

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Kupres

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Karlo Kupres

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem prvenstveno mentoru doc. dr. sc. Ireni Žmak na susretljivosti, mnoštvu korisnih savjeta, strpljenju i pomoći oko izrade ovog diplomskog rada. Također, zahvaljujem tehničkim suradnicima Laboratorija za polimere i kompozite Vesni Đurđi i Božidaru Bušetinčanu, te prof. dr. sc. Janošu Kodvanju, voditelju Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku i asistentu Frani Pamukoviću, mag. ing. što su mi omogućili kvalitetnu i točnu izradu eksperimentalnog dijela ovog rada. Hvala i asistentu Josipu Županu, mag. ing. te prof. dr. sc. Darku Landeku na pomoći pri ispitivanju toplinskih svojstava.

Konačno, ali ne i manje bitno, zahvaljujem cijeloj svojoj obitelji na potpori, što financijskoj, što moralnoj tijekom cijelog studija.

Karlo Kupres



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Kupres**

Mat. br.: 0035167854

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kompozitni materijali proizvedeni od otpadnog papira**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Composite materials produced from waste paper**

Opis zadatka:

Prikupljanjem otpadnog papira dobiva se vrijedna sirovina za izradu novog, recikliranog papira. Osim za izradu recikliranog papira, ovaj otpad s visokom udjelom papirnih vlakana nema drugu značajniju ekonomsku primjenu. Cilj ovog rada je istražiti postupke za ponovnu upotrebu papirnog otpada dodavanjem polimernog veziva, odnosno za izradu polimernog kompozita ojačanog papirnim vlaknima.

U diplomskom radu treba opisati način izrade kompozitnih materijala i ispitnih uzoraka od recikliranog novinskog papira i veziva na osnovi polivinilacetatne disperzije s dodatkom punila i aditiva.

Na dobivenim je uzorcima kompozitnih materijala potrebno ispitati udjele komponenata, koeficijent linearnog stezanja materijala nakon sušenja, vlačnu, savojnu i pritisnu čvrstoću te vlačni, savojni i pritisni modul elastičnosti te tvrdoću.

S obzirom na komponente ovih kompozitnih materijala te na mogućnost njihove primjene kao izolacijskog građevinskog materijala, potrebno je u radu ispitati i gorivost, samogasivost i toplinsku vodljivost.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ŽIVOTNI CIKLUS PROIZVODA I RECIKLIRANJE MATERIJALA	2
3. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	4
3.1. Kompozitni materijali proizvedeni od otpadnog novinskog papira	6
3.2. Novinski papir	7
3.3. Poli(vinil-acetat) (PVAc).....	8
4. OPIS PROVEDENIH ISPITIVANJA	9
4.1. Opis ispitivanja mehaničkih svojstva	9
4.1.1. Opis statičkog vlačnog ispitivanja	9
4.1.2. Opis statičkog tlačnog ispitivanja	11
4.1.3. Opis savojnog ispitivanja	13
4.1.4. Opis ispitivanja žilavosti	15
4.1.5. Opis ispitivanja tvrdoće	16
4.2. Opis ispitivanja toplinskih svojstva	18
4.3. Opis ispitivanja gorivosti i samogasivosti	21
4.4. Statistička obrada rezultata mjerenja	24
5. REZULTATI ISPITIVANJA	25
5.1. Izrada kompozitnog materijala	25
5.2. Oprema za ispitivanje	28
5.3. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstva	37
5.3.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja	38
5.3.2. Rezultati statičkog tlačnog ispitivanja	40
5.3.3. Rezultati ispitivanja savijanja i žilavosti.....	44
5.3.4. Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	46
5.4. Rezultati ispitivanja toplinskih svojstva	48
5.5. Rezultati ispitivanja gorivosti i samogasivosti	51
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	53
7. ZAKLJUČAK.....	54

LITERATURA.....	55
PRILOZI.....	57

POPIS SLIKA

Slika 1.	Proizvodnja materijala, proizvodnja proizvoda, njegovo zbrinjavanje, te faze u kojima nastaje otpad [1]	2
Slika 2.	a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [2]	4
Slika 3.	Kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]	5
Slika 4.	Slaganje različito usmjerenih vlaknima ojačanih slojeva [2]	5
Slika 5.	Toplinska vodljivost u odnosu na udio papirnate kaše (pulpe) u betonu [3]	6
Slika 6.	Molekularna struktura PVAc [5]	8
Slika 7.	Izgled epruveta za statičko vlačno ispitivanje	10
Slika 8.	Normalna epruveta za ispitivanje tlačne čvrstoće	12
Slika 9.	Tanka epruveta za ispitivanje tlačne čvrstoće	12
Slika 10.	Nosač tankih epruveta za tlačno ispitivanje	13
Slika 11.	Naprava za ispitivanje savojne čvrstoće	14
Slika 12.	Epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće	15
Slika 13.	Charpyjev bat [8]	15
Slika 14.	Dimenzije epruveta za ispitivanje žilavosti	16
Slika 15.	Shematski prikaz mjerenja tvrdoće prema Shoreu [9]	17
Slika 16.	Uređaj za mjerenje toplinske vodljivosti KD2 Pro	21
Slika 17.	Ispitivanje gorivosti i samogasivosti	22
Slika 18.	Dimenzije epruveta za ispitivanje gorivosti i samogasivosti	22
Slika 19.	Uzorak u kalupu nakon sušenja	26
Slika 20.	Kidalice VEB Thüringer Industrierwerk	29
Slika 21.	Ekstenziometar Bernhard Holle	30
Slika 22.	Kidalice Messphysik Beta 50-5	31
Slika 23.	Video ekstenziometar Messphysik ME46-450	32
Slika 24.	Charpyjev bat Karl Frank	33
Slika 25.	Shore A-tvrdomjer Zwick	34
Slika 26.	Prijenosni analizator toplinskih svojstva KD2 Pro	35
Slika 27.	Oprema za ispitivanje gorivosti i samogasivosti	36
Slika 28.	Epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstva	37
Slika 29.	Dijagram „naprezanje – istežanje“ kompozitnog materijala	39
Slika 30.	Linearni dio dijagrama „naprezanje – istežanje“ kompozitnog materijala	40
Slika 31.	Ispitivanje statičke tlačne čvrstoće na tankoj epruveti	41
Slika 32.	Normalne epruvete za ispitivanje tlačne čvrstoće prema normi ASTM D695	41
Slika 33.	Umetnuti indikatori za mjerenje pomaka tijekom ispitivanja	42
Slika 34.	Dijagram „naprezanje – sabijanje“	43
Slika 35.	Ispitivanje savojne čvrstoće	44
Slika 36.	Ispitivanje tvrdoće na Shore A tvrdomjeru Zwick	46
Slika 37.	Shore tvrdoće nekih proizvoda [18]	47
Slika 38.	Bušenje rupa za umetanje senzora	49
Slika 39.	Umetanje senzora za mjerenje toplinskih svojstva	49
Slika 40.	Proces mjerenja toplinskih svojstva	50
Slika 41.	Epruvete prije ispitivanja	51
Slika 42.	Epruveta tijekom ispitivanja	52
Slika 43.	Epruveta nakon ispitivanja	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Količina papira utrošena na najpopularnije dnevne tiskovine.....	7
Tablica 2. Svojstva poli(vinil-acetata) [5]	8
Tablica 3. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje	10
Tablica 4. Dimenzije male epruvete za statičko vlačno ispitivanje	11
Tablica 5. Metode ispitivanja tvrdoće po Shoreu	17
Tablica 6. Toplinske vodljivosti nekih materijala [12]	19
Tablica 7. Specifični toplinski kapaciteti nekih krutina [12]	20
Tablica 8. Klase materijala nakon ispitivanja gorivosti i samogasivosti	23
Tablica 9. Svojstva matrice kompozita [17].....	25
Tablica 10. Svojstva ojačala	25
Tablica 11. Komponente kompozitnog materijala i maseni udjeli komponenata	26
Tablica 12. Rezultati mjerenja kalupa i uzorka	27
Tablica 13. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja malih epruveta	38
Tablica 14. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja normalnih epruveta.....	38
Tablica 15. Rezultati ispitivanja statičke tlačne čvrstoće	41
Tablica 16. Rezultati ispitivanja tlačnog modula elastičnosti	43
Tablica 17. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma	45
Tablica 18. Iznosi tvrdoće po Shoreu A	46
Tablica 19. Rezultati ispitivanja toplinskih svojstva.....	48
Tablica 20. Svojstva kompozitnog materijala	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina
a_{cU}	kJ/m^2	žilavost
B	mm	širina epruvete za ispitivanje žilavosti
b_1	mm	širina uskog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje
b_2	mm	širina pri kraju epruvete za statičko vlačno ispitivanje
c	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
C	J/K	toplinski kapacitet
c_v	$\text{MJ/m}^3\text{K}$	specifični volumni toplinski kapacitet
D	mm	promjer epruvete za statičko tlačno ispitivanje
E	MPa	modul elastičnosti
E_{tl}	MPa	tlačni modul elastičnosti
E_{vl}	MPa	vlačni modul elastičnosti
F	N	sila
F_{max}	N	maksimalna sila
$F_{rač}$		izračunati parametar F - razdiobe
F_{tab}		tablični parametar F - razdiobe
H	mm	debljina epruvete
\bar{h}	mm	srednja debljina epruvete
h_1	mm	početna visina Charpyjevog bata
h_2	mm	konačna visina Charpyjevog bata
h_t	mm	visina epruvete za statičko vlačno ispitivanje
k		broj stupnjeva slobode uzorka
L	mm	početna udaljenost između ispitivanja
L	mm	duljina epruvete za savojno ispitivanje
L_0	mm	mjerna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje
l_1	mm	duljina uskog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje
l_2	mm	udaljenost između proširenog paralelnog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje
l_3	mm	ukupna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje
L_s	mm	razmak između oslonaca savojnog ispitivanja
n		veličina uzorka
p		vjerojatnost
R	mm	radijus zakrivljenosti epruvete za statičko vlačno ispitivanje
$R_{m,tl}$	MPa	tlačna čvrstoća
$R_{m,vl}$	MPa	vlačna čvrstoća

S_L	%	koeficijent linearnog stezanja
$S_{L,D}$	%	koeficijent srednjeg linearnog stezanja po dužini
$S_{L,\delta}$	%	koeficijent srednjeg linearnog stezanja po širini
t		varijabla Studentove t -razdiobe
\bar{x}		aritmetička sredina uzorka
α		stupanj značajnosti
ε	mm/mm	deformacija
λ	W/mK	toplinska vodljivost
μ		procijenjeno očekivanje osnovnog skupa
μ_{El}	MPa	intervalna procjena tlačnog modula elastičnosti
μ_{Ev}	MPa	intervalna procjena vlačnog modula elastičnosti
$\mu_{Rm,tl}$	MPa	intervalna procjena tlačne čvrstoće
$\mu_{Rm,vl}$	MPa	intervalna procjena vlačne čvrstoće
μ_{ShoreA}		intervalna procjena tvrdoće po Shoreu A
$\mu_{S,LD}$	%	intervalna procjena linearnog stezanja po dužini
$\mu_{S,L\delta}$	%	intervalna procjena linearnog stezanja po širini
ρ	g/cm ³	gustoća
σ	MPa	naprezanje
$\sigma_{\bar{x}}$		standardna devijacija

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je istražiti potencijalnu primjenu otpadnog papira kao ojačala u polimernom kompozitu. Motivacija za ovaj diplomski rad je rastuća potreba za građevinskim materijalima sa zadovoljavajućim toplinskim, tj. izolacijskim svojstvima, koji nemaju visoke proizvodne troškove, te koji nemaju štetan utjecaj na okoliš. Teoretski dio rada opisuje recikliranje materijala općenito, vrste kompozitnih materijala, glavne konstituente u polimernom kompozitu s otpadnim papirom kao ojačalom i ispitivanja koja su provedena na uzorcima. U drugom, eksperimentalnom dijelu prikazan je način izrade i ispitivanje svojstva kompozitnog materijala s polimernom matricom na bazi poli(vinil-acetata) i otpadnim novinskim papirom kao ojačalom.

Utvrđena je niska gustoća, visoka tlačna čvrstoća i tlačni modul elastičnosti uz dobru žilavost, najviša klasa samogasivosti, visoka tvrdoća, niska toplinska vodljivost, nizak vlačni modul elastičnosti i niska vlačna čvrstoća.

Potencijalna primjena ovakvog kompozitnog materijala u obliku ploča je u građevinskoj industriji kao unutarnja zidna obloga.

Ključne riječi: recikliranje, kompozitni materijali, otpadni papir, PVAc, mehanička svojstva, toplinska svojstva, samogasivost, izolacijski materijali

SUMMARY

The thesis shows a potential usage of waste paper as reinforcement in polymer based matrix. The principal motivation for this thesis is the growing need for materials with acceptable heat insulating characteristics, low productions costs, and are environmentally or eco-friendly.

Theoretical part of thesis describes material recycling, types of composite materials, and main constituents in polymer based matrix composite with waste paper as reinforcement and general properties testing which were carried out. Second part presents the making and testing of the composite material which consists of poly(vinyl-acetate) based matrix and waste newspaper as reinforcement.

Low density, high compressive strength, high compressive modulus of elasticity, good toughness, high self-extinguishing class, high hardness, low thermal conductivity, low tensile elastic modulus and low tensile strength were determined.

Potential applications of this composite material in the form of plates would be in the construction industry for interior wall-coverings.

Key words: recycling, composite materials, waste paper, PVAc, mechanical properties, thermal properties, self-extinguishing, insulation materials

1. UVOD

Zalihe svjetskih sirovina i materijala drastično se smanjuju, potražnja za njima eksponencijalno raste, a količine proizvoda koji se približavaju kraju vlastitog životnog ciklusa postaju sve veći problem. Budući da sve te proizvode treba nekako zbrinuti i istovremeno pokušati očuvati okoliš i prirodne resurse glavno rješenje je recikliranje materijala. Recikliranje je moguće svesti na tri glavna oblika:

- energijsko recikliranje,
- kemijsko recikliranje i
- materijalno recikliranje.

