

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Zala NABERNIK

**VPLIV SESTAVE KOMPOZITA FONKO NA
GORLJIVOST TER FIZIKALNE IN ZVOČNO-
ABSORPCIJSKE LASTNOSTI**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, februar 2022

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

VPLIV SESTAVE KOMPOZITA FONKO NA GORLJIVOST TER FIZIKALNE IN ZVOČNO- ABSORPCIJSKE LASTNOSTI

Diplomsko delo

Študentka: Zala NABERNIK
Študijski program: Tehnologija polimerov
Mentor: doc. dr. Andrijana SEVER ŠKAPIN
Somentor: asist. Janez SLAPNIK
Delovni mentor: Miha MAJDIČ, mag. posl. ved

Slovenj Gradec, februar 2022

IZJAVA

Podpisana Zala Nabernik izjavljam, da:

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

Slovenj Gradec, _____ Podpis: _____

POVZETEK

Vpliv sestave kompozita FONKO na gorljivost ter fizikalne in zvočno- absorpcijske lastnosti

Reciklirana poliuretanska pena je v zadnjih letih zaradi vse večjega ozaveščanja o pomembnosti zniževanja onesnaževanja okolja pridobila ogromen pomen in postala vse pogostejša tematika raziskav. Kompozit FONKO je eden izmed proizvodov podjetja Kopur d. o. o., ki je proizveden iz reciklirane rezane pene in se v avtomobilski industriji uporablja kot izolacijski vgradni del. Ker se v podjetju poleg reciklirane pene za proizvodnjo izdelkov uporablja tudi netkani iglani tekstil, ki je prav tako znan kot odličen absorpcijski material, smo v diplomskem delu proučili vpliv dodatka recikliranih tekstilnih kosmičev k osnovni recepturi kompozita FONKO. Poleg vpliva tekstilnih odpadkov smo proučili tudi vpliv gostote kompozita ter deleža veziva, ki posamezne rezance recikliranega materiala poveže v kompozit. Cilj diplomskega dela je bil določiti, kako omenjeni faktorji vplivajo na hitrost gorenja, zvočno absorpcijo ter mehanske lastnosti. Kompozite z različnimi sestavami smo pripravili s postopkom oblikovanja materiala v kalupih z aktivacijo veziva s pomočjo vroče pare. Pri načrtovanju eksperimenta smo izbrali popolni eksperimentalni načrt, s katerim smo proučevali 3 faktorje (delež tekstilnih odpadkov, delež veziva, gostota) in njihove interakcije s 3 nivoji (3 različne vrednosti faktorjev, pri katerih smo opravili preizkuse). Skupaj je eksperiment obsegal 27 vzorcev. Karakterizacija vzorcev je obsegala natezni preizkus, tlačni preizkus, preizkus gorljivosti, preizkus absorpcije zvoka ter preizkus omočljivosti in navzemanja vlage. Rezultate smo statistično analizirali z analizo variance (ang. Analysis of Variance (ANOVA)). Z višanjem gostote so se mehanske lastnosti kompozita izboljševale (višja natezna in tlačna trdnost); višal se je tudi absorpcijski koeficient kompozita; medtem se je hitrost gorljivosti po doseženi gostoti 100 kg/m^3 manjšala. Poleg gostote, za katero se je izkazalo, da ima na vse proučevane lastnosti največ vpliva, je na mehanske lastnosti precej vplival tudi delež tekstila. Z višanjem deleža tekstila v sestavi kompozita se je natezna trdnost zniževala; znižal se je tudi raztezek. Z večkriterijsko optimizacijo smo določili optimalno sestavo kompozita z gostoto 120 kg/m^3 , vsebnostjo tekstila 10 % ter deležem veziva 6 %. Ta sestava je najbolj ustrezala našim kriterijem, ki hkrati zadostijo zahtevam v avtomobilski industriji.

Ključne besede:

Poliuretanska pena, netkane iglane poliestrske tekstilije, optimizacija sestave, kompozit, vezivo.

SUMMARY

Influence of the composition of the FONKO composite on flammability, physical and sound-absorption properties

Recycled polyurethane foam has gained enormous importance in recent years due to growing awareness of the importance of the reduction of environmental pollution and has become an increasingly common research topic. FONKO composite is one of the products of Kopur d.o.o., which is produced from recycled cut foam and is used in the automotive industry as an insulating installation part. Since the company uses non-woven needle textiles in addition to recycled foam for the production of products, which is also known as an excellent absorbent material, the impact of the addition of recycled textile flakes to the basic recipe of FONKO composite was studied. In addition to the influence of textile waste, the influence of the density of the composite and the proportion of binder that binds individual flakes of recycled material into the composite was also studied. The thesis aimed to determine how these factors affect the burning rate, sound absorption, and mechanical properties. Composites with different compositions were prepared by the process of forming the material in the molds by activating the binder with the help of hot steam. When planning the experiment, a full factorial experimental plan which studied 3 factors (textile waste content, binder content, and density) and their interactions with 3 levels (3 different values of factors at which we performed the tests) was chosen. In total, the experiment consisted of 27 samples. Characterization of the samples included tensile test, pressure test, flammability test, sound absorption test, wettability test, and moisture uptake test. The results were statistically analyzed by Analysis of Variance (ANOVA). With increasing density, the mechanical properties of the composite improved (higher tensile and compressive strength). The absorption coefficient of the composite also increased while the rate of flammability decreased after reaching a density of 100 kg/m^3 . In addition to the density which turned out to have the greatest influence on all the studied properties, the mechanical properties were also significantly influenced by the proportion of textiles. As the proportion of textiles in the composite composition increased, the tensile strength decreased as well as the elongation. With multi-criteria optimization, the optimal composition of the composite with a density of 120 kg/m^3 , a textile content of 10 %, and a binder content of 6 % was determined. This composition best met our criteria which, at the same time, meet the requirements of the automotive industry.

Keywords:

Polyurethane foam, nonwoven needle-punched polyester textiles, composition optimization, composite, binder.

KAZALO

1 UVOD	1
2 TEORETIČNI DEL	3
2.1 Poliuretanska pena	3
2.1.1 Splošno o poliuretanih	3
2.1.2 Penjeni materiali	4
2.1.3 Začetki poliuretanske pene	4
2.1.4 Vrste poliuretanskih pen	4
2.2 Netkani iglani tekstil v avtomobilski industriji	5
2.3 Recikliranje poliuretanske pene	6
2.3.1 Mehansko recikliranje	7
2.4 Lastnosti reciklirane poliuretanske pene in njen pomen v avtomobilski industriji	9
2.4.1 Mehanske lastnosti	9
2.4.2 Odziv na ogenj	11
2.4.3 Absorpcija zvoka	13
2.4.4 Omočljivost	15
2.5 Načrtovanje eksperimentov	17
3 EKSPERIMENTALNI DEL	19
3.1 Uporabljeni materiali	19
3.1.1 Odpadna poliuretanska pena	19
3.1.2 Tekstilni odpadki	19
3.1.3 Vezivo	19
3.2 Priprava vzorcev	19
3.2.1 Priprava mešanice materialov za kompozite	19
3.2.2 Oblikovanje kompozitov v prisotnosti vroče pare	21
3.2.3 Izsekovanje in razrez plošč kompozitov	21
3.3 Karakterizacija	22
3.3.1 Natezni preizkus	22
3.3.2 Tlačni preizkus	23
3.3.3 Odziv na ogenj	24
3.3.4 Absorpcija zvoka	25
3.3.5 Omočljivost in navzemanje vlage	25
3.4 Statistična obdelava podatkov	26
4 REZULTATI IN DISKUSIJA	27
4.1 Rezultati meritev in analiza posameznih vplivov, interakcij na posamezne lastnosti	27
4.1.1 Natezni preizkus	27
4.1.2 Tlačni preizkus	32
4.1.3 Preizkus odziva na ogenj	34
4.1.4 Preizkus zvočne absorpcije	37
4.1.5 Preizkus omočljivosti in navzemanja vlage	38
4.2 Večkriterijska optimizacija sestave kompozita	41

5 SKLEP	42
SEZNAM LITERATURE IN VIROV	44
SEZNAM SLIK	47
SEZNAM TABEL	49
SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	50
SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	51

1 UVOD

Poliuretanska pena velja za enega izmed boljših izolacijskih materialov, ki se je med drugim uveljavil tudi v avtomobilski industriji. Velike količine odpadnega materiala, ki pri tem nastaja v obliki dotrajanih proizvodov ali odvečnega materiala proizvodnih procesov, predstavljajo ogromno breme okolju. Recikliranje je ena izmed rešitev, s katero se odpadki vrnejo v proizvodno verigo, kar pomembno prispeva k vzpostavitvi krožnega gospodarstva [1, 2].

Podjetje Kopur d. o. o. se ukvarja s proizvodnjo kompozitov, izdelanih iz reciklirane poliuretanske pene. Kompozit FONKO je eden izmed njihovih izdelkov. V celoti je izdelan iz reciklirane rezane poliuretanske pene in se v avtomobilski industriji uporablja kot izolacijski vgradni del. Poleg proizvodnje izdelkov iz reciklirane pene se podjetje ukvarja tudi s proizvodnjo izdelkov iz netkanih tekstilij. Ti materiali so prav tako dobri izolatorji, zato se mnogokrat uporabljajo v kombinaciji s penami. Ker se med procesi v proizvodnji kopičijo ostanki tekstilnih materialov, je smiselno proučiti možnost, da bi poleg poliuretanske pene reciklirali tudi odpadne tekstilije. V diplomskem delu smo zato proučili vpliv vsebnosti tekstilnih odpadkov, gostote in delež veziva na izbrane lastnosti kompozitov.

Predpostavili smo, da faktorji gostota, delež veziva in delež tekstilnih odpadkov, ki smo jih proučevali v diplomskem delu, in njihove interakcije vplivajo na lastnosti kompozita. Ocenili smo, da se bo gorljivost z nižanjem gostote ter večanjem deleža veziva zviševala, z dodajanjem tekstilij pa zniževala. Absorpcija zvoka se bo z nižanjem gostote zniževala, z dodatkom flisa pa zviševala, delež veziva, ocenjujemo, ne bo imel večjega vpliva na absorpcijo zvoka. Predvideli smo, da se bodo mehanske lastnosti z višjo gostoto in večjim deležem veziva izboljšale. Z dodajanjem flisa smo sklepali, da se bo tlačna trdnost povečala, medtem ko se bo natezna trdnost znižala.

Glavni cilj diplomskega dela je določiti, kako posamezni faktorji (gostota, količina dodatka netkane poliestrske tkanine oz. flisa ter delež veziva) vplivajo na lastnosti kompozita. Poleg tega je cilj tudi določiti optimalno sestavo kompozita, ki bo ustrezala zahtevam v avtomobilski industriji.

Za doseg ciljev smo:

- pripravili kompozite z različnimi sestavami s postopkom aktivacije veziva pri visoki temperaturi v prisotnosti pare,
- pripravili preizkušance ustreznih dimenzij s pomočjo rezanja in izsekavanja,
- določili gorljivost, fizikalne in zvočno-absorpcijske lastnosti vzorcev,
- analizirali in interpretirali rezultate s pomočjo računalniškega programa.

Pred eksperimentalnim delom smo zasnovali eksperimentalni načrt, kjer smo definirali obsežnost vzorčenj ter določili vrsto eksperimentiranja. Skladno z eksperimentalnim načrtom smo pripravili vzorce kompozitov. Nastale kompozitne plošče smo razrezali in izsekali v podjetju Kopur, kjer smo z ustreznim strojem za izsekavanje in namenskimi noži omogočili doseganje zelenih oblik. Natezni in tlačni test smo opravili na Fakulteti za tehnologijo polimerov; omočljivost smo testirali na Zavodu za gradbeništvo v Ljubljani, gorljivost in absorpcijo zvoka pa smo opravili v podjetju Kopur. Statistično

obdelavo podatkov DoE eksperimentiranja smo izvedli s pomočjo računalniškega programa Minitab.

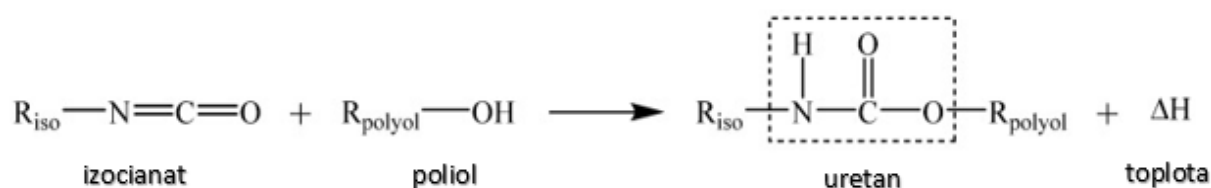
2 TEORETIČNI DEL

2.1 Poliuretanska pena

2.1.1 Splošno o poliuretanih

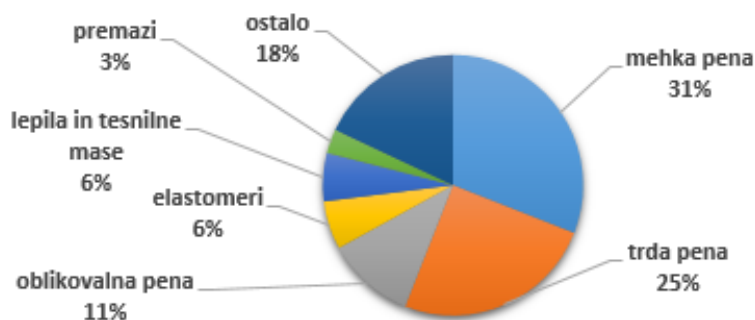
Poliuretani so nedvomno ena izmed pomembnejših skupin polimernih materialov, ki se s pridom že desetletja uporabljajo v številnih aplikacijah. Prvo sintezo poliuretana je opravil Otto Bayer leta 1937. S svojimi sodelavci v podjetju I. G. Farbens je na podlagi znanstvenih spoznanj in analiz novi material opisal ter predstavil njegovo potencialno uporabo. Zaradi podobnosti z najlonskimi vlakni je predstavljal konkurenco podjetju DuPont, ki je nekaj let prej pričelo s proizvodnjo najlona. Prva dva komercialna poliuretanska materiala sta se imenovala Perlon U in Igamid U. Prvi se je uporabljal kot umetna svila in za zobne ščetke, drugi pa za proizvodnjo sintetičnega tekstila, vendar nobeden od njiju ni presegel lastnosti najlona. Sprva je proizvodnja komercialnih poliuretanov skoraj v celoti temeljila na osnovi poliestrskih polioli. Po letu 1957, ko so bili prvič predstavljeni polietrski polioli, pa se je trend proizvodnje poliuretanov zaradi številnih tehnoloških in komercialnih prednosti usmeril v proizvodnjo na polietrski osnovi. Po letu 1940 so podjetja, kot so Bayer (prej I. G. Farbens), Dupont in ISI pospešeno vlagala v komercialni razvoj poliuretanov. Potrošnja poliuretanov se je z vsakim letom povečevala; leta 2016 je na svetovni ravni dosegla skoraj 9 % svetovne potrošnje plastike [3-5].

Poliuretani nastanejo z reakcijo hidroksilnih (-OH) skupin poliola in izocianatnih (-NCO) funkcionalnih skupin izocianata. Izraz "poliuretan" izhaja iz nastale uretanske vezi (-NH-CO-O-), ki povezuje posamezne enote v polimerno verigo. Reakcija je eksotermna in jo predstavlja slika 1 [6].



Slika 1: Kemijska reakcija med izocianatom in poliolum [6]

Poliuretani nudijo izredno široko paleto materialov z najrazličnejšimi sestavami in lastnostmi. Uporabljajo se za različne namene in jih poznamo kot trde, mehke, termoplastične, elastične, zamrežene, kompaktne ali penjene. Najdemo jih v različnih oblikah, kot so brizgani izdelki, folije ali vlakna, v raztopinah ali disperzijah. Največji del poliuretanov se uporablja v proizvodnji mehkih in trdih pen, preostali del pa se uporablja za proizvodnjo oblikovalnih pen, elastomerov ter proizvodov, kot so tesnilne mase, lepila in premazi. Delež potrošnje posameznih proizvodov poliuretana prikazuje slika 2 [3, 6].



Slika 2: Globalna potrošnja poliuretanov v letu 2016 [6]

Največja področja uporabe so v avtomobilski industriji, gradbeništvu in pohištveni industriji, kjer je življenjski cikel proizvoda od 10 do 15 let. Kar dve tretjini poliuretanov v avtomobilih se uporabi za sedeže [3].

2.1.2 Penjeni materiali

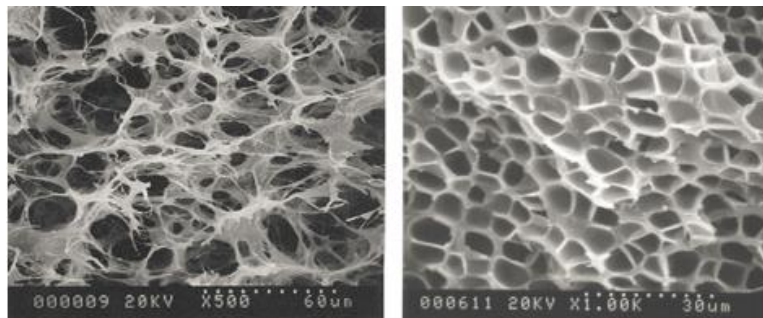
Penjeni polimerni materiali so materiali s celično strukturo, ki jo dosežejo s postopkom penjenja. Postopek se lahko izvede na več načinov, vendar je za kreiranje celičnih mehurčkov pri vseh potreben plin. Zaradi nizke prevodnosti plina (običajno zraka) v celičnem sistemu so dober toplotni izolator, zato se uporabljajo kot izolacijski material, kot jedro nosilnih konstrukcij in kot embalažni material za zaščito izdelkov med transportom. Velik del polimernih pen se uporablja tudi za izdelavo posteljnih ležišč in oblazinjenih delov pohištva. Polimeri, ki se pogosto uporabljajo v obliki celične strukture, so poliuretan, polistiren, polivinilklorid, polipropilen, epoksi smola, polietilen, fenol-formaldehidna smola, akrilonitril butadien stiren, sečninsko-formaldehidna smola, celulozni acetat, stiren akrilonitril in silikon [7].

2.1.3 Začetki poliuretanske pene

V začetku štiridesetih so bile v Nemčiji razvite trde poliuretanske pene, o katerih je leta 1947 poročal O. Bayer. Ta vrsta pen je vrhunec zanimanja doživela med letoma 1945 in 1952. Nadaljnje preiskave podjetja Bayer so medtem vodile v odkritje mehkih poliuretanskih pen, ki jih je leta 1952 predstavil A. Höchtlen in so doživele velik komercialni uspeh [4].

2.1.4 Vrste poliuretanskih pen

Penjene materiale lahko glede na vrsto celic razdelimo na zaprto-celične in odprto-celične pene. Pri zaprto-celični peni je vsaka posamezna celica popolnoma ograjena s steno, medtem ko so pri odprto-celični peni posamezne celice med seboj povezane. Pri prostem ekspaniranju običajno nastanejo pene z odprtimi celicami. Pri večini postopkov penjenja nastaneta obe vrsti pene. Razliko v strukturi obeh tipov celične strukture prikazuje slika 3 [7].



Slika 3: Tipična mikrografa, posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom, ki prikazujeta razliko med odprto-celično strukturo (levo) in zaprto-celično strukturo (desno) [8]

Odprto-celična struktura je značilna za mehke poliuretanske pene, zaprto-celična struktura pa za trde poliuretanske pene.

Mehke poliuretanske pene so znane predvsem po svoji stisljivosti in elastičnosti. Zaradi svoje strukture imajo visoko zračno prepustnost in zmogljivost absorbiranja velikih količin energije, zaradi česar so idealna izbira za oblaginjenje različnih vrst izdelkov: ležišča, pomožni pakirni material za transport izdelkov, sedeži avtomobilov, podlage tepihov itd. Gostota mehkih poliuretanskih pen se običajno giblje med 16 kg/m^3 in 96 kg/m^3 . Pena se izdeluje v blokih širine in višine več metrov, nato pa se razreže na plošče ali druge oblike želene debeline [7, 9].

Pene z zaprtimi celicami se običajno proizvajajo v postopkih, kjer se med fazo nastajanja celic vzdržuje določen tlak. Struktura pene je v primerjavi z mehкими penami bolj neprehodna in zaprta, zato so celice slabše prepustne. Pena z zaprtimi celicami se lahko uporablja kot rešilni jopič, saj se celice ne napolnijo s tekočino. Trde poliuretanske pene imajo visoko tlačno trdnost in dobre toplotno izolacijske lastnosti. Tako kot mehke pene imajo tudi trde pene širok spekter gostot, vendar se pene z gostoto manj kot 24 kg/m^3 zaradi slabe dimenzijske stabilnosti običajno ne uporabljajo. Večina pen, ki se uporablja za izolacijske namene, ima gostoto med 24 kg/m^3 in 50 kg/m^3 . Uporabljajo se predvsem v gradbeništvu [7, 9].

