

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Gašper TIČ

**MEHANSKE IN TOPLOTNE LASTNOSTI
LESNO-POLIMERNIH KOMPOZITOV NA
OSNOVI ČISTEGA IN RECIKLIRANEGA ABS**

Magistrsko delo

Slovenj Gradec, december 2025

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**MEHANSKE IN TOPLOTNE LASTNOSTI
LESNO-POLIMERNIH KOMPOZITOV NA
OSNOVI ČISTEGA IN RECIKLIRANEGA ABS**

Magistrsko delo

Študent:	Gašper TIČ
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	doc. dr. Iztok ŠVAB
Somentor:	viš. pred. Silvester BOLKA

Slovenj Gradec, december 2025

IZJAVA

Podpisani Gašper Tič izjavljam, da:

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

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvalil bi se rad svoji ženi in hčeri, ki sta mi stali ob strani in me podpirali.

POVZETEK

Mehanske in toplotne lastnosti lesno-polimernih kompozitov na osnovi čistega in recikliranega ABS

Uporaba lesne moke kot polnila za kompozite se v današnjem času z vidika okoljske in ekonomske upravičenosti povečuje. Veliko povpraševanje je po tako imenovanih lesno-polimernih kompozitih (WPC), to so kompozitni materiali, ki uporabljajo lesno moko kot polnilo. Včasih se lesna moka doda zaradi izboljšanja mehanskih lastnosti, včasih pa zaradi znižanja stroškov. V magistrskem delu smo preučevali vpliv lesne moke na mehanske in toplotne lastnosti kompozitov. Za matrični material smo uporabili čisti akrilonitril-butadien-stiren (ABS) in recikliran ABS (rABS), potem pa smo dodajali lesno moko v različnih masnih deležih. Dodali smo 20 m.% ali 40 m.% ter lastnosti primerjali med sabo in tudi s samim ABS in rABS. Uporabili smo dve vrsti lesne moke, ki sta se primarno razlikovali v velikosti delcev. Mehanske lastnosti smo določili z upogibnim testom, nateznim testom in metodo po Charpyju. Z diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) in termogravimetrično analizo (TGA) smo preučevali toplotne lastnosti kompozitov. Z DSC smo tudi ugotavljali, da v kompozitih niso bili prisotni kakšni drugi polimeri v primeru uporabe recikliranega materiala. Iz rezultatov smo ugotovili, da se z večanjem deleža polnila izboljšata upogibni in natezni E-modul, prav tako se poveča maksimalna upogibna trdnost in natezna trdnost. Zmanjša pa se upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti, upogibni raztezek pri porušitvi, raztezek pri natezni trdnosti in raztezek pri pretrgu. To pomeni, da kompoziti z dodajanjem polnila postajajo bolj odporni na deformacijo, a postajajo bolj krhki. Ugotovili smo, da polnilo nima posebnega vpliva na toplotne lastnosti, saj se temperature razpada in steklastega prehoda le minimalno znižajo.

Ključne besede:

ABS, rABS, lesna moka, mehanske lastnosti, toplotne lastnosti.

SUMMARY

Mechanical and thermal properties of wood-polymer composites based on virgin and recycled ABS

The use of wood flour as a filler in composite materials has been increasing in recent years due to its environmental and economic justification. There is a growing demand for wood–polymer composites (WPCs), which are composite materials utilizing wood flour as a reinforcing or cost-reducing filler. In this master's thesis, the influence of wood flour on the mechanical and thermal properties of composites was investigated. Virgin acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) and recycled ABS (rABS) were used as matrix materials, to which wood flour was added in various mass fractions (20 wt.% and 40 wt.%). The resulting composites were compared both with each other and with the unfilled ABS and rABS matrices. Two types of wood flour differing primarily in particle size distribution were employed. The mechanical properties were determined using flexural and tensile tests, as well as the Charpy impact method. The thermal behavior of the composites was examined by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). The DSC analysis was also used to verify that no additional polymer phases were present in the composites containing recycled material. The results showed that with increasing filler content, both the flexural and tensile moduli (E-moduli), as well as the maximum flexural and tensile strengths, were improved. However, the flexural strain at maximum stress, the flexural strain at break, the tensile strain at maximum stress, and the tensile strain at break decreased. This indicates that the addition of wood flour increases the stiffness and resistance to deformation of the composites, while simultaneously making them more brittle. It was further determined that the filler did not significantly affect the thermal properties, as only minimal decreases in decomposition temperature and glass transition temperature (T_g) were observed.

Keywords:

ABS, rABS, wood flour, mechanical properties, thermal properties.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen in cilj magistrskega dela	1
1.2	Hipoteze ali trditve	2
1.3	Omejitve	3
1.4	Metode dela	3
2	TEORETIČNI DEL	4
2.1	Opis polimernih materialov	4
2.1.1	Zgodovina polimerov	5
2.1.2	Klasifikacija polimerov	7
2.1.3	Klasifikacija glede na izvor	7
2.1.4	Termoplasti in duromeri	7
2.1.5	Konstitucija, konfiguracija in konformacija	8
2.1.6	Polimerizacija	10
2.2	Akrilonitril butadien stiren (ABS)	16
2.2.1	Recikliran akrilonitril butadien stiren (rABS)	17
2.3	Polnila	17
2.3.1	Klasifikacija polnil	18
2.4	Lesna moka	19
2.4.1	Proizvodnja	19
2.4.2	Kemijska sestava lesa	20
2.4.3	Vlaga	20
2.4.4	Vzdržljivost lesa	20
2.4.5	Lastnosti lesa	21
2.5	Mehanske lastnosti lesno polimernih kompozitov	22
2.6	Toplotne lastnosti WPC	23
2.7	Tehnologije predelave WPC	23
3	EKSPERIMENTALNI DEL	24
3.1	Uporabljeni materiali	24
3.2	Priprava vzorcev	24
3.2.1	Kompavndiranje na dvopolžnem ekstruderju	26
3.2.2	Priprava preizkušancev na brizgalnem stroju	28
3.2.3	Upogibne lastnosti	29
3.2.4	Natezne lastnosti	29
3.2.5	Žilavost po Charpyju	31
3.2.6	Termogravimetrična analiza (TGA)	31
3.2.7	Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)	32
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	34
4.1	Mehanske lastnosti	34
4.1.1	Upogibni test	34
4.1.2	Natezni test	38

4.2	Žilavost po Charpyju	44
4.3	Termogravimetrična analiza (TGA)	47
4.4	Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)	52
5	SKLEP	56
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	58
	SEZNAM SLIK	60
	SEZNAM TABEL	61
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	62
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	63

1 UVOD

V današnjem času si življenja brez plastičnih izdelkov in njihovih kompozitov ne moremo več predstavljati. So del našega vsakdanjega življenja. Ker so plastični kompoziti vsestransko uporabni, se veliko raziskav osredotoča na razvoj in preučevanje kompozitov. Polimernim materialom se lahko dodajo različna polnila, ki izboljšajo njihove mehanske lastnosti in znižajo stroške končnega proizvoda.

Termoplastični polimerni kompoziti imajo veliko prednost pred drugimi materiali, da jih lahko po uporabi ponovno segrejemo in preoblikujemo. Zaradi te lastnosti je možnost recikliranja ali ponovne uporabe večja. V današnjem času se vedno več pozornosti posveča okolju in varovanju le tega. Če lahko polimerne materiale ponovno uporabimo ali recikliramo, je to zelo pomembna lastnost, ki jo moramo upoštevati pri načrtovanju izdelkov. Zaradi možnosti preoblikovanja materiala pri višji temperaturi imamo možnost termoplastične kompozitne materiale brizgati, ekstrudirati in termoformirati. Zaradi tega imamo veliko možnosti, ko pride do oblikovanja in izdelave proizvodov [1].

Akrilonitril-butadien-stiren (ABS) je vsestranski termoplast, ki je sestavljen iz treh različnih monomerov. Vsak monomer vpliva na končne lastnosti polimera. Akrilonitril prispeva k boljši kemični odpornosti in trdnosti, butadien povečuje odpornost proti udarcem, stiren pa zagotavlja trdoto in sijaj. Zaradi omenjenih lastnosti je ABS zelo priljubljen v različnih industrijah. Zelo pogosto se uporablja v avtomobilski industriji, na primer za armaturne plošče, veliko se uporablja tudi v elektro industriji za razna ohišja. Zelo enostavno ga lahko predelujemo, lahko ga brizgamo ali ekstrudiramo, kar poveča njegovo uporabnost. Lahko se tudi reciklira, kar ima v današnji družbi še posebej velik pomen [2].

Ker se v skoraj vsaki industriji uporabljajo polimerni izdelki, je posledično tudi ogromno polimernih odpadkov. Večina se jih sežiga ali odloži na odlagališče. Majhen delež se jih reciklira. Največkrat se očistijo in ponovno preoblikujejo v granulato za ponovno uporabo. To je zanimivo tudi za polimerne kompozite, saj jih tako lahko ponovno uporabimo. Recikliranemu polimernemu materialu lahko dodamo polnilo in tako naredimo kompozit. Pomembno je preučevati lastnosti takšnih recikliranih materialov, saj polimerni materiali v primerjavi s kovino ali steklom močneje degradirajo. Zaradi tega je potrebno preučiti reciklirane polimerne materiale, če izpolnjujejo specifične zahteve za nadaljnjo uporabo [3].

1.1 Namen in cilj magistrskega dela

Glavni cilj magistrskega dela je preučevanje vpliva polnila, v našem primeru lesne moke, na mehanske in toplotne lastnosti kompozitnega materiala. Kompozitni material je sestavljen iz čistega ali recikliranega ABS (rABS) in lesne moke. Preučevali smo tudi, ali ima izbira samega materiala vpliv na lastnosti kompozita in če ima, kakšna je ta razlika. Mehanske in toplotne lastnosti smo karakterizirali na naslednje načine. Z

dinamometrom bomo določili upogibne in natezne lastnosti polimernih kompozitov, s strojem za merjenje žilavosti bomo določili žilavost, z diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) in s termogravimetrično metodo (TGA) smo določili toplotne lastnosti kompozitov.

Preučevali smo naslednje polimerne kompozitne materiale:

- polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka (100/0 m.%),
- polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 1 (80/20 m.%),
- polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 1 (60/40 m.%),
- polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 2 (80/20 m.%),
- polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 2 (60/40 m.%),
- polimerni kompozit rABS/lesna moka (100/0 m.%),
- polimerni kompozit rABS/lesna moka 1 (80/20 m.%),
- polimerni kompozit rABS/lesna moka 1 (60/40 m.%),
- polimerni kompozit rABS/lesna moka 2 (80/20 m.%) in
- polimerni kompozit rABS/lesna moka 2 (60/40 m.%).

Sprotni cilji magistrskega dela so bili:

- priprava materiala po določeni recepturi;
- kompavndiranje na dvopolžnem ekstruderju;
- brizganje na stroju za brizganje;
- določitev mehanskih in toplotnih lastnosti.

1.2 Hipoteze ali trditve

Teza magistrskega dela je, da lahko s karakterizacijo mehanskih in toplotnih lastnosti kompozitnih materialov ugotovimo, kakšen je vpliv polnila na lastnosti polimernih kompozitnih materialov na osnovi čistega in recikliranega ABS.

Predpostavili smo:

- da bomo z višanjem masnega deleža polnila v kompozitnem materialu vplivali na mehanske lastnosti;
- da bodo mehanske lastnosti kompozitov z rABS slabše kot mehanske lastnosti pri čistem ABS;
- da bo predelava materiala z višjim odstotkom polnila težja kot predelava materiala z nižjim odstotkom;
- da bo raztros vrednosti pri mehanski analizi vzorcev z višjim deležem polnila večji kot raztros vrednosti pri vzorcih z nižjim deležem polnila.

V magistrskem delu smo uporabili izbrane komercialne polimerne materiale in polnila kot vhodne surovine.

Vzorci smo pripravili na laboratorijskem dvopolžnem ekstruderju.

1.3 Omejitve

Pri delu smo pričakovali predvsem težave z izdelavo vzorcev, ki so imeli višji odstotek polnila, saj ima polnilo vpliv na procesiranje kompozita.

1.4 Metode dela

Teoretični del magistrskega dela smo zasnovali na osnovi pregleda literature, eksperimentalni del je temeljil na pripravi in karakterizaciji vzorcev.

Vzorci so bili pripravljeni in karakterizirani na Fakulteti za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Vzorce smo kompavndirali na laboratorijskem dvopolžnem ekstruderju in jih nato brizgali na brizgalnem stroju. Dobljene vzorce smo karakterizirali. Z dinamometrom smo vzorcem določili upogibne in natezne lastnosti, s strojem za merjenje žilavosti smo določili žilavost vzorcev, z diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) in s termogravimetrično metodo (TGA) smo določili toplotne lastnosti vzorcev.

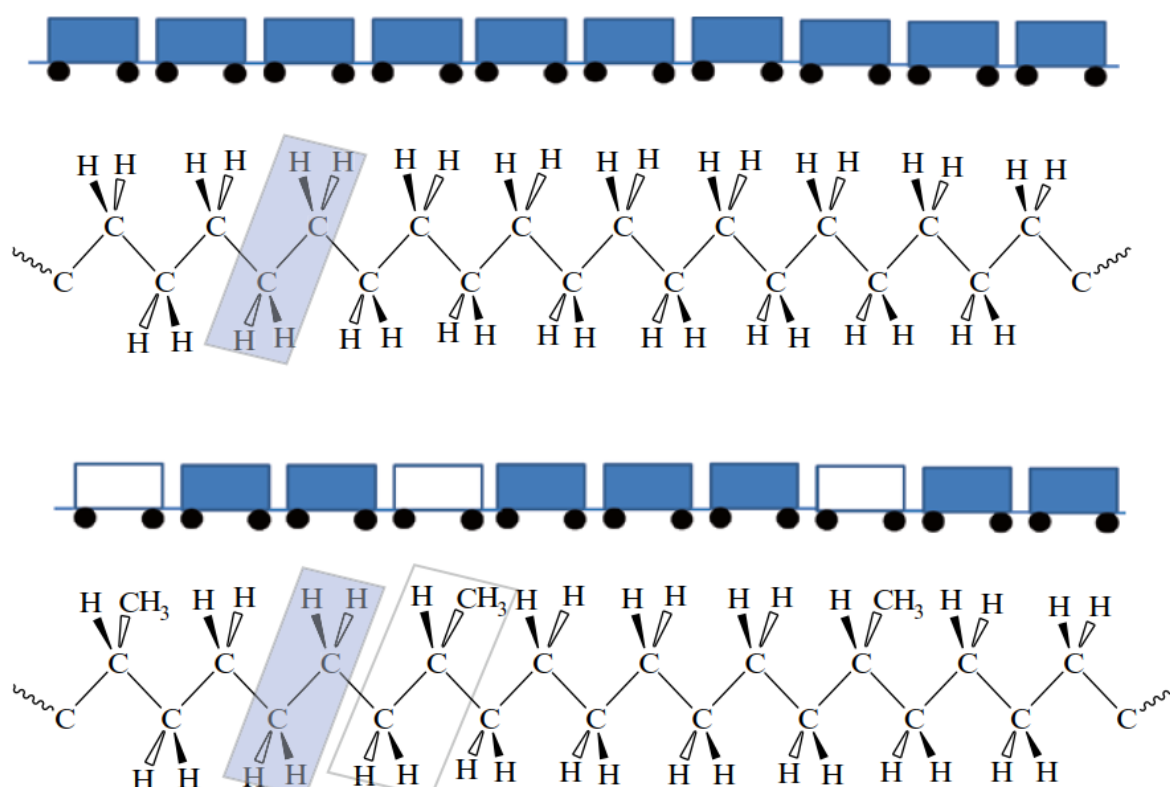
2 TEORETIČNI DEL

2.1 Opis polimernih materialov

Polimeri so kompleksne molekule z veliko molsko maso, katere sestavljajo manjše, ponavljajoče se enote imenovane monomeri. Monomeri so lahko enaki, torej je polimer sestavljen iz ene same vrste monomerov ali pa je sestavljen iz različnih monomerov [4].

Ime polimer izhaja iz grškega jezika in pomeni »veliko« »delov«, torej že iz samega imena vidimo, da polimeri predstavljajo neko celoto, ki jo sestavlja veliko delov, ki se ponavljajo. Kot smo omenili, so polimeri lahko sestavljeni iz ene ponavljajoče se enote ali iz več različnih ponavljajočih enot. Če je polimer sestavljen iz ene same vrste monomera, se imenuje homopolimer, če je sestavljen iz dveh ali več različnih monomernih enot, se imenuje kopolimer [5].

Na sliki 1 je prikazana sestava dveh različnih polimerov.



Slika 1: Primer dveh polimerov in kako sta sestavljena

Zgornji polimer je sestavljen iz ene ponavljajoče se enote in je zaradi tega homopolimer, spodnji polimer pa je sestavljen iz dveh različnih monomernih enot in je zaradi tega kopolimer [5]

Posebnost polimerov v primerjavi z drugimi molekulami je tudi pri prehodu med agregatnimi stanji. Pri drugih vrstah molekul po navadi pride do prehoda med

agregatnimi stanji pri določeni temperaturi. Torej sprva so molekule v trdnem stanju, nato jih segrevamo in pri neki temperaturi preidejo v tekoče stanje, če jih še bolj segrevamo, pa preidejo v plinasto agregatno stanje. Enako se zgodi, če jih ohlajamo. Temperature prehodov med agregatnimi stanji so znane in točno vemo, kdaj se agregatno stanje spremeni. Pri polimerih je to drugače, saj ne moremo govoriti o prehodu med agregatnimi stanji, temveč govorimo o taljenju. To pomeni, ko polimer segrevamo, se počasi iz trdnega stanja spremeni v manj viskozno obliko in jih lahko preoblikujemo, točna temperatura prehoda načeloma ni znana, saj ta sprememba poteka v večjem temperaturnem razponu. Pomembno je tudi, da ob prevelikem segrevanju polimera pride do nastanka plina, vendar ne v smislu prehoda agregatnega stanja, ampak zaradi degradacije polimera začnejo molekule razpadati, stranski produkt tega pa so plini [5].

Ena bolj očitna razlika je tudi primerjava raztapljanja v vodi. Če dodamo sol v vodo in premešamo, se bo sol raztopila, viskoznost raztopine pa bo ostala skoraj nespremenjena. Sol lahko dodajamo tako dolgo, dokler ne dosežemo točke nasičenja. To pomeni, da se v dani količini vode pri enakih pogojih ne more raztopiti več soli. To vidimo tako, da se nam sol začne kopičiti na dnu posode, ne glede na to, koliko časa poteče. Pri polimerih se raztapljanje odvija drugače. Če pogledamo primer polivinil alkohola, raztapljanje poteka tako, da se polimerne molekule najprej napojijo z vodo, zaradi prisotnosti vode se polimerne verige začnejo oddaljevati ena od druge tako dolgo, dokler ne dosežejo točke, kjer so intermolekularne vezi tako šibke, da se polimer raztopi. Če dodajamo polimer tako, kot smo sol, ne dosežemo točke nasičenja, polimeri se še naprej raztapljajo, opazimo pa veliko razliko v viskoznosti raztopine. Polimer lahko dodajamo tako dolgo, dokler ne dobimo testu podobne mase in se zaradi visoke viskoznosti ne raztaplja več. Torej vidimo, da se polimeri obnašajo popolnoma drugače kot na primer soli pri raztapljanju [5].

2.1.1 Zgodovina polimerov

Pojav prvih polimerov sega zelo daleč v zgodovino, kot primer lahko uporabimo celulozo, ki je prisotna v rastlinah. V tem smislu so celulozo uporabljali od samega začetka nastanka človeške vrste v obliki oblačil, ki so jih izdelali iz rastlinskih vlaken in lesa, ki so ga kurili za toploto. Kolagen je prisoten v živalskih kožah, ki so jih uporabljali za različne namene. Res je, da takrat niso vedeli, kaj so polimeri, ali da so sploh prisotni v teh stvareh. Kar se tiče uporabe samih polimerov, bi bilo bolj primerno, če pogledamo žoge, ki so jih za rekreacijo uporabljala ljudstva Srednje in Južne Amerike. Žoge so bile narejene iz gume, ki so jo pridobili iz dreves [5].

Tako kot pri drugih stvareh so se skozi zgodovino zgodila naključja, ki so človeštvo usmerila na pot raziskovanja polimerov. Teh se je v zgodovini zgodilo več, na primer Christian Schonbein je po naključju v svojem laboratoriju polil mešanico dušikove in žveplove kisline in je to na hitro pobrisal z ženinim predpasnikom. Predpasnik je nato

umil in ga dal sušiti pred kamin, ampak je predpasnik zagorel. Odkril je nitrocelulozo [5].

Najbolj znan primer naključij pri polimerih je zagotovo primer Charlesa Goodyearja, ki je po pomoti odstavil mešanico kavčuka in žvepla na vročo peč. Kavčuk se ni stalil, ampak so se njegove lastnosti izboljšale, po naključju je odkril vulkanizacijo in odprl pot za izdelavo pnevmatik. [5]

Ideja, da bi lahko obstajale molekule, ki imajo molsko maso v velikosti par deset tisoč do milijon g/mol je bila takrat nesprejemljiva. Mnenje je bilo, da takšne molekule enostavno ne morejo obstajati in da je raziskovanje le teh zguba časa in nesmisel. Takšni pogledi se skozi zgodovino ponavljajo na različnih področjih, od matematike do fizike itd. Podoben primer je Herman Staudinger, ki je začel preučevati polimerizacijo v zgodnjih letih 20. stoletja. Dobil je dobronameren nasvet, da je bolje, da pusti raziskavo makromolekul pri miru, saj takšne molekule ne morejo obstajati [5].

Včasih je bil biljard zelo priljubljen šport. Pri biljardu se uporabljajo krogle, ki jih je potrebno spraviti v luknje, včasih so bile te krogle narejene iz slonovine. Slonovina je imela zelo zaželeno lastnost za izdelavo biljard krogel, in sicer je bila brez nepravilnosti v rasti in je bila v vse smeri enaka. To pomeni, da so bile krogle iz slonovine brezhibne in primerne za biljard. Kot si lahko mislimo, se je zaradi zahteve po veliki vsoti žog povečal lov na slone, ki so jih lovili zgolj zaradi slonovine. Da bi se to preprečilo, so se iskali materiali, ki bi lahko nadomestili slonovino, to je uspelo John Wesley Hyattu, ki je izumil celuloid kot nadomestilo za slonovino [5].

Leo Baekeland je izumil smolo, ki jo je sintetiziral iz fenola in formaldehida, ki se je lahko oblikovala v trde in trpežne izdelke. Bil je prvi znanstvenik, ki je ugotovil, da se lahko lastnosti materiala sklepajo iz njegovih reagentov, saj se lastnosti posameznih reagentov odražajo na sintetiziranem materialu [5].

Za očeta znanosti o sintetičnih polimernih materialih velja Wallace Hume Carthers. Carthers je bil predavatelj organske kemije na Harvardu, nakar so ga iz DuPonta povabili, da bi delal za njih, saj so na novo naredili oddelek za raziskavo polimernih materialov. Carthers je odkril postopek, kako izdelati poliamide in postavil osnove poteka polimerizacije [5].

V ospredje so polimeri prišli predvsem med drugo svetovno vojno, ko je zaradi pomanjkanja materialov bilo potrebno izumiti nove materiale, ki bi jih lahko nadomestili. Tako se je intenzivno povečala raziskava polimernih materialov, ki so imeli enake lastnosti ali pa celo boljše kot materiali, ki so se uporabljali pred tem. Od takrat naprej se je nadaljevala raziskava polimerov in se do danes ni ustavila [5].

2.1.2 Klasifikacija polimerov

Izraz polimer se uporablja za veliko število različnih materialov, ki imajo veliko molsko maso. Ti materiali se med sabo zelo razlikujejo po fizikalnih lastnostih, kemijski sestavi, toplotnih lastnostih itd. Zaradi tega se uporabljajo različne kategorizacije polimernih materialov za lažje razumevanje. Iz teh kategorizacij lahko sklepamo na neke skupne lastnosti polimerov v posamezni skupini [5].

2.1.3 Klasifikacija glede na izvor

Polimere lahko klasificiramo glede na sam izvor. Poznamo naravne, umetne in sintetične polimere [5].

Naravni polimeri se pojavljajo v naravi. To so polimeri živalskega in rastlinskega izvora, nekaj primerov takšnih polimerov: celuloza, lignin, volna, svila, kolagen itd. [5].