Materijalno recikliranje spada u skupinu najpopularnijih oblika recikliranja iz razloga što je sam proizvod moguće ponovno koristiti, doraditi ili ga iskoristiti kao sekundarnu sirovinu za proizvodnju materijala. Često se događa da je ponovna upotreba ili dorada neisplativa ili nemoguća, ali je zato upotrebljavanje proizvoda kao sekundarne sirovine za proizvodnju materijala itekako moguće. Tako se svakodnevno zbrinjavaju goleme količine proizvoda načinjenih od čelika, papira, polimera i ostalih materijala. Međutim, neke od materijala nije moguće provoditi kroz proces recikliranja nebrojeno puta, tako da se na kraju može činiti da se ponovno nalazimo u slijepoj ulici. Konkretno, takav problem se, između ostalog događa prilikom recikliranja papira.

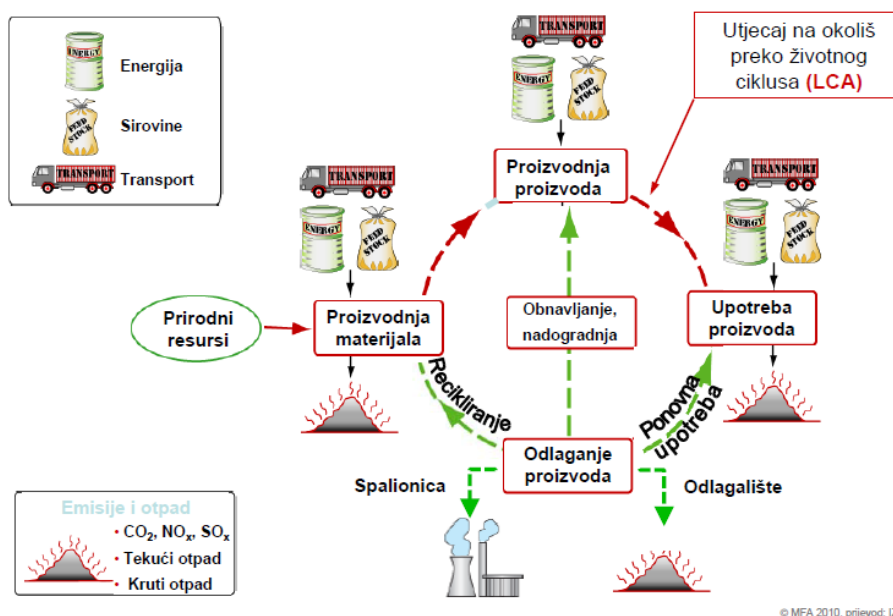
Ovim diplomskim radom pokušat će se ući u problematiku zbrinjavanja novinskog papira koji je već prošao kroz faze recikliranja i kao takav više nije upotrebljiv za prvotnu namjenu. Prvim, teoretskim, dijelom bit će opisan način upotrebe novinskog papira u svrhu dobivanja novog materijala potpuno drugačije namjene i svojstva, dok će u drugom dijelu biti provedena konkretna izrada uzoraka za ispitivanje i razrada područja primjene takvog novo dobivenog materijala.

2. ŽIVOTNI CIKLUS PROIZVODA I RECIKLIRANJE MATERIJALA

Da bi bilo moguće proizvesti proizvod, potrebno je prvo proizvesti materijal. Proizvodnja materijala počinje iskorištavanjem sirovina i resursa. Sirovine i resursi su dva relativno usko povezana pojma. Sirovine su prirodni neobrađeni resursi, dobivaju se iz prirodnih izvora, te služe izravnoj potrošnji, dok su resursi sami po sebi sredstva potrebna za provođenje ili dovršenje određene radnje. Primjer sirovine bila bi željezna ruda, a primjer resursa visoka peć i gorivo za visoku peć. Nakon proizvodnje materijala iz njega se proizvodi određeni proizvod. Svaki proizvod ima svoj životni ciklus, tj. vrijeme koje provede u obavljanju svoje primarne namjene. Nakon što životni ciklus proizvoda završi on postaje otpad. Onog trenutka kada se to dogodi, postavlja se pitanje što učiniti s takvim proizvodom. Postoji nekoliko rješenja:

- ponovna upotreba proizvoda,
- obnavljanje proizvoda i
- ponovna upotreba materijala – recikliranje,
- ili sve nepopularniji oblik, odlaganje.

Slika 1. prikazuje put od sirovina i prirodnih resursa do gotovog proizvoda i njegovog zbrinjavanja, te faze u kojima nastaje otpad.

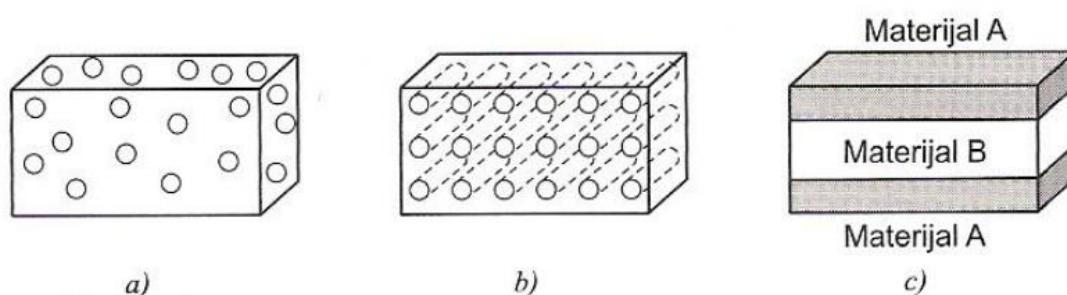


Slika 1. Proizvodnja materijala, proizvodnja proizvoda, njegovo zbrinjavanje, te faze u kojima nastaje otpad [1]

Ponovna upotreba proizvoda podrazumijeva daljnju upotrebu rabljenog proizvoda ili njegovih dijelova u prvobitnoj namjeni. Kao primjer za takvu vrstu recikliranja mogao bi se uzeti automobil. Nakon što ga prvotni vlasnik više ne želi, obično ga prodaje i neki drugi vlasnik se njime služi. Također, ukoliko je neki dio automobila iz nekog razloga neispravan, dijelovi koji su još uvijek ispravni mogu se iskoristiti u nekom drugom automobilu. Nadalje, obnavljanje proizvoda je industrijski postupak koji se obično provodi u tvornicama ili specijaliziranim radionicama u svrhu vraćanja dotrajalog proizvoda u prvobitno stanje. Takvi postupci se često provode na dotrajalim industrijskim strojevima, automobilima, motociklima ili sličnim proizvodima na način da se oni rastavljaju, čiste, zamjenjuju im se ili popravljaju dotrajali dijelovi itd. Treći način recikliranja proizvoda je ponovna upotreba materijala ili recikliranje. Recikliranje je materijalno iskorištavanje dotrajalog proizvoda na način da se on koristi kao sekundarna sirovina u proizvodnji materijala. Materijal dobiven recikliranjem naziva se još i reciklat. Da bi materijal postao reciklat, potrebno ga je odvojiti i usitniti. Tako dobiveni materijal može se iskoristiti na način da se dodaje u smjesu istog takvog nerekiciranog materijala u određenom udjelu ili se koristi kao zasebni materijal. Konkretni primjer takvog proizvoda su dnevne novine. Budući da se dnevne novine sastoje samo od novinskog papira na kojem su otisnuti tekstovi i slike, životni ciklus im je jedan dan, te se ne mogu ponovno upotrijebiti ili obnoviti, logično je da ih je potrebno reciklirati. Međutim, problem kod novinskog papira, a i papira općenito, je ograničen broj ciklusa recikliranja iz razloga što celulozna vlakna koja su sastavni dio papira svakom sljedećom preradom postaju sve kraća, što značajno utječe na svojstva papira. Pokazalo se da papir nakon trećeg recikliranja više nije moguće koristiti kao reciklat za proizvodnju recikliranog papira, stoga se nameće pitanje što učiniti s takvim papirom. Jedno od mogućih rješenja je upotrijebiti ga kao ojačalo u kompozitnom materijalu.

3. KOMPOZITNI MATERIJALI

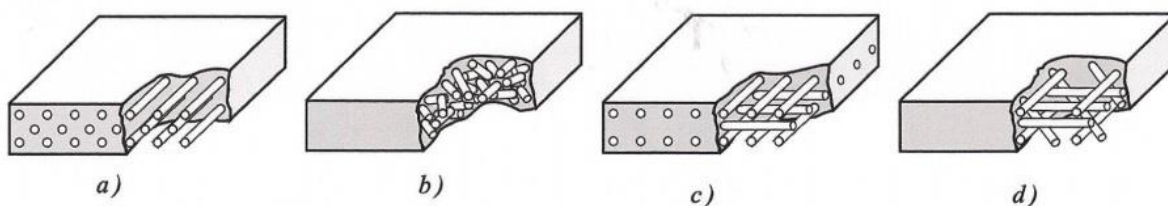
Kompozitni materijali ili kraće kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstva s ciljem dobivanja novog materijala takvih svojstva kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Na taj način moguće je proizvesti materijale zanimljivih kombinacija svojstva kakva ostali materijali ne mogu postići [2]. Tako je primjerice korištenjem kompozita s ugljičnim vlaknima kao ojačalom i epoksidnom smolom kao matricom moguće postići izrazito visoku čvrstoću i krutost uz nisku masu. Kompoziti se mogu u osnovi podijeliti prema obliku ojačala. Tako postoje kompoziti s česticama, kompoziti s vlaknima i slojeviti kompoziti (Slika 2.).



Slika 2. a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [2]

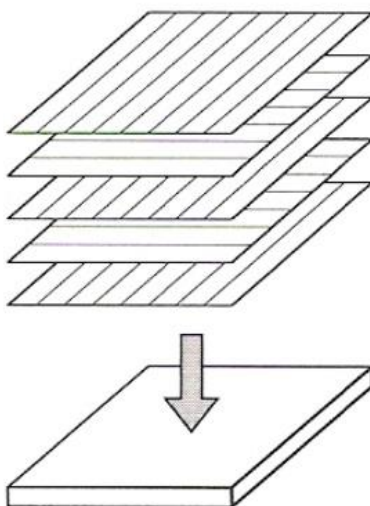
Kompoziti s česticama sastoje se od jednolično raspoređenih tvrdih i krhkih čestica koje se nalaze u mekanijoj i duktilnijoj matrici. Prema veličini čestica dijele se na kompozite s disperzijom, gdje veličina čestica ne prelazi $0,1 \mu\text{m}$ i kompozite s velikim česticama, čiji je promjer veći od spomenutog iznosa od $0,1 \mu\text{m}$. Također, ukoliko kompozit ima volumni udio čestica do $V_p = 0,15$, tada je riječ o kompozitima s disperzijom, a ukoliko je volumni udio veći od $V_p = 0,20$ radi se o kompozitima s velikim česticama [2].

Vlaknima ojačani kompoziti proizvode se na način da se u mekaniju i duktilniju matricu ugrađuju vlakna koja su u pravilu čvrsta, kruta i krhka. Materijal matrice ima zadatak prenijeti opterećenje na vlakna. Vlakna najbolje podnose opterećenja u smjeru vlastite osi, stoga je orijentacija vlakna u kompozitu od velike važnosti. Slika 3. prikazuje neke od načina rasporeda vlakna unutar kompozita.



Slika 3. Kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]

Slojeviti kompoziti sastavljeni su od dvodimenzionalnih slojeva ploča s preferiranim smjerom vlačne čvrstoće. Slojevi se slažu jedan na drugi i čvrsto se povezuju, a ukupna svojstva ovise o orijentaciji vlakana u pojedinim slojevima. Slika 4. prikazuje način izrade slojevitog kompozita.



Slika 4. Slaganje različito usmjerenih vlaknima ojačanih slojeva [2]

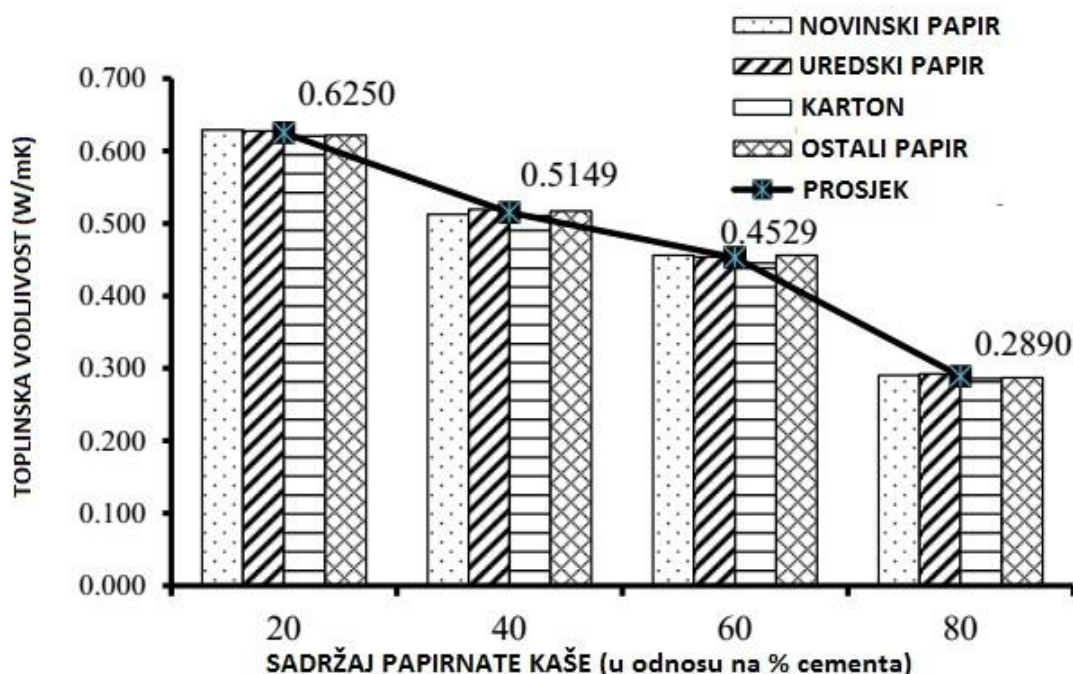
Ukupno ponašanje bilo koje od gore navedenih vrsta kompozita direktno ovisi o [2]:

1. svojstvima matrice i ojačala,
2. veličini i rasporedu konstituenata,
3. volumnom udjelu konstituenata,
4. obliku konstituenata,
5. prirodi i jakosti veze između konstituenata.

