

# Fotodegradacija biorazgradivog polimera PLA

---

**Pavlica, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:076740>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Nikola Pavlica**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Nikola Pavlica

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Ireni Žmak koja je sa svojim stručnim savjetima oblikovala ideju i pomogla mi u izradi ovog završnog rada.

Također zahvaljujem tehničkom suradniku Vesni Đurđi na velikoj pomoći oko eksperimentalnog dijela rada.

Konačno, zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na nesebičnom razumijevanju i podršci tijekom cijelog studiranja, kao i pri izradi ovog završnog rada.

Nikola Pavlica



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne 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:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Pavlica** Mat. br.: 0035180022

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Fotodegradacija biorazgradivog polimera PLA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Photodegradation of the biodegradable polymer PLA**

Opis zadatka:

Polilaktička kiselina, PLA je alifatski poliester otkriven 1932. godine. Početkom 1960-ih počelo je istraživanje primjene ovog materijala kao biorazgradivog polimernog materijala za medicinske svrhe. Dobiva se iz obnovljivih izvora, kao što su šećer, šećerna repa, melasa ili iz kukuruznog, pšeničnog ili rižinog škroba.

Osim u medicini, PLA se primjenjuje za izradu biorazgradivih pakiranja i pribora za jednokratnu upotrebu, kao što su pakiranja hrane, polimerne vrećice, posude za kontejnerski uzgoj presadnica u zaštićenim prostorima, pelene, bočice, jednokratne čaše za hladna pića, folije i filmovi.

U ovom je završnom zadatku potrebno pažljivo proučiti rad s uređajem točkastog izvora ultraljubičastog zračenja Hamamatsu LC8, kao i potrebne mjere zaštite na radu, kojih se student obavezno valja pridržavati tijekom ispitivanja.

Pomoću uređaja će se degradirati ultraljubičastim zračenjem uzorci izrađeni od nepunjenog PLA hrvatskog proizvođača. Postojanost biorazgradivog polimera PLA na ultraljubičasto zračenje u laboratorijskim uvjetima će se zatim ocijeniti na temelju izmjerenih vrijednosti tvrdoće, savojne čvrstoće i udarnog rada loma na degradiranim normiranim ispitnim tijelima.

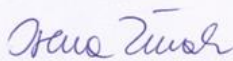
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.


Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. POLIMERNI MATERIJALI.....	3
3. FOTODEGRADACIJA MATERIJALA.....	4
3.1. Podjela ultraljubičastog zračenja .....	6
3.2. Izvori ultraljubičastog zračenja.....	7
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	9
4.1. Priprema ispitnog uzorka za daljnja ispitivanja .....	9
4.2. Izlaganje uzorka ultraljubičastom zračenju.....	9
4.2.1. Mjere zaštite na radu .....	11
4.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava .....	12
4.3.1. Udarni rad loma .....	12
4.3.2. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti.....	16
4.3.3. Tvrdoća .....	27
5. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	35
PRILOZI.....	36

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Polimerizacija polilaktičke kiseline iz cikličkog dimera [1] .....	1
Slika 2.	Uređaj točkastog izvora ultraljubičastog zračenja Hamamatsu LC8 .....	9
Slika 3.	Usporedba spektralnog ozračivanja svjetla ksenonske svjetiljke i Sunčeva svjetla na Zemljinoj površini [11].....	11
Slika 4.	Epruveta za ispitivanje žilavosti [12] .....	13
Slika 5.	Charpyjev bat .....	13
Slika 6.	Epruvete nakon ispitivanja žilavosti.....	15
Slika 7.	Shema ispitivanja savojne čvrstoće [13] .....	16
Slika 8.	Ispitivanje savojne čvrstoće na univerzalnoj kidalici.....	17
Slika 9.	Ovisnost sila-progib 1. epruvete.....	19
Slika 10.	Ovisnost sila-progib 2. epruvete.....	20
Slika 11.	Ovisnost sila-progib 3. epruvete.....	21
Slika 12.	Ovisnost sila-progib 4. epruvete.....	22
Slika 13.	Ovisnost sila-progib 5. epruvete.....	23
Slika 14.	Ovisnost sila-progib 6. epruvete.....	24
Slika 15.	Ovisnost sila-progib 7. epruvete.....	25
Slika 16.	Ispitivanje tvrdoće na tvrdomjeru.....	27

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podjela ultraljubičastog zračenja prema standardu ISO-21348 .....	6
Tablica 2. Rezultati mjerenja i izračunate vrijednosti žilavosti .....	14
Tablica 3. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 1. epruvete .....	19
Tablica 4. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 2. epruvete .....	20
Tablica 5. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 3. epruvete .....	21
Tablica 6. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 4. epruvete .....	22
Tablica 7. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 5. epruvete .....	23
Tablica 8. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 6. epruvete .....	24
Tablica 9. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 7. epruvete .....	25
Tablica 10. Rezultati mjerenja i izračunate vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti .....	26
Tablica 11. Dubina prodiranja uzorka 1 .....	28
Tablica 12. Dubina prodiranja uzorka 2 .....	28
Tablica 13. Dubina prodiranja uzorka 3 .....	29
Tablica 14. Dubina prodiranja uzorka 4 .....	29
Tablica 15. Dubina prodiranja uzorka 5 .....	29
Tablica 16. Dubina prodiranja uzorka 6 .....	30
Tablica 17. Dubina prodiranja uzorka 7 .....	30
Tablica 18. Tvrdća uzorka 1 .....	31
Tablica 19. Tvrdća uzorka 2 .....	31
Tablica 20. Tvrdća uzorka 3 .....	31
Tablica 21. Tvrdća uzorka 4 .....	32
Tablica 22. Tvrdća uzorka 5 .....	32
Tablica 23. Tvrdća uzorka 6 .....	32
Tablica 24. Tvrdća uzorka 7 .....	33
Tablica 25. Srednje vrijednosti tvrdoća .....	33



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_{cu}$	$\text{kJ/m}^2$	udarna žilavost
$E_c$	J	energija loma
$h$	mm	debljina epruvete
$b_N$	mm	širina epruvete na mjestu zareza
$l$	mm	duljina epruvete
$R_{ms}$	$\text{N/mm}^2$	savojna čvrstoća
$F_{max}$	N	maksimalna sila
$L$	mm	razmak između oslonaca
$b$	mm	širina epruvete
$E_s$	$\text{N/mm}^2$	savojni modul elastičnosti
$\Delta F/\Delta f$	$\text{tg}\alpha$	nagib pravca u dijagramu sila, F – progib, f
HB	$\text{kJ/m}^2$	tvrdoća
$F$	N	sila djelovanja kuglice
$D$	mm	promjer kuglice
$h$	mm	dubina prodiranja

## SAŽETAK

Tema završnog rada prikazati je fotodegradaciju poliestera polilaktičke kiseline (PLA), te na temelju izmjerenih vrijednosti tvrdoće, savojne čvrstoće i udarnog rada loma na degradiranim normiranim ispitnim tijelima ocijeniti postojanost biorazgradivog polimera PLA na ultraljubičasto zračenje.

U prvom dijelu rada dan je opći prikaz o poliesteru polilaktičke kiseline (PLA) te o povijesti njegovog razvoja i primjene. Istražena je fotodegradacija materijala s posebnom naznakom na ultraljubičasto zračenje, te njihova podjela i primjena u pojedinim područjima. U eksperimentalnom dijelu rada prikazana je izrada epruveta za ispitivanje kao i rad s uređajem točkastog izvora ultraljubičastog zračenja Hamamatsu LC8, te uspoređivanje s uzorcima PLA polimera koji nisu bili podvrgnuti ultraljubičastom zračenju.

Ključne riječi : fotodegradacija, ultraljubičasto zračenje, biorazgradivi polimer, PLA, mehanička svojstva

Ključne riječi: fotodegradacija, ultraljubičasto zračenje, biorazgradivi polimer, PLA, mehanička svojstva

## **SUMMARY**

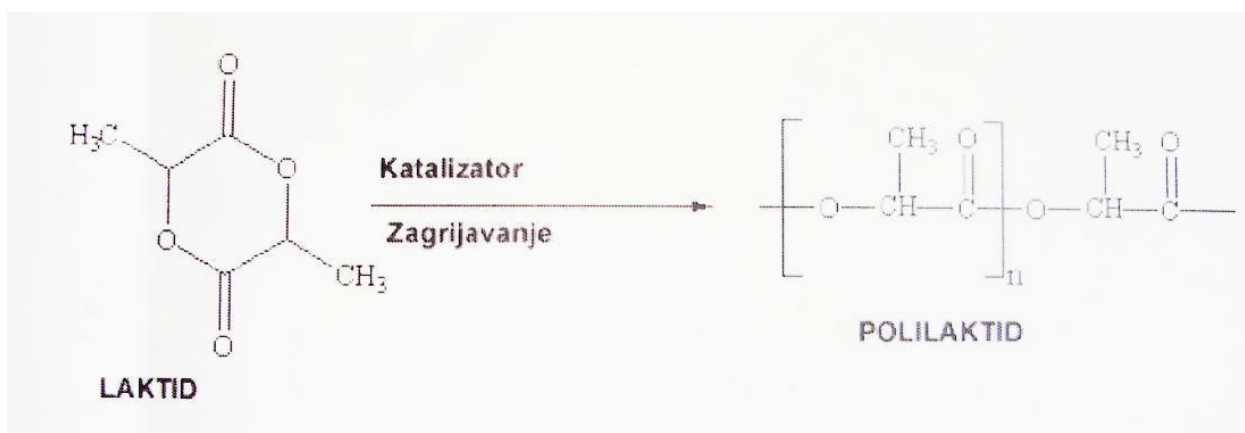
The thesis shows photodegradation of the aliphatic polyester called polylactic acid (PLA), and on the basis of measured values of hardness, flexural strength and toughness on degradable testing bodies, resistance of biodegradable polymer PLA to ultraviolet radiation will be shown.