Umetni polimeri so polimeri, ki jih najdemo v naravi in jih spremenimo. To pomeni, da polimerizacija poteče v naravi in naredi polimer, katerega nato dodatno funkcionaliziramo ali modificiramo. Lastnosti umetnih polimerov so vedno drugačne kot lastnosti naravnih polimerov, ki so služili kot osnova za kreiranje umetnega polimera. Primer tega je guma, ki jo pridobimo iz kavčuka [5].

Sintetični polimeri so pridobljeni iz preprostih izhodiščnih sestavin, kot sta na primer premog, zemeljski plin ali naftni derivati, ponavadi v obliki ogljikovodikov. Sintezo sintetičnih polimerov v celoti naredimo ljudje. Torej iz vhodnih surovin pridobimo monomerne enote, ki jih nato polimeriziramo, da dobimo željen polimer. Pri sintetičnih polimerih imamo največjo svobodo pri dizajniranju končnih lastnosti polimera, saj izhajamo iz monomernih enot, ki jih nadzorujemo in jih lahko polimeriziramo v takšnem zaporedju, da dobimo polimer, ki ustreza našim zahtevam [5].

2.1.4 Termoplasti in duromeri

Zelo pogosto se uporablja klasifikacija polimernih materialov na termoplaste in duromere. Ta klasifikacija predstavlja obnašanje polimernih materialov pri segrevanju. Termoplastični polimeri se pri segrevanju zmečajo in jih je mogoče preoblikovati v željeno obliko. Ko jih oblikujemo in pustimo, da se ohladijo, ohranijo obliko. Če jih ponovno segrejemo, jih lahko ponovno preoblikujemo kolikorkrat to želimo oziroma dokler ni degradacija materiala prevelika. Prednost takšnih materialov je preprosta predelava kot tudi možnost za ponovno uporabo, kar je iz okoljskega vidika zelo pomembna prednost. Slabost je predvsem v tem, da če se material segreje, izgubi svojo obliko, to je lahko v določenih primerih slabost. Vendar se kljub temu v veliki večini uporabljajo termoplastični proizvodi, predvsem plastični proizvodi, ki se proizvedejo z brizganjem [5].

V nasprotju s termoplasti se duromeri obnašajo drugače. Duromeri so zamreženi materiali, to pomeni, da se znotraj materiala molekule med sabo kemijsko povežejo in tvorijo celoto, ki je ne moremo raztopiti ali razdreti. To pomeni, da če duromer ponovno segrevamo, se ne stali, ampak ostane trden. Ker pride do tako močne vezave polimernih vezi med sabo, so zelo dobro odporni na zunanje vplive, dobro so odporni na kemikalije in jih ni mogoče raztopiti. Slabosti duromerov so predvsem v tem, da jih ne moremo reciklirati, torej predstavljajo večjo možnost onesnaženja okolja kot termoplasti, prav tako jih težko oblikujemo. Ko izdelujemo izdelke iz duromerov, imamo določen čas, da se izdelek naredi, preden se začne zamreževanje, tako je lahko v določenih primerih zelo težko narediti takšne izdelke [5].

2.1.5 Konstitucija, konfiguracija in konformacija

Polimeri so zelo zanimivi in kompleksni materiali zelo visokih molskih mas. Poznamo veliko vrst polimerov, ki pa imajo med sabo zelo različne lastnosti. Vemo, da so lastnosti polimerov odvisne od njihove kemijske sestave in 3D strukture [5].

Konstitucija nam pove, kakšna je kemijska zgradba polimera, to pomeni, da vemo, iz kakšne monomerne enote je polimer sestavljen. Največje razlike med polimeri so ravno v monomerih, ki jih sestavljajo. Kot smo omenili, če je polimer sestavljen iz ene same vrste monomerov, se imenuje homopolimer, če je sestavljen iz več različnih monomernih enot, se imenuje kopolimer. Kopolimere lahko še naprej ločimo, odvisno od tega, kako se posamezne monomerne enote vgrajujejo v verigo. Na sliki 2 lahko vidimo primer različnih vrst kopolimerov, odvisno od načina vezave monomernih enot [5].

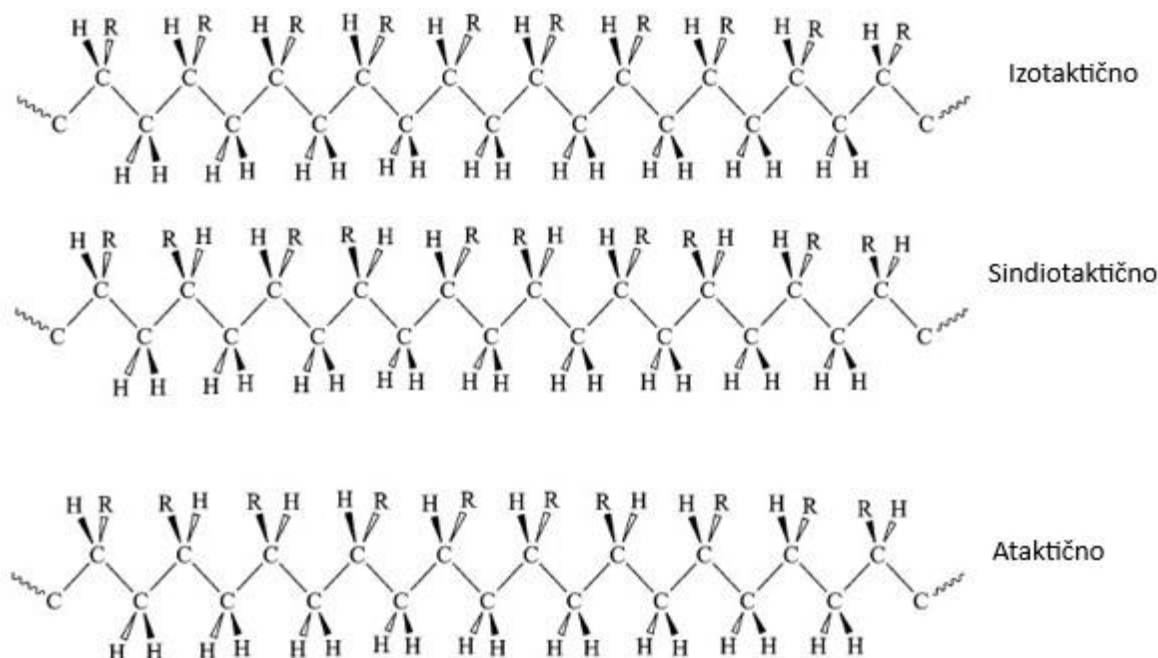


Slika 2: Različne vrste kopolimerov [5]

A in B predstavljata različni monomerni enoti.

Konfiguracija nam pove, kako so urejeni atomi znotraj molekul. Konfiguracija se med polimerizacijo ne spremeni, razen če pride do prekinitve kemijskih vezi. Glede na to, kako so atomi razporejeni v monomeru, poznamo tri vrste konfiguracij. Poznamo

izotaktično, sindiotaktično in ataktično konfiguracijo. Na sliki 3 vidimo različne konfiguracije polimernih materialov [5].

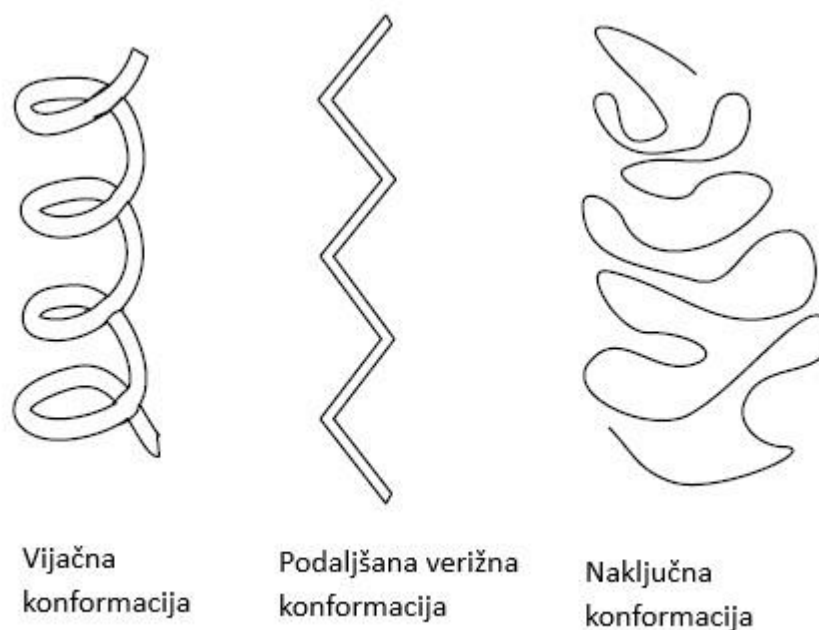


Slika 3: Vrste konfiguracij polimerov [5]

Iz slike 3 je razvidno, kako se polimeri delijo glede na konfiguracijo. Če pogledamo, vidimo, da so izotaktični polimeri tisti, pri katerih so substituenti označeni s črko R na eni strani. O sindiotaktičnih polimerih govorimo, kadar se substituent R alternirajoče spreminja. V primeru, da se substituent R v verigi spreminja naključno, govorimo o ataktičnosti. Čeprav na prvi pogled izgleda, da sama konfiguracija ne igra velike vloge pri lastnostih polimerov, to ne drži. Zelo dober primer je polipropilen. Poznamo ataktični polipropilen, ki je lepljiv in ima zelo slabe mehanske lastnosti, je tako rekoč neuporaben. Izotaktični polipropilen pa ima dobre mehanske lastnosti in se uporablja v zelo širokem spektru izdelkov. Iz tega primera je lepo razvidno, da ima konfiguracija velik vpliv na končne lastnosti materiala [5].

Konformacija

Konformacija je 3D oblika polimerne verige oziroma nam pove, kakšna je prostorska porazdelitev polimerne verige. Na sliki 4 vidimo različne vrste konformacij [5].



Slika 4: Vrste polimernih konformacij [5]

2.1.6 Polimerizacija

Polimerizacija je postopek, pri katerem iz monomerov nastane polimer. Pri polimerizaciji na grobo ločimo verižno in stopenjsko polimerizacijo. Stopenjska polimerizacija je primerna za monomere, ki vsebujejo funkcionalne skupine, ki lahko med sabo reagirajo. To je največkrat kondenzacijska polimerizacija, poznamo pa tudi adicijsko polimerizacijo. Pri kondenzacijski polimerizaciji se monomeri med sabo spojijo, nastane pa stranski produkt, ki se iz molekule izloči, to je največkrat voda, lahko pa so tudi druge snovi. Pri takšni vrsti polimerizacije v polimerni verigi niso prisotni vsi atomi monomerov, saj se kot prej omenjeno izločijo iz verige v obliki stranskih produktov. Tipičen primer takšne polimerizacije je polietilen tereftalat (PET) [5].

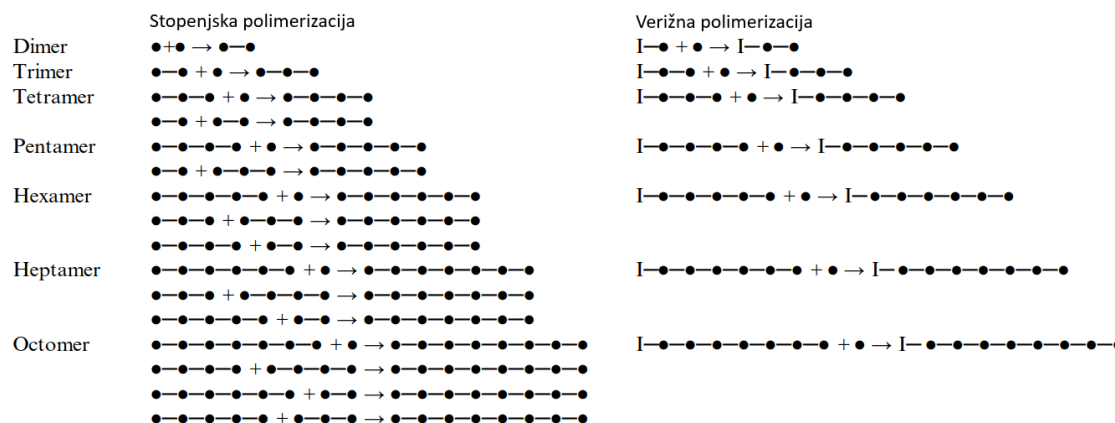
Na sliki 5 vidimo primer polimerizacije PET in nastanek stranskega produkta v obliki vode.



Slika 5: Kondenzacijska polimerizacija PET [5]

Kar se tiče same rasti verige, poznamo dva mehanizma, to sta stopenjska polimerizacija in verižna polimerizacija. Pri stopenjski polimerizaciji se lahko različno dolge verige spojijo med sabo, pri verižni polimerizaciji pa veriga raste vedno v eno

smer z dodajanjem monomernih enot. Na sliki 6 je prikazana razlika med mehanizmoma rasti verige [5].



Slika 6: Potek verižne in stopenjske polimerizacije [5]

V nadaljevanju si bomo ogledali nekaj vrst polimerizacij glede na vrsto mehanizma propagacije.

Polikondenzacija

Polikondenzacija je vrsta stopenjske polimerizacije, ki je zelo pomembna za pridobivanje polimernih materialov. Izpostaviti jo je smiselno, ker je imela velik zgodovinski vpliv na razvoj polimerne znanosti. Predvideva se, da je bil prvi polimer, ki je nastal na svetu, ustvarjen prav s procesom polikondenzacije. Tudi prvi sintetično pripravljen polimer je bil narejen s tem postopkom. Še pomembneje pa je, zlasti z industrijskega vidika, da so bili prvi komercialno uspešni polimeri prav tako pridobljeni s polikondenzacijo. Definicijo polikondenzacije sta opredelila W. H. Carothers in P. J. Flory [6].

Flory je polimerizacije s postopnim naraščanjem molske mase razdelil na polikondenzacijo in poliadicijo, pri čemer ju je opredelil na osnovi kinetičnih zakonitosti. Kot smo omenili, je glavna razlika med poliadicijo in polikondenzacijo izločanje manjših produktov – to se pojavi pri polikondenzaciji, pri poliadiciji pa ne. Navadna polikondenzacija ne-cikličnih monomerov ima skoraj ničelno entropijsko spremembo, kar pomeni, da za potek reakcije zadostuje že majhna sprostitve toplote. Povsem drugače je pri poliadiciji, kjer je entropijska sprememba izrazito negativna, zato mora reakcija potekati močno eksotermno, kar bistveno omejuje možnosti polimerizacije na ta način [6].

Flory je poudaril, da mora definicija polikondenzacije temeljiti na kinetiki in ne na strukturi nastalih polimerov. Opozoril je, da lahko enak polimer, kot ga dobimo s polikondenzacijo, nastane tudi na drugačen način, zato sama struktura produkta ni ustrezno merilo [6].

Po njegovi definiciji so ključne značilnosti stopenjske polimerizacije naslednje:

- Vsi reaktanti (monomeri, oligomeri in polimeri) lahko reagirajo med seboj v katerem koli trenutku, pri čemer se njihova reaktivnost bistveno ne spreminja z velikostjo molekule. Zaradi tega molske mase linearnih verig sledijo tako imenovani Schultz-Floryjevi porazdelitvi.
- Ciklizacija vedno tekmuje z rastjo verige, ne glede na koncentracijo monomera in stopnjo reakcije.
- Koncentracija vseh linearnih vrst se z napredovanjem reakcije stalno zmanjšuje, pojava, ki jo Flory imenuje zakon samorazredčevanja [6].

Ko reakcijo spremlja tudi eliminacija, tak proces opredelimo kot polikondenzacijo [6].

Flory je uvedel tudi terminologijo za različne vrste polikondenzacij [6]:

- Linearna polikondenzacija tvori izključno linearne polimere.
- Dvodimenzionalne polikondenzacije vključujejo reakcije med dvofunkcionalnimi monomeri, z ali brez nastanka cikličnih produktov.
- Trodimenzionalne polikondenzacije vključujejo večfunkcionalne monomere in vodijo do prostorsko zamreženih struktur [6]

S polikondenzacijo pridobimo naslednje polimere: Poliamide, poliaramide, poliimide, polikarbonate, aromatske polietre in poli(alkilenski tereftalat) [6].

Verižna polimerizacija

Pri verižni polimerizaciji se reakcija začne, ko nastane aktivno mesto – to se lahko zgodi z razpadom dvojne vezi v enojno ali z odpiranjem obroča pri cikličnih monomerih. Tako nastane aktivno mesto, iz katerega lahko začne potekati rast verige. Aktivno mesto reagira z monomerom, ki se veže na verigo, pri čemer se aktivno mesto prenese na novo pritrjeni monomer. Monomeri se torej pri verižni polimerizaciji dodajajo posamično, hitro in zaporedno, dokler reakcija ne preneha [7].

Verižna polimerizacija poteka v treh glavnih fazah:

- Inicijacija - je prvi korak. V tem koraku nastane aktivno središče, to je lahko radikal, ion ali katalitska vez na monomeru.
- Propagacija - je zaporedno dodajanje monomernih enot, in prenos aktivnega središča na novo dodani monomer, tako veriga raste.
- Terminacija – konec rasti verige, aktivno središče se izniči in ni možnosti nadaljnje rasti verige [7].

Podrobnosti mehanizma so odvisne od vrste aktivnega središča. Kljub razlikam so vsem verižnim mehanizmom skupne tri značilnosti:

- Dolžina verige ni odvisna od časa reakcije – daljši čas pomeni več polimernih verig, ne pa daljših.

- Aktivni centri določajo stopnjo reakcije, kar pomeni, da polimerna zmes vsebuje monomere, nereagirane iniciatorje in polimerne verige, vendar ne vmesnih produktov.
- Kemijska sestava monomernih enot ostaja nespremenjena – to je ena ključnih lastnosti, s katero lahko določimo, ali je bil polimer proizveden z verižno polimerizacijo [7].

Radikalna polimerizacija

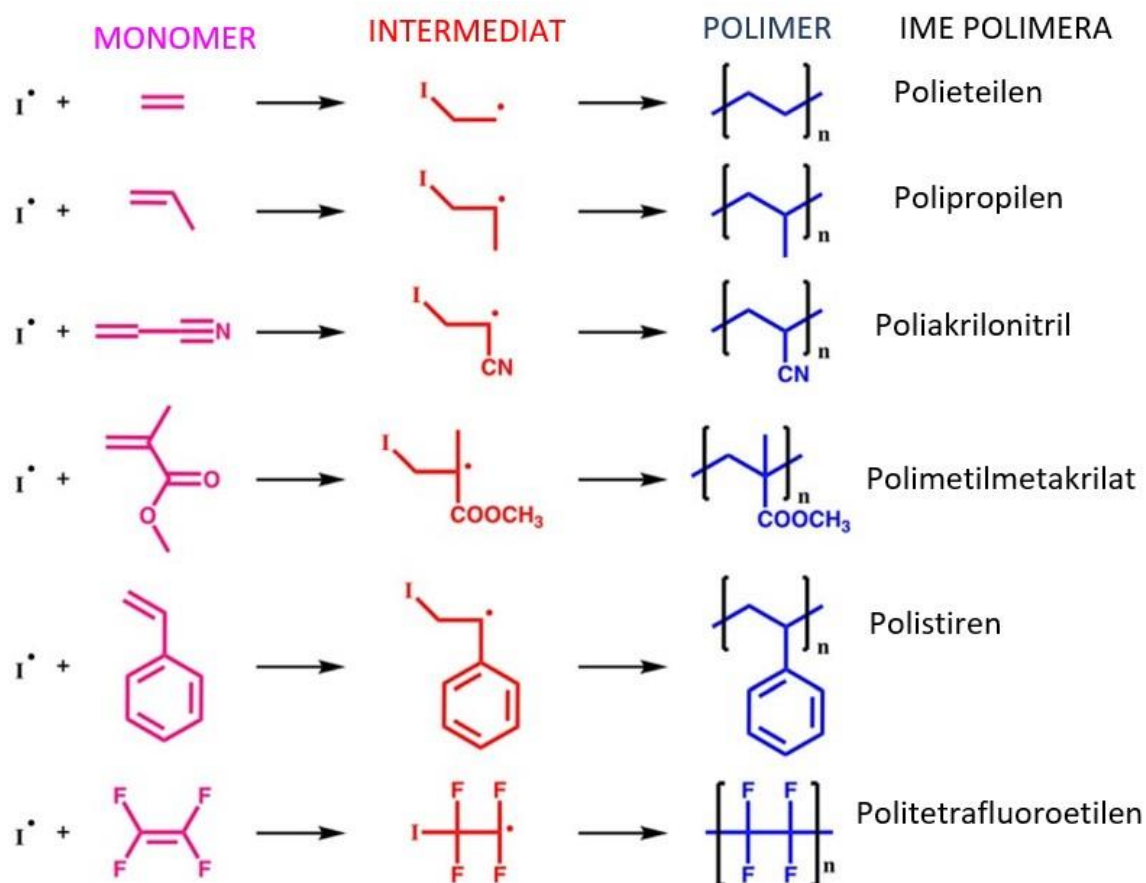
Radikalna polimerizacija je podvrsta verižne polimerizacije, pri kateri je aktivno središče radikal. S tem mehanizmom nastaja veliko komercialno pomembnih polimerov, kot so polistiren, polietilen in drugi. Glavna slabost tega postopka pa je, da je aktivno središče občutljivo na stranske reakcije, ki lahko potečejo na radikal. Zaradi nečistoč se lahko reakcija predčasno ustavi, zato ne dobimo želenega rezultata [7].

Iniciatorji so molekule, ki se razgradijo in tvorijo radikale, ti pa sprožijo rast verige. Razgradnja se lahko zgodi zaradi toplotnega vpliva, sevanja ali redoks reakcije. Nastali radikal lahko reagira z monomerno enoto in tvori vmesno stopnjo, pri kateri monomer postane intermediat z reaktivnim mestom. Od tam naprej lahko poteka propagacija ali pa radikal reagira z drugo molekulo in se izniči. Radikali torej ne reagirajo vedno izključno z monomeri, kar zmanjšuje učinkovitost reakcije [7].

Največji vpliv na delež radikalov, ki reagirajo z monomeri, imajo molekule topila. Ko nastanejo radikali, jih obdajajo molekule topila, ki tvorijo tako imenovano kletko. Če je takšnih molekul veliko, se učinkovitost reakcije bistveno zmanjša [7].

Najpogostejša metoda za pridobivanje radikalov je termični razpad iniciatorske molekule. Uporabljajo se predvsem organske spojine, ki vsebujejo skupine, občutljive na toploto, kot so azo ($-N=N-$), peroksidne ($-O-O-$) ali disulfidne ($-S-S-$) vezi. Poznamo tudi druge metode za tvorbo radikalov, vendar je uporaba iniciatorjev najpogostejša [7].

Na sliki 7 so prikazane stopnje nastanka polimerov iz monomerov preko vmesne stopnje, kjer je lepo vidna sprememba v strukturi monomerne enote ob dodatku radikala [7].



Slika 7: Primeri polimerov pridobljenih z verižno polimerizacijo [7]

Iniciacija

Izraz iniciacija se uporablja, ko želimo označiti, da se je na monomerni enoti pojavil aktivni center, preko katerega lahko začne rasti polimerna veriga; v našem primeru je to prosti radikal. Iniciacija poteka v dveh korakih. V prvem koraku mora iniciatorska molekula razpasti, da nastane prosti radikal. Nato mora ta prosti radikal reagirati z monomerno enoto, da pridobimo aktivni center na preoblikovani monomerni enoti. Sposobnost monomerne enote za sprejem in stabilizacijo prostega radikala vpliva na potek polimerizacije celotnega sistema [7].

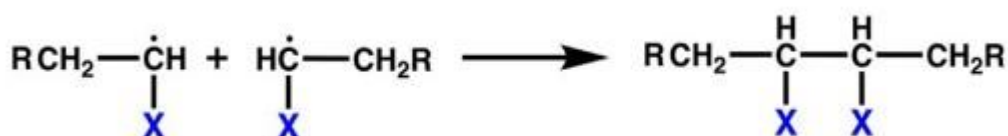
Propagacija

Ko je iniciacija zaključena in ima monomerna enota na sebi vezan prosti radikal, lahko začne polimerna veriga rasti. Pri propagaciji pride do hitrega dodajanja monomernih enot, kar omogoča hitro rast polimerne verige. Propagacija se zgodi v trenutku, kar pomeni, da več tisoč monomernih enot v manj kot eni sekundi tvori polimerno verigo. Če opazujemo reakcijsko zmes, bomo v vsakem trenutku našli monomere, iniciatorske molekule in že nastale polimerne verige, ne bomo pa zaznali rasti posameznih verig [7].