3.1. Kompozitni materijali proizvedeni od otpadnog novinskog papira

Otpadni novinski papir moguće je iskoristiti na nekoliko načina. Prvi način je da se koristi kao sirovina za proizvodnju recikliranog novinskog papira, što je najčešće i slučaj. Proces recikliranja papira počinje prikupljanjem i sortiranjem otpadnog papira, koji se zatim dovozi do postrojenja za recikliranje. U samom postrojenju se obavlja razvlaknjivanje papira u vodi, grubo prosijavanje, uklanjanje otisnute boje, čišćenje, fino prosijavanje, ispiranje, te eventualno ugušćivanje i konzerviranje vlaknaste mase i to točno tim redoslijedom. Gotovo svaki korak procesa prerade direktno utječe na buduća svojstva recikliranog papira, stoga se tijekom cijelog procesa obavlja kontrola kvalitete vlaknaste mase [3]. Ipak, proces recikliranja papira iziskuje relativno velik utrošak energije i vode.

Drugi način materijalnog recikliranja bazira se na korištenju novinskog papira kao aditiva u kompozitnom materijalu iz razloga što papir sam po sebi sadrži jedno zanimljivo toplinsko svojstvo, a to je da se ponaša kao izolator, točnije ima nisku toplinsku vodljivost. Dosadašnja istraživanja pokazala su da ukoliko se u mješavinu betona u određenom omjeru dodaje kaša otpadnog papira ukupna toplinska vodljivost betonskog bloka se smanjuje (Slika 5.).



Slika 5. Toplinska vodljivost u odnosu na udio papirnatu kašu (pulpu) u betonu [3]

Najnoviji način upotrebe otpadnog novinskog papira bio bi kao ojačala u polimernom kompozitu. Ovaj način recikliranja otpadnog novinskog papira vrlo je sličan klasičnoj proizvodnji polimernog kompozita na način da se ojačalo, u ovom slučaju otpadni novinski papir, miješa s polimernom matricom.

3.2. Novinski papir

Novinski papir proizvodi se od dva glavna sastojka:

- celuloze dobivene sulfatnim postupkom i
- drvenjače.

Celuloza se u obliku dugih i čvrstih vlakna dobiva sulfatnim postupkom tako da se celulozna masa pomiješana s natrijevim hidroksidom i natrijevim sulfidom iskuhava oko 5 sati na temperaturi od 100 do 180 °C. Zatim se ta celulozna masa odvaja od preostalog luga, čisti se, pere i po potrebi izbjeljuje.

Drvo je najčešće polazna sirovina za izradu papira općenito. Brušenjem drveta dobiva se drvenjača. Cilj brušenja drveta za proizvodnju drvenjače je dobiti što duža, tanka i mekana vlakanca. Dugačka vlakna su preduvjet za proizvodnju papira s dobrim mehaničkim svojstvima [4].

Za razliku od drugih, kvalitetnijih vrsta papira, novinski papir je relativno niske kvalitete, s obzirom da je najčešće namijenjen za jednokratnu, tj. jednodnevnu upotrebu. Budući da u današnje vrijeme svijest o ekologiji raste iz dana u dan, često se za dnevne tiskovine koristi reciklirani papir.

Upitom kod izdavača o prosječnoj dnevnoj potrošnji papira za izradu triju najpoznatijih dnevnih tiskovina u Hrvatskoj prikupljeni su podaci, koji su prikazani u Tablica 1.

Tablica 1. Količina papira utrošena na najpopularnije dnevne tiskovine

Dnevne novine	Format stranice	Prosječan broj stranica	Prosječna naklada [kom]	Težina papira [g/m²]	Količina papira [t]
Jutarnji list	cijeli format (43 x 57,5 cm)	50	66.000	45	≈9,3
Večernji list	cijeli format (43 x 57,5 cm)	55	62.000	45	≈9,3
24 sata	tabloidni format (29 x 43 cm)	75	190.000	45	≈19
UKUPNO			318.000	45	37,6

Novinski papir odvojeno prikupljen moguće je iskoristiti kao ojačalo u polimernom kompozitu na način da se papir usitni i u određenom omjeru dodaje u polimernu matricu.

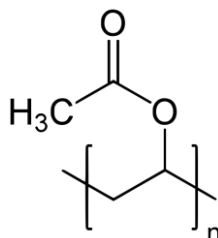
3.3. Poli(vinil-acetat) (PVAc)

Poli(vinil-acetat) ili skraćeno PVAc je plastomer iz skupine polivinil-estera s kemijskom formulom $(C_4H_6O_2)_n$. Otkrio ga je 1912. godine njemački kemičar Fritz Klatte koji je također i vlasnik patenta GP 281687 1912 za pripremu PVAc iz plina acetilena. Komercijalni nazivi za PVAc su još ljepilo za drvo, bijelo ljepilo, stolarsko ljepilo, školsko ljepilo ili jednostavno PVA-ljepilo [5].

Stupanj polimerizacije je obično od 100 do 5000, dok su njegove esterske skupine osjetljive na alkalnu hidrolizu. Neke vrste mikroorganizama poput gljivica, bakterija i lišajeva dokazano degradiraju PVAc, što ga čini biorazgradivim. PVAc se koristi kao osnovni polimer u raznim vrstama ljepila. Svojstva poli(vinil-acetata) dana su u Tablica 2. dok Slika 6. prikazuje molekularnu strukturu PVAc.

Tablica 2. Svojstva poli(vinil-acetata) [5]

POLI(VINIL-ACETAT) (PVAc)	
Kemijska formula	$(C_4H_6O_2)_n$
Molarna masa	86,09 g/mol
Gustoća	1,19 g/cm ³
Vrelište	112 °C
Temperatura staklišta	30 °C



Slika 6. Molekularna struktura PVAc [5]

Ljepilo na bazi PVAc dolazi kao vodena disperzija u kojoj su umiješana razna punila i aditivi kako bi se poboljšala sama svojstva ljepila i pojeftinila proizvodnja.

4. OPIS PROVEDENIH ISPITIVANJA

4.1. Opis ispitivanja mehaničkih svojstva

Predviđanje mehaničkih svojstva bez prethodnih ispitivanja gotovo je nemoguće zadatak. Unutarnje nesavršenosti poput raznih uključaka, dislokacija ili praznina znatno utječu na ukupno ponašanje materijala u eksploataciji stoga je jedini pravi način utvrđivanja stvarnih eksploatacijskih svojstva materijala ispitivanje njegovih mehaničkih svojstva. Osnovna ispitivanja mehaničkih svojstva koja se provode su:

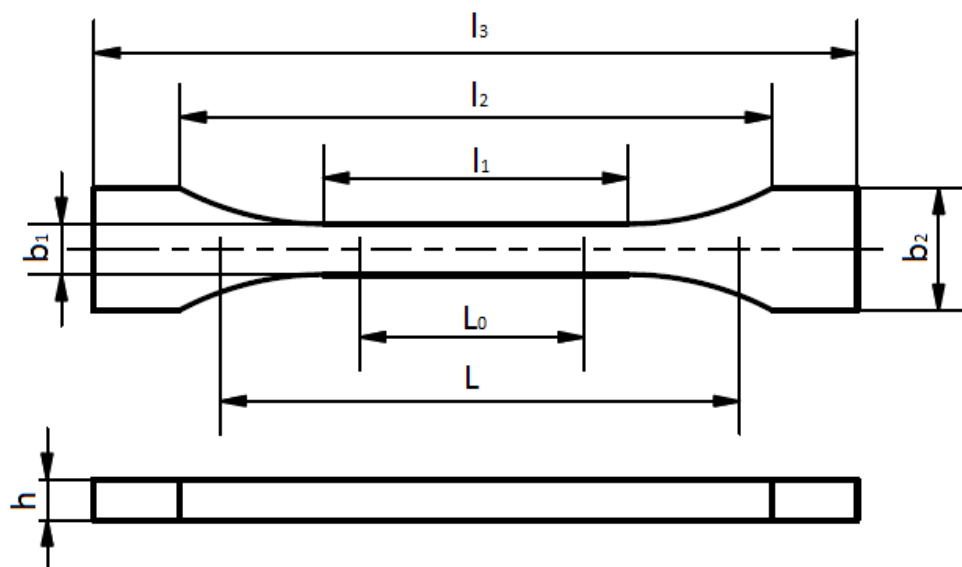
- ispitivanje vlačne čvrstoće,
- ispitivanje tlačne čvrstoće,
- ispitivanje savojne čvrstoće i
- ispitivanje tvrdoće.

Prema potrebi moguće je provesti i ostala ispitivanja mehaničkih svojstva poput gustoće, žilavosti, krutosti, otpornosti puzanju itd.

4.1.1. Opis statičkog vlačnog ispitivanja

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičnog vlačnog naprežanja. Samo ispitivanje se provodi uređajima koji se nazivaju kidalice ili univerzalne ispitivalice. Mehanička svojstva koja je ovim putem moguće odrediti su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća itd. Tijekom ispitivanja se kontinuirano mjeri sila i produljenje epruvete te se grafički registrira dijagram „sila – produljenje“, te se kasnijim uvrštavanjem iznosa poprečnog presjeka epruvete generira dijagram naprežanje-istežanje, tj. „ σ - ϵ dijagram“ [7]. Ispitivanje vlačne čvrstoće polimernih kompozita provodi se prema normi ISO 527. Prvi dio norme, ISO 527-1:1993 propisuje opće principe, dok drugi dio ISO 527-2:1993 propisuje uvjete ispitivanja. Epruvete za ispitivanje dijele se na A – višenamjensko ispitivanje i B – strojna ispitna tijela.

Dimenzije epruveta prikazane su na Slika 7. i dane u Tablica 3.



Slika 7. Izgled epruveta za statičko vlačno ispitivanje

Tablica 3. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje

Tip epruvete	Dimenzije (mm)	
	1A	1B
l_3 – ukupna duljina	≥ 150	
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r – polumjer	$20 \dots 25$	≥ 60
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104 \dots 113$	$106 \dots 120$
b_2 – širina pri kraju	$20 \pm 0,2$	
b_1 – širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	
h – debljina	$4 \pm 0,2$	
L_0 – početna mjerna duljina	$50 \pm 0,5$	
L – početna udaljenost između čeljusti	115 ± 1	$l_2 \pm \frac{5}{0}$

Kod pojedinih uzoraka materijala, zbog dostupne količine materijala, nije moguće izrezati epruvete gore zadanih dimenzija. U tom slučaju koriste se male epruvete dimenzija navedenih u Tablica 4.

Tablica 4. Dimenzije male epruvete za statičko vlačno ispitivanje

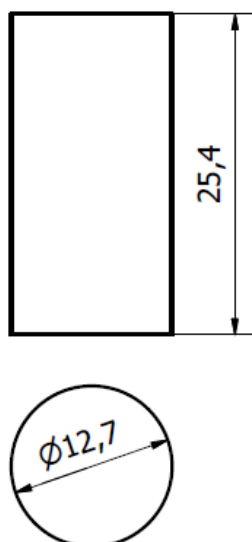
Tip epruvete	Dimenzije (mm)	
	1BA	1BB
l_3 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 30
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r – polumjer	≥ 30	≥ 12
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	58 ± 2	23 ± 2
b_2 – širina pri kraju	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 – širina uskog dijela	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h – debljina	≥ 2	≥ 2
L_0 – mjerna duljina	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L – početna udaljenost između čeljusti	$l_2 \pm \frac{2}{0}$	$l_2 \pm \frac{1}{0}$

Bitno je napomenuti da spomenuta norma ISO 527 nije prikladna za ispitivanje materijala ojačanih tekstilnim vlaknima.

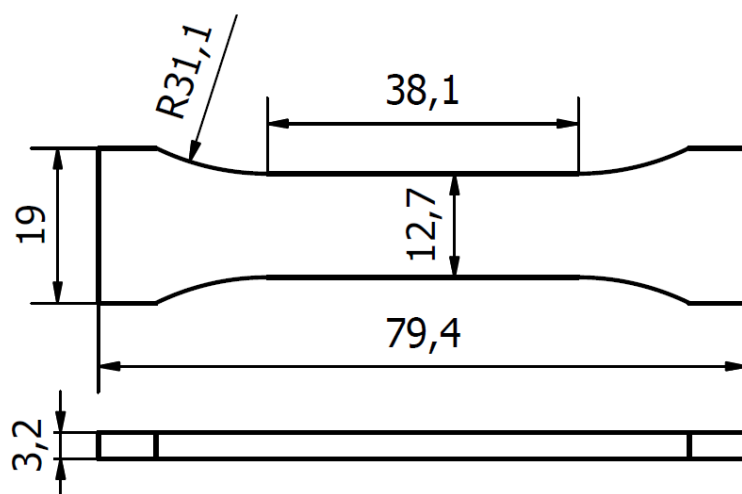
4.1.2. Opis statičkog tlačnog ispitivanja

Ispitivanje statičke tlačne čvrstoće provodi se na istim uređajima kao i ispitivanje statičke vlačne čvrstoće samo u suprotnom smjeru. Epruveta se podvrgava tlačnom naprezanju sve do pojave loma. Tijekom ispitivanja se kontinuirano bilježi sila i sabijanje epruvete, te se na kraju dobije dijagram „sila – skraćenje“ koji je potrebno uvrštavanjem poprečnog presjeka epruvete preračunati u dijagram „naprezanje – sabijanje“ kako bi dobio inženjersko značenje. Ispitivanje tlačne čvrstoće se provodi kako bi se utvrdila granica pri kojoj dolazi do kritičnog tlačnog naprezanja. Samo ispitivanje je moguće provesti prema više normi koje se sve uglavnom referiraju na najčešće korištenu normu u laboratorijima diljem svijeta, normu ASTM D695. Izgled i preporučene dimenzije epruveta prikazane su na Slika 8. i Slika 9.