2.2 Netkani iglani tekstil v avtomobilski industriji

Sorazmerno z rastjo svetovne proizvodnje motornih vozil raste tudi uporaba avtomobilskega tekstila. Med tekstilne materiale, ki se uporabljajo v avtomobilski industriji, spadajo tkani in netkani tekstil, pletenine, prevlečene tkanine in tkanine kot sestavni del v kompozitih. Večina teh tekstilij je del notranje opreme vozila. Približno dve tretjini avtomobilskega tekstila se uporabljata za notranje, talne in stropne obloge, sedeže, varnostne pasove, zračne blazine in filtre. Preostali del se uporablja v zunanjih delih avtomobilov, kot so pnevmatike, ohišja koles in podlage [10].

Uporaba netkanega tekstila v avtomobilski industriji narašča. Glavni razlog za to sta večja produktivnost in nižji proizvodni stroški netkanih materialov. Tovrsten tekstil ne

zahteva pretvorbe vlaken v prejo. Njegovo strukturo dosežemo s prepletanjem vlaken ali filamentov, kar lahko izvedemo z mehansko, kemično ali termično metodo. Največji delež netkanega tekstila se uporablja za preproge v potniški kabini; takoj zatem sledi uporaba za toplotno izolacijo. Manjši deleži uporabe so potem še razne obloge, kot so obloga stropa, vrat, prtljažnika, pokrova motorja ter polica nad prtljažnikom [10, 11].

Netkani tekstil se lahko proizvede na več možnih načinov. Ti so lahko kemični, mehanski, termični ali kombinacija navedenih. Najpogosteje uporabljen postopek je iglanje, ki spada med mehanske postopke. Tehnologija iglanja temelji na prepletanju vlaknaste mreže z večkratnim prodiranjem tankih igel, pri čemer vlakna učvrstimo in dobimo zgoščeno kopreno. Tekstil, izdelan s tem postopkom, ima v svoji strukturi značilno periodičnost, ki je posledica interakcije vlaken z bodicami igel. Segmenti vlaken prehajajo iz površine v notranjost tekstila s pomočjo zazobcev na iglah, pri čemer se oblikujejo snopi vlaken, usmerjeni pravokotno na ravnino. Za ta postopek potrebujemo igelni stroj, v katerega se dovaja koprena [10, 12].

Materiali, ki se v notranjosti avtomobila uporabljajo za obloge, se pogosto uporabljajo na nevidnih mestih vozila. Med najpomembnejše lastnosti za tovrstne materiale sodijo sposobnost za oblikovanje, sproščanje emisij, ki lahko škodujejo zdravju potnikov, odpornost na obrabo, trajnost, omočljivost, vonj, absorpcija zraka in gorljivost izdelka. Z izrazom "sposobnost za oblikovanje" pri materialih, ki se proizvajajo v kontinuirnih oblikah, razumemo, kako dobro se lahko material termično oblikuje oz. termično laminira. To posredno določajo predvsem mehanske lastnosti, kot so natezna in tlačna trdnost ter raztezanje [10].

Z večjim številom vlaken dosežemo večjo gostoto. Večja, kot je gostota tekstila, manjša je stisljivost in manjša je deformacija, ki se pojavi med stiskanjem. Trdnost tekstilij z večjo gostoto je torej višja [11].

Raziskave so pokazale tudi, da se z večanjem gostote zvočna izolativnost tekstilij povečuje, zračna prepustnost pa zmanjšuje. Pri večji količini vlaken se vmesni prostor zmanjšuje, kar preprečuje zraku, da bi prehajal skozi material. Da lahko material zvok absorbira, se mora ta na polimerni steni vlaken razpršiti s pomočjo trenja. Večje, kot bo število celic, več možnosti bo, da se bo zvok razpršil – za to pa mora zvočni val vstopiti v porozni material. To pomeni, da mora biti na površini materiala dovolj por, skozi katere lahko zvok prehaja in se duši [11, 13].

2.3 Recikliranje poliuretanske pene

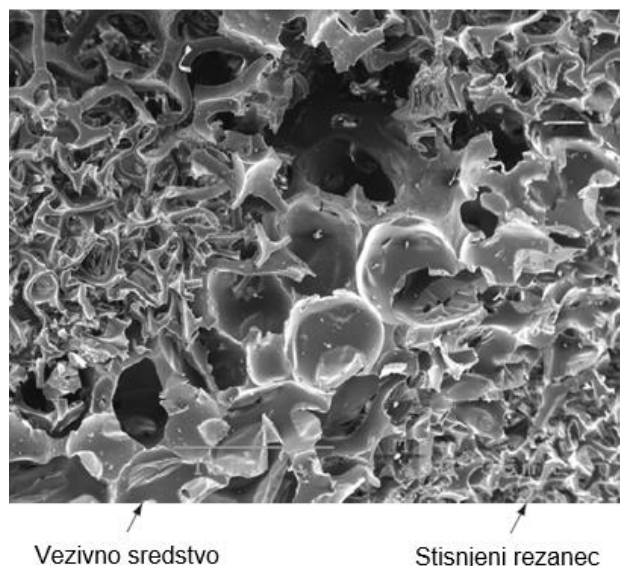
Zaradi nenehnih sprememb na področju zakonodaje in okoljskih vprašanj se po vsem svetu vse več pozornosti namenja recikliranju plastike. Med največjo problematiko odpadkov sodijo tudi poliuretani, predvsem poliuretanska pena. Vse višji stroški odlaganja in vse manj prostora na odlagališčih vodijo k razmisleku o alternativnih možnostih, kot so ponovna uporaba materiala s pomočjo recikliranja [2, 14].

Poliuretanska industrija je v preteklih letih razvila kar nekaj različnih tehnologij recikliranja poliuretanskih odpadnih materialov tako iz zavrženih izdelkov kot tudi iz odpadkov proizvodnega procesa. Metode recikliranja lahko razdelimo na mehansko, kemijsko in termokemijsko recikliranje; ena izmed metod koristne uporabe odpadkov je tudi njihova pretvorba v energijo s sežigom. Mehansko recikliranje vključuje fizikalno obdelavo, kjer zreduciramo velikost odpadnega materiala na manjše kose, ki se nadalje oblikujejo v izdelek. Kemično in termokemično recikliranje vključuje kemično obdelavo, s katero pridobimo kemične surovine za kemično industrijo. Energetska predelava pa vključuje popolno ali delno oksidacijo materiala, pri čemer se poleg stranskih proizvodov, ki jih je treba odstraniti (npr. pepel), pridobivajo toplota in/ali plinasta goriva, olje in oglje. Zaradi dolge življenjske dobe proizvodov iz poliuretana in vse večje pomembnosti krožnega gospodarstva, energetska pretvorba odpadnega materiala ni najboljša rešitev. Poleg tega nastajajo pri sežigu strupeni plini, ki pa so še toliko večja problematika poliuretanskih pen [1, 2, 14].

2.3.1 Mehansko recikliranje

Mehansko recikliranje v prvi fazi vključuje proces, s katerim večje kose poliuretanske pene z različnimi postopki, kot sta rezanje in mletje, obdelamo na manjše kose, npr. prah, kosmiči ali rezanci. Odpadna poliuretanska pena, ki jo uporabimo za recikliranje, je lahko v obliki dotrajanih proizvodov ali ostankov, ki so nastali med proizvodnim procesom. Cilj obdelave na manjše kose je ugodnejša oblika materiala za nadaljnje procese obdelave v končne produkte. Pena v obliki prahu se lahko uporabi kot polnilo pri proizvodnji poliuretanske pene ali elastomerov. V primeru proizvodnje pene se polnilo primeša h komponenti poliola. Brizgani poliuretanski produkti lahko vsebujejo tudi do 20 mas. % mletega poliuretanskega materiala, pri čemer naj bi bil premer delcev od 100 μm do 200 μm [1, 14].

Ena najbolj razširjenih oblik mehanskega recikliranja je oblikovanje rezane pene s pomočjo adhezivnega sredstva. Rezanci poliuretanske pene premera od 5 mm do 10 mm se zberejo v posebnem mešalcu, kjer se pripravi mešanica rezanih kosov različnih barv in trdote. Po tem, ko ji primešamo vezivo, se lahko ta pri visokih temperaturah ponovno tlačno oblikuje. Pri oblikovanju je prisotnost pare nujna, saj se le tako lahko vezivo aktivira. Razmerje rezancev in veziva je različno – odvisno je od tega, kakšne so pričakovane lastnosti materiala. Običajno je masni delež veziva 10 %. Slika 4 prikazuje posnetek vrstičnega elektronskega mikroskopa, na katerem sta prikazana stisnjena rezanca pene, ki ju na mejni površini povezuje vezivo. Gre za športno podlogo gostote 100 kg/m^3 . Opazimo lahko, da ima struktura v območju veziva zaprte celice. Razlike v mehanskih lastnostih, ki so se pojavile na različnih mestih vzorca prostornine 100 mm, so bile $\pm 5\%$ [1, 2, 14, 15].



Slika 4: Posnetek, posnet z vrstičnim elektronskim mikroskopom, rezane poliuretanske pene v materialu za športne blazine [15]

Končni izdelek se zaradi svoje visoke gostote in elastičnosti uporablja za zvočno-apsorpcijske produkte, talno oblogo, športne blazine, pomožni pakirni material itd. Trenutno se v Evropi letno uporabi 20 tisoč ton rezane poliuretanske pene. Medtem ko je trg s talnimi oblogami že skoraj zasičen, je povpraševanje po reciklirani poliuretanski peni v avtomobilskem sektorju vse večje. Proizvajalci avtomobilov v Nemčiji, kot so Volkswagen, Audi, BMW in Opel, si vse bolj prizadevajo za večjo uporabo rezane in ponovno oblikovane poliuretanske pene za dušenje zvoka v avtomobilih. Dokazano je bilo, da je pena iz rabljenih avtomobilskih sedežev mogoče reciklirati na ekonomsko sprejemljivi osnovi; logistika po drugi strani omogoča, da lahko pena iz odpadkov začne uspešno konkurirati primarni peni [16].

Poleg odpadne poliuretanske pene predstavlja okoljski problem tudi odpadni tekstil. Talne obloge iz blaga zavzemajo sicer zgolj slaba 2 % vseh trdnih odpadkov, kar pa količinsko kljub temu predstavlja precejšnje breme z ekonomskega in okoljskega vidika. Industrija je tudi tu problematiko pričela reševati z razvijanjem tehnologij recikliranja. Patent US 9,410,026 B1, ki so ga leta 2016 izdale Združene države Amerike, je ena izmed iznajdb tehnologije recikliranja tekstilnih talnih oblog. Temelji na metodi dodajanja tekstilnih ostankov k rezancem poliuretanske pene. Mešanici se potem podobno kot pri recikliranju 100 % pene doda vezivna komponenta; nato se ta tlačno obdelava v proizvod zelene gostote. Za postopek recikliranja je primeren tekstil najrazličnejših vrst talnih oblog, kot so stanovanjske ali industrijske. Lahko se uporabi tudi tekstil, ki ni bil uporabljen s strani potrošnika, kot so razni proizvodni ostanki ali pa tekstil, ki je bil izločen zaradi nezadovoljivih kriterijev kakovosti. Za tovrstno recikliranje je ustrezna široka paleta tekstilnih materialov. Vlakna materialov so lahko izdelana iz najlona, poliestra, polipropilena, polietilena, poliuretana, polivinil klorida, polietilen tereftalata, lateksa itd. Glede na zelene lastnosti recikliranega proizvoda se lahko dodajajo različne velikosti in oblike tekstilnih ostankov. Z rezanimi kosi tekstilnih

ostankov pridobimo bolj grobo mešanico materiala, medtem ko z dodajanjem finih koprenastih vlaken tekstila pridobimo bolj homogeno različico [17].

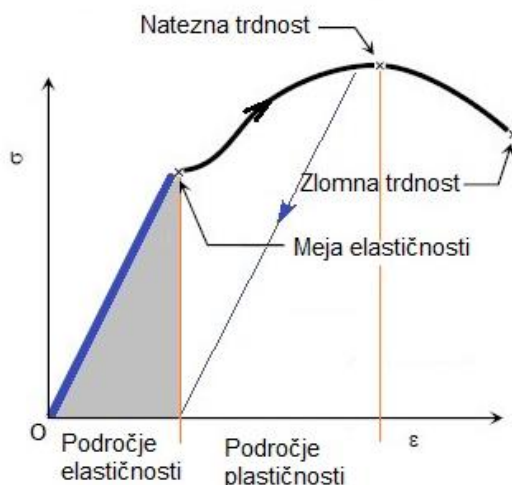
2.4 Lastnosti reciklirane poliuretanske pene in njen pomen v avtomobilski industriji

Pri izbiri optimalne sestave materiala so v avtomobilski industriji ključnega pomena lastnosti, kot so trajnost, odpornost proti obrabi, odpornost proti temperaturnim spremembam, kemična odpornost, udarna žilavost, dimenzijska stabilnost itd. Katere lastnosti materiala bomo proučevali, je odvisno predvsem od namena uporabe ter mesta v avtomobilu, kjer proizvod je. Materiali notranje opreme avtomobila so izpostavljeni temperaturi do 100 °C in lahko pridejo v stik s kemikalijami, kot so čistila, detergenti, hrana, pijača in znoj. Pri materialih pod pokrovom motorja lahko temperatura doseže tudi do 250 °C (odvisno od predela); izpostavljeni so lahko kemikalijam, kot so motorno olje, hladilna tekočina, gorivo itd.; pri tem je treba upoštevati tudi, da se katera izmed tekočin lahko razlije. Pri materialih, uporabljenih v zaprtih, nevidnih delih avtomobila, odpornost proti UV svetlobi ni pomembna, medtem ko je ta pri materialih zunanjih delov vozila izrednega pomena [18].

Od materialov, ki se uporabljajo za akustična polnila, se v prvi vrsti pričakujejo odlične zvočno absorpcijske lastnosti, zaradi česar je poliuretanska pena pogosta izbira. Poleg tega spada tudi med ekstremno lahke materiale. Slabost poliuretanske pene je predvsem slabši odziv na ogenj in strupene snovi, ki nastajajo pri gorenju. Kriterij ocenjevanja gorljivosti je v industriji zelo raznolik, odvisno od priorit. Letalska industrija npr. posveča veliko pozornosti nastajanju dima in strupenih snovi, medtem ko je v avtomobilski industriji kriterij gorljivosti manj sofisticiran. Zahteve temeljijo na hitrosti gorenja, kar nakazuje na čas, ki potnikom omogoča, da vozilo zapustijo [18].

2.4.1 Mehanske lastnosti

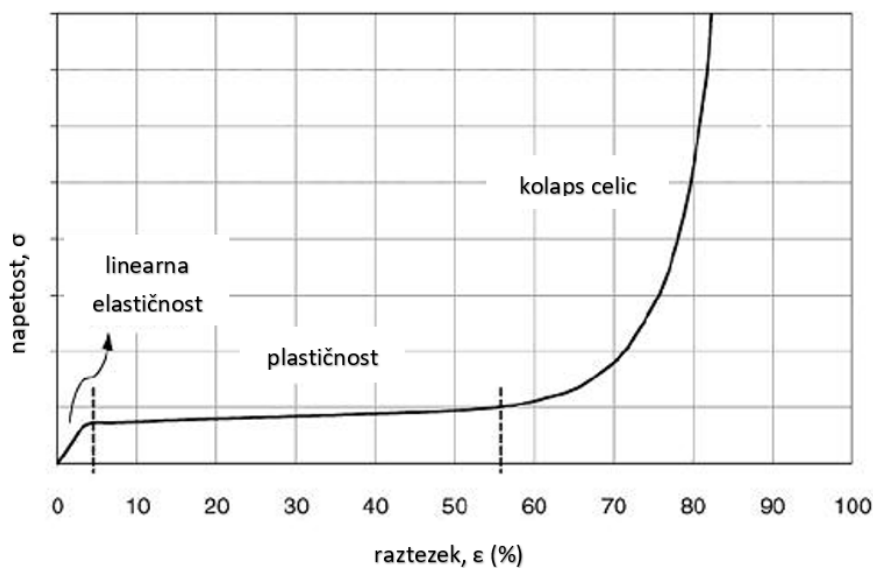
Za razumevanje mehanskih lastnosti polimernih materialov, kot so natezna trdnost, elastični modul in tlačna trdnost, je potrebno poznavanje diagrama "napetost v odvisnosti od raztezka". Slika 5 prikazuje tipično krivuljo, ki jo dobimo pri nateznem testu enega izmed materialov. Diagram prikazuje obnašanje materiala med obremenitvijo z enoosno napetostjo. Krivulja sicer predstavlja obnašanje materiala pri nateznem testu, vendar je princip razumevanja zelo podoben tudi pri ostalih testih, kot so tlačni test ali test strižne trdnosti [19].



Slika 5: Diagram "napetost v odvisnosti od raztezka" nateznega testa [20]

Začetni del krivulje je linearni in zavzema področje, kjer velja Hookov zakon (napetost in raztezek sta sorazmerna). Obnašanje materiala je v tem predelu elastično, kar pomeni, da je po prenehanju delovanja napetosti, deformacija reverzibilna. Iz tega predela krivulje se izračuna tudi modul elastičnosti. S povečevanjem obremenitve preizkušanec preide v področje plastičnosti. Tu se del deformacije ohrani trajno, torej se preizkušanec ne vrne v izhodiščno stanje [9, 19, 20].

Slika 6 prikazuje krivuljo, ki je nastala pri tlačnem preizkušanju penjenega materiala. Zanj so značilna tri področja: linearna elastičnost, plastičnost in kolaps celic. Pri manjšem stisku, običajno manj kot 5 %, je naklon krivulje enak Youngovemu modulu. S povečevanjem obremenitve pa se prične kolaps celic. Ta nazadnje pripelje do tega, da se nasproti ležeče stene celic med sabo dokončno združijo [21].



Slika 6: Diagram "napetost v odvisnosti od raztezka" tlačnega testa, značilnega za polimerne pene [22]

Čeprav se natezni preskusi zelo pogosto izvajajo za določevanje mehanskih lastnosti materialov, se za pene le redko uporabljajo. To je deloma posledica težav pri vpenjanju pene v čeljusti trgalnega stroja, deloma pa zato, ker je za mehke pene zelo malo področij uporabe, ki bi vključevale natezne obremenitve, saj je večina pene šibka pri raztezanju in se zlahka zlomi. Nasprotno pa se zanje zelo pogosto uporablja tlačna obremenitev, na primer pri blazinah in embalažnih penah, ki so obremenjene s težo vsebine [15].

Raziskave kažejo, da so mehanske lastnosti močno odvisne od gostote. Z večanjem gostote se natezna in zlomna trdnost, modul elastičnosti ter tlačna trdnost povečujejo [21, 23].

Poleg trdnosti se z zvišanjem gostote zviša tudi trdota. Trdota predstavlja odpornost materiala proti prodiranju tršega materiala v njegovo vrhno plast in je eden izmed pomembnih podatkov o materialu za številne aplikacije. Penjeni polimeri veljajo za materiale z zelo nizko trdoto, zaradi česar gre vedno več raziskav v smeri razvijanja tehnologij, ki vplivajo na višanje trdote pen. Ena izmed raziskav centra za poliuretansko industrijo v sklopu podjetja American Chemistry Council je pokazala, da povečanje gostote za 1 kg/m^3 povzroči okoli $0,1 \text{ kPa}$ večjo trdoto. Metoda, s katero so bile opravljene meritve, temelji na merjenju sile pri stisku materiala do njegove 40 % debeline in je identična metodi, ki smo jo uporabili v diplomskem delu [21, 23-26].

2.4.2 Odziv na ogenj

Uporaba polimernih materialov se stopnjuje na vseh področjih našega življenja, zato je težnja po materialih, ki izpolnjujejo zahteve odziva na ogenj, še toliko večja. Pri tem je treba poudariti, da je odziv na ogenj lastnost materiala ali proizvoda in pomeni prispevek tega materiala k razvoju požara [19, 27].

Gorenje je kemijska reakcija snovi s kisikom, pri kateri se sproščata toplota in svetloba. Za pojav so nujno potrebne tri komponente: gorljiva snov, kisik in toplota. Interakcijo komponent nam prikazuje trikotnik gorenja na sliki 7 [27, 28].

