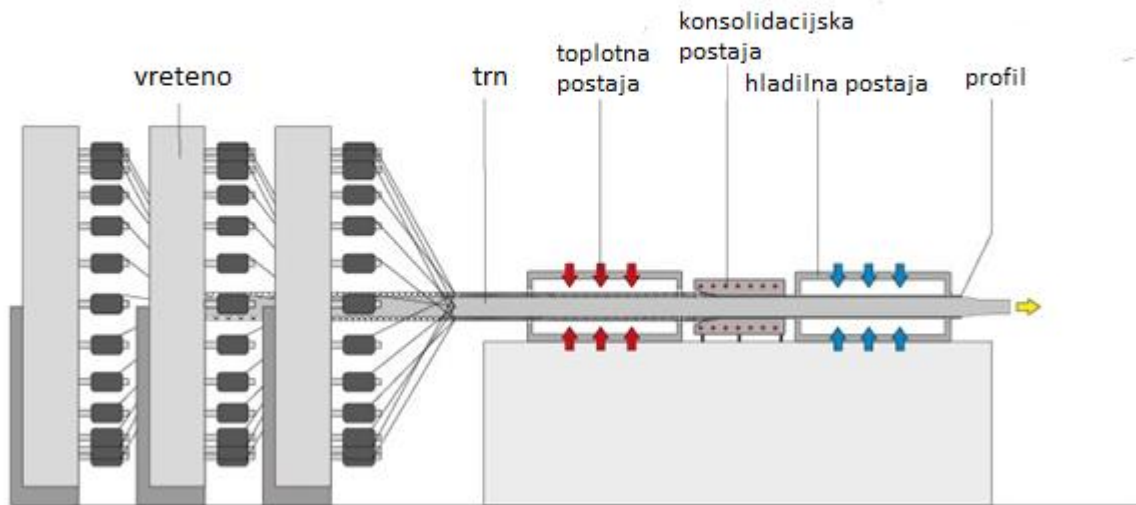
Naslednji postopek je pulforming (slika 5). Pulforming imenujemo postopek, pri katerem s pultruzijo smolo samo delno zamrežimo in nato polizdelek v orodjih za stiskanje stisnemo v zahtevnejše oblike izdelkov [5,11].



Slika 5: Proces pulforminga [14]

Pulvinding (slika 6) si običajno predstavljamo kot proces, pri katerem vlaknato ojačitev omočimo s smolo in nato enakomerno polagamo vzdolž naprej gibajočega se trna. Ovijanju sledi utrjevanje in nato izvlečenje vretena. Izdelek je lahko zelo preproste oblike, lahko pa ima kompleksno obliko, kot na primer karoserija avtomobila.

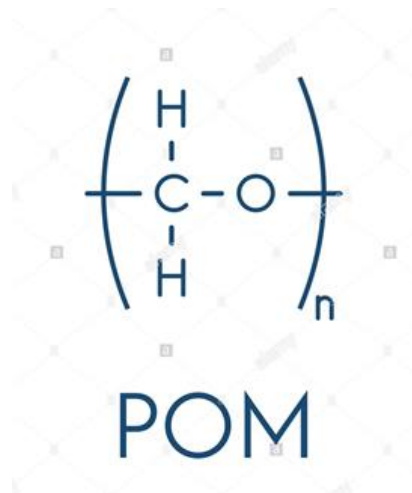
Značilni materiali, ki se uporabljajo za pulvinding, so steklena, ogljikova in aramidna vlakna, povezana s poliestrsko, vinilestrsko ali epoksidno smolo. Uporaba kompozitov, izdelanih s postopkom pulvindinga, je splošno znana za izdelavo zahtevnih in dragih izdelkov, kot so letala, čolni, športni rekviziti. Glavne prednosti so nizkocenovni materiali in delovni stroški ter velika ponovljivost, ki jo omogoča avtomatizacija postopka. Največja slabost je omejitev zaradi oblike orodja – vretena, ki mora biti takšna, da ga je po utrjevanju izdelka možno izvleči oziroma v notranjosti izdelka razstaviti in nato po delih odstraniti. Pri pulvindingu profile, od katerih se zahteva velika torzijska trdnost, ovijamo preko aksialno usmerjene ojačitve še z ojačitvijo, ki jo ovijamo pod izbranim kotom. Največkrat se ovija v dveh plasteh; v prvi plasti v smeri leve spirale, medtem ko v drugi plasti v smeri desne spirale ali obratno [5,11].



Slika 6: Proces pulvindinga [15]

2.2 Polioksimetilen

Polioksimetilen (POM) (slika 7) se odlikuje po dobri dimenzijski stabilnosti, visoki trdoti, togosti, trdnosti, žilavosti in kemijski obstojnosti. Ima tudi dobre drsne in obrabne lastnosti, zato se pogosto uporablja namesto kovinskih materialov. Najnovejši dosežek predstavljajo posebni na udarce odporni poliacetali (POM-HI) [4,16].



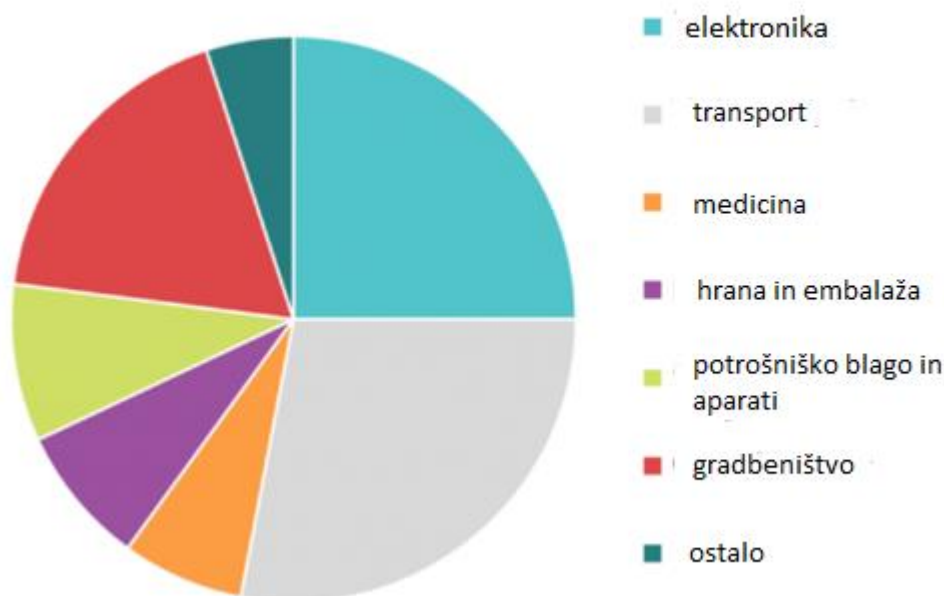
Slika 7: Kemijska struktura POM [17]

2.2.1 Lastnosti

Gostota POM se giblje med 1,41 in 1,43 g/cm³. Je visoko kristaliničen termoplast: pri linearnih, nerazcepljenih verigah je do 75 % kristalinične strukture. Praktično ne navzema vlage. Zaradi njegove visoke stopnje kristaliničnosti je kristalno bele barve, toda prekrivno je sposoben v vseh barvah in ima visok površinski sijaj. Tudi pri nizkih temperaturah ima visoko trdnost, togost in žilavost. Dobro obrabno odpornost lahko izboljšamo z dodatkom molibdenovega disulfida (MoS₂) in politetrafluoroetilen (PTFE). Z dodatkom steklenih vlaken mu zvišamo trdnost, E modul in temperaturno obstojnost. Ostali možni dodatki za ojačanje in polnila: mineralni prah, saje, PTFE, MoS₂. Ima dobre elektro izolacijske lastnosti, visoko prebojno trdnost, ki je praktično neodvisna od vlage v zraku, ter ugodne dielektrične lastnosti. Uporablja se od –40 °C do 90 °C, za kratek čas tudi do 150 °C. Kopolimer ima talilno območje med 165 °C in 168 °C, medtem ko homopolimer pri 175 °C. Gori z modrikastim plamenom in ima oster vonj po formaldehidu. Obstojen je v organskih medijih, kot so alkoholi, aldehidi, estri, etri, v glikolu, bencinu, mineralnih oljih, šibkih bazah in kislinah. Dobro je hidrolizno obstojen. Neobstojeen je v oksidacijskih medijih in močnih kislinah (pH < 4). Degradira pri UV sevanju, zato je primerna uporaba stabilizatorjev, kot so saje. Fiziološko ni nevaren. Če je izpostavljen zraku, se ne tvorijo napetostne razpoke, možne pa so v nekaterih medijih pri višjih notranjih napetostih [16].

2.2.2 Uporaba

POM se uporablja za majhne, tankoslojne (0,15 mm) precizne dele z ozkimi tolerancami, z dobrimi drsnimi in obrabnimi lastnostmi. V finomehaniki se uporablja za zobnike, števec, krmilne naprave, funkcijske dele video in foto aparatov, spojne in vzmetne elemente, sklopke. V strojih in vozilih se uporablja za kolesa, ležaje, drsne elemente, ohišja črpalk, ventilatorje, ohišja ventilatorjev, kletke ležajev, kolute, dele sklopk, pritrdilne elemente, sisteme za dovod goriva. V gospodinjstvu se uporablja za ležaje, valjčke, dele črpalk ter za dele pralnega in pomivalnega stroja. V gradbeništvu in pohištvu pa se uporablja za tečaje, okovje, držaje, fitinge in ventile. Uporablja se tudi za plinske ampule, rezervoarje vžigalnikov, zadrge, smučarske vezi (slika 8) [5,18].

GLOBALNA UPORABA POM V INDUSTRIJI, LETO 2018*Slika 8: Uporaba POM v industriji [19]***2.2.3 Predelava**

POM se zelo dobro predeluje na brizgalnih strojih, pri temperaturah taline od 180 °C do 220 °C, pri homopolimerih od 210 °C do 220 °C. Brizgalni tlaki so od 800 barov do 1700 barov, temperatura orodja od 50 °C do 120 °C, včasih tudi do 140 °C. Krčenje znaša od 1 % do 3,4 %, odvisno predvsem od pogojev predelave. Manjši skrček je pri materialih, ki so ojačani s steklenimi vlakni. Pri čezmernem segrevanju lahko pride do nevarnosti sproščanja plinov (formaldehida). POM lahko predelujemo tudi z ekstrudiranjem (180 °C do 220 °C). Prav tako s termoformiranjem, vendar se ta postopek redko uporablja. Lepimo ga težko, zaradi njegove dobre obstojnosti v kemikalijah in nizke površinske napetosti, uporabljajo pa se adhezivna, reakcijska in poliizocianatna lepila. Površine med lepljenjem mehansko in kemijsko obdelujemo.

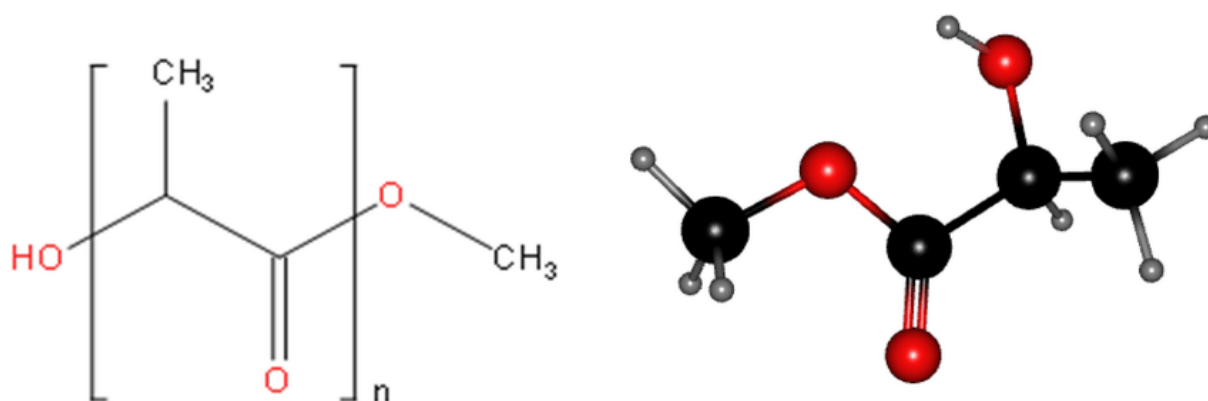
Varimo ga lahko z vročimi plini, toplotnimi elementi, ultrazvočno, vibracijsko ali s trenjem. Pred katero koli predelavo ga je treba sušiti [2,4].

2.3 Polimlečna kislina

Polimlečno kislino (PLA) sestavlja dekstroza, pridobljena iz bio materialov (slika 9). Znana je tudi kot poli (mlečna kislina) ali polilaktid (PL). Je termoplastični poliester z osnovno formulo $(C_3H_4O_2)_n$ ali $[-C(CH_3)HC(=O)O-]_n$, ki ga sintetiziramo s kondenzacijo mlečne kisline z odvajanjem vode. Sintetiziramo ga lahko tudi s polimerizacijo z odpiranjem obroča laktida. Je eden izmed prvih polimerov iz obnovljivih virov. Posebej je zasnovan za uporabo v prehranski industriji.

Je prozorne barve in ima visok sijaj. Uporablja se lahko v spojinah in zmeseh. PLA je postal priljubljen material, ker je ekonomično proizveden iz obnovljivih virov. Leta 2021 je imel PLA največji obseg uporabe med vsemi biopolimeri na svetu. Monomer je običajno narejen iz fermentiranega rastlinskega škroba, na primer koroze, juke, sladkornega trsa ali sladkorne pese. Uporabljata se dva glavna monomera, mlečna kislina in ciklični diester laktid. Največ se PLA sintetizira s polimerizacijo laktida z odpiranjem obroča z različnimi kovinskimi katalizatorji (kositrov oktoat) v raztopini ali suspenziji. Reakcija, ki jo katalizira kovina, po navadi povzroči racemizacijo PLA, kar zmanjša njeno stereopravilnost v primerjavi z začetnim materialom. Polimeri PLA segajo od amorfne steklastega polimera do polikristaliničnega in visokokristalnega polimera s steklastim prehodom 60–65 °C, temperaturo taljenja 130–180 °C in E modulom 2,7–16 GPa. Toplotno odporen PLA lahko prenese temperature do 110 °C. Številne tehnologije, kot so žarjenje, dodajanje sredstev za nukleacijo, oblikovanje kompozitov z vlakni ali nanodelci, podaljševanje verige in uvedba zamreženih struktur, se uporabljajo za izboljšanje mehanskih lastnosti PLA. Visoka površinska energija omogoča dobro tiskanje, zaradi česar se pogosto uporablja v 3D tiskanju. PLA je topen v številnih organskih topilih. Najpogosteje se uporablja etil acetat, uporabljajo pa se tudi propilen karbonat in piridin. Topen je tudi v vročem benzenu, tetrahidrofuranu in dioksanu. Prav tako je visokomolekularni biopolimer, ki se zlahka obdeluje z običajnimi ekstruzijskimi postopki (za pihanje, termoformiranje ...). Polimlečna kislina je najbolj raziskan biopolimer. Iz koroze ali drugih sladkorjev najprej pridobijo D-glukozo, iz katere nato s fermentacijo dobijo polimlečno kislino. PLA se razgradi na tri načine. Prvi način je hidroliza, kjer se estrske skupine glavne verige cepijo, s čimer se zmanjša molekulska masa. Drugi način je termična razgradnja, ki je kompleksen pojav, ki vodi do pojava različnih spojin, in tretji način je fotorazgradnja. UV sevanje povzroča razgradnjo, predvsem tam, kjer je PLA izpostavljen sončni svetlobi. PLA lahko recikliramo, kemično ali mehansko. Pri mehanskem recikliranju lahko odpadni material vsebuje onesnažene delce. PLA je mogoče kemično reciklirati v monomer s toplotno depolimerizacijo ali hidrolizo. Lahko ga tudi kompostiramo. Pod pogoji industrijskega kompostiranja, ki se začne s postopkom kemične hidrolize, sledi mikrobná razgradnja PLA.

Pri temperaturi kompostiranja 58 °C lahko PLA delno razpade v vodo in ogljikov dioksid v 60 dneh, medtem ko ostanek razpada veliko počasneje. V navadnem okolju je razgradnja zelo počasna. PLA je možno tudi sežigati, saj je njegovo sežiganje okolju prijazno, ker se ne sproščajo nobene strupene snovi [20,21].



Slika 9: Kemijska struktura PLA [22]

2.3.1 Lastnosti

Lastnosti PLA sta predvsem visoka togost in odpornost na toploto. Z industrijskim kompostiranjem (58 °C) razpade v treh tednih, mehanske lastnosti ima podobne kot PET (visok površinski sijaj, odlične drsne lastnosti, majhna obraba, dobra žilavost pri nizkih temperaturah, dobre elektro izolacijske lastnosti, nizek toplotni raztezek ...) [23].

2.3.2 Uporaba

Uporablja se v prehrabni industriji za kozarce, skleda, folije, posode za shranjevanje živil, jedilni pribor, lončke za jogurta, plastenke za vodo, folije za pakiranje mesa, sadja, zelenjave, posode za mleko [21].

2.3.3 Predelava

Predeluje se na ekstruzijskih strojih s pihanjem, s termoformiranjem in brizganjem. V staljenem stanju je material stabilen, pod pogojem, da je bil prej posušen [21,23].

2.4 Aluminijev prah

Aluminijev prah je fini zrnat prah. Je srebrno bele do sive barve in je brez vonja. Je reaktivna gorljiva snov. Ker je čisti aluminijev prah drag, se redko uporablja sam. Namesto tega ga uporabljamo za izboljšanje lastnosti drugih materialov.

Uporablja se za izboljšanje odpornosti na udarce, tlačno odpornost, odpornost proti koroziji. Aluminij je kemijski element s simbolom Al in vrstnim številom 13. Je mehka, nemagnetna in kovinsko srebrna bela kovina. Zaradi njegove velike reaktivnosti je v elementarni obliki izjemno redek in omejen samo na ekstremno reduktivna okolja. Glavna aluminijeva ruda je boksit, najpogostejše spojine pa oksidi in sulfati. Ima nizko gostoto in dobro odpornost proti koroziji. Njegove zlitine so ključne v letalski industriji. Uporablja se kot dodatek polimerom z namenom izboljšanja lastnosti.