The first part of the thesis presents information about polyester polylactic acid (PLA) and history of its development and application. Photodegradation of materials with particular indication on ultraviolet radiation and the classification and application in the certain fields have been explored. The experimental part of the thesis demonstrates the production of testing bodies and working with the punctual ultraviolet radiation source device Hamamatsu LC8. The final stage of the project will be comparing the test results with the results of the PLA polymer that hasn't been submitted to ultraviolet radiation.

Key words: photodegradation, ultraviolet radiation, biodegradable polymer, PLA, mechanical properties

## 1. UVOD

Polilaktička kiselina, PLA je alifatski poliester otkriven 1932. godine. Početkom 1960-ih počelo je istraživanje primjene ovog materijala kao biorazgradivog polimernog materijala za medicinske svrhe. Danas se PLA također primjenjuje za izradu biorazgradivih pakiranja i pribora za jednokratnu upotrebu, kao što su pakiranja hrane, polimerne vrećice, posude za kontejnerski uzgoj presadnica u zaštićenim prostorima, pelene, bočice, jednokratne čaše za hladna pića, folije i filmovi. Dobiva se iz obnovljivih prirodnih izvora, šećera (dekstroze, glukoze i saharoze), šećerne repe, melase ili iz škroba dobivenog iz kukuruza, pšenice i riže. Postoje dvije metode polimerizacije polilaktičke kiseline: polimerizacija polilaktičke kiseline kao monomer u otopini i polimerizacija iz cikličkog dimera (laktida) kao što je prikazano na slici 1 [1].



Slika 1. Polimerizacija polilaktičke kiseline iz cikličkog dimera [1]

Pored upotrebe u medicini, ova grupa polimera se danas sve više koristi kao materijal za tehničke primjene zbog svoje čvrstoće. PLA je unikristalni, plastomerni poliestar (čiji stupanj kristaliziranja ovisi o svojstvima polimerizacije) s temperaturom taljenja oko 155 °C.

Svojstva PLA odgovaraju velikom broju metoda prerade kao što su injekcijsko prešanje, puhani filmovi, oblikovanje puhanjem, ekstrudiranje i oblikovanje ekspanzijom.

Potencijalna područja u inženjerskoj primjeni PLA obuhvaćaju ambalažu i spremnike, materijale za poljoprivredu i materijale za kompostiranje. Kombinacija veoma pogodnih fizičkih svojstava kao što su transparentnost i biorazgradivost čine polilaktičku kiselinu pogodnom i za upotrebu kao što je pakiranje. Ovi biorazgradivi polimeri mogu ponuditi rješenja za ekološke probleme s otpadom koji nije biorazgradiv. Toyota Motor Corp. je prva primijenila PLA u svojim automobilima kao dijelove prekrivača za rezervnu gumu i prekrivača podova za modele automobila Raum i Prius.

Nažalost, žilavost i toplinska svojstva nisu dovoljno dobra za pojedine primjene. Iz tog se razloga trenutno, intenzivno proučava PLA koji se proizvodi iz L- laktida i D- laktida, jer posjeduju visoku temperaturu taljenja od približno 230 °C.

## 2. POLIMERNI MATERIJALI

Polimeri su makromolekularni spojevi izgrađeni od velikog broja osnovni jedinica - mera. U makromolekuli meri su međusobno povezani kovalentnim vezama. Polazne jedinice koje sudjeluju u sintezi makromolekula nazivaju se monomeri. Polimerni materijali imaju izuzetnu važnost u suvremenom svijetu jer nalaze primjenu u svim područjima ljudske djelatnosti, od elektronike i medicine do hidrometalurgije i iskorištavanja solarne energije, a mogu se koristiti i kao zamjena za uobičajene materijale (metale, drvo, keramiku i staklo). Međutim, polimerni se proizvodi, posebno ambalaža, često prozivaju kao velik ekološki problem suvremenog svijeta, iako tijekom proizvodnje, transporta i primjene troše relativno malo energije. Porast temperature na Zemlji se povezuje s industrijalizacijom i rastom uporabe fosilnih goriva, a upravo iz nafte i prirodnog plina se proizvodi najveći dio današnjih polimernih materijala koji nisu biorazgradljivi, pa se uz kisele kiše, globalno zatopljenje, nestanak biljnih i životinjskih vrsta, plodnog tla i ozonskog omotača smatraju jednim od najvećih ekoloških problema današnjice. Od velike važnosti je pravilno gospodarenje otpadom, a to u prvom redu znači izbjegavanje ili smanjenje količine otpada, zatim ponovnu uporabu, kemijsku, energijsku i materijalnu oporabu (recikliranje), te na kraju odlaganje kao najnepovoljnije rješenje. Odlagališnog prostora sve je manje, pa jednostavno odlaganje polimernog otpada na odlagališta u mnogim zemljama više nije dopušteno. Proizvodi moraju biti proizvedeni i primjenjivani uz štednju resursa, a nakon završenog životnog vijeka bi se trebali oporabiti. Stoga se pitanje gospodarenja proizvodima nakon kraja uporabe postavlja već tijekom njihova razvoja. Zahtjevi prema proizvođačima polimernih materijala s gledišta zaštite okoliša sve su veći. Najvažniji tehnološki pomak s ekološke točke gledišta učinjen je uvođenjem biorazgradljivih polimera kao materijala široke potrošnje. [2]

### 3. FOTODEGRADACIJA MATERIJALA

Fotodegradacija predstavlja razgradnju materijala pod djelovanjem svjetlosnog zračenja. Štetne tvari iz okoliša, voda, toplina, kisik mogu pokrenuti degradacijske procese, ali kada se govori o vanjskom izlaganju, najutjecajniji je čimbenik koji pokreće degradacijske procese Sunčevo svjetlo, a ostali čimbenici pridonose bržoj ili učinkovitijoj degradaciji u kombinaciji sa svjetlom. Općenito, vanjsko izlaganje proizvoda uvjetima pogodnima za život znači da temperature ne prelaze određene ekstreme, zagađenje zraka nije takvo da predstavlja izuzetno agresivnu atmosferu i dr. U tom smislu definirani uvjeti su sljedeći: temperature koje ne prelaze 100 °C, atmosfera sastavljena od zraka s uobičajenim zagađivačima ili bez njih, različite količine vode (u kapljevitom stanju ili u obliku vodene pare) i Sunčeva svjetlost (prirodno ili simulirani umjetni izvori). [3]

Sunčevo svjetlo nije štetno u cijelom svojem spektru. Što je valna duljina zračenja kraća, to je energija fotona veća i ima veći potencijal za pokretanje kemijske reakcije u nekom polimeru koja uzrokuje promjenu njegovih svojstava. Najštetniji je dio UV-spektra Sunčeva svjetla valnih duljina između 300 i 400 nm. Kako su makromolekule sastavljene od niza ponavljajućih jednostavnih kemijskih funkcionalnih skupina, one su podložne gotovo svim fotokemijskim reakcijama kao i male molekule koje imaju iste kromoforne skupine. Iako se radi o istim vrstama reakcija, brzine kojima se fotokemijske reakcije odvijaju u polimeru razlikuju se od onih u malim molekulama zbog morfoloških utjecaja u polimeru u čvrstom stanju koji se ne javljaju u kapljevitim otopinama i parama jednostavnih organskih molekula. Primjer su makromolekule s cimetnom kiselinom u svojem lancu, koje se umrežuju mehanizmom sličnim mehanizmu dimerizacije cimetne kiseline pri ozračivanju u UV-spektru. Općenito, zbog otežanog ulaska kemijskih spojeva i Sunčeva svjetla u čvrsti polimer brzine degradacije većinom su znatno manje kada se radi o polimeru nego o malim organskim molekulama koje imaju iste funkcionalne skupine. [3]

Ultraljubičasto zračenje (ultraljubičasta svjetlost; kratica UV prema eng. ultraviolet) obuhvaća elektromagnetsko zračenje s valnim duljinama manjim od onih koje ima vidljiva svjetlosti, ali većim od onih koje imaju meke X-zrake, u rasponu od 10 nm do 400 nm, i energiji fotona od 3 eV do 124 eV. [4]

Kada se promatra njegovo djelovanje na ljudsko zdravlje i okolinu, ultraljubičasto zračenje se obično dijeli na UVA (400–315 nm) ili dugovalno (*crno svjetlo*), UVB (315–280 nm) ili srednjevalno i UVC (< 280 nm) ili kratkovalno (*antimikrobno*).