Čeprav propagacija poteka zelo hitro, se monomerne enote lahko razporedijo naključno, vendar je njihovo dodajanje predvidljivo in načrtljivo. Organiziranost monomernih enot v verigi določa stabilizacija prostega radikala na monomerni enoti. Odvisno od mesta, kjer se radikal veže, lahko predvidevamo, kako se bodo nadaljnje monomerne enote povezale v verigo. Rastoče verige stremijo k organizaciji, ki zagotavlja stabilnost verige. Konformacija, ki omogoča največjo stabilnost radikala, določa tudi razporeditev monomernih enot znotraj verige [7].

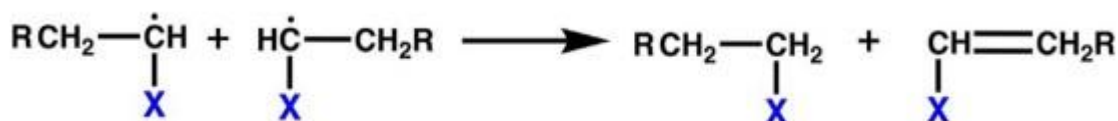
Terminacija

Terminacija je zadnji korak pri rasti polimerne verige. Do terminacije pride, ko izgine aktivni center in nastane polimerna veriga, ki nima več prostega radikala in zaradi tega ne more priti do nadaljnje propagacije. Terminacije ne moremo preprečiti pri normalnih reakcijskih pogojih, lahko pa poskrbimo, da zmanjšamo verjetnost terminacije. Največkrat pride do terminacije, ker se dve radikalski komponenti združita in se med sabo izničita. Poznamo dva mehanizma, kako to poteče, in sicer kombinacijo in disproporcionacijo. Kombinacija je, kadar se dva radikala združita in med njima nastane kovalentna vez. Kombinacija dveh radikalov je prikazana na sliki 8 [7].



Slika 8: Kombinacija dveh radikalov in tvorba kovalentne vezi [7]

Disproporcionacija je, kadar en radikal vzame vodik od drugega radikala in se na ta način oba radikala izničita. Ena molekula bo imela nasičeno končno skupino, druga molekula pa bo imela nenasičeno končno skupino. Disproporcionacija je prikazana na sliki 9 [7].



Slika 9: Disproporcionacija dveh radikalov [7]

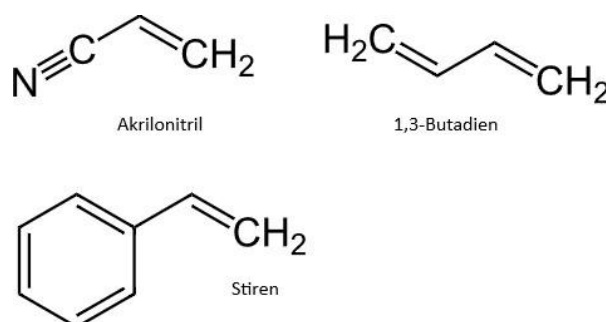
Inhibitorji

Pri rasti polimernih verig je potrebno omeniti tudi inhibitorje, saj lahko močno vplivajo na potek polimerizacije. Inhibitorji imajo visoko afiniteto do prostih radikalov, kar pomeni, da z njimi takoj reagirajo. Prav tako lahko stabilizirajo radikale, da postanejo nereaktivni. Inhibitorje lahko dodamo namerno, vendar so v večini primerov prisotni kot nečistoče in v reakciji niso zaželeni [7].

Inhibitorji lahko vplivajo na propagacijo tako, da stabilizirajo radikale do te mere, da je v zmesi prisoten manj reaktiven radikal, kar posledično upočasni propagacijo. V nekaterih primerih pa lahko radikali popolnoma zaustavijo propagacijo in prekinejo polimerizacijo [7].

2.2 Akrlonitril butadien stiren (ABS)

ABS je amorfen termoplast, ki je sestavljen iz treh monomernih enot, akrilonitrila, butadiena in stirena. ABS lahko predelujemo na različne načine in izdelamo različne izdelke za različne namene uporabe. Lahko ga termoformiramo, brizgamo in ekstrudiramo. ABS je trd, odporen material, ki ni krhek, dobro prenese udarce in se ne zlomi. Dobro je odporen na kemikalije, odporen je na temperaturne spremembe, na primer topla hladna voda, dobro je odporen na abrazijo in ima dobro dimenzijsko stabilnost. Zaradi teh lastnosti se lahko uporablja na zelo različnih področjih. ABS se uporablja predvsem tam, kjer je zahteva po dobrem vizualnem izgledu in rigidnosti. Po navadi je ABS sestavljen iz 20 m.% butadiena, 25 m.% akrilonitrila in 55 m.% stirena, pri čemer je temperatura steklastega prehoda T_g okoli 105 °C. Deleži posameznega monomera se lahko razlikujejo, odvisno od tega, za kakšne aplikacije je material namenjen. ABS se uporablja za ohišja električnih aparatov, ohišja telefonov, športno opremo, itd. Na sliki 10 vidimo posamezne monomerne enote, ki sestavljajo ABS [8].



Slika 10: Monomerne enote, ki sestavljajo ABS (akrlonitril, 1,3-butadien, stiren) [8]

Večina izdelkov iz ABS se brizga. Zelo pomembno je, kadar brizgamo izdelke iz ABS, da se zavedamo, kakšne so njegove lastnosti, da na koncu dobimo željen izdelek, ki izpolnjuje vse zahteve. Do velikih odstopanj v mehanskih lastnostih lahko pride zaradi razlike v tečenju in kopičenja notranjih napetosti pri brizganju. Zaradi tega se izdelki iz ABS običajno brizgajo pri nižjih hitrostih brizganja, da tako povečamo orientacijo. Ena od pogostih napak na izdelkih iz ABS je tudi zunanji videz, saj lahko pride do razbarvanja materiala, lahko pa pride tudi do drugih vizualnih odstopanj [9].

Čeprav je ABS sestavljen iz treh različnih monomerov, ga kljub temu lahko recikliramo. Možnost recikliranja polimernih izdelkov je v današnjem času zelo pomembna, saj lahko material ponovno uporabimo in na ta način ohranjamo okolje in naravo. Iz literature vidimo, da pri mehanski reciklaži in ponovnem brizganju ne pride do bistvene

spremembe v mehanskih lastnostih in je ABS več kot primeren za reciklažo in ponovno uporabo [10].

V zadnjem času se je veliko pozornosti namenilo razvoju nove metode izdelave polimernih izdelkov. Govorimo o 3D tiskanju izdelkov. Največja prednost te metode je izdelava prototipnih izdelkov. Da si lahko lažje predstavljamo, kako bo končni izdelek izgledal. ABS se pogosto uporablja v 3D tisku predvsem zaradi dobre dimenzijske obstojnosti in nizki temperaturi steklastega prehoda [11].

2.2.1 Recikliran akrilonitril butadien stiren (rABS)

Reciklirani ABS je, podobno kot druge vrste recikliranih polimerov, zelo zaželen material, saj njegova ponovna uporaba pomembno prispeva k zmanjševanju ogljičnega odtisa. Poleg tega uporaba recikliranih materialov zmanjšuje potrebo po proizvodnji novih polimerov, saj se lahko ponovno uporabijo že obstoječi materiali. Glavna pomanjkljivost recikliranega ABS se lahko kaže v ohranjanju njegovih mehanskih lastnosti, saj lahko zaradi ponavljajočih se procesov reciklaže pride do degradacije in posledičnega poslabšanja mehanskih lastnosti, kar bi lahko omejilo njegovo nadaljnjo uporabnost. [12]

Raziskave so pokazale, da dodatek recikliranega ABS k primarnemu ABS v masnem razmerju 30 m.% : 70 m.% ne povzroči bistvenega poslabšanja mehanskih lastnosti materiala, saj matrica v veliki meri ohrani svoje lastnosti, stopnja degradacije pa je skoraj zanemarljiva. Pri tem je treba poudariti, da se polimerni materiali ob večkratni reciklaži postopoma degradirajo, zato je ključnega pomena število reciklažnih ciklov, ki jih material prestane, ter njegova sposobnost ohranjanja zahtevanih lastnosti. [12]

Meja števila reciklažnih ciklov, pri katerih material še ohranja ustrezne mehanske lastnosti, je odvisna od vrste polimera. V primeru ABS je bilo ugotovljeno, da tudi po treh reciklažnih ciklih njegove mehanske lastnosti ostajajo primerljive z lastnostmi primarnega ABS, kar omogoča njegovo varno in zanesljivo uporabo. Kljub temu se zazna zmanjšanje natezne trdnosti in udarne žilavosti. [12]

2.3 Polnila

Kot smo že izpostavili, so polimerni materiali zelo pomembni za vsakdanje življenje, zaradi svojih edinstvenih lastnosti jih uporabljamo za različne namene. Lahko se zgodi, da sami polimerni materiali, kot so, nimajo zadovoljivih mehanskih ali termičnih lastnosti, da bi opravili določeno nalogo. Zaradi tega so se poskusile izboljšati lastnosti polimerov z dodatkom polnila. Na ta način so nastali kompozitni materiali. Uporaba kompozitnih materialov je v zadnjih letih porast, saj se zaradi različnih možnosti kombinacij materiala in polnila odpirajo nova vrata za uporabo kompozitnih materialov [13].

Polnila lahko izboljšajo mehanske ali termične lastnosti kompozitov, odvisno od tega, kakšno vrsto polnila uporabljamo. Včasih se polnila uporabljajo zato, da zmanjšajo količino polimera v končnem izdelku in na ta način znižamo končno ceno. Včasih pa je prisotnost polnila nujno potrebna, da lahko material doseže mehanske ali druge lastnosti, ki so potrebne za opravljanje svojega namena [14].

Vpliv polnila na kompozit je predvsem odvisen od vrste polnila, oblike, velikosti in disperzije polnila znotraj matrice [14].

2.3.1 Klasifikacija polnil

Polnila se lahko klasificirajo po različnih kriterijih, odvisno od tega, kakšne lastnosti nas zanimajo. Če klasificiramo polnila glede na agregatno stanje, so vsa polnila deljena na plinasto, tekoče in trdno stanje. Lahko jih delimo glede na to, ali so organska ali anorganska polnila, glede velikosti in obliki delcev [15].

Plinska polnila uporabljamo, kadar želimo dobiti izdelke, ki imajo porozno notranjost. Vzrok za to je lahko želja po zmanjšanju mase in obdržati mehanske lastnosti. Prednost takšnih izdelkov je tudi izboljšana zvočna in toplotna izolativnost [15].

Tekoča polnila sta največkrat voda ali mineralno olje. Voda se predvsem uporablja pri proizvodnji izdelkov iz poliestra. Mineralna olja se uporabljajo za mazanje stičnih površin med površinami. Materiali s tekočimi polnili se uporabljajo predvsem za izdelavo izdelkov, ki so odporni na ogenj, odišavljene izdelke in ležaje, ki ne potrebujejo maziva, saj je mazivo sestavni del izdelka [15].

Trdna polnila so daleč najbolj uporabljena vrsta polnil. Kot trda polnila lahko uporabljamo različne materiale, ki so si med sabo lahko kemijsko in mehansko popolnoma različni. Trdna polnila izboljšajo mehanske lastnosti, zmanjšajo skrčitev končnih izdelkov, povečajo togost, vendar povečajo tudi krhkost izdelkov. Lahko izboljšajo tudi toplotno ali električno prevodnost. Z dodajanjem trdnih polnil zvišamo togost kompozitu [15].

Ena najbolj pomembnih lastnosti trdnih polnil je možnost dispergiranja znotraj polimerne matrice. Če se polnilo enakomerno porazdeli v matrici, pomeni, da so izboljšane lastnosti znotraj celotnega kompozita. Pomembno je tudi, da pride do dobre interakcije med polimerno matrico in polnilom, da se čimbolj povežeta med sabo, saj se na ta način izboljšajo lastnosti kompozita. Glede na vpliv, ki ga ima polnilo na lastnosti kompozita, jih lahko delimo na inertna, to so polnila, ki ne vplivajo na lastnosti kompozita in se dodajo zgolj za zmanjšanje stroškov, in aktivna polnila, ki vplivajo na lastnosti kompozitov [15].

Trdna polnila lahko delimo še naprej, in sicer na mineralna, organska in kovinska polnila, od teh so najbolj pogosta mineralna polnila.

Mineralna polnila so kreda, aerosil, alumosilikati, saje, kovinski oksidi in sulfati.

Organska polnila so grafit, lesna moka, koks in ostala organska vlakna.

Kovinska polnila so različne kovine, baker, cink, železo, aluminij, itd.

Danes se uporablja veliko različnih vrst polnil, da izboljšamo lastnosti kompozitnih materialov. Z njihovim dodatkom zmanjšamo skrčec, izboljšamo mehanske in druge lastnosti. Zaradi razvoja teh materialov so konkurenčni drugim materialom, kot so na primer kovine, steklo ali keramika [16].

2.4 Lesna moka

Lesna moka je izraz, ki se ponavadi uporabi za lesne delce, ki jih lahko presejemo skozi sito z odprtinami 850 mikronov. Lesna moka je v uporabi že zelo dolgo, komercialno se je na trgu pojavila leta 1906 in se uporablja za različne namene. Eden prvih primerov uporabe lesne moke s polimeri je kompozit bakelit, ki je sestavljen iz fenol-formaldehidne smole in lesne moke. Čeprav se je včasih uporabljala v kombinaciji z duromeri, se je njena raba v tem smislu bistveno zmanjšala. V nasprotju z duromeri se je njena uporaba s termoplasti v zadnjih desetletjih močno povečala. Porast v proizvodnji lahko pripišemo zanimanju za izdelke, ki jih uporabljamo za zunanjo dekoracijo, različni okvirji za okna in vrata. Ker je lesna moka pridobljena iz lesa in vemo, da les pri visokih temperaturah zagori, je sama predelava lesne moke kot polnila primerna le pri polimerih, ki imajo temperaturo predelave manj kot 200 °C. Pri polimerih, ki imajo višjo temperaturo predelave, lahko pride do degradacije lesne moke in dobimo neuporabne izdelke [17].

2.4.1 Proizvodnja

Lesna moka se proizvaja iz stranskih produktov lesne obdelave. Torej ostanki, ki nastanejo pri predelavi lesa, se lahko predelajo v lesno moko. Lesna moka je lahko narejena iz različnih vrst lesa, največkrat je to odvisno od okolja, kjer se proizvaja in kakšna drevesa tam rastejo. Kar se tiče same metode predelave lesnih ostankov v lesno moko, ni strogo določena. Lahko uporabimo različne postopke, vendar je cilj vedno enak. Če so odpadni kosi lesa preveliki, jih je najprej potrebno predelati v manjše kose. Ko imamo manjše kose, jih je potrebno še na fino zmleti z uporabo raznih mlinov, da dobimo lesno moko. Kot končni izdelek dobimo moko, v kateri so lahko prisotni delci različnih velikosti in oblik. Ker so delci majhni in je njihovo razmerje med dolžino in presekom 1–5, nam to omogoča enakomerno doziranje lesne moke v material, slabost nizkega razmerja med dolžino in presekom pa je v tem, da ima slabše lastnosti, kar se tiče ojačanja kompozita. Delci lesne moke, ki se uporablja kot polnilo za termoplaste, po navadi niso večji od 425 µm. Lahko naredimo tudi moko, ki je bolj fino mleta, uporaba takšne moke poveča viskoznost taline, vendar imajo končni izdelki lepši videz [17].

2.4.2 Kemijska sestava lesa

Les je kompleksen material, ki ga večinoma sestavlja celuloza, hemiceluloza in lignin. Vsaka snov zase je polimer, torej je les sestavljen iz različnih polimerov. Sam delež posameznih sestavin je odvisen od vrste lesa [17].

Od sestavnih delov lesa se kemijska struktura celuloze najmanj spreminja, stopnja kristaliničnosti je visoka, prav tako je linearen polimer in stopnja polimerizacije je tipično okoli 10.000 enot. Odgovorna je za strukturno stabilnost in moč lesa. Hemiceluloza je bolj razvejen polimer, ki ima bistveno manjšo molsko maso kot celuloza, vendar prav tako prispeva k strukturni stabilnosti. Lignin je amorfen polimer, katerega kemijska sestava je odvisna od vrste lesa. Njegova vloga v lesu je kot vezivo znotraj in med celuloznimi vlakni [17].

2.4.3 Vlaga

Zaradi kemijske sestave celičnih sten, ki vsebujejo hidroksilne skupine, je vezava vode na lesno moko zelo dobra. To lahko predstavlja velik problem, kadar jo dodajamo polimernim materialom, saj si želimo čimbolj suh material in polnilo, da se lahko material lepo ekstrudira in ne pride do težav. Delež vlage v lesu je odvisen od temperature okolice in vlage v sami okolici, pri nižjih temperaturah in višji vlažnosti je delež vlage v lesu višji. Lesna moka v primerjavi z lesom načeloma vsebuje manj kot 4 m.% vlage, ki jo moramo odstraniti pred predelavo. Zaradi svoje zgradbe lahko lesna moka po sušenju zelo hitro ponovno vsrka vlago iz okolice in lahko vsebnost vlage v lesni moki v nekaj urah naraste na nekaj odstotkov. Zaradi tega moramo biti posebej pozorni pri uporabi lesne moke kot polnila. Poskrbeti moramo, da je primerno suha pred uporabo. To pa ne velja za lesno moko samo. Tudi ko je enkrat kompavndirana v polimerno matrico, je pelete pred nadaljnjo uporabo potrebno sušiti, kajti lesna moka nase še vedno veže vlago. Lesna moka pa lahko vpliva prav tako na končni produkt, če ni bila pravilno sušena in je delež vlage prevelik, dobimo proizvode, ki imajo bistveno slabše mehanske lastnosti [17].

2.4.4 Vzdržljivost lesa

Les kot gradbeni material zdrži desetletja v zunanjem okolju, če je impregniran, lakiran ali kako drugače zavarovan pred zunanjimi vplivi. V primerjavi s takšnimi lesnimi izdelki so kompozitni materiali z lesno moko načeloma nezaščiteni. Ena od glavnih tržnih niš za takšne materiale je obljuba, da se jim ni potrebno pretirano posvetiti in jih vzdrževati, ni jih potrebno barvati ali lakirati za zunanjo uporabo. A kljub temu se na proizvodih čez čas vidi sprememba barve zaradi foto degradacije lignina, ki je dovzeten za UV žarke. Takšni proizvodi po določenem času zbledijo in postanejo sivkaste barve. Da bi to preprečili, se proizvodom, ki so namenjeni za zunanjo uporabo, dodajo UV stabilizatorji, da preprečijo bledenje materiala [17].

Na površini se lahko pojavi plesen, njen nastanek pa lahko pripišemo več dejavnikom. Zaradi višje vsebnosti vlage v lesno-polimernih kompozitih, ki se uporabljajo v zunanjem okolju, lahko pride do razvoja plesni. Eden od možnih vzrokov je tudi ta, da se čez čas na površini začnejo nabirati organske snovi, ki omogočijo razvoj plesni. Čeprav plesen ne vpliva na mehanske lastnosti kompozitnega materiala, pa vpliva na njegov vizualni izgled [17].

Les v naravi po določenem času razpade zaradi organizmov, ki lahko razgradijo celulozo in hemicelulozo z uporabo encimov. Podobno kot pri lesu se lahko zgodi pri lesno-polimernih kompozitih, predvsem pri tistih, ki imajo velik delež lesne moke in je vsebnost vlage vsaj 30 m.%. Takšni pogoji omogočajo razvoj gliv, ki razkrajajo les, in na ta način uničijo lesno moko, ki je v izdelku. To se vidi tako na zmanjšanju mase izdelka, kot tudi na občutnem poslabšanju mehanskih lastnosti. Včasih se dodajo aditivi kot na primer cinkov borat, da prepreči rast gliv in se tako zaščiti izdelek [17].

2.4.5 Lastnosti lesa

Ker ima les zelo velik komercialni pomen, so lastnosti različnih vrst lesa dobro raziskane in jasno definirane. Velike razlike pa se pojavijo, če primerjamo lastnosti samega lesa z lastnostmi lesne moke, pridobljene iz iste vrste lesa. Razlog za to so metode pridobivanja lesne moke ter nadaljnja obdelava kot kompozitnega materiala, ki pomembno vplivajo na njihove lastnosti [17].

Visoka temperatura in visoki tlaki med predelavo vplivajo na površino delcev, njihovo gostoto in vsebnost vlage. Na primer, lesna moka, pridobljena s termomehanskimi postopki, ima površino, bogato z ligninom, medtem ko površina lesne moke, pridobljene s kemičnimi postopki, vsebuje več ogljikovih hidratov. Te spremembe na površini vplivajo na interakcijo med polnilom in matrico. Kemijske spremembe površine delcev lahko, na primer, vplivajo na adhezijo med matrico in polnilom [17].

Gostota

Gostota lesne moke je manjša kot gostota lesa, iz katerega je pridobljena. Če lesno moko dodamo polimerom, se njihova gostota poveča, vendar še vedno manj kot v primerjavi z anorganskimi polnili. To je lahko prednost pred anorganskimi polnili, še posebej v primerih, kjer je pomembna nizka masa izdelka, na primer v avtomobilski industriji [17].

Posebnost lesne moke je tudi v njeni stisljivosti, kar jo razlikuje od večine drugih polnil. To pomeni, da se pri predelavi kompozitnega materiala zaradi visokih tlakov podrejo votle stene lesnih vlaken, ki jih nato lahko zapolni polimer ali aditivi. Stopnja zapolnitve je odvisna od več dejavnikov, kot so velikost delcev, metoda predelave in viskoznost aditivov [17].

Termične lastnosti lesnih polnil

Začetek termičnega razpada lesa je odvisen od njegovih sestavnih komponent. Najbolj termično obstojna je celuloza. Zaradi slabe termične obstojnosti se lesna moka uporablja le v polimerih, ki se predelujejo pri temperaturah pod 200 °C. Če je temperatura predelave višja od 200 °C, se začne razgradnja celičnih sten [17].

Preučuje se tudi možnost uporabe lesnih polnil, ki vsebujejo skoraj izključno celulozo. Pri teh polnilih se odstranita lignin in hemiceluloza, ki sta manj termično obstojna. Termogravimetrična analiza (TGA) prav tako pokaže boljšo termično obstojnost celuloznih vlaken v primerjavi z lesno moko [17].

Mehanske lastnosti lesnih polnil

Preučevane mehanske lastnosti vlaken, predvsem naravnih, se močno razlikujejo med različnimi študijami. Razlike nastajajo predvsem zaradi različnih metod priprave vlaken, pomembni pa so tudi pogoji, v katerih so rastline rasle. Treba je upoštevati razliko med vrstami, lokacijo rasti in starostjo rastlin, poleg tega pa še druge dejavnike, ki vplivajo na lastnosti vlaken. Zaradi tega je težko neposredno primerjati mehanske lastnosti iz literature, saj se rezultati med študijami pogosto precej razlikujejo. Kljub temu pa se lahko opazijo določeni trendi, ki se ponavljajo [17].

Iz literature je razvidno, da so mehanske lastnosti lesa zelo anizotropne, zlasti če primerjamo lastnosti glede na rast lesa. Mehanske lastnosti lesnih vlaken so običajno boljše kot lastnosti samega lesa. Če primerjamo naravna vlakna, kamor spadajo tudi lesna vlakna, z anorganskimi vlakni, kot so steklena ali ogljikova vlakna, vidimo, da imajo anorganska vlakna boljše mehanske lastnosti. Kljub temu pa naravna vlakna zaradi nizke gostote in nizke cene predstavljajo konkurenčno prednost, zlasti kadar ni potrebna tako visoka mehanska trdnost, kot jo zagotovijo anorganska polnila [17].

Če primerjamo lesno moko in lesna vlakna, so mehanske lastnosti lesnih vlaken boljše. To je pričakovano, saj je lažje ohraniti integriteto vlaken kot pa zdrobiti les v moko. Slabost lesne moke je tudi v tem, da jo je težje homogeno vmešati v polimerno matrico zaradi slabe adhezije med polnilom in matrico. To lahko povzroči nepravilno porazdelitev polnila znotraj polimerne matrice in posledično slabše mehanske lastnosti kompozita [17].