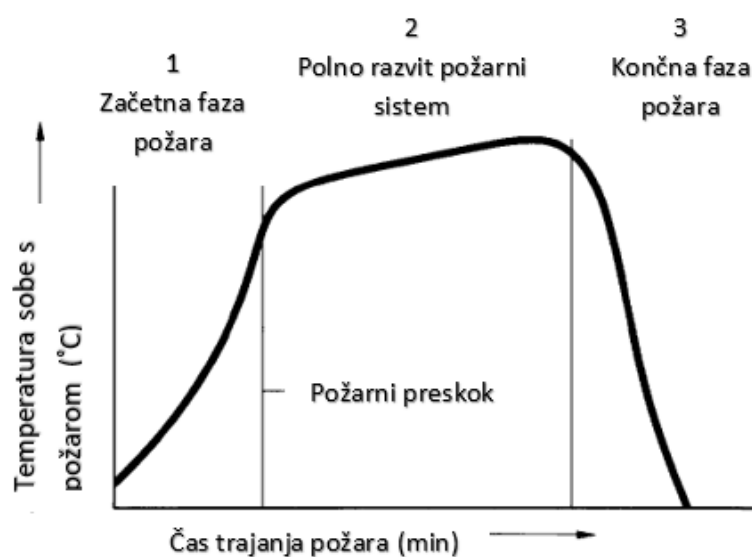


Slika 7: Trikotnik gorenja [29]

Gorljivi materiali so tisti, ki zaradi svoje kemijske strukture oksidirajo. To so predvsem materiali, ki imajo v svoji strukturi visok delež ogljika in vodika. Zaradi svoje kemijske strukture spadajo polimerni materiali med gorljive snovi.

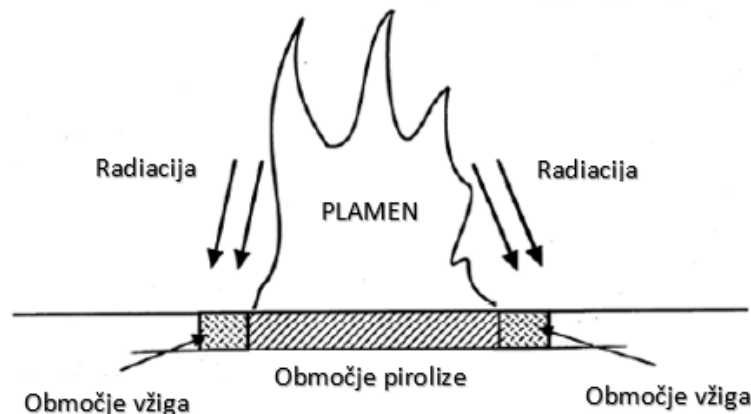
Med izgorevanjem polimerni material degradira, pri čemer na površini nastanejo hlapni delci polimera. Gorivo, ki nastane, se razprši na fronto plamena, kjer oksidira. Pri tem nastane še več toplote, kar ponovno povzroči razgradnjo polimerne mase. Vzpostavi se ciklični proces gorenja [19].

Potek gorenja lahko razdelimo na tri stopnje. Prva stopnja se prične z vžigom, ki povzroči širjenje plamena in pospešeno rast temperature. Pri določeni temperaturi, običajno med 800 °C in 1000 °C, pride do požarnega preskoka in polno razvitega požara, ki pa po porabi goriva oz. odsotnosti ene izmed komponent trikotnika gorljivosti preide v tretjo, zadnjo fazo gorenja – fazo pojemajočega požara. Potek gorenja prikazuje slika 8 [27, 28].



Slika 8: Stopnje požara [28]

Med gorenjem materiala se toplota sprošča v obliki konvekcije, kondukcije in sevanja. Ti procesi prenosa toplote so ključni za vžig in obnašanje ognja. Površine v bližini plamena se segrejejo in razgradijo, pri čemer nastanejo vnetljivi delci. Ti povzročijo številne nove vžige, kar povzroči širjenje plamena. Proces ponavljajočih se vžigov je prikazan na sliki 9. Horizontalno širjenje plamena je relativno počasno, ker se snov pred plamenom segreva le s pomočjo sevanja. Širjenje plamena navzgor je hitrejše, saj sta tu poleg sevanja prisotni tudi konvekcija in kondukcija, kar vpliva na učinkovitejši prenos toplote [27].



Slika 9: Horizontalni prenos gorenja [27]

Kateri so vzroki za nastanek požarov v motornih vozilih, je vprašanje, na katerega je težko odgovoriti. Ocenjuje se, da so med možnimi sprožilci požara kratek stik, leteče iskre ali vroči izpušni plini. Eden izmed možnih virov vžiga je lahko tudi žareča cigareta. Rezultati preiskav požarov v Angliji kažejo, da je velik odstotek požarov posledica požiga. Predhodna izbira materiala za uporabo v notranjosti vozila naj bi zagotovila čim varnejši odziv v primeru požara. Predpisi, ki temeljijo na varnostnem standardu za motorna vozila FMVSS 302, se izvajajo po vsem svetu in temeljijo na ovrednotenju odziva na ogenj predvsem preko hitrosti gorenja [28].

Leta 2003 je bila v znanstveni reviji *Polymer testing* objavljena raziskava o odzivu na ogenj mehke poliuretanske pene, kjer so bile primerjane različne metode testiranja. Testirale so se poliuretanske pene različnih gostot in stopnje poroznosti. Ovrednotenje rezultatov na podlagi standarda FMVSS 302 je pokazalo, da na hitrost gorenja poroznost nima pomembnega vpliva, ima pa vpliv v veliki meri gostota. S povečevanjem gostote se je hitrost gorenja zmanjševala. To potrjujejo tudi drugi viri literature. Razlog za to naj bi bilo dejstvo, da je hitrost gorenja materiala odvisna od količine materiala, ki se pri tem porabi. V primeru nižje gostote je na voljo manj materiala, ki posledično prej zgore. V primeru višje gostote pa se zaradi večje količine goriva ogenj širi počasi. Na hitrost gorenja vpliva tudi velikost celic v peni. Večje, kot so celice, manjša je hitrost gorenja. Razlog za to je, da je pri večjih celicah površina na volumen poliuretanske pene manjša [23, 30].

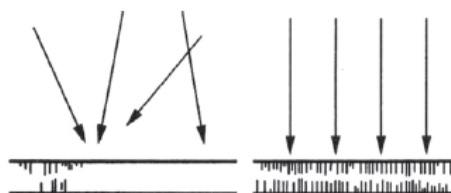
2.4.3 Absorpcija zvoka

Ko zvočni valovi udarijo ob steno, se del energije odbije in ustvari odmev; del se prenese na drugo stran stene, del energije pa se absorbira. V prostoru, ki ga omejuje stena, se sliši zgolj del zvoka, ki se je od stene odbil in se pretvoril v odmev, preostalega dela (absorpcije in prenosa energije skozi steno) pa ni mogoče slišati. Ta del predstavlja skupno zmanjšanje zvoka oz. hrupa. Materiali z dobrimi izolacijskimi in absorpcijskimi lastnostmi so zato nepogrešljivi sestavni del konstrukcij objektov in motornih vozil [23, 31].

Absorpcijo zvoka običajno določamo z zvočno-absorpcijskim koeficientom α , ki nam pove, kolikšen del energije zvočnih valov je material sposoben absorbirati. Definiramo ga kot razmerje med absorpcijsko energijo materiala in skupno energijo zvočnih valov ob udarcu. Vsak inženirski material ima svoj koeficient absorpcije zvoka, ki je odvisen od sestave in strukture materiala. Vrednosti koeficienta se gibljejo med 0 in 1, pri čemer 1 predstavlja celotno energijo zvočnih valov pri trku ob steno. Ker se običajno nek delež energije še vedno odbije in prepreči popolno zatiranje zvoka, so vrednosti absorpcije materialov manjše od 1. Na zvočno-absorpcijski koeficient poleg sestave in strukture materiala vpliva tudi frekvenca valov, ki lahko variira od 125 Hz in vse do 4000 Hz. Za splošno določevanje absorpcijskih lastnosti materialov se je uveljavila uporaba koeficienta zniževanja hrupa (ang. noise reduction coefficient (NRC)), ki zaobjame širok spekter vrednosti pri različnih frekvencah. Gre za aritmetično sredino vrednosti koeficientov pri frekvencah 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz in 2000 Hz. Primerjava absorpcijskih lastnosti različnih materialov je z uporabo NRC parametra lažja in enostavnejša [6, 23, 31, 32].

Porozni in vlaknasti materiali imajo odlične absorpcijske lastnosti predvsem zaradi svoje unikatne strukture. Pri prehajanju zvočne energije skozi pore in kanale s pomočjo molekul zraka se zvočna energija zaradi površinskega trenja vlaken in por pretvori v toploto. Koliko energije se bo pretvorilo, je odvisno od velikosti območja, kjer pride do pretvorbe energije [6, 31].

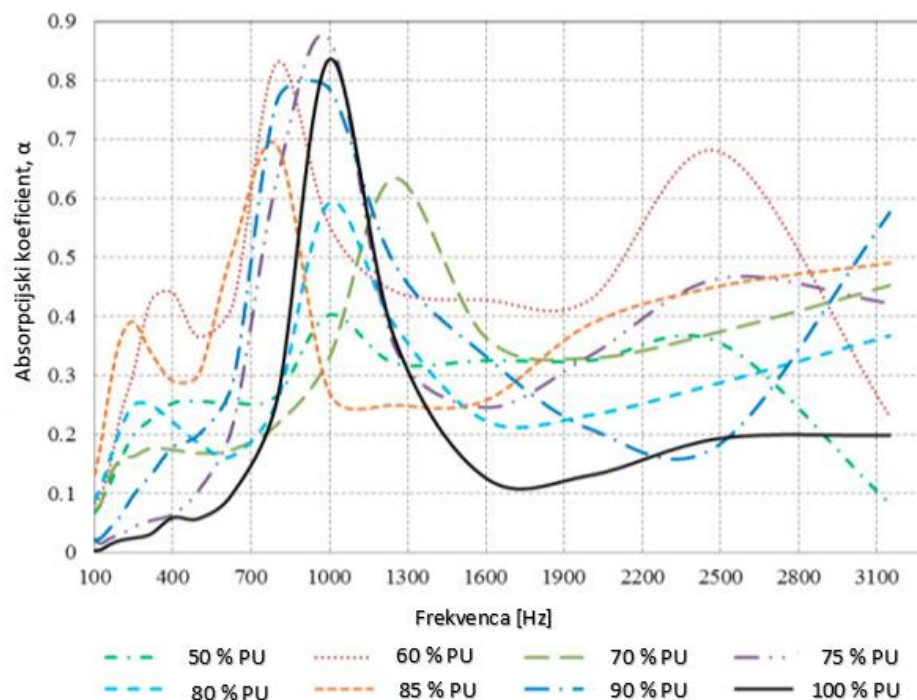
Poleg sestave in strukture materiala ter frekvence zvočnih valov na zvočno-absorpcijski koeficient vpliva tudi usmerjenost zvočnih valov na preizkušanelec. Najpogostejši metodi za določevanje zvočno-absorpcijskega koeficienta sta merjenje z impedančno cevjo (Kundtove cevi) in merjenje v odmevnici, ki pa se razlikujeta predvsem v tem, pod kakšnim kotom zvočni valovi udarijo ob steno preizkušanca. V primeru merjenja z impedančno cevjo padajo zvočni valovi navpično na preizkušanelec, medtem ko pri metodi merjenja v odmevnici zvočni valovi padajo na steno preizkušanca pod naključnim kotom. Razliko prikazuje slika 10. Zaradi te razlike so rezultati meritve v odmevnici nekoliko višji od rezultatov meritve z impedančno cevjo [32].



Slika 10: Različna usmeritev zvočnih valovanj (levo: meritev v odmevnici, desno: meritev z impedančno cevjo) [32]

Raziskave so pokazale, da gostota na absorpcijske lastnosti poliuretanske pene nima posebnega vpliva, ima pa vpliv velikost celic. Večji zvočno-absorpcijski koeficient so imele pene s finejšo celično strukturo, kar potrjuje dejstvo, da se z večjo skupno površino celičnih sten v toploto pretvori več zvočne energije [23].

Raziskava, ki je leta 2015 nastala v sklopu trajnostnih rešitev za energijo in okolje v organizaciji Eenviro, je bila namenjena študiju izboljšanja akustičnih lastnosti trde poliuretanske pene z dodajanjem tekstilnih odpadkov. Testiranih je bilo osem različic kompozita; delež tekstila je variiral med 0 % in 50 %. Rezultati meritev so prikazani na sliki 11 [33].



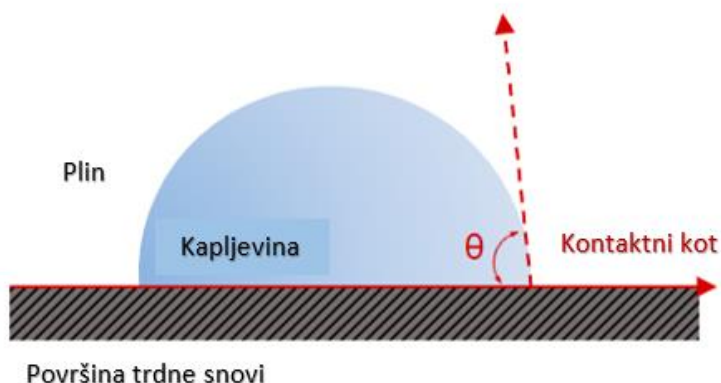
Slika 11: Rezultati meritev zvočno-absorpcijskega koeficienta kompozitov iz poliuretanske pene in tekstilnih odpadkov z impedančno cevjo [33]

Izkazalo se je, da ima material z dodanim tekstilom boljše absorpcijske lastnosti kot 100 % poliuretanska pena. NRC vrednosti kompozitnega materiala s 40 % tekstilnih odpadkov in 60 % poliuretanske pene so bile celo dvakrat večje od NRC vrednosti 100 % poliuretanske pene [33].

2.4.4 Omočljivost

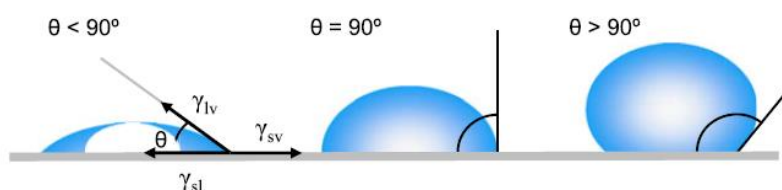
Penjeni materiali med uporabo pogosto pridejo v stik z vodo, zato je podatek o obnašanju materiala v prisotnosti vode še toliko pomembnejši. Poliuretanske pene so lahko hidrofilne ali hidrofobne. Pene, ki se uporabljajo kot kuhinjske gobice ali krpice, morajo biti sposobne dobro absorbirati vodo, medtem ko mora biti absorpcija pen v rešilnih jopičih ali izolacijah čim manjša [15].

Slika 12 prikazuje kapljico kapljevine, ki leži na gladki površini trdne snovi. Kakšno obliko bo kapljica zavzela, je odvisno od omočljivosti površine, ki se določi s pomočjo kontaktnega kota [34, 35].



Slika 12: Kontaktni kot, s katerim določamo omočljivost [36]

Kontaktni kot oklepata medfazna površina med kapljevino in trdno snovjo in medfazna površina med kapljevino in plinom. Bolj kot se kapljevina razširi po površini, manjši je kontaktni kot, medtem ko bo pri večjem kontaktnem kotu kapljevina zavzela bolj okroglo obliko kapljice. S tem bo skušala minimizirati stik s površino trdne snovi. Če je kontaktni kot 0° , govorimo o popolni omočitvi, kadar pa je ta 180° , do omočitve sploh ni prišlo. Površine, karakterizirane s kotom, večjim od 90° , veljajo za hidrofobne, površine. Tiste, karakterizirane s kotom, manjšim od 90° , pa veljajo za hidrofilne [34, 35, 37].



Slika 13: Z večanjem kontaktnega kota se omočljivost povečuje [35]

V notranjosti kapljevine povezujejo vse molekule svoje sosednje molekule z enako silo, ki jih imenujemo kohezijske oz. van der Waalsove sile. Rezultanta teh sil je enaka nič. Molekule, ki so na površini tekočine, rezultante sil ne morejo uravnotežiti, saj jih sosednje molekule obkrožajo le iz določenih smeri. Ker so sile iz notranjosti prevelike in jih molekule iz plinske faze ne morejo kompenzirati, kaže rezultanta sil v notranjost tekočine. Da bi kapljevina ohranila čim nižjo prosto energijo na površini, zavzame obliko z najmanjšo možno površino. Voda na primer je znana po svoji izredno visoki površinski energiji in močnih kohezijskih silah. Če želimo, da z vodo omočimo neko površino, moramo poskrbeti, da bo površinska napetost površine trdne snovi dovolj visoka za ugoditev skupne energije sistema. Površine, ugodne za dobro omočitev z vodo, so polarne površine, ki tvorijo dipol-dipol interakcije ter vodikove vezi; stiku z nepolarnimi površinami se bo voda zaradi njihove nižje površinske energije izognila [34, 35, 37].

Kontaktni kot oz. kot omočenja kapljevine na gladki trdni površini je leta 1805 Thomas Young definiriral z mehanskim ravnovesjem, ki nastane z delovanjem treh medfaznih površinskih napetosti (prikazano na sliki 13). Ravnovesje opisuje Youngova enačba:

$$Y_{\text{trdna snov-plin}} - Y_{\text{trdna snov-kapljevina}} = Y_{\text{kapljevina-plin}} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

pri čemer je:

- $Y_{\text{trdna snov-plin}}$ - medfazna površinska napetost med trdno snovjo in plinom (J/m^2),
- $Y_{\text{trdna snov-kapljevina}}$ - medfazna površinska napetost med trdno snovjo in kapljevino (J/m^2),
- $Y_{\text{kapljevina-plin}}$ - medfazna površinska napetost med kapljevino in plinom (J/m^2),
- θ - kontaktni kot ($^\circ$) [35].

Poliuretani imajo kakor večina drugih polimernih materialov relativno nizko prosto površinsko energijo. Razlog za to je običajno v njihovi kemični strukturi, ki vsebuje premalo polarnih funkcionalnih skupin [38].

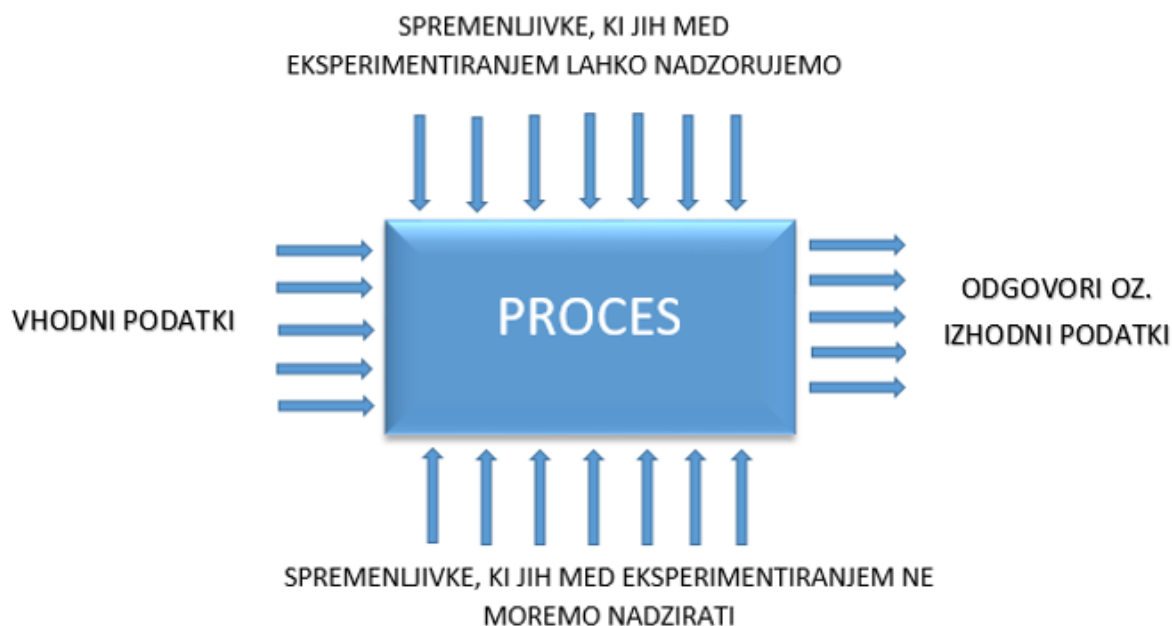
2.5 Načrtovanje eksperimentov

Eksperiment je eden izmed osnovnih pristopov raziskovalnega dela. Gre za sistematičen postopek, pri katerem raziskovalec vpliva na nastanek in potek različnih pojavov in procesov; pri tem proučuje vplivne faktorje, njihove učinke in interakcije. Uspešnost eksperimenta je odvisna od priprave eksperimentalnega načrta, izvajanja meritev in interpretacije rezultatov. Pomembno je, da se potek raziskovanja določi že na začetku [39, 40].