Otkriće ultraljubičastog zračenja je povezano s promatranjem srebrnih soli (AgBr, AgCl i AgI), koje potamne kad su izložene Sunčevim zrakama. 1801. godine, njemački fizičar Johann Wilhelm Ritter je primijetio da postoje nevidljive zrake svjetlosti, u blizini ljubičaste svjetlosti, koje su kemijski djelovale na papir, umočen u srebrni klorid, da potamni.[5]



### 3.1. Podjela ultraljubičastog zračenja

Elektromagnetski spektar ultraljubičastog svjetla se može podijeliti na veliki broj načina. Sljedeća podjela prikazana je u tablici 1 prema prijedlogu međunarodnog standarda, koji određuje Sunčevo zračenje (ISO-21348). [6]

**Tablica 1. Podjela ultraljubičastog zračenja prema standardu ISO-21348**

Naziv	Skraćenica	Valna duljina područja u nanometrima	Energija po fotonu
Ultraljubičasto A ili dugovalno područje, (crno svjetlo)	<b>UVA</b>	315 nm – 400 nm	3,10–3,94 eV
Blisko UV	NUV	300 nm – 400 nm	3,10–4,13 eV
Ultraljubičasto B ili srednjevalno područje	<b>UVB</b>	280 nm – 315 nm	3,94–4,43 eV
Srednje UV	MUV	200 nm – 300 nm	4,13–6,20 eV
Ultraljubičasto C ili kratkovalno područje,	<b>UVC</b>	100 nm – 280 nm	4,43–12,4 eV
Daleko UV	FUV	122 nm – 200 nm	6,20–10,2 eV
Vakuumsko UV	VUV	100 nm – 200 nm	6,20–12,4 eV
Duboko UV	LUV	88 nm – 100 nm	12,4–14,1 eV
Super UV	SUV	10 nm – 150 nm	8,28–124 eV
Ekstremno UV	EUV	10 nm – 121 nm	10,2–124 eV

### 3.2. Izvori ultraljubičastog zračenja

#### Prirodni izvori

Sunce zrači ultraljubičasto zračenje u području UVA, UVB i UVC. Zemljin ozonski omotač zaustavlja 97 % – 99 % Sunčevog ultraljubičastog zračenja, u području UVA i UVB, da stigne do površine Zemlje. Od ultraljubičastog zračenja koje stigne do površine Zemlje, gotovo sve otpada na UVA-zračenje.

Obično prozorsko staklo je 90 % prozirno za UVA-zrake, ali zaustavlja 90 % manje valne duljine. Silikatno ili kvarcno staklo je prozirno za sve ultraljubičasto zračenje, pa čak i za vakuumsko UV-zračenje.

Vakuumsko UV-zračenje označava područje od 100 do 200 nm, u kojem je zrak potpuno neproziran za to područje. Ta neprozirnost se javlja zbog snažne apsorpcije ili upijanja kisika u zraku. U proizvodnji poluvodiča se koristi svjetlost valne duljine manje od 200 nm, pa se mora raditi u plinu koji nema kisika u sebi.

Ekstremno UV-zračenje je karakteristično za snažnu reakciju s atomima: valne duljine iznad 30 nm izbacuju valentne elektrone i ioniziraju atome, dok fotoni valne duljine manje od 30 nm reagiraju s elektronima u unutrašnjim energetske razinama i s jezgrom. [7]

#### Crno svjetlo

Crno svjetlo zrači svjetiljka koja emitira zračenje u dugovalnom UV-svjetlu (dužina vala oko 360 nm) i vrlo malo vidljive svjetlosti. Naziva se i UV-flourescentna svjetiljka. Koristi se da bi pobudila fluorescenciju, kao i da otkrije UV-boje (provjera novčanica) ili za otkrivanje urina. Upotrebljava se i kod uređaja za privlačenje komaraca. Neke svjetiljke ne koriste fluorescentnu tvar, nego vrlo skupo staklo, poznato kao Woodovo staklo, koje služi kao filter. Crno svjetlo se emitira s malom snagom i u području UVA-zračenja, te ne uzrokuje opekotine na koži i rak kože. [8]

## **Antimikrobna fluorescentna svjetiljka**

Ove svjetiljke nemaju fluorescentni premaz. One zasnivaju svoje djelovanje na činjenici da ultraljubičasto zračenje ubija većinu mikroorganizama ili mikroba. Takve svjetiljke ne sadrže uopće fluorescentnu tvar, tako da više nalikuju na tinjalicu. Cijevi se sastoje od amornog kvarca, koji propušta UV-zrake dobivene emisijom žive. Takve svjetiljke ne samo da ubijaju mikroorganizme, nego pretvaraju dio kisika u ozon. Mogu oštetiti oči i kožu, pa je obavezna zaštita kod rada s antimikrobnom fluorescentnom svjetiljkom. Geolozi ih koriste za otkrivanje nekih vrsta minerala. [9]

## **Ultraljubičasti laseri**

UV-laserske diode i UV-laseri s čvrstom jezgrom proizvode se za emitiranje UV-zračenja, s valnim duljinama 262, 266, 349, 351, 355 i 375 nm. UV-laseri se koriste u industriji za lasersko graviranje, u medicini za dermatologiju i očnu kirurgiju (za popravljjanje vida). [10]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Priprema ispitnog uzorka za daljnja ispitivanja

Prvi korak pripreme ispitnog uzorka je određivanje dimenzija epruveta za savojnu čvrstoću i udarni rad loma. Dimenzije za savojnu čvrstoću određene su putem norme. Nakon utvrđenih dimenzija izrađen je plan za dobivanje što više epruveta na PLA polimeru nakon čega su uzorci izrezani pomoću ručne pile, te brušeni na pokretnoj brusnoj traci kako bi se dobili što kvalitetniji ispitni uzorci s okomitim ravnim rubovima za daljnja ispitivanja.

### 4.2. Izlaganje uzorka ultraljubičastom zračenju

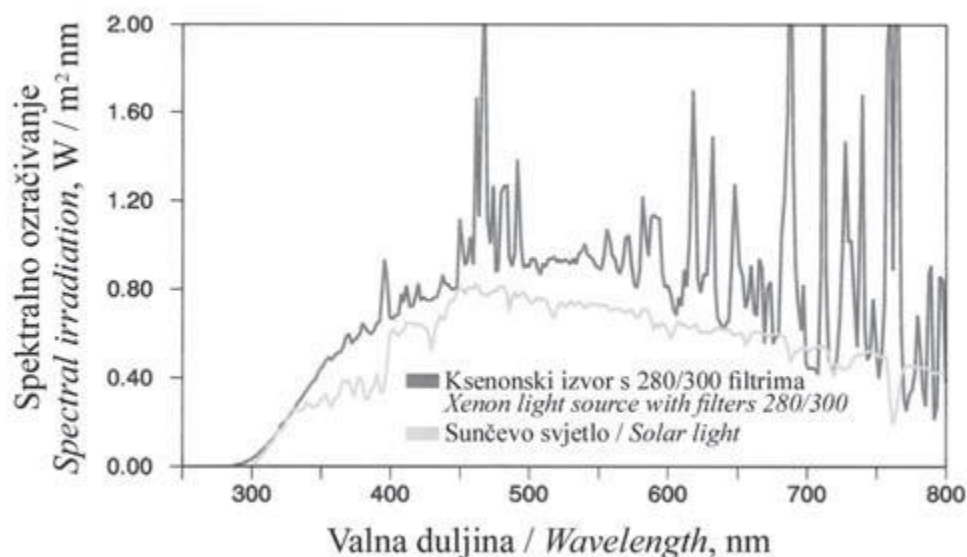
Nakon pripreme epruveta, prvi korak u eksperimentalnoj fazi izrade ovog rada je izlaganje ispitnih uzoraka ultraljubičastom zračenju. Ispitivanje je provedeno pomoću uređaja točkastog izvora ultraljubičastog zračenja Hamamatsu LC8, koji se nalazi u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 2. Uređaj točkastog izvora ultraljubičastog zračenja Hamamatsu LC8

Ovaj uređaj ima ugrađeni RS-232C ulaz kako bi omogućio što preciznije i jednostavnije kontroliranje parametara za daljnje ispitivanje. Hamamatsu LC8 održava intenzitet svjetla putem ksenonske lampe na fiksnoj razini zbog čega je omogućeno stabilno zračenje. Intenzitet svjetlosti obično varira tijekom ispitivanja dok je kod ovog uređaja taj intenzitet konstantan jer je reguliran pomoću unutarnjeg senzora. Intenzitet zračenja (referentna vrijednost) prikazuje se kao digitalna vrijednost na LCD zaslonu. Time se eliminiraju problemi koji se javljaju zbog ljudske pogreške i različitih uvjeta rada. Potpuna kontrola i detaljno postavljanje i očitavanje parametara čine ga idealnim za potpuno automatizirano istraživanje.

U ovom radu svaki uzorak PLA polimera izložen je djelovanju ultraljubičastog zračenja pomoću navedenog uređaja. Svjetlo ksenonskih svjetiljki vrlo je slično danjem svjetlu. Ipak, njegov spektar zračenja sadržava valne duljine koje se ne nalaze u spektru Sunčeva zračenja koje dopire do Zemlje. Točnije, spektar svjetla iz ksenonskih izvora sadržava znatan udio valnih duljina kraćih od onih koje sadržava Sunčev spektar na površini Zemlje. To su valne duljine kraće od 300 nm. Zbog toga se koriste odgovarajući filtri koji onemogućuju prolazak zračenju neprirodno kratkih valnih duljina UV-spektra. Slika 3. prikazuje usporedbu spektralnog ozračivanja svjetla ksenonske svjetiljke prekrivene s 280/300 filtrima i Sunčeva svjetla na Zemljinoj površini. Može se uočiti da ksenonski izvor svjetla ima spektralno ozračivanje koje je vrlo slično spektralnog ozračivanju Sunčeva svjetla na Zemljinoj površini.



**Slika 3. Usporedba spektralnog ozračivanja svjetla ksenonske svjetiljke i Sunčeva svjetla na Zemljinoj površini [11]**

Napravljena su preliminarna ispitivanja utjecaja ultraljubičastog zračenja na polimer PLA. Prva udaljenost uzorka od izvora zračenja je postavljena na 7 cm. Nakon 10 zračenja u trajanju od 1 minute, dakle ukupno 10 minuta, nisu primijećene velike promjene na uzorku vizualnim pregledom. Zatim je stolić pomaknut i udaljenost uzorak – izvor smanjena na 5 cm. No već nakon 3 minute je uzorak požutio i postao ljepljiv na mjestu najintenzivnijeg zračenja. Nakon 4 minute je uzorak bio iznimno krhak.

Stoga je kao najbolja udaljenost od izvora zračenja do uzorka odabrana vrijednost 6 cm. Trajanje izlaganja uzorka je odabrano da bude 5 minuta jer je nakon tog vremena polimer vidljivo fotodegradiran, a još nije toliko krhak da bi bio tehnički neupotrebljiv. Svaki uzorak ozračivan je 5 minuta pri maksimalnoj vrijednosti intenziteta zračenja.

#### **4.2.1. Mjere zaštite na radu**

Pri preciznom postavljanju uzoraka na ispitni stolić i pri izlaganju uzoraka ultraljubičastom zračenju uvedene su potrebne mjere zaštite. Kao mjera zaštite korištene su naočale koje štite oči od UV - zračenja. Također, izvor zračenja je smješten u kućište od nehrđajućeg čelika što dodatno štiti od UV – zračenja.

### 4.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava

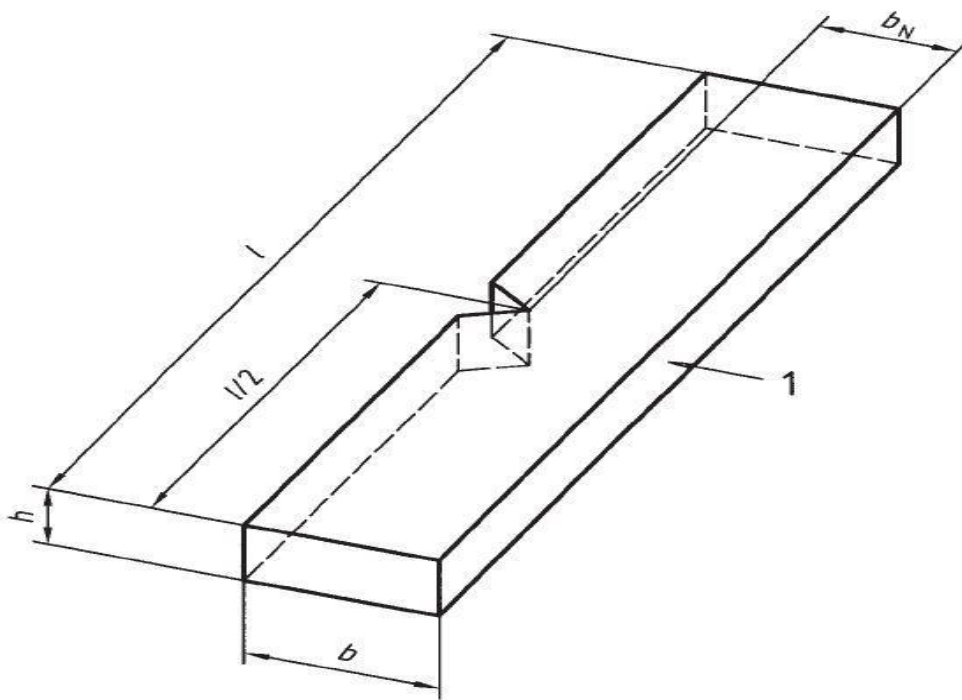
Ispitivanje mehaničkih svojstava provodi se na uzorcima normiranog oblika i dimenzija – epruvetama. Mjesto uzimanja uzorka i smjer izrezivanja epruvete utječu na veličinu mehaničkog svojstva kod svih anizotropnih materijala. Broj epruveta treba biti što veći kako bi se dobio veći broj rezultata, a time i veća točnost mjerenja. Njihov broj ovisi o nehomogenostima prisutnima u materijalu kao posljedica preradbe, te o načinu ispitivanja nekog mehaničkog svojstva. Prilikom ovog ispitivanja dobiveno je po sedam epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće, žilavosti i tvrdoće. Mjerenja mehaničkih svojstava dobivenih uzoraka PLA polimera napravljena su u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

#### 4.3.1. Udarni rad loma

Udarni rad loma je svojstvo koje pokazuje kolika je otpornost materijala na udarac. Ovo svojstvo je važno za dijelove koji su opterećeni na udarna opterećenja. Ispitivanje udarnog rada loma provodi se na Charpyjevu batu. Samo ispitivanje izvodi se na način da se epruveta stavi u oslonac, te se s određene visine spušta bat da slobodnim padom lomi epruvetu. Količina kinetičke energije utrošene za lom epruvete naziva se udarni rad loma ili žilavost.

Ispitivanje je provedeno u skladu s normom EN ISO 179-1.

Slika 4. prikazuje epruvetu s V-zarezom za ispitivanje udarnog rada loma. Oznaka „ $l$ “ označava smjer udaranja bata u uzorak. Veličina  $l$  je duljina ispitnog uzorka. Prema normi  $l = 25 h = 50 \pm 2$  mm. Za tu duljinu ispitnog uzorka propisan je razmak između oslonaca na Charpyjevom batu od  $L = 31 + 0,5$  mm. Širina epruvete ( $b$ ) iznosi  $b = 15 \pm 0,35$  mm, debljina ( $h$ )  $h = 2 \pm 0,1$  mm.



Slika 4. Epruveta za ispitivanje žilavosti [12]



Slika 5. Charpyjev bat



Udarni rad loma računa se prema izrazu [12]:

$$A_{cu} = \frac{E_c}{hb_N} 10^3, [\text{kJ/m}^2]$$

gdje je:

$A_{cu}$  – udarna žilavost,  $\text{kJ/m}^2$

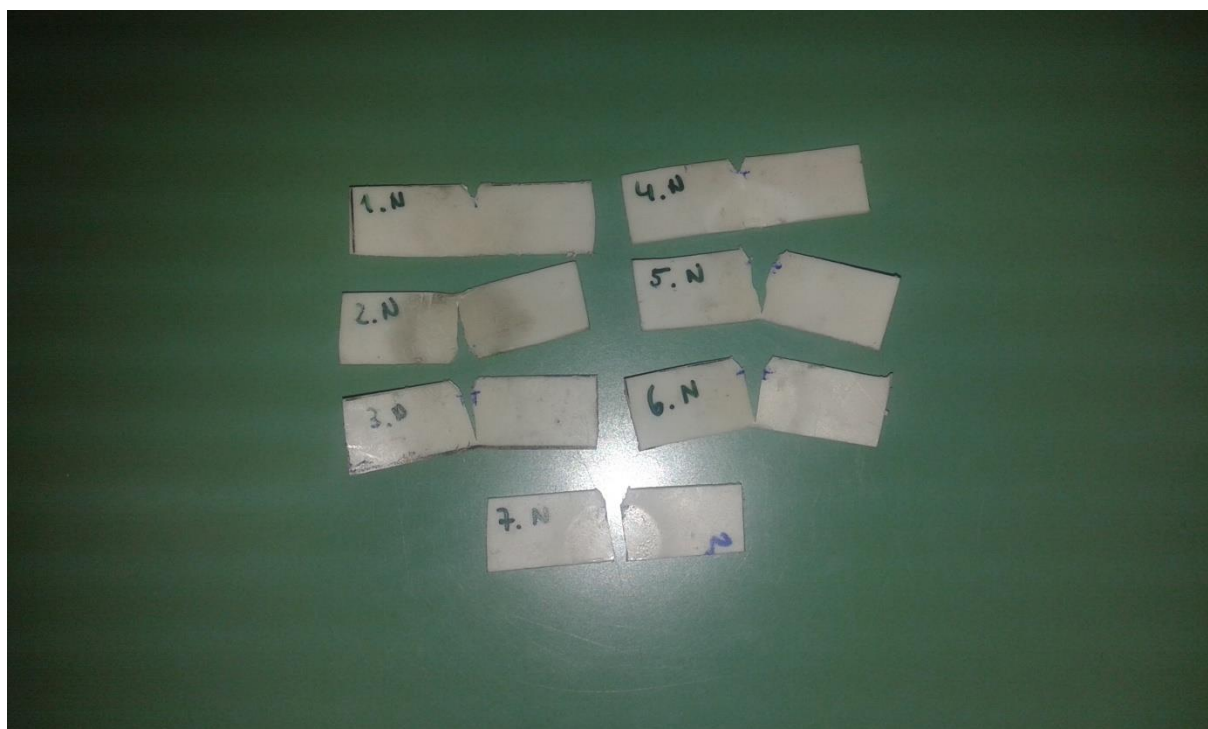
$E_c$  – energija loma, J

$h$  – debljina epruvete, mm

$b_N$  – širina epruvete na mjestu zareza, mm

**Tablica 2. Rezultati mjerenja i izračunate vrijednosti žilavosti**

Mjerenje udarne žilavosti						
Redni broj epruvete	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$l$ [mm]	$E_c$ [kpcm]	$E_c$ [J]	$A_{cu}$ [ $\text{kJ/m}^2$ ]
1.	1,90	12,10	49,03	16,5	1,68	73,07
2.	1,89	12,04	49,44	12	1,22	53,61
3.	1,87	11,97	50,22	9	0,92	41,10
4.	1,77	12,20	50,50	22	2,24	103,73
5.	1,72	12,12	50,05	6	0,61	29,26
6.	1,71	12,16	50,29	5	0,51	24,53
7.	1,97	11,86	49,68	4,5	0,46	19,69
Srednja vrijednost					1,09	49,28
Standardna devijacija					0,66	28,04



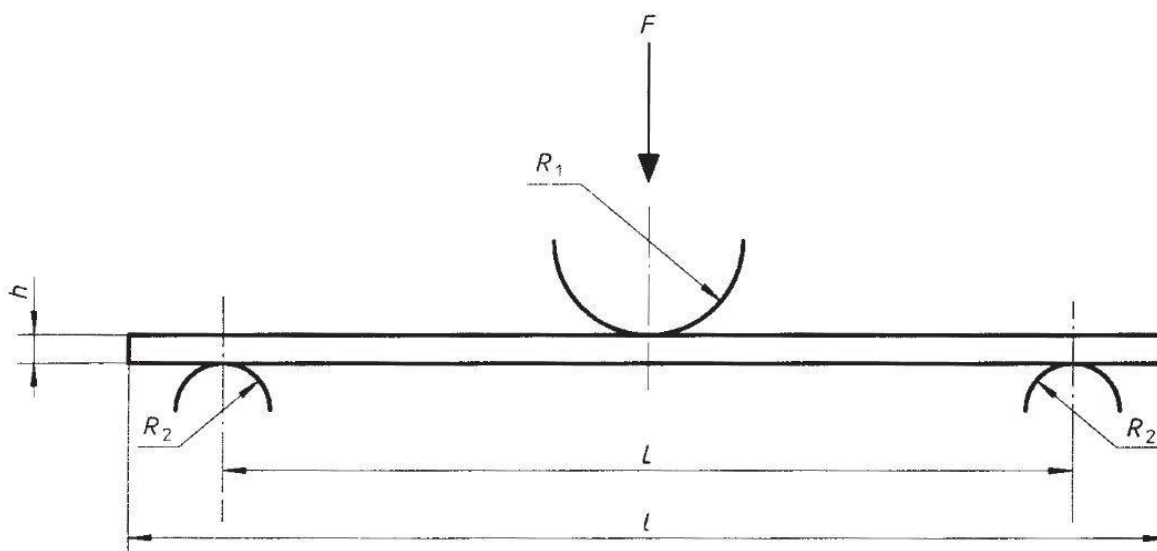
**Slika 6. Epruvete nakon ispitivanja žilavosti**

Ispitivanja žilavosti rađena su na sedam epruveta koje su prethodno bile podvrgnute ultraljubičastom zračenju. Žilavost ozračenog uzorka iznosi  $49,28 \text{ kJ/m}^2$ , a žilavost neozračenog uzorka iznosi  $23,11 \text{ kJ/m}^2$ . Iz čega zaključujemo da je ozračeni materijal dvostruko žilaviji od neozračenog materijala. Rasipanje rezultata je dosta veliko, a razlog tome vjerojatno leži u pokojem poroznom mjestu unutar epruvete.

#### 4.3.2. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti

Epruveta se postavlja na dva oslonca te po sredini epruvete djeluje pritisak koji opterećuje ispitni uzorak u tri točke. Postupak se provodi do konačnog pucanja epruvete pri čemu se mjeri maksimalna sila koju epruveta može izdržati do pojave loma. Ispitivanje savojne čvrstoće vrši se na epruvetama četvrtastog poprečnog presjeka sukladno normi EN ISO 178. [13]

Slika 7. prikazuje epruvetu za ispitivanje savojne čvrstoće. Oznaka  $F$  predstavlja silu kojom se opterećuje ispitni uzorak. Veličina  $l$  je duljina ispitnog uzorka. Prema normi  $l = 40 \pm 2$  mm. Širina i debljina epruvete također su određene normom, a iznose:  $b = 25 \pm 0,5$  mm i  $h = 2 \pm 0,1$  mm. Razmak između oslonaca prema normi mora biti  $L = 16 h = 16 \times 2$  mm = 32 mm.



Slika 7. Shema ispitivanja savojne čvrstoće [13]



**Slika 8. Ispitivanje savojne čvrstoće na univerzalnoj kidalici**

Uređaj na kojemu su provedena ispitivanja je VEP Thuringer Industriewerk Rauenstein, model 2132 iz 1964. godine, mjernog područja od 0 do 4800 N. Mjerno područje koje je korišteno u ovom radu kreće se od 0 do 980 N. Prema tome vidi se da su potrebne vrlo male sile za deformiranje i u konačnici pucanje ispitnog uzorka. Na periodima od 2 N (2, 4, 6 N...) očitavani su progibi uz male stanke tijekom ispitivanja jer u laboratoriju nije dostupan digitalni komparator pa nije moguće kontinuirano iščitavanje podataka. Iako savijanje nije posve kontinuirano, ovako kratke stanke ne utječu značajno na rezultate ispitivanja pa se dobiveni rezultati smatraju valjanima.

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu [13]:

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} L}{2bh^2}, [\text{N/mm}^2]$$

gdje je:

$R_{ms}$  – savojna čvrstoća,  $\text{N/mm}^2$

$F_{max}$  – maksimalna sila opterećenja, N

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$b$  – širina epruvete, mm

$h$  – debljina epruvete, mm

Savojni modul elastičnosti računa se prema izrazu [13]:

$$E_s = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta f}, [\text{N/mm}^2]$$

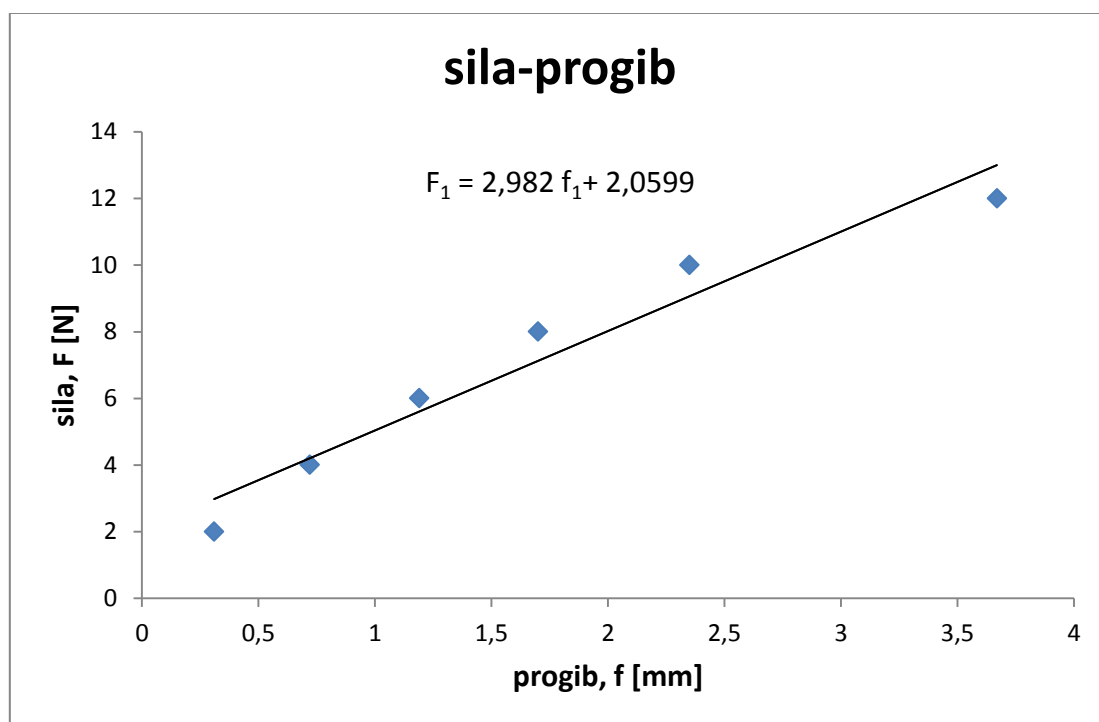
gdje je:

$E_s$  – savojni modul elastičnosti,  $\text{N/mm}^2$

$\frac{\Delta F}{\Delta f}$  – nagib pravca u dijagramu sila,  $F$  – progib,  $f$ ,  $\text{tg}\alpha$

Tablica 3. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 1. epruvete

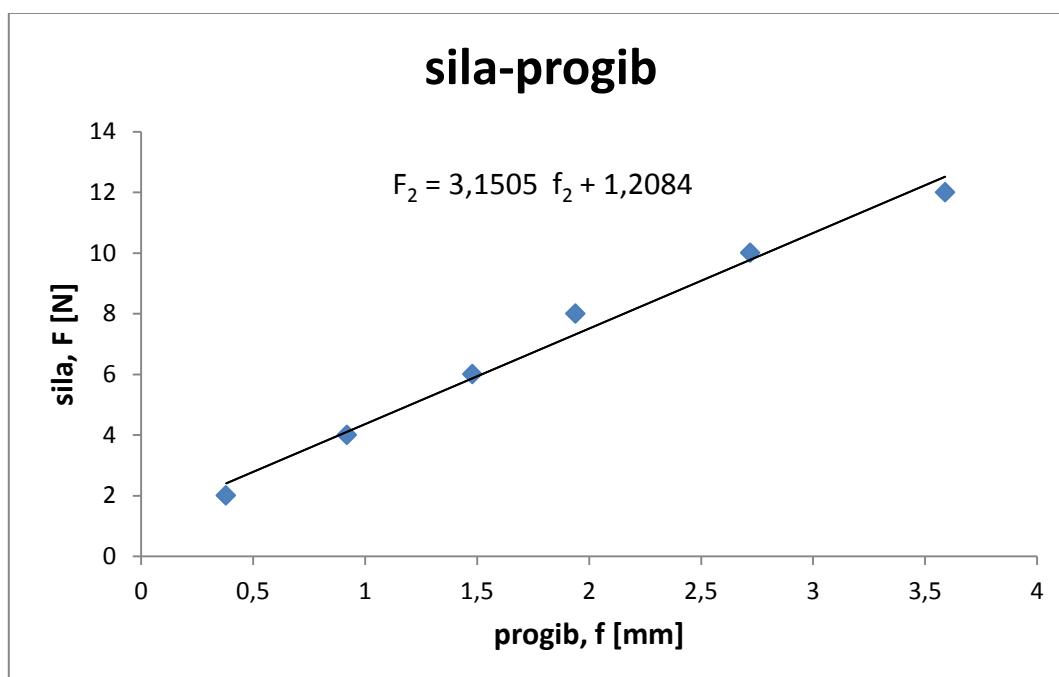
$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,31
4	0,72
6	1,19
8	1,70
10	2,35
12	3,67



Slika 9. Ovisnost sila-progib 1. epruvete

Tablica 4. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 2. epruvete

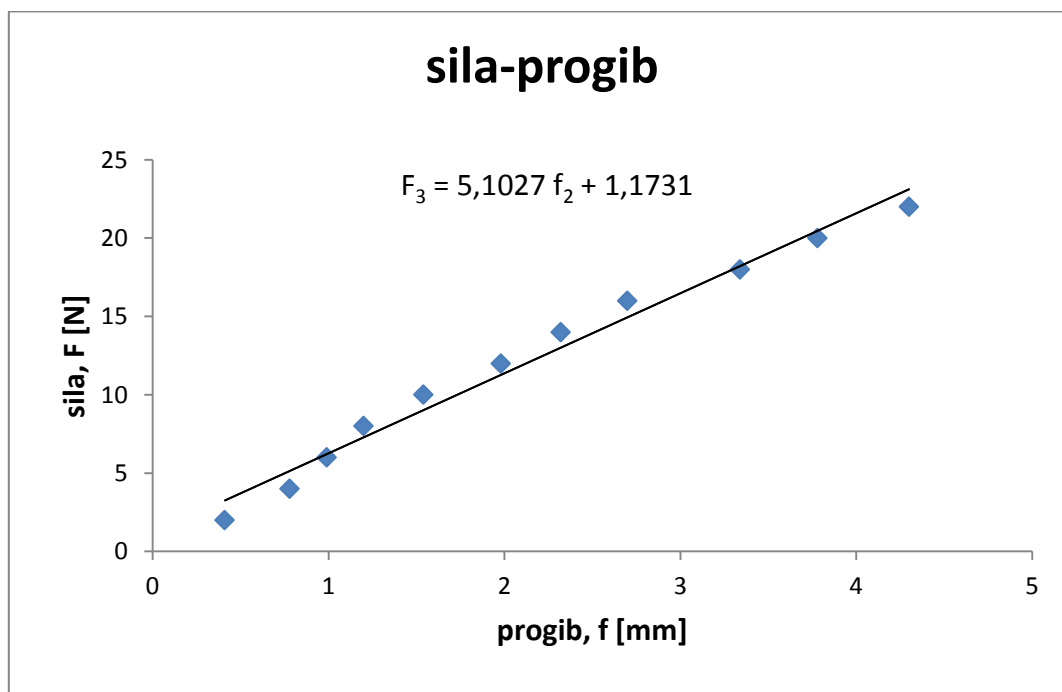
$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,38
4	0,92
6	1,48
8	1,94
10	2,72
12	3,59



Slika 10. Ovisnost sila-progib 2. epruvete

Tablica 5. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 3. epruvete

$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,41
4	0,78
6	0,99
8	1,20
10	1,54
12	1,98
14	2,32
16	2,70
18	3,34
20	3,78
22	4,30

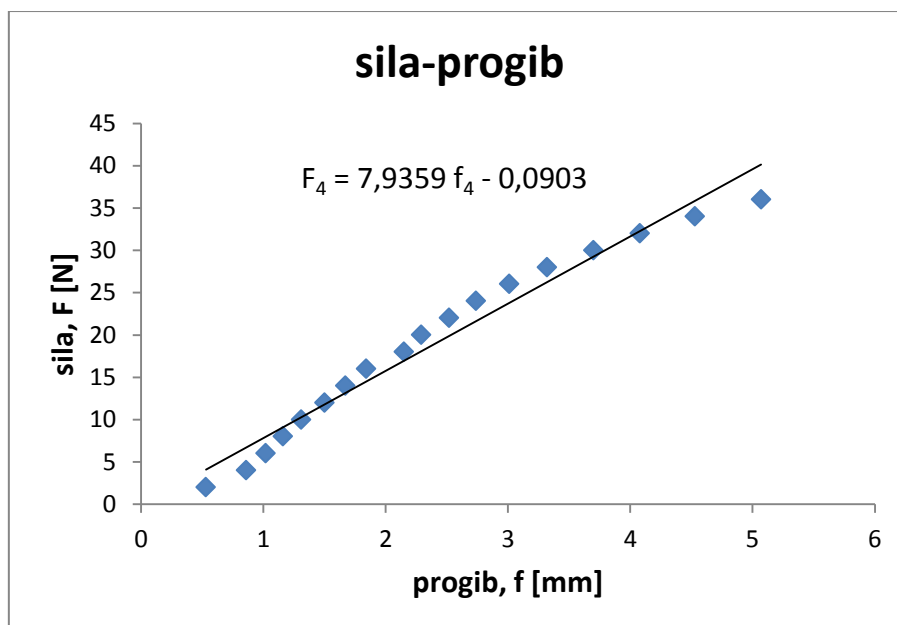


Slika 11. Ovisnost sila-progib 3. epruvete



Tablica 6. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 4. epruvete

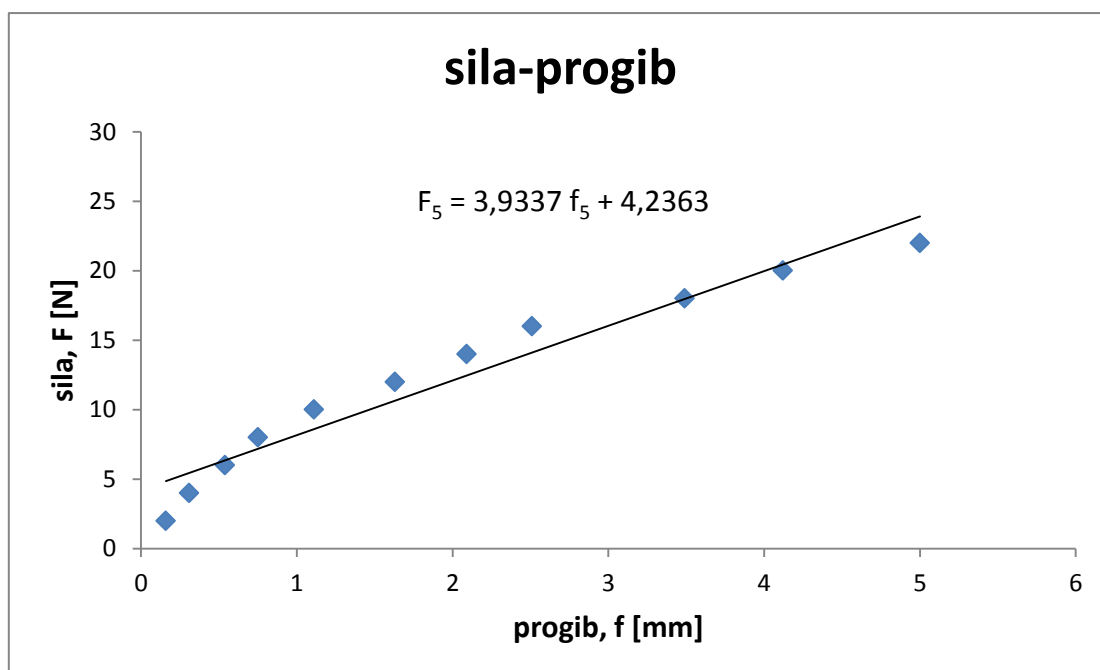
$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,53
4	0,86
6	1,02
8	1,16
10	1,31
12	1,50
14	1,67
16	1,84
18	2,15
20	2,29
22	2,52
24	2,74
26	3,01
28	3,32
30	3,70
32	4,08
34	4,53
36	5,07



Slika 12. Ovisnost sila-progib 4. epruvete

Tablica 7. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 5. epruvete

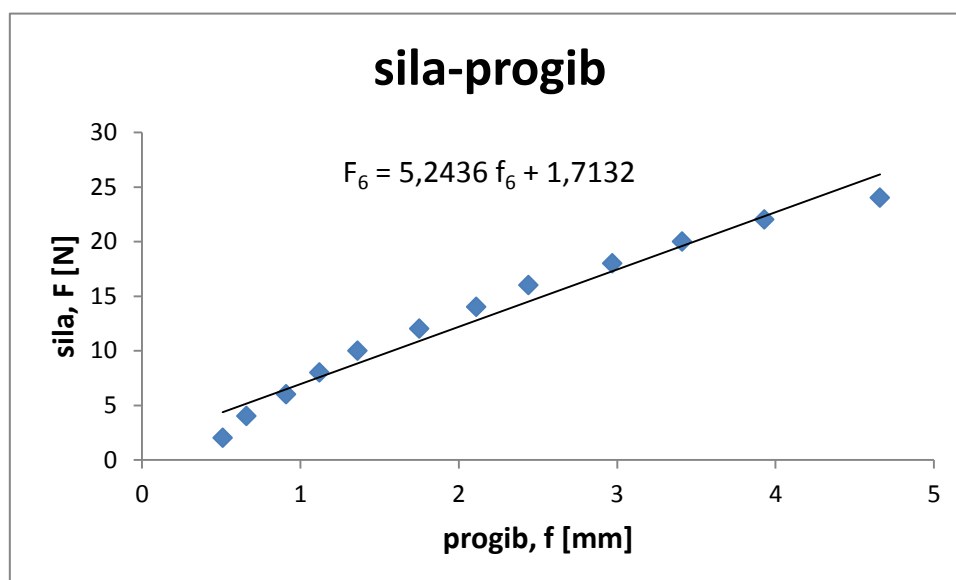
$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,16
4	0,31
6	0,54
8	0,75
10	1,11
12	1,63
14	2,09
16	2,51
18	3,49
20	4,12
22	5,00



Slika 13. Ovisnost sila-progib 5. epruvete

Tablica 8. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 6. epruvete

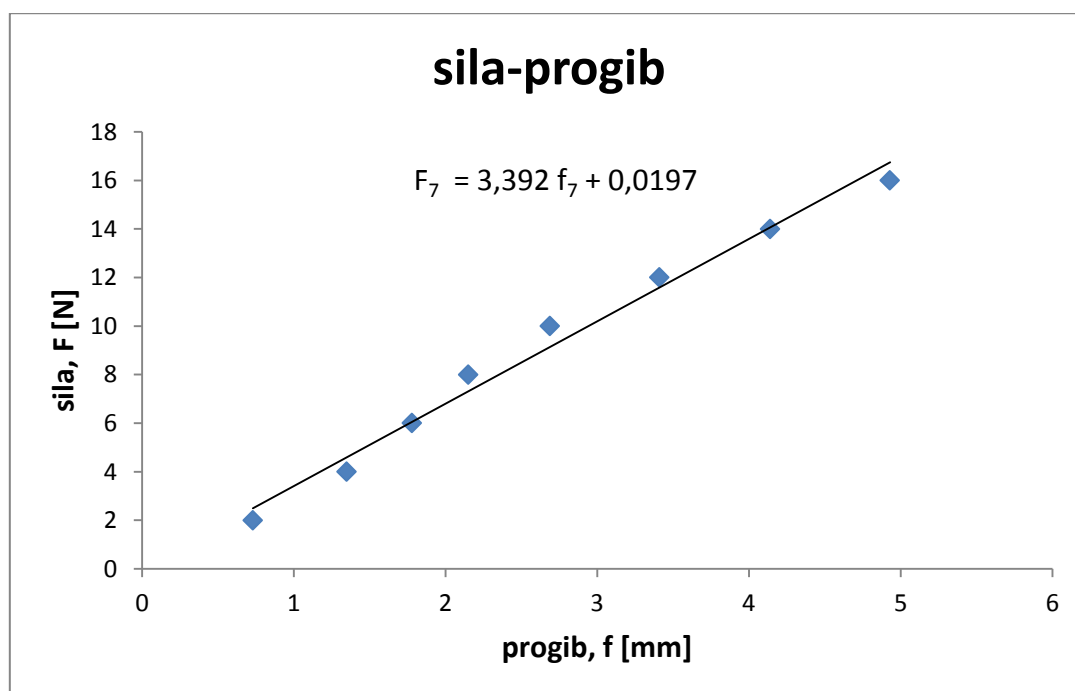
$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,51
4	0,66
6	0,91
8	1,12
10	1,36
12	1,75
14	2,11
16	2,44
18	2,97
20	3,41
22	3,93
24	4,66



Slika 14. Ovisnost sila-progib 6. epruvete

Tablica 9. Progib u ovisnosti o sili pri savijanju 7. epruvete

$F$ [N]	$f$ [mm]
2	0,73
4	1,35
6	1,78
8	2,15
10	2,69
12	3,41
14	4,14
16	4,93



Slika 15. Ovisnost sila-progib 7. epruvete

**Tablica 10. Rezultati mjerenja i izračunate vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti**

Mjerenje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti							
Redni broj epruvete	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$L$ [mm]	$F_{max}$ [N]	$\Delta F/\Delta f$ [N/mm]	$R_{ms}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1.	24,60	1,70	32	14	2,98	9,45	201,99
2.	24,57	1,68	32	14	3,15	9,69	221,50
3.	25,18	2,00	32	24	5,10	11,44	207,40
4.	25,40	2,33	32	38	7,94	13,23	202,45
5.	25,38	1,80	32	24	3,93	14,01	217,51
6.	24,84	2,02	32	26	5,24	12,31	209,66
7.	24,92	1,86	32	18	3,39	10,02	173,18
Srednja vrijednost						11,4	205
Standardna devijacija						1,7	15

Ispitivanja savojne čvrstoće rađena su na sedam epruveta uzorka koji je bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju i preliminarna ispitivanja na jednoj epruveti uzorka koji nije bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju. Savojna čvrstoća neozračenog uzorka iznosi 10,4 N/mm<sup>2</sup>, a savojni modul elastičnosti 458 N/mm<sup>2</sup>. Kao što vidimo iz rezultata nema velike razlike kod ispitivanja savojne čvrstoće, ali zato uzorak koji nije bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju pokazuje puno veći modul elastičnosti u odnosu na uzorak koji je bio podvrgnut zračenju. Rasipanje rezultata je dosta veliko. Razlog tome je vjerojatno, kao što smo već naveli, postojanje pokojeg poroznog mjesta unutar epruvete.

### 4.3.3. Tvrdoća

Tvrdoća je svojstvo materijala koje se protivi zadiranju stranog tijela u njegovu strukturu (ili površinu). To je svojstvo krutina jer tekućine i plinovi nemaju tvrdoću. Podaci o tvrdoći materijala su neophodni kada se radi o ručnoj ili strojnoj obradi. Alati uvijek moraju biti tvrdi od materijala koji se obrađuje. Tvrdoća epruveta prethodno podvrgnutih ultraljubičastom zračenju ispitivana je na tvrdomjeru u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prilikom ispitivanja korištena je norma EN ISO 2039-1 [14] iz koje su iščitani podaci potrebni za provedbu ispitivanja. Sila kojom djeluje kuglica iznosi  $F = 50 \text{ N}$ , a promjer kuglice je  $D = 5 \text{ mm}$ .



Slika 16. Ispitivanje tvrdoće na tvrdomjeru

Tvrdoća se računa prema izrazu [14]:

$$HB = \frac{F}{D\pi h}, [\text{N/mm}^2]$$

gdje je:

$HB$  – Tvrdoća,  $\text{N/mm}^2$

$F$  – sila djelovanja kuglice, N

$D$  – promjer kuglice, mm

$h$  – dubina prodiranja, mm

**Tablica 11. Dubina prodiranja uzorka 1**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,230 mm	0,240 mm	0,245 mm
1 cm	0,200 mm	0,210 mm	0,215 mm
2 cm	0,230 mm	0,240 mm	0,250 mm

**Tablica 12. Dubina prodiranja uzorka 2**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,255 mm	0,290 mm	0,300 mm
1 cm	0,255 mm	0,265 mm	0,275 mm
2 cm	0,245 mm	0,255 mm	0,265 mm

**Tablica 13. Dubina prodiranja uzorka 3**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,265 mm	0,275 mm	0,285 mm
1 cm	0,240 mm	0,255 mm	0,260 mm
2 cm	0,205 mm	0,215 mm	0,225 mm

**Tablica 14. Dubina prodiranja uzorka 4**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,255 mm	0,265 mm	0,275 mm
1 cm	0,225 mm	0,240 mm	0,250 mm
2 cm	0,215 mm	0,220 mm	0,230 mm

**Tablica 15. Dubina prodiranja uzorka 5**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,260 mm	0,270 mm	0,280 mm
1 cm	0,230 mm	0,240 mm	0,250 mm
2 cm	0,265 mm	0,275 mm	0,285 mm



**Tablica 16. Dubina prodiranja uzorka 6**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,255 mm	0,265 mm	0,275 mm
1 cm	0,200 mm	0,210 mm	0,220 mm
2 cm	0,200 mm	0,210 mm	0,220 mm

**Tablica 17. Dubina prodiranja uzorka 7**

Dubina prodiranja nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	0,260 mm	0,270 mm	0,280 mm
1 cm	0,235 mm	0,245 mm	0,255 mm
2 cm	0,325 mm	0,335 mm	0,345 mm

Nakon izmjerenih vrijednosti prodiranja određuje se (prema gore navedenoj formuli) tvrdoća svakog uzorka na različitim udaljenostima pri različitom vremenu.

Iako norma EN ISO 2039-1 propisuje zaokruživanje vrijednosti tvrdoće za  $HB < 250 \text{ N/mm}^2$  na cijeli broj, u tablicama 18 do 25. su prikazane vrijednosti zaokružene na jedno decimalno mjesto zbog veće točnosti i boljeg praćenja utjecaja intenziteta zračenja na tvrdoću materijala.

**Tablica 18. Tvrdoća uzorka 1**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	13,8 N/mm <sup>2</sup>	13,3 N/mm <sup>2</sup>	13 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	15,9 N/mm <sup>2</sup>	15,2 N/mm <sup>2</sup>	14,8 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	13,8 N/mm <sup>2</sup>	13,3 N/mm <sup>2</sup>	12,7 N/mm <sup>2</sup>

**Tablica 19. Tvrdoća uzorka 2**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12,5 N/mm <sup>2</sup>	11 N/mm <sup>2</sup>	10,6 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	12,5 N/mm <sup>2</sup>	12 N/mm <sup>2</sup>	11,6 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	13 N/mm <sup>2</sup>	12,5 N/mm <sup>2</sup>	12 N/mm <sup>2</sup>

**Tablica 20. Tvrdoća uzorka 3**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12 N/mm <sup>2</sup>	11,6 N/mm <sup>2</sup>	11,2 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	13,3 N/mm <sup>2</sup>	12,5 N/mm <sup>2</sup>	12,2 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	15,5 N/mm <sup>2</sup>	14,8 N/mm <sup>2</sup>	14,1 N/mm <sup>2</sup>

**Tablica 21. Tvrdoća uzorka 4**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12,5 N/mm <sup>2</sup>	12 N/mm <sup>2</sup>	11,6 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	14,1 N/mm <sup>2</sup>	13,3 N/mm <sup>2</sup>	12,7 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	14,8 N/mm <sup>2</sup>	14,5 N/mm <sup>2</sup>	13,8 N/mm <sup>2</sup>

**Tablica 22. Tvrdoća uzorka 5**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12,2 N/mm <sup>2</sup>	11,8 N/mm <sup>2</sup>	11,4 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	13,8 N/mm <sup>2</sup>	13,3 N/mm <sup>2</sup>	12,7 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	12 N/mm <sup>2</sup>	11,6 N/mm <sup>2</sup>	11,2 N/mm <sup>2</sup>

**Tablica 23. Tvrdoća uzorka 6**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12,5 N/mm <sup>2</sup>	12 N/mm <sup>2</sup>	11,6 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	15,9 N/mm <sup>2</sup>	15,2 N/mm <sup>2</sup>	14,5 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	15,9 N/mm <sup>2</sup>	15,2 N/mm <sup>2</sup>	14,5 N/mm <sup>2</sup>

**Tablica 24. Tvrdoća uzorka 7**

Tvrdoća nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12,3 N/mm <sup>2</sup>	11,8 N/mm <sup>2</sup>	11,4 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	13,5 N/mm <sup>2</sup>	13 N/mm <sup>2</sup>	12,5 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	9,8 N/mm <sup>2</sup>	9,5 N/mm <sup>2</sup>	9,2 N/mm <sup>2</sup>

Nakon izračunatih vrijednosti tvrdoće određujemo njenu srednju vrijednost nakon 10, 30 i 60 sekundi.

**Tablica 25. Srednje vrijednosti tvrdoća**

Srednja vrijednost tvrdoće nakon:			
Udaljenost od središta najjačeg zračenja	10 s	30 s	60 s
0 cm	12,5 N/mm <sup>2</sup>	11,9 N/mm <sup>2</sup>	11,5 N/mm <sup>2</sup>
1 cm	14,1 N/mm <sup>2</sup>	13,5 N/mm <sup>2</sup>	13 N/mm <sup>2</sup>
2 cm	13,5 N/mm <sup>2</sup>	13,1 N/mm <sup>2</sup>	12,5 N/mm <sup>2</sup>

Iz ovog rezultata se može zaključiti da je degradacija materijala ultraljubičastim zračenjem utjecala na tvrdoću samog materijala. Dio uzorka koji je bio u samom centru točkastog snopa ultraljubičastog zračenja ima manju tvrdoću od dijela koji je udaljeniji za 1, odnosno 2 cm. Tvrdoća nezračenog uzorka nakon 10 sekundi, iznosi 16,3 N/mm<sup>2</sup>, nakon 30 sekundi iznosi 15,7 N/mm<sup>2</sup>, a nakon 60 sekundi iznosi 15,3 N/mm<sup>2</sup>. Iz ovih podataka zaključujemo da je ultraljubičasto zračenje značajno utjecalo na sniženje tvrdoće.

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanje polilaktičke kiseline potrebno je zbog utvrđivanja kvalitete proizvoda koji će izvršavati namijenjenu funkciju. Ispitivanje se sastojalo od podvrgavanja polimera ultraljubičastom zračenju nakon čega su se ispitala njegova mehanička svojstva istoga.

Već nakon 5 minuta ozračivanja bila je vidljiva žuta točkasta pjega na površini uzorka kao posljedica raspadanja odnosno degradacije polimernog materijala. Nakon što je uzorak vidljivo degradiran krenula su ispitivanja mehaničkih svojstava.

Kod ispitivanja žilavosti dobivena je veća razlika u rasipanju rezultata nego kod mjerenja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Materijal koji je bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju ima žilavost u vrijednosti od  $49,28 \text{ kJ/m}^2$ , dok žilavost „čistog“, odnosno neozračenog materijala iznosi  $23,11 \text{ kJ/m}^2$ . Iz čega možemo zaključiti da je ozračen materijal dvostruko žilaviji od materijala koji nije bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju.

Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti pokazalo je da materijal koji je bio ozračivan ima zanemarivo veću savojnu čvrstoću od neozračenog materijala, ali znatno manji savojni modul elastičnosti.

Pokazalo se da je tvrdoća ozračenog materijala na mjestu točkastog traga ozračivanja manja u odnosu na rubne dijelove istog uzorka. Materijal koji nije bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju pokazuje zamjetno veću tvrdoću, što je zbog degradacije materijala bilo i očekivano.

Općenito se može zaključiti da materijal koji je bio podvrgnut ultraljubičastom zračenju ima veću žilavost i savojnu čvrstoću, ali znatno manji savojni modul elastičnosti i manju tvrdoću. Dakle ispitivanjem je potvrđena fotodegradacija polimera polilaktičke kiseline u laboratorijskim uvjetima.

## LITERATURA

- [1] Šurina, R., Somogyi M., Biorazgradljivi polimeri za biomedicinske namjene, *Tekstil* 55 (12), str. 642-645 (2006).
- [2] [www.gradst.hr/Portals/9/docs/.../POLIMERNI%20%20MATERIJALI.pdf](http://www.gradst.hr/Portals/9/docs/.../POLIMERNI%20%20MATERIJALI.pdf), [21.02.2015.]
- [3] Allara, D. L., *Aging of Polymers*, Environmental Health Perspectives, (1975)11, 29-45.
- [4] <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1562/003-9076<0561%3AAHOUPF>2.0.CO%3B2>, [21.02.2015.]
- [5] Hockberger, P. E., „A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms“, Photochem. Photobiol., 2002.
- [6] ISO 21348 - "Process for Determining Solar Irradiances".
- [7] <http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/ozonelayer.html>. [22.02.2015]
- [8] Philips, S., Osram, P., "Compiled from various Philips, Osram and Sylvania Lighting Catalogues", str. 87-89 (2001).
- [9] <http://ateam.lbl.gov/Design-Guide/DGHtm/t.8lampretrofits.htm>. [22.02.2015]
- [10] Marshall, C., A simple, reliable ultraviolet laser: the Ce:LiSAF, Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [11] Wypych, G., *Handbook of Material Weathering*, 2nd Edition, ChemTec Publishing, 1995.
- [12] Plastics – Determination of Charpy impact properties, Part 1: Non-instrumented impact test, EN ISO 179-1 : 2000.
- [13] Plastics – Determination of flexular properties, EN ISO 178 : 2001
- [14] Plastics – Determination of hardness, Part 1: Ball indentation method, EN ISO 2039-1: 2001.

## **PRILOZI**

I. CD-R disk