Tanka epruveta se koristi u slučajevima kada nije moguće izrezati iz materijala okrugli prizmatični oblik. U slučaju korištenja tanke epruvete potrebno je koristiti nosač epruveta prikazan na Slika 10.



Slika 8. Normalna epruveta za ispitivanje tlačne čvrstoće



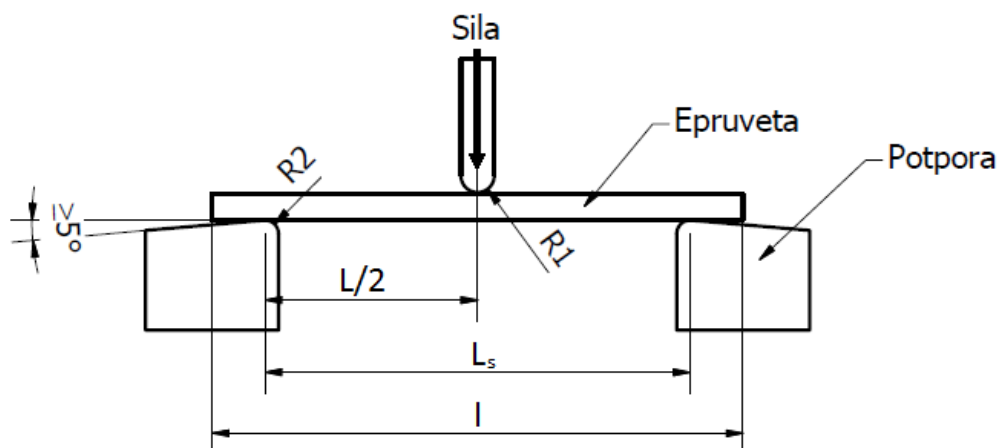
Slika 9. Tanka epruveta za ispitivanje tlačne čvrstoće



Slika 10. Nosač tankih epruveta za tlačno ispitivanje

4.1.3. Opis savojnog ispitivanja

Savojno ispitivanje ili ispitivanje savojne čvrstoće polimernih kompozita provodi se također na univerzalnoj kidalici i to najčešće prema normi ISO 178. Epruvete se postavljaju na napravu za trotočkasto ispitivanje savojne čvrstoće (Slika 11.), te se povećava sila savijanja sve do pojave loma.



Slika 11. Naprava za ispitivanje savojne čvrstoće

gdje je:

L_s – razmak između oslonaca

l – duljina epruvete

$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$

$R_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$

Razmak između oslonaca računa se prema jednadžbi (1):

$$L_s = (16 \pm 1) \cdot \bar{h} \quad (1)$$

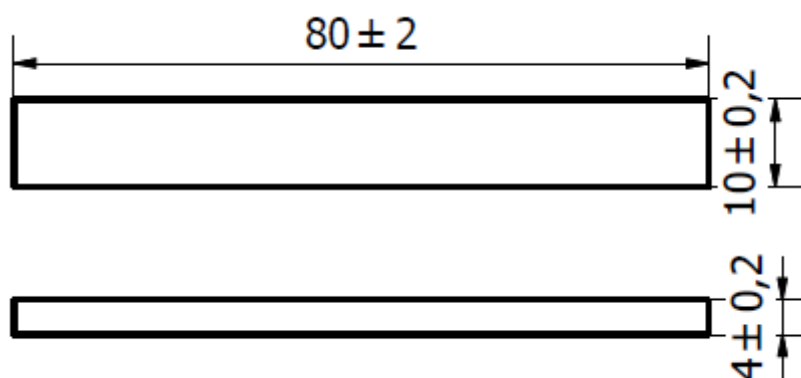
gdje je:

L_s – razmak između oslonaca

\bar{h} – aritmetička sredina debljina svih epruveta

Tijekom ispitivanja se bilježi progib epruvete kako bi se kasnije mogao odrediti i savojni modul elastičnosti. Savojno ispitivanje uglavnom je namijenjeno za utvrđivanje graničnog naprezanja pri kojem dolazi do loma ukoliko je materijal napregnut na savijanje.

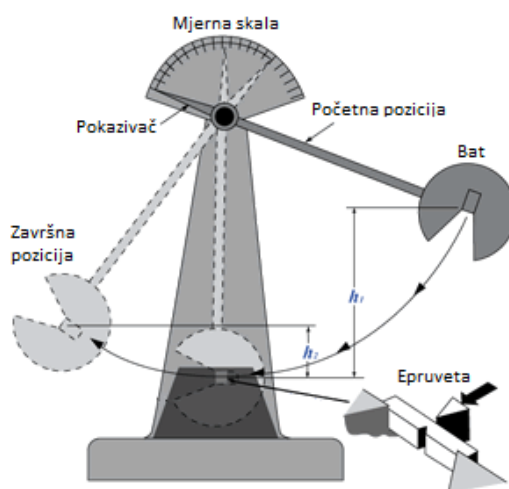
Dimenzije epruveta propisuje norma i prikazane su na Slika 12.



Slika 12. Epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće

4.1.4. Opis ispitivanja žilavosti

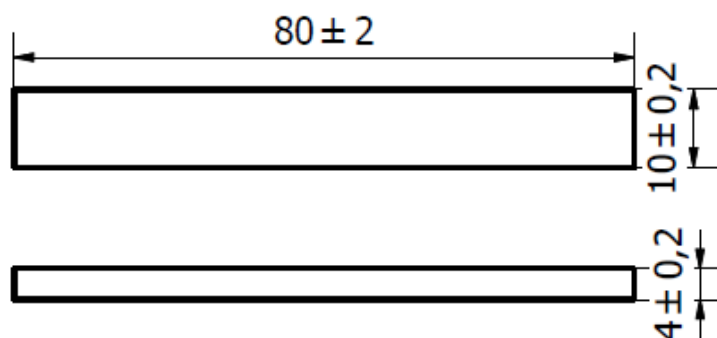
Žilavost se ispituje ukoliko su materijali u konstrukciji izloženi udarnom opterećenju. Žilavost je najlakše odrediti ispitivanjem udarnog rada loma na uređaju koji se naziva Charpyjev bat (Slika 13).



Slika 13. Charpyjev bat [8]

Glava bata se postavlja u početnu poziciju na određenu visinu, h_1 te se zatim ispušta da udari epruvetu. Nakon što bat udari epruvetu, doseže određenu visinu u stanju mirovanja, h_2 , a pritom zaustavlja pokazivač na određenoj vrijednosti na mjernoj skali. Na temelju tih dviju vrijednosti visina bata u stanju mirovanja i mase bata, na mjernoj skali se očitava iznos žilavosti. Točnije, razlika potencijalnih energija glave bata u stanju mirovanja prije i nakon

udarca jednaka je energiji utrošenoj na lom uzorka, odnosno jednaka je udarnom radu loma. Ispitivanje se provodi prema normi ISO 179-1. Norma propisuje i dimenzije epruveta za ispitivanje, a koje su prikazane na Slika 14.



Slika 14. Dimenzije epruveta za ispitivanje žilavosti

Ovisno o vrsti materijala koji se ispituje epruvete mogu biti sa zarezom ili bez njega. Normom propisani zarez se narezuje na epruvetama ukoliko prilikom ispitivanja udarnog rada loma na epruvetama bez zareza ne dolazi do loma.

4.1.5. Opis ispitivanja tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće također je jedno od glavnih ispitivanja mehaničkih svojstva materijala. Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, tvrdog materijala. Ovisno o vrsti materijala primjenjuju se različiti postupci mjerenja tvrdoće koji u osnovi rade na sličnom principu. Tvrdi indentor se utiskuje u ispitni uzorak te se mjeri dubina prodiranja ili širina otiska. Na osnovi izmjerenih podataka određuje se iznos tvrdoće. Neki od postupaka mjerenja tvrdoće su:

- Rockwellova metoda – utiskivanje dijamantnog stošca,
- Vickersova metoda – utiskivanje dijamantne piramide,
- Brinellova metoda – utiskivanje kuglice od tvrdog metala,
- Metoda po Shoreu – utiskivanje čeličnog indentora različitih geometrija.

Kod ispitivanja plastomera, elastomera, duromera i polimernih kompozita koristi se metoda po Shoreu prema normi DIN ISO 7619. Geometrije indentora prikazane su u Tablica 5. Geometrija indentora bira se na sljedeći način:

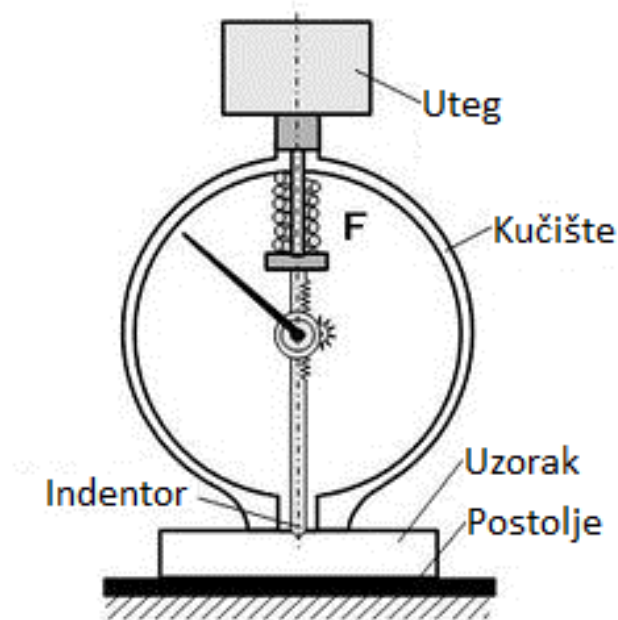
- iznosi tvrdoće manji od 20 pomoću indentora D – koristiti indentor A,
- iznosi tvrdoće manji od 20 pomoću indentora A – koristiti indentor AO,
- iznosi tvrdoće veći od 90 s indentorom A – koristiti indentor D,
- ispitni uzorci tanji od 6 mm – indentor AM

Tablica 5. Metode ispitivanja tvrdoće po Shoreu

Metoda po Shoreu	Tip indentora	Promjer indentora	Dubina prodiranja
A	Krnji stožac vršnog kuta 35°	$\phi 1,25$ mm	2,5 mm
D	Stožac vršnog kuta 30°	$\phi 1,25$ mm	2,5 mm
AO	Polukugla	$R = 2,5$ mm	2,5 mm
AM	Stožac vršnog kuta 30°	$\phi 0,79$ mm	1,25 mm

Princip mjerenja tvrdoće prema Shoreu je sljedeći. Uzorak debljine minimalno 6 mm za A, D i AO metodu ispitivanja postavlja se na postolje tvrdomjera. Indentor se utiskuje u trajanju od 3 sekunde te se na mjernoj skali tvrdomjera očitava iznos tvrdoće.

Princip mjerenja shematski je prikazan na Slika 15.



Slika 15. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće prema Shoreu [9]

4.2. Opis ispitivanja toplinskih svojstva

Toplina je energija koja zbog razlike temperatura prelazi iz područja više temperature u područje niže temperature. Taj prijenos topline moguć je na tri načina:

- prolazom topline
- konvekcijom i
- zračenjem.

Prolaz topline specifičan je za čvrsta tijela gdje, ukoliko se pojavi temperaturna razlika, toplinska energija će prelaziti s mjesta više temperature prema mjestu niže temperature. Prijenos topline ostvaruje se molekularnim gibanjem, dok je samo tijelo mirno. S druge strane, konvekcija je specifična za fluide s obzirom da se pri prenošenju topline giba i samo sredstvo što znači da je konvekcija moguća samo u tekućinama i plinovima. Prijenos topline zračenjem odvija se na način da se toplinska energija tijela pretvara u elektromagnetsko zračenje te emitira u okolni prostor. Svako tijelo ugrijano na određenu temperaturu emitira toplinsko zračenje čiji sastav i energija bitno ovise o temperaturi tijela. [10]

Budući da je tema ovog diplomskog rada vezana uz ispitivanja svojstva polimernog kompozita, koji spada u kategoriju čvrstih tijela i samim time dominantan proces prijenosa topline je prolaz topline, ispitivati će se svojstvo koje najviše utječe na prolaz topline, a to je toplinska vodljivost, λ . Toplinska vodljivost tvari, λ je fizikalna veličina definirana kao količina topline koji tvar provodi kroz jedinicu površine u jedinici vremena, pri standardnim uvjetima, a da se temperatura pri tom smanji za 1 K na jedinici puta u smjeru strujanja topline. Toplinska vodljivost, λ direktno ovisi o svojstvima tvari koja provodi toplinu. Mjerna jedinica za toplinsku vodljivost je W/mK [11]. Što je iznos toplinske vodljivosti veći, materijal je bolji vodič topline i suprotno, što je iznos toplinske vodljivosti manji, materijal je bolji toplinski izolator. Bolja izolacijska svojstva se mogu postići npr. većom poroznosti materijala. Primjeri toplinske vodljivosti nekih materijala dani su u Tablica 6. [12]

Tablica 6. Toplinske vodljivosti nekih materijala [12]

Dobri vodiči topline		Toplinski izolatori	
Materijal	λ [W/mK]	Materijal	λ [W/mK]
srebro	419	kamena vuna	0,04
bakar	386	pluto	0,041
aluminij	229	drvo	0,128-0,186
željezo	73,3	papir	0,208
platina	70	opeka	0,733

Sljedeće bitno toplinsko svojstvo je specifični toplinski kapacitet, c . Općenito toplinski kapacitet, C , fizikalna je veličina koja govori koliko topline treba dovesti tijelu da se njegova temperatura povisi za 1 K, te se izražava u Jouleima po Kelvinu [J/K]. Da bi se uopće moglo raspolagati toplinskim kapacitetom kao fizikalnom veličinom nekog krutog tijela, potrebno je poznavati specifični toplinski kapacitet materijala, c . Specifični toplinski kapacitet, c je toplinski kapacitet, C koji se odnosi na masu neke tvari i izražava se obično u kilojouleima po kilogramu i Kelvinu [kJ/kgK] te govori koliko je topline potrebno dovesti tijelu mase 1 kg da bi mu se temperatura povisila za 1 K [13].