2.5 Mehanske lastnosti lesno polimernih kompozitov

Lesno polimerni kompoziti (WPC) so materiali, katerih popularnost raste zaradi dobre kombinacije lastnosti, ki jih ponuja polimerna matrica in uporaba lesne moke. Ker so WPC kompozitni materiali, imajo togost nekje med obema sestavnima deloma. Zaradi vsebnosti lesne moke v kompozitu, se kompozit obnaša podobno kot les, kar se tiče zadrževanja žebeljev in vijakov. Lahko ga prevrtamo in se obnaša podobno kot les. Ker so v tem polimernem materialu vlakna oblita z matrico, je sama absorpcija vode manjša kot pri lesu. Zaradi dodatka lesne moke so takšni polimerni materiali bolj krhki v primerjavi s samo polimerno matrico. Če primerjamo mehanske lastnosti polimerov z

mehanskimi lastnostmi WPC, ki imajo za matrični material enak polimer, vidimo, da se ob dodatku lesne moke predvsem spremeni udarna žilavost WPC. Udarna žilavost WPC je v primerjavi s čistim polimerom približno 8-krat nižja. Kar pomeni, da material postane bolj krhek zaradi dodatka polnila. Vidimo pa tudi, da se elastični modul WPC poveča v primerjavi s čistim polimernim materialom. Nekatere lastnosti se ob dodatku polnila izboljšajo, druge pa poslabšajo, odvisno od namena uporabe WPC je lahko to težava ali pa tudi ne [18].

2.6 Toplotne lastnosti WPC

Kot večkomponentni kompoziti imamo več faktorjev, ki vplivajo na toplotne lastnosti WPC. Ena od najbolj pomembnih lastnosti je toplotna stabilnost WPC med samo predelavo, torej med ekstrudiranjem ali brizganjem. Na same toplotne lastnosti WPC-ja vpliva sestava končnega kompozita, interakcije med matrico in polnilom ter modifikacija površine polnila. Termogravimetrična analiza pokaže, da je delež vsebnosti lesne moke ključni faktor, ki vpliva na toplotno stabilnost, prvotno izgubo mase in delež pepela. Povečanje vsebnosti lesne moke poveča vsebnost pepela, ki negativno vpliva na toplotno stabilnost. Ob večjem deležu lesne moke se kompozitu zmanjša temperatura steklastega prehoda. Zviša se temperatura kristalizacije, delež kristaliničnosti pa se zmanjša [19].

2.7 Tehnologije predelave WPC

Poznamo veliko proizvodov, ki so narejeni iz WPC. Izdelamo jih lahko z uporabo različnih tehnologij, odvisno kakšen izdelek želimo. WPC lahko:

- Ekstrudiramo, kadar želimo izdelati podolgovate profile, največ se ekstrudiranje uporablja za izdelavo izdelkov za gradbeništvo.
- Brizgamo, kadar želimo posamezne izdelke različnih oblik.
- Stiskamo, kadar želimo narediti večslojne izdelke, katerim lahko dodamo različna vlakna kot dodatna polnila, naredimo sendvič izdelek [20].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

V eksperimentalnem delu smo kot polimerno matrico uporabili čisti ABS in recikliran ABS. Kot polnilo smo uporabili dva tipa lesne moke. Osnovne lastnosti materialov so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Pregled uporabljenih materialov

Material	Osnovne lastnosti
Čisti ABS	MFR: 9 cm ³ /10 min. (230 °C/10 kg) Gostota: 1,01 g/cm ³ ABS kopolimer z visoko žilavostjo in srednjim tečenjem
Recikliran ABS	Meljava čistega ABS kot industrijski odpad
Lesna moka 1	Sušena lesna moka iz mehkega lesa Gostota: 120–160 kg/m ³ Velikost delcev: < 200 μm
Lesna moka 2	Sušena lesna moka iz trdega lesa Gostota: 130–180 kg/m ³ Velikost delcev: 180 - 500 μm

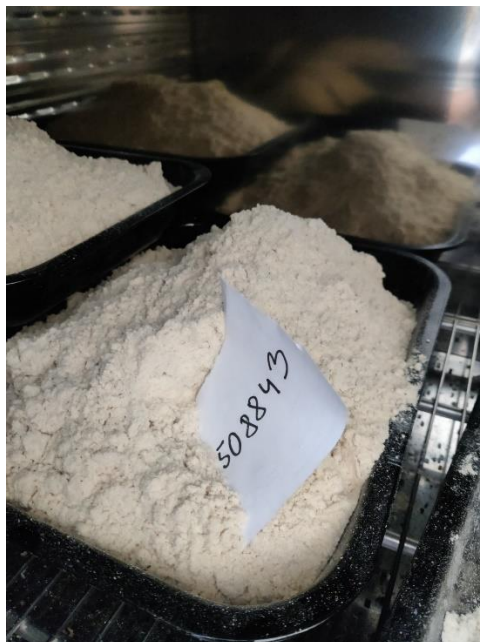
3.2 Priprava vzorcev

Priprava vzorcev je potekala tako, da smo lesno moko sušili v sušilni komori Memmert pri 100 °C in jo sušili pred kompavndiranjem tako dolgo, da je bila vlažnost lesne moke okoli 1 m.%. Pripravili smo deset vzorcev: Sestave vzorcev in njihove oznake lahko vidimo v tabeli 2.

Tabela 2: Sestava kompozitnih materialov

Sestava kompozita	Masni delež posamezne sestavine (ABS/lesna moka)	Oznaka vzorca
Čisti ABS	100 m.% ABS	822_2025_0193_01
Polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 1	80/20 m.%	822_2025_0193_02
Polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 1	60/40 m.%	822_2025_0193_03
Polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 2	80/20 m.%	822_2025_0193_04
Polimerni kompozit čisti ABS/lesna moka 2	60/40 m.%	822_2025_0193_05
Recikliran ABS	100 m.% rABS	822_2025_0193_06
Polimerni kompozit rABS/lesna moka 1	80/20 m.%	822_2025_0193_07
Polimerni kompozit rABS/lesna moka 1	60/40 m.%	822_2025_0193_08
Polimerni kompozit rABS/lesna moka 2	80/20 m.%	822_2025_0193_09
Polimerni kompozit rABS/lesna moka 2	60/40 m.%	822_2025_0193_10

Iz tabele 2 vidimo, da imamo označeno lesna moka 1 in lesna moka 2, razlika med tema dve mokama je v tem, kako fino so mleta vlakna. V primeru lesne moke 1 so vlakna zelo fino mleta iz mehkega lesa. V primeru lesne moke 2 pa so bolj groba in iz trdega lesa. Omenjena razlika se vidi na slikah 11 in 12.



Slika 11: Lesna moka 1



Slika 12: Lesna moka 2

Ko smo se prepričali, da so bila vlakna dovolj suha, smo lahko začeli s kompavndiranjem vzorcev.

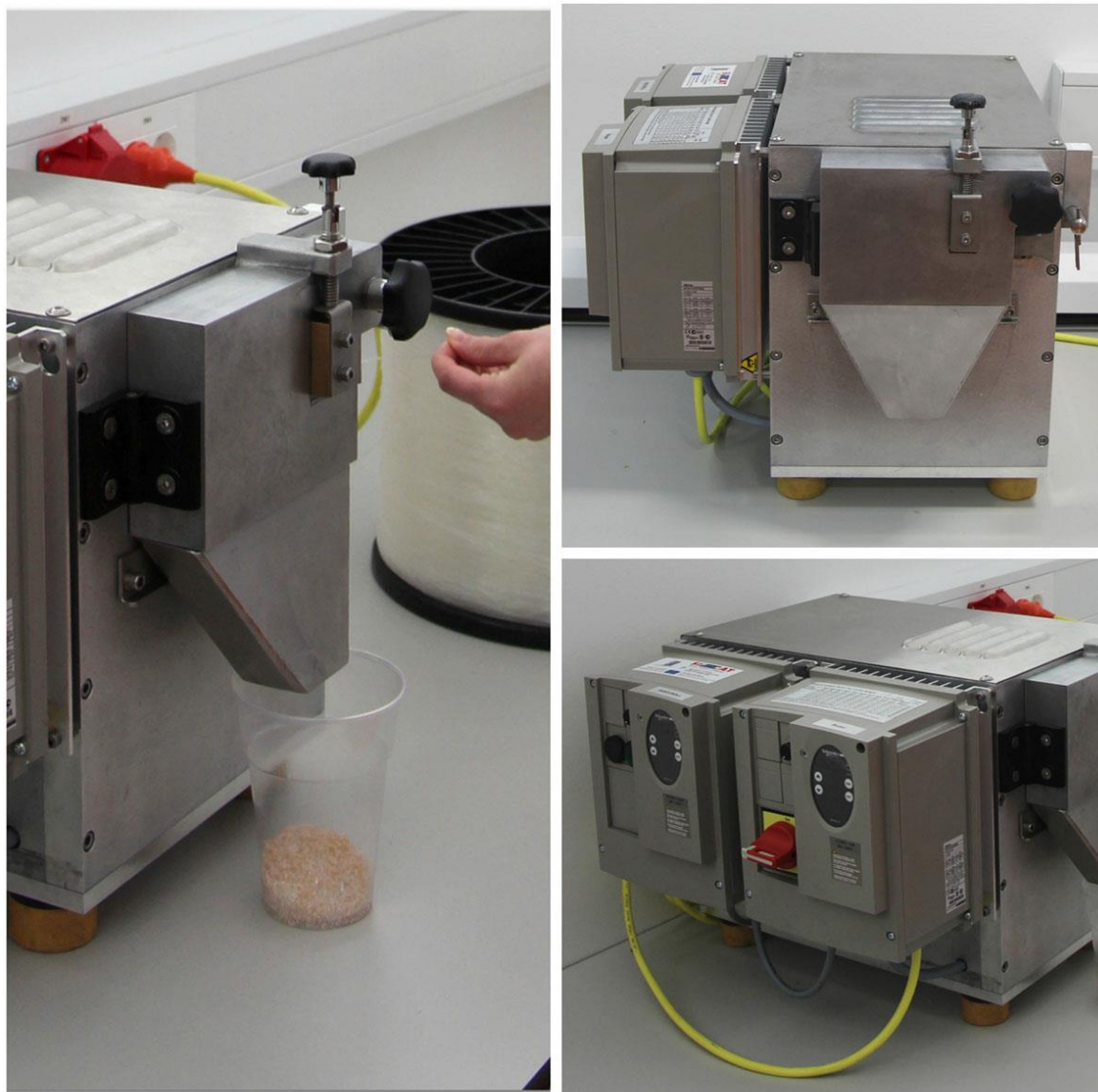
3.2.1 Kompavndiranje na dvopolžnem ekstruderju

Za kompavndiranje smo uporabili dvopolžni ekstruder LABTECH-LTE 20-44. Za vsak vzorec smo kompavndirali dva kilograma materiala, da smo ga imeli dovolj za kasnejše brizganje. Za samo doziranje potrebne količine polnila smo uporabili gravimetrični dozator Movacolor, ki avtomatsko dodaja potrebno maso polnila in ga enakomerno razporedi po vzorcu. Na sliki 13 je prikazan dvopolžni ekstruder LABTECH-LTE 20-44.



Slika 13: Dvopolžni ekstruder LABTECH-LTE 20-44

Dobljeni material smo nato vpeli in granulirali na granulatorju SCHEER, ki je prikazan na sliki 14.



Slika 14: Granulator SHEER

Temperaturni profil ekstrudiranja je prikazan v tabeli 3.

Tabela 3: Temperaturni profil ekstrudiranja vzorcev

Šoba	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Cona
210 °C	210 °C	210 °C	210 °C	200 °C	200 °C	200 °C	190 °C	190 °C	190 °C	180 °C	SP

Hitrost ekstrudiranja je bila 18,2 m/min, število obratov na minuto (rpm) je bilo 300. Parametri so bili konstantni za ekstrudiranje vseh vzorcev. Med ekstrudiranjem smo opazili, da se nam z dodajanjem lesne moke povišuje tlak na šobi. Pri čistem ABS je bil tlak na šobi 25 barov, pri 40 m.% lesne moke pa je bil tlak na šobi okoli 36 barov. To povišanje tlaka je bilo pričakovano, saj je zaradi vsebnosti vlaken talina bolj viskozna in pride do večjega tlaka na šobi ekstruderja.

3.2.2 Priprava preizkušancev na brizgalnem stroju

Ko smo vzorce ekstrudirali in granulirali, smo vse granule dali sušiti v peč, da so bile naslednji dan pripravljene na brizganje. Brizganje se je izvedlo na brizgalnem stroju Krauss Maffei, CX 50-180 s 50 t zapiralne sile. Orodje smo temperirali na 60 °C.

Temperaturni profil taline je bil pri vseh vzorcih enak, prav tako se temperatura temperirne enote ni spreminjala. Temperaturni profil taline in dejanske temperature med brizganjem so prikazane v tabeli 4.

Tabela 4: Temperaturni profil taline

Cona	11	4	3	2	1
Nastavljena T	195 °C	205 °C	200 °C	190 °C	180 °C
Dejanska T	195 °C	207 °C	199 °C	190 °C	182 °C

Drugi parametri so se spreminjali med brizganjem, predvsem je bilo odvisno od količine lesne moke v vzorcu. Naknadni tlak in čas hlajenja posameznih vzorcev so prikazani v tabeli 5.

Tabela 5: Parametri brizganja, naknadni tlak in čas hlajenja

Številka vzorca	Preklopna točka po poti (mm)	Naknadni tlak prva stopnja (bar)	Trajanje naknadnega tlaka prva stopnja (s)	Naknadni tlak druga stopnja (bar)	Trajanje naknadnega tlaka druga stopnja (s)	Čas hlajenja (s)
822_2025_0193_01	3	1000	5	100	1	20
822_2025_0193_02	4	1000	4	100	1	25
822_2025_0193_03	3,5	1000	4	100	1	25
822_2025_0193_04	3	1100	4	100	1	20
822_2025_0193_05	3,4	1200	2	100	1	25
822_2025_0193_06	2	1200	4	100	1	20
822_2025_0193_07	3	1100	4	100	1	10
822_2025_0193_08	3,5	1200	3	100	1	20
822_2025_0193_09	3	1100	4	100	1	20
822_2025_0193_10	3	1200	3	100	1	20

Točka preklopa, hitrost brizganja in čas brizganja so prikazani v tabeli 6.

Tabela 6: Hitrost brizganja in čas brizganja

Številka vzorca	Hitrost brizganja prva stopnja (mm/s)	Hitrost brizganja druga stopnja (mm/s)	Čas brizganja (s)
822_2025_0193_01	50	10	0,56
822_2025_0193_02	50	20	0,53
822_2025_0193_03	50	25	0,54
822_2025_0193_04	50	10	0,53
822_2025_0193_05	50	25	0,53
822_2025_0193_06	50	10	0,54
822_2025_0193_07	50	10	0,53
822_2025_0193_08	50	25	0,53
822_2025_0193_09	50	10	0,53
822_2025_0193_10	50	25	0,53

Za vsak vzorec smo naredili 80 brizgov. Kar se tiče preizkušancev za žilavost po Charpyju smo vzeli brizge 50–60 brez zareze, z zarezo pa brizge 70–80. Za upogibni test smo vzeli preizkušance brizgov 45–50. Natezni test smo izvedli na preizkušancih brizgov 54–60.

3.2.3 Upogibne lastnosti

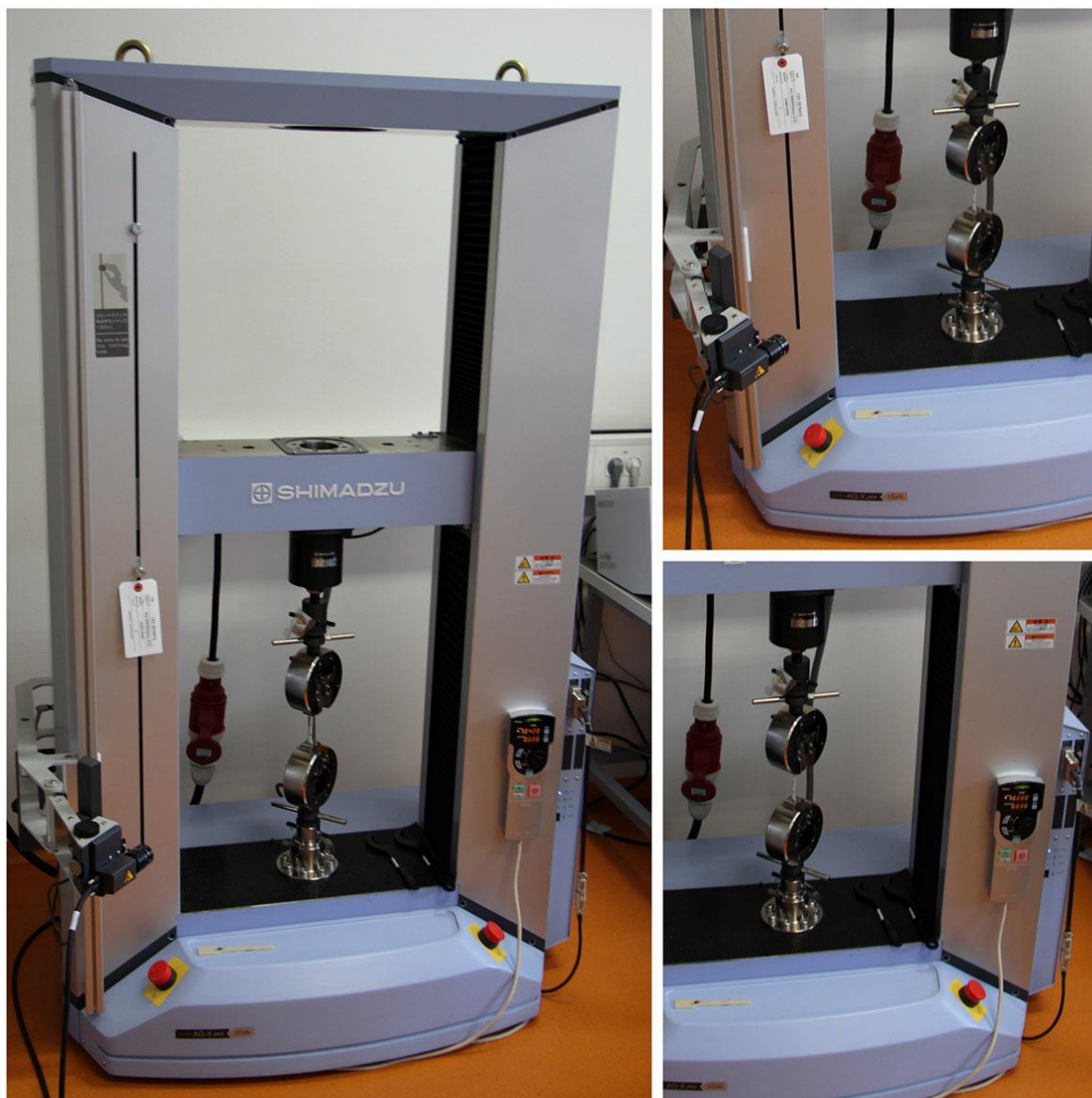
Upogibne lastnosti smo določili na trgalnem stroju Shimadzu AG-X Plus 10 kN skladno s standardom ISO 178. Vzorce smo testirali s 3-točkovnim upogibnim preizkusom.

Vzorce smo položili vodoravno na spodnji del priprave, zgornji del pa je bil pred tem odmaknjen, da je bilo dovolj prostora za namestitev vzorca. Ko je bil vzorec nameščen, se je zgornja točka približala vzorcu in začela delovati nanj ter ga deformirati. Pomembno je bilo, da smo vzorec namestili na sredino spodnjega dela priprave in ga postavili čim bolj pravokotno na spodnji podstavek, s čimer smo zagotovili ponovljivost meritev.

Za vsako recepturo smo testirali po pet vzorcev. Hitrost pomika čeljusti je bila 2 mm/min. Pri upogibnem testu smo zasledovali upogibni E modul (E_f), maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}), upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (ϵ_{fM}) in upogibni raztezek pri porušitvi (ϵ_{fB}).

3.2.4 Natezne lastnosti

Natezne lastnosti smo določili na trgalnem stroju Shimadzu AG-X Plus 10kN v skladu s standardom ISO 527, stroj se uporablja za testiranje mehanskih lastnosti materialov. Trgalni stroj je prikazan na sliki 15.

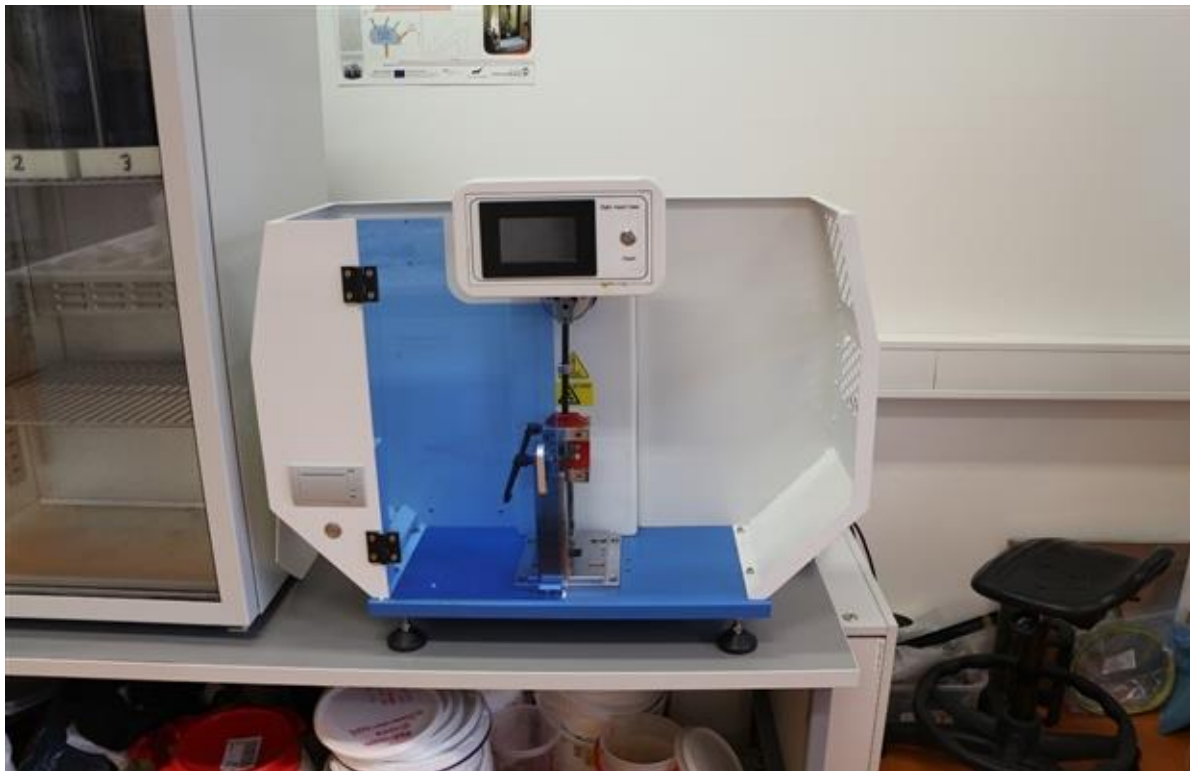


Slika 15: Trgalni stroj Shimadzu AG-X Plus 10kN

Vzorci smo vpeli v čeljusti tako, da so bili navpično poravnani. Vzorci smo trdno pričvrstili med čeljusti, da se med testom niso premaknili. Pomembno je bilo, da so bili vzorci čimbolj na sredini čeljusti in čimbolj navpično vpeti, da smo na ta način lahko zagotovili ponovljivost meritev. Razdalja med čeljustmi je bila 50 mm, prav tako smo pri testiranju uporabili prednapetost s silo 0,7 N in s tem zagotovili, da so bili vsi vzorci enakomerno vpeti in pripravljeni za meritev. Pomerili smo po pet vzorcev iz vsake recepture. Hitrost pomika čeljusti je bila 1 mm/min do razteзка 0,4 %, potem smo hitrost povišali na 50 mm/min. Pri nateznem testu smo zasledovali natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m), raztezek pri natezni trdnosti (ϵ_m) in raztezek pri pretrgu (ϵ_{tb}).

3.2.5 Žilavost po Charpyju

Udarne žilavost materiala smo izmerili z uporabo Charpyjeve metode. Za to metodo smo uporabili napravo za merjenje udarne žilavosti LY-XJJDS v skladu s standardom ISO 179. Naprava je prikazana na sliki 16.