2.5 Kompatibilizator SMA

Stiren malein-anhidrid (SMA) je amorfni termoplastični kopolimer. SMA se tipično uporablja za dodajanje k polimerom za povečanje toplotne stabilnosti, dimenzijske stabilnosti in adhezijske lastnosti. Je posebej zasnovan za uporabo pri ekstruziji filmov ali v kombinaciji s polistirenom (PS). Lahko se predeluje v vseh vrstah opreme za obdelavo polimerov. Za dobro disperzijo v stirenskih polimerih, kot je polistiren, se priporočajo za uporabo ekstruderji z dvojnimi polžem z blago konfiguracijo in napravo za vakuumsko odzračevanje. Da bi se izognili degradaciji SMA, se moramo izogniti temperaturam, višjim od 280 °C in visokim strižnim napetostim. Uporablja se lahko v odmerkih, višjih od 50 %. Dodaja se lahko za zvišanje temperaturne stabilnosti, dimenzijske stabilnosti, povišanje površinske napetosti in viskoznosti taline v številnih polimernih sistemih, še posebej v PS. Granule je možno v ekstruder dodajati preko običajnega dozirnega sistema. Shranjevati ga je treba na suhih in prezračenih mestih, ki so zaščitena pred vročino in neposredno sončno svetlobo in niso vlažna. Je bele barve [24].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Materiali, uporabljeni v raziskavah, so čisti polioksimetilen s komercialnim imenom Hostaform® C 9021, podjetja Ticona, polimlečna kislina s komercialnim imenom Ingeo™ 2003D, proizvajalca Natureworks, dodatek aluminijev prah, ki je bil odpad podjetja Talum v granulaciji 270 mikronov, in stabilizator SMA s komercialnim imenom Xiran® SZ08250 proizvajalca Polyscope. V tabeli 1 so prikazane recepture v odstotkih. Pri vzorcih s 5 % je dodanega 50 g aluminija, pri vzorcih z 15 % pa 150 g.

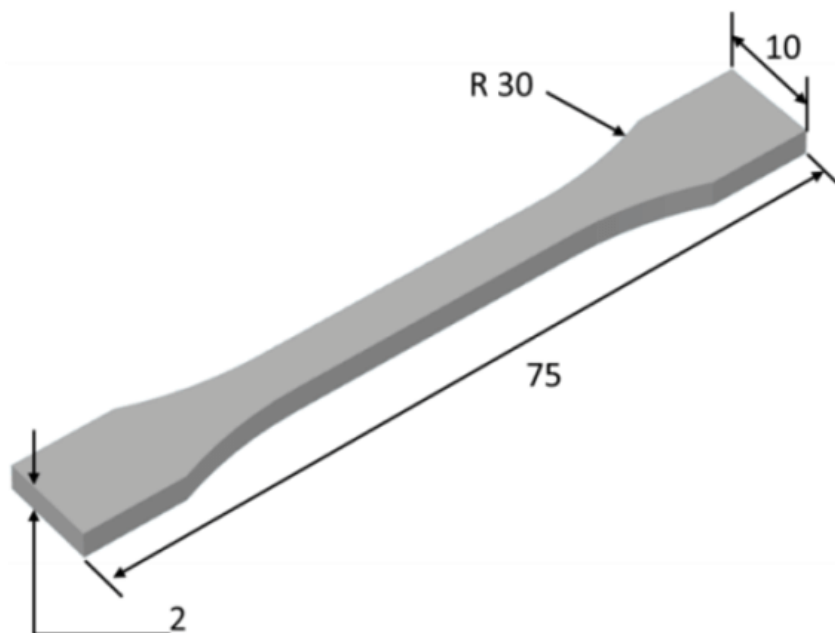
Tabela 1: Vzorci in količine dodatkov

VZOREC	Al (%)	SMA (%)	PLA (%)	POM (%)
822_2017_0046_1	5		95	
822_2017_0046_2	5	1	94	
822_2017_0046_3	15		85	
822_2017_0046_4	15	1	84	
822_2017_0046_5	5			95
822_2017_0046_6	5	1		94
822_2017_0046_7	15			85
822_2017_0046_8	15	1		84

3.2 Priprava vzorcev

Pripravljene mešanice vzorcev smo ekstrudirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech-LTE. Ekstruder ima L/D razmerje 44/1 in 10 grelnih con ter grelec na šobi. Material smo ekstrudirali skozi okrogli šobi premera 3 mm in filament vodili skozi vodno kopel ter ga takoj granulirali na dolžino 4 mm. Dobljeni material smo pred brizganjem osušili do vlažnosti 0,02 %. Brizganje vseh serij smo izvedli na brizgalnem stroju Krauss Maffei 50-180 CX, s premerom polža 30 mm in zapiralno silo 500 kN. Uporabili smo dvognezdno orodje s hladnim dolivnim kanalom in oblikama, skladnima s standardoma ISO 527, oblika 1BA (slika 10) in ISO 178 (udarna in zarezna žilavost in upogibni testi). Pri POM matrici so bile temperature cilindra od 165 °C (vstopna cona) do 180 °C (šoba), hitrost brizganja 50 mm/s, protitlak pri plastificiranju 75 barov, obrati plastificiranja 20 obr/min, temperatura orodja 80 °C, čas hlajenja 15 s.

Pri PLA matrici so bile temperature cilindra od 160 °C (vstopna cona) do 170 °C (šoba), hitrost brizganja 50 mm/s, protitlak pri plastificiranju pa 250 barov, obrati plastificiranja 50 obr/min, temperatura orodja 30 °C, čas hlajenja 25 s.



Slika 10: Vzorec za natezni test, skladen z obliko po ISO 527 1BA [25]

3.3 Metode dela

Vzorci, ki smo jih nabrizgali na brizgalnem stroju Krauss Maffei, smo pozneje uporabili za upogibne preizkuse, natezne preizkuse, DMA, CHARPY test, TGA, HOT DISC in FTIR. Za natezne in upogibne teste smo uporabili trgalni stroj podjetja Shimadzu AG-X plus 10kN. Pri upogibnih in nateznih preizkusih smo za vsak vzorec izvedli po pet meritev. Preden smo začeli z meritvami, smo vsakemu vzorcu izmerili dimenzije. Pri upogibnem in nateznem preizkusu smo izmerili debelino in širino. Pri nateznem preizkusu je bila začetna razdalja med zgornjo in spodnjo čeljustjo 50 mm in hitrost pomika čeljusti 1 mm/min. Pri upogibnih preizkusih je bila začetna razdalja med čeljustmi 64 mm in hitrost pomikanja 2 mm/min. DMA analize so se izvajale na dinamičnem mehanskem analizatorju Perkin Elmer, DMA 8000. Vzorci smo analizirali z dvojno prižemo, frekvenca je znašala 1 Hz, amplituda pa je znašala 0,05 mm. Vzorci so se segrevali od sobne temperature do končne temperature 105 °C, s hitrostjo segrevanja 2 °C/min. Vzorci POM smo analizirali pod istimi pogoji, vendar do temperature 175 °C. Udarno in zarezno žilavost smo merili na napravi za merjenje udarne žilavosti CHARPY LY-XJJD5. Za vsak vzorec smo testirali 10 paralelk, izračunali povprečje ter standardni odklon. Za termogravimetrične analize smo uporabili napravo Perkin Elmer TGA 4000, s katero smo določali spremembo mase v odvisnosti od temperature. Material smo segrevali eno minuto na 40 °C, potem segrevali od 40 °C do 600 °C s hitrostjo segrevanja 10 °C/min v N₂ atmosferi (20 mL/min). Sledil je izotermni segment pri temperaturi 600 °C, 10 minut v O₂ atmosferi (20 mL/min). Merjenje toplotne prevodnosti se je izvajalo na aparaturi HOT DISC, kjer se je za vsak vzorec izvedlo po pet meritev.

Meritve so se izvajale na temperaturi 25 °C, pri moči 3 mW ter času 20 s. Absorpcijski spekter smo določali z ATR FT-IR spektrometrom (Perkin Elmer spectrum 65).

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Natezni preizkus

Natezni preizkus je temeljni mehanski preizkus, s katerim ugotavljamo trdnostne lastnosti kovin, zlitin, plastike, napetost tečenja (mejo plastičnosti), natezno trdnost in modul elastičnosti. Te številčne podatke lahko neposredno uporabimo pri trdnostnih izračunih različnih konstrukcijskih elementov. Preizkušance obremenimo z enoosno (natezno) napetostjo. Napetost med preizkusom počasi narašča, zato preizkus spada med kvazistatične preizkuse. Vse meritve za natezni preizkus so zbrane v tabeli 2.

Tabela 2: Natezni E moduli, natezna trdnost, raztezek pri natezni trdnosti in raztezek pri pretrgu

VZOREC	Natezni E modul (GPa)	Natezna trdnost (MPa)	Raztezek pri natezni trdnosti (%)	Raztezek pri pretrgu (%)
882_2017_0046_01	3,37	68,6	2,62	3,60
882_2017_0046_01-STD	0,29	2,8	0,13	0,95
882_2017_0046_02	3,40	70,9	2,69	3,94
882_2017_0046_02-STD	0,13	0,8	0,14	1,20
882_2017_0046_03	5,22	69,2	2,39	3,27
882_2017_0046_03-STD	0,29	0,9	0,05	0,60
882_2017_0046_04	4,36	68,1	2,52	3,63
882_2017_0046_04-STD	0,92	1,9	0,07	0,49
882_2017_0046_05	2,68	63,2	7,77	12,99
882_2017_0046_05-STD	0,51	1,7	0,28	0,73
882_2017_0046_06	2,36	63,1	7,27	10,47
882_2017_0046_06-STD	0,40	1,7	0,21	1,58
882_2017_0046_07	1,94	59,4	5,93	7,79
882_2017_0046_07-STD	0,45	2,2	0,30	1,44
882_2017_0046_08	2,58	59,0	5,65	6,67
882_2017_0046_08-STD	0,59	2,5	0,18	0,73

Najvišji natezni E modul pri vzorcih s PLA matrico ima vzorec 3 (5,22 GPa), najnižji natezni E modul pa ima vzorec 1 (3,37 GPa). Na osnovi izbranih meritev smo prišli do ugotovitve, da PLA, ki vsebuje 5 % delež Al prahu z dodatkom kompatibilizatorja, zvišamo natezni E modul. Vzorcem, ki vsebujejo 15 % Al prahu, pa z dodatkom SMA natezni E modul znižamo. Pri vzorcih s POM matrico dodatek kompatibilizatorja zniža natezni E modul. Najvišji natezni E modul ima vzorec 5 (2,68 GPa), najnižjega pa vzorec 7 (1,94 GPa). Če med seboj primerjamo vzorce, ki vsebujejo 5 % Al z dodatkom kompatibilizatorja znižamo natezni E modul, vzorcem z 15 % deležem Al pa z dodatkom kompatibilizatorja povišamo natezni E modul. Vzorci s PLA matrico imajo višje natezne E module kot vzorci s POM matrico. Vzorcem PLA z manjšo vsebnostjo Al z dodatkom kompatibilizatorja zvišamo natezni E modul, medtem ko ga vzorcem POM z nižjim deležem Al znižamo. To pa ne velja za vzorce z večjo vsebnostjo Al prahu, saj PLA z večjim deležem Al prahu z dodatkom SMA znižamo natezni E modul, vzorcem POM pa z dodatkom SMA povišamo natezni E modul.

Iz tabele 2 lahko razberemo, da se maksimalna natezna trdnost vzorcu 2 zviša glede na vzorec 1, in to za 2,3 MPa. Vzorcju 4 se natezna trdnost glede na vzorec 3 zniža, in to za 1,1 MPa. Pri vzorcih PLA z nižjo vsebnostjo Al prahu dodatek SMA poviša natezne trdnosti, medtem ko jih pri vzorcih z večjim deležem Al prahu dodatek SMA zniža. Pri vzorcih s POM matrico ima najvišjo natezno trdnost vzorec 5, najnižjo pa vzorec 8. Vzorci POM z večjo vsebnostjo Al imajo nižje natezne trdnosti kot vzorci z nižjim odstotkom.

Enako velja za vzorce, ki vsebujejo dodatek SMA. Vzorcem z dodatkom SMA znižamo natezne trdnosti. Če primerjamo med seboj vseh osem vzorcev, ugotovimo, da imajo vzorci s PLA matrico višjo natezno trdnost kot vzorci s POM matrico. Prav tako na natezno trdnost vpliva tudi odstotek dodanega Al prahu, saj se pri vzorcih PLA, ki imajo višji odstotek dodanega Al, zniža natezna trdnost, enako velja za POM vzorce. Dodatek kompatibilizatorja nekaterim vzorcem še dodatno zniža natezno trdnost. Raztezek pri natezni trdnosti je pri vzorcih s PLA matrico nižji kot pri vzorcih s POM matrico. Pri raztezu pri natezni trdnosti opazimo, da pri vzorcih s PLA matrico ta pada z višanjem dodatka Al prahu, pri dodanem kompatibilizatorju se pri 5 % Al prahu zviša, prav tako pri 15 % dodatku. Pri raztezu pri natezni trdnosti opazimo, da pri vzorcih s POM matrico ta pada z višanjem dodatka Al prahu, pri dodanem kompatibilizatorju pa se še dodatno zniža. Vzorci s PLA matrico imajo nižje raztezke pri pretrgu kot vzorci s POM matrico. Največji raztezek pri pretrgu ima vzorec 5 (12,99 %), najnižjega pa vzorec 3 (3,27 %). Vzorci PLA, ki vsebujejo 5 % delež Al, imajo višje raztezke pri pretrgu kot vzorci PLA s 15 % Al prahu. Z dodatkom SMA še dodatno zvišamo raztezek pri pretrgu. Vzorci s POM matrico, ki vsebujejo 5 % delež Al, imajo višje raztezke pri pretrgu kot vzorci s 15 % dodatkom Al. Z dodatkom SMA se raztezki pri pretrgu znižajo. Z dodatkom SMA vzorcem PLA zvišamo raztezke pri pretrgu, pri vzorcih s POM pa jih znižamo. Grafi vzorcev za natezne preizkuse so prikazani v prilogi 1.

4.2 Upogibni preizkus

Upogibni preizkus se uporablja za določanje trdnosti materiala, predvsem za materiale, za katere ne velja Hookov zakon. Preizkušanece položimo med dve podpori in ga v sredini obremenimo s silo, ki ga upogne. Merimo maksimalno silo in največji upogib do loma. Vse meritve za upogibni preizkus so zbrane v tabeli 3.

Tabela 3: Upogibni E moduli, upogibna trdnosti in raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti

Vzorec	Upogibni E modul (GPa)	Maksimalna upogibna trdnost (MPa)	Upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (%)
882_2017_0046_01	4,02	99,9	4,20
882_2017_0046_01-STD	0,10	7,1	0,13
882_2017_0046_02	4,12	101,9	4,29
882_2017_0046_02-STD	0,07	2,1	0,08
882_2017_0046_03	5,08	102,4	3,65
882_2017_0046_03-STD	0,11	3,0	0,07
882_2017_0046_04	5,09	103,6	3,61
882_2017_0046_04-STD	0,13	2,2	0,07
882_2017_0046_05	2,86	86,2	6,75
882_2017_0046_05-STD	0,01	0,3	0,07
882_2017_0046_06	2,85	85,9	6,69
882_2017_0046_06-STD	0,02	0,2	0,03
882_2017_0046_07	3,28	82,5	6,34
882_2017_0046_07-STD	0,00	0,1	0,05
882_2017_0046_08	3,21	84,0	6,35
882_2017_0046_08-STD	0,01	0,2	0,07

Najvišji upogibni E modul pri vzorcih s PLA matrico ima vzorec 4 (5,09 GPa) najnižji upogibni E modul pa ima vzorec 1. Iz izbranih meritev smo prišli do ugotovitve, da PLA pri istem odstotku Al prahu z dodatkom kompatibilizatorja povišamo upogibni E modul in da imajo vzorci, ki vsebujejo višji delež Al prahu, še višji upogibni E modul. Dodatno upogibni E modul zvišamo z dodatkom SMA. Pri vzorcih s POM matrico dodatek kompatibilizatorja zniža upogibni E modul. Če primerjamo med sabo vzorce 5, 6 in 7, 8, vidimo, da imata vzorca 7 in 8 višji upogibni E modul, na osnovi česar predvidevamo, da večji odstotek Al prahu vpliva na zvišanje upogibnega E modula. Vzorci s PLA matrico imajo višje upogibne E module kot vzorci s POM matrico. Z dodatkom SMA vzorcem s PLA matrico zvišamo upogibne E module, vzorcem s POM matrico pa jih znižamo.

Iz tabele 3 lahko razberemo, da se maksimalna upogibna trdnost vzorcema 2 in 4 zviša glede na vzorca 1 in 3, in to za 2 MPa oziroma za 1,2 MPa. Pri vzorcu 6 dodatek kompatibilizatorja zniža maksimalno upogibno trdnost za 0,3 MPa glede na vzorec 5. Pri vzorcu 8 pridemo do ugotovitve, da ima vzorec 1,5 MPa višjo maksimalno upogibno trdnost glede na vzorec 7. Če med seboj primerjamo vseh osem vzorcev, ugotovimo, da imajo vzorci s PLA matrico višjo maksimalno upogibno trdnost kot vzorci s POM matrico. Prav tako na maksimalno upogibno trdnost vpliva tudi odstotek dodanega Al prahu, saj imajo vzorci, ki imajo višji odstotek dodanega Al prahu, višjo maksimalno upogibno trdnost. Dodatek kompatibilizatorja še dodatno zviša maksimalno upogibno trdnost v primeru vzorcev s PLA matrico in pri vzorcih s POM matrico, ko je dodanega 15 % Al prahu. Pri vzorcih s POM matrico višanje dodatka Al prahu znižuje maksimalno upogibno trdnost. Upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti je pri vzorcih s PLA matrico nižji kot pri vzorcih s POM matrico. Pri upogibnem raztezk pri maksimalni upogibni trdnosti opazimo, da pri vzorcih s PLA matrico ta pada z višanjem dodatka Al prahu, pri dodanem kompatibilizatorju se pri 5 % dodanega Al prahu zviša, pri 15 % pa zniža. Pri upogibnem raztezk pri maksimalni upogibni trdnosti opazimo, da pri vzorcih s POM matrico ta pada z višanjem dodatka Al prahu, pri dodanem kompatibilizatorju se pri 5 % dodanega Al prahu zniža, pri 15 % pa malenkostno zviša. Upogibni grafi vzorcev so prikazani v prilogi 2.