Većina mjernih uređaja ne mjeri specifični toplinski kapacitet direktno iz razloga što sam uređaj ne zna o kakvom tijelu se radi, kolika je gustoća tijela i samim time kolika je masa tijela. Veličinu koju je moguće izmjeriti je volumni toplinski kapacitet, v_c koja daje informacije o sposobnosti tijela zadanog volumena da pohrani toplinsku energiju dok prolazi kroz zadanu temperaturnu promjenu, ali bez faznih pretvorbi [14]. Mjerna jedinica u kojoj se često izražava volumni toplinski kapacitet je megajoul po metru kubnom i kelvinu [MJ/m³K]. Da bi dobili specifični toplinski kapacitet, c potrebno je znati gustoću ρ ispitivanog materijala. Proračun specifičnog toplinskog kapaciteta prikazan je sljedećom jednačinom:

$$c = \frac{c_v}{\rho} \quad (2)$$

gdje je:

c – specifični toplinski kapacitet

c_v – specifični volumni toplinski kapacitet

ρ – gustoća

Dakle, dijeljenjem specifičnog volumnog toplinskog kapaciteta, c_v , s gustoćom ispitivanog materijala dobiva se specifični toplinski kapacitet, c . Također je bitno naglasiti da se kod svih krutina s povećavanjem temperature mijenja i specifični toplinski kapacitet, što je od velike važnosti kod metala koji se izlažu visokim temperaturama kao na primjer kod toplinske obrade. U Tablica 7. prikazani su specifični toplinski kapaciteti nekih krutina na 20 °C.

Tablica 7. Specifični toplinski kapaciteti nekih krutina [12]

Materijal	kJ/(kg K)
srebro	0,233
bakar	0,379
aluminij	0,879
željezo	0,452
platina	0,136
kamena vuna	0,754
pluto	1,884
drvo	2,271
papir	1,340
opeka	1,047

Toplinska svojstva mjere se posebnim mjernim uređajima koji rade na principu da se mjerni senzor umeće u uzorak materijala i uređaj očitava iznose toplinskih svojstva i ispisuje ih na ekranu ili pisaču. Primjer jednog takvog uređaja prikazan je na Slika 16.



Slika 16. Uređaj za mjerenje toplinske vodljivosti KD2 Pro

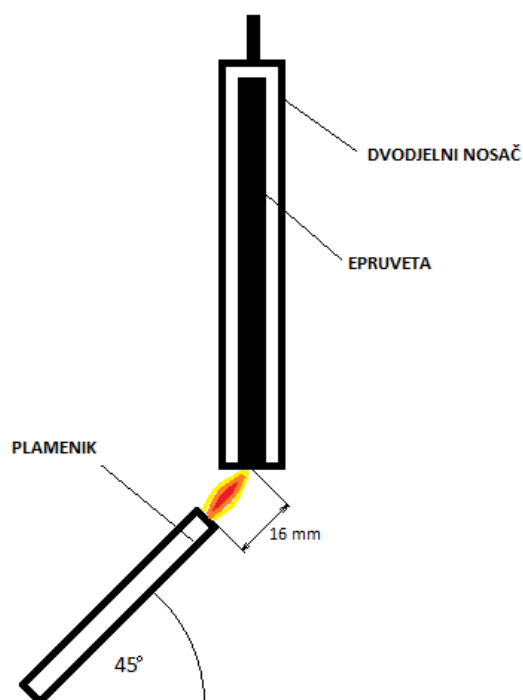
4.3. Opis ispitivanja gorivosti i samogasivosti

Neki materijali poput određenih vrsta polimera, polimernih kompozita i drva skloni su gorenju ukoliko se nađu u direktnom doticaju s otvorenim plamenom. Ukoliko postoji mogućnost da se takvi materijali pod određenim okolnostima nađu u spomenutim uvjetima, potrebno je provesti ispitivanje gorivosti i samogasivosti.

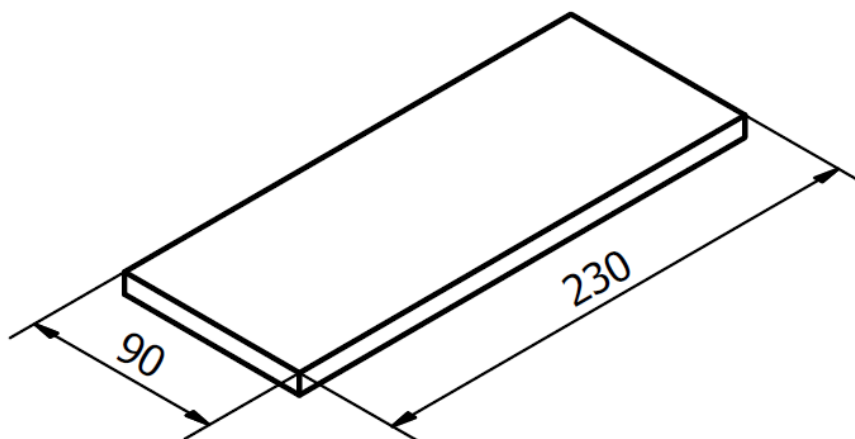
Gorivost materijala (*eng. material combustibility*) govori u kojoj mjeri će materijal gorjeti kada se izloži otvorenom plamenu. Gorivost se najčešće ispituje kod materijala koji se koriste u građevinskoj industriji ili kada je materijal potrebno skladištiti dulji vremenski period [15].

Samogasivost (*eng. self-extinguishing*) je sposobnost materijala da prekine gorjeti kada se izvor otvorenog plamena ukloni [15]. Kao i svojstvo gorivosti, ispituje se najčešće kod materijala korištenih u građevinskoj industriji.

Ispitivanje gorivosti i samogasivosti provodi se prema normi DIN 53 438. Ispitivanje se vrši prema skici sa Slika 17.



Slika 17. Ispitivanje gorivosti i samogasivosti



Slika 18. Dimenzije epruveta za ispitivanje gorivosti i samogasivosti

4.4. Statistička obrada rezultata mjerenja

Na rezultatima ispitivanja različitih svojstava kompozita ojačanog papirom određena je nepristrana procjena parametara osnovnog skupa na temelju teorije uzoraka. S obzirom da je kod svih mjerenja riječ o malim uzorcima ($n \leq 30$ elemenata, tj. podataka), potrebno je koristiti Studentovu t -razdiobu s parametrom $k = n - 1$ za intervalnu procjenu očekivanja osnovnog skupa iz kojeg potječe uzorak [16]. Intervalna procjena pojedinih svojstava kompozitnog materijala uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ u ovom je radu izračunata prema izrazu (3):

$$\bar{x} - t_{(k; \frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{(k; 1 - \frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

gdje su:

\bar{x} – aritmetička sredina uzorka

t – varijabla Studentove t -razdiobe

k – broj stupnjeva slobode uzorka od n podataka

n – veličina uzorka

α – stupanj značajnosti

s – nepristrana procjena standardne devijacije

μ – procijenjeno očekivanje osnovnog skupa

5. REZULTATI ISPITIVANJA

U ovom diplomskom radu, kao matrica polimernog kompozita korišteno je ljepilo na osnovi poli(vinil-acetatske) (PVAc) vodene disperzije s dodatkom punila i aditiva, dok je kao ojačalo korišten usitnjeni reciklirani novinski papir. Ispitana su mehanička svojstva (vlačna, tlačna, savojna i udarna svojstva te tvrdoća), zatim toplinska svojstva te gorivost i samogasivost.

5.1. Izrada kompozitnog materijala

Kao matrica kompozitnog materijala korišteno je polimerno ljepilo na bazi PVAc vodene disperzije s dodatkom punila i aditiva trgovačkog naziva „Eurostik Klasik“ hrvatskog proizvođača „Chromos d.d.“, svojstva prikazanih u Tablica 9.

Tablica 9. Svojstva matrice kompozita [17]

Gustoća	$\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$
Temperatura primjene	+15 °C do +25 °C
Najniža temperatura primjene	+12 °C

Ojačalo korišteno u kompozitnom materijalu je sjeckani reciklirani novinski papir svojstva prikazanih u Tablica 10.

Tablica 10. Svojstva ojačala

Gustoća	$\rho = 0,623 \text{ g/cm}^3$
Dimenzije pojedinačnog sjeckanog papira	4,5 mm x 19 mm
Površina pojedinačnog sjeckanog papira	$A = 85,5 \text{ mm}^2$

Komponente kompozitnog materijala i njihovi maseni udjeli prikazani su u Tablica 11. Miješanje se provodi ručno ili strojno sve dok se ne postigne gusta, koherentna masa. Nakon što se smjesa izmiješa, slijedi kalupljenje te sušenje. Sušenje pripremljenih uzoraka trajalo je 2 tjedna na sobnoj temperaturi.

Tablica 11. Komponente kompozitnog materijala i maseni udjeli komponenata

Komponenta	Maseni udio
Matrica	1221 g
Ojačalo	108 g
Maseni omjer komponenata	11,31:1 \approx 11:1
Maseni udio ojačala	8,13 %

Nakon potpunog sušenja, određen je koeficijent linearnog stezanja kompozitnog materijala. Koeficijent linearnog stezanja utvrđuje koliko se dimenzije kompozita smanjuju uslijed sušenja. Ispitivanje se provedi na način da se izmjeri kalup po širini i dužini na deset mjesta i uzme se srednja vrijednost. Isti postupak se primjenjuje i na uzorak, te se rezultati koriste za izračunavanje koeficijenta linearnog stezanja. Slika 19. prikazuje uzorak u kalupu nakon sušenja.

**Slika 19. Uzorak u kalupu nakon sušenja**

U Tablica 12. prikazani su rezultati mjerenja dimenzija kalupa i uzorka.

Tablica 12. Rezultati mjerenja kalupa i uzorka

Dužina		Širina	
Kalup	Uzorak	Kalup	Uzorak
140,4	136,2	45,3	43,5
140,4	136,5	45,4	44,1
140,5	136,4	45,3	43,5
140,9	136,5	45,3	43,2
140,7	136,4	45,5	43,3
140,7	135,9	45,2	43,5
140,8	136,0	45,4	43,3
140,6	136,3	45,0	43,4
140,5	136,3	45,3	43,7
140,5	136,4	45,4	43,5
$\bar{x}_{KD} = 140,6$	$\bar{x}_{UD} = 136,29$	$\bar{x}_{K\check{S}} = 45,31$	$\bar{x}_{U\check{S}} = 43,5$
$\sigma_{\bar{x}} = 0,17$	$\sigma_{\bar{x}} = 0,20$	$\sigma_{\bar{x}} = 0,14$	$\sigma_{\bar{x}} = 0,25$

Koeficijent linearnog stezanja kompozita izračunava se prema jednadžbi (4):

$$S_L = \frac{\bar{x}_K - \bar{x}_U}{\bar{x}_K} \cdot 100, \% \quad (4)$$

gdje su:

S_L [%] – koeficijent linearnog stezanja

\bar{x}_K [mm] – aritmetička sredina izmjera kalupa

\bar{x}_U [mm] – aritmetička sredina izmjera uzorka.