Slika 16: Naprava za merjenje udarne žilavosti LY-XJJDS

Pri preizkusu udarne žilavosti smo preizkušali vzorce z in brez zareze. Za vsak vzorec smo pomerili deset kosov z in deset kosov brez zareze. Pri vzorcih, ki so vsebovali samo čisti ABS ali rABS smo uporabili kladivo z energijo 5 J, pri ostalih vzorcih pa smo uporabili kladivo z energijo 2 J. Zasledovali smo udarno žilavost in zarezno udarno žilavost.

3.2.6 Termogravimetrična analiza (TGA)

S termogravimetrično analizo (TGA) smo analizirali sestavo kompozita in delež polnila v njem. TGA smo izvedli na napravi termogravimetrični analizator z DSC signalom Mettler Toledo, TGA/DSC 3+. Naprava je prikazana na sliki 17.



Slika 17: Termogravimetrični analizator z DSC signalom Mettler Toledo, TGA/DSC 3+

Vzorci smo v prvem koraku segrevali od 40 °C do 600 °C v dušikovi atmosferi (20 mL/min), hitrost segrevanja je bila 10 K/min. V drugem koraku pa je potekalo segrevanje od 600 °C do 900 °C v kisikovi atmosferi (20 mL/min), hitrost segrevanja je ostala nespremenjena 10 K/min. Pri TGA smo zasledovali temperaturo degradacije, kolikšen je bil razpad posamezne sestavne komponente, kdaj je prišlo do degradacije in koliko je ostalo saj.

3.2.7 Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)

Z diferenčno dinamično kalorimetrijo smo določili temperaturo steklastega prehoda in prisotnost morebitnih nečistoč. DSC smo izvedli z diferenčnim dinamičnim kalorimetrom Mettler Toledo, DSC2. Naprava je prikazana na sliki 18.



Slika 18: Diferenčni dinamični kalorimeter Mettler Toledo, DSC 2

Najprej smo vzorce segreli na 25 °C ter temperirali 1 min. Nato smo vzorce segreli iz 25 °C do 200 °C, hitrost segrevanja je bila 10 K/min. Ko smo dosegli temperaturo 200 °C, smo zopet temperirali 1 min. Nato smo vzorce začeli ohlajati iz 200 °C do 25 °C, hitrost ohlajanja je bila -10 K/min. Ko smo prišli do temperature 25 °C, smo postopek še enkrat ponovili, da smo tako dobili DSC diagram. Pri DSC smo zasledovali temperaturo steklastega prehoda.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Mehanske lastnosti

Za določanje mehanskih lastnosti smo uporabili upogibni in natezni test. Zanimalo nas je, kako bo vplival dodatek polnila na mehanske lastnosti vzorcev in ali bomo opazili kakšno razliko med čistim ABS in rABS. Za vsako recepturo smo izmerili pet vzorcev.

4.1.1 Upogibni test

V tabeli 7 so podane povprečne vrednosti in standardna deviacija za vzorce pri upogibnem testu.

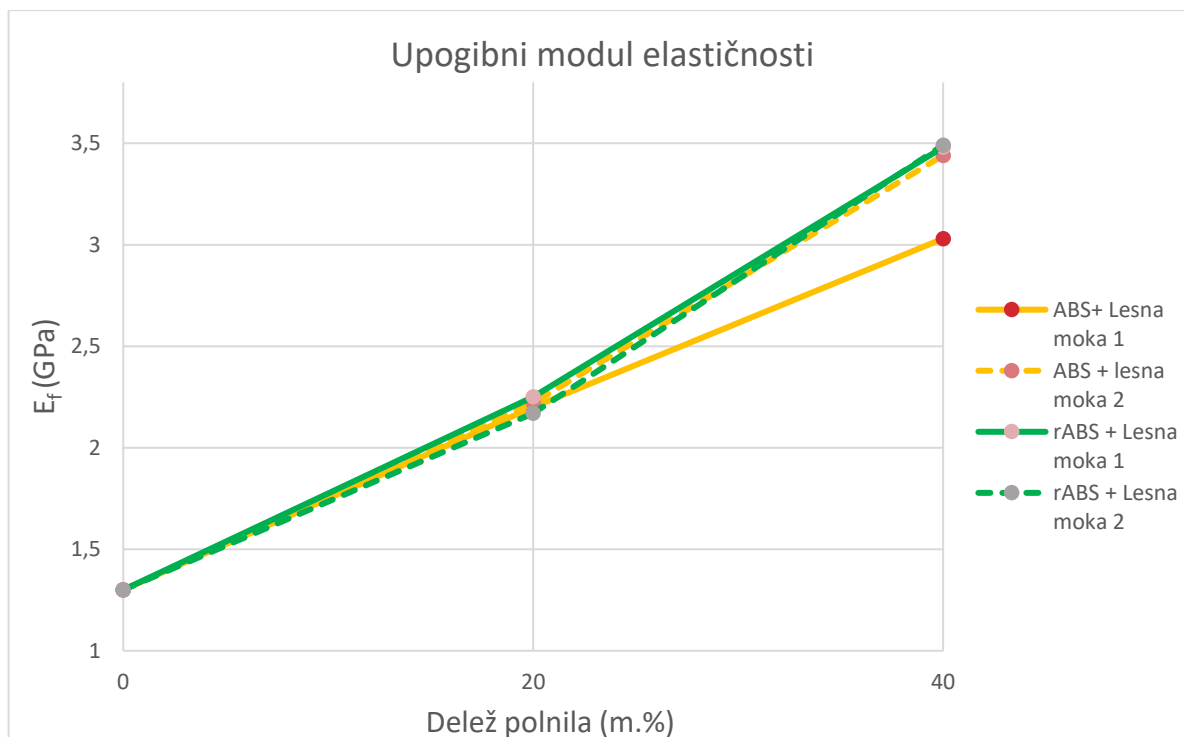
Tabela 7: Povprečne vrednosti in standardna deviacija vzorcev pri upogibnem testu

Številka vzorca	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ϵ_{fM} (%)	ϵ_{fB} (%)
822_2025_0193_01	$1,30 \pm 0,01$	$39,3 \pm 0,0$	$4,68 \pm 0,05$	$6,71 \pm 0,87$
822_2025_0193_02	$2,20 \pm 0,02$	$46,4 \pm 0,1$	$4,14 \pm 0,06$	$4,56 \pm 0,20$
822_2025_0193_03	$3,03 \pm 0,02$	$52,0 \pm 0,1$	$2,86 \pm 0,10$	$2,93 \pm 0,10$
822_2025_0193_04	$2,22 \pm 0,03$	$45,5 \pm 0,1$	$3,54 \pm 0,07$	$3,98 \pm 0,11$
822_2025_0193_05	$3,44 \pm 0,02$	$51,9 \pm 0,6$	$2,35 \pm 0,08$	$2,49 \pm 0,09$
822_2025_0193_06	$1,30 \pm 0,01$	$39,1 \pm 0,1$	$4,60 \pm 0,02$	$6,58 \pm 0,91$
822_2025_0193_07	$2,25 \pm 0,01$	$47,2 \pm 0,1$	$4,07 \pm 0,05$	$4,38 \pm 0,14$
822_2025_0193_08	$3,48 \pm 0,02$	$54,9 \pm 0,3$	$2,57 \pm 0,05$	$2,65 \pm 0,04$
822_2025_0193_09	$2,17 \pm 0,01$	$45,2 \pm 0,2$	$3,78 \pm 0,09$	$4,30 \pm 0,18$
822_2025_0193_10	$3,49 \pm 0,01$	$51,7 \pm 0,4$	$2,28 \pm 0,06$	$2,44 \pm 0,06$

Iz tabele 7 smo najprej primerjali vzorca 822_2025_0193_01 in 822_2025_0193_06. V hipotezi smo predpostavili, da bodo kompozitni materiali iz rABS izkazovali slabše mehanske lastnosti kot tisti iz čistega ABS. Zato smo najprej primerjali osnovna polimera med seboj, da bi ugotovili, ali se razlike pojavljajo že pri sami matrici.

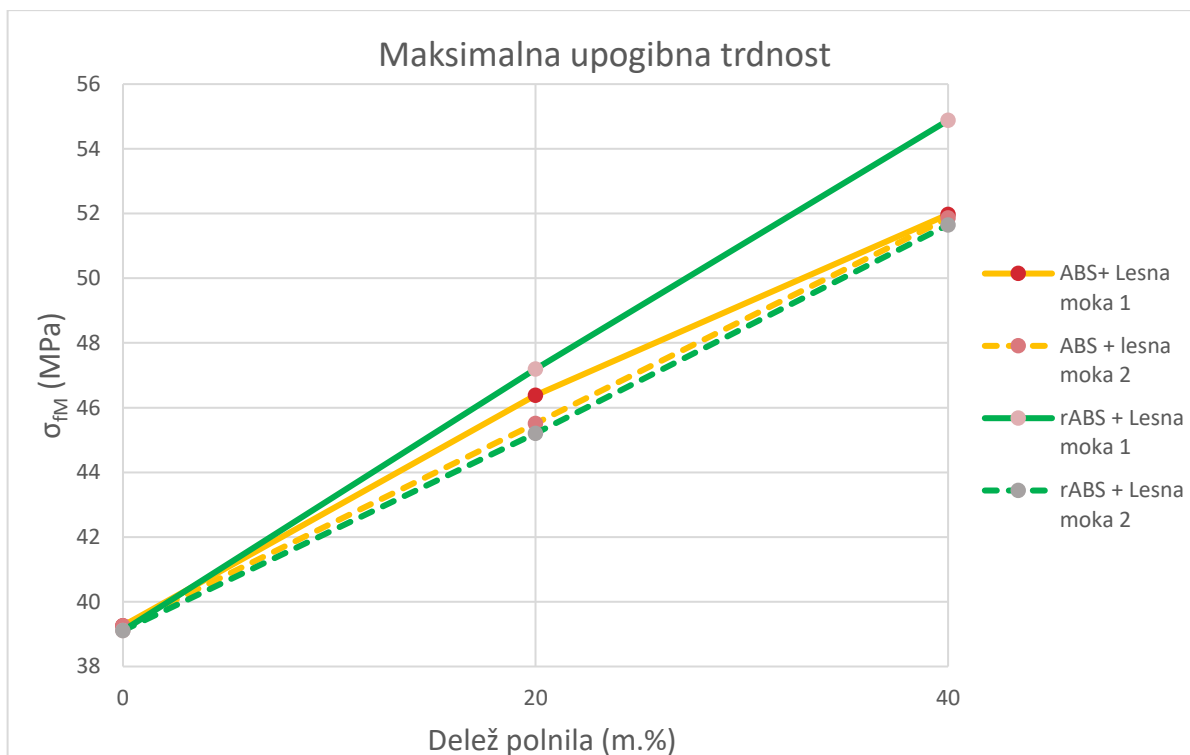
Primerjava E_f je pokazala, da sta bili vrednosti za oba vzorca identični. Pri σ_{fM} sta bili povprečni vrednosti tudi zelo podobni, prav tako pa se je standardni odklon med njima le minimalno razlikoval. Podobno smo ugotovili pri ϵ_{fM} in ϵ_{fB} , kjer se vrednosti prav tako niso bistveno razlikovale. Na podlagi teh rezultatov sklepamo, da med čistim ABS in rABS ni opaznih razlik v mehanskih lastnostih. To pomeni, da morebitnih razlik med kompoziti iz obeh materialov ne moremo pripisati polimerni matrici, temveč polnilu.

V nadaljevanju smo analizirali vse vzorce, da bi ugotovili razlike med njimi. Ugotovili smo, da so razlike v E modulu majhne, kar pomeni, da velikost delcev polnila ni imela opaznega vpliva na to lastnost. Na sliki 19 je grafični prikaz spremembe upogibnega E modula v odvisnosti od deleža polnila.



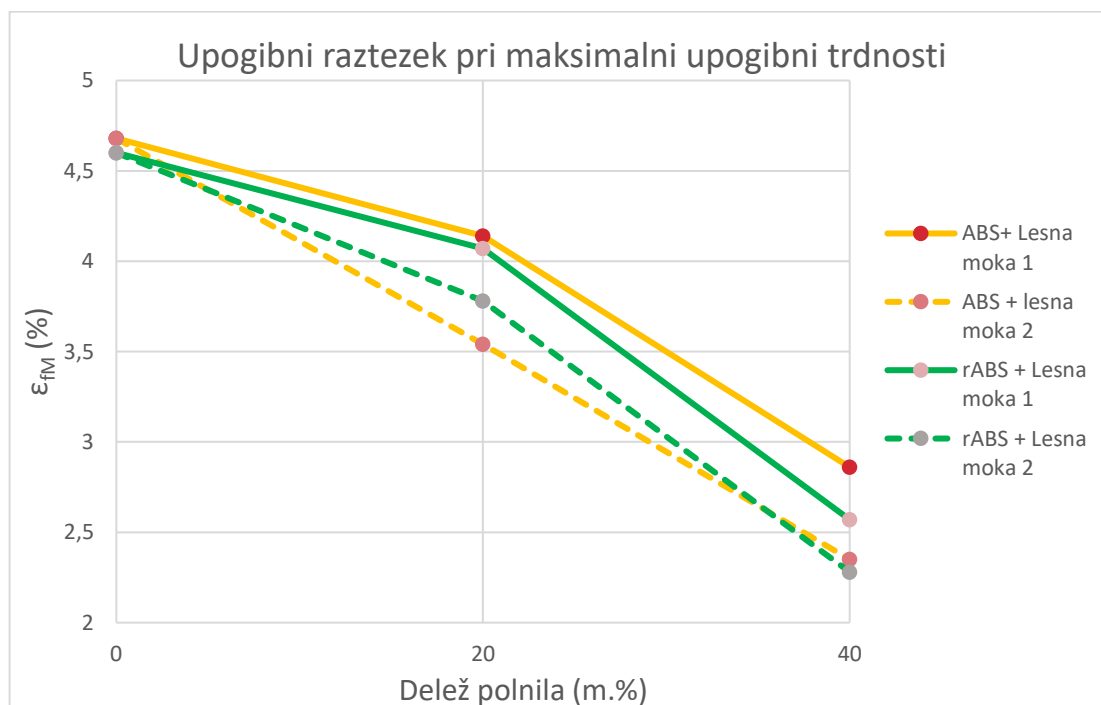
Slika 19: Upogibni E modul

Pri maksimalni upogibni trdnosti smo zaznali odstopanje. Kot smo že ugotovili, da med čistim ABS in rABS ni razlik, smo to odstopanje pripisali polnilu. Vzorci z enako vrsto polnila so imeli zelo podobne vrednosti, medtem ko so vzorci z lesno moko 1 dosegali višje vrednosti kot tisti z lesno moko 2. Pomembno je poudariti, da je odstopal le en vzorec. To odstopanje lahko pripišemo disperznosti polnila znotraj polimerne matrice, kar je razvidno iz grafa na sliki 20.



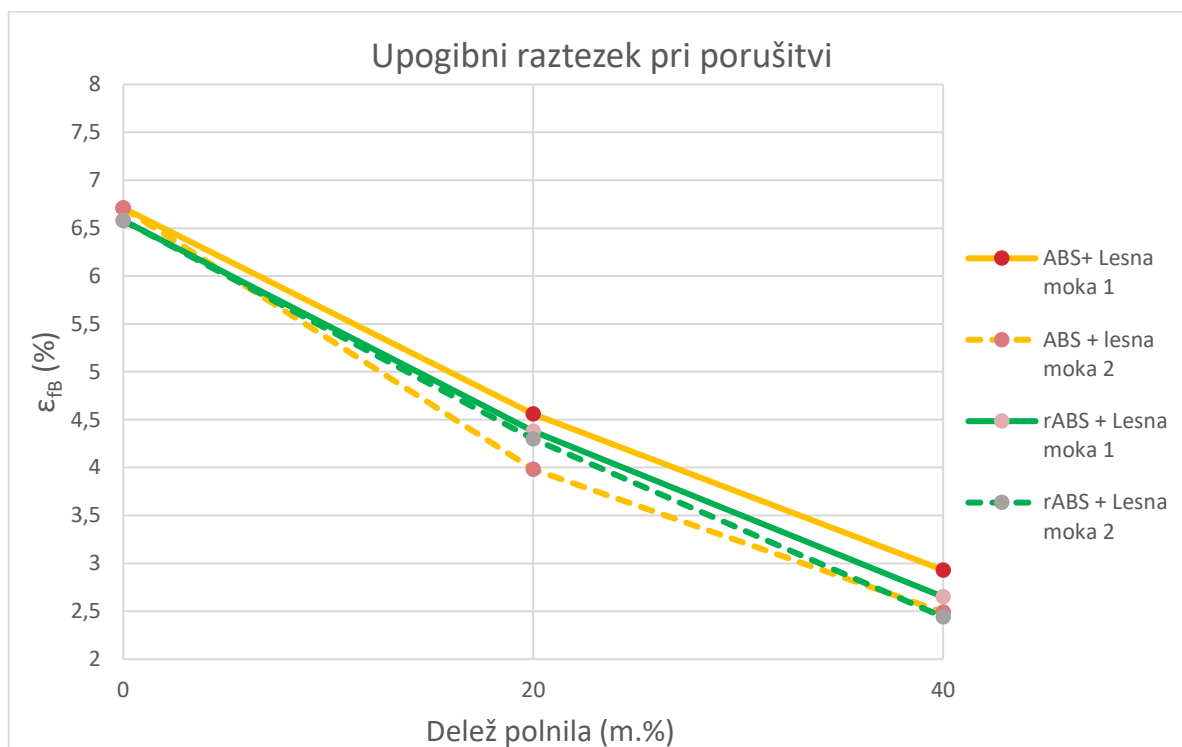
Slika 20: Maksimalna upogibna trdnost

Pri upogibnem raztezu pri maksimalni trdnosti se je pokazal podoben trend, in sicer, da so bile vrednosti višje pri vzorcih, ki so vsebovali lesno moko 1. Na sliki 21 je prikazan graf upogibnega razteza pri maksimalni upogibni trdnosti v odvisnosti od deleža polnila



Slika 21: Upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti

Podobno kot pri upogibnem raztezu pri maksimalni upogibni trdnosti se je trend ponovil pri upogibnem raztezu pri porušitvi, torej so imeli vzorci z lesno moko 1 boljše mehanske lastnosti kot vzorci z lesno moko 2. Na sliki 22 je prikazan graf upogibnega razteza pri porušitvi v odvisnosti od deleža polnila.



Slika 22: Upogibni raztezek pri porušitvi

Rezultati so pokazali, da se je pri višjem deležu lesne moke 1 (40 m.%) pojavila razlika med čistim ABS in rABS, kar pa smo pripisali neenakomerni disperziji polnila v matrici. Pri višji vsebnosti polnila se leseni delci namreč niso enakomerno porazdelili v polimerni matrici, kar je lahko povzročilo razlike med meritvami.

Ko smo primerjali mehanske lastnosti čistih polimerov (ABS in rABS) s kompozitnimi materiali, smo ugotovili, da se je z dodatkom lesne moke izboljšal upogibni E modul. Tak rezultat je bil pričakovan, saj se z dodatkom polnila poveča togost materiala in s tem odpornost proti deformaciji. To se je jasno odrazilo v višjih vrednostih E_r .

Podoben trend smo opazili tudi pri maksimalni upogibni trdnosti, kjer so se vrednosti z dodajanjem polnila povečevale – večji kot je bil delež polnila, višje so bile izmerjene vrednosti. S tem se je tudi povečala odpornost materiala proti deformaciji.

Nasprotno pa smo pri upogibnem raztezu pri maksimalni trdnosti in pri porušitvi zaznali zmanjšanje vrednosti z dodajanjem lesne moke. To je skladno z opažanjem, da so kompozitni vzorci postali bolj togi in krhki, kar se je odrazilo v manjših vrednostih raztezkov.

Na podlagi rezultatov upogibnega testa smo ugotovili, da se je odpornost materiala proti deformaciji z dodatkom polnila izboljšala (višji E_f in σ_{fM}), medtem ko se je raztezek ob porušitvi zmanjšal, kar pomeni, da je material postal trši in manj elastičen. Dobljeni rezultati so skladni s pričakovanji. Manjše razlike med meritvami pripisujemo dejstvu, da pri pripravi kompozitov nismo uporabili kompatibilizatorja, temveč le polimerno matrico in vlakna. Iz rezultatov je tudi razvidno, da sta uporabljena polimera – čisti ABS in rABS – z vidika upogibnih lastnosti skoraj identična.

4.1.2 Natezni test

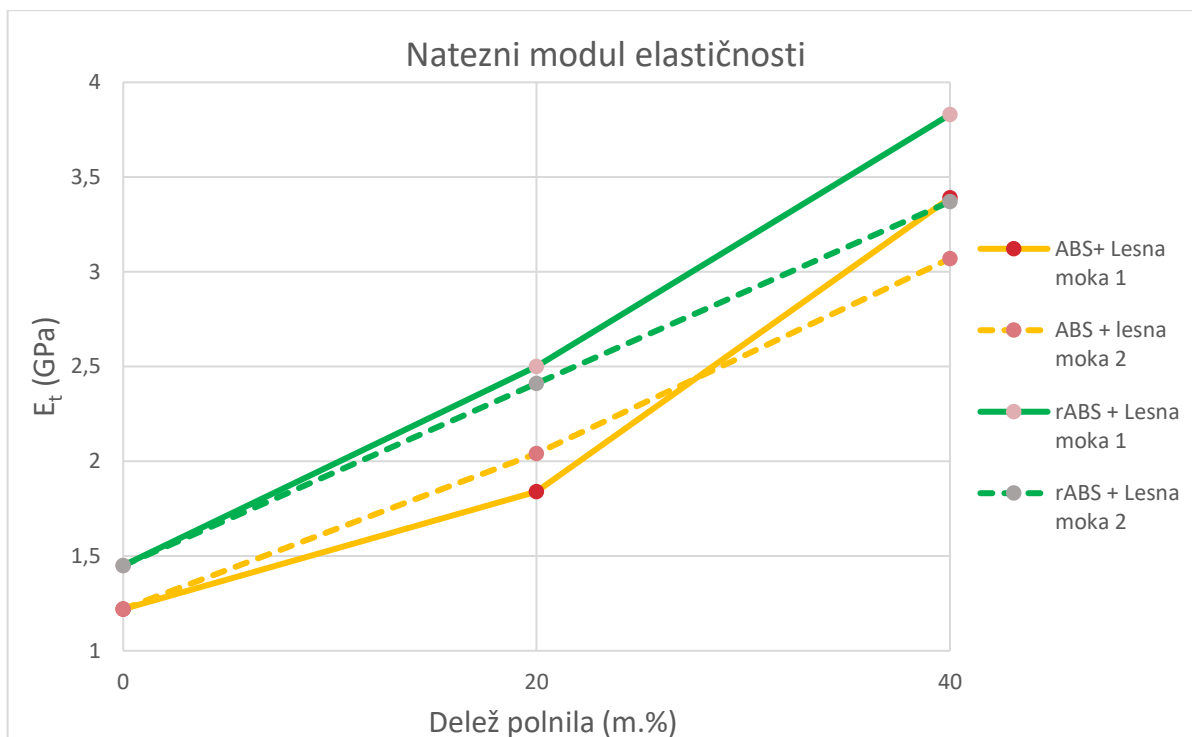
Enako kot pri upogibnem testu smo preučevali mehanske lastnosti pri nateznem testu, iz vsake sestave smo pomerili pet vzorcev. V tabeli 8 so prikazane povprečne vrednosti in standardna deviacija vzorcev pri nateznem testu.