4.3 DMA

Dinamična mehanska analiza (DMA) je analitska metoda, ki hkrati določa mehanske lastnosti vzorca v odvisnosti od temperature, amplitude in frekvence [26]. Rezultati meritev so zbrani v tabeli 4.

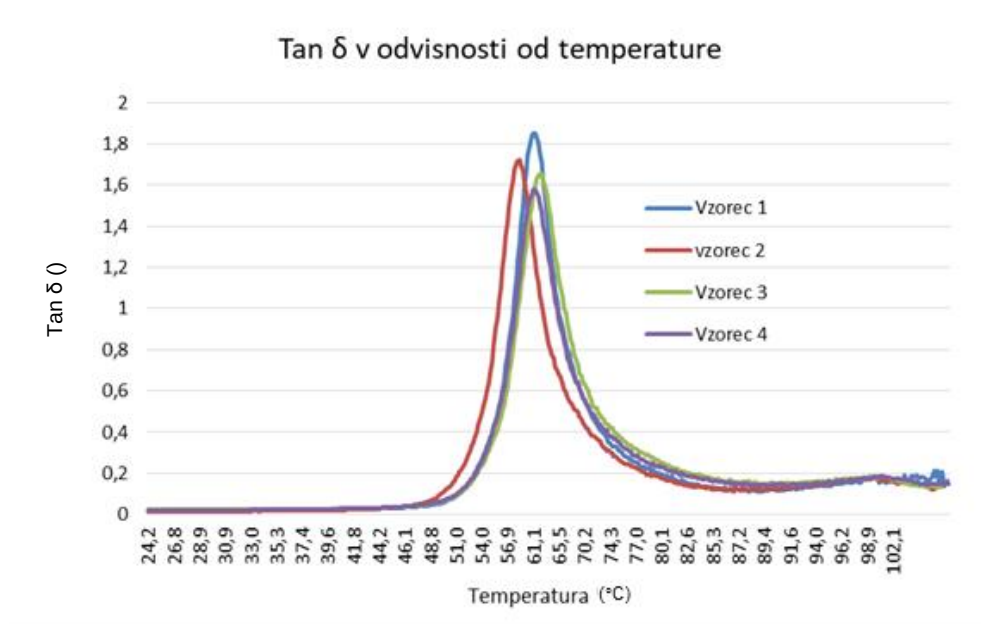
Tabela 4: Temperatura steklastega prehoda, dinamični E modul in faktorji izgub

	Dinamični E modul (GPa)	vrh $\tan \delta$ (T_g) (°C)	$\tan \delta$ (-)
882_2017_0046_01	3,938	67,2	1,807
882_2017_0046_02	3,947	67,5	1,717
882_2017_0046_03	4,367	68,0	1,717
882_2017_0046_04	4,530	67,7	1,595
882_2017_0046_05	2,607		0,279
882_2017_0046_06	2,406		0,249
882_2017_0046_07	2,614		0,249
882_2017_0046_08	2,782		0,243

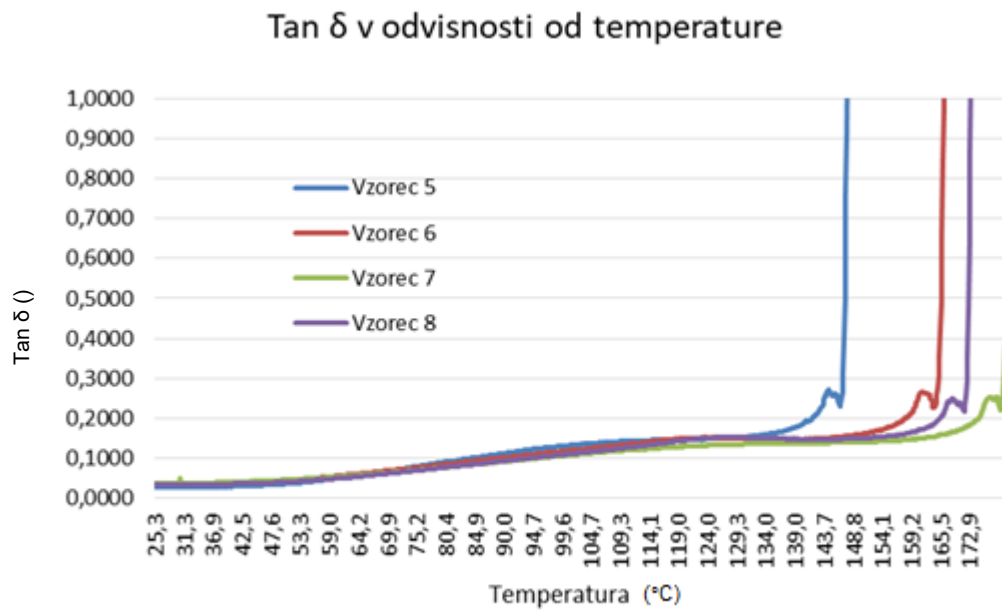
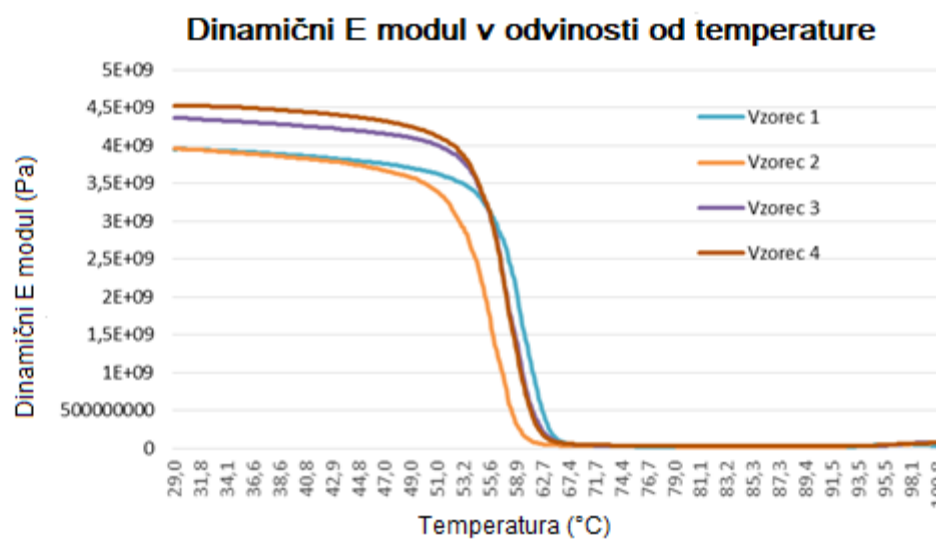
Temperature steklastega prehoda se pri PLA matrici (slika 11) nahajajo v območju med 67,2 °C in 68,0 °C. Najvišjo temperaturo ima vzorec 3 in znaša 68,0 °C.

Iz izbranih meritev smo prišli do ugotovitve, da imajo vzorci s PLA matrico, ki vsebujejo manjši delež Al prahu, nižje temperature steklastega prehoda kot tisti z večjim odstotkom Al. Temperaturo steklastega prehoda pri PLA s 5 % deležem Al nekoliko povišamo z dodatkom SMA. Pri vzorcih s 15 % deležem pa se temperatura steklastega prehoda z dodatkom kompatibilizatorja zniža.

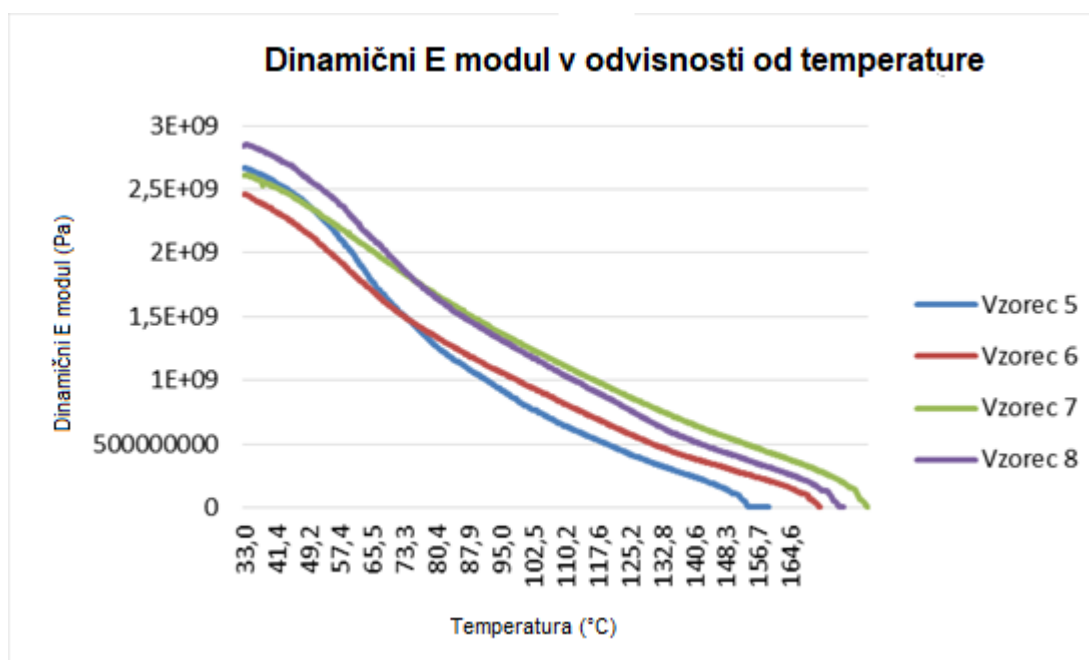
Iz grafov faktorjev izgub za POM matrico (slika 12) vidimo, da v merjenem temperaturnem območju ni steklastega prehoda. Če primerjamo med sabo vseh osem vzorcev, imajo vzorci s PLA matrico (slika 13) višje dinamične E module kot vzorci s POM matrico (slika 14). Prav tako na dinamični E modul vplivajo odstotki Al prahu. Vzorci, ki imajo večji delež Al prahu, imajo tudi višji dinamični E modul. Dinamični E modul še dodatno poviša dodatek kompatibilizatorja, kar pa ne velja za vzorec 6, ki mu dodatek SMA zniža dinamični E modul. Primerjajmo še faktorje izgub. Vzorci s POM matrico imajo bistveno nižje faktorje izgub kot vzorci s PLA matrico. Najnižji faktor izgub ima vzorec 8, to je 0,243, najvišji faktor izgub pa vzorec 1, to je 1,807. Vsem vzorcem z dodatkom kompatibilizatorja faktor izgub znižamo. Vrh faktorja izgub nam pove, kako kompozit duši vibracije. Kadar je faktor izgub nižji, pomeni, da je kompozit bolj elastičen.



Slika 11: $\tan \delta$ v odvisnosti od temperature PLA

Slika 12: Tan δ v odvisnosti od temperature POM

Slika 13: Dinamični E modul v odvisnosti od temperature



Slika 14: Dinamični modul v odvisnosti od temperature

4.4 CHARPY TEST

Udarni preizkus je preizkus, ki pokaže odpornost materiala proti udarcem. Pri udarnih obremenitvah se materialu zmanjša žilavost, zato pride do krhkega loma. Največji vpliv na krhki lom imata nizka temperatura ter koncentracija napetosti v materialu [27]. Vse meritve udarne žilavosti so zbrane v tabeli 5.

Tabela 5: Meritve udarne žilavosti

Vzorec	Udarne žilavost (kJ/m ²)	Standardna deviacija (kJ/m ²)	Zarezna udarna žilavost (kJ/m ²)	Standardna deviacija (kJ/m ²)
822_2017_0046_1	25,8	4,1	2,7	0,4
822_2017_0046_2	27,5	3,5	3,1	0,7
822_2017_0046_3	19,4	2,2	3,2	0,7
822_2017_0046_4	19,6	0,9	3,2	0,6
822_2017_0046_5	62,7	11,3	6,2	0,3
822_2017_0046_6	53,9	3,5	5,9	0,8
822_2017_0046_7	29,8	2,1	4,3	0,1
822_2017_0046_8	26,8	3,2	4,2	0,3

Najvišjo udarno žilavost pri vzorcih s PLA matrico ima vzorec 2, kjer udarna žilavost znaša 27,5 kJ/m², najnižjo pa vzorec 3, kjer je udarna žilavost 19,4 kJ/m².

Na osnovi izbranih meritev smo prišli do ugotovitve, da imajo vzorci s PLA matrico nižje udarne žilavosti kot vzorci s POM matrico. Vzorcem PLA matrice pri istem odstotku Al prahu z dodatkom kompatibilizatorja udarno žilavost povišamo. Najvišjo udarno žilavost pri vzorcih POM ima vzorec 5, in sicer 62,7 kJ/m², najnižjo pa vzorec 8, in sicer 26,8 kJ/m².

Vzorci s POM matrico imajo pri višjih odstotkih dodanega Al prahu nižjo udarno žilavost. Z dodatkom SMA vzorcem s POM matrico znižamo udarno žilavost. Zarezna udarna žilavost je precej nižja od udarne žilavosti, na kar vpliva zarez na vzorcih za merjenje zarezne udarne žilavosti. Najnižje vrednosti imajo vzorci s PLA matrico, najvišje pa vzorci s POM matrico. Izmed vseh osmih vzorcev ima najvišjo zarezno udarno žilavost vzorec 5, najnižjo pa vzorec 1. Pri vzorcih s PLA matrico dodatek SMA poveča zarezno udarno žilavost. Pri vzorcih s POM matrico pa se ta ob dodatku kompatibilizatorja zmanjša.

4.5 TGA

Kot funkcijo temperature ali časa merimo spremembo v masi vzorca. TGA se uporablja za določanje masnega deleža hlapnih sestavin vzorca in spremljanje poteka degradacije [4]. Zbrani rezultati TGA meritev so prikazani v tabeli 6.

Tabela 6: Meritve razpada vzorcev

Vzorec	T _{d1} (°C)	Razpad 1 (%)	T _{d2} (°C)	Razpad 2 (%)	Ostanek (%)
822_2017_0046_1	377,2	94,9			5,1
822_2017_0046_2	376,6	1,7	420,9	94,5	3,8
822_2017_0046_3	370,7	83,4			16,6
822_2017_0046_4	371,3	84,2			15,8
822_2017_0046_5	370,2	95,1			4,9
822_2017_0046_6	367,6	95,1			4,9
822_2017_0046_7	373,8	85,9			14,1
822_2017_0046_8	379,9	88,1			11,9

Iz tabele razberemo, da večinoma vsi vzorci razpadejo v temperaturnem intervalu od 365 do 380 °C, razen pri vzorcu 2 imamo dvojni razpad, kjer pri prvem razpadu vzorca razpade 1,7 %, pri drugem razpadu pa ostala večina, približno 94,5 %. Vzorec 1 ima razpad pri temperaturi 377,2 °C, vzorec 2 pri temperaturi 376,6 °C. Vzorec 3 ima temperaturo razpada pri 370,7 °C, vzorec 4 pa pri temperaturi 371,3 °C. Če primerjamo med seboj vse štiri vzorce PLA matrice, pridemo do ugotovitev, da vzorec, ki vsebuje manjši delež Al prahu in je brez kompatibilizatorja, razpade pri najvišji temperaturi. Temperaturo razpada znižamo s tem, da mu dodamo kompatibilizator. Pri vzorcih 3 in 4 pa je ravno obratno. Ta dva vzorca vsebujeta 15 % Al prahu, vzorec 4 pa še dodatno kompatibilizator. Vidimo, da ima vzorec 4 večjo temperaturo razpada kot vzorec 3, kar pomeni, da mu dodatek kompatibilizatorja dvigne temperaturo razpada in tudi odstotek razpada. Primerjajmo še vzorce POM.

Vzorec 5 ima temperaturo razpada 370,2 °C, vzorec 6 pa 367,6 °C. Vzorec 7 ima temperaturo razpada 373,8 °C, medtem ko vzorec 8 razpade pri 379,9 °C.

Vzorcem POM z dodatkom 5 % Al, kadar mu dodamo SMA, znižamo temperaturo razpada. To pa ne velja za vzorce s 15 % Al, saj imajo ti vzorci višjo temperaturo razpada kot vzorci brez SMA.

Iz teh meritev pridemo do sklepa, da imajo vzorci s PLA matrico, ki vsebujejo večji delež Al, nižjo temperaturo razpada. Vzorcem, ki vsebujejo še SMA, se pri večjem deležu Al dodatno dvigne še temperatura razpada, in sicer iz 370,7 °C na 371,3 °C. Pri POM vzorcih imata vzorca, ki vsebujeta večji delež Al, višjo temperaturo razpada, iz česar sklepamo, da jima dodatek poviša temperaturo razpada. Vzorec 5 ima temperaturo razpada 370,2 °C, vzorec 6 pa 367,6 °C. To pomeni, da dodatek kompatibilizatorja zniža temperaturo razpada. Pri vzorcih 6 in 7 je ravno obratno, saj ima vzorec, ki ima dodan kompatibilizator, višjo temperaturo razpada kot vzorec 7, ki je brez kompatibilizatorja. Prav tako se mu poveča delež razpada.

4.6 HOT DISC

Metoda HOT DISC se uporablja za merjenje toplotne prevodnosti in toplotne difuzivnosti. Vse meritve za toplotno in temperaturno prevodnost so zbrane v tabeli 7.

Tabela 7: Meritve toplotne prevodnosti, toplotne difuzivnosti ter specifična toplota

Vzorec	Toplotna prevodnost (W/mK)	Toplotna difuzivnost (mm ² /s)	Specifična toplota (MJ/m ³ K)
822_2017_0046_1	0,290	0,249	1,164
822_2017_0046_2	0,280	0,240	1,184
822_2017_0046_3	0,371	0,358	1,042
822_2017_0046_4	0,374	0,356	1,058
822_2017_0046_5	0,501	0,356	1,465
822_2017_0046_6	0,533	0,428	1,298
822_2017_0046_7	0,686	0,595	1,253
822_2017_0046_8	0,611	0,450	1,367

Najvišjo toplotno prevodnost pri vzorcih s PLA matrico ima vzorec 4 (0,374 W/mK), najnižjo toplotno prevodnost pa vzorec 2 (0,280 W/mK). Na osnovi zbranih meritev smo prišli do ugotovitve, da PLA pri istem odstotku Al prahu z dodatkom kompatibilizatorja znižamo toplotno prevodnost in da imajo vzorci, ki vsebujejo višji delež Al prahu, višjo toplotno prevodnost kot vzorci PLA z nižjo vsebnostjo Al. Pri nižjih odstotkih Al prahu z dodatkom SMA toplotno prevodnost znižamo, pri večjih odstotkih Al pa z dodatkom SMA zvišamo toplotno prevodnost. Pri vzorcih s POM matrico dodatek kompatibilizatorja pri nižjih odstotkih Al prahu toplotno prevodnost zvišuje, pri nižjih vrednostih pa jo znižuje.

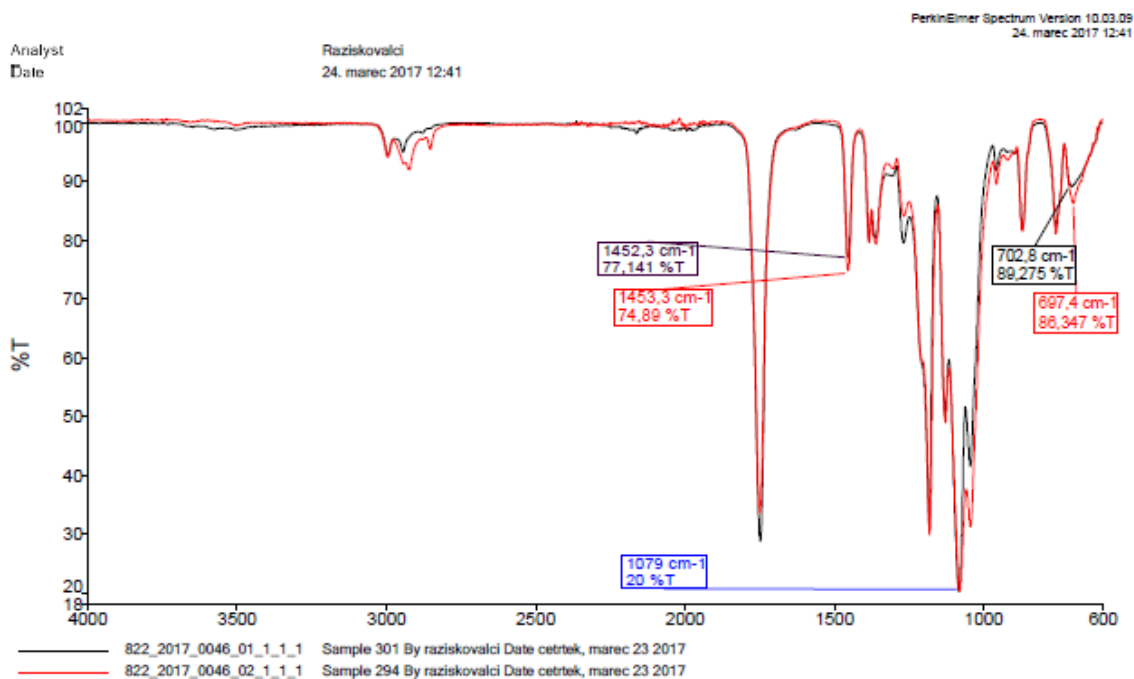
Najnižjo toplotno prevodnost pri vzorcih s POM matrico ima vzorec 5 (0,501 W/mK), najvišjo pa vzorec 7 (0,686 W/mK). Vzorci z nižjim deležem Al prahu imajo tudi nižjo toplotno prevodnost kot vzorci z višjim odstotkom.

Z dodatkom SMA vzorcem s POM matrico, ki imajo nižji odstotek Al, toplotno prevodnost povišamo, vzorcem z večjim odstotkom Al pa jo znižamo. Vzorci s PLA matrico imajo nižjo temperaturno prevodnost kot vzorci s POM matrico.

Najvišjo toplotno difuzivnost pri vzorcih s PLA matrico ima vzorec 4 ($0,356 \text{ mm}^2/\text{s}$), najnižjo toplotno difuzivnost pa vzorec 2 ($0,240 \text{ mm}^2/\text{s}$). Pri vzorcih s PLA matrico imajo višjo difuzivnost tisti vzorci, ki vsebujejo večji odstotek Al prahu. Pri vzorcih PLA, ki imajo dodatek SMA, pa se difuzivnost zniža. Med vzorci s POM matrico ima najvišjo temperaturno prevodnost vzorec 7, in sicer $0,595 \text{ mm}^2/\text{s}$, najnižjo pa vzorec 5, $0,356 \text{ mm}^2/\text{s}$. iz tabele je razvidno, da vzorcem POM, ki vsebujejo nižji odstotek Al prahu, z dodatkom SMA difuzivnost povišamo. Vzorcem z višjim odstotkom Al prahu pa z dodatkom kompatibilizatorja difuzivnost znižamo. Specifična toplota je pri vzorcih s PLA matrico nižja kot pri vzorcih s POM matrico. Najvišjo specifično toploto pri vzorcih PLA ima vzorec 2 ($1,184 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$), najnižjo pa vzorec 3 ($1,042 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$). Vzorci, ki vsebujejo višji odstotek Al prahu, imajo nižjo specifično toploto od vzorcev z nižjim odstotkom Al prahu. Z dodatkom kompatibilizatorja vzorcem PLA zvišamo specifično toploto. Najvišjo specifično toploto vzorcev s POM matrico ima vzorec 5, in sicer $1,465 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$, najnižjo pa vzorec 7, $1,253 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$. Vzorcem POM z nižjim odstotkom Al prahu z dodatkom SMA specifično toploto znižamo, vzorcem z višjim odstotkom Al prahu pa jo zvišamo.

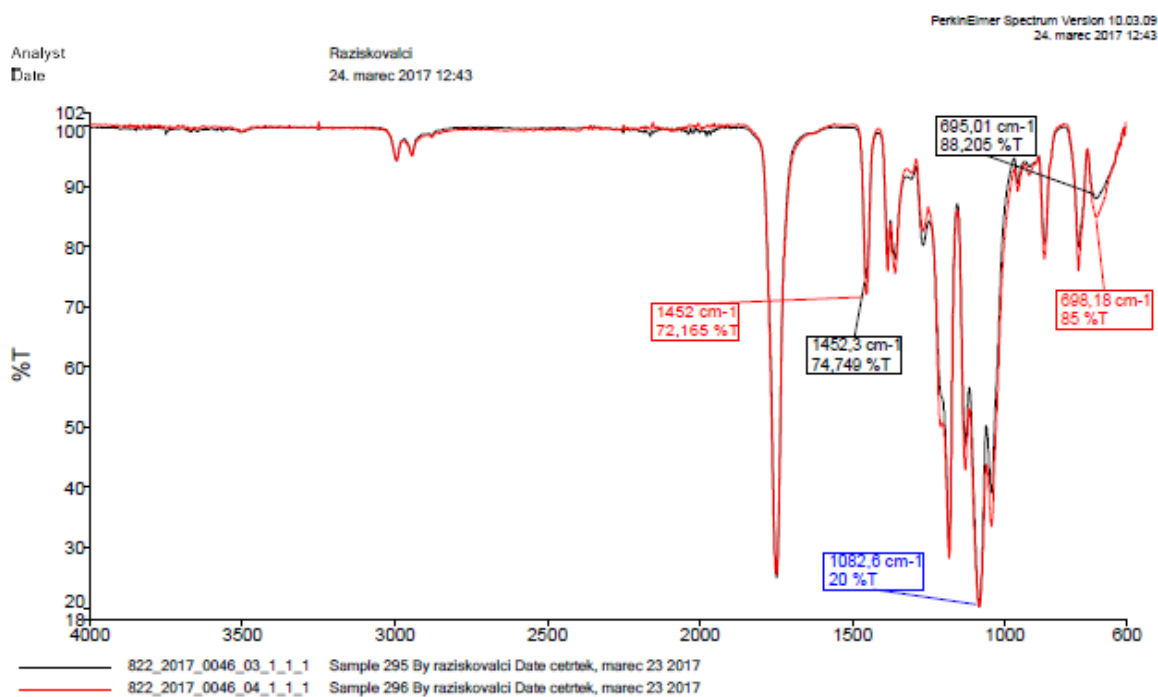
4.7 FTIR

Infrardeča spektroskopija (IR spektroskopija) je podskupina spektroskopije, ki obravnava infrardeče območje elektromagnetnega spektra. Uporablja se lahko za identifikacijo spojin ali za raziskovanje sestave vzorcev. Infrardeči spekter vzorca se zbira s prepuščanjem infrardečega svetlobnega žarka skozi vzorec. Pregled prepuščene svetlobe razkrije, koliko energije se absorbira na vsaki valovni dolžini. To lahko storimo z orodjem Fourierjeve transformacije za hkratno merjenje vseh valovnih dolžin. Iz tega je mogoče ustvariti prepustnost ali absorpcijski spekter, ki kaže, pri katerih IR valovnih dolžinah absorbira vzorec. Analiza teh absorpcijskih lastnosti razkrije podrobnosti o molekularni strukturi vzorca [28]. Izmerjeni spektri vzorcev so prikazani na slikah 15–18.



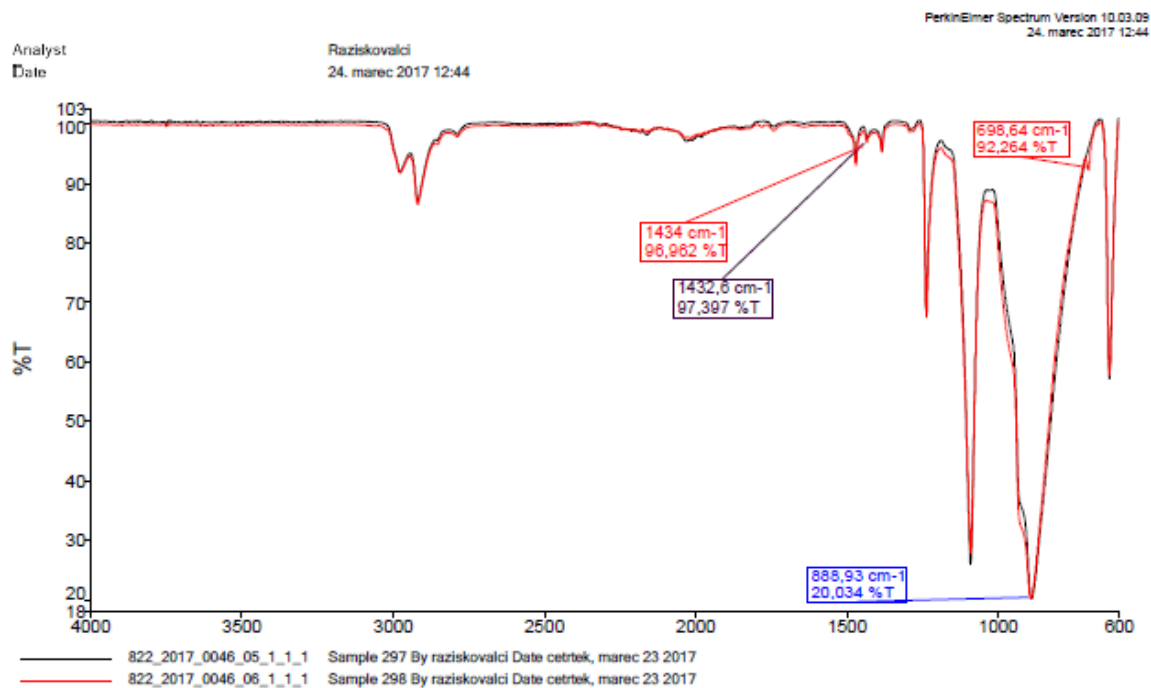
Slika 15: FTIR spekter vzorcev 1 in 2

Pri prvem vrhu se nahaja –CH vez, kjer je označen vrh pri $1452,3\text{ cm}^{-1}$. Vidimo, da imata oba vzorca primerljivo transmissivnost. Potem imamo še najnižji vrh pri 1079 cm^{-1} , kjer imata oba vzorca identično vrednost. Na tem vrhu se nahajajo C-O vezi.

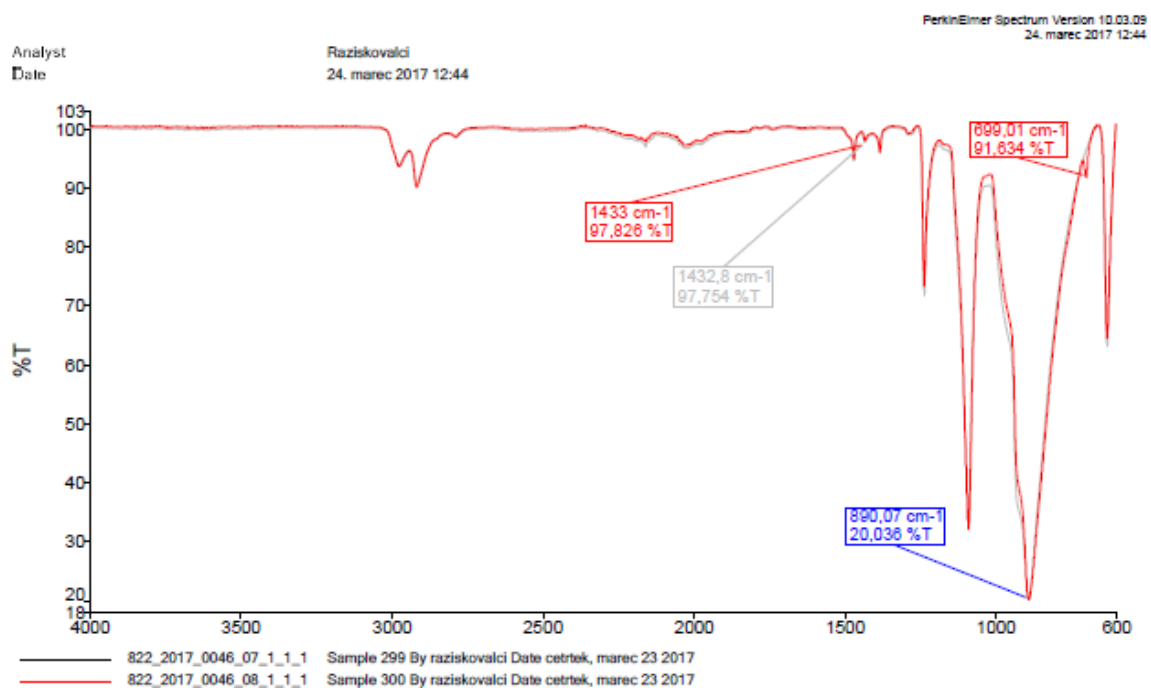


Slika 16: FTIR spekter vzorcev 3 in 4

FTIR graf za vzorca 3 in 4 je precej podoben vzorcema 1 in 2. Prvi vrh se nahaja na začetku in prikazuje -CH vez. Potem imamo vrh pri valovnem številu 1452 cm^{-1} , za katerega je značilna vez C-H. Poleg tega imamo še vrh pri valovnem številu 1082 cm^{-1} , kar prikazuje C-O vez.



Slika 17: FTIR spekter vzorcev 5 in 6



Slika 18: FTIR spekter vzorcev 7 in 8

Prvi vrh, ki ni označen in se nahaja okrog valovnega števila 3000 cm^{-1} , nakazuje, da se tukaj nahaja --CH vez. Ta se nahaja nekje med valovnima številoma 2923 cm^{-1} in 2854 cm^{-1} . Drugi vrh, ki se nahaja pri valovnem številu nam nakazuje na C=O vezi, ki se nahajajo med valovnim številoma 1640 cm^{-1} in 1384 cm^{-1} . Vrh, ki se nahaja pri valovnem številu 1000 cm^{-1} , predstavlja vrh C-O.

5 SKLEP

Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da dodatek Al prahu in dodatek kompatibilizatorja pri nekaterih vzorcih izboljšata lastnosti, medtem ko jih pri drugih poslabšata. Pri upogibnih preizkusih pridemo do zaključka, da vzorcem s PLA matrico dodatek Al in kompatibilizatorja poveča upogibni E modul, kar pa ne velja za vzorce s POM matrico, saj jim z dodatki znižamo upogibni E modul. Enako velja za upogibne trdnosti. Vzorcem PLA se zvišajo, medtem ko se vzorcem z manjšo vsebnostjo Al znižajo. Vzorcem, ki vsebujejo večji odstotek Al prahu, se zvišajo. Vzorci PLA, ki imajo večji delež Al, imajo višje upogibne trdnosti, ki se še povišajo z dodatkom kompatibilizatorja. Vzorci PLA z nižjim odstotkom Al prahu imajo višji raztezek kot vzorci z dodatkom kompatibilizatorja. Pri vzorcih z višjim odstotkom pa dodatek SMA zniža upogibni raztezek. Vzorci POM z nižjim deležem Al imajo višjo upogibno trdnost. Z dodatkom kompatibilizatorja vzorcem POM z nižjim deležem znižamo upogibno trdnost, vzorcem z višjim deležem Al prahu pa z dodatkom SMA zvišamo upogibno trdnost. Vzorci PLA in POM z nižjim deležem Al prahu imajo višje raztezke kot vzorci z višjim deležem. Upogibni raztezki pri vzorcih s PLA matrico se z dodatkom SMA pri nižjih vsebnosti Al prahu zvišajo, pri višjih deležih pa znižajo. Ravno obratno je pri vzorcih POM, saj vzorcem z nižjo vsebnostjo Al prahu z dodatkom SMA znižamo raztezek, pri vzorcih z višjim deležem pa jo z dodatkom SMA zvišamo.

Pri nateznih preizkusih vzorcem PLA z nižjo vsebnostjo Al z dodatkom kompatibilizatorja zvišamo natezne E module, pri vzorcih POM pa z dodatkom kompatibilizatorja znižamo natezni E modul. Vzorci PLA z višjim deležem Al prahu imajo višje natezne E module. Iz tega sklepamo, da z dodatkom Al prahu zvišamo natezne E module PLA. Vzorcem s PLA matrico, ki vsebujejo nižjo vrednost Al prahu, z dodatkom kompatibilizatorja zvišamo natezno trdnost, raztezek pri natezni trdnosti in raztezek pri pretrgu. To pa ne velja za vzorce PLA z višjim deležem Al prahu, saj jim z dodatkom kompatibilizatorja natezno trdnost znižamo, zvišamo pa raztezke. Pri vzorcih POM dodatek kompatibilizatorja vpliva na natezne E module, pri nižjih vsebnostih Al prahu se natezni E modul z dodatkom kompatibilizatorja zniža, prav tako se znižajo natezna trdnost in raztezki. Podobno velja za vzorce POM z višjim odstotkom Al, le da se natezni E modul z dodatkom kompatibilizatorja zviša, natezna trdnost in raztezki pa znižajo.

Vzorci PLA in POM z višjim odstotkom Al prahu imajo višje dinamične E module. Pri PLA vzorcih z dodatkom SMA te še dodatno zvišamo. Pri vzorcih POM pa z dodatkom SMA vzorcem z nižjo vsebnostjo Al prahu znižamo dinamični E modul, vzorcem z višjim odstotkom Al prahu pa ga zvišamo.

Iz rezultatov sklepamo, da dodatek SMA vzorcem PLA z nižjim odstotkom poviša temperaturo steklastega prehoda, vzorcem PLA z višjim deležem Al prahu pa jo zniža. Vzorci PLA imajo višje faktorje izgub kot vzorci POM. Pri vseh vzorcih z dodatkom SMA faktorje izgub znižamo.

Najvišjo udarno žilavost imajo vzorci POM, ki se jim z dodatkom kompatibilizatorja zniža. Vzorcem PLA pa se z dodatkom SMA poviša. Na udarno žilavost ima vpliv tudi odstotek Al, saj imajo vzorci z višjim odstotkom Al prahu nižje vrednosti udarne žilavosti.

Vzorci PLA, ki imajo večji odstotek Al prahu, imajo nižje temperature razpada kot vzorci z nižjim deležem. Na to vpliva dodatek Al prahu. To pomeni, da več kot je Al, nižje temperature so potrebne za razpad vzorcev. Z dodatkom SMA vzorcem z nižjimi odstotki Al prahu znižamo temperature razpada, vzorcem z višjim odstotkom pa jih povišamo. Enako velja za vzorce POM – vzorcem z dodatkom kompatibilizatorja pri nižjih % Al prahu znižamo temperaturo razpada, pri vzorcih z višjim odstotkom pa jo povišamo. Vzorci PLA z višjim odstotkom Al prahu imajo nižje temperature razpada, medtem ko imajo vzorci POM, ki vsebujejo višji odstotek Al prahu, višje temperature razpada.

Vzorci POM imajo višjo toplotno prevodnost in toplotno difuzivnost od vzorcev PLA. Vzorci z nižjimi odstotki Al prahu imajo nižjo toplotno prevodnost in toplotno difuzivnost. Vzorcem s PLA matrico z dodatkom SMA pri nižjih vsebnostih toplotno prevodnost znižamo, pri višjih pa jo povišamo, medtem ko je pri toplotni difuzivnosti ravno obratno. Vzorcem POM dodatek SMA pri nižjem odstotku Al povišamo toplotno difuzivnost, vzorcem z večjim odstotkom pa dodatek SMA zniža toplotno difuzivnost.

Cilji diplomskega dela so bili izpolnjeni, saj smo ugotovili, da se z dodatki Al prahu in kompatibilizatorjev nekatere lastnosti izboljšajo, medtem ko se druge poslabšajo. Hipoteze so bile potrjene, saj so se z dodatkom kompatibilizatorja in Al prahu nekaterim vzorcem toplotne prevodnosti zvišale. Enako velja za žilavost materiala, saj se je vzorcem PLA žilavost zvišala, vzorcem POM pa znižala.

Za nadaljnje raziskave bi bilo dobro pripraviti in karakterizirati vzorce z višjim odstotkom kompatibilizatorja SMA in z višjim odstotkom Al prahu. S tem bi dobili vzorce, ki bi imeli še višjo toplotno prevodnost in hkrati tudi po vsej verjetnosti nižjo žilavost.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] V.M. I. Švab, Polimerni kompoziti, zbrano gradivo, Slovenj Gradec, Slovenj Gradec, 2008.
- [2] Navodnik Janez, Mateja Kopčič, Plastik - orodjar, 1995.
- [3] Henrik Privšek, Umetnost brizganja, Škofljica, 2015.
- [4] Majda Žigon, Uvod v polimere, zapiski predavanj, kemijski inštitut, Ljubljana, 2009.
- [5] F.L. and R.R.D. Maththers, Composite materials: Engineering and science, Mater Des. 16 (1995) 119–120. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(95\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0261-3069(95)90018-7).
- [6] W. Grellmann, S. Seidler, Polymer Testing, 2013.
- [7] K. Potter, Resin Transfer Moulding, Springer Netherlands, Dordrecht, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0021-9>.
- [8] ResearchGate, Resin transfer molding (RTM) process, (2017). https://www.researchgate.net/figure/Resin-transfer-molding-RTM-process-courtesy-2_fig4_327416010 (accessed October 23, 2023).
- [9] Wikipedia, Plastic compounding, (2022). https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic_compounding (accessed October 23, 2023).
- [10] R. manufacturing Wayken, Injection Molding Machine, (2022). <https://waykenrm.com/wp-content/uploads/2022/12/injection-molding.jpg> (accessed October 23, 2023).
- [11] B.T. Åström, Manufacturing of Polymer Composites, 2018. <https://doi.org/10.1201/9780203748169>.
- [12] a K.C. Pultrex, Pullwinding for use with pultrusion equipment, England, 2019.
- [13] SubsTech, Pultrusion - A scheme of the process, (2016). <https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=pultrusion&cache=cache&media=pultrusion.png> (accessed October 23, 2023).
- [14] Mechanicalland, Illustration of the pulforming process, (2021). <https://mechanicalland.com/a-brief-explanation-of-pulforming-processes/> (accessed October 23, 2023).
- [15] Carbonprofiles, Pullwinding, (n.d.). <https://www.carbonprofiles.dk/composites/pullwinding.aspx> (accessed October 23, 2023).
- [16] Celanese, Hostaform ® POM Polyoxymethylene Copolymer PRODUCT MANUAL, 2014.

-
- [17] Adobe Stock, Chemical structure of POM, (n.d.). <https://stock.adobe.com/images/polyoxymethylene-pom-acetal-polyformaldehyde-plastic-polymer-chemical-structure-skeletal-formula/222431182> (accessed October 23, 2023).
- [18] Resinex, POM, distribution of plastic & elastomers, (n.d.). <https://www.resinex.si/polimeri/pom.html> (accessed October 23, 2023).
- [19] Mordor Intelligence, Medical Polyoxymethylene (POM) Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028), (2018). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/medical-polyoxymethylene-pom-market> (accessed October 23, 2023).
- [20] Martina Zapušek, Možnost uporabe bioplastike kot embalažnega materiala za živila, 2014.
- [21] Resinex, PLA, distribution of plastic & elastomers, (n.d.). <https://www.resinex.si/polimeri/pla.html> (accessed October 23, 2023).
- [22] ResearchGate, Chemical structure of poly (lactic acid) (PLA), (2022). https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-poly-lactic-acid-PLA_fig2_352498878 (accessed October 23, 2023).
- [23] Natureworks, Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet For Fresh Food Packaging and Food Serviceware, n.d. www.natureworkslc.com.
- [24] Polyscope, Technical DataSheet Xiran SZ08250, (2017).
- [25] ResearchGate, Tensile test specimen (Type 1BA), all dimensions are in mm, (2018). https://www.researchgate.net/figure/Tensile-test-specimen-Type-1BA-all-dimensions-are-in-mm_fig4_332708163 (accessed October 23, 2023).
- [26] laboratoy services Eurolab, Dinamična mehanska analiza (DMA), (n.d.). <https://www.labaratuar.com/sl/testler/malzeme/dinamik-mekanik-analiz--dma/> (accessed October 23, 2023).
- [27] Wikipedija, Udarni preizkus, (2021).
- [28] laboratory services Eurolab, Infrardeča spektroskopija s Fourierjevo transformacijo (FTIR), (n.d.). <https://www.labaratuar.com/sl/testler/malzeme/fourier-donusumu-kizilotesi-spektroskopisi--ftir/> (accessed October 23, 2023).

SEZNAM SLIK

Slika 1: RTM proces [8]	4
Slika 2: Linija za kompavndiranje [9]	5
Slika 3: Brizgalni stroj [10]	5
Slika 4: Postopek pultruzije [13]	6
Slika 5: Proces pulforminga [14]	7
Slika 6: Proces pulvindinga [15]	8
Slika 7: Kemijska struktura POM [17]	8
Slika 8: Uporaba POM v industriji [19]	10
Slika 9: Kemijska struktura PLA [22]	12
Slika 10: Vzorec za natezni test, skladen z obliko po ISO 527 1BA [25]	15
Slika 11: Tan δ v odvisnosti od temperature PLA	21
Slika 12: Tan δ v odvisnosti od temperature POM	22
Slika 13: Dinamični E-modul v odvisnosti od temperature	22
Slika 14: Dinamični modul v odvisnosti od temperature	23
Slika 15: FTIR spekter vzorcev 1 in 2	27
Slika 16: FTIR spekter vzorcev 3 in 4	27
Slika 17: FTIR spekter vzorcev 5 in 6	28
Slika 18: FTIR spekter vzorcev 7 in 8	28
Slika 19: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 1	38
Slika 20: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 2	39
Slika 21: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 3	40
Slika 22: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 4	41
Slika 23: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 5	42
Slika 24: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 6	43
Slika 25: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 7	44
Slika 26: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 8	45
Slika 27: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 1	46
Slika 28: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 2	47
Slika 29: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 3	48
Slika 30: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 4	49
Slika 31: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 5	50
Slika 32: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 6	51
Slika 33: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 7	52
Slika 34: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 8	53

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Vzorci in količine dodatkov	14
Tabela 2: Natezni E moduli, natezna trdnost, raztezek pri natezni trdnosti in raztezek pri pretrgu	17
Tabela 3: Upogibni E moduli, upogibna trdnosti in raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti	19
Tabela 4: Temperatura steklastega prehoda, dinamični E modul in faktorji izgub	20
Tabela 5: Meritve udarne žilavosti	23
Tabela 6: Meritve razpada vzorcev	24
Tabela 7: Meritve toplotne prevodnosti, toplotne difuzivnosti ter specifična toplota	25

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

GPa -Gigapascal

MPa - Megapascal

kJ/m² - Kilodžul na kvadratni meter

W/mK - Watt na meter kelvin

mm²/s - kvadratni milimeter na sekundo

MJ/m³K - Megadžul na kubični meter kelvin

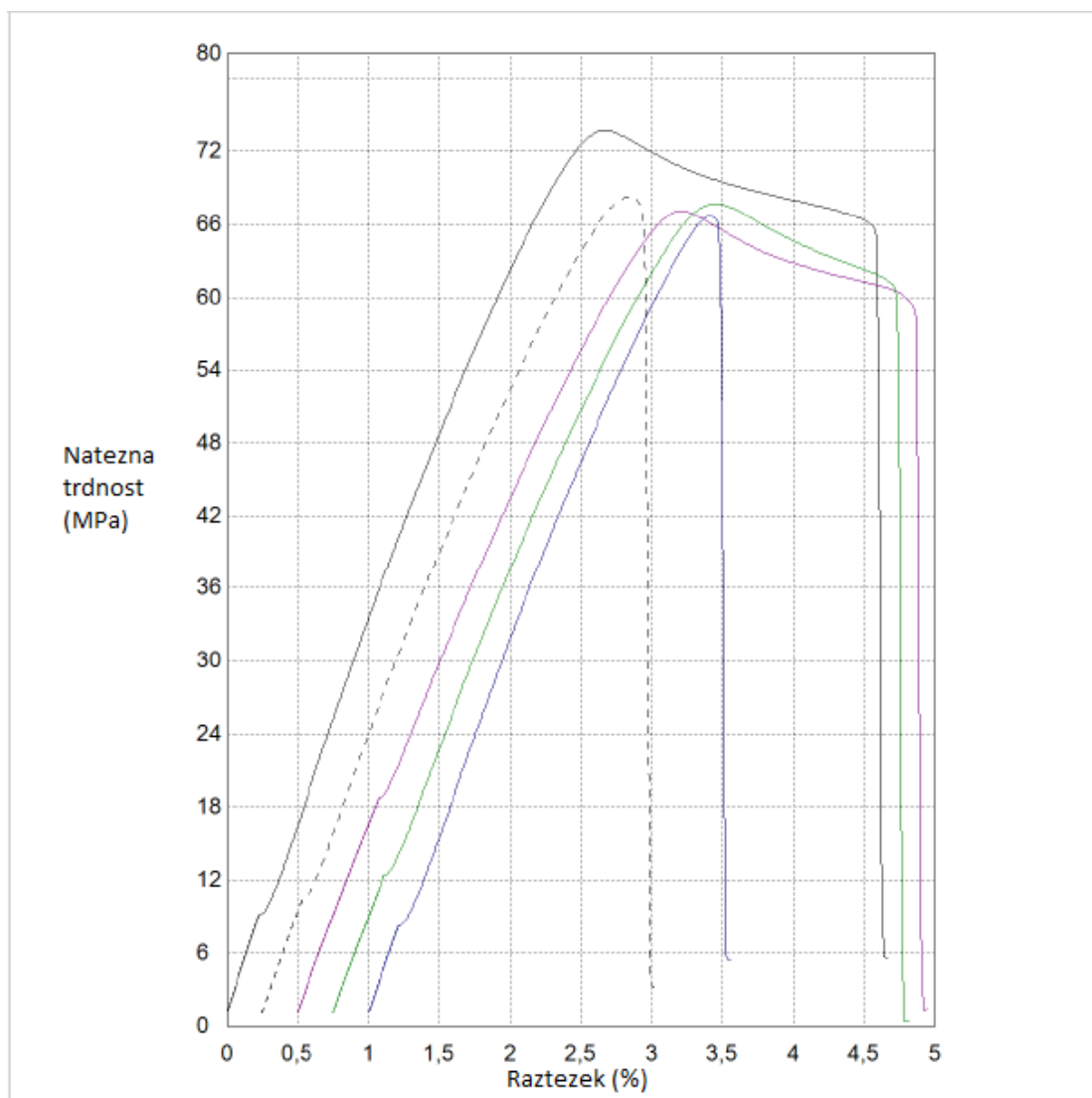
mW - Miliwatt

cm⁻¹ - centimeter na minus 1

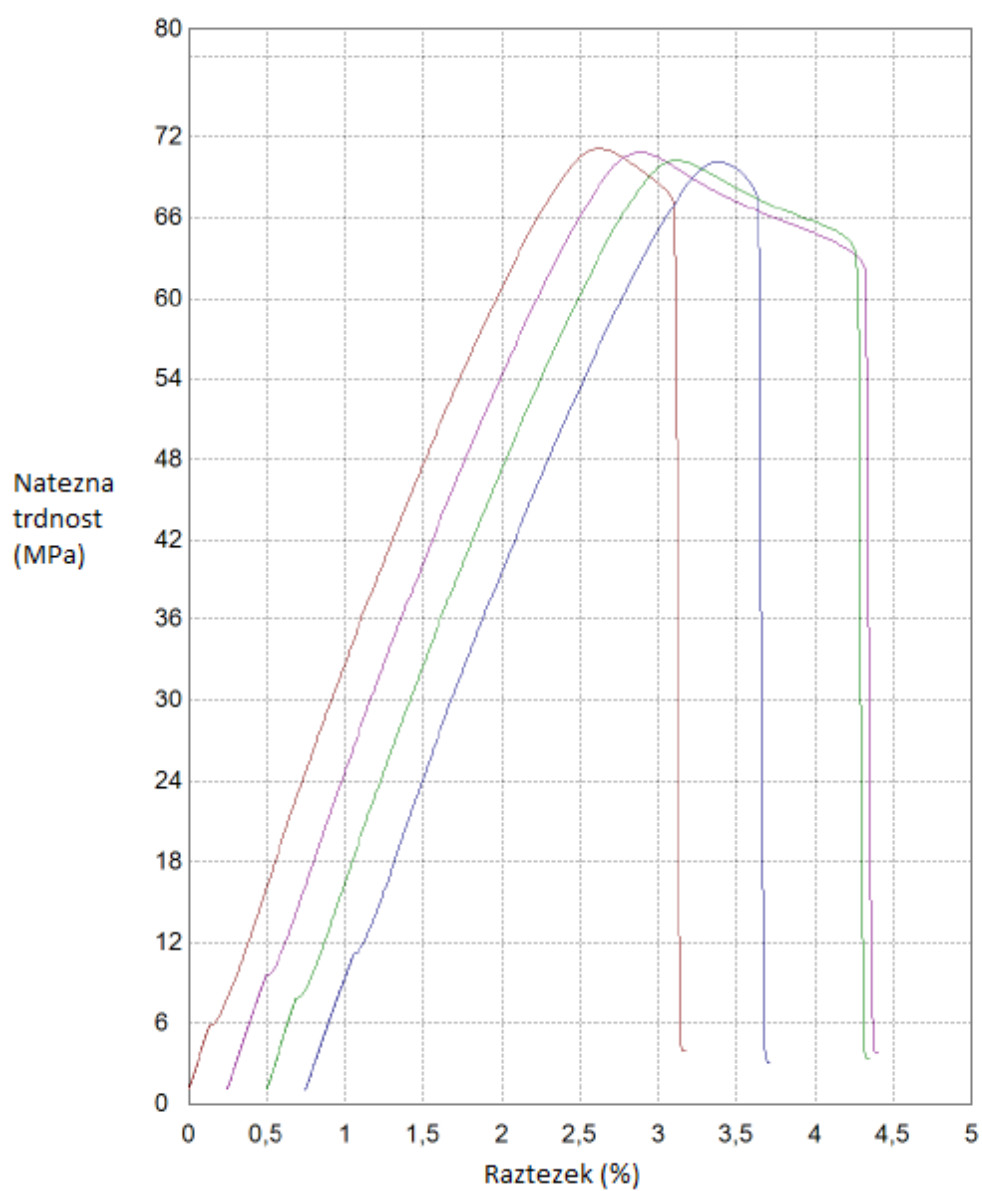
%T - Transmisivnost

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

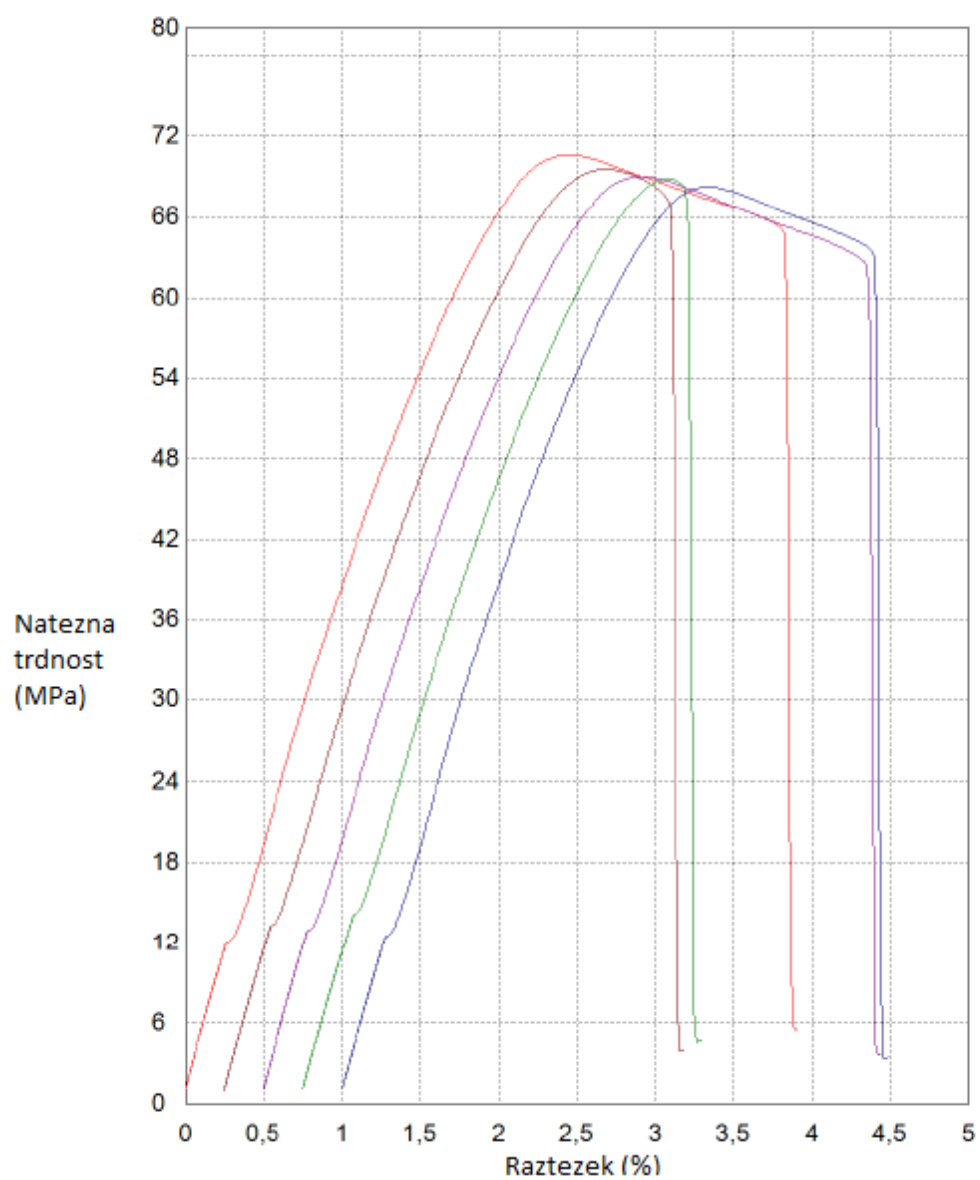
PA - Poliamid
PLA - Poli mlečna kislina
POM - Poli oksi metilen
AL - Aluminij
SMA - Stiren malein anhidrid
DMA - Dinamično-mehanska analiza
TGA - Termo-gravimetrična analiza
HOT DISC - Naprava za merjenje toplotne prevodnosti
FTIR - Infrardeča spektroskopija
HT-VLAKNA - visokotemperaturna vlakna
RTM - Resin transfer Moulding
MoS₂ - Molibdenove disulfid
PTFE - Poli tetra flouro etilen
UV - Ultravijolična
PET - Poli etilen tereftalat
ISO - International Standard Organisation

PRILOGE**Priloga 1: Rezultati nateznega preizkusa**

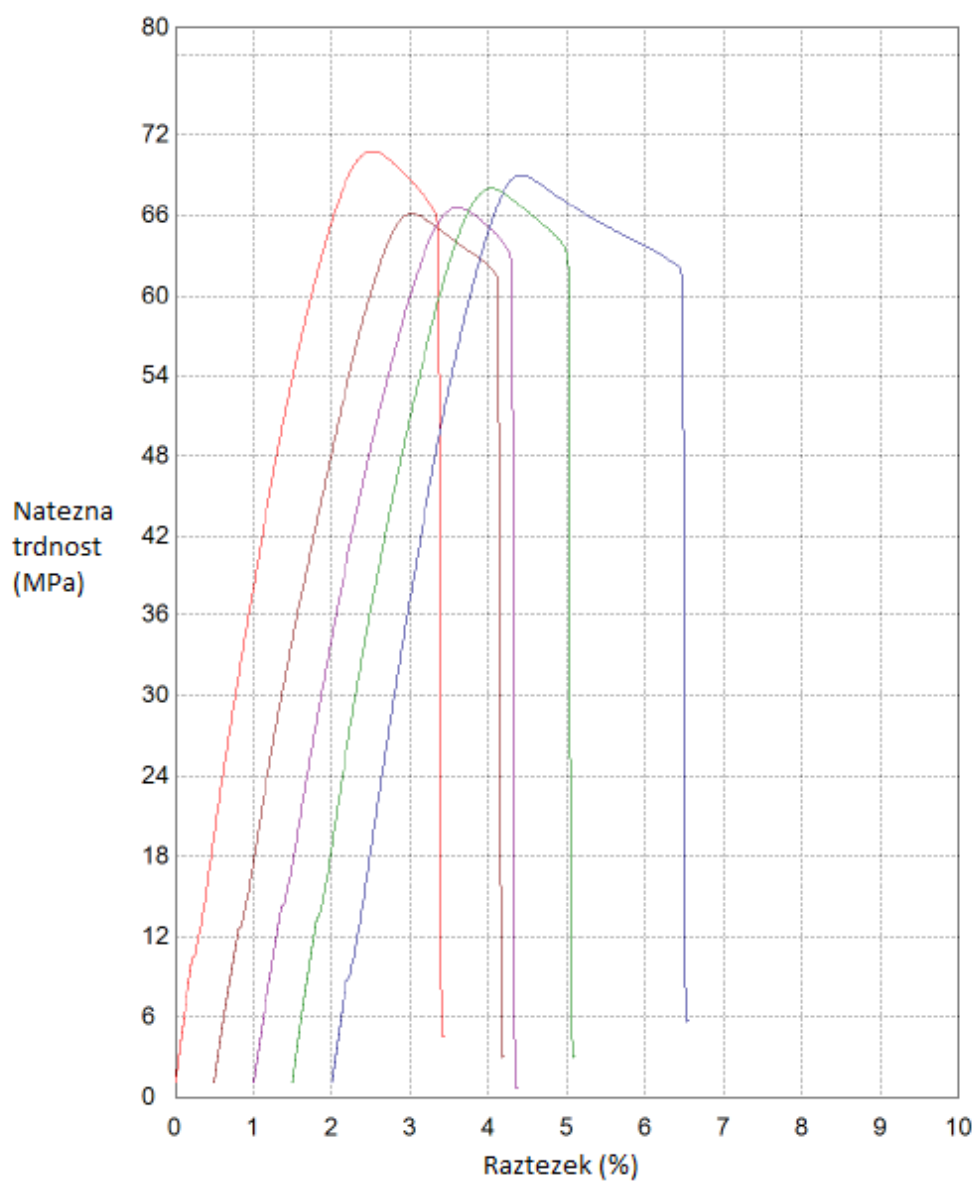
Slika 19: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 1



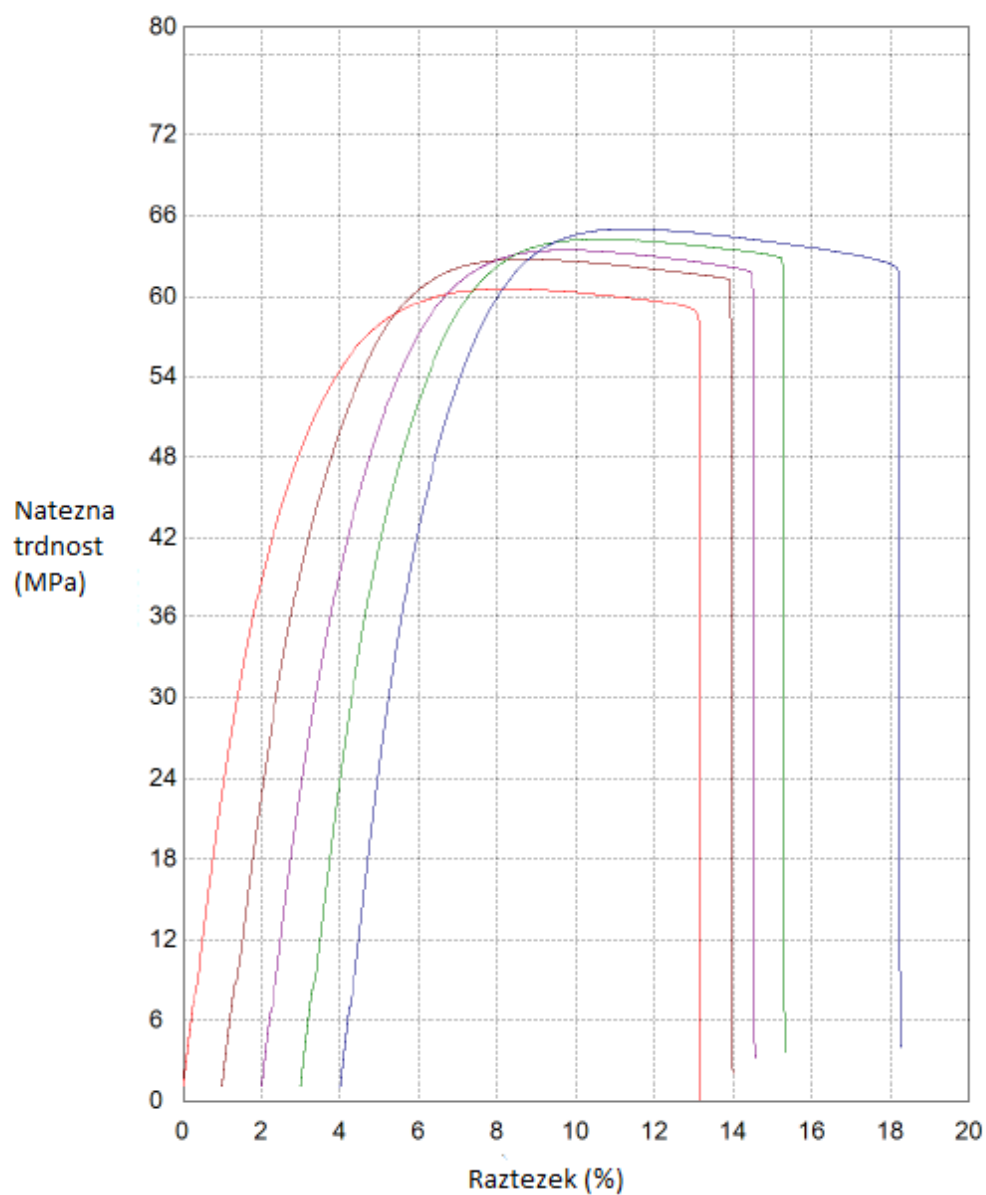
Slika 20: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 2



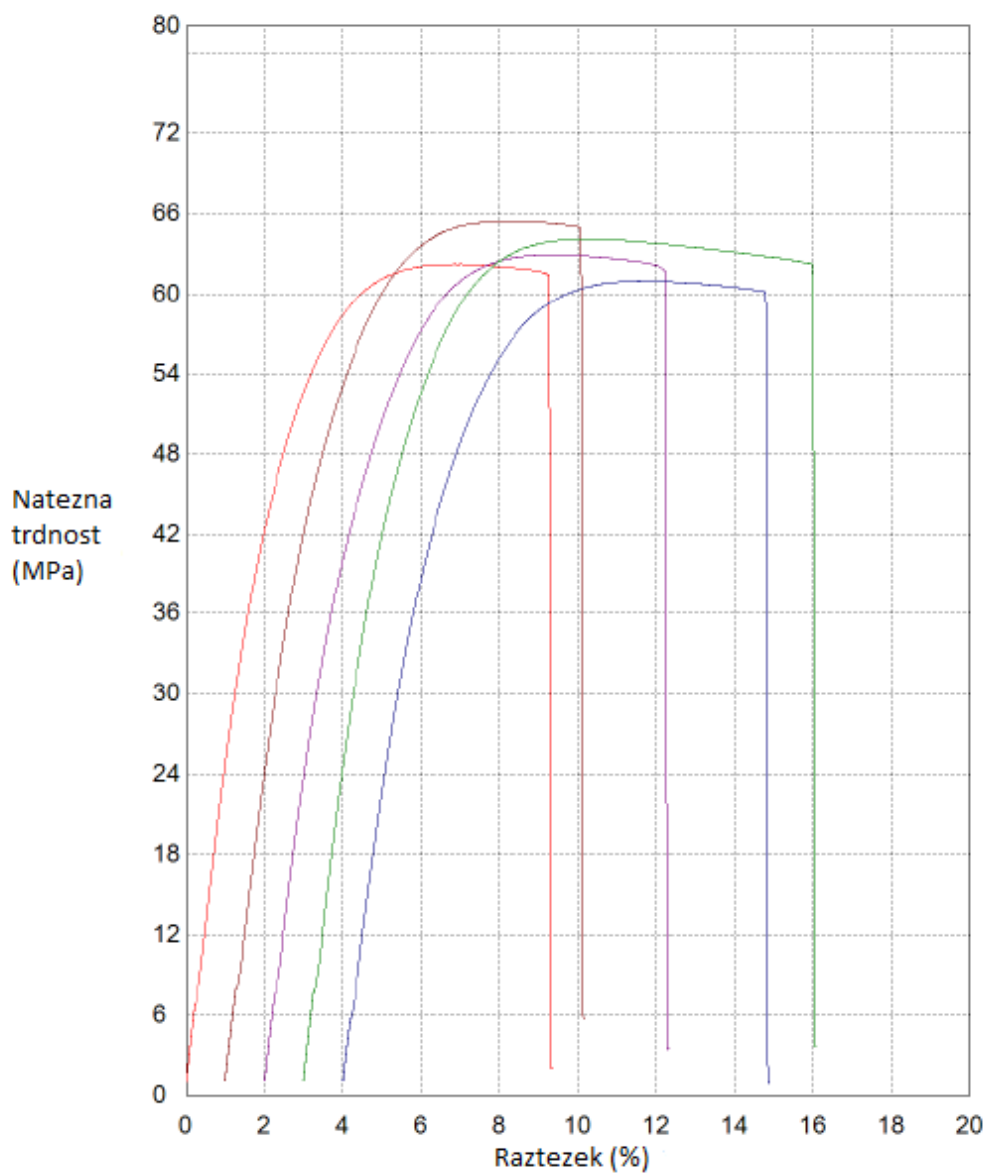
Slika 21: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 3



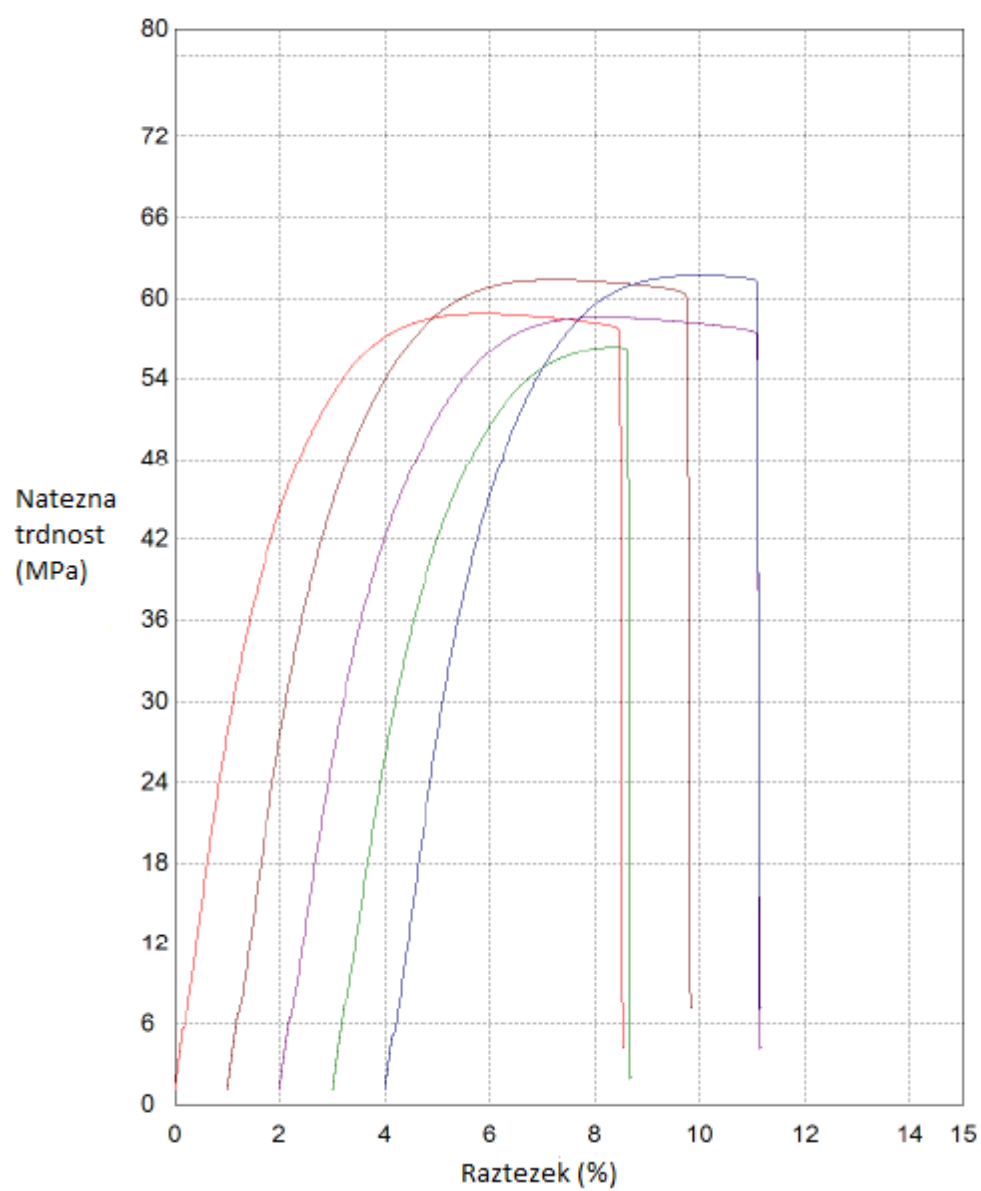
Slika 22: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 4



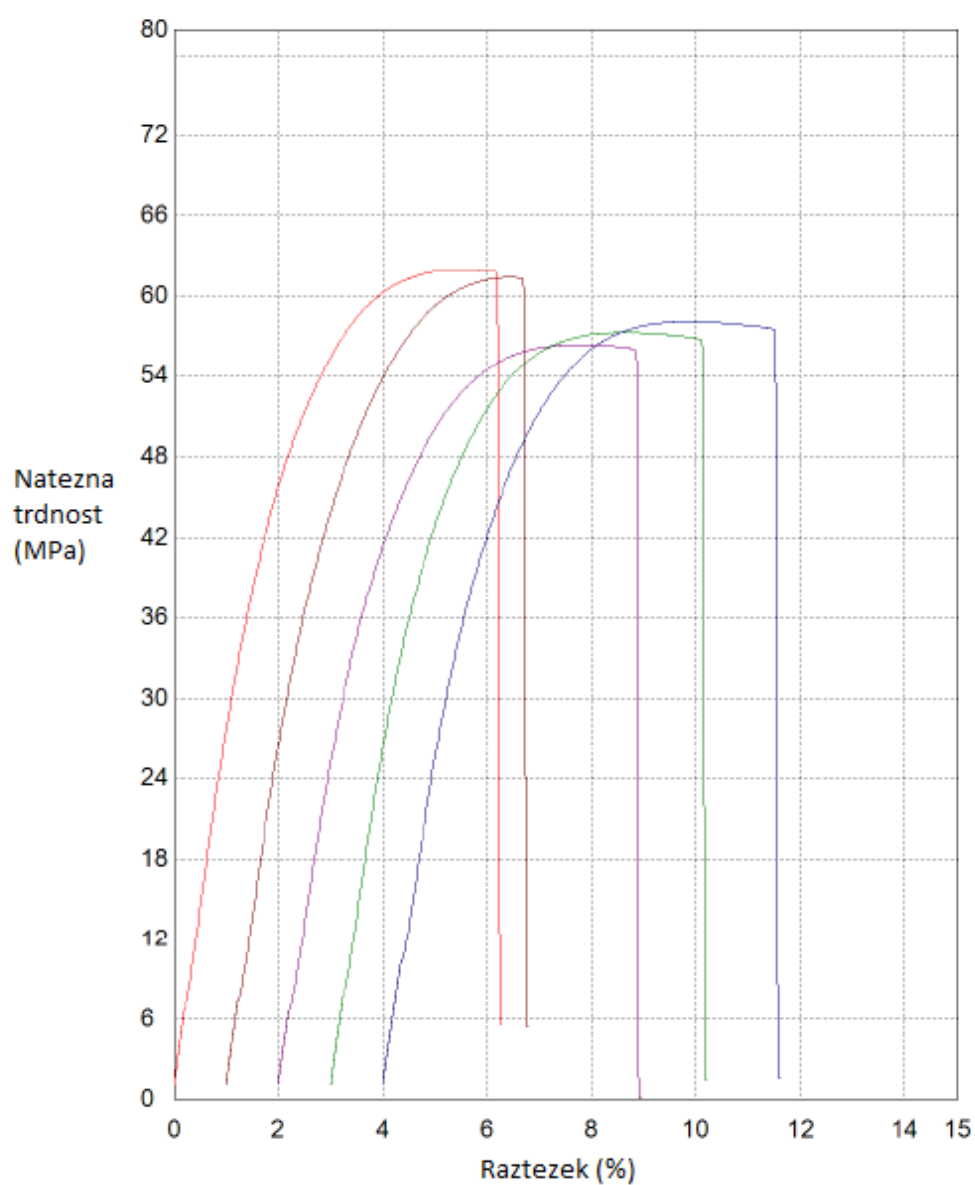
Slika 23: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 5



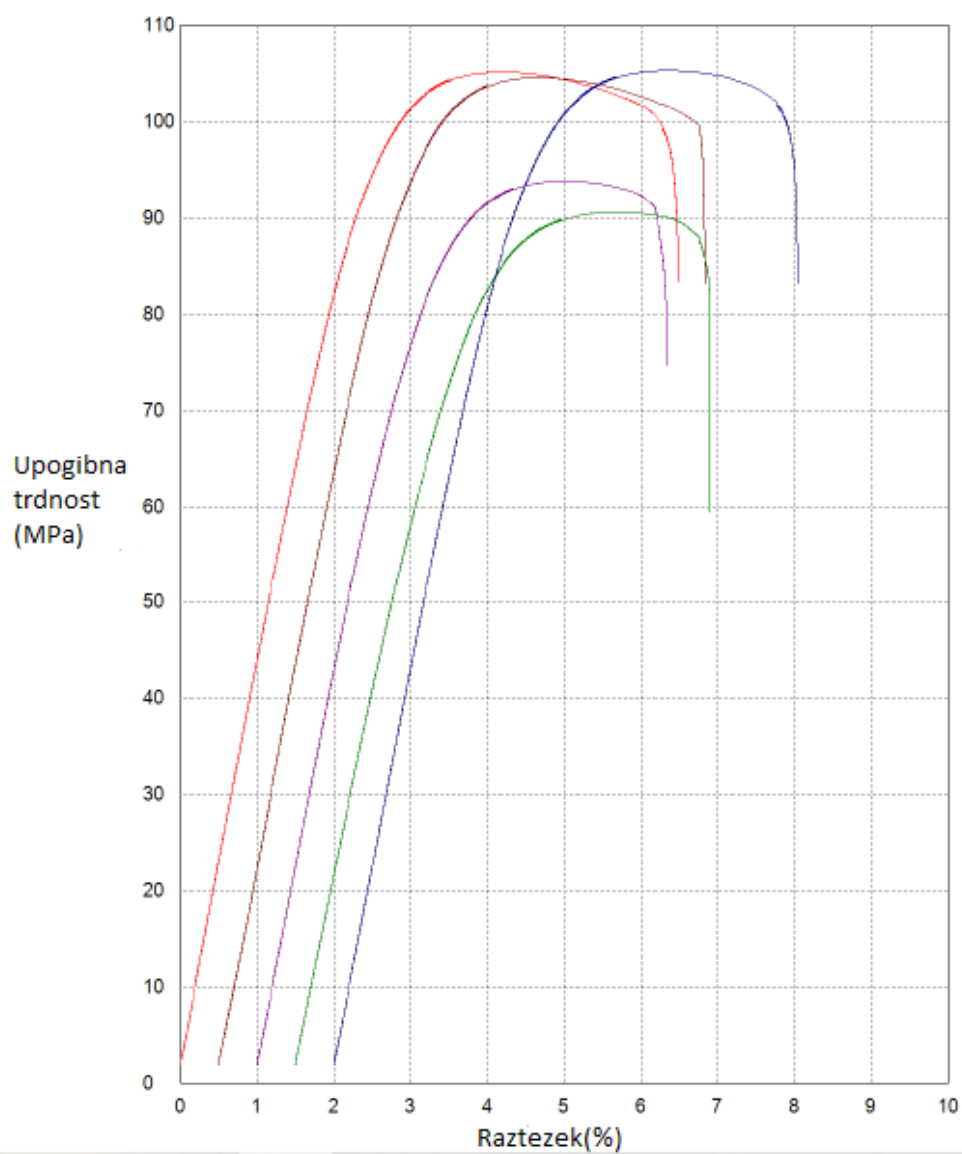
Slika 24: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 6



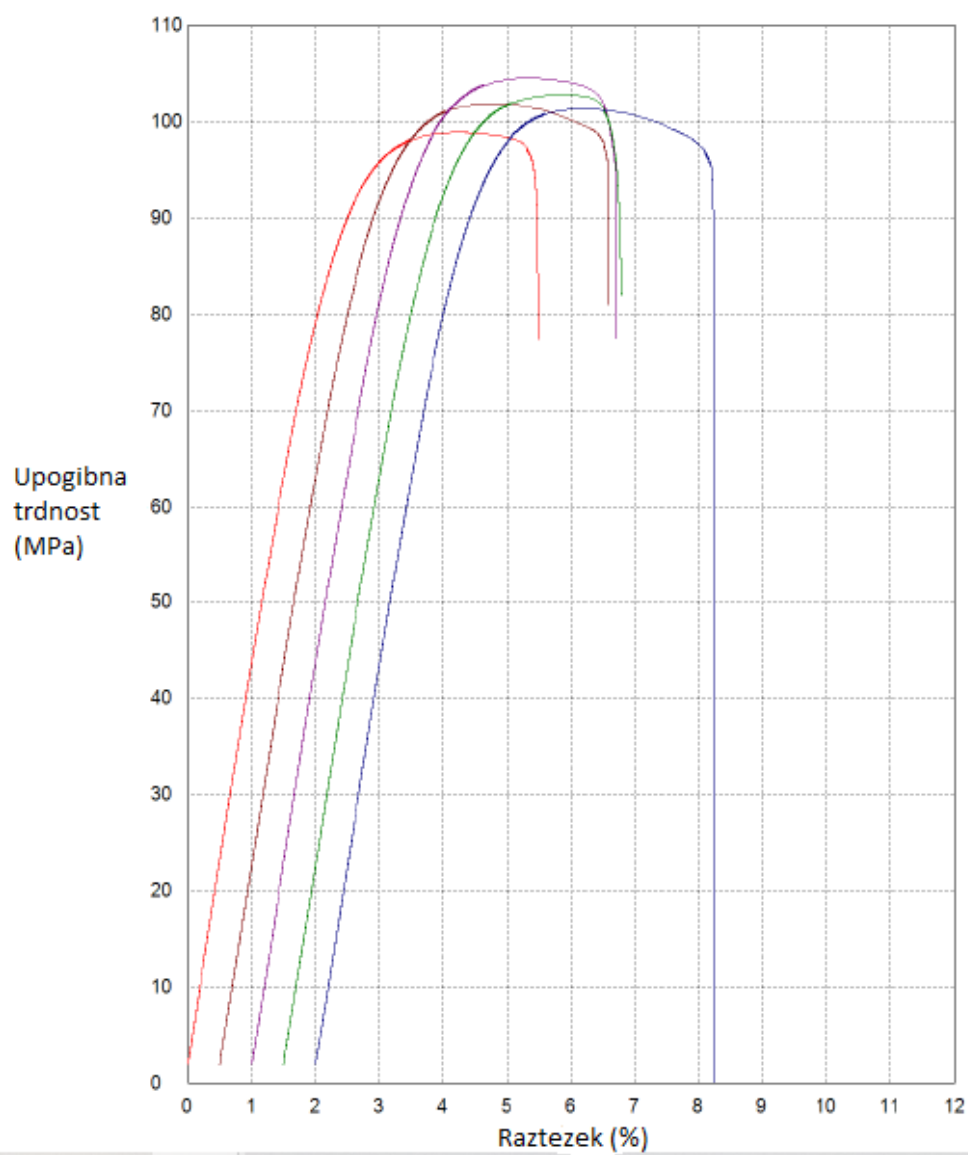
Slika 25: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 7



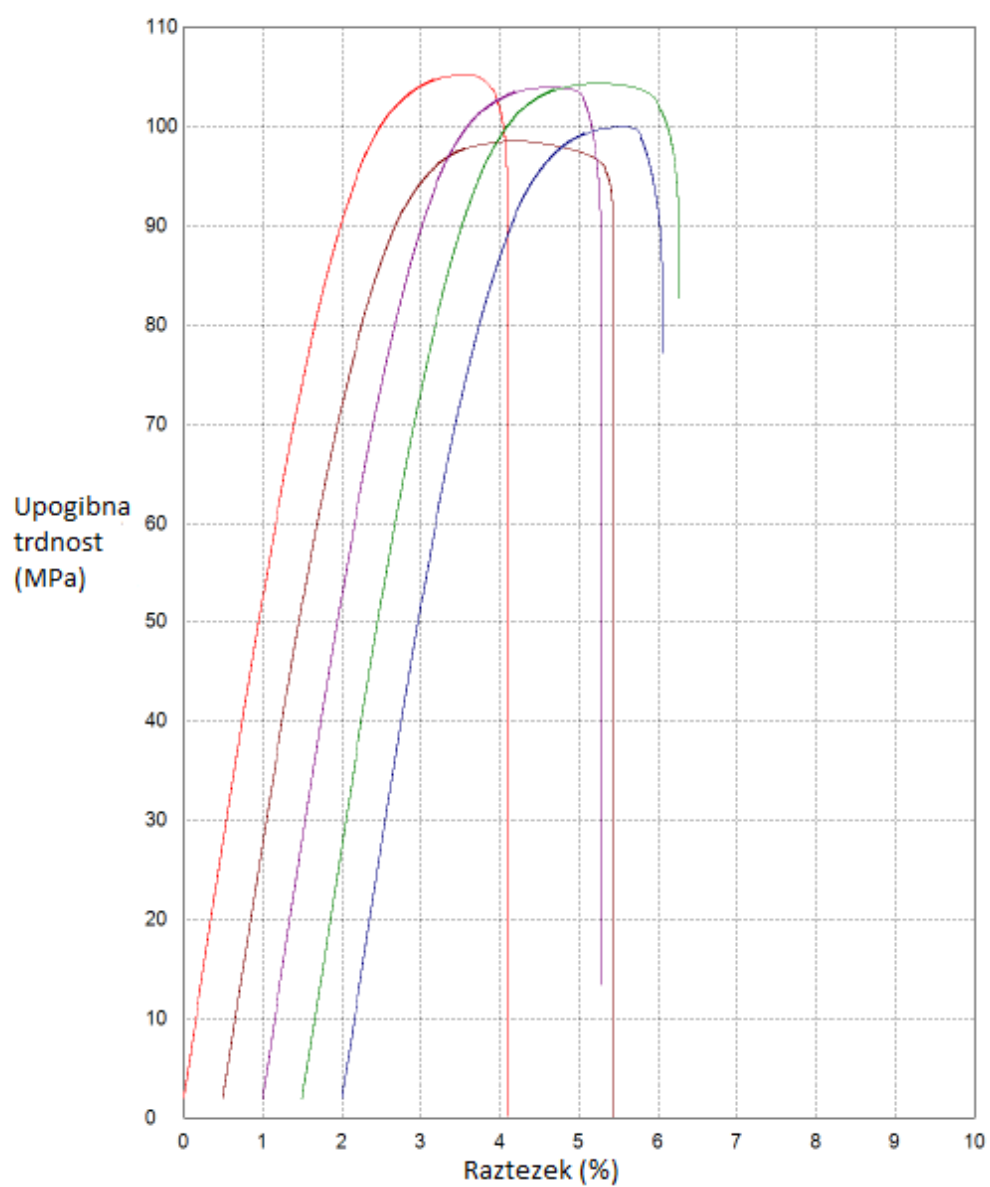
Slika 26: Slika grafa nateznega preizkusa vzorca 8

Priloga 2: Rezultati upogibnega preizkusa

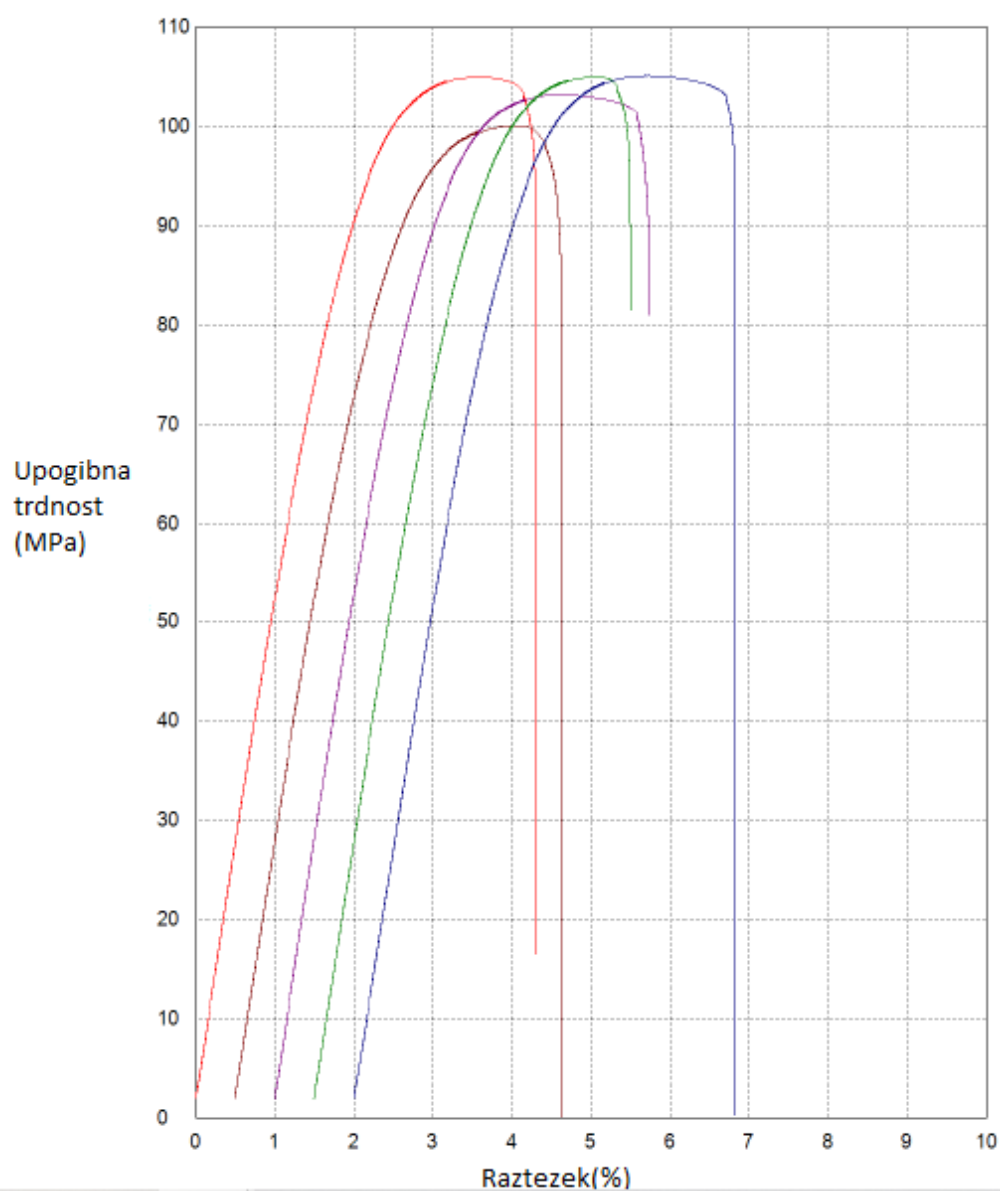
Slika 27: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 1



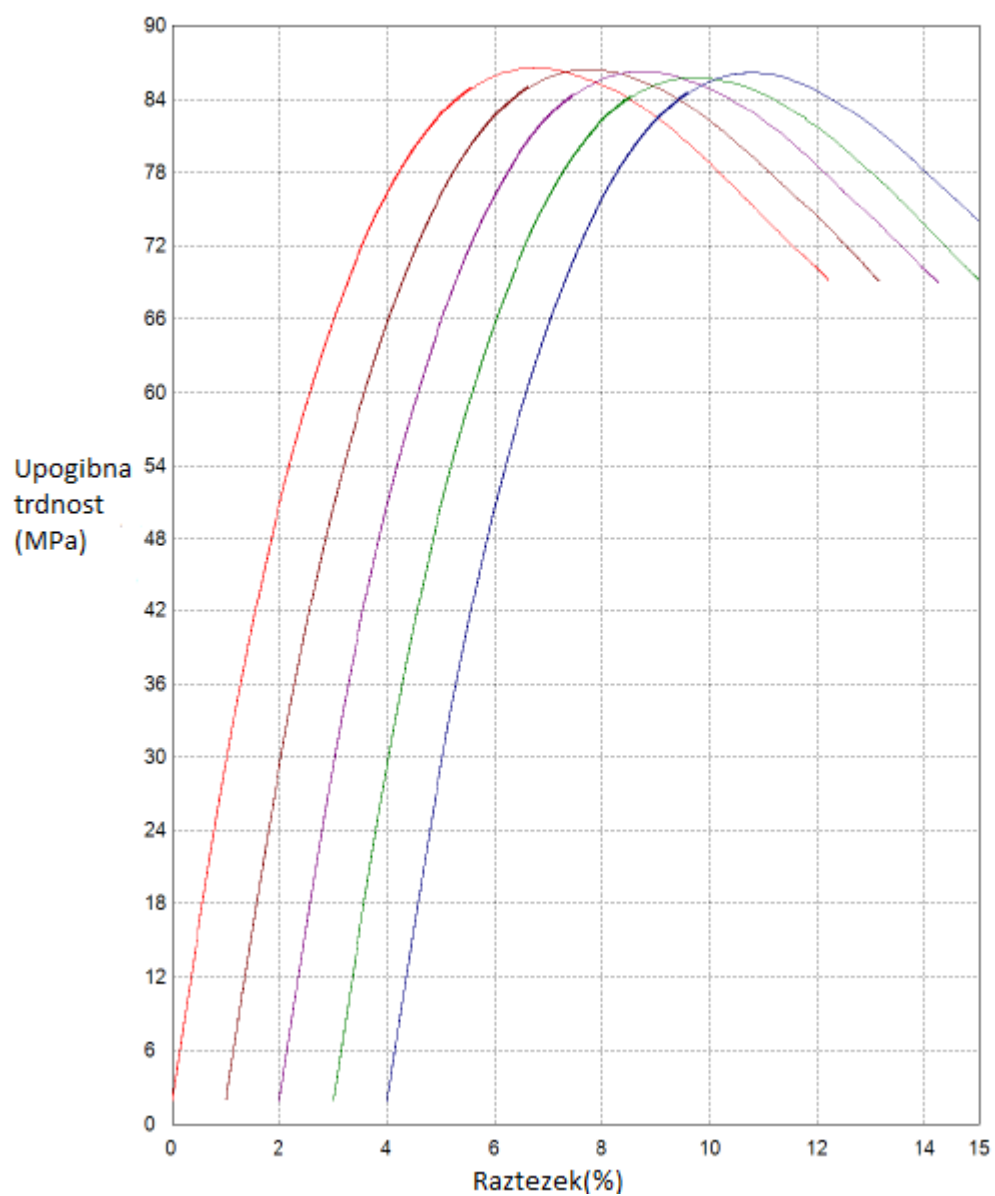
Slika 28: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 2



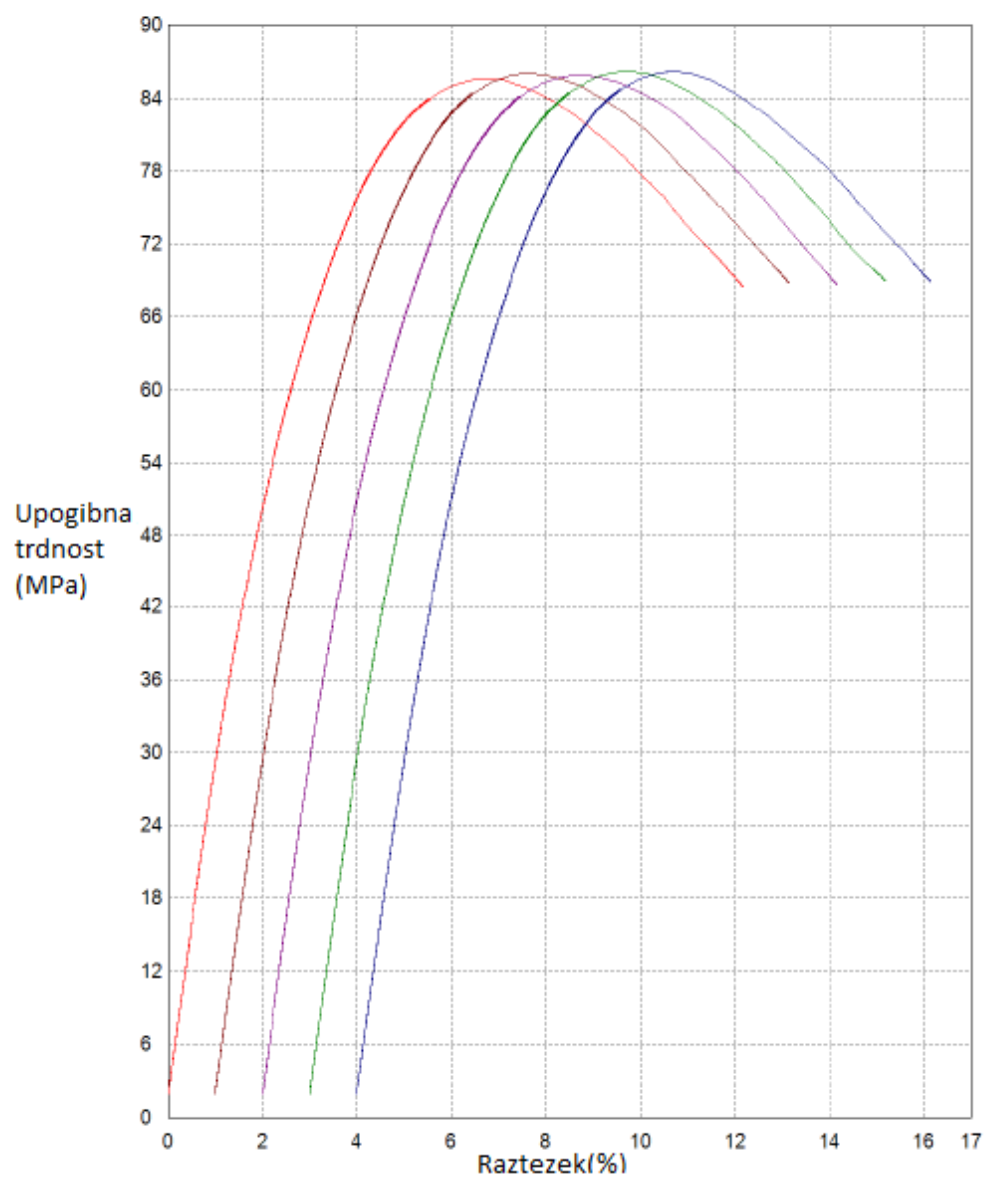
Slika 29: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 3



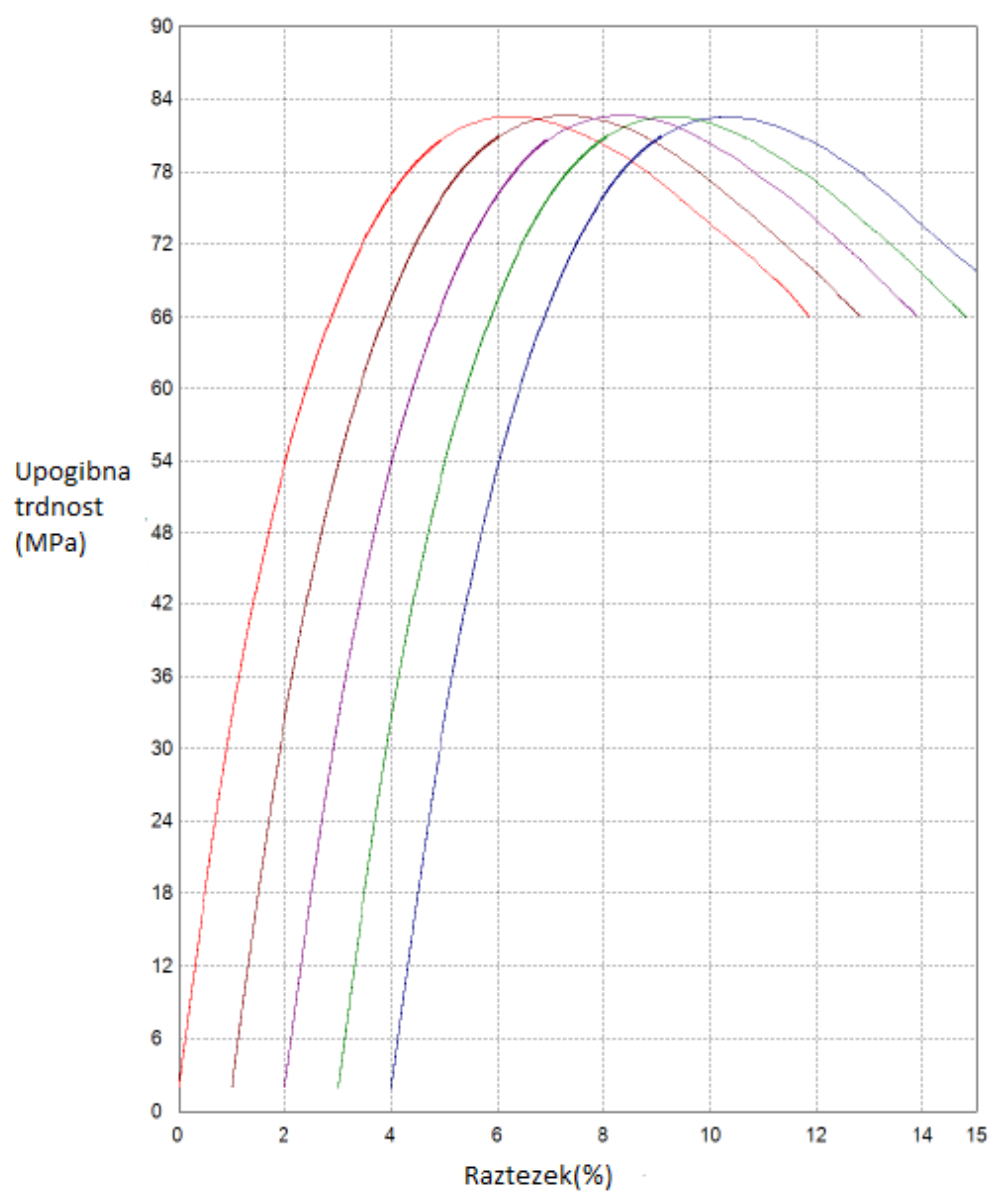
Slika 30: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 4



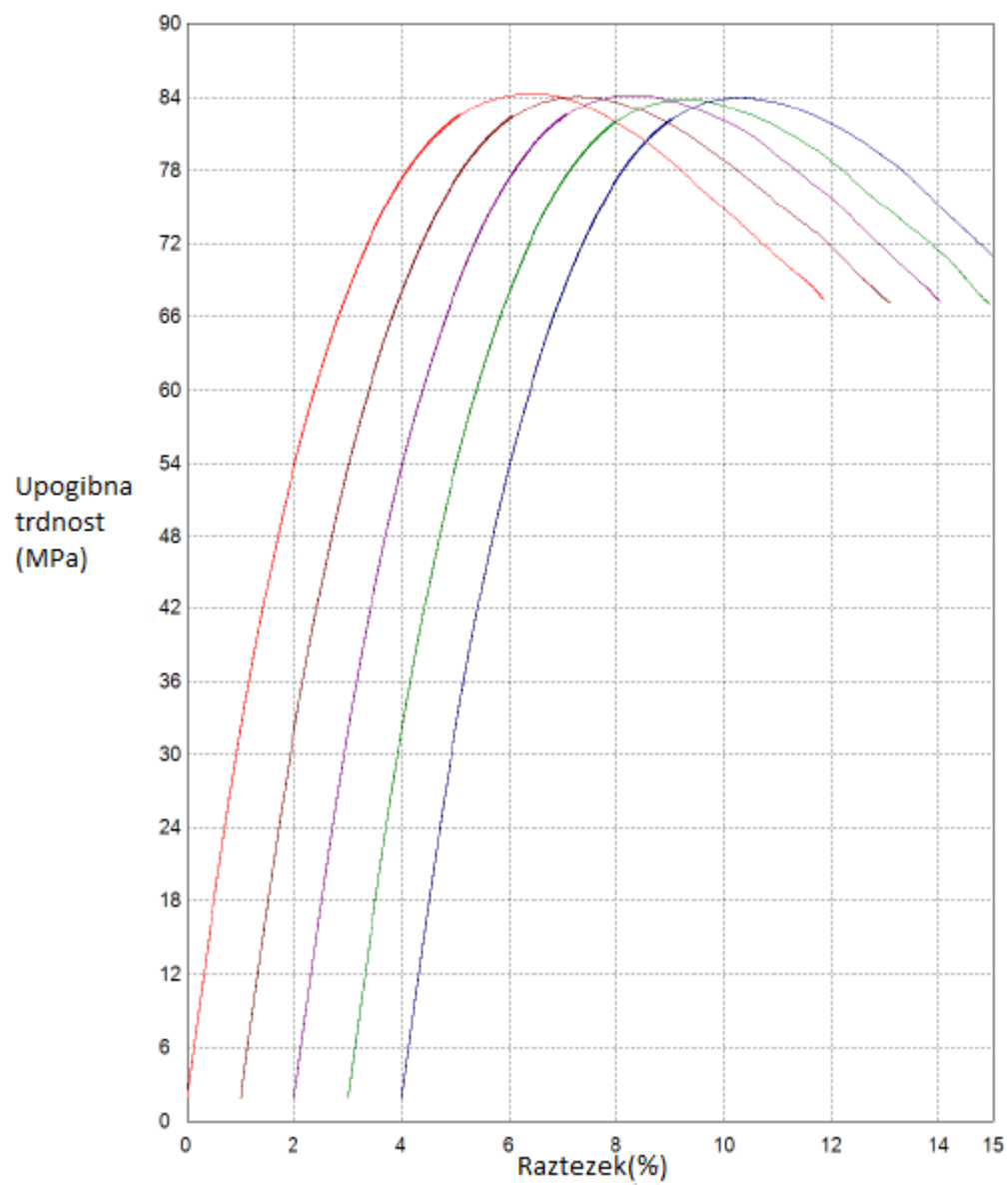
Slika 31: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 5



Slika 32: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 6



Slika 33: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 7



34Slika 35: Slika grafa upogibnega preizkusa vzorca 8