Stoga je koeficijent srednjeg linearnog stezanja po dužini:

$$S_{LD} = \frac{\bar{x}_{KD} - \bar{x}_{UD}}{\bar{x}_{KD}} \cdot 100 = \frac{140,6 - 136,29}{140,6} \cdot 100 = 3,0654 \% \approx 3,1 \% \quad (5)$$

Intervalna procjena linearnog stezanja po dužini kompozitnog materijala iskazana u postocima, a uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ je:

$$2,92 \% < \mu_{S,LD} < 3,43 \% \quad (6)$$

Koeficijent srednjeg linearnog stezanje po širini je:

$$S_{L\dot{s}} = \frac{\bar{x}_{K\dot{s}} - \bar{x}_{U\dot{s}}}{\bar{x}_{K\dot{s}}} \cdot 100 = \frac{45,31 - 43,5}{45,31} \cdot 100 = 3,995 \% \approx 4 \% \quad (7)$$

Intervalna procjena linearnog stezanja po širini kompozitnog materijala iskazana u postocima, a uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ je:

$$3,56 \% < \mu_{S,L\dot{s}} < 4,43 \% \quad (8)$$

5.2. Oprema za ispitivanje

Za potrebe ispitivanja predviđenih u ovom diplomskom radu korištena je oprema u Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale te oprema u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Zavoda za tehničku mehaniku, oba na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kraljici (Slika 20.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: VEB Thüringer Industrierwerk

Vrsta: 2131

Nazivna sila: 0 – 2400 N

Razred točnosti: 1. klasa

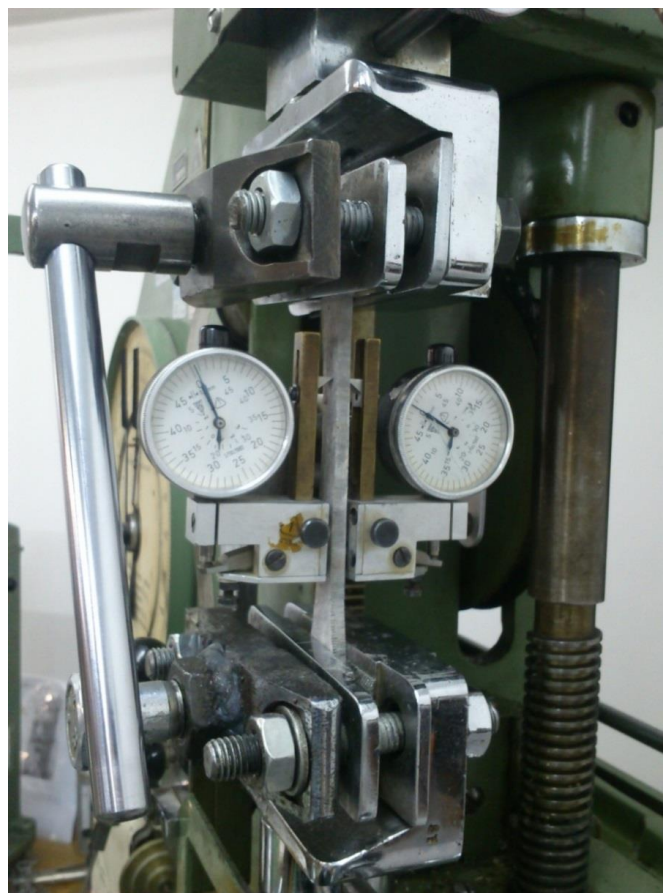


Slika 20. Kidalica VEB Thüringer Industriewerk

Za mjerenje produljenja tijela epruvete korišten je ekstenziometar (Slika 21.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Bernhard Holle

Razred točnosti: klasa 1



Slika 21. Ekstenziometar Bernhard Holle

Za utvrđivanje tlačne čvrstoće korištena je univerzalna kidalica (Slika 22.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Messphysik

Vrsta: Beta 50-5

Nazivna sila: 6,3 kN

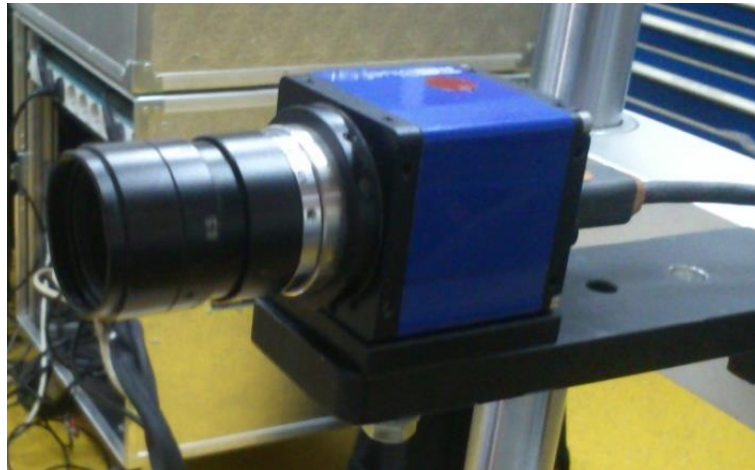


Slika 22. Kidalica Messphysik Beta 50-5

Za praćenje pomaka prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće korišten je video ekstenziometar (Slika 23.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Messphysik

Tip: ME46-450



Slika 23. Video ekstenziometar Messphysik ME46-450

Ispitivanje žilavosti provedeno je na Charpyjevom bat (Slika 24.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Karl Frank

Nazivna vrijednost: 4 J (40 kpcm)

Proizvodni broj: 81

Godina proizvodnje: 1968.



Slika 24. Charpyjev bat Karl Frank

Tvrdoća je ispitana metodom Shore A na tvrdomjeru (Slika 25.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Zwick

Tip: 7201

Serijski broj: 45835



Slika 25. Shore A-tvrdomjer Zwick

Toplinska vodljivost izmjerena je prijenosnim analizatorom toplinskih svojstva (Slika 26.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: Decagon Devices

Vrsta: KD2 Pro



Slika 26. Prijenosni analizator toplinskih svojstva KD2 Pro

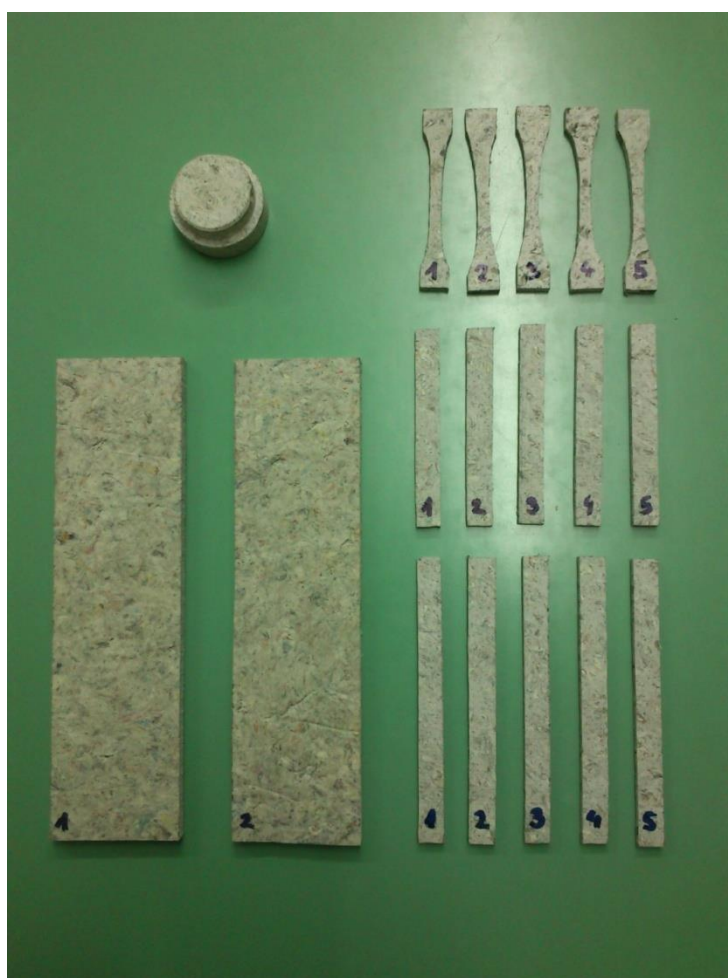
Ispitivanje gorivosti i samogasivosti provedeno je korištenjem Bunsenovog plamenika i čeličnog držača uzorka izrađenog prema normi, Slika 27.



Slika 27. Oprema za ispitivanje gorivosti i samogasivosti

5.3. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstva

Kako bi se utvrdila pojedina mehanička svojstva kompozitnog materijala pripremljene su epruvete za svako ispitivanje (Slika 28.). Cilindričan uzorak istokaren je iz punog komada materijala te će se na njemu provesti ispitivanje tvrdoće, dok su preostale epruvete izrezane prema važećim normama iz ploče debljine 4 mm.



Slika 28. Epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstva

5.3.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Zbog ograničene količine dostupnog kompozitnog materijala, statičko vlačno ispitivanje provedeno je na 5 malih epruveta tipa 1BA, prema normi ISO 527-1, čije su dimenzije ranije navedene u Tablici 4. Brzina ispitivanja je bila 7 mm/min. Dobiveni rezultati su prikazani u Tablici 13. Omjer maksimalne sile i početne površine poprečnog presjeka predstavlja vlačnu čvrstoću.

Tablica 13. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja malih epruveta

Epruveta	Širina uskog dijela, b_1 [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Površina poprečnog presjeka, A [mm ²]	Maksimalna sila, F_{max} [N]	Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl}$ [MPa]
1	5,10	4,18	21,318	54	2,53
2	5,10	4,33	22,083	66	2,99
3	5,10	4,34	22,134	104	4,70
4	4,74	4,32	20,477	58	2,83
5	4,74	4,28	20,287	86	4,24
\bar{x}	4,96	4,29	21,26	73,600	3,45
$\sigma_{\bar{x}}$	0,20	0,07	0,87	21,0	0,95

Zbog ograničenja mjerne opreme, točnije nemogućnosti postavljanja ekstenziometra na tijelo male epruvete, nije bilo moguće odrediti vlačni modul elastičnosti kompozitnog materijala, stoga su izrezane još dvije dodatne normalne epruvete, također prema normi ISO 527-2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja dodatnih normalnih epruveta prikazani su u Tablici 14:

Tablica 14. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja normalnih epruveta

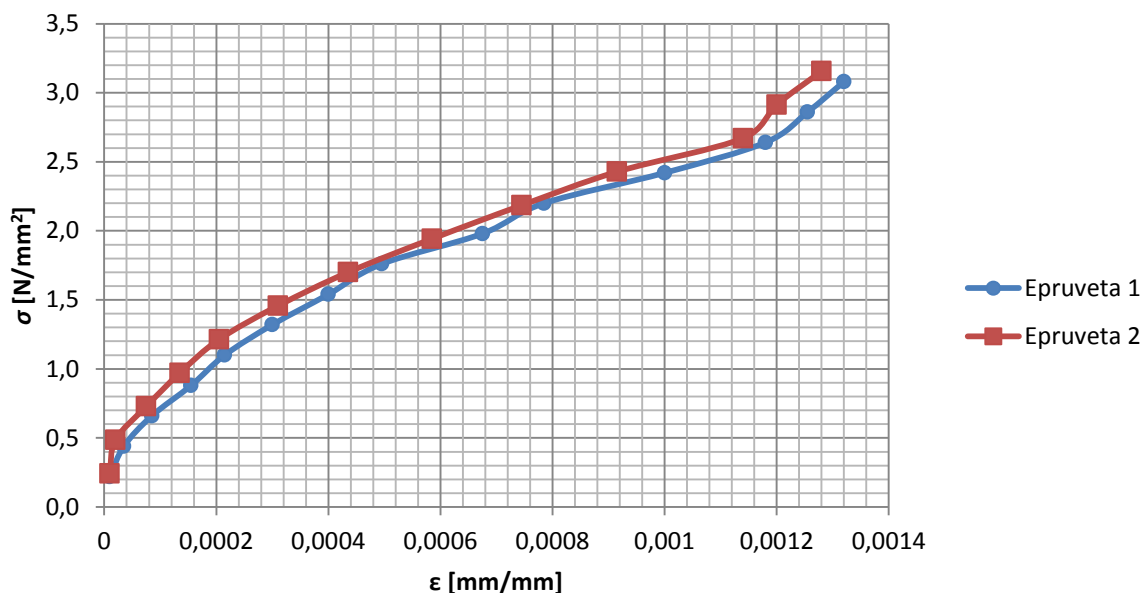
Epruveta	Širina uskog dijela, b_1 [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Površina poprečnog presjeka, A [mm ²]	Maksimalna sila, F_{max} [N]	Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl}$ [MPa]
1	10,72	4,24	45,453	146	3,21
2	9,9	4,16	41,184	138	3,35

Iz iznosa vlačne čvrstoće, $R_{m,vl}$ određene na malim i normalnim epruvetama vidljivo je da obje vrste epruveta imaju gotovo isto izračunato maksimalno naprezanje. Da između ta dva uzorka vlačne čvrstoće kompozitnog materijala nema statistički značajne razlike potvrdio je i F -test putem metode analize varijance ($F_{rač} = 0,062 < F_{tab} = 6,61$; $p = 0,814$).

Za spomenutih 7 ispitivanja vlačne čvrstoće na različitim standardnim epruvetama izrađene od istog kompozitnog materijala određena je intervalna procjena vlačne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm, vl}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$:

$$2,7 \text{ MPa} < \mu_{Rm, vl} < 4,1 \text{ MPa} \quad (9)$$

Na raspoloživim dvama normalnim uzorcima za vlačno ispitivanje određen je vlačni modul elastičnosti na temelju dijagrama „naprezanje – deformacija“ ili kraće „ $\sigma - \varepsilon$ “. Deformacija, ε se u slučaju vlačnog ispitivanja naziva i istežanje, Slika 29.



Slika 29. Dijagram „naprezanje – istežanje“ kompozitnog materijala

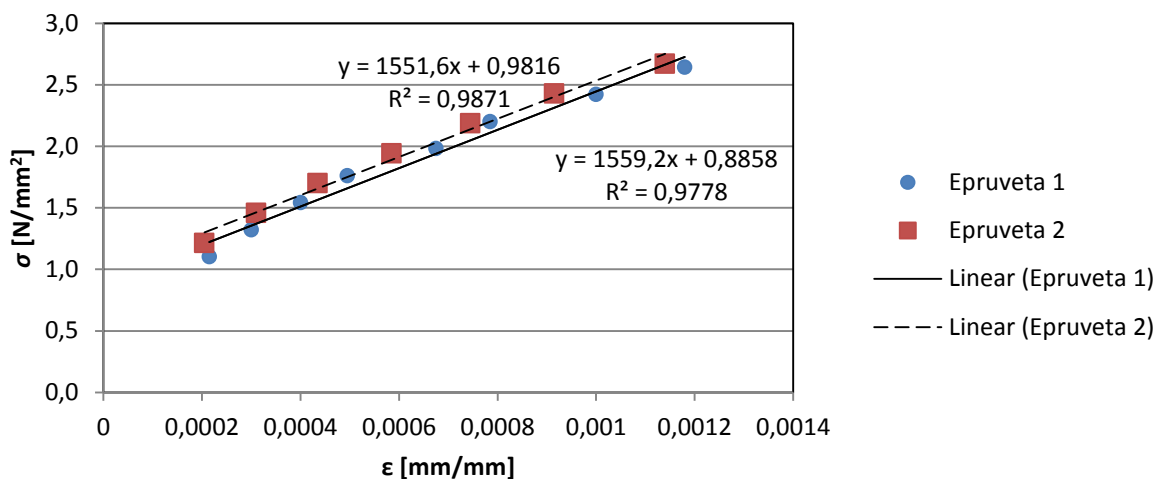
Vlačni modul elastičnosti, E_{vl} određuje se na način da se odbace početni, nelinearni i završni, nelinearni dio krivulje iz dijagrama „ $\sigma - \varepsilon$ “, te se središnji, približno linearni dio krivulje aproksimira pravcem. Jednadžba aproksimacijskog pravca određuje modul elastičnosti, jer je po Hookeovom zakonu:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (10)$$

Primjenom ove metode određene su dvije vrijednosti vlačnog modula elastičnosti kompozitnog materijala: 1552 i 1559 MPa. Za te je vrijednosti intervalna procjena vlačnog modula elastičnosti, uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$:

$$1511 \text{ MPa} < \mu_{Evl} < 1600 \text{ MPa} \quad (11)$$

Svakako, s obzirom na mali broj uzoraka, ispitivanje bi trebalo ponoviti na dodatnim uzorcima. Dodatni normalni uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće iz istog materijala bi se mogli naknadno izrezati iz uzoraka koji su ostali velikim dijelom neoštećeni nakon ispitivanja zapaljivosti i samogasivosti, što je prikazano u poglavlju 5.5. i vidljivo na Slika 43.