V industriji se že nekaj desetletij uporabljajo metode, kot so posamezni faktor hkrati (ang. one factor at a time (OFAT)), posamezna spremenljivka hkrati (ang. one variable at one time (OVAT)) in spreminjanje ene posamezne spremenljivke hkrati (ang. changing one separate variable at one time (COST)) , vendar so se te izkazale za precej neučinkovite. Razlog je v tem, da se eksperimentiranje z omenjenimi metodami izvaja zgolj s spreminjanjem ene spremenljivke, medtem ko vse ostale ostanejo konstantne. Za učinkovitejše proučevanje vplivnih faktorjev in njihovih interakcij ter možnostjo iskanja optimalnih rešitev z uporabo napovednih kalkulacij se danes v veliki meri uporablja metoda načrtovanja eksperimentov (ang. design of experiments (DoE)) [41, 42].

Načrtovanje eksperimenta se prične z določevanjem vplivnih faktorjev oz. vhodnih spremenljivk. Lahko jih je več, lahko pa je tudi ena sama. Vplivni faktorji so lahko kvalitativni kot npr. prisotnost/odsotnost vode ali kvantitativni kot npr. numerične vrednosti pH, temperature, število vrtljajev, hitrost, čas. Poleg faktorjev, ki jih lahko v procesu nadzorujemo in vodimo, obstajajo tudi faktorji, na katere nimamo vpliva in v določeni meri predstavljajo napake eksperimenta. Primer takšnih prikritih faktorjev je človeški faktor. Poleg vplivnih faktorjev je potrebno določiti tudi odgovore oz. izhodne

podatke procesa, na podlagi katerih se interpretirajo rezultati. Vhodne in izhodne spremenljivke procesa prikazuje slika 14 [39, 40, 42].



Slika 14: Vhodne in izhodne spremenljivke procesa [39, 40, 42]

Naslednji korak pri načrtovanju eksperimenta je določevanje nivojev faktorjev in opredelitev eksperimentalnega področja. Nivo je vrednost, pri kateri se poskus izvaja. Lahko jih je več, morata pa biti vsaj dve. Najpomembnejši vrednosti nivojev sta najvišja in najnižja vrednost, ki hkrati definirata eksperimentalno področje [40].

Eksperimentalne načrte v grobem delimo na popolne in delne. Popolni eksperimentalni načrt vključuje vse možne eksperimente z vsemi spremenljivkami na vseh izbranih nivojih. Z večanjem števila faktorjev in nivojev število poskusov močno narašča, zato se ta vrsta eksperimentalnih načrtov uporablja redko. Prednost je sicer ta, da vključimo vse interakcije, vendar za to porabimo ogromno časa in stroškov. Delni eksperimentalni načrt pa v nasprotju s popolnim načrtom vključuje le določene poskuse, ki se določijo kot najprimernejše. Uporabi se takrat, kadar je vseh poskusov, ki bi vključevali vse interakcije in možnosti, preveč in bi bila časovna in stroškovna izguba prevelika. Za delni eksperimentalni načrt porabimo sicer mnogo manj časa kot npr. za metodo OFAT ali popolni eksperimentalni načrt, vendar pa s to metodo pridobimo manj podatkov, zaradi česar je lahko napovedna kalkulacija pomanjkljiva [39, 40].

Med naprednejše metode delnih eksperimentalnih načrtov DoE spadajo Taguchi metoda, Plackett-Burman metoda in metoda odzivnih površin.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Kompozit je sestavljen iz treh komponent – odpadne poliuretanske pene, odpadne poliestrske tkanine in veziva.

3.1.1 Odpadna poliuretanska pena

Poliuretanska pena, ki jo podjetje Kopur d. o. o. uporablja za recikliranje, so večji odpadni kosi pene, ki so nastali kot stranski produkt proizvodnje različnih podjetij. Gre predvsem za podjetja, ki se ukvarjajo s proizvodnjo pohištvene industrije, kjer peno uporabljajo za različne vrste oblazinjenja. Večino pene je proizvedene v slovenskem podjetju Plama-pur d. o. o. Gostota pene se giblje od 20 kg/m³ do 100 kg/m³, tlačna trdnost pa med 15 kPa in 30 kPa.

3.1.2 Tekstilni odpadki

Tekstilni odpadki so stranski produkt proizvodnih procesov podjetja Kopur d. o. o. V osnovi gre za netkani iglani poliestrski tekstil 2D kontinuirane oblike (krajše flis), ki ga podjetje dobavlja navitega na kolute (eden izmed glavnih dobaviteljev je slovensko podjetje Filc d. o. o.). Glede na tip flisa se razlikujejo po gostoti (70 kg/m³– 1200 kg/m³) in barvi (bela, siva, črna). Poleg tega se lahko uporabljajo v različnih izvedbah, kot so tekstili, laminirani s poliuretansko folijo, tekstili s samolepilnim nanosom itd. Flis ima hidrofobni značaj. Odpadni odrezki, ki nastanejo med termoformiranjem, se zberejo in zmeljejo v mlinu.

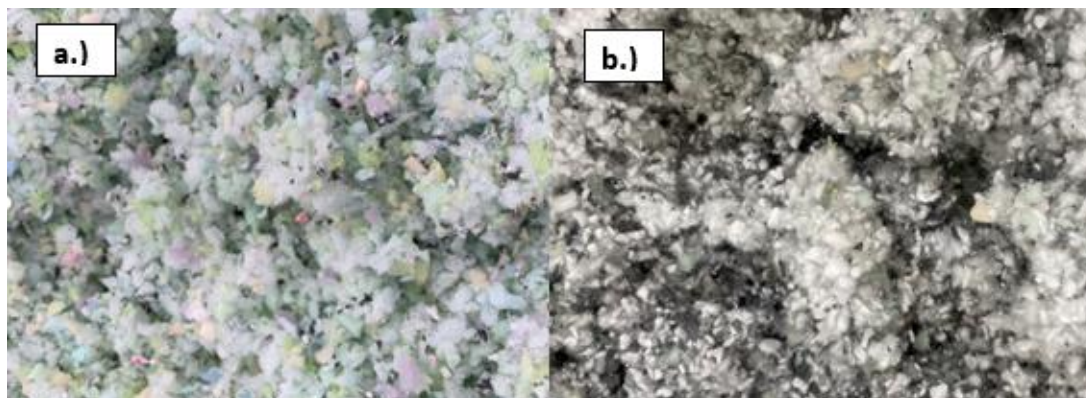
3.1.3 Vezivo

Vezivo s komercialno oznako ISO 139/4, proizvajalca BASF Polyurethanes GmbH iz Nemčije, je predpolimer na osnovi 4,4'-difenilmetan diizocianata (MDI). Komponenta se uporablja predvsem za proizvodnjo izdelkov iz reciklirane poliuretanske pene. Gre za prozorno, rahlo rumenkasto viskozno snov, ki se kot vezivno sredstvo aktivira v prisotnosti vroče pare. Pri 25 °C dosega viskoznost vrednosti 325 mPa/s, gostota pa pri 25 °C znaša 1,14 g/cm³.

3.2 Priprava vzorcev

3.2.1 Priprava mešanice materialov za kompozite

Za vsak kompozit smo pripravili 1 kg mešanice kosmičev poliuretanske pene in tekstila. Glede na delež tekstilnih odpadkov, ki naj bi ga posamezni kompozit vseboval, smo te pripravili v masnem razmerju PU pena : tekstil = 70 : 30, 80 : 20 in 90 : 10. Kosmiči pene in tekstila so prikazani na sliki 15.



Slika 15: a.) Fotografija kosmičev poliuretanske pene, b.) Fotografija kosmičev tekstilnih odpadkov

Pripravljene zmesi smo zmešati z ročnim mešalnikom. Komponenti smo mešali tako dolgo, da je bila na videz zmes homogena. Nato smo dodali vezivo. Za doseganje ustreznih gostot kompozitov smo maso potrebnega materiala izračunali s pomočjo volumna kalupa, v katerem se mešanica kasneje oblikuje v kompozit. Receptura za posamezne kompozite je prikazana v tabeli 1.

Tabela 1: Receptura kompozitov

VZOREC	OZNAKA	GOSTOTA (kg/m ³)	DELEŽ VEZIVA (%) ¹	DELEŽ TEKSTILA (%)
K_80_6_30	1	80	6	30
K_80_6_20	2	80	6	20
K_80_6_10	3	80	6	10
K_80_7_30	4	80	7	30
K_80_7_20	5	80	7	20
K_80_7_10	6	80	7	10
K_80_8_30	7	80	8	30
K_80_8_20	8	80	8	20
K_80_8_10	9	80	8	10
K_100_6_30	10	100	6	30
K_100_6_20	11	100	6	20
K_100_6_10	12	100	6	10
K_100_7_30	13	100	7	30
K_100_7_20	14	100	7	20
K_100_7_10	15	100	7	10
K_100_8_30	16	100	8	30

¹ Delež veziva je predstavljen kot dodatek mešanici poliuretanske pene in tekstila in ga nismo obravnavali kot del zmesi pri kalkulaciji deležev komponent, zato je delež pene in tekstila skupaj 100 %.

VZOREC	OZNAKA	GOSTOTA (kg/m ³)	DELEŽ VEZIVA (%)	DELEŽ TEKSTILA (%)
K_100_8_20	17	100	8	20
K_100_8_10	18	100	8	10
K_120_6_30	19	120	6	30
K_120_6_20	20	120	6	20
K_120_6_10	21	120	6	10
K_120_7_30	22	120	7	30
K_120_7_20	23	120	7	20
K_120_7_10	24	120	7	10
K_120_8_30	25	120	8	30
K_120_8_20	26	120	8	20
K_120_8_10	27	120	8	10

3.2.2 Oblikovanje kompozitov v prisotnosti vroče pare

Pripravljene mešanice smo enakomerno porazdelili v kalup oziroma orodje in ga zaprli. Orodje ima na zadnji strani priključen ventil, preko katerega se dovaja vroča para, ki poskrbi, da se vezivo aktivira in komponente med sabo povežejo. Po dveh minutah izpostavljanja vroči pari smo kompozit vzeli iz orodja. Orodje je prikazano na sliki 16.



Slika 16: Levo: orodje v fazi aktivacije veziva s pomočjo vroče pare, desno: odprto orodje z oblikovanim kompozitom

3.2.3 Izsekovanje in razrez plošč kompozitov

Preizkušance za karakterizacijo natezne trdnosti smo pripravili z uporabo stroja za izsekovanje (Schön & Cie Crosshead Die Cutting Machine Type7072M). S pomočjo namenskega noža, ki se uporablja izključno za pridobitev preizkušancev po standardu SIST EN ISO 1798:2009, smo dosegli zahtevano obliko in dimenzije.

Preizkušance za testiranje tlačne trdnosti, gorljivosti, zvočne absorpcije in omočljivosti, ki po standardih zahtevajo enostavne oblike ravnih linij, smo iz plošč kompozitov lahko

pripravili z razrezom. To smo izvedli s pomočjo računalniško vodenega obdelovalnega stroja (ang. computer numerical control (CNC)), ki temelji na obdelovanju s pomočjo tračne žagice.

Izgled vzorcev je prikazan na sliki 17.



Slika 17: Fotografije preizkušancev za karakterizacijo (levo: za preizkus gorljivosti, sredina: za preizkus tlačne trdnosti, desno: za preizkus natezne trdnosti)

3.3 Karakterizacija

3.3.1 Natezni preizkus

Pri metodi preizkušane, vpet v čeljusti, raztegujemo s konstantno hitrostjo, dokler se ta ne pretrga; medtem merimo silo. Na podlagi izmerjene sile in ploščine preseka preizkušanca lahko določimo natezno trdnost. Natezna trdnost je maksimalna napetost, ki v vzorcu nastane med raztegovanjem. Poleg natezne trdnosti lahko s preizkusom določimo tudi raztezek, ki je nastal do pretrga (zloma) vzorca [43].

Natezni preizkus smo izvajali v skladu s standardom SIST EN ISO 1798:2009, ki je posebej namenjen karakterizaciji penjenih polimernih materialov. Natezni preizkus smo izvedli z univerzalnim preizkuševalnim strojem AG-X plus 10 kN (Shimadzu Corporation, Kjoto, Japonska), ki je prikazan na sliki 18. Za preizkus smo uporabili po 5 preizkušancev (paralelk) na vzorec. Pred vpetjem v čeljusti smo vsakemu preizkušancu izmerili dimenzije ter s črticami označili območje z vzdolžno razdaljo 50 mm. Preizkušanec smo testirali s hitrostjo pomika 500 mm/min.



Slika 18: Univerzalni stroj Shimadzu AG X plus, ki je poleg nateznega preizkusa primeren tudi za izvajanje tlačnega in preizkusa

3.3.2 Tlačni preizkus

S preizkusom določimo karakteristiko napetost/raztezek (angl. compression stress/strain characteristic (CC)), ki podaja informacije o tlačnih lastnosti materiala, vendar ne nujno o dolgoročni nosilnosti materiala. Karakteristika napetost/raztezek tlačnega preizkusa se razlikuje od karakteristike trdote, ki jo opisuje standard ISO 2439. Pogojeni sta z debelino in nateznimi lastnostmi materiala, obliko kompresijskih plošč ter obliko in velikostjo preizkušancev. Pred izvajanjem preizkusa smo testirancem izmerili dimenzije in natančno določili njihovo površino. Preizkušanje je potekalo s cikličnim stiskanjem testiranca s pomočjo kompresijskih plošč. Prvi trije cikli so potekali s stiskom materiala do 70 % njegove izhodiščne debeline. Zadnji, četrti stisk, pa je potekal s stiskom do 40 % izhodiščne debeline. Medtem smo merili silo. Na podlagi napetosti, ki se je v materialu ustvarila v trenutku zadnjega stiska, smo določili karakteristiko napetosti/raztezka, ki je hkrati tudi vrednost kompresijske napetosti pri 40 % stisku (CV_{40}) [44].

Tlačni preizkus je bil izveden v skladu s standardom SIST EN ISO 3386-1:2000, ki je namenjen karakterizaciji mehkih pen z gostoto, nižjo od 250 kg/m^3 . Za preizkus smo potrebovali 3 preizkušance (3 paralelke) na vzorec. Kompresijske plošče, ki smo jih pri testiranju uporabili, so imele površino $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$. Ker površina testiranca ne sme biti večja od površine kompresijske plošče, smo se odločili, da bo površina preizkušancev obsegala $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$. Hitrost med testom je bila 100 mm/min ; stroj, ki smo ga za to uporabili, je bil Shimadzu AG X plus.

3.3.3 Odziv na ogenj

Metoda določa lastnosti odziva na ogenj različnih materialov v avtomobilski industriji. Gre predvsem za materiale, ki so vgrajeni v notranjo opremo avtomobilov in vključujejo izolacijske materiale, inženirsko plastiko in druge. Namen je zmanjšati število smrtnih žrtev in poškodb potnikov v motornih vozilih zaradi požarov, zlasti tistih, ki izvirajo iz notranjosti vozila iz virov, kot so vžigalice in cigarete. Metoda temelji na merjenju hitrosti širjenja plamena iz enega mesta na drugega. Gre za horizontalni test, kar pomeni, da je lega preizkušanca v horizontalnem položaju; horizontalno se posledično pomika tudi plamen gorenja. Vzorec smo v komoro postavili tako, da smo ga namestili na podporno stojalo in nanj položili podporno držalo v obliki črke U. Po zaprtju komore smo aktivirali plamen višine 3 cm na Bunsenovemu gorilniku, ki je tik pod vzorcem na začetni strani komore in je vir vžiga. Ko se je material vnel, se je pričel širiti plamen. Ko je ta dosegel dolžino 3,5 cm vzorca, smo pričeli z merjenjem časa. Čas smo ustavili, ko je ogenj popolnoma ugasnil, in si zabeležili razdaljo zgorelega materiala. Hitrost gorenja naj bi bila nižja od 100 mm/min, kar pomeni čas, v katerem potniki še lahko varno zapustijo vozilo.

Glede na področje uporabe izdelka, izdelanega iz materiala, ki ga preiskujemo, smo preizkus odziva na ogenj izvedli v skladu s standardom FMVSS 302. Za preizkus smo uporabili 3 preizkušance na vzorec, kar sicer ni popolnoma skladno s standardom, saj je predpisanih 5 paralelek. Vzorce smo preizkušali v komori Atlas HMV Horizontal Flame Chamber, ki je konstruirana iz nerjavečega jekla s toplotno odpornim steklenim oknom.

Komora za izvajanje testa horizontalne gorljivosti je poleg vzorca, nameščenega v podporno držalo, prikazana na sliki 19.



Slika 19: Levo: Atlas HMV Horizontal Flame Chamber, desno: vzorec, nameščen na podporni element z držalom v obliki črke U

3.3.4 Absorpcija zvoka

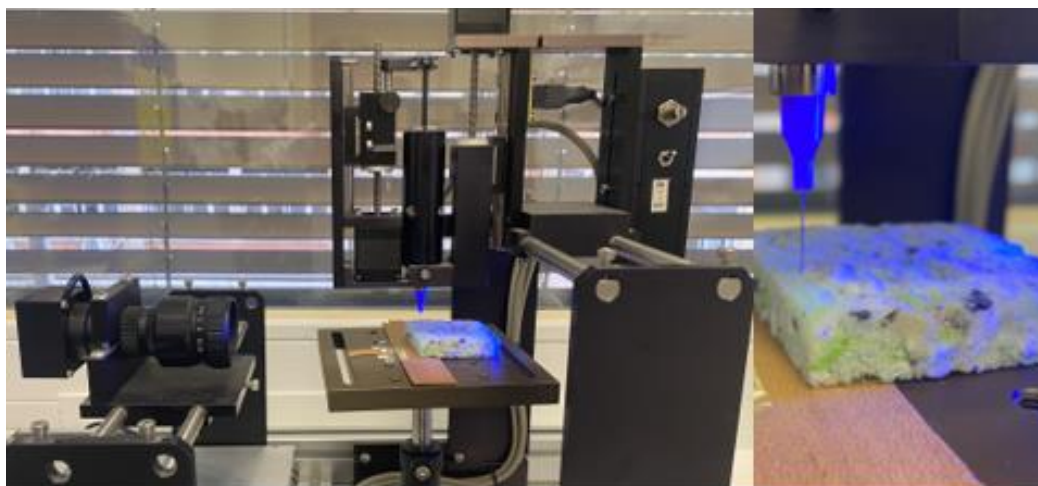
Preizkus absorpcije zvoka je bil izveden z uporabo alfa kabine. Preizkušancem smo pred testiranjem izmerili dimenzije in zabeležili površino. Pred začetkom preizkušanja smo opravili meritve prazne kabine, torej brez vzorca. S to meritvijo je program primerjal posamezne meritve vzorcev in tako izračunal absorpcijski koeficient. Vzorec smo v alfa kabini postavili na določeno pozicijo in kabino tesno zaprli. Nato smo za nekaj sekund sprožili šum preko zvočnikov, nameščenih v odmevnici. Pri tem so se s pomočjo mikrofona zajeli odmevni časi, ki nastanejo med stimulacijami s šumnimi impulzi oktavnih oz. terciarnih pasov. Program nam je nato izračunal absorpcijski koeficient pri frekvencah 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz, 2000 Hz, 2500 Hz, 3150 Hz, 4000 Hz, 5000 Hz, 6300 Hz, 8000 Hz, 10000 Hz.

Preizkus smo izvedli po smernicah standarda PR 353.2, ki se uporablja za preizkušanje materialov BMW avtomobilske industrije. Potrebovali smo 1 preizkušanec na vzorec. Glede na to, da v preteklosti meritve niso pokazale nobenih vplivov vsebnosti veziva na absorpcijo zvoka, deleža veziva pri preizkušanju nismo upoštevali. Preizkusili smo torej 9 vzorcev, ki so vključevali kombinacije vseh 3 nivojev faktorjev gostote in deleža tekstila. Alfa kabina, ki smo jo uporabili, je domače izvedbe in je manjša različica alfa kabine v švicarskem zveznem laboratoriju za materiale, znanost in tehnologijo (EMPA) proizvajalca Autoneum Wintertur. Računalniški program, ki smo ga uporabljali za analizo, je DEWESoftX2.

3.3.5 Omočljivost in navzemanje vlage

Preizkus omočljivosti smo izvedli z metodo merjenja kontaktnega kota. Postopek se prične z nanosom kapljice kapljevine na ravno, "gladko" površino vzorca. V našem primeru smo uporabili destilirano vodo. Obnašanje kapljice na površini se vseskozi spremlja s kamero, ki vsako sekundo posname fotografijo. V našem primeru je kamera snemala slike 80 sekund. Glede na obliko kapljice, ki jo kapljevina tvori v stiku s površino, program izračuna kontaktni kot.

Pri tem smo sledili standardu SIST EN 828:2014. Za meritve smo uporabili goniometer proizvajalca First Ten Anystrems 1000 (Slika 20); program, s katerim smo meritve analizirali, je bil FTA 32. Ker je material nehomogen in bi za statistično analizo posameznih kompozitov morali izvesti ogromno meritev, smo se odločili, da se usmerimo v meritve različnih delcev, ki kompozit sestavljajo. Opravili smo meritve posameznih kosmičev pene, kosmičev tekstila in nazadnje veziva. Za merjenje veziva smo vzorec viskozne snovi s kapalko nanесли na stekleno ploščico, na kateri se je tvorila enakomerno porazdeljena plast veziva. Meritve smo opravili na 10 različnih kosmičih pene in 10 različnih kosmičih tekstila; na površini veziva smo opravili 3 meritve.



Slika 20: Merjenje kontaktnega kota (levo: goniometer, vzorec z iglastim nanašalcem kapljevine)

Ker nas je zanimalo, koliko vlage je material sposoben absorbirati iz prostora s povprečno sobno vlažnostjo, smo opravili tudi test navzemanja vlage. Pri tem smo vzorce, ki so bili hranjeni v zatesnjenih vrečkah, izmerili izhodiščno maso in jih nato za teden dni izpostavili standardnim pogojem s temperaturo 23 °C in relativno vlažnostjo 50 %, da se je masa stabilizirala. Nato smo izmerili maso in meritev po eni uri ponovili, da smo se prepričali o ravnotežnem stanju (vrednosti se ne smejo spreminjati). Vzorce smo zatem sušili v sušilniku pri temperaturi 60 °C za 24 ur. Po sušenju smo vzorce hranili v eksikatorju ter maso ponovno izmerili; potem smo jih ponovno dali v sušilnik. Po eni uri smo postopek merjenja mase ponovili, da smo se prepričali, da se je masa stabilizirala.

Sušilnik, ki smo ga uporabili za sušenje vzorcev, je bil SP-55 EASY (proizvajalec Kambič d. o. o.).

3.4 Statistična obdelava podatkov




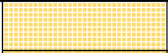





Statistično analizo smo izvedli s programsko opremo Minitab 19. Podatke smo modelirali z linearno regresijo ter jih analizirali z ANOVA. Razpršenost točke okoli regresijske premice meri determinacijski koeficient (R^2). Model z večjo razpršenostjo izmerjenih podatkov od premice in s tem večjim odstopanjem oblaka točk od modela ima manjšo vrednost determinacijskega koeficienta. V primeru, kjer se podatki ujemajo s premico oz. je njihovo odstopanje od premice majhno, je vrednost determinacijskega koeficienta večja. Ali rezultati kažejo statistično pomembnost ali ne, nam pove P-vrednost oz. statistična značilnost. Ali lahko ničelno hipotezo zavrnamo ali ne, nam pove stopnja tveganja (α), ki predstavlja verjetnost, da se bomo pri sklepanju zmotili. V diplomskem delu smo kot stopnjo tveganja oz. stopnjo pomembnosti definirali vrednost 0,05 [45].

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Rezultati meritev in analiza posameznih vplivov, interakcij na posamezne lastnosti

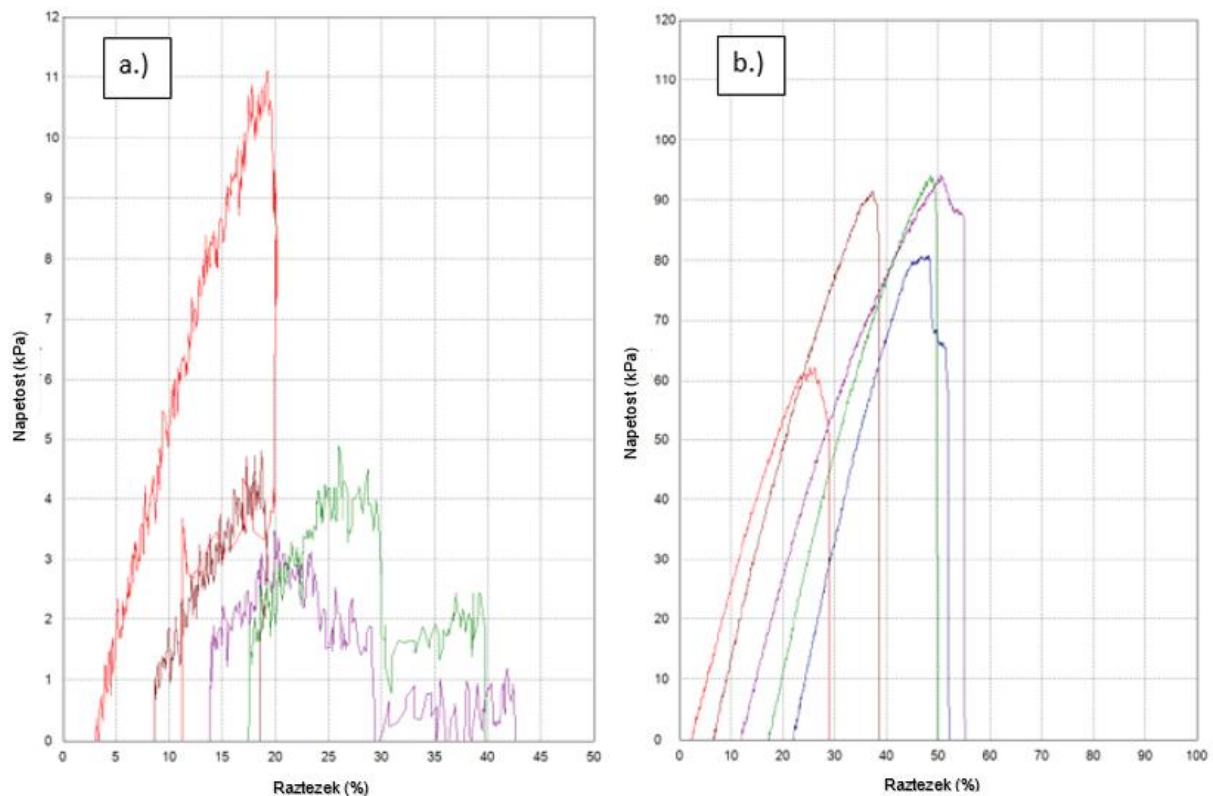
4.1.1 Natezni preizkus

Slika 21 prikazuje legendo diagramov z rezultati. Stolpci, ki ponazarjajo različne vzorce, se med sabo razlikujejo po barvi, vzorcu in svetlosti stolpcev, kar predstavlja 3 različne faktorje ter njihove nivoje. Stolpci z različnimi barvami predstavljajo vzorce, ki se razlikujejo po gostoti; stolpci z različnim vzorcem predstavljajo vzorce z različnim deležem veziva; svetlost barve stolpca ponazarjajo vzorce, ki se med seboj ločijo po deležu tekstila.

LEGENDA			
barva stolpcev		RG 80	gostota
		RG 100	
		RG 120	
vzorec stolpcev		6%	delež veziva
		7%	
		8%	
svetlost barve stolpcev		30%	delež tekstila
		20%	
		10%	

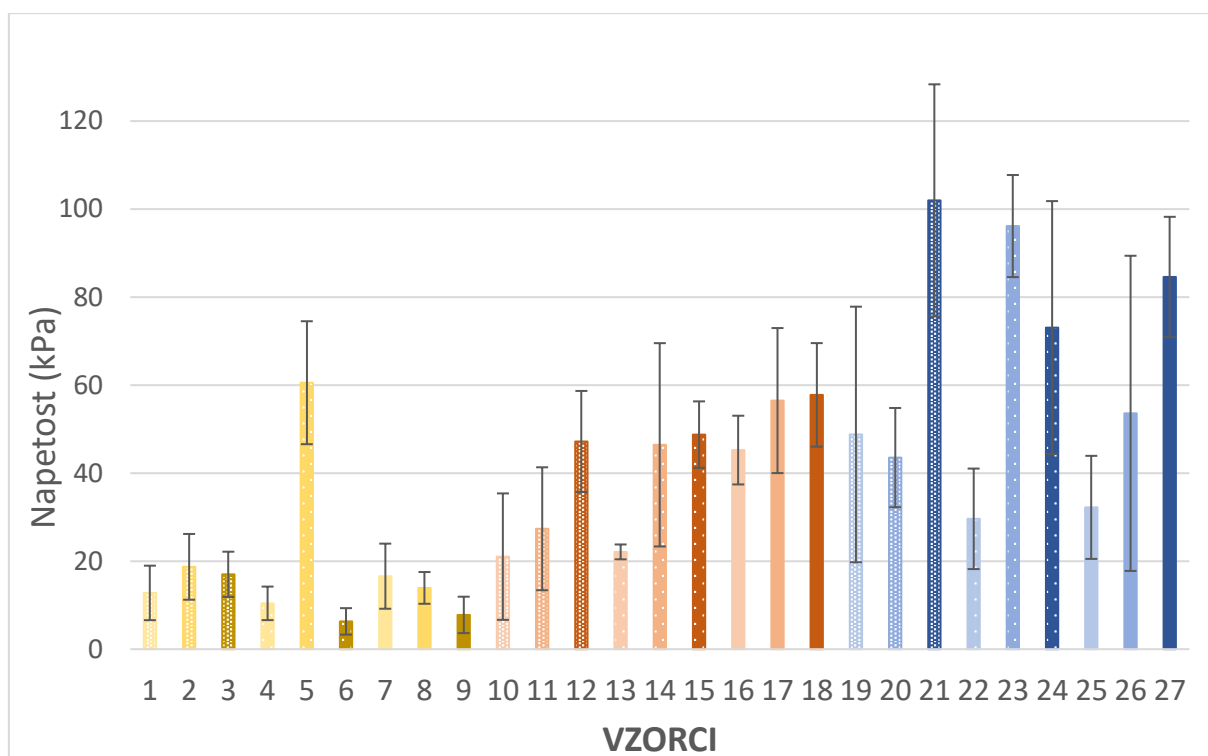
Slika 21: Legenda grafov na slikah 23 in 24

Slika 23 prikazuje rezultate natezne trdnosti, slika 24 pa rezultate raztezka pri pretrgu. Po pregledu rezultatov lahko z gotovostjo trdimo, da ima izmed vseh faktorjev največji vpliv na rezultate gostota. Z večanjem gostote se natezna trdnost namreč znatno poveča. Pri analizi diagramov smo opazili, da so krivulje gostote 80 kg/m^3 precej nazobčane, medtem ko so krivulje vzorcev z večjimi gostotami bolj gladke (razlika, prikazana na sliki 22). To je mogoče razložiti z večjim deležem praznin, ki so prisotne pri vzorcih z nižjo gostoto. Vzorci z višjimi gostotami so s tega vidika bolj homogeni, zato je napetost med preizkusom naraščala enakomerneje. Poleg omenjenega smo pri vzorcih z nižjo gostoto opazili, da je prišlo do točke zloma nekoliko kasneje kot pri maksimalni napetosti. Pri vzorcih z večjo gostoto se je vzorec pretrgal pri maksimalni napetosti oz. tik za njo.



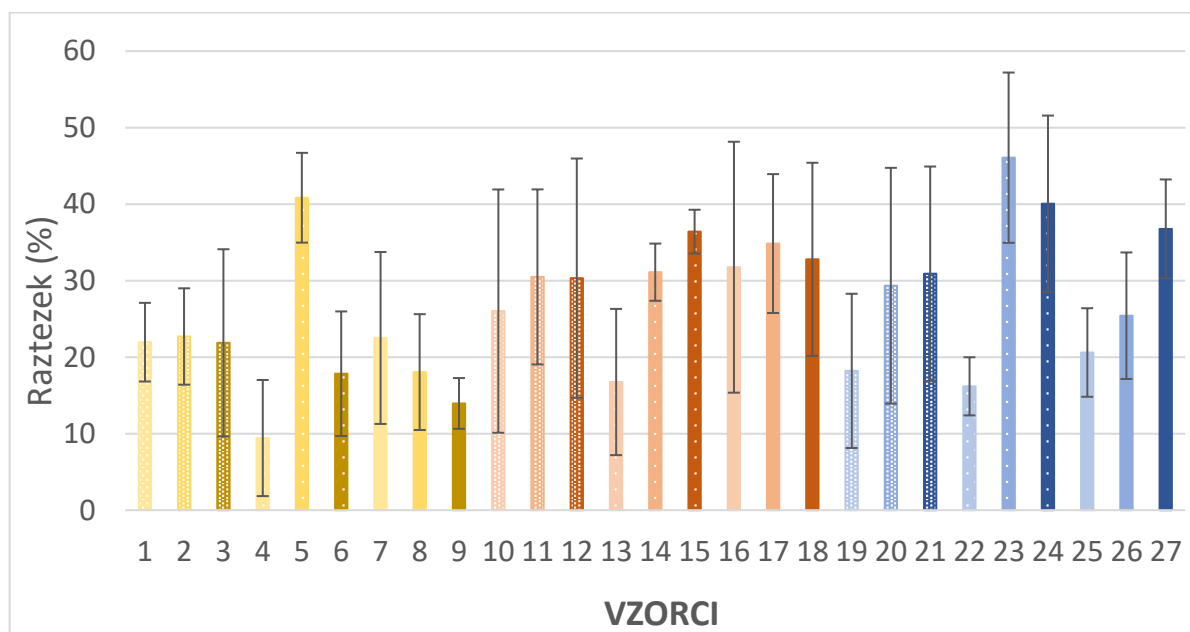
Slika 22: Diagram napetosti v odvisnosti od raztezka pri nateznem testu: a.) Vzorec z gostoto 80 kg/m^3 , b.) vzorec z gostoto 120 kg/m^3

Vzorci z gostoto 80 kg/m^3 so imeli natezno trdnost v območju med 10 kPa in 20 kPa, raztezek pri pretrgu pa v območju med 10 % in 20 %. Izjema je vzorec K_80_7_80, ki je dosegel povprečno natezno trdnost 60 kPa, vendar z nekoliko večjo deviacijo in raztezkom. Vrednosti natezne trdnosti so se pri vzorcih z gostoto 100 kg/m^3 precej zvišale. Povprečne vrednosti natezne trdnosti so se gibale v območju od 25 kPa do 55 kPa, raztezek pa v območju med 18 % in 37 %. Nekateri vzorci z gostoto 120 kg/m^3 so dosegali bistveno višje natezne trdnosti, kot npr. vzorec K_120_6_90 s povprečno vrednostjo 101 kPa, vendar so imeli relativno visoke standardne deviacije meritev. Natezne trdnosti vzorcev najvišje gostote so se gibale v območju med 30 kPa in 100 kPa, raztezek pri pretrgu pa v območju med 15 % in 45 %.



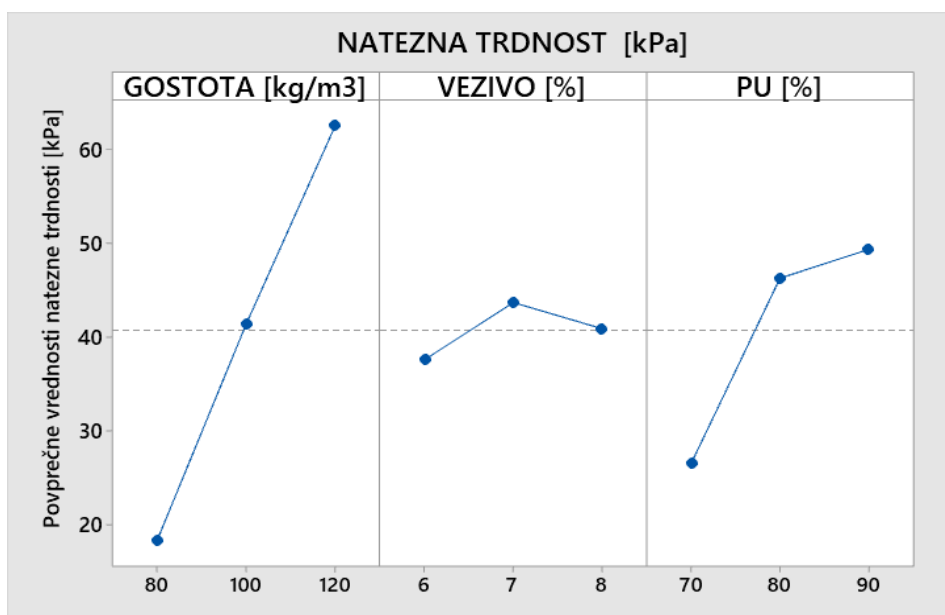
Slika 23: Histogram z rezultati nateznega testa: natezna trdnost oz. maksimalna napetost

Delež veziva nima velikega vpliva na rezultate. Pri vzorcih z gostotama 80 kg/m^3 in 120 kg/m^3 med rezultati in deležem veziva ni zaznani posebnih povezav, pri 100 kg/m^3 pa je mogoče opaziti, da natezna trdnost z večjim dodatkom veziva nekoliko narašča. Nekoliko več vpliva ima na rezultate delež tekstila. Iz rezultatov vzorcev z 100 kg/m^3 in 120 kg/m^3 je razvidno, da z večanjem deleža tekstila natezna trdnost in raztezek padata, kar pa se sicer ni izkazalo pri vzorcih z najnižjo gostoto.



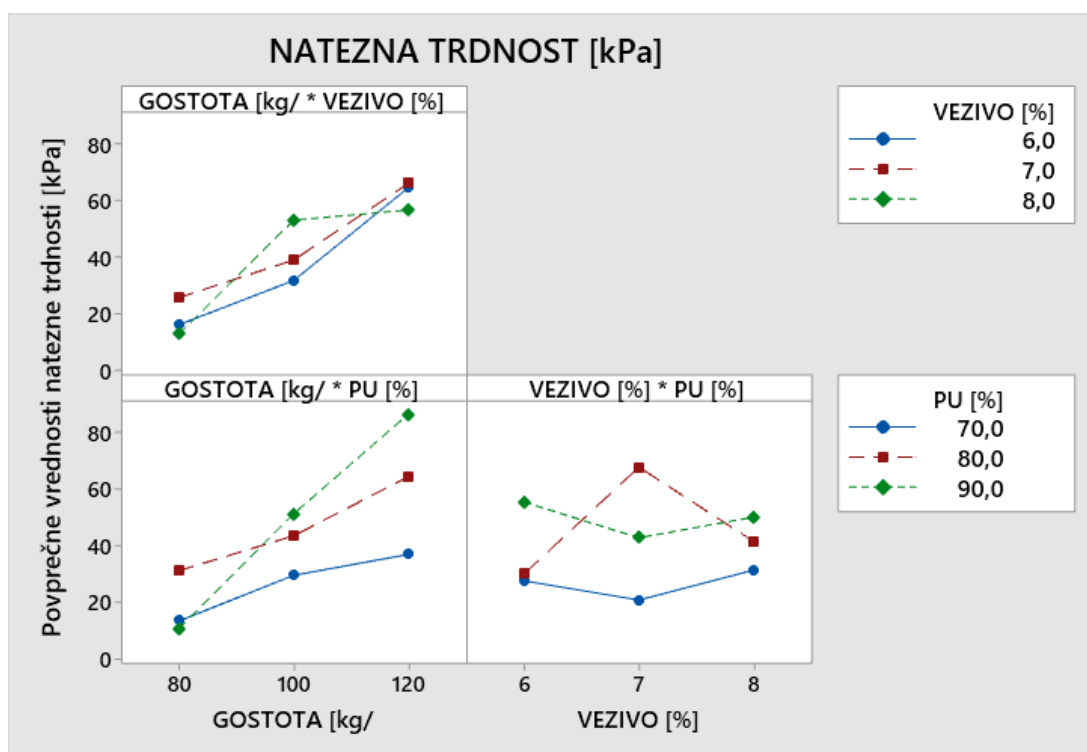
Slika 24: Histogram z rezultati nateznega testa: raztezek pri pretrgu

Slika 25 prikazuje vpliv vseh treh faktorjev na natezno trdnost kompozita. Vsaka točka na grafu je povprečje 9 vzorcev enake lastnosti (na primer 9 vzorcev ima gostoto 80 kg/m³, 9 vzorcev ima dodanega 6 % veziva, itd.). Vidimo, da sta gostota in natezna trdnost premo sorazmerni; nekoliko manjši vpliv ima na natezno trdnost delež tekstila oz. pene. Vpliv gostote in dodatka tekstila nam potrjuje tudi njuna izjemno nizka p-vrednost. P-vrednost deleža tekstila je 0,003, gostote pa celo 0,000. Vpliv veziva ni bil statistično pomemben, saj njegova p-vrednost znaša 0,481. Vrednost determinacijskega koeficienta R^2 modela znaša 95,48 %.



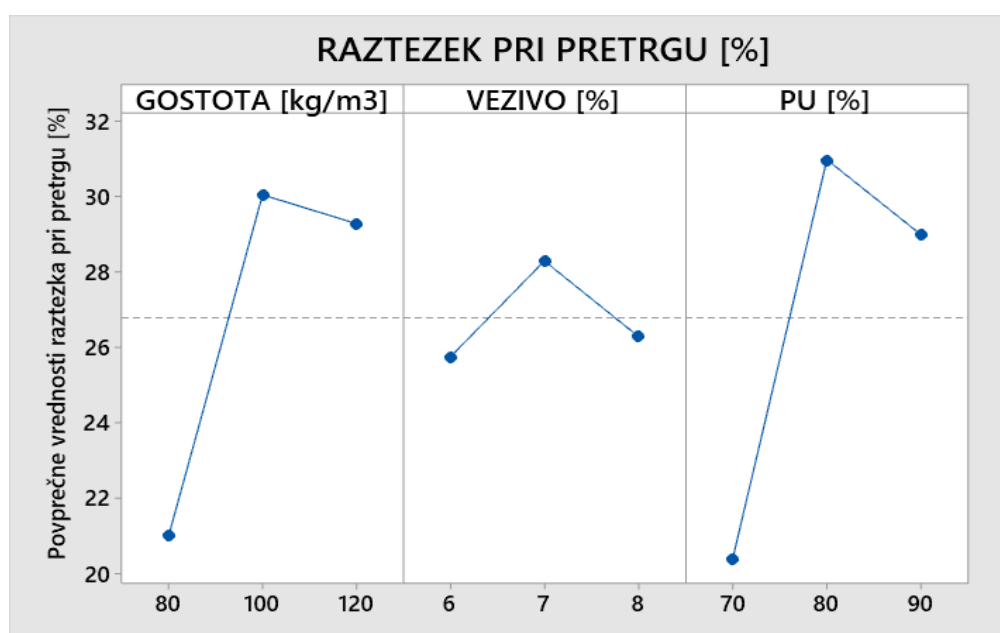
Slika 25: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate natezne trdnosti kompozita.

Slika 26 prikazuje vpliv interakcij faktorjev na natezno trdnost kompozita. Analiza variance je pokazala, da sta statistično pomembni interakciji med gostoto in deležem tekstila (p -vrednost = 0,017) ter med deležem tekstila in deležem veziva (p -vrednost = 0,016). Interakcija med gostoto in deležem veziva ni statistično pomembna (p -vrednost = 0,147). Iz rezultatov je razvidno, da natezna trdnost ne glede na vsebnost veziva z gostoto narašča. Največjo vrednost imajo v tem primeru vzorci z gostoto 120 kg/m³. Iz diagrama interakcij gostote in deleža tekstila močno izstopa krivulja z najnižjim deležem tekstila, ki z večanjem gostote strmo narašča, kar kaže na to, da ima gostota večji vpliv na kompozite z nižjim deležem veziva. To je mogoče pojasniti s slabo kompatibilnostjo oz. adhezijo tekstilnih kosmičev z vezivom oz. drugimi komponentami kompozita. Z dodajanjem tekstila nastane kompozit krhek in drobljiv, zato je tudi trdnost materiala pri največji vsebnosti tekstila najmanjša. Največja razlika v trdnosti nastane med krivuljami različnih deležev pene pri najvišji gostoti. Iz grafa, ki nakazuje interakcijo med vezivom in deležem tekstila, lahko razberemo, da pri nizki in visoki vrednosti deleža tekstila delež veziva nima velikega vpliva, medtem ko dobimo pri 80 % poliuretanski vsebnosti najvišje vrednosti trdnosti pri 7 % veziva.



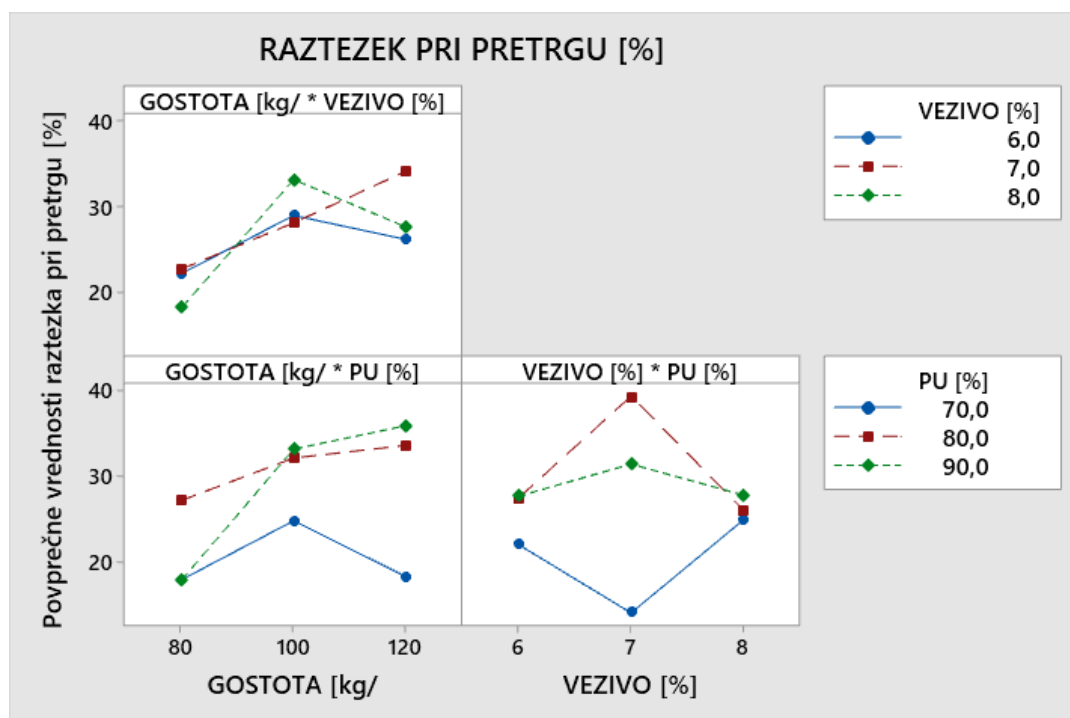
Slika 26: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate natezne trdnosti

Slika 27 prikazuje vpliv vseh treh faktorjev na raztezek kompozita pri pretrgu. Razvidno je, da imata pomemben vpliv delež tekstila ter gostota, kar nakazujeta tudi njuni nizki p-vrednosti (0,003 in 0,007). Pri obeh opazimo skokovito rast vrednosti raztezka iz najnižjega nivoja do srednje vrednosti. Pri obeh se je raztezek s prehajanjem krivulje v območje tretjega nivoja nekoliko zmanjšal. Vpliv veziva ni statistično pomemben. Vrednost determinacijskega koeficienta R^2 je 91,69 %.



Slika 27: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate raztezka pri pretrgu

Slika 28 prikazuje vpliv interakcij faktorjev na raztezek kompozita pri pretrgu. Analiza je pokazala, da ima interakcija veziva z deležem tekstila na raztezek precejšen vpliv. P-vrednost interakcije je 0,016. Na grafu vidimo očitno razliko med vrednostmi pri kompozitih z različnimi deleži tekstila pri vsebnosti veziva 7 %. Največji raztezek dosega krivulja z 20 % vsebnostjo tekstila, najnižjega pa krivulja s 30 % vsebnostjo tekstila. Povprečne vrednosti raztezkov vzorcev z različnimi vsebnosti tekstila so pri vsebnosti veziva 6 % in 8 % na podobnem nivoju. Vpliv interakcije med gostoto in vezivom ter interakcije med gostoto in deležem tekstila ni statistično pomemben.

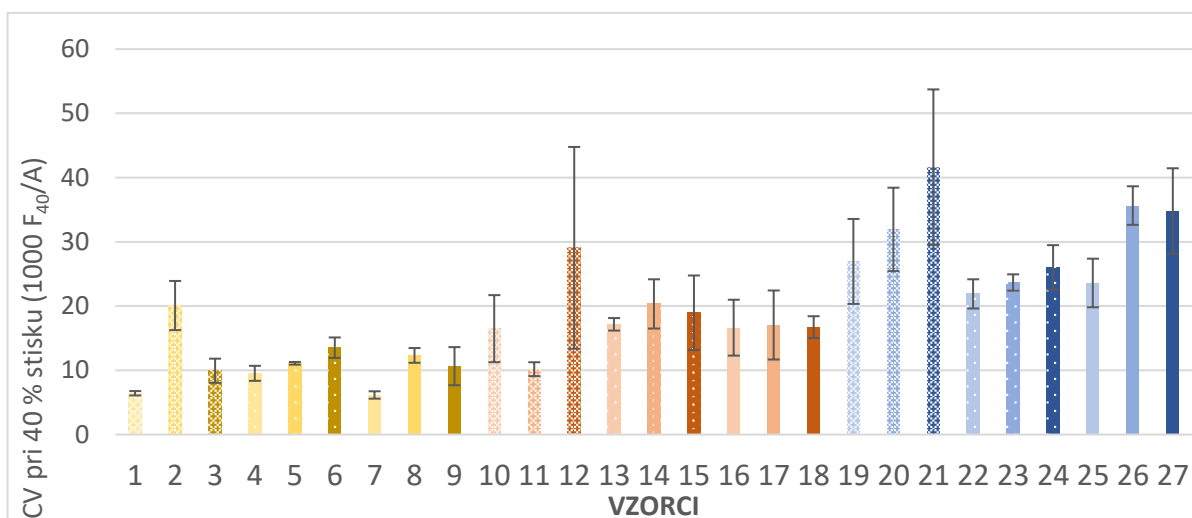


Slika 28: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate raztezka pri pretrgu

4.1.2 Tlačni preizkus

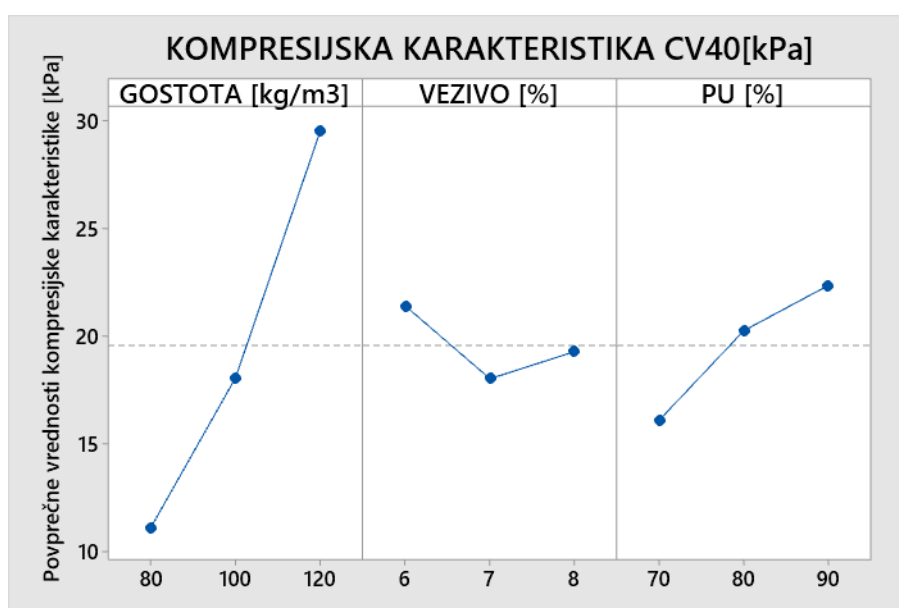
Slika 29 prikazuje rezultate tlačnega preizkusa; legenda diagrama je predstavljena na sliki 21. Iz diagrama je razvidno, da na tlačno trdnost v največji meri vpliva gostota. Tako kot pri natezni trdnosti tudi pri tlačni trdnosti vrednosti z večanjem gostote rastejo. Predpostavljamo, da so kompoziti z večjo gostoto sposobni prenesti večje obremenitve, saj se sila med obremenitvijo razporedi na več materiala. Vrednosti tlačne trdnosti vzorcev z gostoto 80 kg/m³ se gibljejo v območju med 5 kPa in 15 kPa, vrednosti vzorcev gostote 100 kg/m³ med 10 kPa in 20 kPa, medtem ko vzorci z največjo gostoto vključujejo vrednosti med 20 kPa in 40 kPa. Dodatek veziva ni pomembno vplival na kompresijsko karakteristiko. Izmed rezultatov najbolj izstopata vzorca K_100_6_90 in K_120_6_90, ki sta dosegla zelo visoke vrednosti. Pri obeh je dodatek tekstila najmanjši, delež veziva pa le 6 %. Kompresijska karakteristika z največjo vrednostjo je bila zabeležena pri vzorcu K_120_6_90 in znaša 41,5 kPa. Pri vzorcih z gostoto 120 kg/m³ lahko opazimo, da se kompresijska karakteristika z

odajanjem tekstila manjša. To bi si lahko zopet razlagali s slabo adhezijo kosmičev tekstila z ostalimi komponentami kompozita.



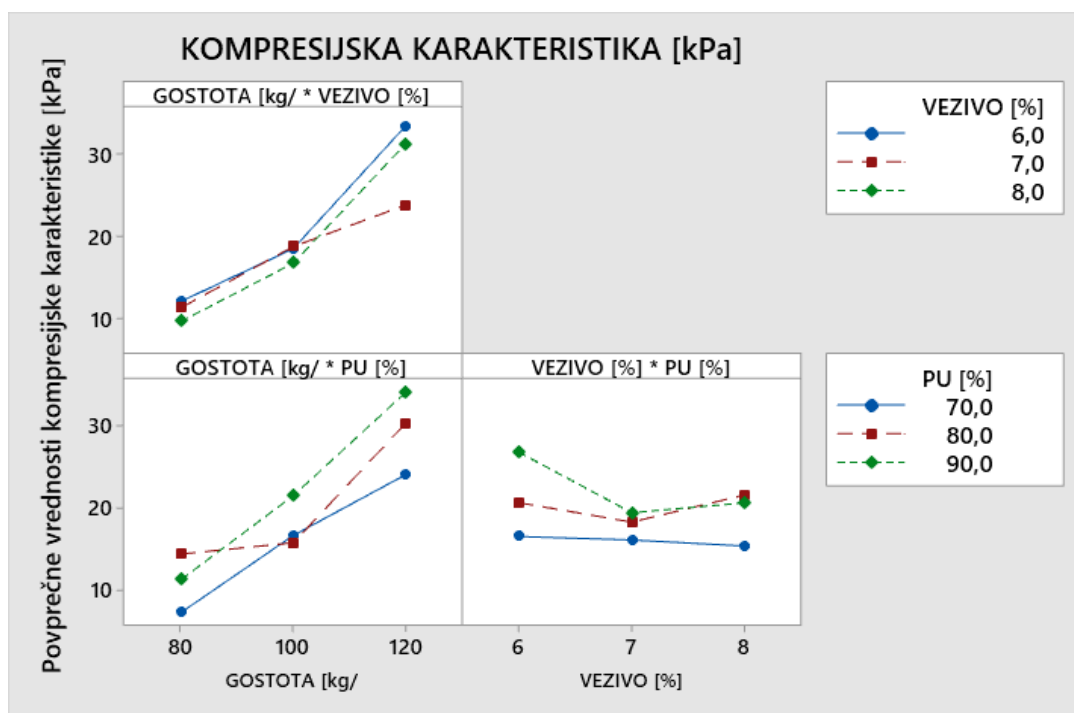
Slika 29: Histogram z rezultati tlačnega testa: kompresijska karakteristika CV₄₀

Slika 30 prikazuje vpliv vseh treh faktorjev na kompresijsko karakteristiko kompozita. Analiza variance je pokazala, da ima statistično pomemben vpliv na rezultate tlačne trdnosti gostota (p -vrednost = 0,000). Iz diagrama je razvidno, da se z višanjem gostote kompresijska karakteristika povečuje linearno. Z višanjem deleža PU opazimo naraščanje vrednosti CV₄₀, vendar učinek ni statistično pomemben (p -vrednost = 0,062), zato bi lahko to pripisali tudi naključju. Vsebnost veziva ima s p -vrednostjo 0,362 nima statistično pomembnega vpliva na vrednost CV. Vrednost determinacijskega koeficienta R^2 modela znaša 91,96 %.



Slika 30: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate kompresijske karakteristike

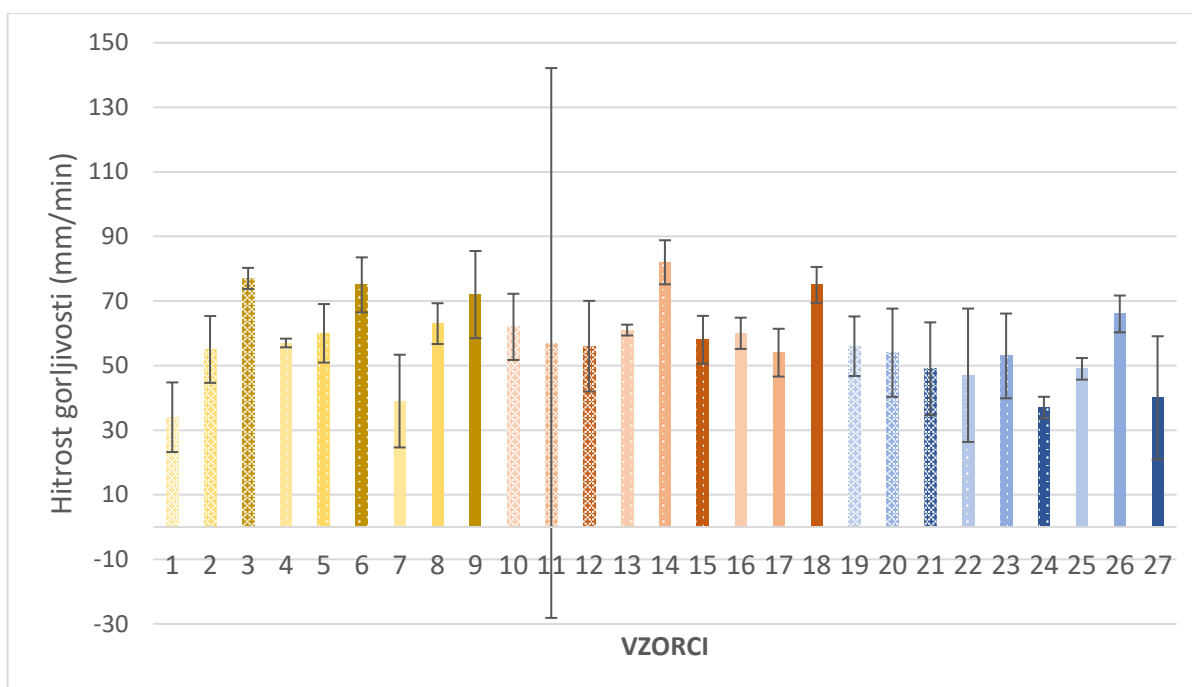
Na podlagi analize variance lahko trdimo, da nobena izmed interakcij nima posebnega vpliva na rezultate, kar je razvidno tudi iz slike 31, ki prikazuje vpliv posameznih interakcij na kompresijsko karakteristiko kompozita.



Slika 31: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate kompresijske karakteristike

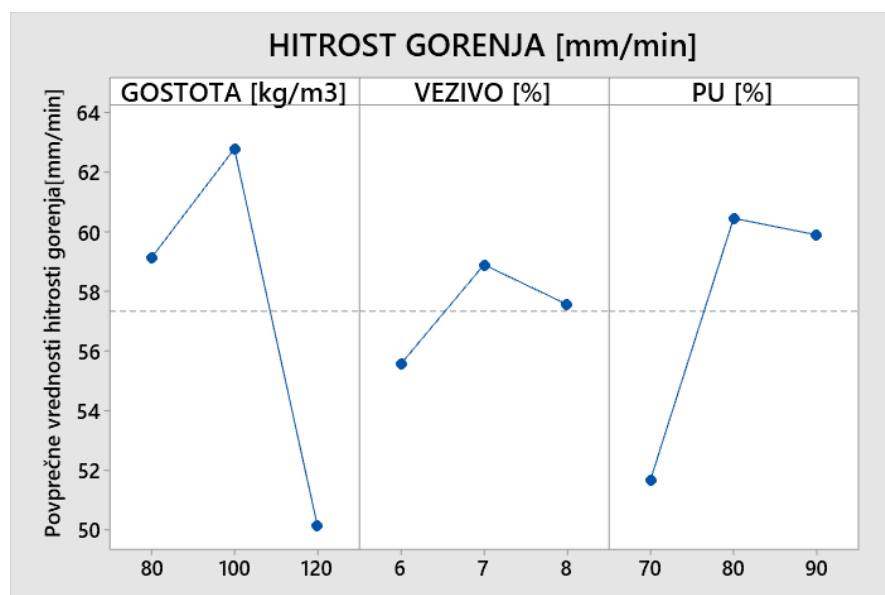
4.1.3 Preizkus odziva na ogenj

Slika 32 prikazuje rezultate preizkusa odziva na ogenj; legenda diagrama je podana na sliki 21. Vsi preizkušanci so pogoreli skoraj do konca držala, razen dva preizkušanca vzorca K-80_6_90, kjer je ogenj ugasnil pri dolžini 45 mm in 46 mm, en preizkušanec vzorca K_80_8_70 z največjo pogorelo dolžino 120 mm ter dva preizkušanca vzorca K_100_6_80, pri katerih je plamen izginil pri 40 mm in 20 mm. Iz rezultatov ni razvidnih posebnih vplivov, ki bi nakazovali povezave med katerim izmed faktorjev in hitrostjo gorenja. Opazimo lahko, da so standardne deviacije med paralelkami precej velike, zlasti pri vzorcu K_100_6_80, zaradi česar med vzorci ne moremo delati posebnih primerjav. Zanimivo je to, da sta najmanjšo in največjo vrednost imela ravno preizkušanca istega vzorca. Najnižja izmerjena hitrost je bila 19,7 mm/min, najvišja pa 184,6 mm/min.



Slika 32: Histogram z rezultati testa gorljivosti: hitrost gorljivosti

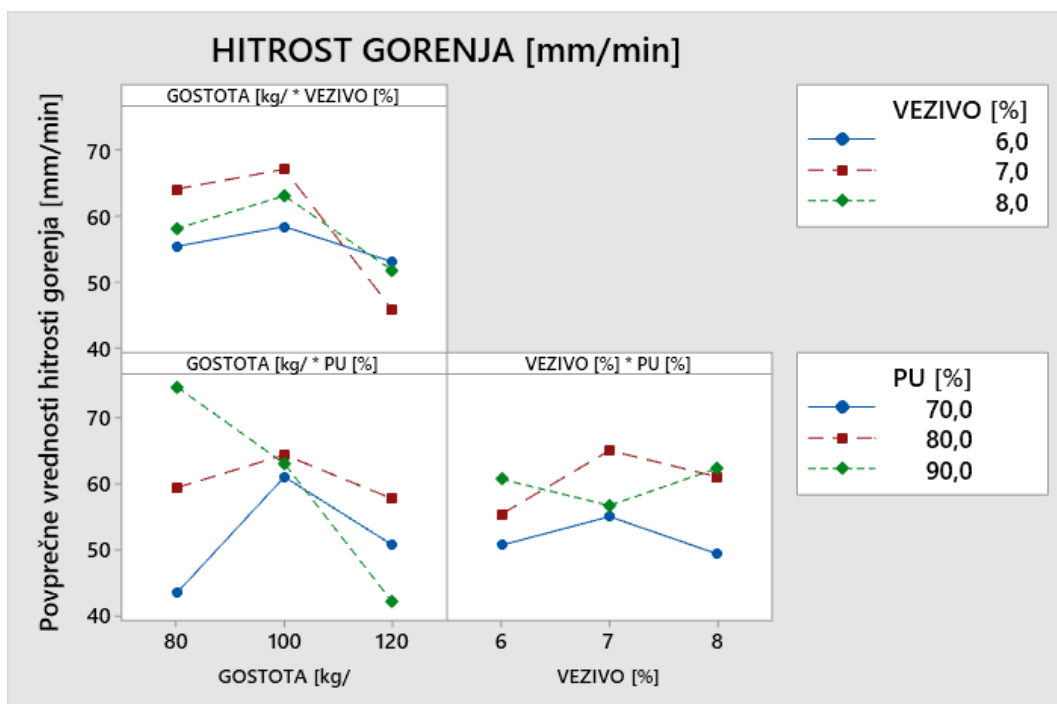
Slika 33 prikazuje vpliv vseh treh faktorjev na hitrost gorenja kompozita. P-vrednosti rezultatov preizkušanja gorljivosti so precej višje kot pri nateznem ali tlačnem testu, zlasti pri analizi vpliva veziva. Najnižja p-vrednost (0,059) je zabeležena pri gostoti. Na diagramu lahko opazimo, da je hitrost gorenja pri najnižji gostoti kompozita relativno visoka ter se pri gostoti 100 kg/m^3 še dodatno zviša. Pri gostoti 120 kg/m^3 je hitrost gorjenja najnižja. Vrednost determinacijskega koeficienta R^2 je 91,96 %.



Slika 33: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate hitrosti gorenja

Slika 34 prikazuje vpliv interakcij faktorjev na hitrost gorenja kompozita. Iz rezultatov analize variance je razvidno, da interakcija med gostoto in deležem veziva ter interakcija med deležem veziva in deležem tekstila nimata vpliva na hitrost gorenja.

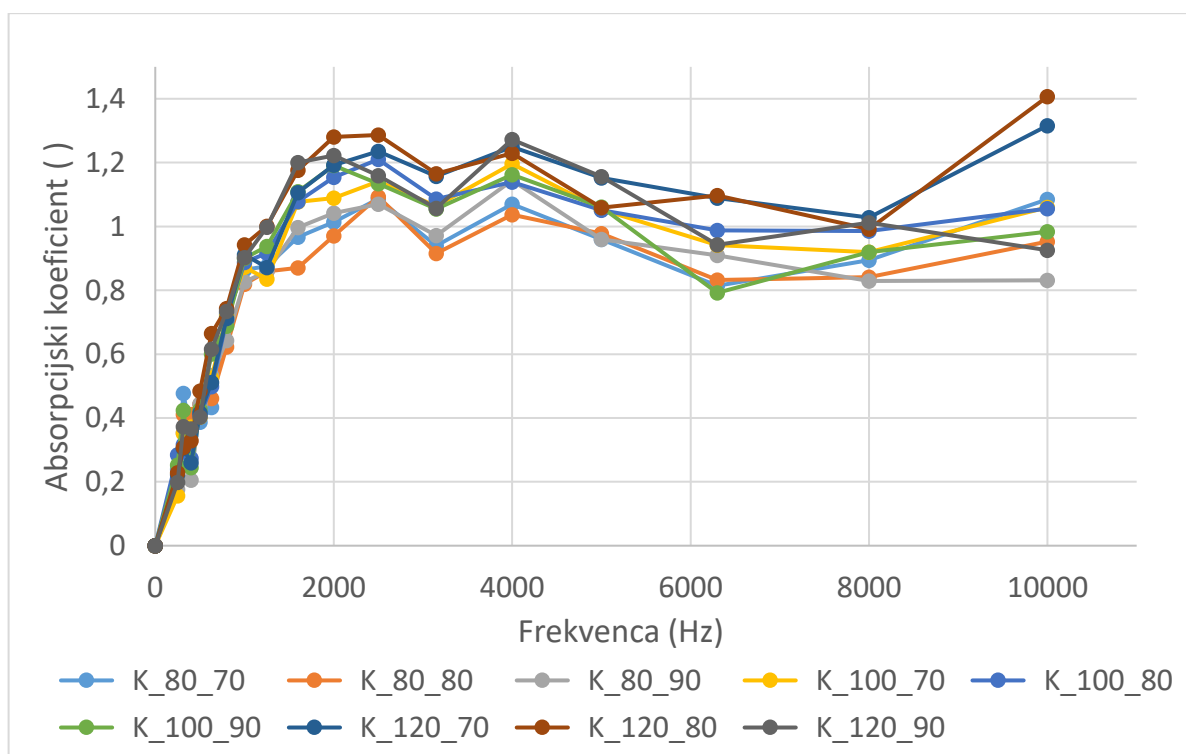
Izkazalo pa se je, da ima interakcija gostote in vsebnosti tekstila statistično pomemben vpliv (p -vrednost = 0,050). Iz diagrama lahko razberemo, da so pri gostoti 100 kg/m^3 vrednosti vseh treh krivulj kompozitov z različnimi vsebnostmi tekstila enake. Pri visoki gostoti (120 kg/m^3) je hitrost gorenja najnižja v primeru nizke vsebnosti tekstila, najvišja pa v primeru srednje vsebnosti tekstila. Pri nizki gostoti (80 kg/m^3) je hitrost gorenja najnižja pri visoki vsebnosti tekstila, najvišja pa pri nizki vsebnosti tekstila.



Slika 34: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate hitrosti gorenja

4.1.4 Preizkus zvočne absorpcije

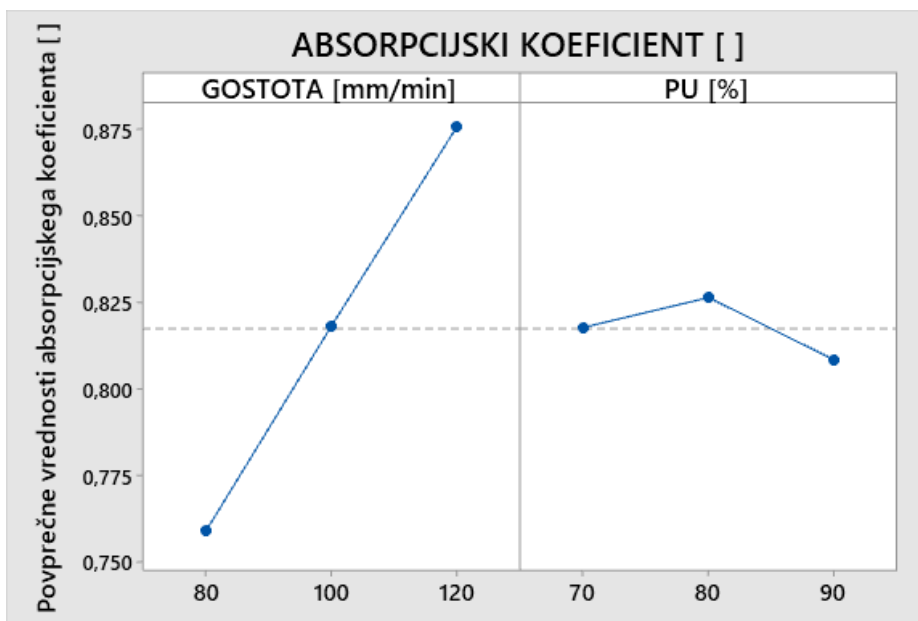
Slika 35 prikazuje rezultate preizkusa zvočne absorpcije. Diagram prikazuje krivulje vseh 9 vzorcev, ki se razlikujejo po barvah. Za posamezne frekvence na abscisi je podana izmerjena vrednost absorpcijskega koeficienta na ordinati. Iz rezultatov je razvidno, da ima na absorpcijo zvoka velik vpliv gostota. Razlika v absorpciji se pokaže predvsem pri srednjih in visokih frekvencah (od 2000 Hz naprej). Na splošno večja, kot je gostota, večji je absorpcijski koeficient. Predpostavljamo, da je pri kompozitih z nižjo gostoto v materialu veliko praznine in manj materiala, ki bi lahko zvok pretvoril iz kinetične energije v toploto. Kompoziti z večjo gostoto vsebujejo več materiala in ker je prisotnega več materiala, je prisotnih tudi več por oz. kanalov, zaradi katerih pride do večje verjetnosti absorpcije energije. Vsebnost tekstila v glavnem ne igra večje vloge, a se kažejo razlike pri posameznih frekvencah. Pri zelo visokih frekvencah, kot sta 10000 Hz in 6000 Hz, imajo večjo absorpcijo vzorci z večjim deležem tekstila, medtem ko dosegajo pri frekvenci 4000 Hz večjo absorpcijo vzorci z manjšim deležem pene.



Slika 35: Graf z rezultati preizkušanja zvočne absorpcije: absorpcijski koeficient pri različnih frekvencah

Za statistično analizo smo kot absorpcijski koeficient za posamezni vzorec vzeli povprečno vrednost rezultatov različnih frekvenc. Iz slike 36 je razvidno, da sta si gostota in absorpcijski koeficient premo sorazmerna. Vpliv gostote nam je pokazala tudi analiza variance; p-vrednost gostote je namreč 0,004. Vsebnost tekstila (p-

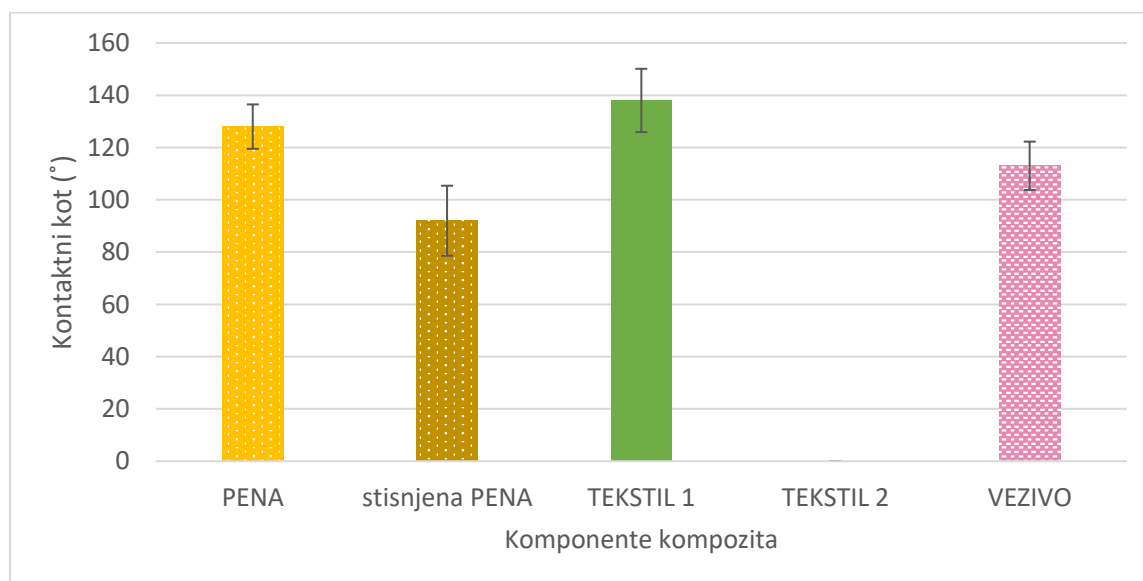
vrednost = 0,552) na absorpcijske lastnosti nima statistično pomembnega vpliva. Vrednost determinacijskega koeficienta R^2 je 93,74 %.



Slika 36: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate hitrosti gorenja

4.1.5 Preizkus omočljivosti in navzemanja vlage

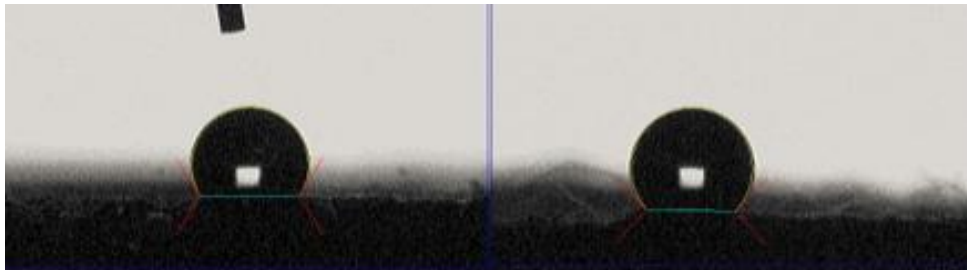
Slika 37 prikazuje vrednosti kontaktnega kota vseh treh komponent kompozita. Ker so se na določenih mestih iste komponente rezultati od ostalih precej razlikovali, smo te obravnavali posebej. Predstavljeni rezultati so izmerjeni kontaktni koti v stopinjah takoj po stabiliziranju kapljice na površini. Meritev je potekala približno 1 oz. 2 sekundi po nanosu.



Slika 37: Izmerjeni kontaktni koti na različnih mestih takoj po nanosu kapljice na površino kompozita

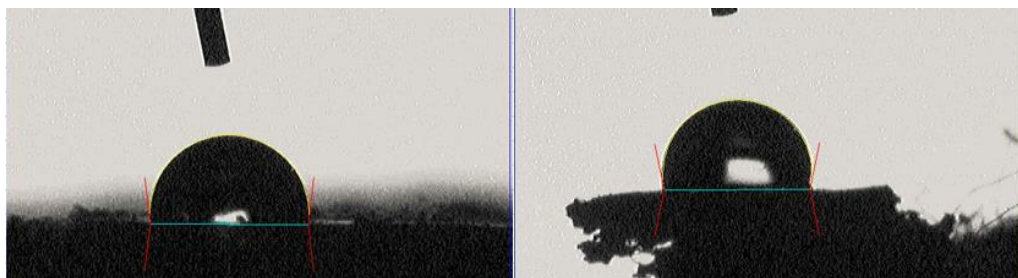
Površino kompozita sestavljajo različni delci poliuretanske pene, ki imajo praviloma v večini primerov porozno strukturo (na grafu označeno s PENA). Nekateri delci pene, običajno nekoliko močnejše obarvani, pa imajo gladko in sijočo strukturo (na grafu označeno s stisnjena PENA). Ti koščki pene se pojavijo zgolj na površini kompozita, zato je mogoče, da se material na nekaterih delih med procesom strjevanja materiala v kalupu ob steni zmežča, deformira in obarva. Ker so meritve teh mest v kompozitu vidno drugačne od meritev poroznih delcev pen, smo te obravnavali posebej.

Meritve poliuretanske pene s porozno strukturo (PENA), ki sestavlja večinski poliuretanski del površine, so pokazale, da je material hidrofoben. Slika 38 prikazuje dve izmed meritev kontaktnega kota na površini poliuretanske pene (s porozno strukturo). Razvidno je, da je kapljica vode v stiku s površino tvorila velik kontaktni kot, kar kaže na to, da ima površina materiala zelo nizko površinsko energijo. Tudi po 60 sekundah sta oblika in kontaktni kot ostala enaka.



Slika 38: Meritve kontaktnega kota delcev porozne poliuretanske pene (PENA)

Slika 39 prikazuje meritvi kontaktnega kota stisnjene poliuretanske pene. Kontaktni koti so nekoliko nižji kot pri peni s porozno strukturo. Vrednosti se gibajo med 80° in 100° . Kontaktni kot stisnjene pene je torej za 30 % manjši od kontaktnega kota pene s porozno površino.



Slika 39: Meritve kontaktnega kota delcev stisnjene gladke poliuretanske pene (stisnjena PENA)

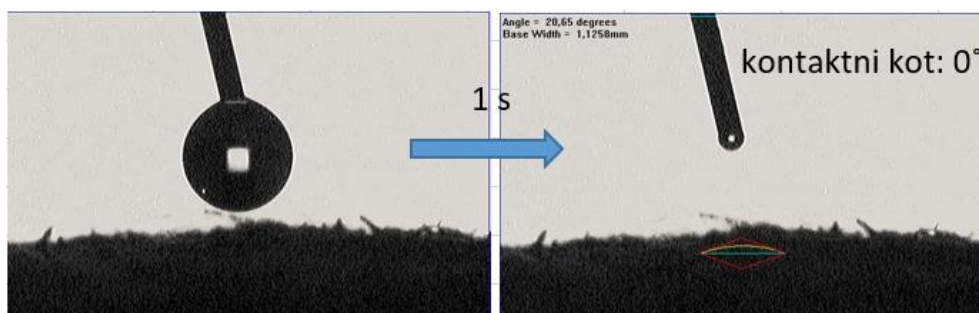
Pri meritvah površine tekstilnih kosmičev smo opazili, da se kapljica na nekaterih mestih obnaša drugače. Nekateri meritve so pokazale podobno obnašanje kot pri poliuretanski peni; močno hidrofobnost z vrednostmi kontaktnega kota okoli 140° . Kapljica, oblikovana v kroglo, je ostala po 60 s od nanosa bolj ali manj v isti obliki in oklepala kontaktni kot z le kakšno stopinjo manj. Vrednosti kontaktnega kota so visoke predvsem zaradi narave poliestra, ki je znan po svoji izjemno nizki prosti površinski

energiji. Rezultati meritev so na sliki 37 označeni z zeleno; dve izmed fotografij meritve sta predstavljeni na sliki 40.



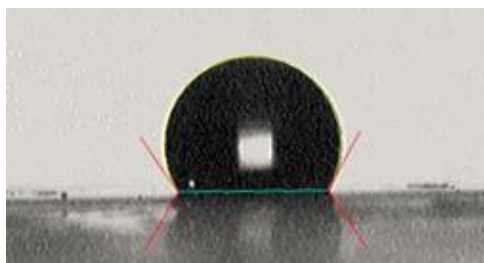
Slika 40: Meritve kontaktnega kota tekstila (primera s stabilno kapljico)

Na nekaterih mestih tekstilnih kosmičev je bilo obnašanje kapljice popolnoma drugačno. Po nanosu kapljice na površino je kapljica izginila oz. poniknila v material. Pojav se je zgodil tudi v manj kot 1 sekundi, zaradi česar je bila že prva meritev kontaktnega kota 0° . Pojav, ki ga je ujela kamera v intervalu 1 sekunde, je prikazan na sliki 41. Pojav je mogoče razložiti s prisotnostjo večje praznine oz. votline med vlakni tik pod površino, kjer je bila opravljena meritev.



Slika 41: Meritve kontaktnega kota tekstila (primer popolnega izginotja kapljice)

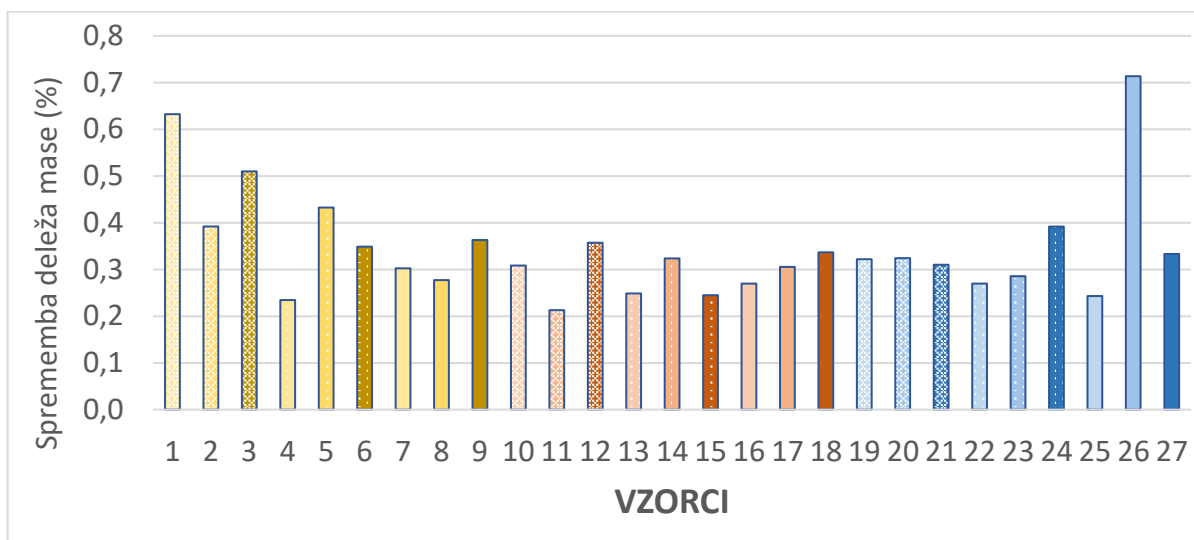
Meritve kontaktnega kota veziva so prav tako pokazale hidrofoben značaj. Vrednosti so se gibale med 100° in 120° . Meritev prikazuje slika 42.



Slika 42: Meritve kontaktnega kota veziva

Slika 43 prikazuje rezultate preizkusa navzemanja vlage kompozita; legenda diagrama je predstavljena na sliki 21. Sprememba mase po sušenju vzorcev je izredno majhna; vrednosti se namreč gibljejo med 0,2 % in 0,7 %. Na podlagi tega lahko sklepamo, da material navzema zanemarljivo malo vlage. Opazili nismo nobenega vpliva faktorjev

oziroma spremenljivk (gostota in sestava) na navzemanje vlage. Pri tem je potrebno upoštevati, da smo vzorce izpostavili laboratorijskim pogojem 50 % relativne vlažnosti pri 23 °C in je možno, da bi se material v prisotnosti zelo visoke vlažnosti obnašal drugače.



Slika 43: Histogram rezultatov preizkusa navzemanja vlage: sprememba deleža mase [%]

4.2 Večkriterijska optimizacija sestave kompozita

Pri optimizaciji sestave kompozita smo upoštevali 4 kriterije: natezno trdnost, raztezek pri pretrgu, tlačno trdnost in odziv na ogenj. Absorpcije zvoka pri tem nismo mogli upoštevati, ker smo pri analizi proučevali zgolj dva faktorja. Pri kalkulaciji optimalne sestave je program iskal vzorec s čim večjo natezno in tlačno trdnostjo ter čim manjšo hitrostjo gorenja.

Rezultat optimizacije nam je kot optimalno rešitev predlagal vzorec K_120_6_90. V tabeli 2 so predstavljeni rezultati vzorca posameznih testiranj.

Tabela 2: Rešitev večkriterijske optimizacije sestave

VZOREC	NATEZNA TRDNOST [kPa]	RAZTEZEK PRI PRETRGU [%]	TLAČNA TRDNOST [kPa]	HITROST GORENJA [mm/min]
K_120_6_90	98	33	41	47

Rezultat zvočne absorpcije vzorca K_120_90 je bil visok absorpcijski koeficient, ki je še posebej izstopal pri frekvenci 4000 Hz. Z izbiro sestave kompozita se torej strinjamo tudi z vidika zvočne absorpcije.

5 SKLEP

Z diplomskim delom smo uspešno dosegli zastavljene cilje in določili optimalno sestavo kompozita FONKO. Z analizo rezultatov meritev, ki smo jo izvedli s pomočjo računalniškega programa Minitab, smo med drugim odkrili nekaj presenetljivih spoznanj, na podlagi katerih smo nekaj naših hipotez ovrgli. Večina rezultatov je bilo pravilno predvidenih in je potrdila zastavljene hipoteze.

Z gotovostjo lahko trdimo, da ima izmed vseh faktorjev največ vpliva na vse proučevane lastnosti gostota kompozita. Višja, kot je gostota kompozita, višji sta natezna in tlačna trdnost. Na natezno trdnost poleg gostote v veliki meri vpliva tudi vsebnost tekstila ter interakciji med deležem tekstila in vsebnostjo veziva ter med deležem tekstila in gostoto. Rezultati so pokazali, da z višanjem vsebnosti tekstila natezna trdnost pada, kar prav tako potrjuje našo hipotezo. Natezni preizkus je pokazal tudi, da imata na raztezek pri pretrgu materiala velik vpliv prav tako gostota in vsebnost tekstila. Najmanjša raztezka materiala sta pri najnižji gostoti in največji vsebnosti tekstila. Z višanjem gostote se raztezek viša; po doseženi gostoti 100 kg/m^3 ta nekoliko pade. Višji, kot je delež tekstila, nižji je raztezek, vendar pri manjših količinah dodanega tekstila (manj kot 20 %) z nižanjem deleža tekstila raztezek pada. Poleg glavnih vplivov ima na raztezek vpliv tudi interakcija vsebnosti veziva z dodatkom tekstila, ki kaže najnižji raztezek pri kombinaciji 7 % veziva ter 30 % dodatka tekstila. Rezultati meritev hitrosti gorenja so bili precej presenetljivi, saj smo pričakovali večjo mero vpliva faktorjev. Izkazalo pa se je, da nobeden izmed faktorjev nima očitnega vpliva na proučevano lastnost. V določeni meri imata vpliv le gostota, kjer najnižjo hitrost dosega kompozit z najvišjo gostoto, ter interakcija gostote z deležem tekstila, kjer najnižji vrednosti dosega kompozit s kombinacijo 30 % vsebnosti tekstila in 80 kg/m^3 ter kombinacijo 10 % vsebnosti tekstila in 120 kg/m^3 . Rezultati meritve zvočne absorpcije so pokazali, da v največji meri vpliva gostota, ki potrjuje našo hipotezo, da se z višanjem gostote absorpcijski koeficient narašča. Presenetljivo je bilo, da delež tekstila nima vpliva na absorpcijski koeficient, kar zavrača našo hipotezo. Vloga vsebnosti tekstila je pomembna zgolj v primeru, če opazujemo koeficiente pri različnih frekvencah. Višjo zvočno absorpcijo ima pri frekvenci 10000 Hz na primer kompozit z več dodatka tekstila, medtem ko je večji absorpcijski koeficient pri kompozitu z višjim deležem poliuretanske pene. Na podlagi izvedenega preizkusa omočljivosti lahko trdimo, da je kompozit hidrofoben in ni preveč podvržen navzemanju vlage.

Z večkriterijsko optimizacijo sestave kompozita, ki smo jo izvedli s pomočjo računalniškega programa Minitab, smo ugotovili, da je glede na naš kriterij optimalna izbira vzorec K_120_6_90 z gostoto 120 kg/m^3 , deležem veziva 6 % ter 10 % vsebnostjo tekstilnih odpadkov. V primeru nadaljevanja raziskave bi bilo smiselno ponovno opraviti meritve optimalne sestave kompozita, s katero bi potrdili ustreznost izbire.

Menimo, da bi lahko nekaj več povezav med nekaterimi faktorji in proučevanimi lastnostmi dosegli, če bi pri načrtovanju eksperimenta izbrali širši razpon med nivoji.

To bi lahko spremenili pri faktorju veziva, kjer bi mogoče z večjim intervalom med nivoji prišli do spoznanja, da ima ta na lastnosti večji vpliv. Velik razpon v vrednosti nivojev se je dobro obnesel pri analizi gostote, vendar smo v primeru najnižje gostote imeli kar nekaj problemov pri izdelavi materiala in testiranjih, saj je bil kompozit že pri rokovanju precej krhek in občutljiv. Pri izdelavi smo morali paziti, da smo v kalup material razporedili čim bolj enakomerno, da ne bi na določenih mestih tvorili prevelike praznine.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] M. M. Alavi Nikje, Recycling of Polyurethane Wastes, 2019. <https://doi.org/10.1515/9783110641592>.
- [2] W. Yang, Q. Dong, S. Liu, H. Xie, L. Liu, J. Li, Recycling and Disposal Methods for Polyurethane Foam Wastes, *Procedia Environ. Sci.* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.023>.
- [3] Janez Navodnik, *Poliuretani, Plastforma.* (2004) 28–34.
- [4] J. H. Saunders, K. C. Frisch, In *Polyurethane Chemistry and Technology I.*, in: *Chemistry (Easton).*, 1963.
- [5] B. A. Dombrow, *Polyurethanes*, second edition, Reinhold publishing, New York, 1965.
- [6] N. V. Gama, A. Ferreira, A. Barros-Timmons, *Polyurethane foams: Past, present, and future*, *Materials (Basel).* (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11101841>.
- [7] M. Chanda, S. K. Roy, *Plastics Technology Handbook*, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420006360>.
- [8] M. Nofar, C. B. Park, *Introduction to Plastic Foams and Their Foaming*, in: *Poly lactide Foam.*, 2018. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813991-2.00001-9>.
- [9] Janez Navodnik, *Plastik - orodjar, priročnik*, 3. izdaja, Navodnik - kemijski inženiring, Velenje, 1998.
- [10] J. Y. Chen, *Nonwoven textiles in automotive interiors*, in: *Appl. Nonwovens Tech. Text.*, 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-437-1.50010-0>.
- [11] R. M. V. Thirumurugan, S. Arvindkumar, P. Gnanaprakasam, *A review on nonwoven fabrics: manufacturing properties and applications*, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 8 (2021) 1819–1823.
- [12] Elvira Hasić, *Proučevanje toplotno fizikalnih lastnosti funkcionaliziranih netkanih tekstilij*, Maribor, 2011.
- [13] S. S. Culhane, *Review on acoustic properties of textiles*, *Tech. Textilien.* (2018).
- [14] K. M. Zia, H. N. Bhatti, I. Ahmad Bhatti, *Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review*, *React. Funct. Polym.* (2007). <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004>.
- [15] N. Mills, *Polymer Foams Handbook*, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8069-1.X5000-4>.
- [16] W. Raßhofer, E. Weigand, *Automotive Polyurethanes*, 2019. <https://doi.org/10.1201/9780367810986>.
- [17] G. F. J. J. M. Rees, *Rebond polyurethane foam comprising reclaimed carpet material and methods for the manufacture of same*, US 9,410,026 B1, 2016.
- [18] J. MAXWELL, *Choosing plastics*, in: *Plast. Automot. Ind.*, 1994. <https://doi.org/10.1533/9781845698645.49>.
- [19] V. Shah, *Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis: Third Edition*, 2006. <https://doi.org/10.1002/0470100427>.

- [20] M. K. Š. Černe, J. K. Ivančič, M. Zakotnik, D. Rajh, E. Komočar, Raztezanje plastike, Ljubljana, 2011.
- [21] L. Mkrtychyan, M. Maier, U. Huber, Structural polyurethane foam: Testing and modelling for automotive applications, *Int. J. Crashworthiness*. (2008). <https://doi.org/10.1080/13588260802221310>.
- [22] G. Vladimír, Testing and application of new phenomenological material model for foam materials, *Elektrotehnika*. (2010).
- [23] K. C. F. J. H. Saunders, *Polyurethanes: Chemistry and Technology Pt. 2*, Interscience publishers, New York, London, Sydney, 1964.
- [24] R. H. M. Krebs, J. Sassenhagen, *Novel Technology to Influence Hardness of Flexible Pu Foams*, (2015).
- [25] M. A. Koshute, Influence of PU foam thickness, density, and hardness on seat cushion durability, in: *SAE Tech. Pap.*, 1993. <https://doi.org/10.4271/930633>.
- [26] Jure Stepišnik, Razumevanje tehniških pojmov trdota in trdnost med učenci od 6. do 8. razreda osnovne šole, Ljubljana, 2011.
- [27] B. K. K. T. R. Hull, *Fire retardancy of polymers: New strategies and mechanisms*, Royal society of chemistry, Cambridge, 2009.
- [28] F. H. Prager, H. Rosteck, *Polyurethane and Fire*, 2006. <https://doi.org/10.1002/3527607870>.
- [29] D. Šinigoj, *Presoja uspešnosti sanacije gozdnega požarišča Fajhti hrib- Cerje iz leta 1994*, Ljubljana, 2010.
- [30] J. Lefebvre, B. Bastin, M. Le Bras, S. Duquesne, C. Ritter, R. Paleja, F. Poutch, Flame spread of flexible polyurethane foam: Comprehensive study, *Polym. Test*. (2004). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.08.003>.
- [31] P. Němeček, Sound absorption measurement in alpha cabin, in: *Lect. Notes Mech. Eng.*, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05203-8_52.
- [32] P. S. Liu, G. F. Chen, P. S. Liu, G. F. Chen, *Characterization Methods: Physical Properties, Porous Mater.* (2014).
- [33] A. E. Tiuc, H. Vermešan, T. Gabor, O. Vasile, Improved Sound Absorption Properties of Polyurethane Foam Mixed with Textile Waste, in: *Energy Procedia*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.245>.
- [34] Anna Kirveslahti, *Polymer wettability properties: their modification and influences upon water movement*, Joensuu, 2016.
- [35] Y. Yuan, T. R. Lee, *Contact angle and wetting properties*, Springer Ser. Surf. Sci. (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1_1.
- [36] B. Arkles, *Hydrophobicity, hydrophilicity and silane surface modification*, 2006.
- [37] U. B. R. Fuchs- Godec, *Pojavi na površinah- interno gradivo*, Maribor, 2019.
- [38] N. Slepickova Kasalkova, P. Slepicka, Z. Kolska, V. Svorcik, *Wettability and Other Surface Properties of Modified Polymers*, in: *Wetting and Wettability*, 2015. <https://doi.org/10.5772/60824>.
- [39] A. Hribernik, *Metode eksperimentalnega dela: Načrtovanje eksperimentov*, Maribor, 2011.

-
- [40] B. Durakovic, Design of experiments application, concepts, examples: State of the art, *Period. Eng. Nat. Sci.* (2017). <https://doi.org/10.21533/pen.v5i3.145>.
- [41] S. Beg, S. Swain, Introduction to the Experimental Designs: Basic Fundamentals, in: *Des. Exp. Pharm. Prod. Dev.*, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4717-5_1.
- [42] Stefan Moser, Design of experiments (DOE), *Projektmagazin*. (2019).
- [43] Flexible cellular polymeric materials- Determination of tensile strength and elongation at break, ISO 1798, 2009.
- [44] Polymeric materials, cellular flexible — Determination of stress-strain characteristics in compression — Part 1: Low-density materials, ISO 3386-1, 2010.
- [45] T. Schuster, A. Liesen, *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49836-1>.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Kemijska reakcija med izocianatom in polioliolom [6].....	3
Slika 2: Globalna potrošnja poliuretanov v letu 2016 [6].....	4
Slika 3: Tipična mikrografa, posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom, ki prikazujeta razliko med odprto-celično strukturo (levo) in zaprto-celično strukturo (desno) [8].....	5
Slika 4: Posnetek, posnet z vrstičnim elektronskim mikroskopom, rezane poliuretanske pene v materialu za športne blazine [15].....	8
Slika 5: Diagram "napetost v odvisnosti od raztezka" nateznega testa [20].....	10
Slika 6: Diagram "napetost v odvisnosti od raztezka" tlačnega testa, značilnega za polimerne pene [22].....	10
Slika 7: Trikotnik gorenja [29].....	11
Slika 8: Stopnje požara [28].....	12
Slika 9: Horizontalni prenos gorenja [27].....	13
Slika 10: Različna usmeritev zvočnih valovanj (levo: meritev v odmevnici, desno: meritev z impedančno cevjo) [32].....	14
Slika 11: Rezultati meritev zvočno-absorpcijskega koeficienta kompozitov iz poliuretanske pene in tekstilnih odpadkov z impedančno cevjo [33].....	15
Slika 12: Kontaktni kot, s katerim določamo omočljivost [36].....	16
Slika 13: Z večanjem kontaktnega kota se omočljivost povečuje [35].....	16
Slika 14: Vhodne in izhodne spremenljivke procesa [39, 40, 42].....	18
Slika 15: a.) Fotografija kosmičev poliuretanske pene, b.) Fotografija kosmičev tekstilnih odpadkov.....	20
Slika 16: Levo: orodje v fazi aktivacije veziva s pomočjo vroče pare, desno: odprto orodje z oblikovanim kompozitom.....	21
Slika 17: Fotografije preizkušancev za karakterizacijo (levo: za preizkus gorljivosti, sredina: za preizkus tlačne trdnosti, desno: za preizkus natezne trdnosti).....	22
Slika 18: Univerzalni stroj Shimadzu AG X plus, ki je poleg nateznega preizkusa primeren tudi za izvajanje tlačnega in preizkusa.....	23
Slika 19: Levo: Atlas HVM Horizontal Flame Chamber, desno: vzorec, nameščen na podporni element z držalom v obliki črke U.....	24
Slika 20: Merjenje kontaktnega kota (levo: goniometer, vzorec z iglastim nanašalcem kapljevine).....	26
Slika 21: Legenda grafov na slikah 23 in 24.....	27
Slika 22: Diagram napetosti v odvisnosti od raztezka pri nateznem testu: a.) Vzorec z gostoto 80 kg/m^3 , b.) vzorec z gostoto 120 kg/m^3	28
Slika 23: Histogram z rezultati nateznega testa: natezna trdnost oz. maksimalna napetost.....	29
Slika 24: Histogram z rezultati nateznega testa: raztezek pri pretrgu.....	29
Slika 25: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate natezne trdnosti kompozita.....	30
Slika 26: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate natezne trdnosti.....	31
Slika 27: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate raztezka pri pretrgu.....	31
Slika 28: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate raztezka pri pretrgu.....	32

Slika 29: Histogram z rezultati tlačnega testa: kompresijska karakteristika CV_{40}	33
Slika 30: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate kompresijske karakteristike	33
Slika 31: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate kompresijske karakteristike	34
Slika 32: Histogram z rezultati testa gorljivosti: hitrost gorljivosti	35
Slika 33: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate hitrosti gorenja	35
Slika 34: Vpliv interakcij faktorjev na rezultate hitrosti gorenja.....	36
Slika 35: Graf z rezultati preizkušanja zvočne absorpcije: absorpcijski koeficient pri različnih frekvencah	37
Slika 36: Vpliv posameznih faktorjev na rezultate hitrosti gorenja	38
Slika 37: Izmerjeni kontaktni koti na različnih mestih takoj po nanosu kapljice na površino kompozita.....	38
Slika 38: Meritve kontaktnega kota delcev porozne poliuretanske pene (PENA).....	39
Slika 39: Meritve kontaktnega kota delcev stisnjene gladke poliuretanske pene (stisnjena PENA)	39
Slika 40: Meritve kontaktnega kota tekstila (primera s stabilno kapljico)	40
Slika 41: Meritve kontaktnega kota tekstila (primer popolnega izginotja kapljice)	40
Slika 42: Meritve kontaktnega kota veziva	40
Slika 43: Histogram rezultatov preizkusa navzemanja vlage: sprememba deleža mase [%].....	41

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Receptura kompozitov	20
Tabela 2: Rešitev večkriterijske optimizacije sestave	41

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

δ - gostota

γ - površinska napetost

θ - kontaktni kot

ε - raztezek

σ - napetost (natezni/ tlačni preizkus)

α - stopnja tveganja

R^2 - determinacijski koeficient

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

OH - hidroksidna skupina

NCO - izocianatna skupina

BMW - Bayerische Motoren Werke (nemški proizvajalec avtomobilov)

UV - ultravijolično

FMVSS - Federal Motor Vehicle Safety Standards (varnostni standard za motorna vozila)

NRC - Noise reduction coefficient (koeficient zniževanja hrupa)

OFAT - One factor at a time (posamezni faktor naenkrat)

OVAT - One variable at a time (posamezna spremenljivka naenkrat)

COST - Changing one separate variable at one time (spreminjanje ene spremenljivke naenkrat)

DOE - Design of experiments (načrtovanje eksperimentov)

CNC - Computer numerical control (računalniško podprto krmiljenje)

CC - Compression characteristic (kompresijska karakteristika)

ANOVA - Analysis of Variance (analiza variance)