Tabela 8: Povprečne vrednosti in standardna deviacija pri nateznem testu

Številka vzorca	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_m (%)	ε_{tb} (%)
822_2025_0193_01	$1,22 \pm 0,11$	$30,0 \pm 0,7$	$4,02 \pm 0,25$	$14,04 \pm 2,00$
822_2025_0193_02	$1,84 \pm 0,28$	$32,7 \pm 0,3$	$3,85 \pm 0,21$	$5,13 \pm 0,35$
822_2025_0193_03	$3,39 \pm 0,31$	$37,5 \pm 0,4$	$3,82 \pm 0,28$	$4,03 \pm 0,39$
822_2025_0193_04	$2,04 \pm 0,17$	$33,5 \pm 1,2$	$3,85 \pm 0,58$	$4,32 \pm 0,49$
822_2025_0193_05	$3,07 \pm 0,32$	$36,3 \pm 1,8$	$2,91 \pm 0,26$	$3,05 \pm 0,31$
822_2025_0193_06	$1,45 \pm 0,10$	$31,3 \pm 1,4$	$3,95 \pm 0,18$	$13,50 \pm 1,09$
822_2025_0193_07	$2,50 \pm 0,17$	$35,6 \pm 0,6$	$3,67 \pm 0,05$	$4,69 \pm 0,17$
822_2025_0193_08	$3,83 \pm 0,13$	$37,8 \pm 3,3$	$3,25 \pm 0,17$	$3,39 \pm 0,21$
822_2025_0193_09	$2,41 \pm 0,18$	$33,4 \pm 0,9$	$3,11 \pm 0,16$	$3,76 \pm 0,39$
822_2025_0193_10	$3,37 \pm 0,13$	$38,0 \pm 0,9$	$2,55 \pm 0,08$	$2,71 \pm 0,09$

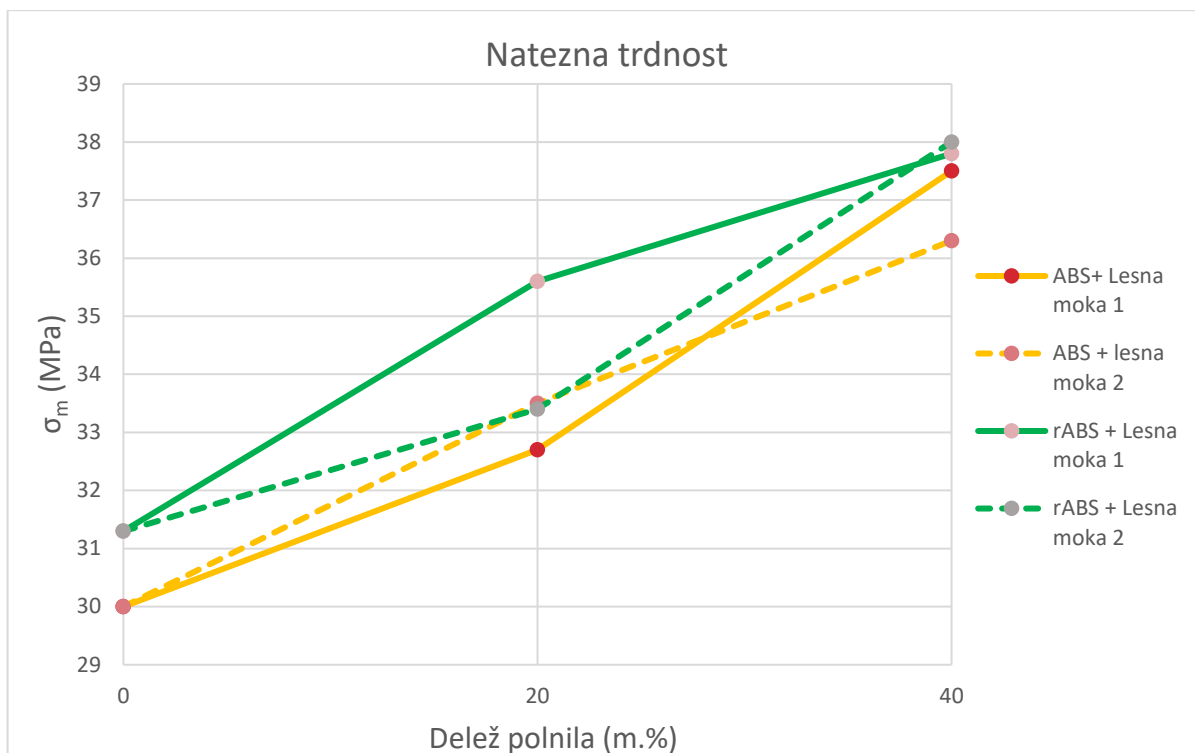
V primerjavi z upogibnim testom smo pri nateznem testu zaznali bistveno višjo deviacijo med meritvami. Takšna odstopanja so lahko najverjetneje posledica večje občutljivosti nateznega preizkusa na pogoje vpetja, homogenosti vzorca in mikrostrukturnih nepravilnosti. Kljub temu smo ugotovili, da se je trend povprečnih vrednosti ponavljal in je skladen s pričakovanji.

Pri nateznem E modulu smo zaznali razlike v vrednostih, ki pa niso popolnoma skladne s pričakovanim trendom. Najvišje vrednosti E_t so bile dosežene pri kompozitih iz rABS, kar je nekoliko presenetljivo glede na predpostavljeno degradacijo recikliranega materiala. Ta pojav je lahko posledica boljšega oprijema polnila z matrico pri rABS ali naključnih variacij v strukturi materiala. Razlike so razvidne iz grafa na sliki 23.



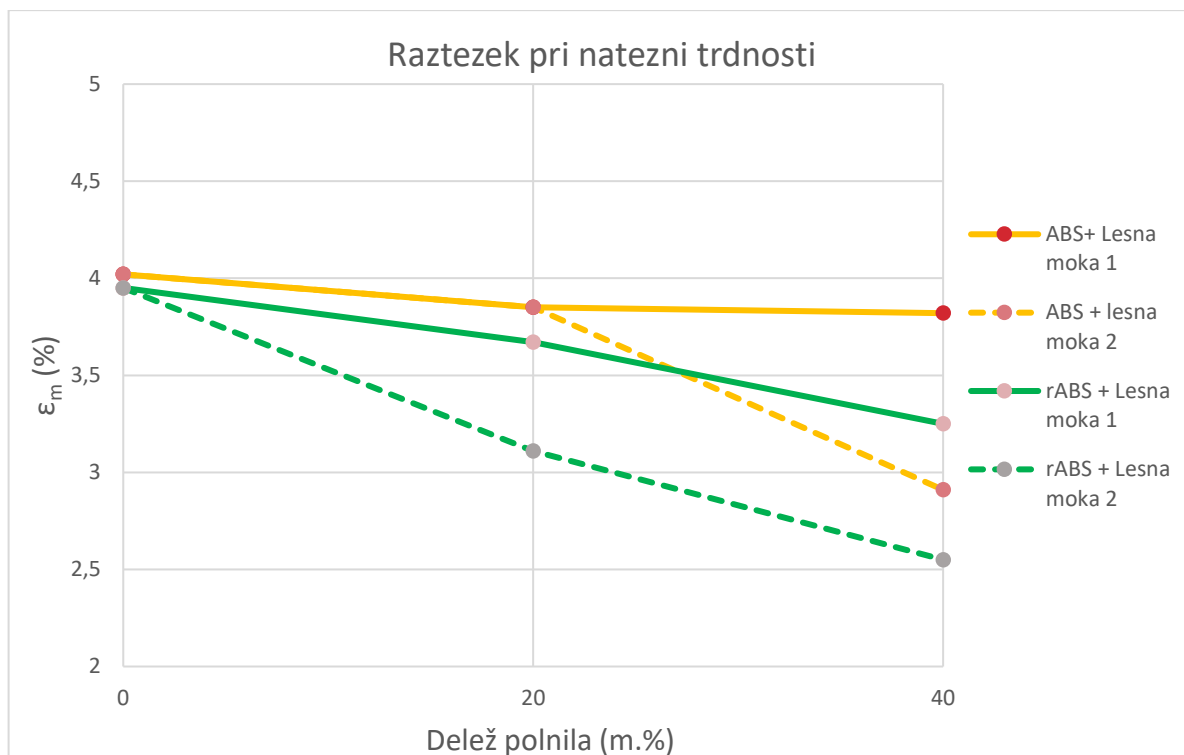
Slika 23: Natezni modul elastičnosti

Zaznali smo tudi odstopanja pri natezni trdnosti. Podobno kot pri nateznem E modulu, so imeli vzorci iz rABS boljše lastnosti od tistih iz čistega ABS. Kot smo že ugotovili, da med obema polimernima matricama ni bilo opaznih razlik, je razlog za razliko v vrednostih najverjetneje v porazdelitvi polnila znotraj polimerne matrice ali površinskih interakcij med polnilom in polimerno matrico. Na sliki 24 je prikazana natezna trdnost v odvisnosti od deleža polnila.



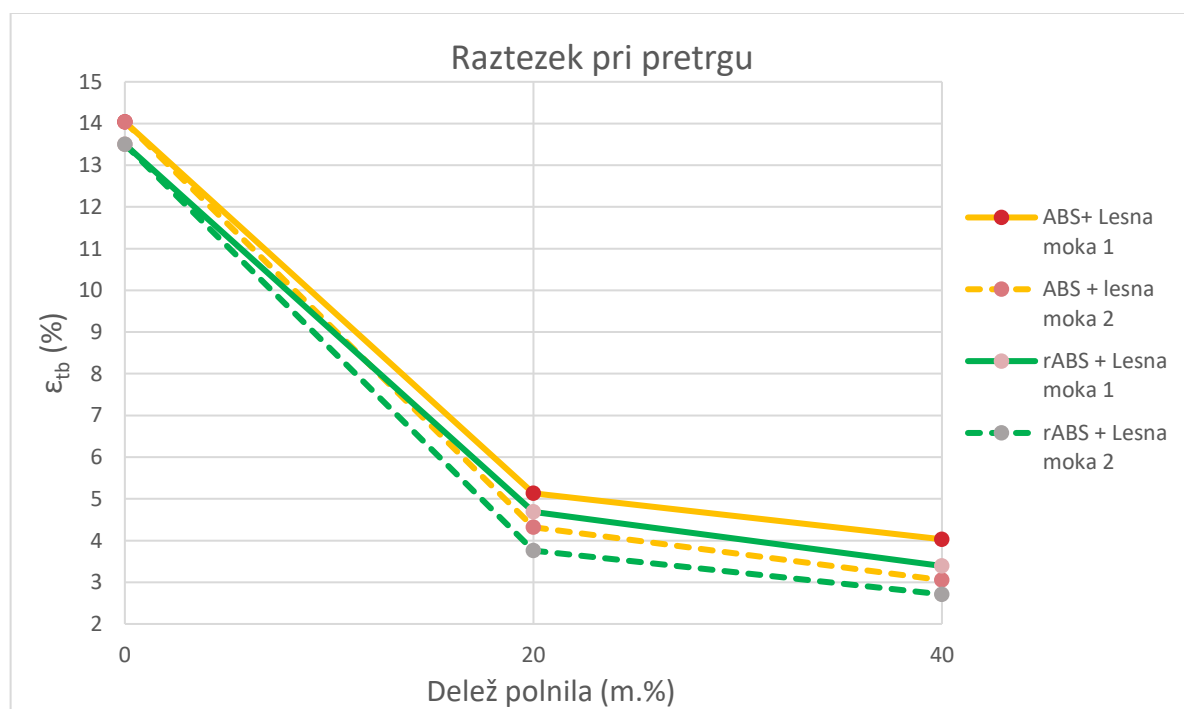
Slika 24: Natezna trdnost

Pri raztezkcu pri natezni trdnosti smo opazili, da so vzorci iz čistega ABS z 20 m.% polnila dosegli boljše vrednosti kot vzorci iz rABS. Pri vzorcih s 40 m.% polnila pa se trend nekoliko spremeni, saj rezultati ne sledijo tistim, pridobljenim pri 20 m.%. Takšna odstopanja so najverjetneje posledica visoke vsebnosti polnila, ki otežuje homogeno disperzijo in povzroča lokalno koncentracijo napetosti. To lahko razberemo iz grafa na sliki 25.



Slika 25: Raztezek pri natezni trdnosti

Pri raztezk pri pretrgu (ϵ_{tb}) imajo vzorci z lesno moko 1 višje vrednosti raztezka kot tisti z lesno moko 2. To lahko pomeni, da ima lesna moka 1 verjetno boljše fizikalne lastnosti (manjša velikost delcev, boljša čistost ali nižja vsebnost vlage), kar omogoča boljšo interakcijo z matrico in večjo energijsko absorpcijo ob lomu. Kompoziti z lesno moko 2 so bolj togi in krhki. Rezultati so razvidni iz grafa na sliki 26.



Slika 26: Raztezek pri pretrgu

Predhodno smo predpostavili, da bo pri vzorcih z višjim deležem polnila deviacija rezultatov večja. V nekaterih primerih se je predpostavka potrdila, kar je razvidno iz tabele 8. Vendar pa ocenjujemo, da so odstopanja večinoma posledica drugih vplivov. Na podlagi opravljenih meritev sklepamo, da ni mogoče z gotovostjo trditi, da višji delež polnila nujno povzroča večjo deviacijo rezultatov. Na splošno rezultati nateznega preizkusa potrjujejo ugotovitve upogibnega testa. Z dodajanjem lesne moke se povečujeta togost in trdnost materiala, medtem ko se razteznost ob porušitvi zmanjšuje. S tem postane material bolj tog in manj duktilen. Rezultati nateznega preizkusa potrjujejo pričakovan vpliv dodanega polnila na mehanske lastnosti kompozitov na osnovi ABS. Rezultati tudi potrjujejo, da ni bistvenih razlik med čistim in rABS v mehanskih lastnostih, kar potrjuje možnost ponovne uporabe rABS kot enakovredne surovine za izdelavo WPC.

Pri preučevanju vpliva polnila smo uporabili dve vrsti lesne moke, ki sta se razlikovali tako po vrsti lesa kot po velikosti delcev. Lesna moka 1, pridobljena iz mehkega lesa, je imela bistveno manjše delce, medtem ko je bila lesna moka 2 iz trdega lesa in z večjo povprečno granulacijo. Obe karakteristiki — tip lesa in velikost delcev — imata neposreden vpliv na medfazne interakcije, porazdelitev polnila v matrici in končne mehanske lastnosti kompozita.

Mehki les ima v primerjavi s trdim lesom višjo vsebnost lignina in večjo elastičnost celičnih sten, kar pomeni, da so delci mehkega lesa pogosto bolj prožni in manj krhki. Poleg tega ima mehki les zaradi strukture tudi ugodnejše razmerje med površino in masnim deležem, kar lahko izboljša interakcijo z ABS matrico. Ti dejavniki lahko vodijo do:

- boljših medfaznih interakcij med delci polnila in polimerno matrico,
- manjše verjetnosti krhkih lomov na medfazni meji in
- boljšega prenosa napetosti iz matrice na polnilo.

V kompozitih, kjer vladajo šibke medfazne interakcije (kot pri ABS–les brez kompatibilizatorja), je prav interaktivnost ključna, saj zmanjšuje možnost nastanka mikropraznin na faznih mejah.

Nasprotno pa delci iz trdega lesa zaradi bolj toge celične strukture delujejo bolj krhko, kar poveča možnost nastanka mikrorazpok in lokalnih koncentracij napetosti, še posebej pri višjem deležu polnila.

To se neposredno ujema z rezultati: kompoziti z lesno moko 1 dosegajo višje vrednosti trdnosti in raztezka, medtem ko kompoziti z lesno moko 2 kažejo večjo togost, a hkrati povečano krhkost.

Velikost delcev je eden ključnih dejavnikov, ki določajo lastnosti kompozita. Manjši delci (lesna moka 1) zagotavljajo:

- boljšo disperzijo v matriki,

- večjo specifično površino,
- manjšo verjetnost nastanka aglomeratov,
- bolj enakomeren prenos obremenitev med matrico in polnilom in
- posledično so mehanske lastnosti boljše in rezultati bolj ponovljivi.

Večji delci (lesna moka 2) pa povzročajo:

- slabšo disperzijo,
- večje aglomerate,
- manjšo specifično površino,
- nehomogenosti v notranji strukturi in
- povečano občutljivost na lokalno koncentracijo napetosti.

Zaradi teh dejavnikov so rezultati za lesno moko 2 bolj variabilni, raztezki nižji, kompozit pa bolj krhek - kar je razvidno iz slike 22 in slike 26.

ABS je hidrofobno polimerno vezivo, katerega površina je kemijsko slabo kompatibilna s hidroksilnimi skupinami lignoceluloznih delcev. Ker v našem primeru kompatibilizator ni bil uporabljen, so bile interakcije med ABS in lesno moko večinoma fizikalne, pri čemer najpomembneje vplivajo:

- mehanska adhezija zaradi hrapavosti delcev,
- velikost delcev,
- elastičnost in površinska energija delcev in
- enakomernost disperzije.

Manjši, mehkejši in elastičnejši delci (lesna moka 1):

- se lažje vgradijo v polimerno matrico,
- povzročijo manj votlin in mikrovzeli na medfazni meji,
- zmanjšajo koncentracijo napetosti pri obremenjevanju in
- omogočajo boljši prenos napetosti.

Večji, rigidni delci (lesna moka 2):

- pogosto tvorijo šibke točke v materialu,
- povzročajo predčasno porušitev in
- slabše sodelujejo pri prenosu napetosti.

Vsled tega kompoziti z lesno moko 1 izkazujejo boljše rezultate pri upogibnem in nateznem testiranju, zlasti pri raztezk pri porušitvi.

Primerjava obeh vrst lesne moke jasno kaže, da sta tip lesa in velikost delcev pomembna parametra, ki določata lastnosti kompozita. Lesna moka 1 (mehki les, manjši delci) je zaradi svoje bolj prilagodljive mikrostrukture, večje specifične površine in ugodnejših medfaznih interakcij omogočila boljšo disperzijo, višjo trdnost in večjo razteznost kompozitov. Lesna moka 2 (trdi les, večji delci) je prispevala k večji togosti, vendar tudi k večji krhkosti in večji variabilnosti rezultatov.

Medfazne interakcije so glavni faktor, ki vpliva na mehanske lastnosti kompozitov, saj v odsotnosti kompatibilizatorja odločilno vplivajo predvsem geometrija delcev, elastičnost materiala, površinska hrapavost in enakomernost disperzije.

Zaključki so skladni z mehanizmi vedenja lignoceluloznih polnil v termoplastičnih matricah in potrjujejo, da sta vrsta lesa in velikost delcev polnila bistveno pomembnejša od tega, ali je bila uporabljena primarna ali reciklirana ABS matrica.

4.2 Žilavost po Charpyju

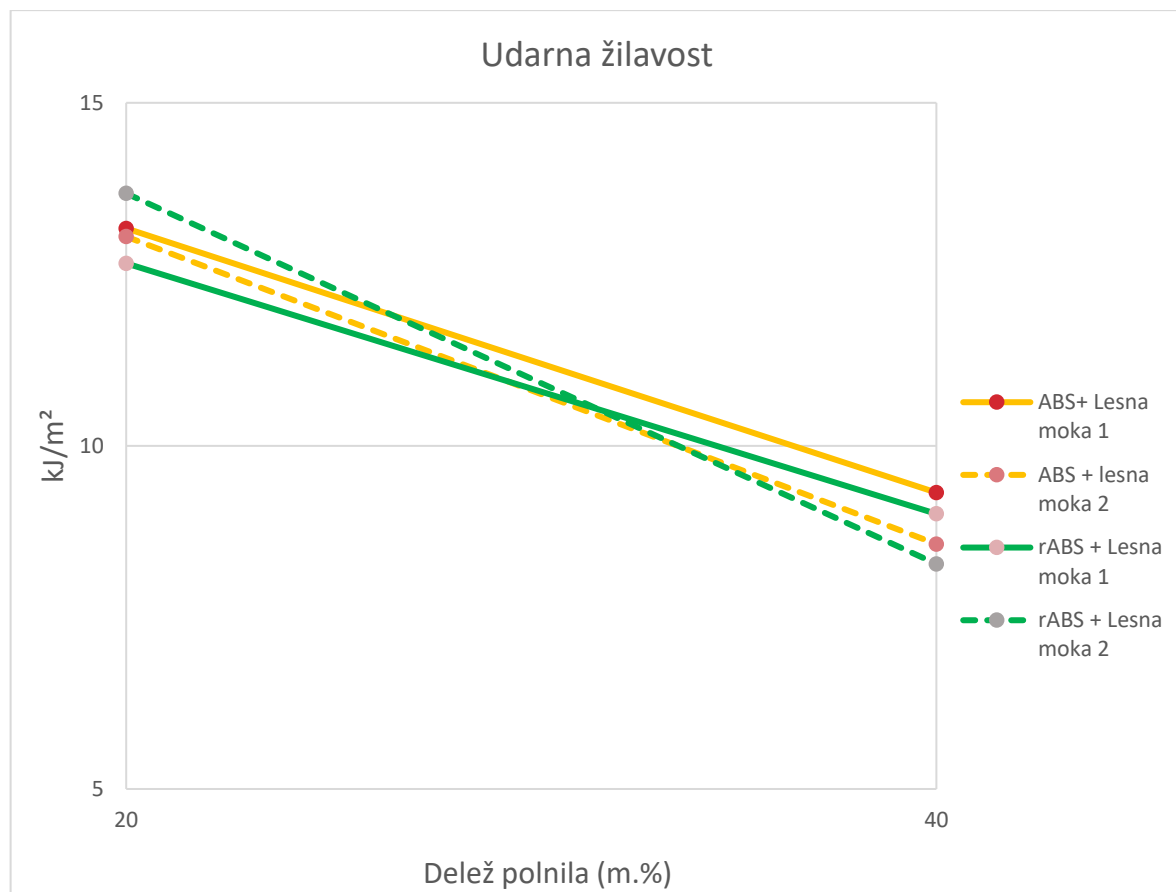
Pri Charpyjevem testu smo pripravili skupno dvajset preizkušancev iz vsakega vzorca. Deset preizkušancev smo uporabili za Charpyjev test brez zareze, deset preizkušancev pa za zarezo udarno žilavost. V tabeli 9 so prikazane povprečne vrednosti in standardne deviacije za testirane vzorce.

Tabela 9: Charpy test – udarna žilavost in zarezna udarna žilavost

Številka vzorca	Udarna žilavost (kJ/m ²)	Standardna deviacija (kJ/m ²)	Zarezna udarna žilavost (kJ/m ²)	Standardna deviacija (kJ/m ²)
822_2025_0193_01	Brez loma	0	24,0	0,7
822_2025_0193_02	13,2	1,4	4,1	0,1
822_2025_0193_03	9,3	0,7	2,9	0,1
822_2025_0193_04	13,1	1,1	5,5	0,2
822_2025_0193_05	8,6	0,6	3,5	0,1
822_2025_0193_06	Brez loma	0	25,3	0,9
822_2025_0193_07	12,7	0,9	3,9	0,1
822_2025_0193_08	9,0	0,3	2,7	0,1
822_2025_0193_09	13,7	1,3	5,8	0,2
822_2025_0193_10	8,3	0,8	3,5	0,1

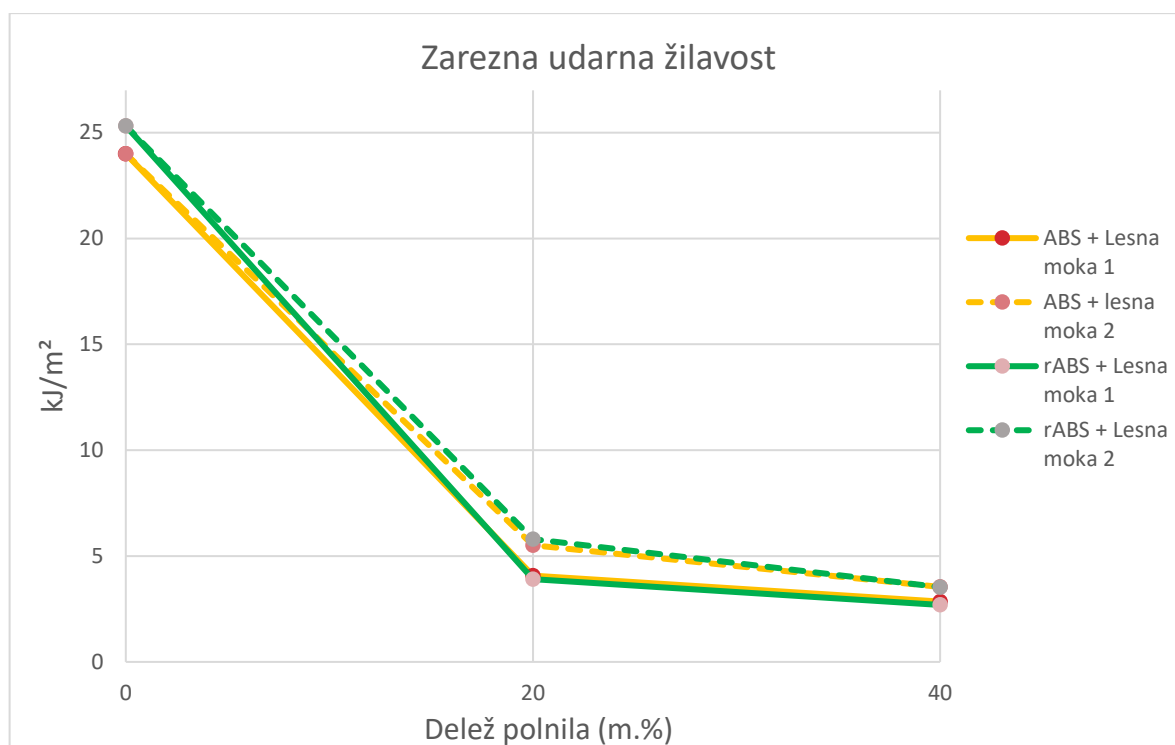
Iz dobljenih rezultatov smo ugotovili, kako vsebnost polnila vpliva na udarno žilavost materiala. Pri čistem ABS in rABS ni prišlo do loma preizkušanca, medtem ko z dodatkom polnila material postaja bolj krhek, zmanjšuje se sposobnost absorpcije energije.