Slika 30. Linearni dio dijagrama „naprežanje – istezanje“ kompozitnog materijala

5.3.2. Rezultati statičkog tlačnog ispitivanja

Za ispitivanje statičke tlačne čvrstoće prvotno su pripremljene tanke epruvete prema normi ASTM D695. Međutim, pokazalo se da nije moguće odrediti iznos maksimalne tlačne čvrstoće, a time i tlačnog elastičnog modula, uslijed intenzivnog izvijanja epruvete (Slika 31.) što može biti posljedica velike elastičnosti kompozitnog materijala. Kako bi ipak bilo moguće odrediti i statičku tlačnu čvrstoću i tlačni modul elastičnosti pripremljene su normalne epruvete cilindričnog poprečnog presjeka (Slika 32).



Slika 31. Ispitivanje statičke tlačne čvrstoće na tankoj epruveti



Slika 32. Normalne epruvete za ispitivanje tlačne čvrstoće prema normi ASTM D695

Ispitivanje je provedeno na 5 normalnih epruveta pripremljenih prema normi ASTM D695, uz brzinu ispitivanja je 1,3 mm/min. Rezultati su prikazani u Tablica 15.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja statičke tlačne čvrstoće

Epruveta	Promjer epruvete, d [mm]	Visina epruvete, h_t [mm]	Tlačna čvrstoća $R_{m,t}$ [MPa]	Napomena
1	12,7	25,4	47,49	
2	12,7	25,4	31,90	
3	12,7	25,4	17,41	Odbačeni rezultati
4	12,7	25,4	27,26	
5	12,7	25,4	23,29	
\bar{x}	12,7	25,4	32,49	
$\sigma_{\bar{x}}$	-	-	10,6	

Iznosi tlačne čvrstoće, $R_{m,tl}$ određeni su direktno tijekom ispitivanja na univerzalnoj kidalici. Za dobivene je vrijednosti intervalna procjena tlačne čvrstoće, uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$:

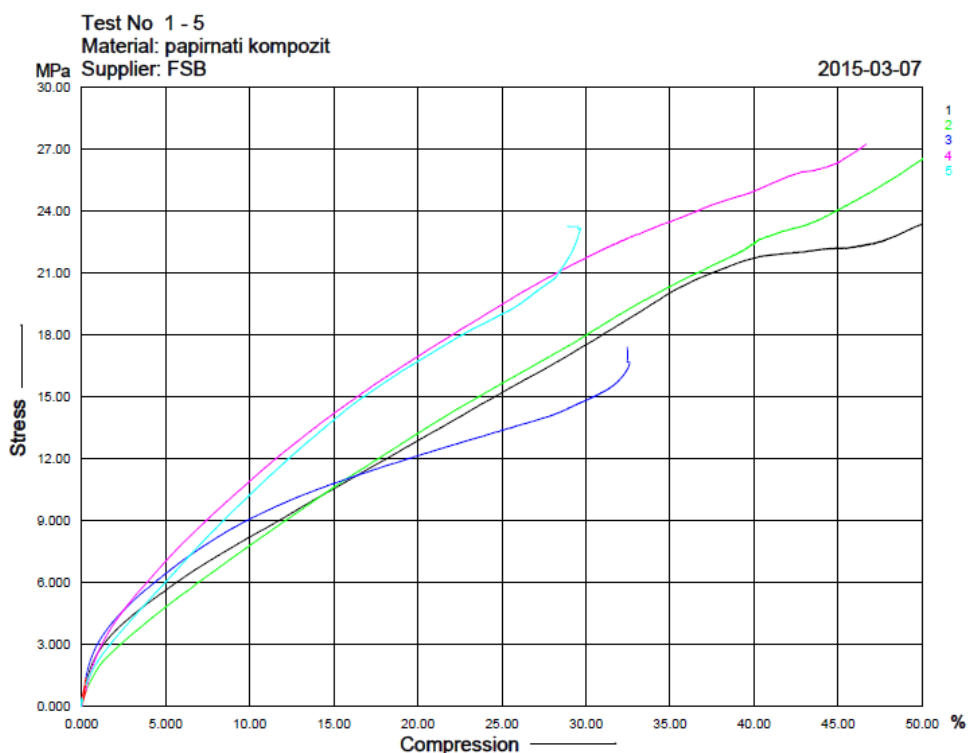
$$15,6 \text{ MPa} < \mu_{R_{m,tl}} < 49,4 \text{ MPa} \quad (12)$$

Prilikom statičkog tlačnog pokusa na epruvetu se stavljaju indikatori (Slika 33.), čiji pomak prati video ekstenziometar. Prilikom ispitivanja epruvete br. 3 došlo je do zakretanja indikatora što je poremetilo proces mjerenja stoga su rezultati ispitivanja epruvete br. 3 odbačeni.



Slika 33. Umetnuti indikatori za mjerenje pomaka tijekom ispitivanja

Slika 34. prikazuje sve krivulje „naprezanje – deformacija“, točnije „naprezanje – sabijanje“ snimane tijekom ispitivanja, te se jasno vidi da je pri ispitivanju tlačne čvrstoće epruvete br. 3 došlo do pogreške, tj. već pri otprilike 32 % sabijanja ekstenziometar je prestao mjeriti pomak. Također je vidljivo da je zakretanje indikatora počelo na oko 15 % sabijanja.



Slika 34. Dijagram „naprezanje – sabijanje“

Tlačni modul elastičnosti također je određen tijekom ispitivanja i prikazan je u Tablica 16.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja tlačnog modula elastičnosti

Epruveta	Promjer epruvete, d [mm]	Visina epruvete, h_t [mm]	Tlačni modul elastičnosti, E_{el} [MPa]	Napomena
1	12,7	25,4	407	
2	12,7	25,4	246	
3	12,7	25,4	515	Odbačeni rezultati
4	12,7	25,4	315	
5	12,7	25,4	271	
\bar{x}	12,7	25,4	301	
$\sigma_{\bar{x}}$	-	-	70,8	

Veliko rasipanje rezultata mjerenja tlačnog modula elastičnosti posljedično je vidljivo i kod intervalne procjene tlačnog modula elastičnosti kompozitnog materijala, uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$:

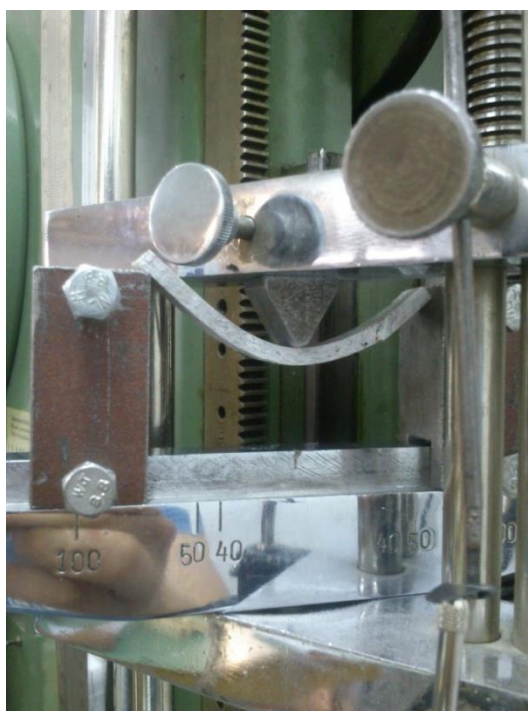
$$197 \text{ MPa} < \mu_{Etl} < 422 \text{ MPa} \quad (13)$$

Važno je primijetiti i da tijekom ispitivanja tlačne čvrstoće pri dosezanju maksimalne tlačne sile ne dolazi do krhkog loma, nego samo do sabijanja.

5.3.3. Rezultati ispitivanja savijanja i žilavosti

Savojno ispitivanje nije bilo moguće provesti ni prema jednoj dostupnoj normi jer nije dolazilo do loma epruveta, već samo do deformacije. Također, primijećeno je da je bilo riječ samo o elastičnoj deformaciji materijala jer su se epruvete nakon rasterećenja, otprilike nakon jedne minute od rasterećenja i odlaganja na stol, vraćale u prvobitan položaj. Slika 35. prikazuje pokušaj savojnog ispitivanja na univerzalnoj kidalici, gdje se jasno vidi ispadanje epruvete iz desnog oslonca prije dosezanja maksimalne sile F_{max} .

Stoga je, s obzirom da su uzorci za savojno ispitivanje po normi istih dimenzija kao i za ispitivanje žilavosti prema normi ISO 179, obavljeno je to ispitivanje iako nije bilo predviđeno diplomskim zadatkom.



Slika 35. Ispitivanje savojne čvrstoće

Rezultati ispitivanja žilavosti, odnosno Charpyjevog udarnog rada loma prikazani su u Tablica 17. S obzirom na starost mjernog uređaja, mjerna skala je u starim jedincima kpcm. Dijeljenjem očitanih vrijednosti s konstantom Zemljine gravitacije dobivaju se vrijednosti udarnog rada loma u Nm, odnosno u skladu s važećim Međunarodnim sustavom jedinica SI. Norma ISO 179 nadalje propisuje izračun i iskazivanje udarnog rada loma po jedinici površine poprečnog presjeka epruvete, a_{cU} [kJ/m²].

Tablica 17. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Epruveta	Širina epruvete, b [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Energija apsorbirana uslijed loma, [kpcm]	Energija apsorbirana uslijed loma [Nm]	Udarni rad loma, a_{cU} [kJ/m ²]
1	9,80	4,20	1,1	0,108	26,725
2	10,70	4,22	0,8	0,078	17,717
3	9,90	4,30	0,8	0,078	18,793
4	10,40	4,37	0,82	0,080	18,043
5	10,14	4,36	0,85	0,083	19,226
\bar{x}	10,19	4,29	0,88	0,086	20,1
$\sigma_{\bar{x}}$	0,37	0,08	0,13	0,013	3,75

Intervalna procjena udarnog rada loma kompozitnog materijala, uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ je:

$$15,4 \text{ kJ/m}^2 < \mu_{AcU} < 24,8 \text{ kJ/m}^2 \quad (14)$$

5.3.4. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je na Shore A tvrdomjeru prema normi DIN ISO 7619. S obzirom da navedena norma propisuje minimalnu debljinu uzorka 6 mm, tvrdoća po Shoreu nije mogla biti izmjerena na ostacima uzoraka na kojima su ispitivana do sada opisana mehanička svojstva jer je njihova debljina samo 4 mm. Stoga je za mjerenje tvrdoće poslužio uzorak pripremljen za ispitivanje toplinskih svojstava, kao što se vidi na Slika 36. Provedeno je deset mjerenja i rezultati su prikazani u Tablica 18.



Slika 36. Ispitivanje tvrdoće na Shore A tvrdomjeru Zwick

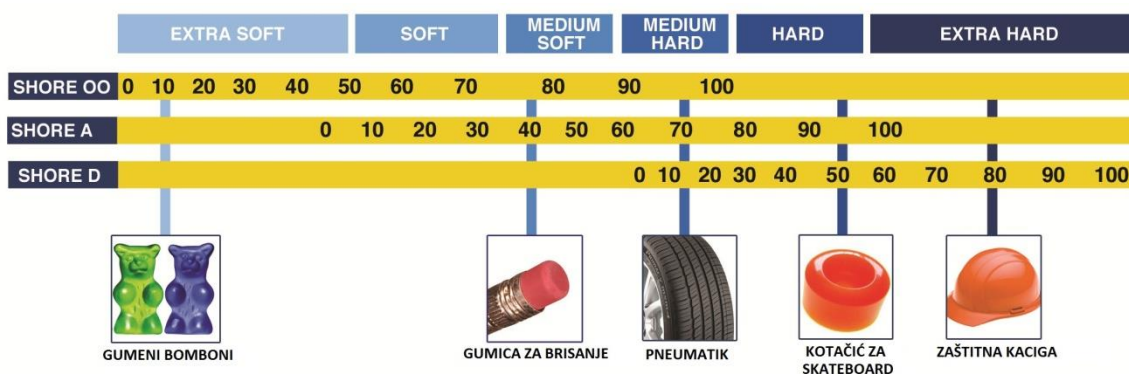
Tablica 18. Iznosi izmjerene tvrdoće po Shoreu A

Mjerenje	Iznos tvrdoće
1	91
2	89
3	91
4	92
5	92
6	90
7	93
8	91
9	89
10	91
\bar{x}	91
$\sigma_{\bar{x}}$	1,3

Intervalna procjena tvrdoće po shoreu A, uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ iznosi:

$$90,0 < \mu_{ShoreA} < 91,8 \quad (15)$$

Slika 37. prikazuje tvrdoće po Shoreu nekoliko poznatih proizvoda. Vidljivo je da je tvrdoća ispitivanog kompozitnog materijala od otpadnog papira visoka gotovo kao tvrdoća kotačića za skejtbord.