Ugotovimo lahko, da so povprečne vrednosti med vzorci z enakim masnim deležem polnila in isto vrsto lesne moke zelo podobne. Vrednosti brez dodane lesne moke niso prikazane na grafu, saj ni prišlo do loma. To je razvidno iz grafa na sliki 27.



Slika 27: Udarne žilavost po Charpy-ju

Pri zarezni udarni žilavosti vidimo, da so vrednosti vzorcev z enakim deležem polnila skoraj identični. To pomeni, da vrsta polnila bistveno ne vpliva na zarezno udarno žilavost, vpliva pa vsebnost polnila. Na sliki 28 vidimo vrednosti zarezne udarne žilavosti v odvisnosti od deleža polnila.



Slika 28: Zarezna udarna žilavost

Pri čistih polimerih (vzorci 822_2025_0193_01 in 822_2025_0193_06) ni prišlo do loma preizkušancev. To kaže na izrazito duktilno obnašanje ABS in rABS, ki sta pri udarnem obremenjevanju sposobna absorbirati znatno količino energije, preden pride do porušitve. Ta ugotovitev ponovno potrjuje, da med ABS in rABS ni pomembnih razlik v mehanskem obnašanju, kar je skladno z rezultati upogibnih in nateznih preizkusov.

Z dodajanjem lesne moke kompozit izgubi duktilnost in postane izrazito bolj krhek. Večji delež lesnega polnila zmanjša sposobnost materiala, da absorbira energijo med hitrim obremenjevanjem, kar je razvidno iz upada udarne žilavosti.

Razlogi za zmanjšanje udarne žilavosti pri dodajanju lesne moke so naslednji:

- Oslabljen medfazne interakcije ABS – lesna moka. Ker kompatibilizator ni bil uporabljen, je interakcija med hidrofilnim lesnim polnilom in hidrofobno ABS matrico zelo šibka. To vodi v nastanek mikropraznin na medfazni meji, ki delujejo kot iniciatorji razpoka.
- Lesni delci delujejo kot "trde točke". Lesno polnilo prevzema obremenitev manj učinkovito kot ABS matrica. Ob udarnem nihanju delci delujejo kot koncentradorji napetosti, kar pospeši začetek in širjenje razpoke.
- Krhkost lignoceluloznih delcev pod udarnim obremenjevanjem. Les pri hitri obremenitvi pokaže bistveno večjo krhkost kot polimerni materiali, zato kompozit izgubi duktilno energijsko absorpcijsko sposobnost.

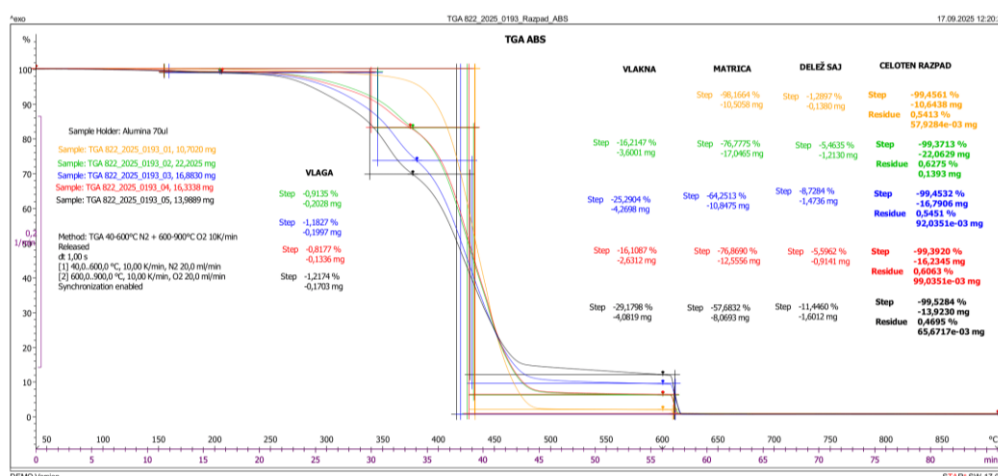
Pri udarni žilavosti (brez zareze) je razlika med tipoma lesne moke opazna, pri zarezni udarni žilavosti pa razlika skoraj izgine.

Pri udarni žilavosti brez zareze ima velikost delcev vpliv na rezultate. Manjši delci lesne moke 1 se boljše dispergirajo v polimerni matrici, zaradi tega nastanejo manjše lokalne napetosti, zaradi katerih je možnost za porušitev manjša. Pri večjih delcih moke 2 pa lahko pride do nastanka mikropraznin in mest kjer je večja napetost. To povzroči večjo krhkost materiala. Zaradi tega so kompoziti iz lesne moke 1 dosegali nekoliko višje udarne žilavosti. V obeh primerih pa polnilo bistveno poslabša sposobnost absorpcije energije, torej material postane bolj krhek.

Pri zarezni udarni žilavosti vrsta lesa skoraj ne vpliva na vrednosti, razlog je v tem, da je pri zarezni udarni žilavosti na preizkušancu že ustvarjeno mesto, kjer je prisotna kritična začetna zarezna defekt. Zaradi tega je v tem delu preizkušanja lokalna koncentracija napetosti in je to glavni mehanizem porušitve, kriterij porušitve je odvisen predvsem od tega, kako dobro matrica prenese razpoko, zaradi tega je vpliv velikosti in tipa delcev sekundaren. Šibka medfazna vez ABS-les povzroči skoraj enak mehanizem porušitve, ne glede na tip lesa. Zato se vrednosti zarezne udarne žilavosti med lesno moko 1 in lesno moko 2 skoraj ne razlikujejo, porušitev poteka praktično identično.

4.3 Termogravimetrična analiza (TGA)

S pomočjo TGA smo analizirali, kako so sestavljeni vzorci, kolikšen je bil delež polnila, polimerne matrice in morebitnih drugih dodatkov. Prav tako smo preverili, kdaj je prišlo do degradacije posameznega sestavnega dela. Za primerjavo smo rezultate prikazali ločeno, na enem diagramu so vsi vzorci, ki vsebujejo čisti ABS kot matrico (slika 29), na drugem pa so tisti, ki vsebujejo rABS (slika 31). To omogoča neposredno primerjavo termičnega obnašanja materialov z različnima matricama.



Slika 29: Prikazuje TGA graf za razpad vzorcev, ki vsebujejo čisti ABS

Na grafu smo prikazali vzorce, kjer smo uporabili čisti ABS kot polimerno matrico. Ugotovili smo, da so vsi vzorci, ki so vsebovali lesno moko, vezali določeno količino

vode, medtem ko pri čistem ABS vlaga ni bila prisotna. Takšno obnašanje potrjujejo tudi podatki iz literature [17], kjer je navedeno, da je lesna moka močno higroskopična in da se lahko vlaga, kljub predhodnemu sušenju, pojavi tudi v končnih izdelkih. Zaradi tega je bistvenega pomena, da se lesna moka pred predelavo ustrezno posuši, saj lahko vlaga negativno vpliva na končne lastnosti kompozita. Na grafu smo dodatno prikazali delež lesne moke, delež polimerne matrice ter delež saj v kompozitu, pri čemer so vrednosti posameznih razpadov podane v tabeli 10.

Tabela 10: Razpad TGA čisti ABS in vsebnost posameznih komponent

Številka vzorca	Vsebnost vlage (m.%)	Prvi razpad (m.%)	Drugi razpad (m.%)	Delež saj (m.%)	Anorganski ostanek (m.%)
822_2025_0193_01	0,00	0,00	98,17	1,29	0,54
822_2025_0193_02	0,91	16,21	76,78	5,46	0,64
822_2025_0193_03	1,18	25,29	64,25	8,73	0,55
822_2025_0193_04	0,82	16,10	76,87	5,60	0,61
822_2025_0193_05	1,22	29,18	57,68	11,45	0,47

Iz podatkov je razvidno, kolikšen delež vlage je bil prisoten v posameznih vzorcih. Ker se je vrednost gibala okoli 1 m.%, lahko sklepamo, da smo kompozitne materiale ustrezno pripravili. Znano je namreč, da pri nezadostno osušeni lesni moki lahko vsebnost vlage naraste, kar negativno vpliva na končne lastnosti kompozita.

Prvi razpadni korak, opažen na TGA-krivuljah, ni neposredno povezan z masnim deležem lesne moke v kompozitu. Lesna moka se namreč v tem temperaturnem območju ne razgradi v celoti, hkrati pa v razpad že delno vstopi tudi polimerna matrica ABS. Posledično je prvi razpadni interval rezultat prekrivanja razpadnih procesov obeh komponent, zato njegove intenzitete ni mogoče neposredno povezovati z vsebnostjo lesnih vlaken v materialu.

Zaradi omenjenega prekrivanja termičnih razpadov interpretacija prvega razpadnega koraka ne omogoča zanesljive kvantifikacije deleža lesne moke v kompozitu. Natančnejšo oceno dejanske vsebnosti polnila je zato mogoče izvesti šele na podlagi preostanka deleža saj pri višjih temperaturah, kjer je razpad lesne komponente praktično zaključen.

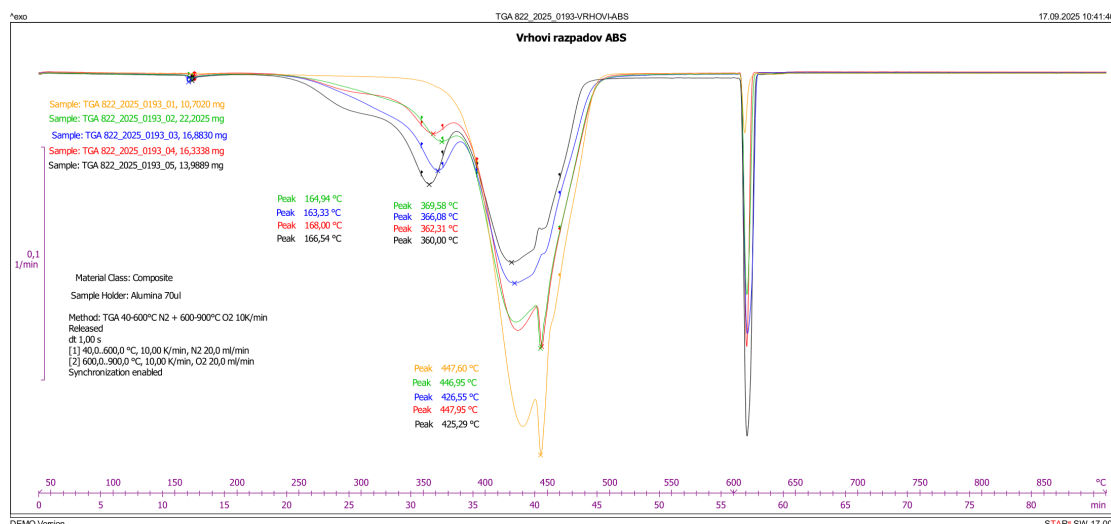
Če primerjamo delež saj, ki ostane lahko vidimo, da je pri vzorcih, ki vsebujejo 20 m.% polnila vrednost skoraj identična, iz česa lahko sklepamo, da sta ta dva vzorca vsebovala enak delež polnila, če primerjamo vzorca, ki bi naj vsebovala 40 m.% polnila pa vidimo, da se vrednosti precej razlikujeta. Iz samih vrednosti sklepamo, da je imel vzorec 822_2025_0193_03 okoli 40 m.% polnila, če primerjamo glede na prejšnja dva vzorca, vzorec 822_2025_0193_05 pa je vseboval več kot 40 m.% polnila, saj je vseboval bistveno več saj.

Takšna razlaga dodatno potrjuje, da za določanje dejanskega masnega deleža lesne moke v ABS-kompozitih ni smiselno izhajati iz prvega razpadnega koraka, temveč iz

celotne TGA-krivulje in ostanka saj. Ta pristop omogoča bolj zanesljivo primerjavo med načrtovano in dejansko sestavo preiskanih kompozitnih materialov.

Ker se vsebnost matrice obnaša obratno sorazmerno z vsebnostjo vlaken, se je z večanjem deleža polnila zmanjševal delež polimerne matrice. Opazili smo tudi, da se delež saj povečuje z večanjem deleža lesne moke, kar je skladno s pričakovanji in potrjeno z rezultati.

Na koncu smo ugotovili, da v kompozitih ostane približno 0,5 m.% nerazgradljivih ostankov, ki jih pripisujemo mineralnim sestavinam lesa, saj se pri temperaturah našega eksperimenta ne razgradijo. Sestave vzorcev so v skladu s pričakovanji, največje odstopanje smo opazili pri dejanski vsebnosti vlaken, ki je bistveno odstopala od želene. Na sliki 30 je prikazan spekter razpadov vzorcev kompozitov na osnovi čistega ABS.



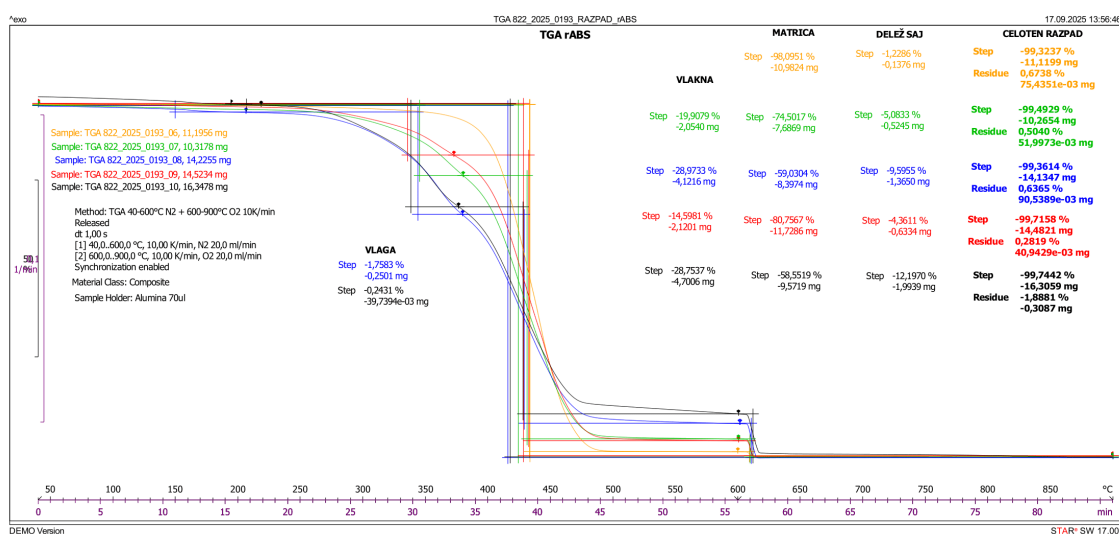
Slika 30: Diagram prikazuje vrhove razpadov različnih sestavnih delov kompozitov iz čistega ABS

Iz diagrama je razvidno, da se pri razpadu pojavljajo trije izraziti vrhovi. Prvi vrh se pojavi pri temperaturi približno 165°C, kar predstavlja temperaturo, pri kateri voda, prisotna v kompozitnem materialu, izhlapeva. Čeprav bi lahko pričakovali, da bo ta temperatura bližje vrelišču vode, je zaradi vezave vlage na lesno moko potrebna višja temperatura, da voda dejansko izhlapi iz vzorca.

Drugi vrh je zaznan pri temperaturi okoli 364°C. Ta vrh označuje temperaturo, pri kateri lesna moka razpade v polimerni matrici. Opazimo, da se ta temperatura med posameznimi vzorci bistveno ne razlikuje, kar kaže na podobno termično stabilnost lesne moke ne glede na vrsto kompozita.

Tretji, zadnji vrh pa je povezan z razpadom polimerne matrice. Čisti ABS razpada pri temperaturi približno 447 °C. Pri vzorcih, ki vsebujejo 40 m.% lesne moke, je ta temperatura nekoliko nižja, okoli 426 °C. Rezultatski trendi so skladni z znanimi termičnimi obnašanji kompozitov na osnovi ABS z naravnimi vlakni, kjer večja vsebnost polnila povzroči rahlo znižanje temperature razpada zaradi zmanjšane toplotne stabilnosti matrice.

Na podoben način smo proučili razpad kompozitnih materialov, ki so imeli za osnovo rABS in rezultate primerjali, da bi ugotovili morebitne razlike v primerjavi s kompoziti iz čistega ABS. Na sliki 31 je prikazan TGA graf za vzorce, pri katerih je bila uporabljena polimerna matrica rABS.



Slika 31: Prikazuje TGA graf za razpad vzorcev, ki vsebujejo rABS

V primerjavi z vzorci, kjer smo uporabili čisti ABS, smo vsebnost vode pri vzorcih iz rABS zaznali le pri dveh vzorcih. To sta bila vzorca, ki sta vsebovala 40 m.% polnila. To kaže, da je bilo polnilo pri vzorcih iz rABS bolj suho in smo vlago zaradi tega zaznali samo pri dveh vzorcih. Vrednosti posameznih komponent kompozitov na osnovi rABS so prikazane v tabeli 10.

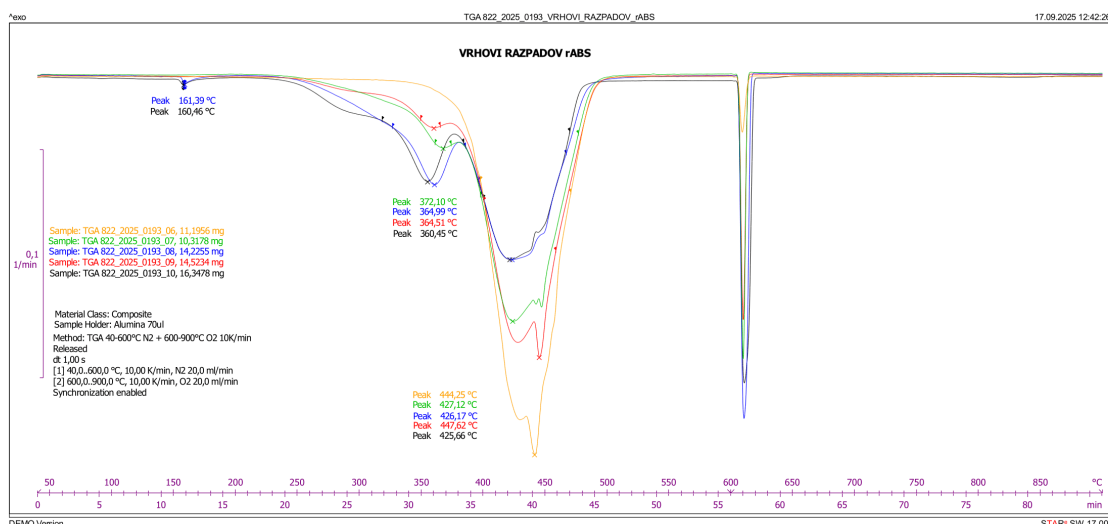
Tabela 11: Razpad TGA rABS in vsebnost posameznih komponent

Številka vzorca	Vsebnost vlage (m.%)	Prvi razpad (m.%)	Drugi razpad (m.%)	Delež saj (m.%)	Anorganski ostanek (m.%)
822_2025_0193_06	0,00	0,00	98,10	1,23	0,67
822_2025_0193_07	0,00	19,91	74,50	5,08	0,51
822_2025_0193_08	1,76	28,97	59,03	9,60	0,64
822_2025_0193_09	0,00	14,60	80,76	4,36	0,28
822_2025_0193_10	0,24	28,75	58,55	12,20	0,26

Iz tabele je razvidno, da so ti vzorci vsebovali manj vlage kot vzorci, kjer je bil uporabljen čisti ABS. Kar zadeva vsebnost vlaken, smo pri vzorcu 822_2025_0193_07 uspeli doseči skoraj želeno vrednost. Pri vzorcu 822_2025_0193_09 pa je vrednost precej odstopala od želene – lahko potrdimo, da se je pojavila enaka težava kot pri kompozitih na osnovi čistega ABS-a, in sicer je bila vsebnost polnila manjša od nastavljenega.

Delež saj in vsebnost matrice sta odvisna od količine polnila – več, kot je bilo polnila, več je bilo tudi saj, polimerne matrice pa manj. Razen razlike v vsebnosti vlage, nismo opazili bistvenih razlik med kompoziti s čistim ABS in rABS.

Preučili smo vrhove razpadov posameznih komponent kompozitov in jih primerjali z vrhovi pri čistih ABS-kompozitih, da bi ugotovili, ali obstaja kakšna razlika v temperaturi razpada. Na sliki 32 je prikazan diagram vrhov razpada komponent v vzorcih, narejenih na osnovi rABS-a.



Slika 32: Diagram prikazuje vrhove razpadov različnih sestavnih delov kompozitov iz rABS

Iz prikazanega diagrama smo razbrali, da je bila temperatura razpada vode v vzorcih približno 161 °C, temperatura razpada vlaken okoli 365 °C, medtem ko je temperatura razpada polimerne matrice znašala približno 434 °C. Čeprav smo zaznali manjše razlike v temperaturah razpadov, so bile te zanemarljive, zato predpostavljamo, da se temperature razkroja med kompoziti na osnovi čistega ABS in rABS bistveno ne razlikujejo.

Ključna ugotovitev TGA-analize je, da je natančna določitev dejanske vsebnosti lesne moke v kompozitih otežena zaradi prekrivanja termičnega razpada lesnih vlaken in polimerne matrice ABS. Zaradi sočasnega razpada obeh komponent masnega deleža polnila ni mogoče zanesljivo določiti neposredno iz razpadnih korakov TGA-krivulj.

Kljub temu je na podlagi preostanka mase, ki ustreza vsebnosti saj, mogoče oceniti razmerja med posameznimi vzorci in preveriti, ali ta sledijo predvideni sestavi.

Rezultati kažejo, da se vsebnost saj med analiziranimi vzorci bistveno razlikuje. Vzorci s predvideno vsebnostjo 20 m.% polnila izkazujejo relativno majhna odstopanja, kar kaže na primerljivo in med seboj podobno vsebnost lesnih vlaken. Nasprotno pa so pri vzorcih s predvideno vsebnostjo 40 m.% polnila opažena večja odstopanja v dejanski vsebnosti vlaken, kar je mogoče pripisati neustreznemu kompavndiranju lesnih vlaken v polimerno matrico.

Kljub omenjenim razlikam v vsebnosti polnila vsi preučevani kompoziti izkazujejo termično stabilnost v temperaturnem območju, značilnem za ABS, in sicer med približno 350 in 450 °C. To potrjuje, da dodatek lesnih vlaken ni bistveno poslabšal toplotne stabilnosti kompozitnih materialov.

Poleg tega rezultati kažejo, da je reciklirana matrica rABS termično primerljiva s čisto matrico, kar je izjemno pomembno z vidika ponovne uporabe materialov. Odsotnost večjih razlik v temperaturah razpada potrjuje, da proces reciklaže ni bistveno vplival na strukturo polimera in s tem na njegovo toplotno stabilnost.

Slabe medfazne interakcije med ABS in lesom na splošno vodijo k poroznosti na medfazni meji, slabšemu prenosu toplote, možnosti lokalnega pregrevanja in nižji temperaturi razpada matrice v močno polnjenih kompozitih.

Ker sta oba tipa lesne moke hidrofilna, ABS pa je hidrofoben, se pričakovano ne tvori kemičnih vezi ali močnih fizikalnih interakcij. Zato tudi ni razlike v stabilnosti med mehkim in trdim lesom, velikost delcev vpliva predvsem na disperzijo, ne na temperaturo razpada, pri 40 m.% polnila pride do padca stabilnosti matrice.

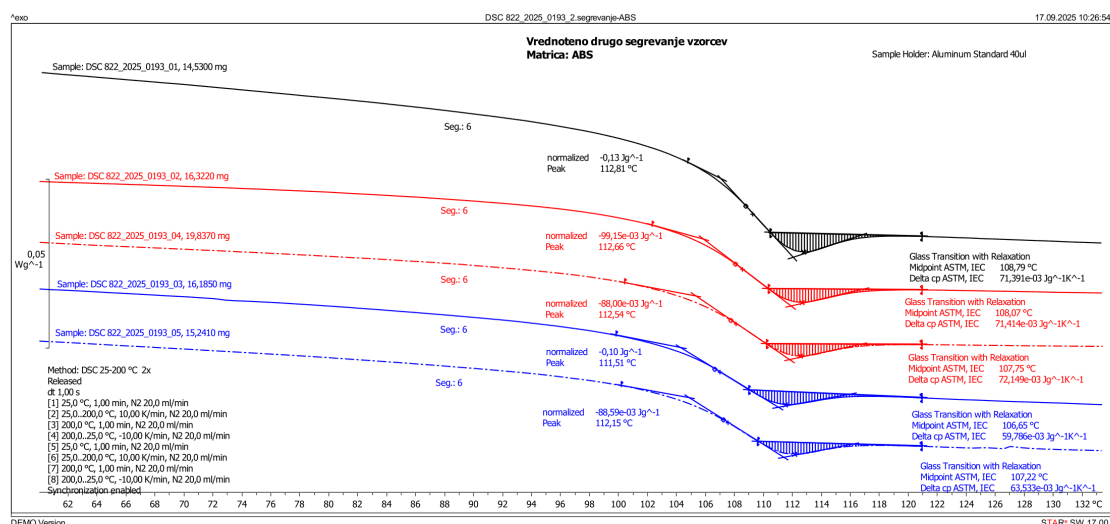
Vrsta lesa nima pomembnega vpliva na TGA rezultate, velikost delcev vpliva predvsem na homogenost, dejanska izmerjena vsebnost vlaken je bila nižja od želene, kar je tipično za naravne kompozite, termična stabilnost kompozita se pri 40 m.% nekoliko zniža, rABS in ABS sta termično skoraj identična, kar kaže na dobro možnost uporabe rABS kot trajnostne matrice za lesno-polimerne kompozite. Medfazne interakcije so šibke, kar potrjuje odsotnost razlik med vrstami lesa.

4.4 Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC)

Diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) smo uporabili za toplotno karakterizacijo vzorcev, z namenom določiti temperaturo steklastega prehoda in preveriti morebitni vpliv dodanega polnila na toplotne lastnosti. Poleg tega nas je pri DSC analizi zanimalo, ali so bili v posameznih vzorcih, zlasti tistih iz rABS-a, prisotni sledovi nečistoč. Pri recikliranih materialih namreč obstaja večja verjetnost kontaminacije z drugimi polimeri, ki bi jih bilo možno zaznati z DSC metodo.

Izvedli smo DSC analizo vseh deset vzorcev. Vse vzorce na osnovi čistega ABS-a smo analizirali skupaj na enem skupnem diagramu, prav tako smo na ločenem diagramu obravnavali vse vzorce na osnovi rABS-a. Na ta način smo obravnavali le dva grafa, iz katerih smo določali temperaturo steklastega prehoda in morebitno prisotnost dodatnih faz ali nečistoč.

Na sliki 33 je prikazan DSC diagram vseh vzorcev na osnovi čistega ABS.



Slika 33: DSC diagram drugega segrevanja vzorcev na osnovi čistega ABS

Za vrednotenje rezultatov smo uporabili zgolj diagrame drugega segrevanja materiala. Kot je znano, se med prvim segrevanjem in ohlajanjem iz materiala izniči t. i. "toplotni odtis", ki izvira iz njegove proizvodnje. Zato je za naše potrebe ključno prav drugo segrevanje, saj pri njem material ne nosi več pretekle toplotne zgodovine, kar omogoča zanesljivejšo primerjavo vzorcev.

Na diagramu so prikazane krivulje vseh vzorcev na osnovi čistega ABS. Zgornja, črna krivulja predstavlja referenčni vzorec čistega ABS-a, pri katerem smo izmerili temperaturo steklastega prehoda 108,8 °C.

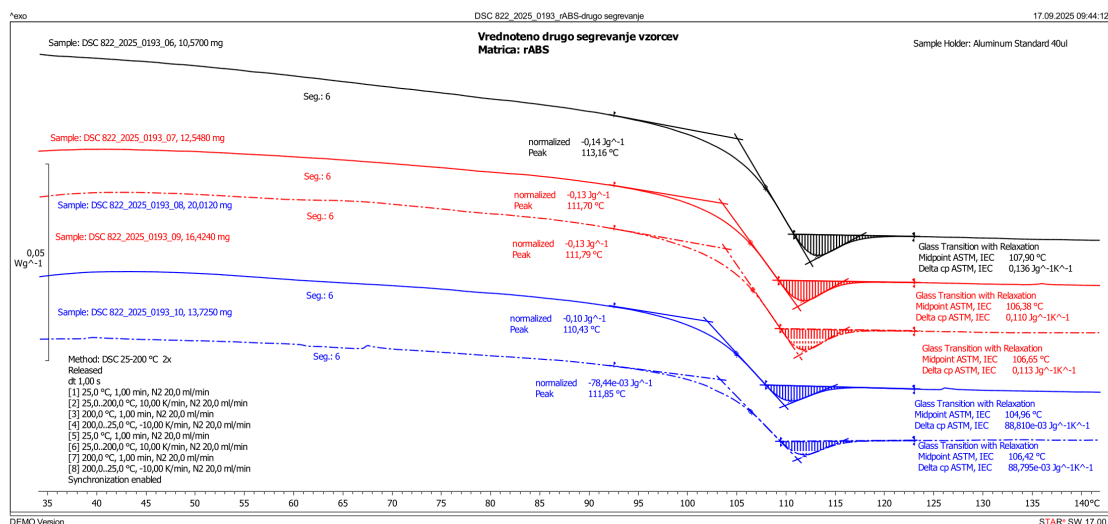
Sledi krivulja za vzorec 822_2025_0193_02, ki vsebuje 20 m. % lesne moke 1, kjer smo izmerili temperaturo steklastega prehoda 108,1 °C. Nadalje smo pri vzorcu 822_2025_0193_04, z 20 m. % lesne moke 2, zabeležili temperaturo 107,8 °C.

Modra krivulja pripada vzorcu 822_2025_0193_03, ki vsebuje 40 m. % lesne moke 1, pri katerem je bila temperatura steklastega prehoda 106,7 °C. Zadnji vzorec, 822_2025_0193_05, s 40 m. % lesne moke 2, je imel temperaturo steklastega prehoda 107,2 °C.

Iz diagramov je razvidno, da se pri vseh vzorcih pojavi le en steklasti prehod, kar pomeni, da kompozitni materiali ne vsebujejo drugih polimernih komponent. V

nasprotnem primeru bi zaznali dodatne prehode. Lahko tudi zasledimo, da se z dodajanjem polnila temperatura steklastega prehoda rahlo znižuje, vendar spremembe niso signifikantne. Največje odstopanje smo zaznali pri vzorcu 822_2025_0193_03, kjer je bil padec temperature približno 2 °C v primerjavi z nepolnjenim ABS-om.

Na sliki 34 je prikazana DSC analiza vzorcev na osnovi rABS. Pri teh kompozitih smo bili še posebej pozorni na pojav dodatnih temperaturnih prehodov, ki bi lahko nakazovali prisotnost nečistoč ali drugih polimerov v recikliranem materialu.



Slika 34: DSC diagram drugega segrevanja vzorcev na osnovi rABS

Diagrame smo analizirali na enak način kot pri prejšnjih vzorcih. Prva, črna krivulja pripada vzorcu 822_2025_0193_06, pri katerem smo izmerili temperaturo steklastega prehoda 107,9 °C. Druga krivulja pripada vzorcu 822_2025_0193_07, kjer je bila temperatura steklastega prehoda okoli 106,4 °C.

Naslednja krivulja pripada vzorcu 822_2025_0193_09, pri katerem smo temperaturo steklastega prehoda izmerili pri 106,7 °C. Vzorec 822_2025_0193_08 je imel temperaturo steklastega prehoda 105,0 °C. Zadnji analizirani vzorec je bil 822_2025_0193_10, pri katerem je bila temperatura steklastega prehoda 106,4 °C.

Iz diagramov je razvidno, da vzorci na osnovi rABS niso vsebovali nečistoč v obliki drugih polimernih materialov, saj bi se v tem primeru pojavili dodatni temperaturni prehodi.

Rezultati DSC analize prav tako potrjujejo, da je reciklirani ABS termično primerljiv s čistim ABS, zato je njegova ponovna uporaba pri pripravi WPC mogoča tako z vidika predelovalnih lastnosti kot tudi termične stabilnosti.

Znižanje T_g je relativno majhno, predvsem zaradi slabe kompatibilnosti lignoceluloznega polnila z ABS matrico. Medfazne interakcije so zato šibke, kar

pomeni, da lesna moka ne deluje kot plastifikator, temveč predvsem kot pasivno polnilo. Razlog, da je vpliv bolj opazen pri lesni moki mehkega lesa, je večja specifična površina in večja prisotnost hemiceluloze, ki je bolj higroskopna. To lahko povzroči mikrolokalno znižanje T_g , vendar je vpliv še vedno minimalen, kar je skladno s pričakovanji za WPC kompozite brez površinske modifikacije polnil.

DSC analiza potrjuje, da dodatek polnila ne glede na vrsto lesa le rahlo zniža T_g , da razlike med mehкими in trdimi vrstami lesa izhajajo predvsem iz velikosti delcev in njihove specifične površine ter da sta tako ABS kot rABS termično stabilna in homogena. Pri rABS nismo zaznali nečistoč, kar potrjuje ustreznost materiala za ponovno predelavo in uporabo.

5 SKLEP

Glavni cilj magistrskega dela je bil preučevanje vpliva polnila, lesne moke, na mehanske in toplotne lastnosti v kompozitih na osnovi ABS. Zastavili smo hipotezo, da se bodo z višanjem masnega deleža polnila spremenile mehanske lastnosti kompozitov. To hipotezo smo potrdili, saj so rezultati mehanske analize (natezni test, upogibni test, Charpyjev preizkus) pokazali, da se z dodajanjem polnila mehanske lastnosti spreminjajo. Prav tako smo opazili, da se z višanjem deleža lesne moke izboljša odpornost proti deformaciji, hkrati pa se poveča krhkost kompozita.

Predpostavili smo tudi, da bodo mehanske lastnosti kompozitov na osnovi recikliranega ABS (rABS) slabše od tistih, kjer smo kot matrico uporabili čisti ABS. To hipotezo smo ovrgli, saj iz meritev ni bilo razvidnih bistvenih razlik med vzorci z matrico iz čistega ABS in rABS. Hipoteza, da bo predelava vzorcev težja pri višji vsebnosti polnila, se je izkazala za pravilno. Težave pri predelavi so se pojavile predvsem pri ekstrudiranju, kjer je bila talina kompozitov pri ohlajanju s 40 m.% lesne moke zaradi visoke vsebnosti vlaken zelo krhka. Pri vzorcih z visoko vsebnostjo lesne moke smo imeli precej težav pri pripravi granulata. Imeli smo tudi nekaj težav pri brizganju vzorcev; pri vzorcih z 40 m.% lesne moke so dolivki ostajali na dolivni strani orodja, kar smo morali ročno odstranjevati. Pri ostalih recepturah teh težav ni bilo, zato smo glede predelave pravilno postavili hipotezo.

V magistrskem delu smo ugotovili, da se upogibni E modul, maksimalna upogibna trdnost, natezni E modul in natezna trdnost izboljšajo z dodatkom lesne moke. Večji, kot je delež polnila, bolj se te lastnosti povečajo. Nasprotno pa se obnašajo upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti, upogibni raztezek pri porušitvi, natezni raztezek pri natezni trdnosti in natezni raztezek pri pretrgu. Te lastnosti se poslabšajo, kar pomeni, da je raztezek ob porušitvi manjši zaradi dodatka polnila. Material postane bolj odporen proti deformaciji in bolj krhek.

Primerjava polimernih matric je pokazala, da med čistim ABS in rABS ni opaznih razlik v mehanskih lastnostih, toplotnih značilnostih ali termični stabilnosti. Rezultati potrjujejo, da je rABS primeren za ponovno uporabo v WPC kompozitih, saj reciklaža ni bistveno vplivana strukturo polimera, T_g ali termično stabilnost. Mehki les je nekoliko bolj kompatibilen z ABS matrico, kar omogoča malenkost boljše mehanske lastnosti, verjetno zaradi večje specifične površine in izboljšane disperzije polnila. Trdi les daje nekoliko nižje vrednosti raztezka in žilavosti, kar je povezano z večjo krhkostjo in manjšo interaktivnostjo z matrico. Pri čistem ABS in rABS ni prišlo do loma, medtem ko dodatek polnila zmanjšuje udarno žilavost in zarezno udarno žilavost, kar potrjuje povečano krhkost kompozitov. Vpliv vrste lesa na zarezno udarno žilavost ni bil izrazit, kar nakazuje, da je primarni dejavnik krhkosti vsebnost polnila, medtem ko velikost delcev vpliva predvsem na lokalne mehanske lastnosti. Vsi vzorci so vsebovali okoli 1 m.% vlage ali manj, kar potrjuje ustrezno pripravo in sušenje lesne moke. Dejanska vsebnost polnila v kompozitih je nekoliko nižja od načrtovane, predvsem pri 40 m.% polnila, kar je posledica aglomeracije vlaken med ekstrudiranjem. Vpliv polnila na

termično stabilnost je minimalen, vsi kompoziti ostajajo stabilni v območju tipičnem za ABS. rABS kompoziti so termično primerljivi s čistim ABS, brez opaznih razlik v temperaturi razpada ali prisotnosti tujih faz (kontaminacije). Vsi kompoziti imajo en sam steklasti prehod, kar kaže na odsotnost drugih polimernih komponent. Temperatura steklastega prehoda rahlo upade z naraščajočim deležem polnila, kar je posledica omenjenega vpliva polnila na lokalno mobilnost verig. Mehki les povzroča rahlo večje znižanje T_g kot trdi les, kar ustreza večji specifični površini in boljšemu medfaznemu stiku. rABS se obnaša podobno kot čisti ABS, kar potrjuje primernost recikliranega materiala za izdelavo WPC.

Mehanski in termični rezultati skupaj kažejo, da kompoziti postajajo togi in krhki z naraščajočim deležem polnila, medtem ko kakovost matrice nima pomembnega vpliva. Medfazne interakcije med ABS matrico in lesnim polnilom so prisotne, vendar šibke. Mehki les omogoča nekoliko boljšo interaktivnost, kar se odraža v nekoliko boljših mehanskih lastnostih. Izbira tipa lesa, velikost delcev in delež polnila so pomembni za optimizacijo lastnosti WPC kompozitov.

Rezultati mehanskih in termičnih lastnosti kažejo, da uporaba recikliranih polimerov v kompozitnih materialih ne pomeni nujno kompromisa v kakovosti, temveč ponuja priložnost za okoljsko in ekonomsko učinkovitejšo proizvodnjo. Z delom smo potrdili, da ima reciklirani ABS z ustreznim dodatkom naravnih vlaken primerljive lastnosti kot čisti ABS.

Iz rezultatov vidimo vpliv dodatka lesne moke na mehanske lastnosti kompozitov. V nadaljevanju bi bilo smotno preučiti, kako vpliva velikost delcev na mehanske lastnosti, če bi se pojavile kakšne težave pri predelavi ter možnost brizganja vzorcev z večjim aspektnim razmerjem. Poleg tega bi bilo smiselno preučiti vpliv različnih kompatibilizatorjev na mehanske lastnosti lesnih kompozitov ter ugotoviti, kako lahko na ta način izboljšamo materialne lastnosti.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] E.R. Larson, Why Use Plastic?, in: Thermoplastic Material Selection, Elsevier, 2015: pp. 19–56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31299-8.00002-7>.
- [2] Y.P. Shaik, N.K. Naidu, V.R. Yadavalli, M.R. Muthyala, The Comparison of the Mechanical Characteristics of ABS Using Three Different Plastic Production Techniques, OAlib 10 (2023) 1–18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1110097>.
- [3] C. Veres, M. Tănase, A Bibliometric and Systematic Review of the Use of Recycled Composite Materials with an Emphasis on the Mechanical Performance of Structures, Materials 18 (2025) 607. <https://doi.org/10.3390/ma18030607>.
- [4] GENERAL POLYMERS, STRUCTURE, PROPERTIES AND APPLICATIONS: A REVIEW, MINAR International Journal of Applied Sciences and Technology 07 (2025). <https://doi.org/10.47832/2717-8234.22.15>.
- [5] V. Causin, Polymers: An Overview, in: Polymers on the Crime Scene, Springer International Publishing, Cham, 2015: pp. 9–52. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15494-7_2.
- [6] H. Kricheldorf, Polycondensation, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39429-4>.
- [7] S. Beck, R. Narain, Polymer synthesis, in: Polymer Science and Nanotechnology, Elsevier, 2020: pp. 21–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00003-0>.
- [8] D. V. Rosato, D. V. Rosato, M. V. Rosato, PLASTIC PROPERTY, in: Plastic Product Material and Process Selection Handbook, Elsevier, 2004: pp. 40–129. <https://doi.org/10.1016/B978-185617431-2/50005-0>.
- [9] M.E.. Adams, Acrylonitrile-butadiene-styrene polymers, Rapra Technology, 1993.
- [10] E. ÇETİN, O.T. TÜRKAN, Material recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) from wiring devices using mechanical recycling, Sustainable Chemistry for the Environment 6 (2024) 100095. <https://doi.org/10.1016/j.sscenv.2024.100095>.
- [11] S.K. Selvamani, M. Samykano, S.R. Subramaniam, W.K. Ngui, K. Kadirgama, G. Kanagaraj, M.S. Idris, 3D printing: Overview of ABS evolvement, in: 2019: p. 020041. <https://doi.org/10.1063/1.5085984>.
- [12] E. ÇETİN, O.T. TÜRKAN, Material recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) from wiring devices using mechanical recycling, Sustainable Chemistry for the Environment 6 (2024) 100095. <https://doi.org/10.1016/j.sscenv.2024.100095>.

-
- [13] P. Sivasubramanian, K. Mayandi, V. Arumugaprabu, N. Rajini, S. Rajesh, History of Composites and Polymers, in: *Polymer-Based Composites*, CRC Press, Boca Raton, 2021: pp. 1–21. <https://doi.org/10.1201/9781003126300-1>.
- [14] K.B. Bommegowda, N.M. Renukappa, J.S. Rajan, Role of Fillers in Controlling the Properties of Polymer Composites: A Review, in: *Techno-Societal 2020*, Springer International Publishing, Cham, 2021: pp. 637–648. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69925-3_62.
- [15] A.K. Mazitova, I.I. Zaripov, G.K. Aminova, M.V. Ovod, N.L. Suntsova, Fillers for polymer composite materials, *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal* 14 (2022) 294–299. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299>.
- [16] R. Yadav, M. Singh, D. Shekhawat, S.-Y. Lee, S.-J. Park, The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review, *Compos Part A Appl Sci Manuf* 175 (2023) 107775. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107775>.
- [17] C.M. Clemons, D.F. Caulfield, Wood Flour, in: *Functional Fillers for Plastics*, Wiley, 2005: pp. 249–270. <https://doi.org/10.1002/3527605096.ch15>.
- [18] L.M. Matuana, S. Cam, K.B. Yuhasz, Q.J. Armstrong, Composites of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Filled with Wood-Flour, *Polymers and Polymer Composites* 15 (2007) 365–370. <https://doi.org/10.1177/096739110701500503>.
- [19] Y. Guo, S. Zhu, Y. Chen, D. Li, Thermal Properties of Wood-Plastic Composites with Different Compositions, *Materials* 12 (2019) 881. <https://doi.org/10.3390/ma12060881>.
- [20] Z. Mitaľová, J. Litecká, M. Kočiško, K. Berladir, Technologies of Production of Materials Based on WPC: A Short Review, *Polymers (Basel)* 17 (2025) 1025. <https://doi.org/10.3390/polym17081025>.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Primer dveh polimerov in kako sta sestavljena	4
Slika 2: Različne vrste kopolimerov [5]	8
Slika 3: Vrste konfiguracij polimerov [5]	9
Slika 4: Vrste polimernih konformacij [5]	10
Slika 5: Kondenzacijska polimerizacija PET [5]	10
Slika 6: Potek verižne in stopenjske polimerizacije [5]	11
Slika 7: Primeri polimerov pridobljenih z verižno polimerizacijo [7]	14
Slika 8: Kombinacija dveh radikalov in tvorba kovalentne vezi [7]	15
Slika 9: Disproporcionacija dveh radikalov [7]	15
Slika 10: Monomerne enote, ki sestavljajo ABS (akrilonitril, 1,3-butadien, stiren) [8]	16
Slika 11: Lesna moka 1	25
Slika 12: Lesna moka 2	25
Slika 13: Dvopolžni ekstruder LABTECH-LTE 20-44	26
Slika 14: Granulator SHEER	27
Slika 15: Trgalni stroj Shimadzu AG-X Plus 10kN	30
Slika 16: Naprava za merjenje udarne žilavosti LY-XJJDS	31
Slika 17: Termogravimetrični analizator z DSC signalom Mettler Toledo, TGA/DSC 3+	32
Slika 18: Diferenčni dinamični kalorimeter mettler toledo, DSC 2	33
Slika 19: Upogibni E modul	35
Slika 20: Maksimalna upogibna trdnost	36
Slika 21: Upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti	36
Slika 22: Upogibni raztezek pri porušitvi	37
Slika 23: Natezni modul elastičnosti	39
Slika 24: Natezna trdnost	40
Slika 25: Raztezek pri natezni trdnosti	41
Slika 26: Raztezek pri pretrgu	41
Slika 27: Udarne žilavost po Charpy-ju	45
Slika 28: Zarezna udarna žilavost	46
Slika 29: Prikazuje TGA graf za razpad vzorcev, ki vsebujejo čisti ABS	47
Slika 30: Diagram prikazuje vrhove razpadov različnih sestavnih delov kompozitov iz čistega ABS	49
Slika 31: Prikazuje TGA graf za razpad vzorcev, ki vsebujejo rABS	50
Slika 32: Diagram prikazuje vrhove razpadov različnih sestavnih delov kompozitov iz rABS	51
Slika 33: DSC diagram drugega segrevanja vzorcev na osnovi čistega ABS	53
Slika 34: DSC diagram drugega segrevanja vzorcev na osnovi rABS	54

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Pregled uporabljenih materialov	24
Tabela 2: Sestava kompozitnih materialov	24
Tabela 3: Temperaturni profil ekstrudiranja vzorcev	27
Tabela 4: Temperaturni profil taline	28
Tabela 5: Parametri brizganja, naknadni tlak in čas hlajenja	28
Tabela 6: Hitrost brizganja in čas brizganja	29
Tabela 7: Povprečne vrednosti in standardna deviacija vzorcev pri upogibnem testu	34
Tabela 8: Povprečne vrednosti in standardna deviacija pri nateznem testu	38
Tabela 9: Charpy test – udarna žilavost in zarezna udarna žilavost	44
Tabela 10: Razpad TGA čisti ABS in vsebnost posameznih komponent	48
Tabela 11: Razpad TGA rABS in vsebnost posameznih komponent	50

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

E_f - upogibni E modul (GPa)
 σ_{fM} - maksimalna upogibna trdnost (MPa)
 ε_{fM} - upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (%)
 ε_{fB} - upogibni raztezek pri poružitvi (%)
 E_t - natezni E modul (GPa)
 σ_m - natezna trdnost (MPa)
 ε_m - raztezek pri natezni trdnosti (%)
 ε_{tb} - raztezek pri pretrgu (%)
 μm - mikrometer
 T - temperatura
 s - sekunda
 mm - milimeter
 mm/s - milimeter na sekundo
 N - newton
 K - kelvin
 K/min - kelvin na minuto
 GPa - gigapascal
 MPa - megapascal
 $\%$ - odstotek
 $m.\%$ - masni delež
 kJ/m^2 - kilojoul na kvadratni meter
 $NaCl$ - natrijev klorid
 kg - kilogram
 mm - milimeter
 t - tona
 m/min - meter na minuto
 min - minuta
 $^{\circ}C$ - stopinje celzija

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

ABS - akrilonitril butadien stiren
rABS - recikliran akrilonitril butadien stiren
WPC - lesno-polimerni kompoziti
3D -tridimenzionalno
R - susbstituent
UV - ultravijolično
Rpm - rotacije na minuto
TGA - termogravimetrična analiza
PET - polietilen tereftalat
DSC - diferenčna dinamična kalorimetrija