Slika 37. Shore tvrdoće nekoliko poznatih proizvoda [18]

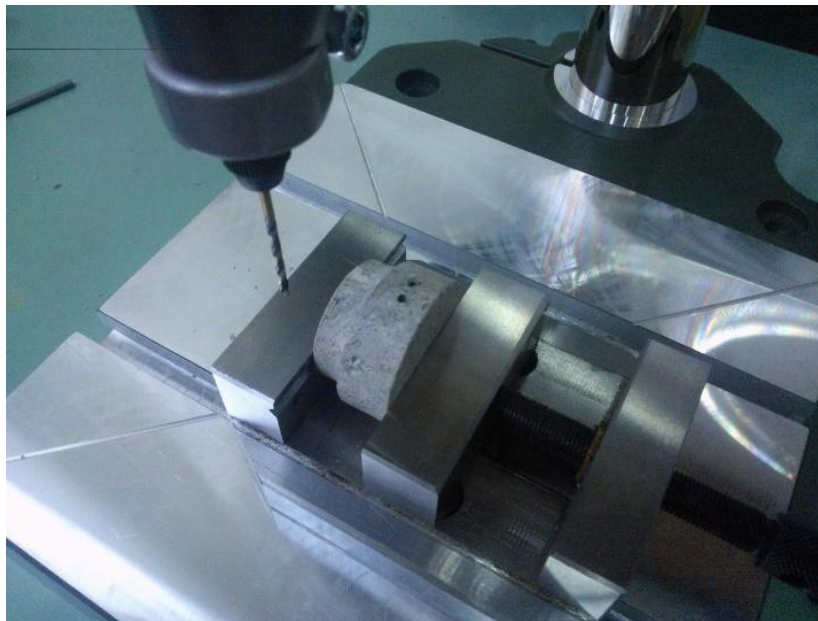
5.4. Rezultati ispitivanja toplinskih svojstva

Ispitivanje toplinskih svojstva kompozitnog materijala od otpadnog papira provedeno je na prijenosnom analizatoru toplinskih svojstva KD2 Pro. Priprema i ispitivanje uzorka prikazani su na Slika 38., Slika 39. i Slika 40. Rupe za umetanje senzora bušene su svrdlom promjera 1,3 mm. Dobivene vrijednosti mjerenja prikazane su u Tablica 19.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja toplinskih svojstva

Mjerenje	Toplinska vodljivost, λ [W/(m·K)]	Specifični volumni toplinski kapacitet, c_v , [MJ/m ³ K]	Specifični toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Pogreška mjerenja	Temperatura okoliša u vrijeme ispitivanja [°C]
1	0,423	2,555	1,587	0,0005	26,16
2	0,417	2,550	1,584	0,0004	25,78
3	0,416	2,551	1,584	0,0004	25,41
4	0,418	2,556	1,588	0,0004	25,16
5	0,419	2,562	1,591	0,0005	24,91
6	0,417	2,555	1,587	0,0004	25,03
7	0,415	2,555	1,587	0,0004	25,53
8	0,418	2,569	1,596	0,0004	25,90
9	0,418	2,571	1,597	0,0004	26,11
10	0,418	2,573	1,598	0,0004	26,34
11	0,417	2,574	1,599	0,0004	26,46
\bar{x}	0,418		1,594	-	-
$\sigma_{\bar{x}}$	0,002		0,006	-	-

Za izračun specifičnog toplinskog kapaciteta, c , korišten je specifični volumni toplinski kapacitet, c_v , kako je to opisano u poglavlju 4.2. Za to je bio potreban podatak o gustoći kompozitnog materijala, koja na temelju izmjerene geometrije uzorka i mase iznosi 1,61 g/cm³.



Slika 38. Bušenje rupa za umetanje senzora analizatora toplinskih svojstva



Slika 39. Umetanje senzora za mjerenje toplinskih svojstva u uzorak



Slika 40. Proces mjerenja toplinskih svojstava

Za navednih 11 mjerenja toplinske vodljivosti, λ i specifičnog toplinskog kapaciteta, c kompozitnog materijala od otpadnog papira iz Tablica 19. određene su intervalne procjene toplinske vodljivosti, μ_λ i specifičnog toplinskog kapaciteta, μ_c uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$.

$$0,416 \text{ W/mK} < \mu_\lambda < 0,419 \text{ W/mK} \quad (16)$$

$$1,59 \text{ kJ/kgK} < \mu_c < 1,60 \text{ kJ/kgK} \quad (17)$$

5.5. Rezultati ispitivanja gorivosti i samogasivosti

Ispitivanje gorivosti i samogasivosti provedeno je sukladno normi DIN 53 438 i utvrđeno je sljedeće:

- ispitivanje je provedeno na dvije epruvete,
- tijekom ispitivanja epruvete se nisu zapalile,
- epruvete su se nakon uklanjanja plamena trenutno ugasile, te plamen nije dosegao normom propisanu gornju oznaku,
- dim se pojavio u maloj količini i to u trenutku samogašenja epruvete,
- obje epruvete su se identično ponašale tijekom ispitivanja,

iz čega je zaključeno da kompozit ima klasu:

K1 – samogasiv (nije dosegnuta mjerna oznaka).

Slika 41., Slika 42. i Slika 43. prikazuju epruvetu prije, tijekom i nakon ispitivanja.



Slika 41. Epruvete prije ispitivanja gorivosti i samogasivosti



Slika 42. Epruveta tijekom ispitivanja gorivosti i samogasivosti



Slika 43. Epruveta nakon ispitivanja gorivosti i samogasivosti

6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Nakon što su obavljena sva predviđena ispitivanja, dobiveni su rezultati sažeti u Tablica 20.

Podaci su klasificirani u tri glavne skupine:

- fizikalna svojstva kompozitnog materijala – svojstva koja spadaju u ovu grupu u ovom slučaju su gustoća ρ , koeficijent linearnog stezanja S_L te kategorija zapaljivosti i samogasivosti,
- mehanička svojstva kompozitnog materijala – ispitivana mehanička svojstva su vlačna čvrstoća $R_{m,vl}$, vlačni modul elastičnosti E_{vl} , tlačna čvrstoća $R_{m,tl}$, tlačni modul elastičnosti E_{tl} , udarni rad loma, a_{cU} i tvrdoća po Shoreu A,
- toplinska svojstva kompozitnog materijala –toplinska vodljivost, λ i specifični toplinski kapacitet, c .

Tablica 20. Svojstva kompozitnog materijala

	Intervalna procjena, μ	Iznos	Norma za ispitivanje
Fizikalna svojstva			
Gustoća	1,61	g/cm ³	-
Koeficijent linearnog stezanja, dužinski	2,92 % < μ < 3,43 %	%	-
Koeficijent linearnog stezanja, širinski	3,56 % < μ < 4,43 %	%	-
Gorivost i samogasivost	K1 - samogasiv	-	DIN 53 438
Mehanička svojstva			
Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl}$	2,7 < μ < 4,1	MPa	ISO 527-2
Tlačna čvrstoća, $R_{m,tl}$	15,6 < μ < 49,4	MPa	ASTM D695
Vlačni modul elastičnosti, E_{vl}	1511 < μ < 1600	MPa	ISO 527-2
Tlačni modul elastičnosti, E_{tl}	197 < μ < 422	MPa	ASTM D695
Udarni rad loma, a_{cU}	15,4 < μ < 24,8	kJ/m ²	ISO 179
Tvrdoća Shore A	90,0 < μ < 91,8	-	DIN ISO 7619
Toplinska svojstva			
Toplinska vodljivost, λ	0,416 < μ < 0,419	W/mK	-
Specifični toplinski kapacitet, c	1,59 < μ < 1,60	kJ/kgK	-

7. ZAKLJUČAK

Otpadni papir pokazao se kao vrlo vrijedna i dostupna sirovina za izradu kompozitnih materijala. Jednostavno ga je prikupiti, a u slučajevima kada ga nije moguće upotrijebiti za izradu recikliranog papira, može se upotrijebiti kao ojačalo u kompozitu s polimernom matricom.

Rezultati ispitivanja pokazali su da ovaj materijal ima nisku gustoću, da ga odlikuju visoka tlačna čvrstoća i tlačni modul elastičnosti uz dobru žilavost, te najviša klasa samogasivosti. Tijekom ispitivanja tlačne čvrstoće primijećeno je da pri doseganju maksimalne sile ne dolazi do krhkog loma, već samo sabijanja. Također, nemogućnost određivanja savojne čvrstoće zbog velike elastičnosti govori da je materijal pogodan za izradu zakrivljenih površina jer uslijed savijanja ne dolazi do loma. Tvrdoća razine tvrdoće kotačića za skejtbord pokazuje potencijalnu dobru otpornost na trošenje. Niska toplinska vodljivost kompozitni materijal svrstava u grupu izolatora, što je još jedna od prednosti. S druge strane, nizak vlačni modul elastičnosti je najslabiji polimernim materijalima, stoga ovaj kompozitni materijal nije pogodan za nosive dijelove, niti zbog niske vlačne čvrstoće smije biti izložen visokom vlačnom naprezanju.

Potencijalna primjena ovakvog kompozitnog materijala u obliku ploča moguća je u građevinskoj industriji kao unutarnja zidna obloga. Za takve bi namjene trebalo još dodatno ispitati apsorpciju vode, poroznost i otpornost na mikroorganizme.

LITERATURA

- [1] Filetin, T.: Interna predavanja iz kolegija Recikliranje materijala, Zagreb 2013.
- [2] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb 2011.
- [3] Sangrutsamee, V., Srichandr, P., Poolthong, N., Re-Pulped Waste Paper-Based Composite Building Materials with Low Thermal Conductivity, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 11 (2012) No. 1 p. 147-151
- [4] Kosić, T.: Osnove grafičkih materijala i tiskarskih tehnika, Zagreb, 2008.
- [5] poly(vinyl acetate) information and properties,
<http://www.polymerprocessing.com/polymers/PVAc.html> zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [6] Polyvinyl acetate - Wikipedia, the free encyclopedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_acetate zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [7] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Zagreb 2005.
- [8] Charpy Testing _ Mechanical Testing _ Atrona Test Labs, <http://atrona.com/charpy-testing.html> zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [9] Shore-Härte [German RepRap Wiki],
http://wiki.germanreprap.com/materialien/shore_haerte zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [10] Kulušić, P.: Mehanika i toplina, Zagreb 1990.
- [11] Toplinska vodljivost – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_vodljivost zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [12] Halasz, B., Galović, A., Boras, I.: Toplinske tablice, Zagreb 2008.
- [13] Toplinski kapacitet – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski_kapacitet zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [14] Volumetric heat capacity - Wikipedia, the free encyclopedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/Volumetric_heat_capacity zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [15] Combustibility - Wikipedia, the free encyclopedia,
<https://en.wikipedia.org/wiki/Combustibility> zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [16] Inženjerska statistika: Osnove teorije uzoraka,
https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2012_15718_Osnove_teorije_uzoraka_2011.pdf zadnje posjećeno 2.7.2015.
- [17] CHROMOS d.d. __ Ljepila, http://www.chromos.hr/old/Eurostik_Klasik.htm, zadnje posjećeno 2.7.2015.

- [18] Mold Making_ Mold Rubber Hardness, <http://blog.polytek.com/2013/10/28/mold-making-mold-rubber-hardness/> zadnje posjećeno 2.7.2015.

PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Korištene norme
- III. Slike epruveta prije i nakon ispitivanja

II. Korištene norme

ISO 527-2 – ispitivanje vlačne čvrstoće polimera i polimernih kompozita

ASTM D695 – ispitivanje tlačne čvrstoće

ISO 179 – ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom

DIN ISO 7619 – ispitivanje tvrdoće po shoreu

DIN 53 438 – ispitivanje gorivosti i samogasivosti

III. Slike epruveta prije i nakon ispitivanja

Statičko vlačno ispitivanje

Male epruvete prije i nakon ispitivanja:



Normalne epruvete prije i nakon ispitivanja:



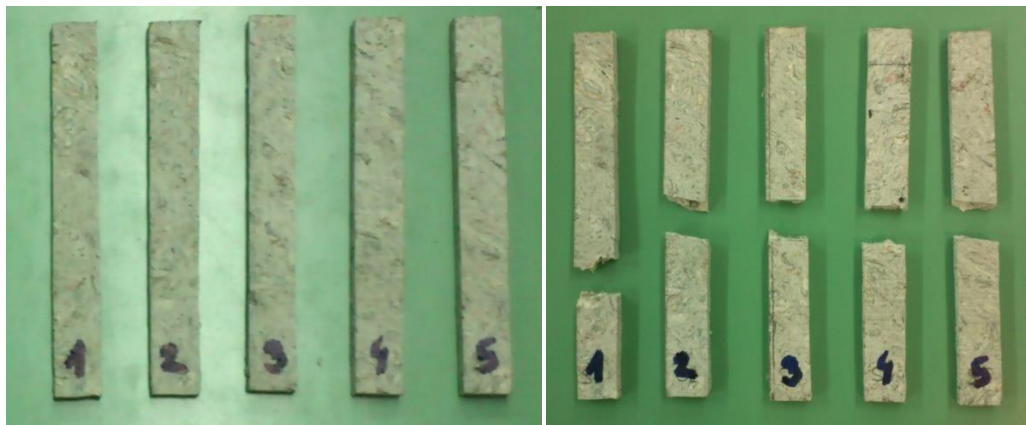
Statičko tlačno ispitivanje

Normalne epruvete prije i nakon ispitivanja:



Ispitivanje žilavosti

Normalne epruvete prije i nakon ispitivanja:



Ispitivanje gorivosti i samogasivosti

Epruvete prije i nakon ispitivanja:

