

Eksperimentalno i numeričko istraživanje utjecaja debljine stijenke na mehanička svojstva staklenim vlaknima ojačanog PBT materijala

Grdović, Stipe

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:739998>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Stipe Grdović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Skozrit, dipl. ing.

Dr.sc. Boris Jalušić, dipl. Ing.

Student:

Stipe Grdović

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentorima izv. prof. dr. sc Ivici Skozritu i dr. sc. Borisu Jalušiću na stručnom vođenju, savjetima i potpori tijekom izrade ovog rada.

Rad je izrađen u suradnji s tvrtkom Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb, te im se ovim putem zahvaljujem na pruženoj prilici za suradnju kroz ovaj rad.

Zahvaljujem se kolegama Anti Bubalu, mag. ing. mech. i Karlu Tonkoviću, mag. ing. mech. iz tvrtke Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb na uloženom trudu i asistenciji tokom eksperimentalnih istraživanja, kao i za svaki nesebično dodijeljen savjet u vezi ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem cijeloj svojoj obitelji i prijateljima na potpori i motivaciji, jer bez njih ništa ovo ne bi bilo moguće.

Stipe Grdović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Stipe Grdović**

JMBAG: **0035221878**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno i numeričko istraživanje utjecaja debljine stijenke na mehanička svojstva staklenim vlaknima ojačanog PBT materijala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and numerical investigation of wall thickness influence on mechanical properties of glass fibre reinforced PBT material**

Opis zadatka:

Tvrtka Yazaki Europe Limited® bavi se razvojem, modeliranjem i izradom raznih vrsta konektora, ožičenja, terminala i kućišta za autoindustriju širom svijeta. Najčešće korišten materijal za izradu navedenih komponenti je polimer polibutilen tereftalat (PBT) zbog svojih dobrih mehaničkih i električnih svojstava. U svrhu dodatnih poboljšanja njegovih mehaničkih svojstva dodatno se ubrizgavaju staklena vlakna u raznim postotcima ovisno o uvjetima i opterećenju kojem će komponenta biti podvrgnuta. Zbog različitih debljina stijenki konektora, može doći do lokalnih promjena mehaničkih svojstava koje treba istražiti. Cilj ovog završnog rada je istražiti utjecaj debljine stijenke epruvete PBT materijala ojačanog staklenim vlaknima na mehanička svojstva materijala.

U radu je potrebno:

1. Provesti eksperimentalno istraživanje mehaničkog ponašanja polimernog materijala ojačanog staklenim vlaknima. U sklopu eksperimentalnog istraživanja potrebno je provesti vlačni test i test savijanja epruvete u tri točke uz primjenu metode digitalne korelacije slike (DIC).
2. Na temelju eksperimentalnih podataka odrediti modul elastičnosti i vlačnu čvrstoću.
3. Primjenom dobivenih karakteristika materijala provesti numeričke analize svijanja epruveta u tri točke primjenom programskog paketa Abaqus® koji se temelji na metodi konačnih elemenata, te rezultate usporediti s eksperimentalnim.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. - 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. - 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Skozrić *Skrozic Ivica*

Dr. sc. Boris Jalušić *Jalušić*

Predsjednik Povjerenstva:

V Soldo
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
1. UVOD.....	1
2. MEHANIČKA SVOJSTVA POLIMERA	3
2.1. Tipovi mehaničkih svojstava.....	3
2.2. Statički vlačni test	4
2.2.1. Priprema epruveta za ispitivanja	4
2.3. Test savijanja u tri točke (eng. <i>Three point bending test</i>)	10
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE MATERIJALA	13
3.1. Statički vlačni test PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana.....	13
3.2. Test savijanja u tri točke PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana	22
4. NUMERIČKA SIMULACIJA TESTA SAVIJANJA EPRUVETE U TRI TOČKE (eng. <i>Three point bending</i>).....	28
4.1. Osnove metode konačnih elemenata	28
4.2. Primjenjeni konačni elementi.....	28
4.3. Modeliranje problema savijanja u tri točke.....	29
4.3.1. Dimenzije, materijal, rubni uvjeti i mreža konačnih elemenata.....	29
4.3.2. Verifikacija mreže konačnih elemenata	31
4.4. Rezultati numeričkih simulacija.....	35
4.4.1 Epruveta debljine 0,5 mm	35
4.4.2 Epruvete debljina 2 i 4 mm	38
5. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Kemijska struktura polibutilen tereftalata [2]	1
Slika 2. Karakteristični oblici dijagrama $\sigma - \varepsilon$ osnovnih skupina polimernih materijala [1] ...	3
Slika 3. Granule PBT materijala	4
Slika 4. Kućište kalupa.....	5
Slika 5. Kalup.....	5
Slika 6. Epruveta pravokutnog poprečnog presjeka $b_1 \times h$ [mm x mm].....	6
Slika 7. Epruvete razvrstane po debljini (0,5 do 2 mm).....	7
Slika 8. Epruvete razvrstane po debljini (2,5 do 4 mm).....	7
Slika 9. Epruvete pripremljene za nanošenje rastera.....	8
Slika 10. Epruveta spremna za vlačni test.....	8
Slika 11. Konfiguracija statičkog vlačnog testa	9
Slika 12. Vlačni test	10
Slika 13. Naprava za test savijanja u tri točke.....	10
Slika 14. Potisnik sa nanesenim raster slojem.....	11
Slika 15. Epruveta pripremljena za test savijanja u tri točke	11
Slika 16. Konfiguracija testa savijanja u tri točke.....	12
Slika 17. Razlika između inženjerske i stvarne krivulje naprezanje-deformacija [9]	13
Slika 18. Određivanje deformacija pomoću GOM Correlate.....	14
Slika 19. Dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana, debljine 0.5 mm, epruveta: a) S1, b) S2 i c) S3.....	16
Slika 20. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 1 mm.....	17
Slika 21. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 1,5 mm.....	18
Slika 22. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 2 mm.....	18
Slika 23. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 2,5 mm.....	19
Slika 24. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 3 mm.....	19
Slika 25. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 3,5 mm.....	20
Slika 26. Kombinirani dijagram $\sigma - \varepsilon$ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 4 mm.....	20
Slika 27. Ovisnost vlačnog modula elastičnosti o debljini stijenke PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana.....	22
Slika 28. GOM Correlate – savijanje u 3 točke.....	23
Slika 29. Savijanje u tri točke prema normi HRN EN ISO 178.....	24
Slika 30. Dijagram sila – progib dobiven testom savijanja u tri točke za epruvetu debljine 0,5 mm.....	24
Slika 31. Dijagram sila – progib dobiven testom savijanja u tri točke za epruvete debljine 1, 1,5 i 2 mm.....	25
Slika 32. Dijagram sila – progib dobiven testom savijanja u tri točke za epruvete debljine 2,5, 3, 3,5 i 4 mm.....	25
Slika 33. Dijagramska usporedba savojnog i vlačnog modula elastičnosti u ovisnosti o debljini stijenke PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana	27
Slika 34. 3D element C3D8 [12].....	29

Slika 35. 2D element S4R [12].....	29
Slika 36. Pocan B3235 000000 [14].....	30
Slika 37. Model korišten za simulaciju savijanja u tri točke.....	30
Slika 38. Mreža konačnih elemenata – tri oslonca.....	31
Slika 39. Mreža konačnih elemenata epruvete – 656 C3D8 elementa.....	31
Slika 40. Mreža konačnih elemenata epruvete – 4488 C3D8 elementa.....	32
Slika 41. Mreža konačnih elemenata epruvete – 30016 C3D8 elementa.....	32
Slika 42. Konvergencija mreže konačnih elemenata	33
Slika 43. Mreža konačnih elemenata – epruveta debljine 0,5 mm.....	34
Slika 44. Mreža konačnih elemenata – epruveta debljine 2 mm.....	34
Slika 45. Mreža konačnih elemenata – epruveta debljine 4 mm.....	34
Slika 46. Dijagram sila-pomak dobiven numeričkom simulacijom – debljina epruvete 0,5 mm	35
Slika 47. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 0,5 mm – materijal Pocan B3235 000000 LANXESS	37
Slika 48. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 0,5 mm – materijal dobiven eksperimentalnim ispitivanjima	37
Slika 49. Dijagram sila – progib dobiven numeričkom simulacijom – epruveta debljine 2 mm	38
Slika 50. Dijagram sila – progib dobiven numeričkom simulacijom – epruveta debljine 4 mm	38
Slika 51. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 2 mm – materijal dobiven eksperimentalnim ispitivanjima	40
Slika 52. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 2 mm – materijal Pocan B3235 000000 LANXESS	40
Slika 53. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 4 mm – materijal dobiven eksperimentalnim ispitivanjima	41
Slika 54. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 4 mm – materijal Pocan B3235 000000 LANXESS	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije epruvete prema normi HRN EN ISO 527-2	6
Tablica 2. Izmjerene dimenzije pravokutnih presjeka vrata epruvete.....	6
Tablica 3. Vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 0,5 mm	17
Tablica 4. Vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana	21
Tablica 5. Savojni modul elastičnosti PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana	26
Tablica 6. Broj konačnih elemenata ovisno o debljini epruvete	33
Tablica 7. Vrijednosti sila u odnosu na progib epruvete debljine 0,5 mm.....	36
Tablica 8. Vrijednosti sila u odnosu na progib epruvete debljine 2 mm.....	39
Tablica 9. Vrijednosti sila u odnosu na progib epruvete debljine 4 mm.....	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
σ	N/mm ²	Naprezanje
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
ε	mm/mm	Deformacija
b_1	mm	Širina vrata epruvete
b_2	mm	Širina krajeva epruvete
r_1	mm	Mali radijus epruvete
r_2	mm	Veliki radijus epruvete
h	mm	Debljina vrata epruvete
l_1	mm	Duljina vrata epruvete
l_3	mm	Ukupna duljina epruvete
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
w	mm	Progib epruvete
F	N	Sila postignuta pri progibu epruvete w
ε_f	N/mm ²	Deformacija prilikom naprezanja σ_f
σ_f	N/mm ²	Naprezanje izmjereno pri deformaciji ε_f
E_f	N/mm ²	Svojni modul elastičnosti
L	mm	Razmak između dvije čeljusti naprave

SAŽETAK

Ovaj završni rad osmišljen je kao suradnja s tvrtkom Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb. Tema rada je provesti eksperimentalno ispitivanje polimernog materijala polibutilen tereftalata (PBT) dodatno ojačanog s 30% staklenih vlakana. Kako stijenke električnih konektora, koji su glavni proizvod Yazake Europe Limiteda, podružnica Zagrebu, često imaju malu debljinu stijenke (manju od 1 mm) te kako staklena vlakna povećavaju čvrstoću i krutost, no negativno utječu na krhkost, potrebno je provesti istraživanje utjecaja debljine stijenke na mehanička svojstva navedenog polimernog materijala. Materijalni podatci koji se koriste prilikom provedne računalnih analiza, kao što su lomna čvrstoća i lomno istezanje dobiveni su laboratorijskim ispitivanjem proizvođača. No, proizvođač provodi laboratorijska ispitivanja na uzorcima (epruvetama) debljine 4 mm, što je znatno veća dimenzija u odnosu na već spomenute proizvode (konektore). Sukladno tome, u početku rada opisana su mehanička svojstva polimernih materijala i što sve na njih utječe. U nastavku su opisane najprimjenjenije metode ispitivanja mehaničkih svojstva materijala, a to su statički vlačni test i test savijanja u tri točke. Eksperimentalna ispitivanja provedena su uz nadležnost i prisustvo stručne osobe, te se postupak i analiza dobivenih rezultata nalazi u 3. poglavlju. Mehanička svojstva koja su u navedenom poglavlju izračunata koriste se u sljedećem poglavlju koji se bavi numeričkim proračunom testa savijanja u tri točke. Računalna simulacija je izvedena primjenom programskog paketa Abaqus® koji se temelji na metodi konačnih elemenata (MKE). Uvodni dio navedenog poglavlja posvećen je općenito formulaciji metode konačnih elemenata, te njenim svojstvima i primjeni. Također, prikazani su i opisani konačni elementi koji će biti korišteni u numeričkoj simulaciji. Nadalje, prikazane su dimenzije, materijalne postavke i rubni uvjeti numeričkog proračuna i u konačnici grafička obrada samih rezultata. U posljednjem, 5. poglavlju, doneseni su svi zaključci na temelju prikazanih rezultata.

Ključne riječi:

polibutilen tereftalat (PBT), staklena vlakna, debljina stijenke, mehanička svojstva, statički vlačni test, test savijanja u tri točke, Abaqus®, numerička simulacija, metoda konačnih elemenata (MKE)

SUMMARY

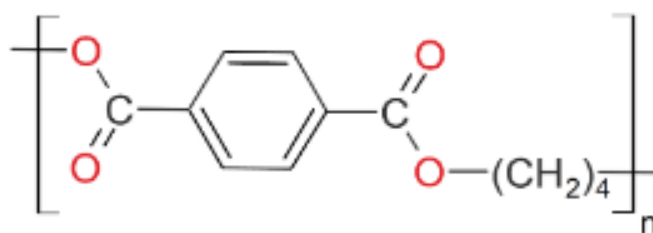
This paper was envisioned as a collaboration with the company Yazaki Europe Limited, branch office Zagreb. The topic of the work is to perform experimental test of the polymer material polybutylene terephthalate (PBT) additionally reinforced with 30% glass fibers. Since the walls of electrical connectors, which are the main product of Yazaki Europe Limited, branch office Zagreb, often have a small wall thickness (less than 1 mm) and since glass fibers increase strength and stiffness, but have a negative effect on fragility, it is necessary to conduct research of the influence of wall thickness on mechanical properties of the specified polymer material. Material data that are used when performing computer analyses, such as stress at break and strain at break, were obtained by the manufacturer's laboratory testing. However, the manufacturer conducts laboratory tests on samples (tubes) with a thickness of 4 mm, which is significantly larger than the already mentioned products (connectors). In accordance with that, beginning of work is dedicated to description of mechanical properties and what influenced them the most. After that, the most applied methods of testing mechanical properties of materials, static tensile test and three point bending, are presented. All experimental tests were carried out with the competence and presence of an expert, and the procedure and analysis of the obtained results can be found in chapter 3. The mechanical properties calculated previously are also used in next chapter, which deals with the numerical calculation of three point bending test. The computer simulation was performed using the Abaqus® software package, which is based on the finite element method (FEM). The introductory part of the mentioned chapter is devoted to the general formulation of the finite element method, as well as its properties and application. Also, the finite elements that have been used in the numerical simulation are presented and described. Furthermore, the dimensions, material settings and boundary conditions of the numerical calculation and finally the graphic processing of the results are presented. In the last, fifth chapter, conclusions are drawn based on the presented results.

Key words:

polybutylen terephthalate (PBT), glass fibres, wall thickness, mechanical properties, static tensile test, three poing bending, Abaqus®, numerical simulation, finite element method (FEM)

1. UVOD

Polimeri su tvari čija je osnovna strukturna jedinica makromolekula. Makromolekula je molekula sastavljena od velikog broja ponavljanih strukturnih jedinica tzv. mera. Polimeri se razvrstavaju na više načina, no najkorištenija raspodjela jest raspodjela prema vrsti veza između makromolekula i ponašanju pri zagrijavanju. Prema toj podjeli postoje plastomeri (termoplasti), duromeri (duroplasti) i elastomeri [1]. Plastomeri su oni polimeri kojima su makromolekule međusobno povezane isključivo sekundarnim vezama, te obzirom na karakter sekundarnih veza postupak omekšavanja i očvršćivanja se kod navedenih polimera može teorijski stalno ponavljati. Za razliku od plastomera, elastomeri su uz sekundarne veze, djelomično umreženi i pomoću primarnih veza. Zbog prisustva sekundarnih veza, elastomere se kao i plastomere može omekšati, no zbog prisustva primarnih veza oni se ne mogu rastaliti. Duromeri imaju potpuno umreženu strukturu, odnosno makromolekule kod duromera su isključivo povezane primarnim vezama. Posljedica toga je da se duromeri ne mogu omekšati niti rastaliti, te su uz to i otporni na povišene temperature. Polimerni materijal koji će se obrađivati u ovom radu je polibutilen tereftalat (PBT) i spada u skupinu termoplasta. PBT je zbog svojih dobrih električnih i mehaničkih svojstava jako popularan izbor u automobilskoj i električnoj industriji, te se koristi u izradi auto odbojnika, brisača, ručica vrata te različitih električnih konektora. Dobiva se polimerizacijom butandiola i tereftalne kiseline, te je po strukturi vrlo sličan polietilen tereftalatu (PET), a razlikuju se u broju metilenskih (CH₂) skupina prisutnih u ponavljajućim jedinicama polimernih molekula, kao što je prikazano na [Slika 1].



Slika 1. Kemijska struktura polibutilen tereftalata [2]

Što se tiče mehaničkih svojstava, PBT karakterizira visoka čvrstoća i krutost u različitim atmosferskim uvjetima, otpornost na visoke temperature i starenje uzrokovano visokim temperaturama. Nadalje, ono što ga čini jako popularnim u električnoj industriji su jako dobra električna svojstva, stabilnost boje, niska higroskopsnost, otpornost na kemikalije i dobar površinski sjaj. U tvrtki Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb, koju karakterizira proizvodnja električnih konektora, PBT je zbog svega ranije navedenog često korišten. Ovisno

o potrebama i zahtjevima mehanička svojstva PBT-a se mogu dodatno poboljšati ojačanjem staklenim vlaknima, koja su karakteristična po visokoj čvrstoći, otpornosti na kemikalije, dobrim izolacijskim svojstvima i nisu gorivi. Posljedica ojačavanja staklenim vlaknima je povećanje krutosti, čvrstoće ali i krhkosti. U ovom radu razmatrati će se PBT ojačan s 30% staklenih vlakana te će se eksperimentalno pokazati utjecaj debljine stijenke na mehanička svojstva materijala.

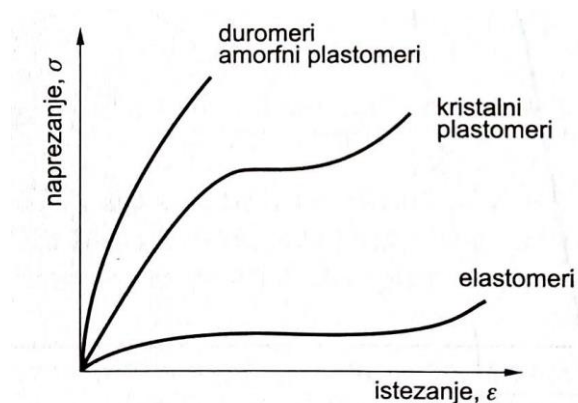
2. MEHANIČKA SVOJSTVA POLIMERA

2.1. Tipovi mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva materijala, pa tako i polimera, obuhvaćaju široku paletu vrlo važnih fizičkih ponašanja do kojih dolazi uslijed djelovanja vanjskih opterećenja. Princip linearne elastičnosti je među bitnijim mehaničkim svojstvima na koje treba obratiti pozornost. Karakteristično je po tome što uslijed djelovanja relativno malih opterećenja i rasterećenja istih materijal se vrati u svoje prvobitno stanje. Ponašanje materijala za koje navedena karakteristika vrijedi zove se Hooke-ov pravac čija jednadžba za jednodimenzijski problem glasi:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E. \quad (2.1)$$

Gdje je σ [N/mm²] naprezanje, E [N/mm²] Youngov modul elastičnosti i ε [mm/mm] deformacija. Generalno, mehanička svojstva polimernog materijala mogu se opisati na sličan način kao i mehanička svojstva čelika, a to je putem Youngovog modula elastičnosti, vlačne čvrstoće i granice tečenja. Youngov modul elastičnosti, odnosno konstanta E predstavlja svojstvo materijala koje ovisi direktno o jačini veze između atoma i/ili molekula u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi [3]. Vlačna ili rastezna čvrstoća predstavlja naprezanje kod maksimalne sile, no osim vlačne čvrstoće polimerni materijal može biti opisan pomoću tlačne, savojne, uvojne i smične čvrstoće. Granica tečenja je ono naprezanje kod kojeg materijal počne teći bez povećanja naprezanja. Nakon što materijal pređe granicu tečenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Sve navedene mehaničke karakteristike materijala rezultat su eksperimentalnih testiranja čiji rezultati oblikuju najvažniji dijagram kod opisivanja mehaničkih svojstva polimera, a to je dijagram naprezanje-istezanje ($\sigma - \varepsilon$ dijagram). Na [Slika 2] prikazan je opći oblik krivulja na $\sigma - \varepsilon$ dijagramu određenih polimernih skupina.



Slika 2. Karakteristični oblici dijagrama $\sigma - \varepsilon$ osnovnih skupina polimernih materijala [1]

2.2. Statički vlačni test

Najčešća metoda određivanja mehaničkih svojstva polimernih materijala je vlačni test. Testiranje se provodi na stroju koji se naziva kidalica, a ispitni uzorci koji se opterećuju na vlak nazivaju se epruvete. U tekstu koji slijedi opisana je priprema epruveta za ispitivanje i sve ostale postavke potrebne za razumijevanje rada.

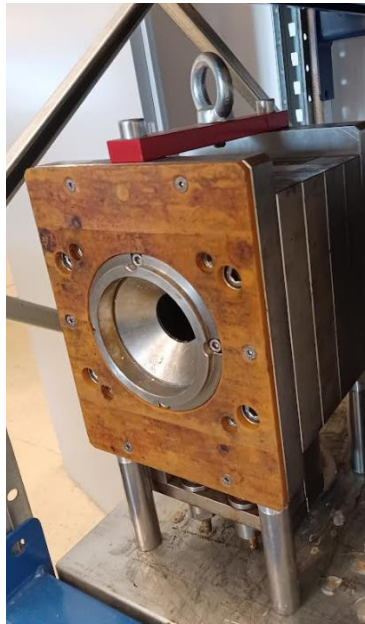
2.2.1. Priprema epruveta za ispitivanja

U okviru ovoga rada provode se eksperimentalna istraživanja mehaničkog ponašanja PBT-a na epruvetama koje su dobivene injekcijskim prešanjem. Injekcijsko prešanje je najvažniji ciklički postupak praoblikovanja ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu. Polimer poprima oblik kalupne šupljine te hlađenjem postaje podoban za vađenje iz kalupa. Na [Slika 3] prikazane su granule PBT materijala koje se nakon taljenja brizgaju u kućište kalupa i popunjavaju kalupnu šupljinu.



Slika 3. Granule PBT materijala

Na [Slika 4] prikazan je alat, odnosno kućište kalupa koji će se koristiti za izradu epruveta potrebnih za ovo eksperimentalno istraživanje, dok je na [Slika 5] prikazan umetak za alat, odnosno kalup iz kojeg kao rezultat izlaze 4 epruvete unaprijed propisanih debljina.



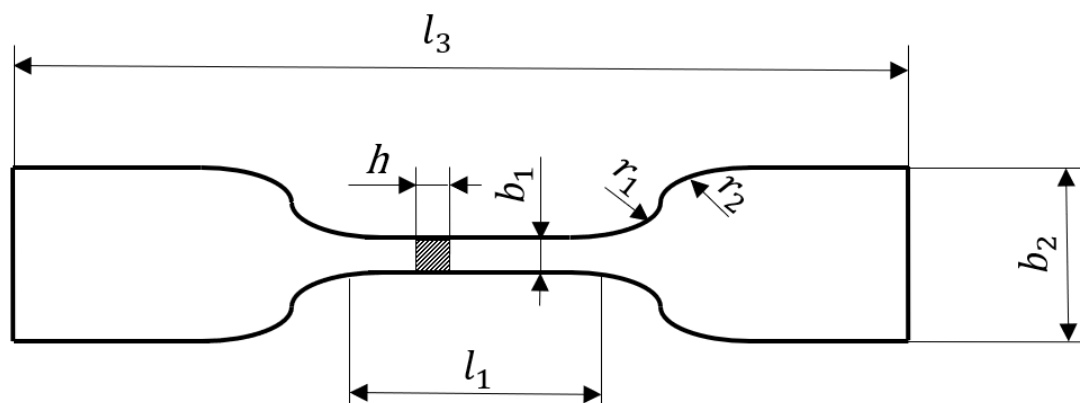
Slika 4. Kučište kalupa



Slika 5. Kalup

Dimenzije epruveta su bazirane prema normi HRN EN ISO 527-2, gdje je standardom određena dimenzija male epruvete debljine 1 mm [4]. Tema rada je istraživanje utjecaja debljine stijenke na mehanička svojstva PBT-a pa će se zbog toga imati epruvete izrađene u 8 različitih debljina (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; i 4 mm) uz napomenu kako je duljina vrata epruveta konstantna.

Na [Slika 6] prikazana je skica plosnate epruvete pravokutnog poprečnog presjeka ($b_1 \times h$) napravljena po uzoru na ranije navedenu normu. Na priloženoj slici l_1 predstavlja duljinu vrata epruvete i l_3 predstavlja ukupnu duljinu epruvete dok je veličina h debljina epruvete. Veličine b_1 i b_2 predstavljaju širinu vrata, odnosno širinu krajeva epruvete, a r_1 i r_2 su mali odnosno veliki radijus.



Slika 6. Epruveta pravokutnog poprečnog presjeka $b_1 \times h$ [mm x mm]

Dimenzije normirane za epruvetu debljine 1 mm prikazane su u [Tablica 1].

Oznaka	Opis oznake	Iznos u mm
l_1	Duljina vrata	$12 \pm 0,5$
l_3	Ukupna duljina	≥ 35
h	Debljina	$1 \pm 0,1$
b_1	Širina vrata	$2 \pm 0,1$
b_2	Širina krajeva	$6 \pm 0,5$
r_1	Mali radijus	$3 \pm 0,1$
r_2	Veliki radijus	$3 \pm 0,1$

Tablica 1. Dimenzije epruvete prema normi HRN EN ISO 527-2

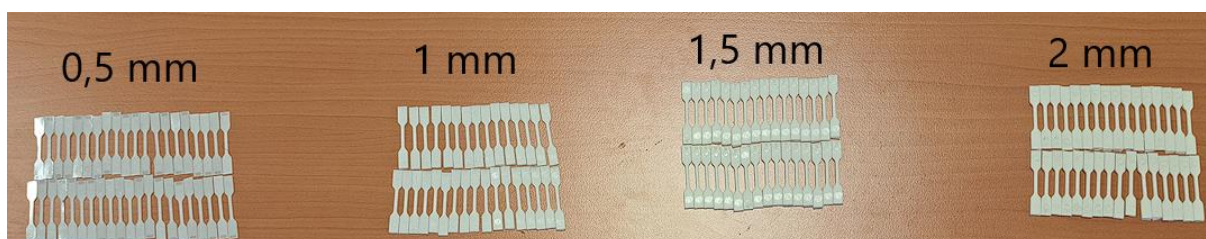
Prilikom dizajniranja kalupa za izradu epruveta, potrebno je voditi računa da polimerni materijali mogu imati određene devijacije u dimenzijama. Devijacije nastaju zbog svojstva „skupljanja“ (eng. *shrinkage*) polimernog materijala. Do skupljanja dolazi prilikom hlađenja otpresaka, u ovom slučaju epruveta, nakon procesa injekcijskog prešanja opisanog u prethodnom poglavlju. Iz tog su razloga epruvete dodatno izmjerene digitalnim pomičnim mjerilom. Izmjerene dimenzije prikazane su u [Tablica 2].

Tablica 2. Izmjerene dimenzije pravokutnih presjeka vrata epruvete

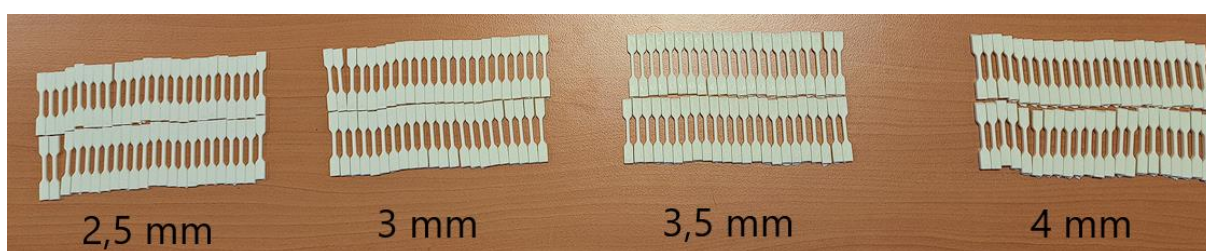
PBT	Izmjerena dimenzija pravokutnog presjeka vrata epruvete $b_1 \times h$ [mm x mm]							
30%	0,48x2,02	0,99x2,03	1,5x2,06	1,98x2,08	2,48x2,09	2,98x2,12	3,48x2,14	3,95x2,16

Iz [Tablica 2] može se zaključiti da su maksimalna odstupanja od zadanih debljina prosječno $\pm 0,03$ mm te će se stoga prilikom obrade rezultata i to uzeti u obzir.

Na [Slika 7] i [Slika 8] prikazane su sve epruvete koje su izrađene i razvrstane po debljini. U dogovoru sa kolegama iz tvrtke Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb, testiranje će se provesti na 3 uzorka od svake debljine, odnosno 24 epruvete će biti potvrđene statičkom vlačnom testu.



Slika 7. Epruvete razvrstane po debljini (0,5 do 2 mm)



Slika 8. Epruvete razvrstane po debljini (2,5 do 4 mm)

Nakon razvrstavanja, epruvete je potrebno posebno pripremiti nanošenjem rastera, odnosno stohastičkog uzorka. Na površinu epruvete potrebno je najprije nanijeti sloj bijelog mat laka kako bi se uklonile refleksije, a nakon toga nanosi se crni stohastički raster. Crni raster mora biti nanesen tako da na mjernom području, vratu epruvete, budu jasno vidljive točke koje će se promatrati optički. Takva metoda mjerenja raspodjele pomaka na površini epruvete naziva se korelacija digitalne slike (eng. *Digital Image Correlation – DIC*) [5]. U svrhu ovog testiranja koristit će se 2D DIC metoda (jedna kamera), no postoji još i 3D DIC metoda u kojoj su aktivne dvije kamere. Primjenom 2D DIC metode, kamera snima i registrira skup slika koje opisuju cijelo polje pomaka. Iz polja pomaka koristeći se računalnim alatom GOM Correlate® [6] računa se polje deformacija. Primjenom kalibracijskih algoritama, rezultati dobiveni na kidalici i rezultati dobiveni 2D DIC metodom implementiraju se u konačni $\sigma - \varepsilon$ dijagram iz kojeg se mogu odrediti glavna mehanička svojstva ispitnog uzorka. Na [Slika 9] prikazane su epruvete

pripremljene za nanošenje rastera, dok je na [Slika 10] prikaz epruvete pripremljene za testiranje.

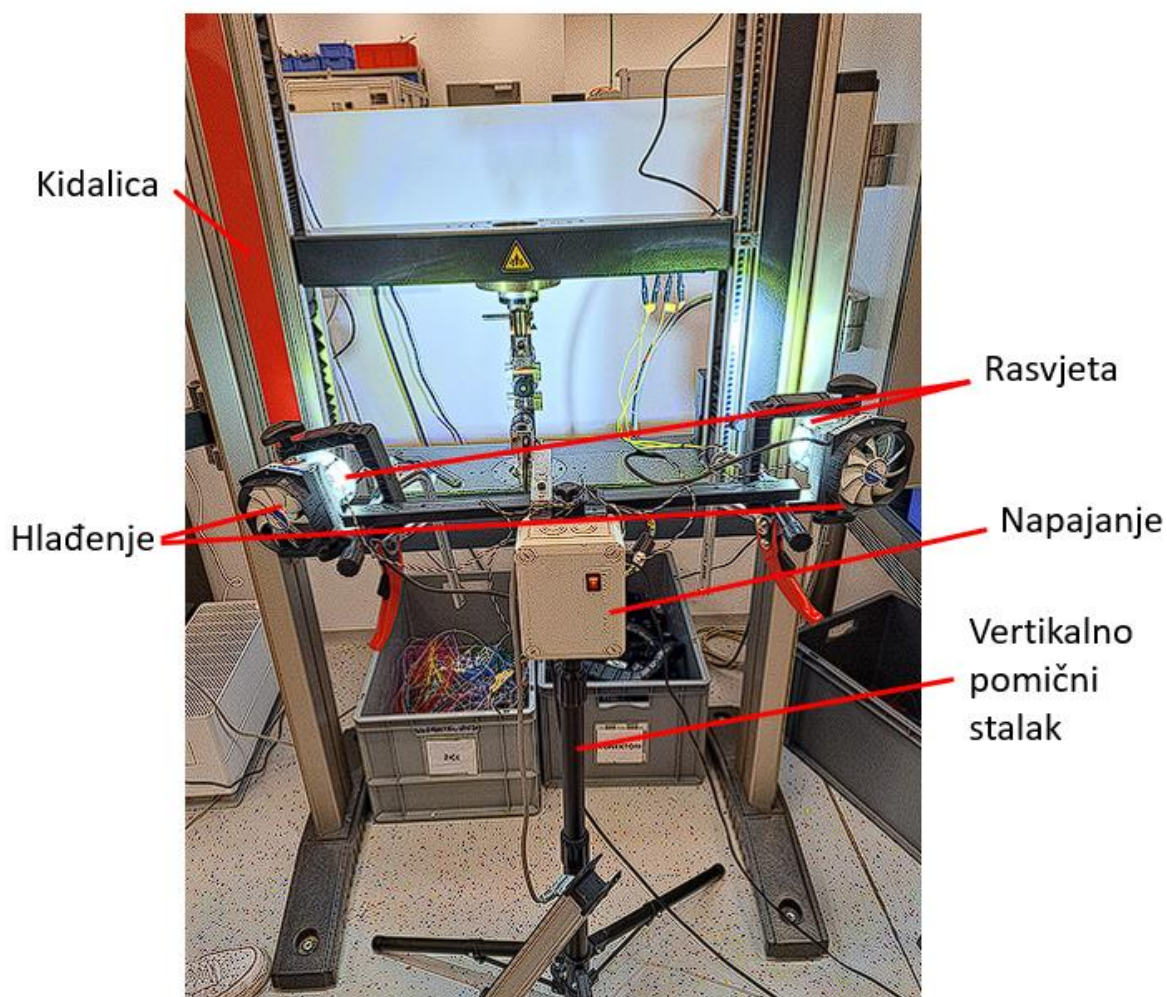


Slika 9. Epruvete pripremljene za nanošenje rastera

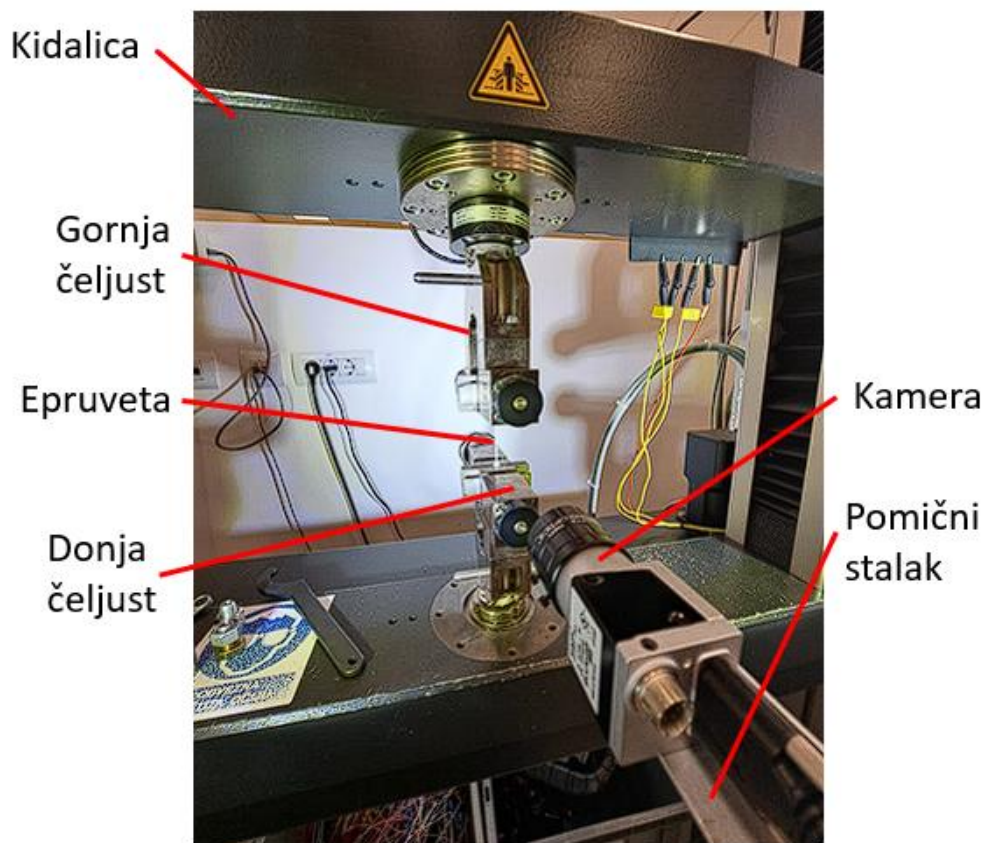


Slika 10. Epruveta spremna za vlačni test

Ispitna konfiguracija za statički vlačni test prikazana je na [Slika 11]. Sastoji se od kidalice (Zwick roell Z010 [7]) maksimalne vlačne sile 10 kN, kamere za snimanje polja pomaka epruvete i stalka na kojem se nalazi rasvjeta, napajanjem i hlađenje sustava. Konfiguracijski stalak je pomičan po vertikalnoj osi te služi za namještanje pozicije kamere kako bi se osigurala preciznost snimanja polja pomaka epruvete.



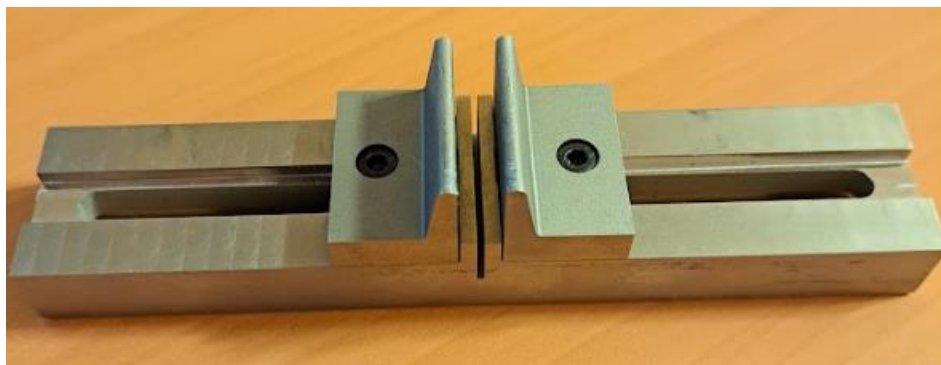
Slika 11. Konfiguracija statičkog vlačnog testa



Slika 12. Vlačni test

2.3. Test savijanja u tri točke (eng. *Three point bending test*)

Testom savijanja u tri točke dobivaju se podaci o savojnom modulu elastičnosti, naprezanju i deformacijama prilikom savijanja te u konačnici dijagram naprezanje-istezanje za savojno opterećenje. Za provedbu testa dizajnirana je naprava prikladna za naše dimenzije epruveta. Naprava je prikazana na [Slika 13], a sastoji se od dvije čeljusti čvrsto povezanih vijkom i maticom s pripadajućim postoljem.



Slika 13. Naprava za test savijanja u tri točke

Na [Slika 14] prikazan je potisnik koji predstavlja jedini pokretni dio naprave. On svojim gibanjem vertikalno prema dolje savija ispitni uzorak, te je tretiran slojem rastera kao i epruvete.



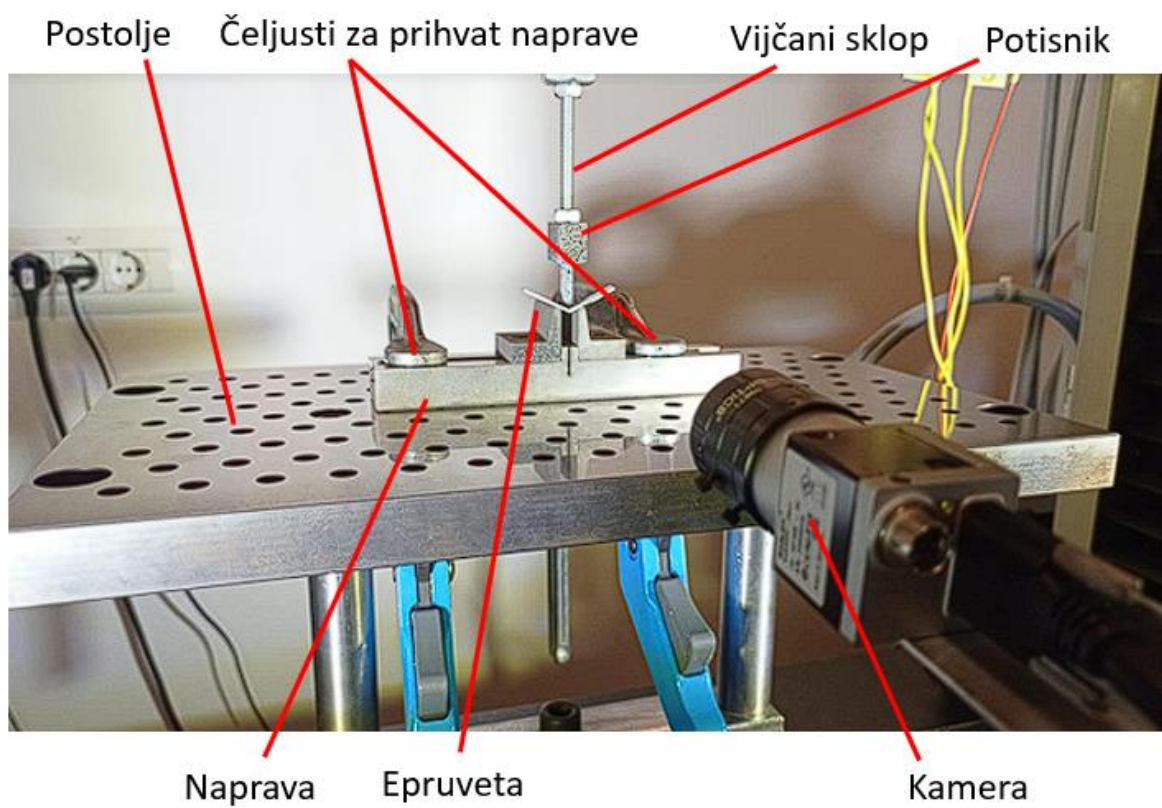
Slika 14. Potisnik sa nanesenim raster slojem

Priprema epruveta za testiranje izvodi se isto kao i priprema za statički vlačni test uz jednu iznimku. Za test savijanja raster sloj potrebno je nanijeti po boku epruvete odnosno po debljini stijenke ispitnog uzorka. Prilikom testiranja koristit će se 24 epruvete (3 za svaku debljinu) kao što je to bio slučaj kod statičkog vlačnog testa. Prikaz epruvete pripremljene za test savijanja u 3 točke nalazi se na [Slika 15].



Slika 15. Epruveta pripremljena za test savijana u tri točke

Postolje naprave prilikom testiranja je uklješteno i nepomično, a potisnik se pritiskom silom kidalice, preko vijčanog spoja giba vertikalno prema dolje. Prikaz konfiguracije testa savijanja u tri točke prikazan je na [Slika 16].



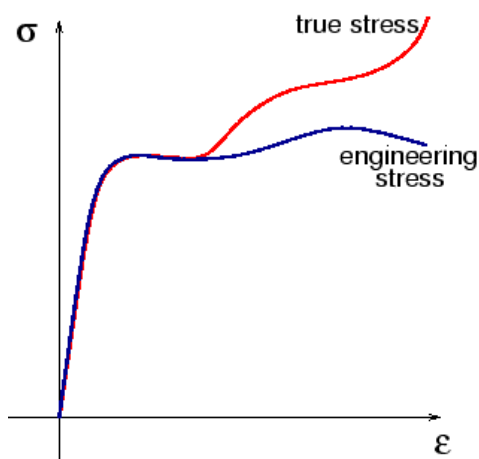
Slika 16. Konfiguracija testa savijanja u tri točke

3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE MATERIJALA

U sljedećim poglavljima bit će prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja PBT materijala. Eksperimentalna ispitivanja provedena su u tvrtki Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb na kidalici Zwick roell Z010 [7] maksimalne sile 10 kN, uz prisustvo i asistenciju stručne osobe.

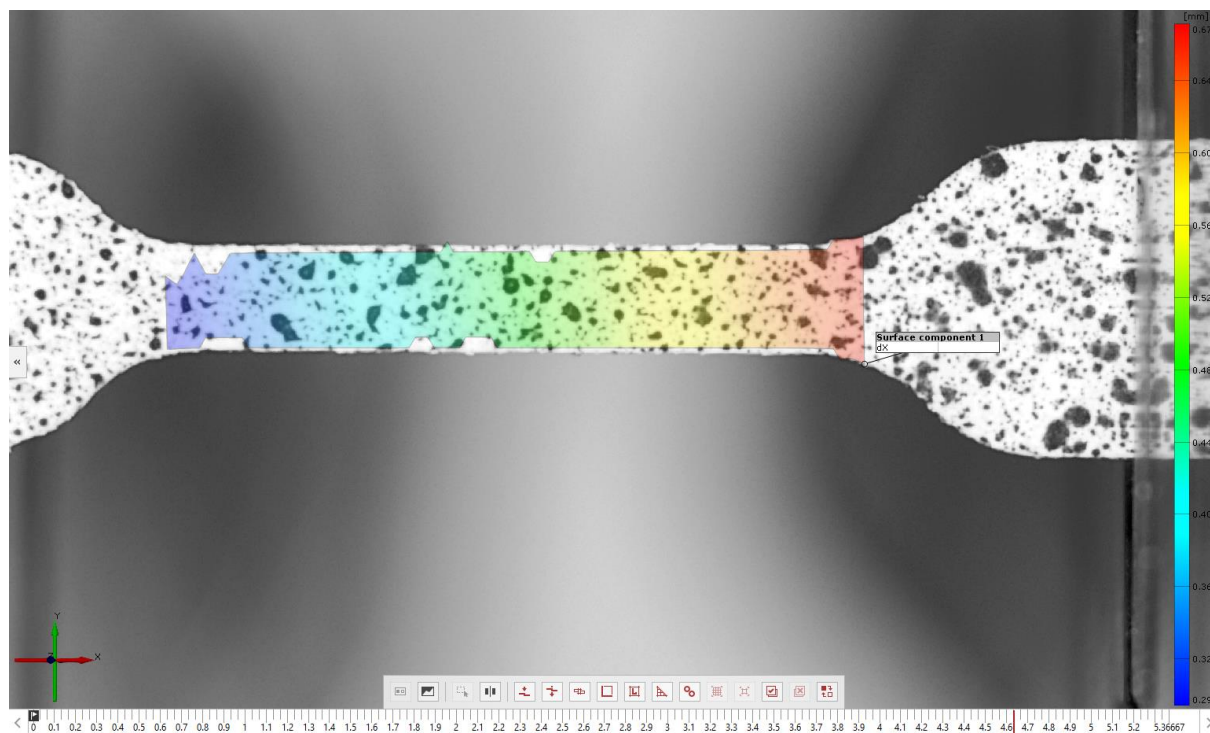
3.1. Statički vlačni test PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana

Mehanička svojstva kompozitnog materijala najčešće se određuju u uvjetima jednoosnog naprezanja, odnosno pomoću statičkog vlačnog pokusa opisanim u prethodnom poglavlju. Prije početka ispitivanja potrebno je pomoću software-a testXpert® [8] podesiti početnu poziciju tako da eliminiramo prednaprezanja uslijed pritiska čeljusti koje osiguravaju epruvetu od pomicanja. Osim toga, potrebno je i namjestiti brzinu ispitivanja, koja će u ovom slučaju biti 5 mm/min. Tijekom ispitivanja software testXpert® kontinuirano mjeri silu i produljenje epruvete i grafički prikazuje dijagram sila-produljenje. Kako bismo izračunali traženu inženjersku krivulju naprezanje-deformacija potrebno je silu podijeliti sa odgovarajućom početnom površinom epruvete, te je produljenje potrebno podijeliti s duljinom vrata epruvete. Pojam inženjerska krivulja naprezanje-deformacija proizlazi iz pretpostavke da su poprečni presjeci nedeformabilni, odnosno njihova deformacija ne utječe na rezultate u tolikoj mjeri da bismo je uključili u ovaj eksperiment. Zanemarivanjem pretpostavke nedeformabilnosti rezultiralo bi stvarnom krivuljom naprezanje-deformacija, čija bi analiza izašla van okvira ovog završnog rada. Na [Slika 17] prikazana je dijagramska usporedba inženjerske i stvarne krivulje $\sigma - \varepsilon$.



Slika 17. Razlika između inženjerske i stvarne krivulje naprezanje-deformacija [9]

Kao što je opisano u prethodnim poglavljima, pomaci će se prilikom ovog testiranja mjeriti 2D DIC metodom, te će se pomoću software-a GOM Correlate® izračunavat deformacije [Slika 18]. Nadalje, iz dobivenih podataka izračunavat će se pripadajući vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća.



Slika 18. Određivanje deformacija pomoću GOM Correlate

Vlačni testovi bazirani su prema normi HRN EN ISO 527-2 [4], koja je posvećena uvjetima ispitivanja i standardnim veličinama epruveta. Razlika je u tome što su prema navedenoj normi definirane standardne epruvete debljine 1 mm, dok je nama potrebno još 7 preostalih debljina ranije navedenih u potpoglavlju 2.2.1. Prilikom analize rezultata potrebno je uzeti u obzir da će kod navedenih 7 preostalih epruveta doći do odstupanja od norme HRN EN ISO 527-2. Razlog tome je što će se u ovom radu dimenzijska varijabla duljine vrata epruvete zadržati konstantnom, kako bismo sve testove savijanja u 3 točke, koji je opisan u sljedećem poglavlju, mogli provesti na napravi prikazanoj na [Slika 13]. Navedenom normom također je definirano i mjerno područje epruvete i ono iznosi $10 \pm 0,5$ mm. Vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća određeni su prema normi HRN EN ISO 527-1, u čijem je 10. poglavlju detaljno opisana analiza rezultata [10]. Između ostalog, pronalazi se i jednadžba za računanje vlačnog modula elastičnosti koja zapravo predstavlja nagib pravca koji prolazi kroz dvije točke koje se nalaze u linearnom području ponašanja materijala. Jednadžba glasi:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.1)$$

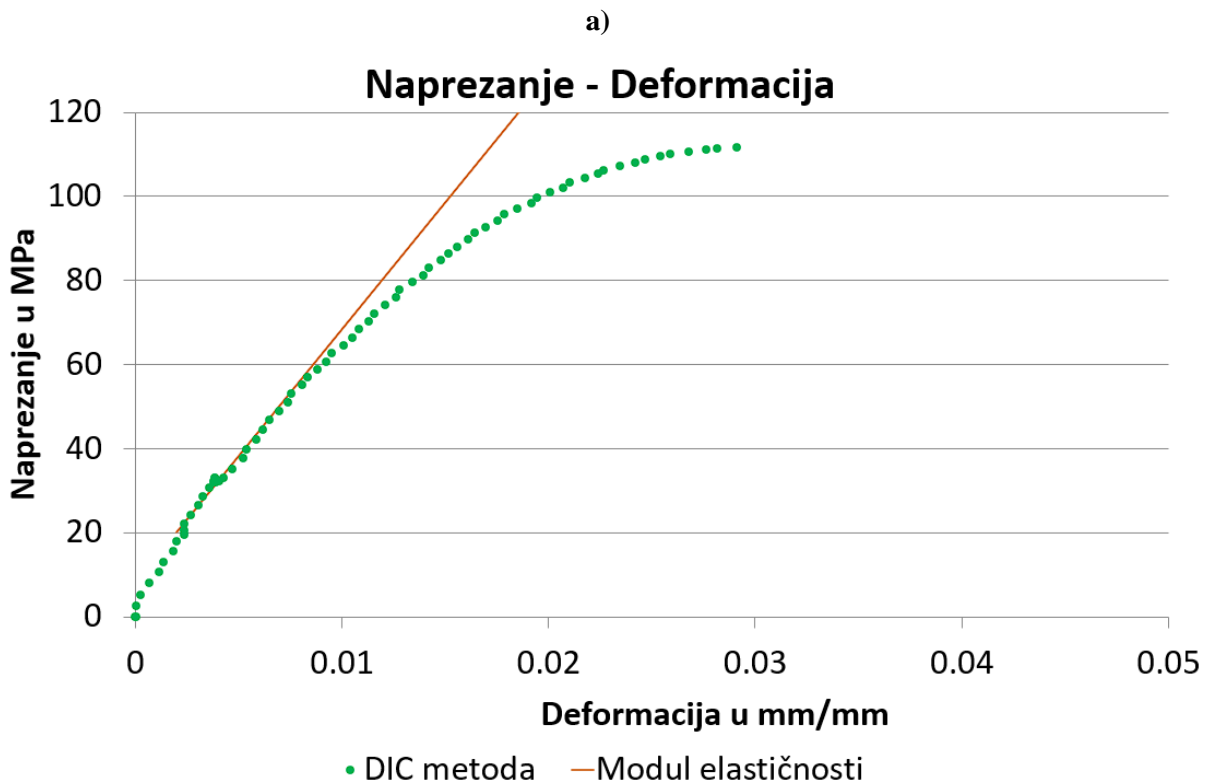
Gdje je:

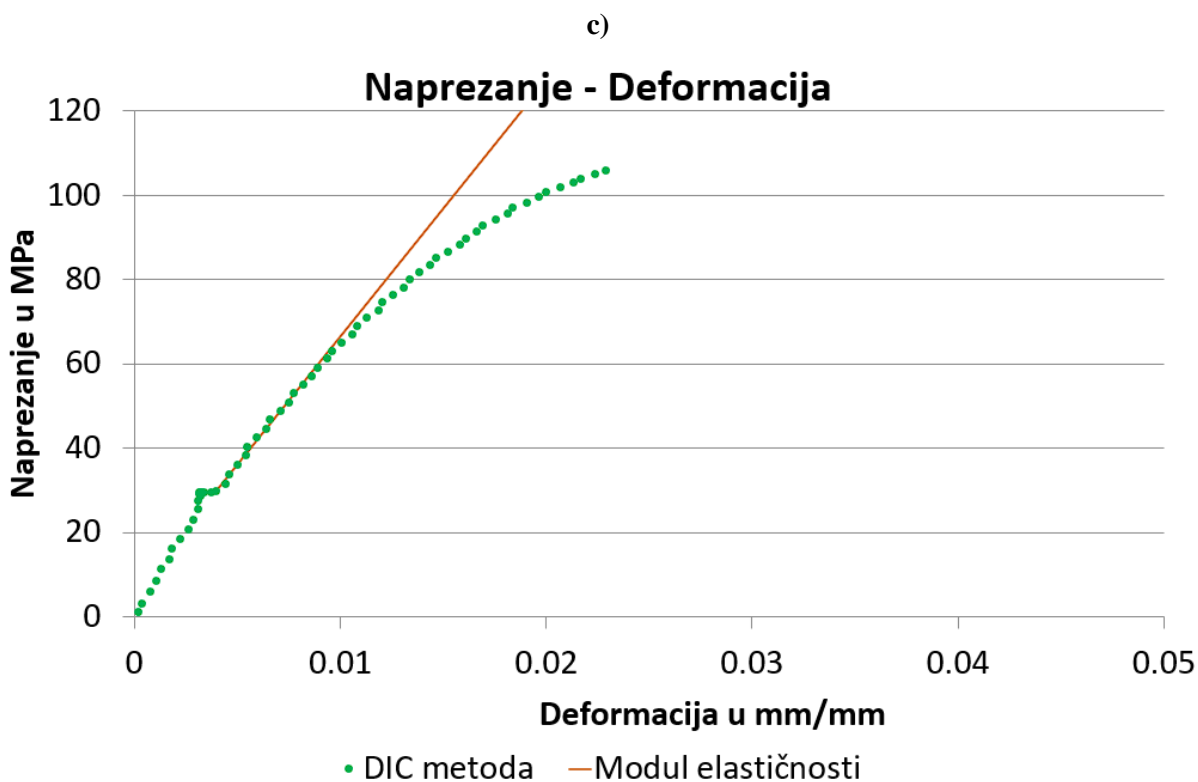
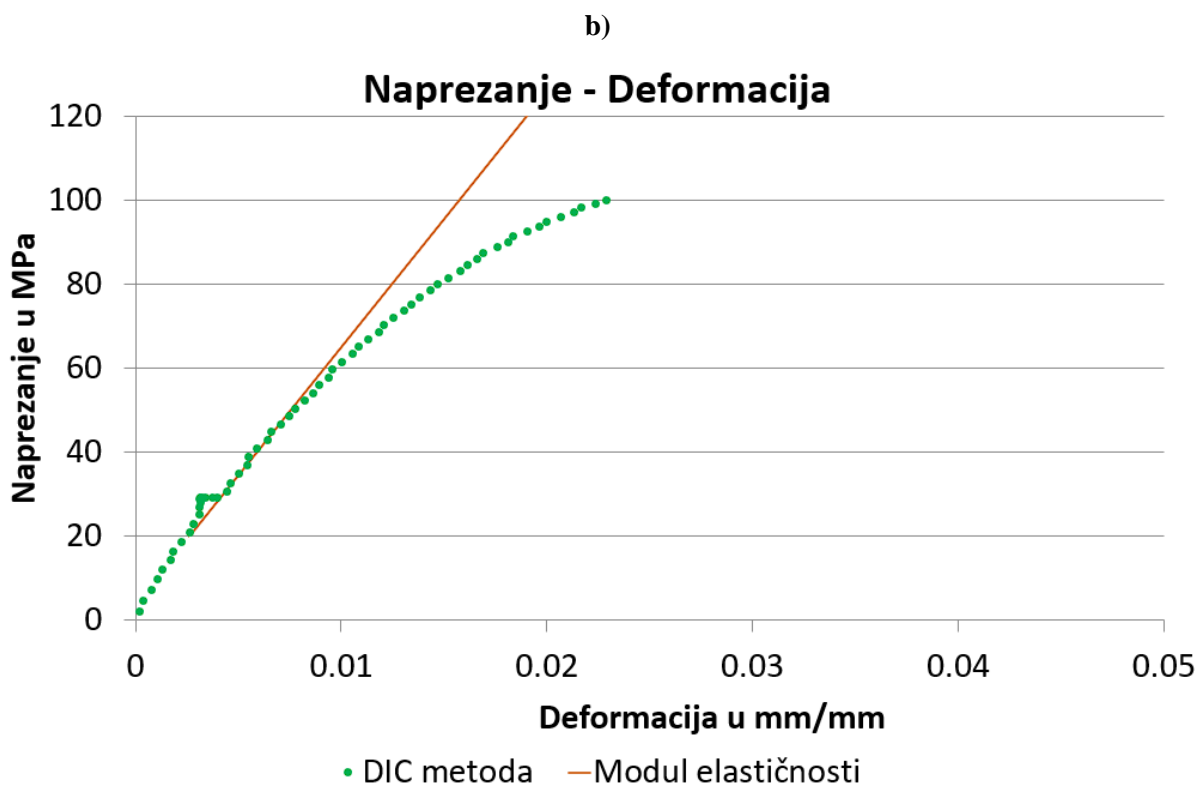
E_t – vlačni modul elastičnosti izražen u MPa

σ_1 – naprezanje izraženo u MPa, izmjereno za vrijednosti deformacije $\varepsilon_1=0,0005$ (0,05%)

σ_2 – naprezanje izraženo u MPa, izmjereno za vrijednosti deformacije $\varepsilon_2=0,0025$ (0,25%)

Na [Slika 19] prikazani su rezultati ispitivanja PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana debljine 0,5 mm u obliku dijagrama naprezanje-deformacija te je prikazan pravac pomoću kojeg je određen vlačni modul elastičnosti.





Slika 19. Dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana, debljine 0.5 mm, epruveta: a) S1, b) S2 i c) S3

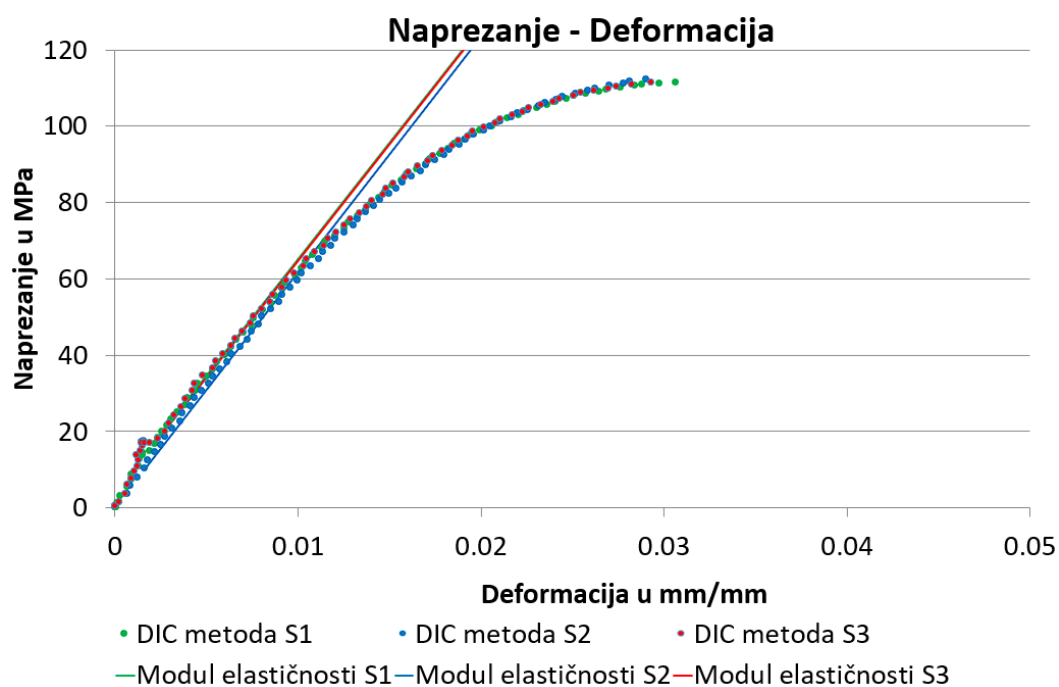
U [Tablica 3] prikazana su rješenja dobivena pomoću norme HRN EN ISO 527-1 za epruvetu debljine 0,5 mm. Vrijednosti prikazane u [Tablica 3] i [Tablica 4] koristiti će se za opisivanje mehaničkih svojstava materijala prilikom numeričkog proračuna koji je prikazan u poglavlju 4.

Tablica 3. Vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 0,5 mm

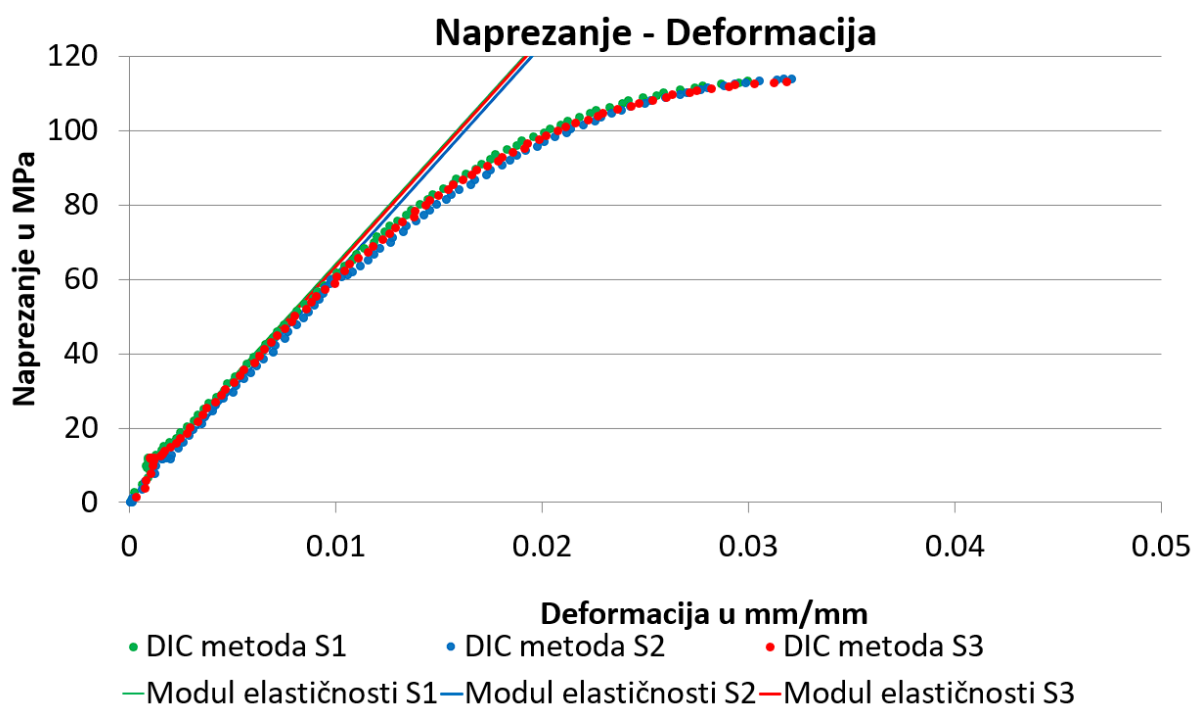
	PBT 30% S.V. 0,5 mm			
	S1	S2	S3	Prosjek
E [N/mm ²]	6034,48	6097,6	6071,4	6067,83
R_m [N/mm ²]	112	107,18	108,92	109,37

Iz [Tablica 3] vidljivo je da rezultati dobiveni za svaki pojedinačni uzorak odstupaju maksimalno 0,5% od prosječne vrijednosti sva tri uzorka. Sukladno tome, u nastavku rada prikazan će biti samo jedan graf za svaku debljinu epruvete. Svaki graf sadržavati će međusobnu usporedbu tri ispitna uzorka iste debljine, a vrijednosti vlačnog modula elastičnosti i vlačne čvrstoće će se nastaviti prikazivati tablično kao i u [Tablica 3].

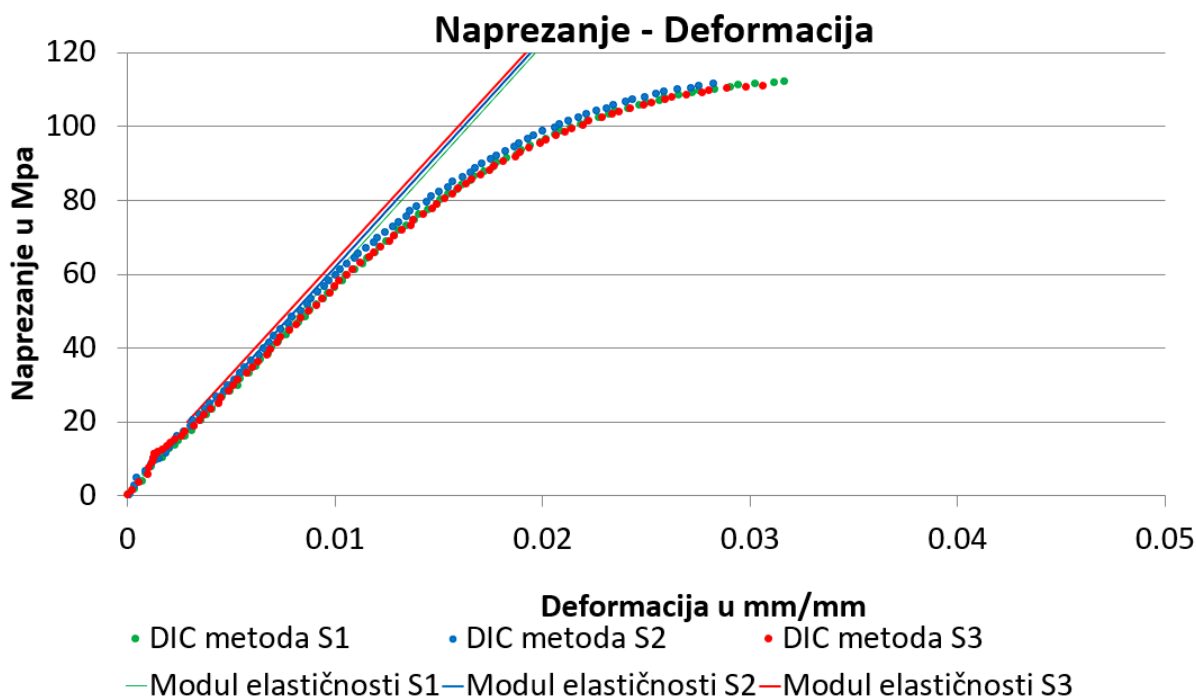
Na [Slika 20] do [Slika 26] dijagramski su prikazani rezultati ispitivanja PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana za epruvete debljina od 1 do 4 mm.



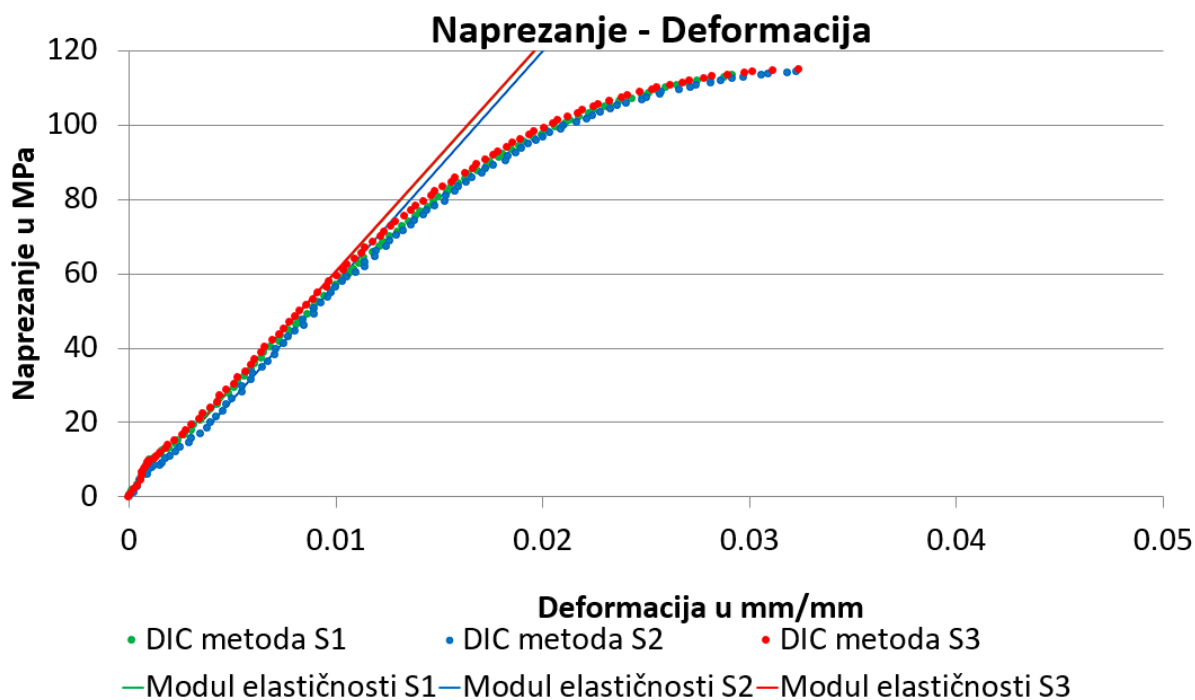
Slika 20. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 1 mm



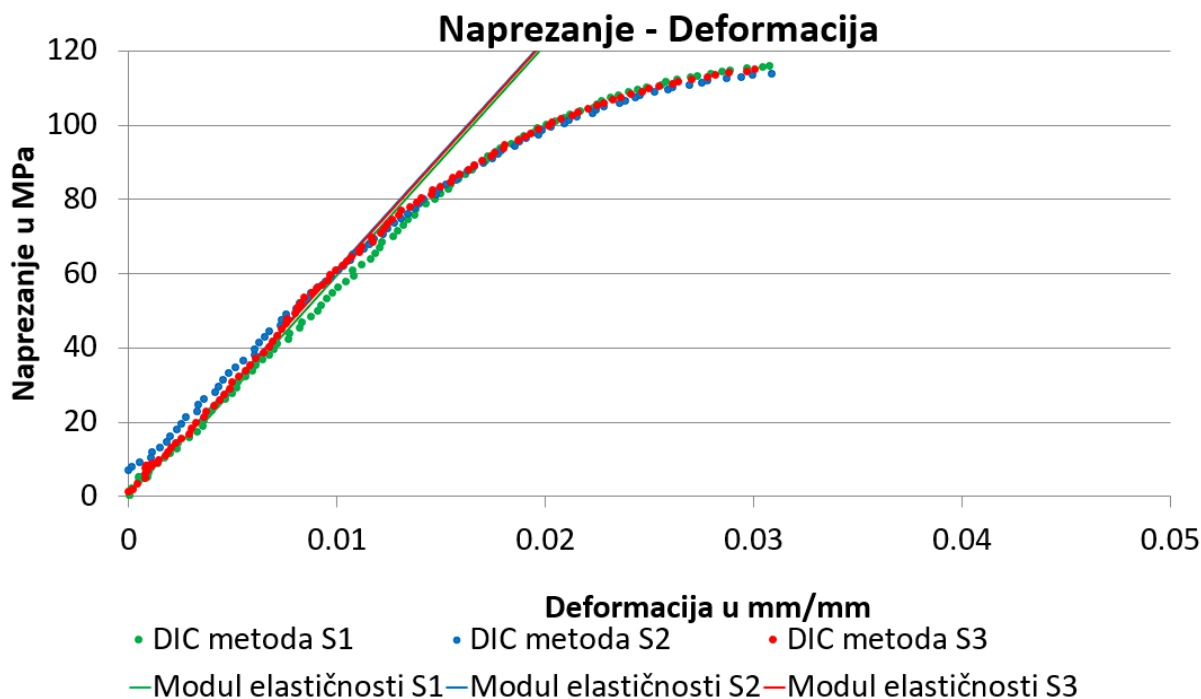
Slika 21. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 1,5 mm



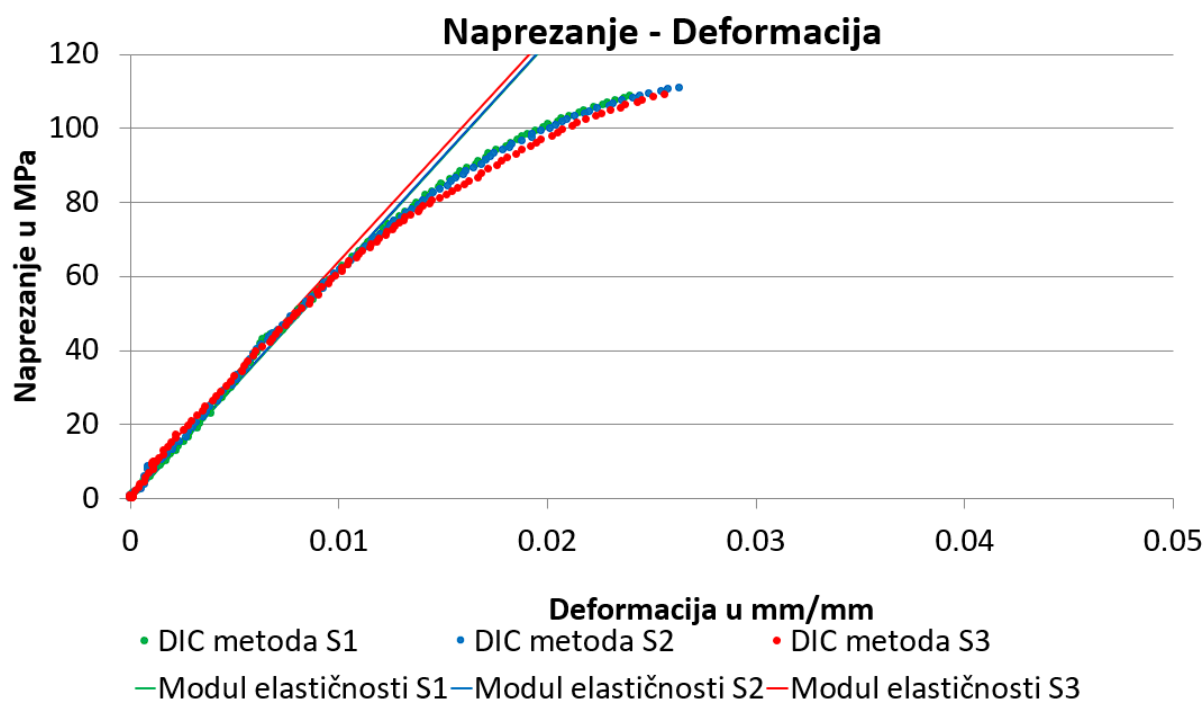
Slika 22. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 2 mm



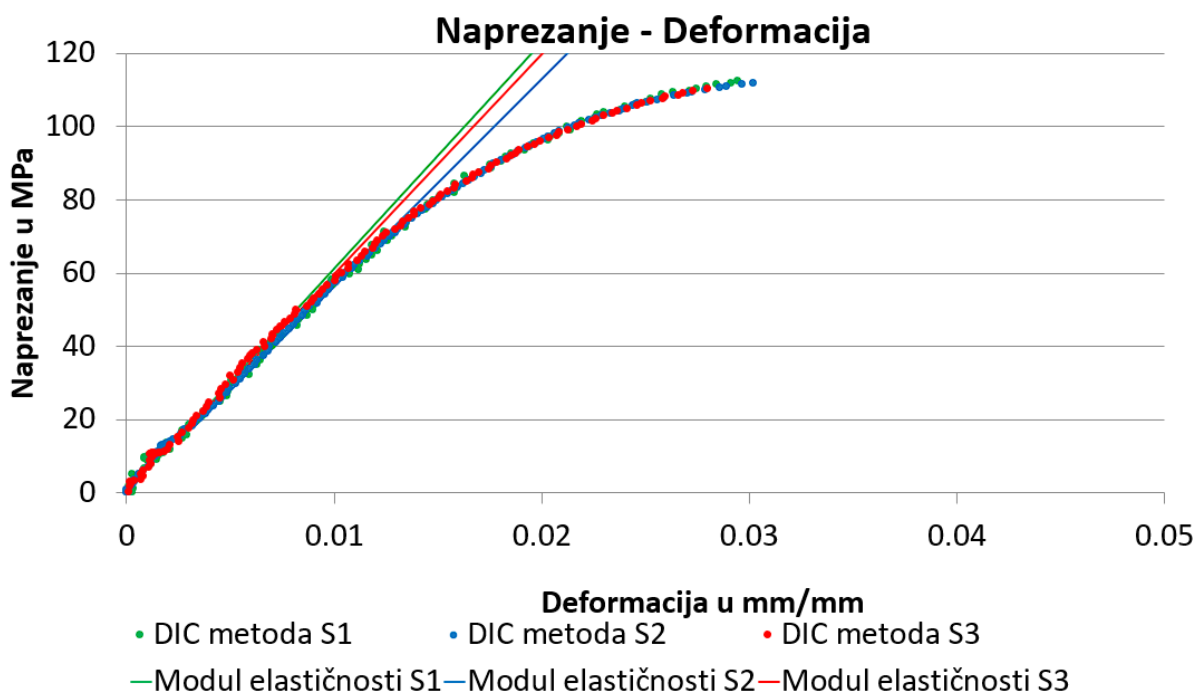
Slika 23. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 2,5 mm



Slika 24. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 3 mm



Slika 25. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 3,5 mm



Slika 26. Kombinirani dijagram σ - ϵ PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana debljine 4 mm

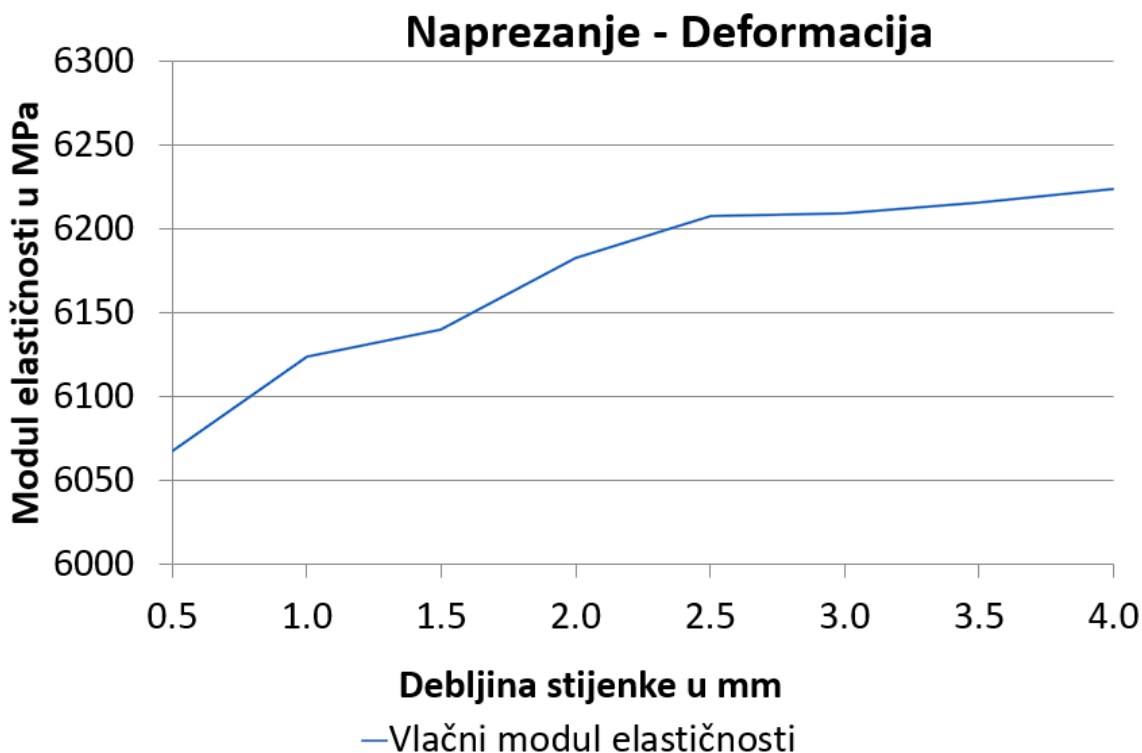
U [Tablica 4] prikazana su rješenja temeljena na normi HRN EN ISO 527-1 za preostalih 7 debljina ispitanih epruveta.

Tablica 4. Vlačni modul elastičnosti i vlačna čvrstoća PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana

Debljina stijenke [mm]	Epruveta	E [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]
1	S1	6100,5	111,7
	S2	6164,4	113,27
	S3	6108,2	112,25
	Prosjek	6124,37	112,41
1,5	S1	6118,88	114,4
	S2	6172,84	114,18
	S3	6129,6	113,8
	Prosjek	6140,44	114,13
2	S1	6194,69	112,82
	S2	6161,97	113,13
	S3	6191,4	112,37
	Prosjek	6182,69	112,77
2,5	S1	6191,4	115,53
	S2	6250	115,12
	S3	6183,75	115,85
	Prosjek	6208,38	115,5
3	S1	6226,18	116,78
	S2	6197,33	115,27
	S3	6205,67	116,82
	Prosjek	6209,73	116,29
3,5	S1	6221,81	113,28
	S2	6206,67	115,08
	S3	6220,69	114,03
	Prosjek	6216,39	114,13
4	S1	6229,56	114,49
	S2	6215,54	113,78
	S3	6227,98	114,54
	Prosjek	6224,36	114,27

Analizom rezultata u [Tablica 3] i [Tablica 4] vidi se da vlačni modul elastičnosti ne ovisi o debljini stijenke koliko je bilo očekivano u polaznoj pretpostavci. Točnije rečeno, porast u prosječnim vrijednostima vlačnog modula elastičnosti polazeći od najtanjeg uzorka (0,5 mm) do najdebljeg (4mm) iznosi maksimalno 1,6%. Navedeni interval porasta vlačnog modula

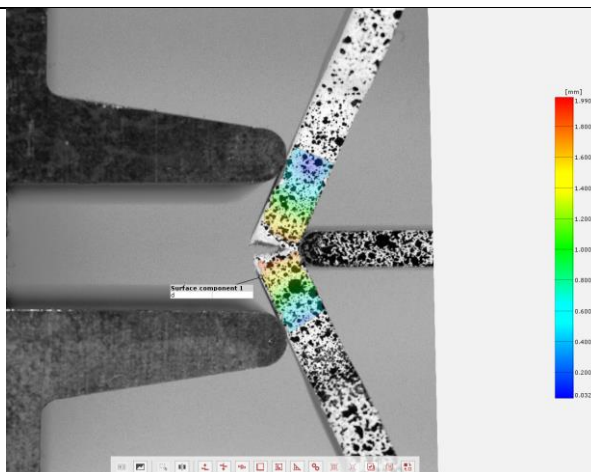
elastičnosti nije dovoljan da bi se sa sigurnošću moglo reći da debljina stijenke, kod PBT materijala ojačanog sa 30% staklenih vlakana, utječe na mehanička svojstva. Iz prethodno navedenih rješenja također se vidi da debljina stijenke ne utječe ni na vlačnu čvrstoću. Na [Slika 27] dijagramski je prikazana ovisnost vlačnog modula elastičnosti o debljini stijenke epruvete.



Slika 27. Ovisnost vlačnog modula elastičnosti o debljini stijenke PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana

3.2. Test savijanja u tri točke PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana

Testom savijanja u tri točke, čiji je postupak opisan ranije u poglavlju 2.3, eksperimentalno se dobivaju podatci o savojnom modulu elastičnosti. Dobiveni rezultati se obrađuju kao i prilikom prethodno opisanog statičkog vlačnog testa. U ovom slučaju software GOM Correlate® također koristimo kao regulator pomaka, kako bismo eliminirali mogućnost greške koja je kod kidalice moguća zbog njenih pomičnih dijelova (opruga i vretena). Na [Slika 28] prikazano je polje deformacija uslijed loma ispitane epruvete pomoću GOM Correlate® software-a.



Slika 28. GOM Correlate – savijanje u 3 točke

Savojni modul elastičnosti i vlačni modul elastičnosti se u praksi poistovjećuju i za većinu materijala imaju sličnu, odnosno istu vrijednost. Testiranje je bazirano prema normi HRN EN ISO 178 [11] koja određuje savojna svojstva plastičnih materijala. Koristeći se prethodno navedenom normom dolazimo do ključnih jednadžbi za ovo eksperimentalno istraživanje:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6wh}{L^2}, \quad (3.3)$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}. \quad (3.4)$$

Gdje je:

E_f – savojni modul elastičnosti izražen u MPa

σ_{f1} – naprezanje izraženo u MPa, izmjereno za vrijednosti deformacija $\varepsilon_{f1}=0,0005$

σ_{f2} – naprezanje izraženo u MPa, izmjereno za vrijednosti deformacija $\varepsilon_{f1}=0,0025$

F – sila ostvarena prilikom progiba w

L – razmak između čeljusti naprave prikazane na [Slika 13]

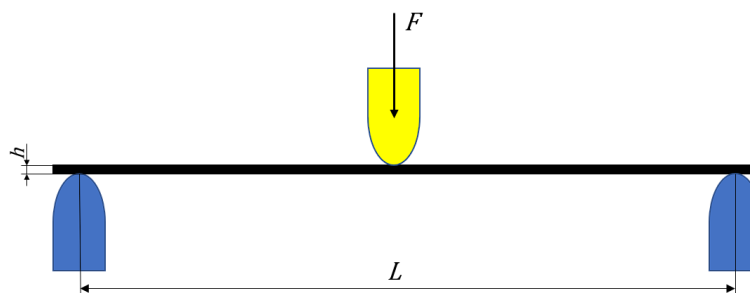
h - debljina epruvete, [Tablica 2].

b - širina epruvete, [Tablica 2].

Na [Slika 29] prikazane su varijable korištene prilikom izračunavanja savojnog modula elastičnosti pomoću jednadžbe (3.4). Razmak između čeljusti L je prilikom testiranja postavljen na 9 mm i takav ostaje tijekom testiranja svih epruveta. Prilikom interpretiranja rezultata potrebno je pripaziti na omjer koja se nalazi u normi HRN EN ISO 178 [11] koji glasi:

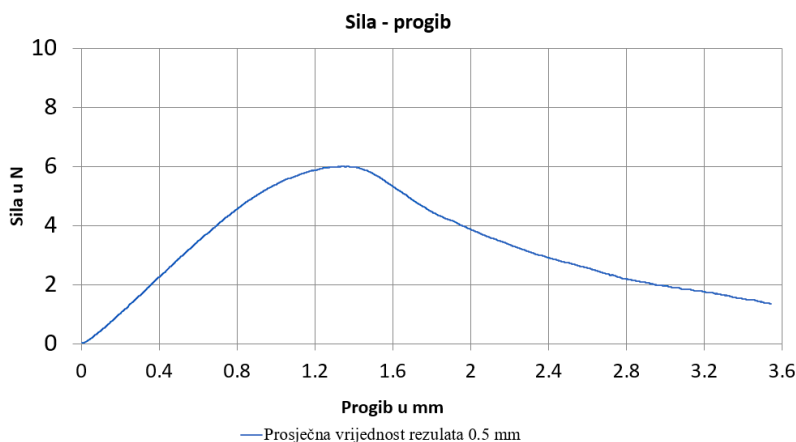
$$\frac{L}{h} \geq 16 \pm 1 \text{ mm.} \quad (3.5)$$

Navedena nejednadžba (3.5), propisuje da su testiranja kod kojih je omjer razmaka između čeljusti L podijeljen s debljinom epruvete h veći od 16 pravilno odrađena i mogu se poistovjetiti s navedenom normom. U našem slučaju jedino epruveta debljine 0,5 mm zadovoljava uvjet, dok su preostale epruvete van okvira norme.

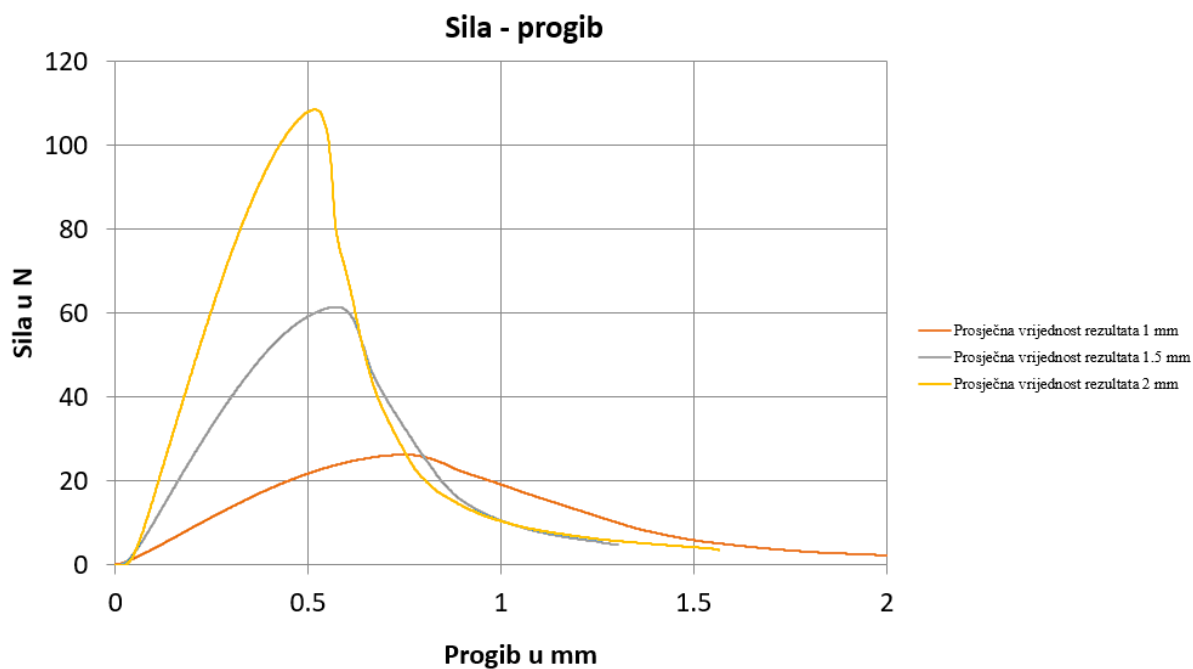


Slika 29. Savijanje u tri točke prema normi HRN EN ISO 178

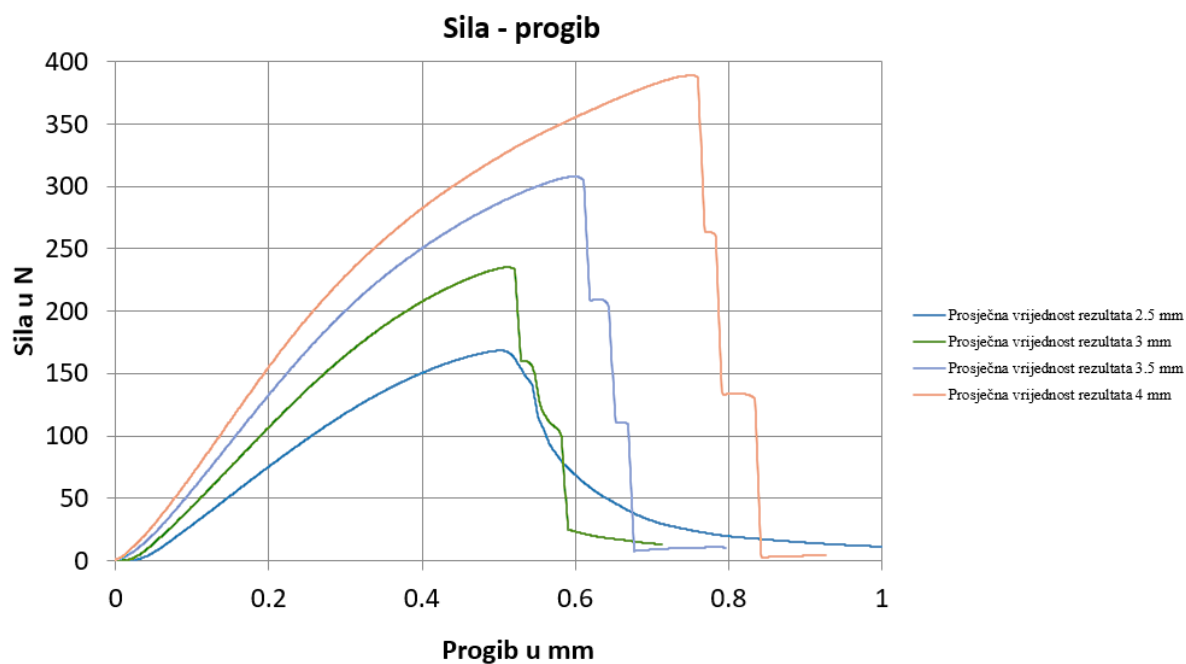
Na [Slika 30], [Slika 31] i [Slika 32] dijagramski su prikazani rezultati testa savijanja u tri točke epruvete dobivenih pomoću kidalice.



Slika 30. Dijagram sila – progib dobiven testom savijanja u tri točke za epruvetu debljine 0,5 mm



Slika 31. Dijagram sila – progib dobiven testom savijanja u tri točke za epruvete debljine 1, 1,5 i 2 mm



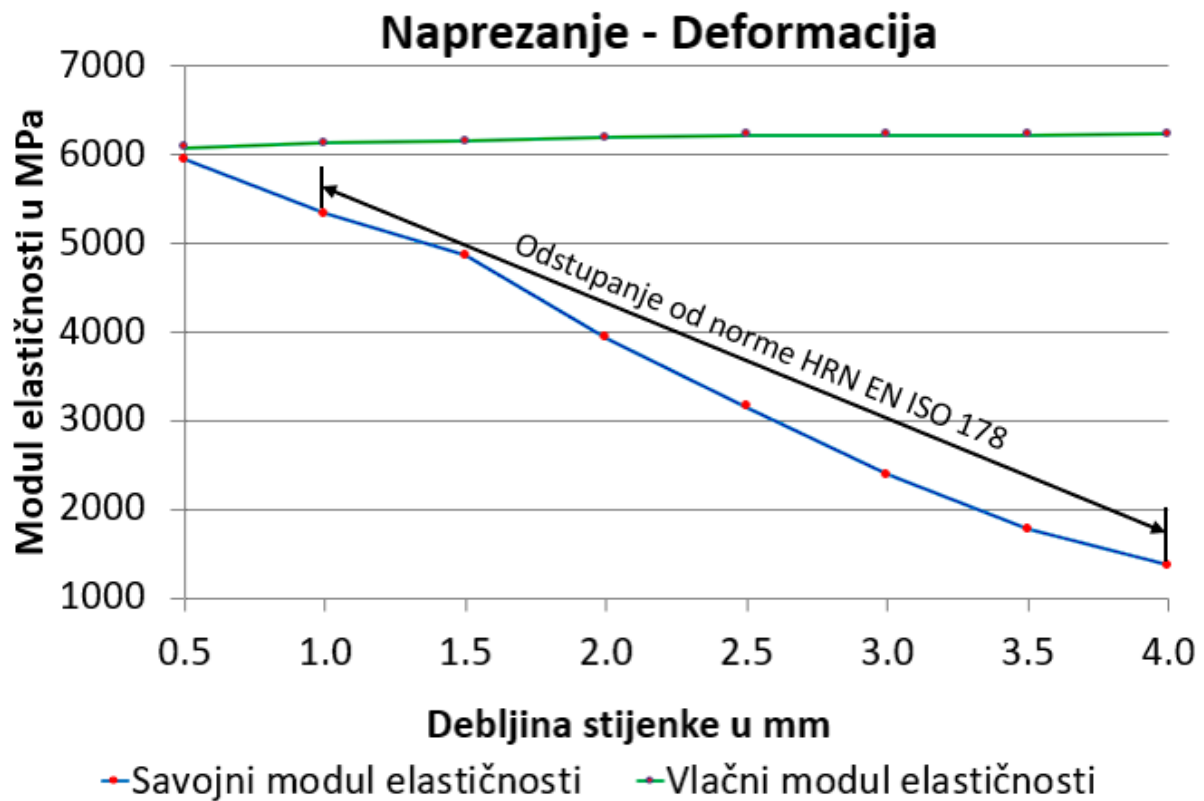
Slika 32. Dijagram sila – progib dobiven testom savijanja u tri točke za epruvete debljine 2,5, 3, 3,5 i 4 mm

U [Tablica 5] prikazane su vrijednosti dobivene koristeći se jednadžbama (3.2), (3.3) i (3.4) za svih 8 testiranih debljina epruveta.

Tablica 5. Savojni modul elastičnosti PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana

Debljina stijenke [mm]	Epruveta	E_f [N/mm ²]
0,5	S1	6111,11
	S2	5820,11
	S3	5882,35
	Prosjek	5937,86
1	S1	5291
	S2	5293,13
	S3	5405,41
	Prosjek	5329,14
1,5	S1	4784,69
	S2	4842,62
	S3	4926,11
	Prosjek	4851,14
2	S1	3922,67
	S2	3931,87
	S3	3917,45
	Prosjek	3921,57
2,5	S1	3134,8
	S2	3154,7
	S3	3146,12
	Prosjek	3147,98
3	S1	2341,92
	S2	2375,3
	S3	2450,98
	Prosjek	2389,4
3,5	S1	1818,18
	S2	1764,71
	S3	1739,13
	Prosjek	1774
4	S1	1379,31
	S2	1369,31
	S3	1346,8
	Prosjek	1368,47

Iz priloženih rezultata primjećuje se da za razliku od vlačnog, savojni modul elastičnosti ovisi o debljini epruvete. Porastom debljine epruvete savojni modul elastičnosti pada za otprilike 10 do 20% po debljini epruvete. Kao što je opisano ranije u poglavlju, nejednadžbu (3.5) zadovoljava samo stijenka debljine 0,5 mm, te će se taj uzorak smatrati reprezentativnim za nastavak ispitivanja. Preostali rezultati su dobiveni van okvira norme koja propisuje uvjete testiranja u tri točke [11]. Na [Slika 33] dijagramski je prikazana ovisnost savojnog modula elastičnosti o debljini stijenke, te usporedba sa vlačnim modulom elastičnosti ranije prikazanim na [Slika 27].



Slika 33. Dijagramska usporedba savojnog i vlačnog modula elastičnosti u ovisnosti o debljini stijenke PBT materijala ojačanog s 30% staklenih vlakana

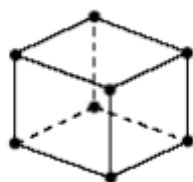
4. NUMERIČKA SIMULACIJA TESTA SAVIJANJA EPRUVETE U TRI TOČKE (eng. Three point bending)

4.1. Osnove metode konačnih elemenata

Numerički proračun testa savijanja epruvete u 3 točke proveden je primjenom programskog paketa Abaqus/Standard® [12], koji se bazira na metodi konačnih elemenata (MKE). MKE numerička je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma, gdje se diferencijalne jednačbe koje opisuju cijelo područje razmatranog modela zamjenjuju sustavom algebarskih jednačbi [13]. Područje kontinuuma se kod MKE dijeli na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno stvara se mreža konačnih elemenata koji opisuju zadani problem. Postoji više tipova konačnih elemenata, no za svaki mora vrijediti da je sa susjednim elementom povezan u točki na konturi koja se naziva čvor. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacija, naprežanja temperature te ostalih veličina u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije zajedno sa rubnim uvjetima koje moraju zadovoljavati pomažu opisivanju ponašanja diskretiziranog modela kako bi se problem što više približio stvarnosti. Ovisno o složenosti konstrukcije, neki sustavi algebarskih jednačbi mogu se riješiti ručno i to su npr. osno opterećenje štapa, savijanje grede, gredne i štapne konstrukcije itd. Za složenije konstrukcije, kao npr. električni konektor firme Yazaki Europe Limited valja riješiti sustav algebarskih jednačbi s velikim brojem nepoznanica, što je bez korištenja računala vrlo teško postići.

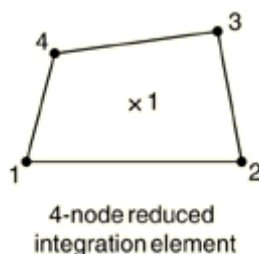
4.2. Primjenjeni konačni elementi

Konačni element korišten za opisivanje modela epruvete je trodimenzijski izoparametarski element C3D8 koji je uzet iz biblioteke elemenata programskog paketa Abaqus® [12] koji je prikazan na [Slika 34]. Stupnjevi slobode ovog heksaedarskog linearnog elementa su tri pomaka odnosno translacije u pravcu globalnih osi u svakom čvoru, dok je polje pomaka opisano istim interpolacijskim funkcijama kao i geometrija elementa. U svakoj točki navedenog konačnog elementa stanje naprežanja i deformacije određeno je sa šest komponenata. Naprežanja i deformacije se kod ovih elemenata osim u globalnom Kartezijevom koordinatnom sustavu mogu prikazati i u lokalnom koordinatnom sustavu. Navedeni element je po inženjerskom iskustvu najidealniji za korištenje kod manje kompliciranih modela, koji ne zahtijevaju primjenu velikog broja elemenata, s obzirom da nije računalno prezahtjevan te daje vrlo točne rezultate.



Slika 34. 3D element C3D8 [12]

Konačni element koji opisuje napravu [Slika 13] je dvodimenzijski kvadratni ljuskasti element S4R koji se također nalazi u Abaqus® biblioteci [12]. Prikazan je na [Slika 35] i sastoji se od 4 čvora, karakterizira ga reducirana integracija i široko je primjenjiv u praksi za svaki problem koji uključuje zakrivljenu geometriju.



Slika 35. 2D element S4R [12]

4.3. Modeliranje problema savijanja u tri točke

4.3.1. Dimenzije, materijal, rubni uvjeti i mreža konačnih elemenata

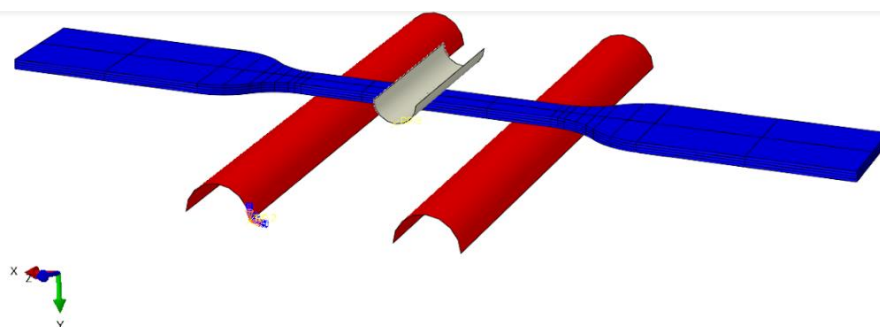
Numerička simulacija će biti odrađena za epruvetu debljine 0,5 mm jer su za tu debljinu epruvete, normom HRN EN ISO 178 [11], propisani uvjeti zadovoljeni. Osim te debljine, provest će se i numerička simulacija za epruvetu debljine 2 i 4 mm, no dobiveni rezultati zbog razloga objašnjenih u prethodnom poglavlju će vjerojatno odstupati od norme. Prilikom modeliranja epruveta u stablu *Part* koristit će se točne vrijednosti poprečnog presjeka epruvete $[b_1 \times h]$ prikazanih u [Tablica 2]. Nadalje, u stablu *Property* potrebno je definirati materijal epruvete. Materijal s kojim se uspoređuju rezultati eksperimentalnog i numeričkog ispitivanja je Pocan B3235 000000 [14] proizveden od strane LANXESS Performance Materials GmbH [15]. Navedeni materijalni podatci i maksimalne vrijednosti naprezanja i deformacija koje on sadržava svakodnevno se u tvrtki Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb koristi za analizu

rezultata simulacija. Na [Slika 36] prikazani su materijalni podatci sa mehaničkim svojstvima navedenog materijala. Testiranja kojima se došlo do prikazanih vrijednosti odvijala su se brzinom kidalice 1 mm/min. Korištene epruvete dizajnirane su prema normi HRN EN ISO 527-2 [4], no za razliku od epruveta korištenih u ovom radu nije korišteno 5. poglavlje norme koje je posvećeno malim epruvetama.

Pocan B3235 000000 PBT-GF30 LANXESS Performance Materials GmbH			
Product Texts			
ISO 20028-PBT,GF30,GHMR,09-100			
PBT, 30 % glass fibers, injection molding			
Rheological properties	Value	Unit	Test Standard
Melt volume-flow rate, MVR	17	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperature	260	°C	ISO 1133
Load	2.16	kg	ISO 1133
Molding shrinkage, parallel	0.4	%	ISO 294-4, 2577
Molding shrinkage, normal	1.1	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus	9800	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	140	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	2.9	%	ISO 527-1/-2
Tensile creep modulus, 1h	9800	MPa	ISO 899-1
Tensile creep modulus, 1000h	8900	MPa	ISO 899-1
Charpy impact strength, +23°C	65	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30°C	60	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, +23°C	10	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Puncture energy, +23°C	2.3	J	ISO 6603-2
Puncture energy, -30°C	2.5	J	ISO 6603-2

Slika 36. Pocan B3235 000000 [14]

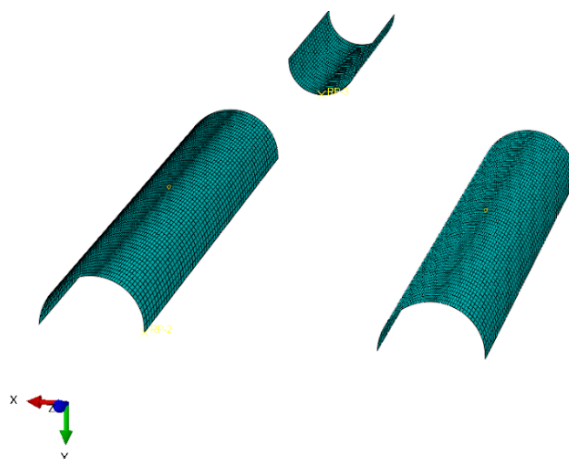
Vrijednost savojnog modula elastičnosti korištenog u ovoj simulaciji preuzima se iz [Tablica 5], dok su gustoća materijala i Poissonov faktor definirani istog iznosa kao i kod Pocana B3235 000000, te iznose 1550 kg/m³ i 0,3. Na [Slika 37] prikazan je model s pripadnim rubnim uvjetima. Tri oslonca su definirana kao *Rigid body* i predstavljaju dijelove simulacije koji se smatraju nedeformabilnim. Središnji oslonac predstavlja potisnik [Slika 14], dok su preostala dva oslonca čeljusti naprave [Slika 13]. Razmak između čeljusti definiran je u prethodnom poglavlju [3.2] i iznosi 9 mm. Od rubnih uvjeta korišteno je uklještenje *Encastre* koje je dodijeljeno čeljustima, dok je pomak definiran na središnjem osloncu (potisniku).



Slika 37. Model korišten za simulaciju savijanja u tri točke

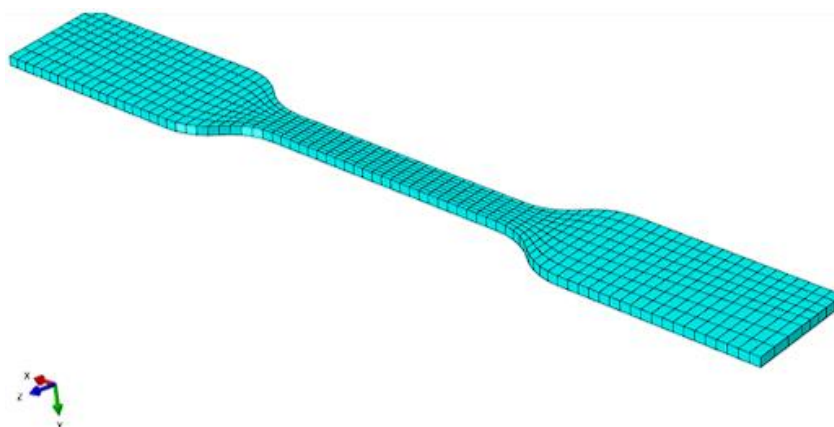
4.3.2. Verifikacija mreže konačnih elemenata

Prilikom modeliranja mreže konačnih elemenata korištena je kombinacija elemenata C3D8 i S4R. Povećanjem broja elemenata povećava se i točnost rezultata, jer time povećavamo ukupni broj stupnjeva slobode. U inženjerskoj praksi, uvijek se teži što manjem broju elemenata bez da se naruši točnost rezultata. Prevelik broj elemenata zahtijeva veću količinu radne memorije (RAM) računala, povećava vrijeme računanja i poskupljuje proračun. Sukladno tome, potrebno je provesti verifikaciju mreže kako bismo došli do optimalnog broja konačnih elemenata. Verifikacija će se provesti na epruveti debljine 0,5 mm i sadržavat će tri različite gustoće mreže. Iz razloga što su oslonci u numeričkim simulacijama koje će se provesti definirani kao *Rigid body*, verifikacija njihove mreže neće se uzimati u obzir već će u svakoj simulaciji biti ista, i sastojat će se od 7000 S4R elementa [Slika 38].



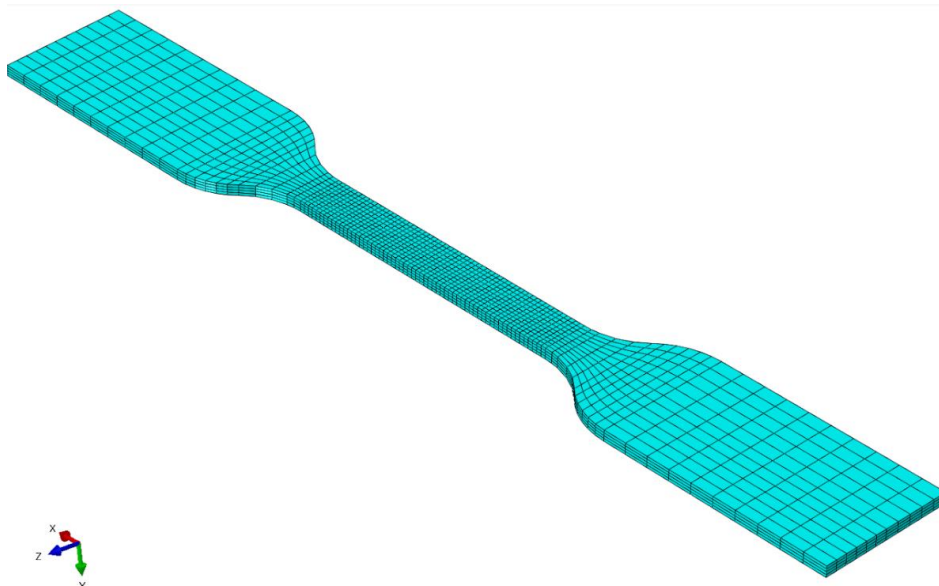
Slika 38. Mreža konačnih elemenata – tri oslonca

Na [Slika 39] prikazana je mreža konačnih elemenata primjenjena na epruvetu, koja se sastoji od 656 C3D8, odnosno po debljini epruvete je to 1 element duljine stranice 0,48 mm.



Slika 39. Mreža konačnih elemenata epruvete – 656 C3D8 elementa

Na [Slika 40] prikazana je mreža konačnih elemenata primjenjena na epruvetu, koja se sastoji od 4488 C3D8, odnosno po debljini epruvete su to 4 elementa duljine stranice 0,12 mm.



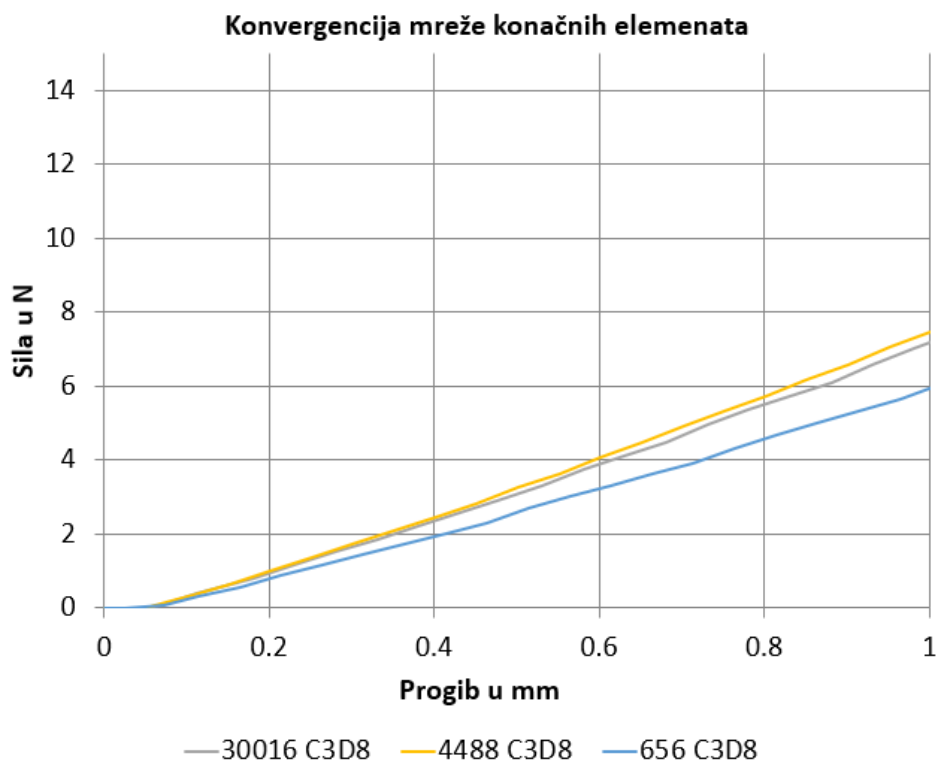
Slika 40. Mreža konačnih elemenata epruvete – 4488 C3D8 elementa

Na [Slika 40] prikazana je mreža konačnih elemenata primjenjena na epruvetu, koja se sastoji od 30016 C3D8 elementa, odnosno po debljini su to 8 duljine stranice 0,03 mm.



Slika 41. Mreža konačnih elemenata epruvete – 30016 C3D8 elementa

Na [Slika 42] prikazana je dijagramska usporedba rezultata dobivenih provedbom računalne simulacije savijanja u tri točke. Na dijagramu se razlikuju rješenja ovisno o gustoći mreže epruvete koja je korištena.



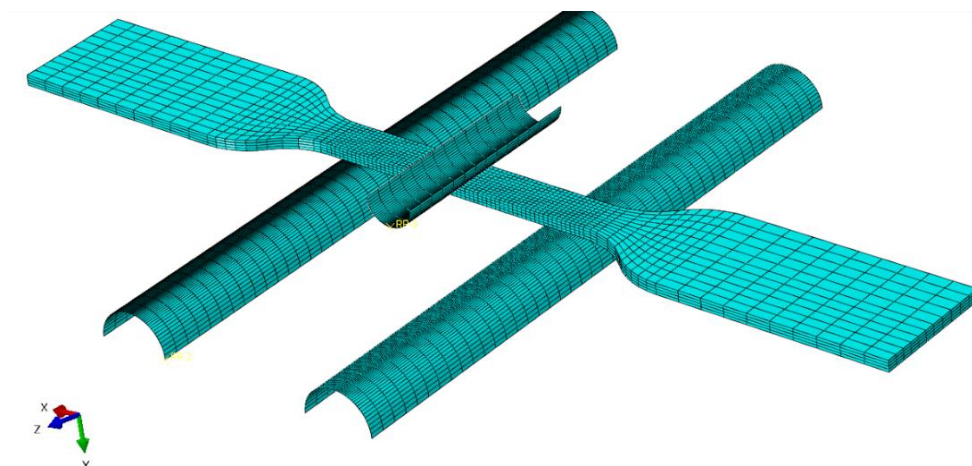
Slika 42. Konvergencija mreže konačnih elemenata

Na temelju dijagrama prikazanog na [Slika 42] primjećuje se da su razlike u rezultatima između mreža koje koriste 30016 i 4488 C3D8 elementa minimalne, odnosno konvergiraju približno istom rješenju. Na temelju te činjenice za daljnji proračun odabire se mreža 4488 C3D8 elementa koja se sastoji od 4 elementa po debljini epruvete. Za epruvete debljine 2 i 4 mm neće se provoditi dodatna verifikacija mreže, već će se analogno mreži za epruvetu 0,5 mm odabrati optimalan broj elemenata.

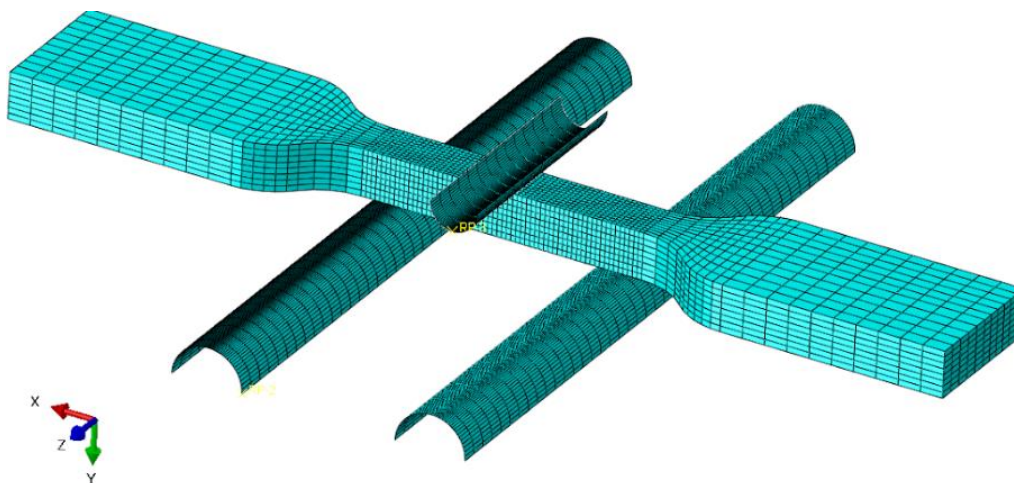
U [Tablica 6] prikazan je broj konačnih elemenata korištenih prilikom numeričkih simulacija, modeli sa optimiziranim mrežama konačnih elemenata prikazani su na [Slika 43], [Slika 44] i [Slika 45].

Tablica 6. Broj konačnih elemenata ovisno o debljini epruvete

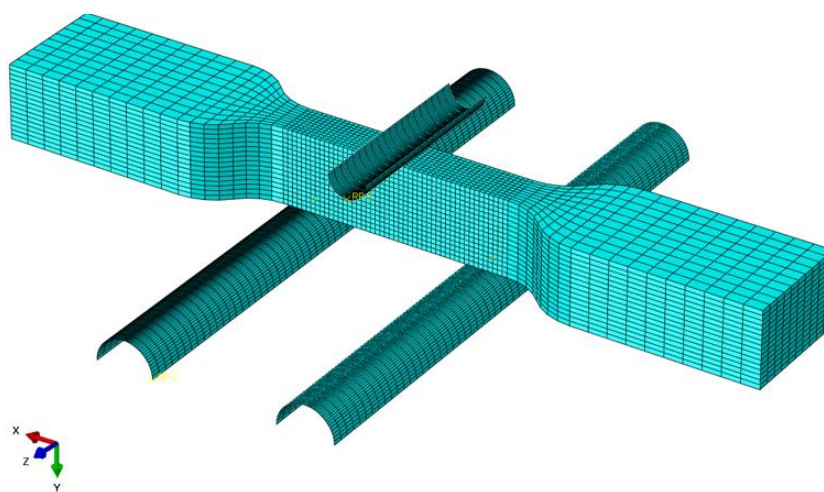
h , debljina epruvete u mm	Broj konačnih elemenata		
	S4R	C3D8	Ukupno
0,5	7000	4488	11488
2	7000	8800	15800
4	7000	13440	20440



Slika 43. Mreža konačnih elemenata – epruveta debljine 0,5 mm



Slika 44. Mreža konačnih elemenata – epruveta debljine 2 mm



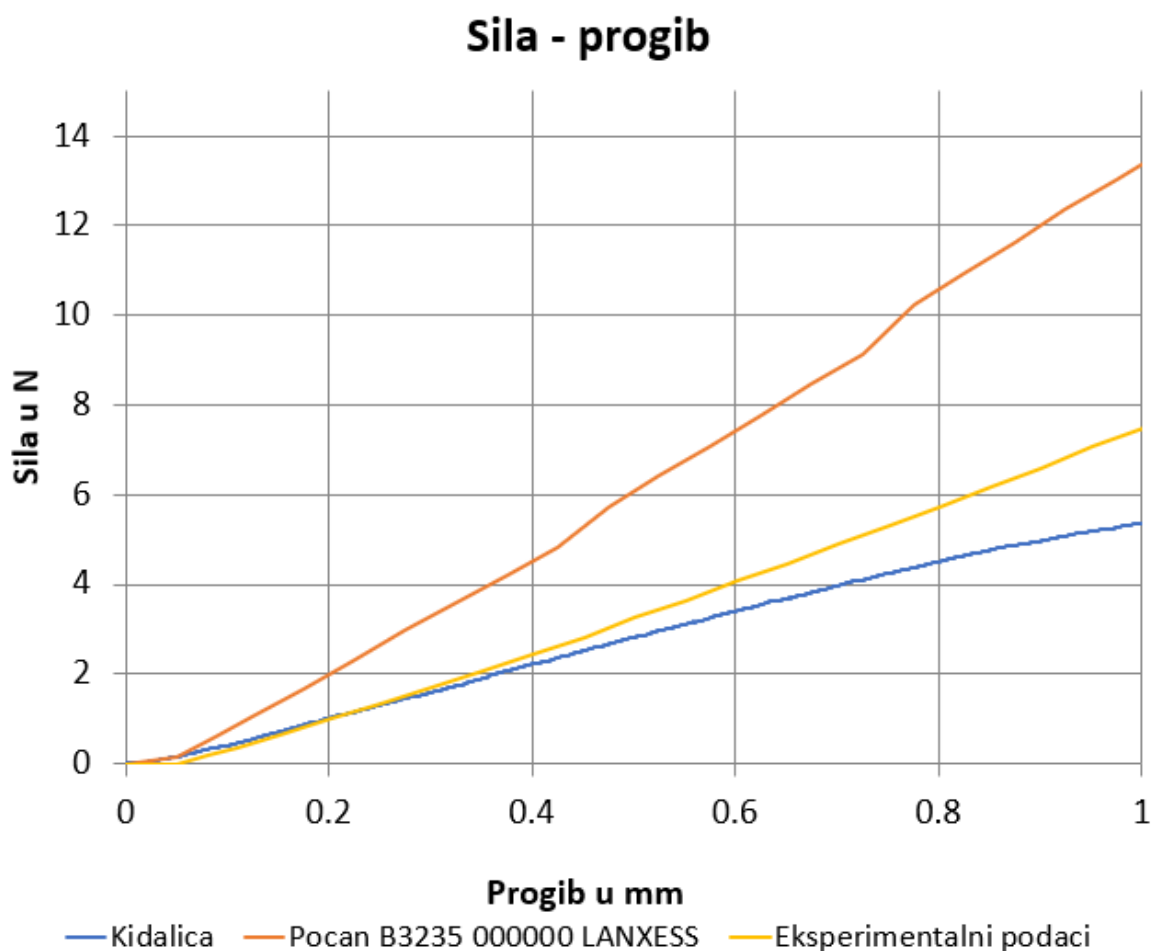
Slika 45. Mreža konačnih elemenata – epruveta debljine 4 mm

4.4. Rezultati numeričkih simulacija

Kao što je opisano u prethodnom poglavlju, provode se tri računalne simulacije za tri različite debljine epruvete. Rubni uvjeti ostaju isti za svaku debljinu epruvete, a razlika je osim u geometriji epruveta, odnosno debljini i u materijalnim svojstvima. Materijal s kojim će se uspoređivati eksperimentalni i numerički rezultati je Pocan B3235 000000 [14].

4.4.1 Epruveta debljine 0,5 mm

Na [Slika 46] prikazana je dijagramska usporedba rješenja dobivenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom. Krivulja obojana plavom bojom može se vidjeti i u ranije prikazanom dijagramu na [Slika 30], a predstavlja vrijednosti dobivene pomoću kidalice. Crvena krivulja prikazuje rezultate savijanja u tri točke kada se koristi materijal proizvođača, a žuta krivulja prikazuje rezultate kada se koriste materijalne postavke dobivene eksperimentalnim ispitivanjem opisanim u prethodnim poglavljima.



Slika 46. Dijagram sila-pomak dobiven numeričkom simulacijom – debljina epruvete 0,5 mm

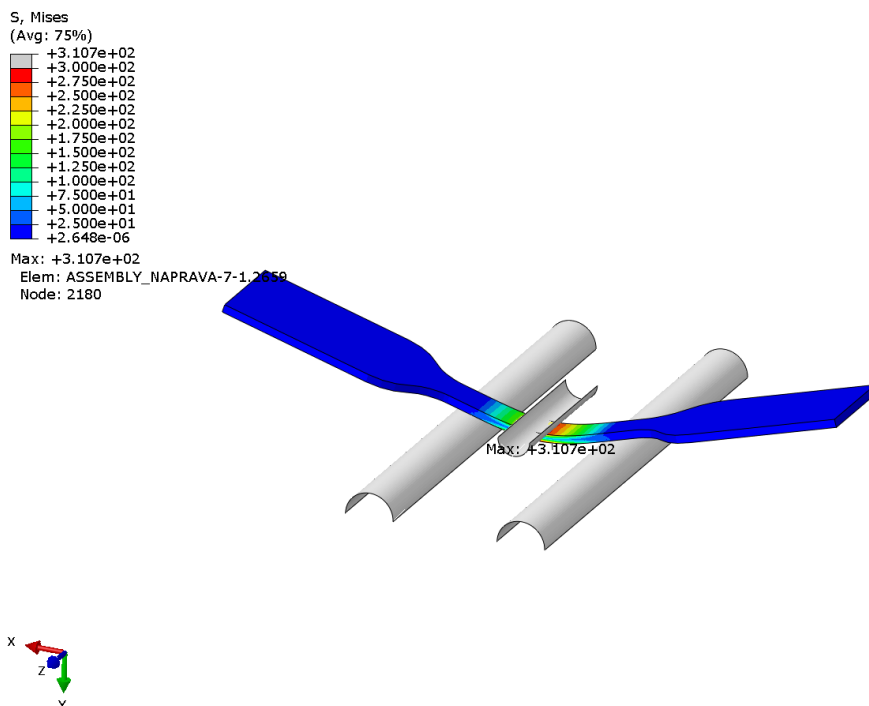
Iz priloženog može se primijetiti da je prilikom istog iznosa progiba epruvete sila generirana kod materijala Pocan B3235 000000 veća nego kod materijala dobivenog eksperimentalnim ispitivanjem. Važno je napomenuti da su iznosi sila kod grafa dobivenog pomoću kidalice manje, zbog toga što kod materijala korištenih u numeričkim simulacijama nije definirana plastičnost kao svojstvo materijala. Plastičnost bi u ovom slučaju dodatno smanjila vrijednosti sile kod obje numeričke simulacije, no s uključivanjem plastičnosti bi izašli van okvira ovog rada. Vrijednosti sile oba materijala za progibe epruvete koji se nalaze u linearnom području materijala prikazane su u [Tablica 7].

Tablica 7. Vrijednosti sila u odnosu na progib epruvete debljine 0,5 mm

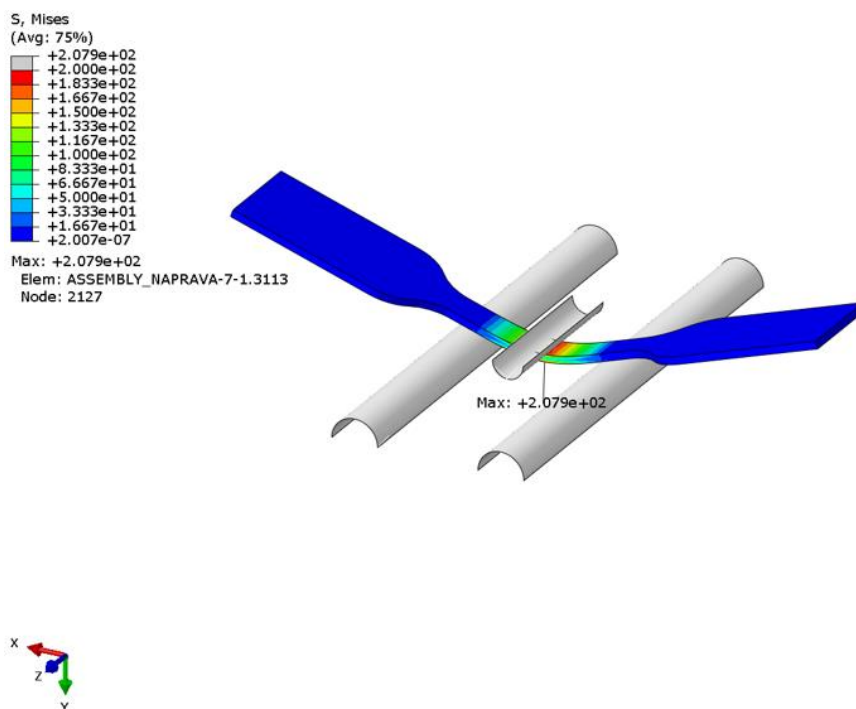
	Progib epruvete u mm	Sila u N
Kidalice	0,1	0,56
	0,2	1,01
	0,4	2,12
	0,6	3,48
	0,8	4,5
Pocan B3235 000000 LANXESS	0,1	0,86
	0,2	2
	0,4	3,21
	0,6	7,4
	0,8	10,68
Eksperimentalni podaci	0,1	0,54
	0,2	1,01
	0,4	2,17
	0,6	3,96
	0,8	5,74

Iz priloženih tabličnih rezultata primjećuje se 30 do 40% manja sila kod materijala dobivenog eksperimentalnim ispitivanjem u usporedbi s materijalom proizvođača.

Na [Slika 47] i [Slika 48] prikazana je vizualizacija rezultata koja opisuje polje naprezanja epruvete. Maksimalna vrijednost naprezanja u oba slučaja nalazi se na sredini epruvete i kod Pocan B3235 000000 materijala ono je uvijek većeg iznosa nego kod materijala čija mehanička svojstva smo dobili eksperimentalnim istraživanjem.



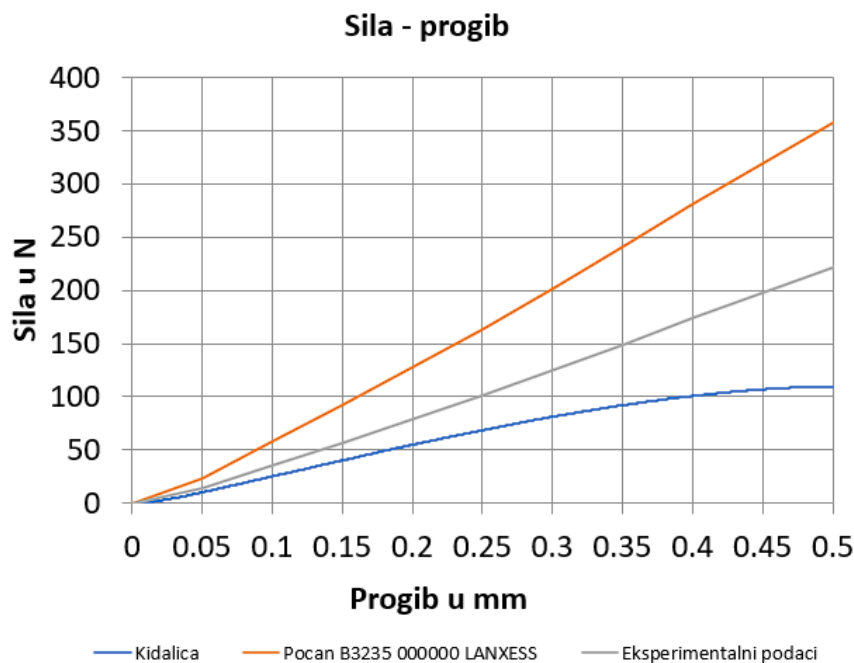
Slika 47. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 0,5 mm – materijal Pocan B3235 000000 LANXESS



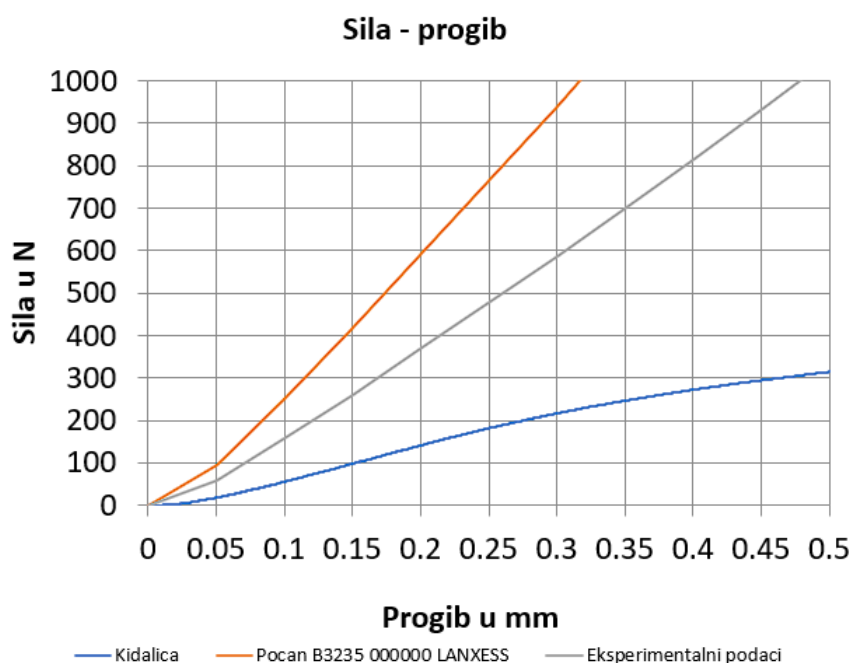
Slika 48. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 0,5 mm – materijal dobiven eksperimentalnim ispitivanjima

4.4.2 Epruvete debljina 2 i 4 mm

Analogno postupku za debljinu epruvete 0,5 mm, dijagramski je na [Slika 49] prikazana ovisnost postignute sile o progibu epruveta 2 i 4 mm. Potrebno je naglasiti kako prikazani rezultati odstupaju od norme HRN EN ISO 178 te se zaključci dovedeni za epruvetu 0,5 mm ne mogu poistovjetiti sa epruvetama debljine 2 i 4 mm.



Slika 49. Dijagram sila – progib dobiven numeričkom simulacijom – epruveta debljine 2 mm



Slika 50. Dijagram sila – progib dobiven numeričkom simulacijom – epruveta debljine 4 mm

Tablične vrijednosti za progibe koje opisuju linearno područje ponašanja materijala prikazano je u [Tablica 8] i [Tablica 9] za debljine epruveta 2 i 4 mm.

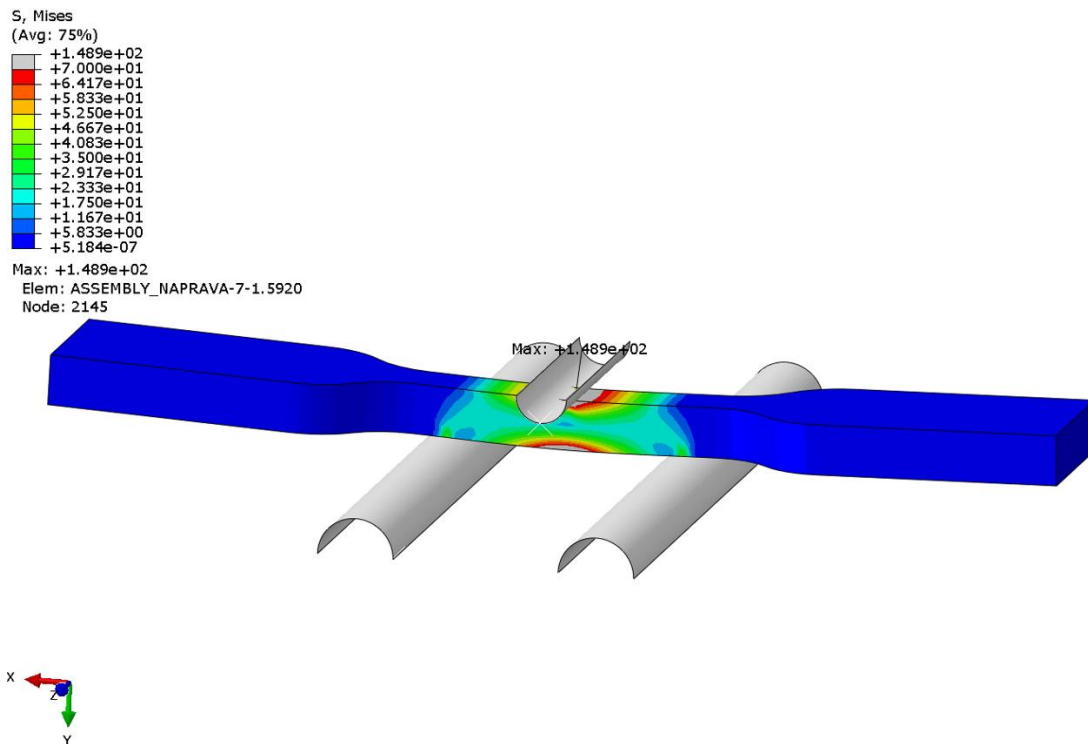
Tablica 8. Vrijednosti sila u odnosu na progib epruvete debljine 2 mm

	Progib epruvete u mm	Sila u N
Kidalice	0,1	25
	0,2	52
	0,3	80
	0,4	100
Pocan B3235 000000 LANXESS	0,1	60
	0,2	125
	0,3	200
	0,4	280
Eksperimentalni podaci	0,1	40
	0,2	75
	0,3	125
	0,4	175

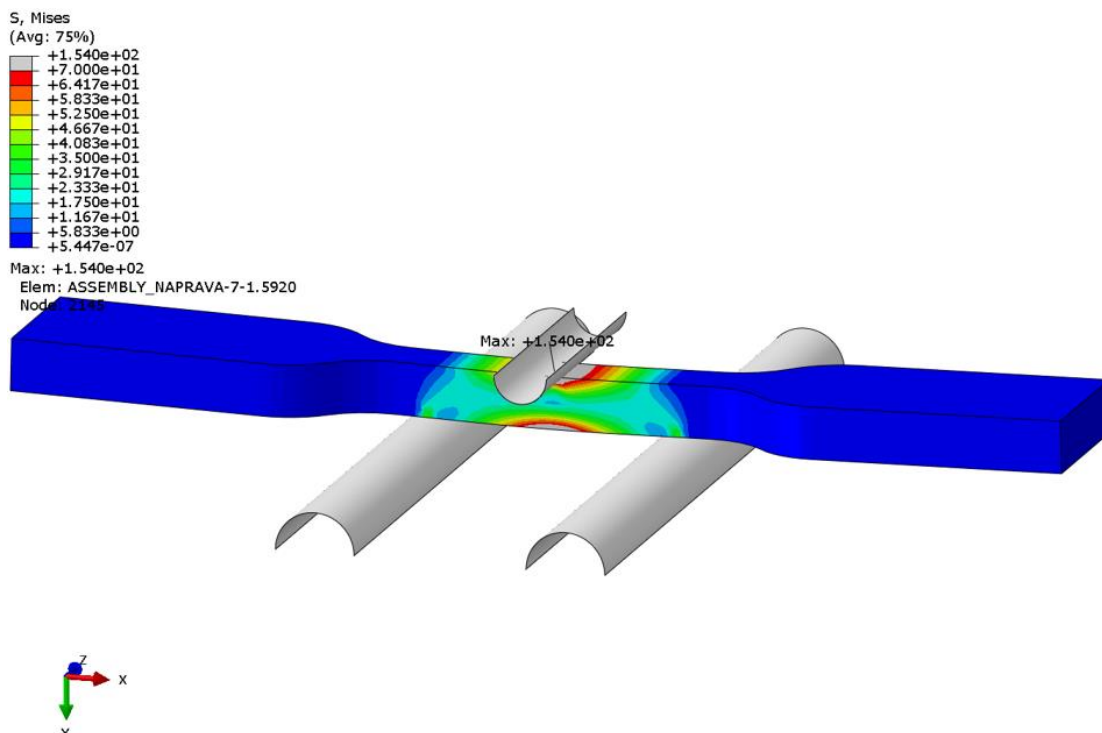
Tablica 9. Vrijednosti sila u odnosu na progib epruvete debljine 4 mm

	Progib epruvete u mm	Sila u N
Kidalice	0,05	25
	0,1	75
	0,2	140
	0,3	210
Pocan B3235 000000 LANXESS	0,05	100
	0,1	250
	0,2	600
	0,3	950
Eksperimentalni podaci	0,05	75
	0,1	150
	0,2	380
	0,3	590

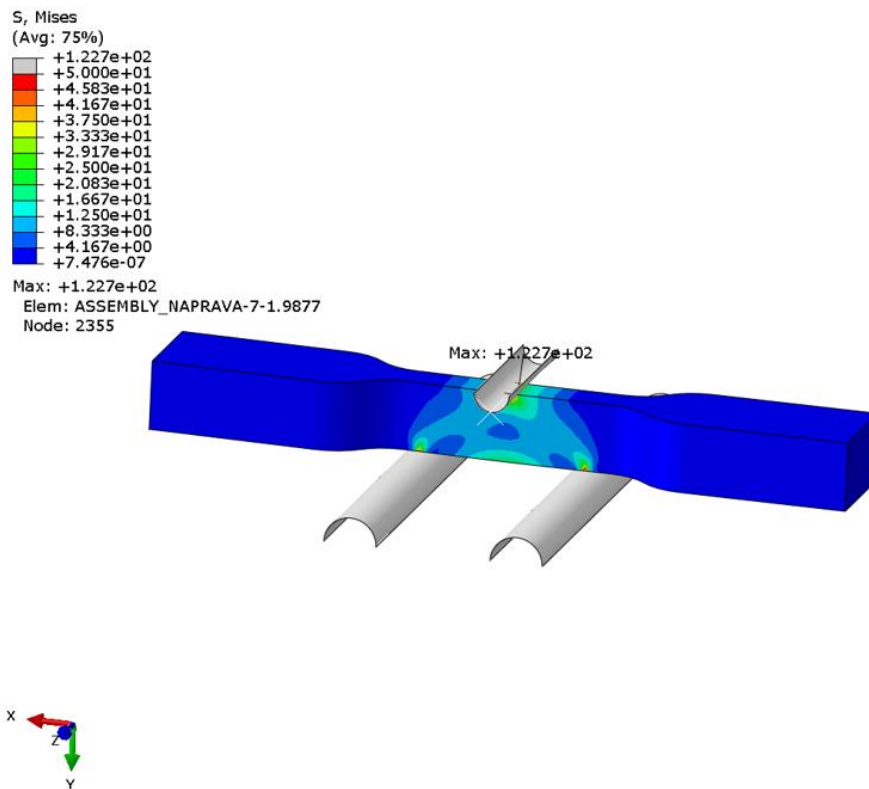
Vizualizacija rezultata prikazana je pomoću polja naprezanja na [Slika 51], [Slika 52], [Slika 53] i [Slika 54] za debljine epruveta 2 i 4 mm.



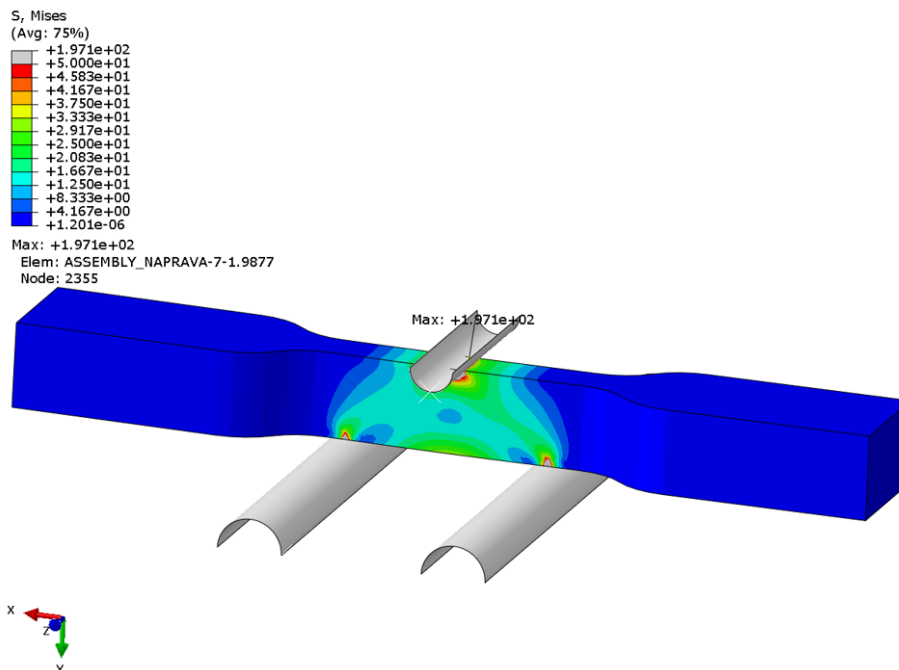
Slika 51. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 2 mm – materijal dobiven eksperimentalnim ispitivanjima



Slika 52. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 2 mm – materijal Pocan B3235 000000 LANXESS



Slika 53. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 4 mm – materijal dobiven eksperimentalnim ispitivanjima



Slika 54. Raspodjela naprezanja na epruveti debljine 4 mm – materijal Pocan B3235 000000 LANXESS

Vizualizacija rezultata pomoću polja pomaka prikazana na priloženim slikama ukazuje na to da plastičnost kod epruveta 2 i 4 mm ima značajniji utjecaj na numeričke rezultate nego što je to slučaj kod epruvete debljine 0,5 mm. Nadalje, vrijednosti sila prikazanih u [Tablica 8] i [Tablica 9] ukazuju da su sile kod materijala opisanog materijalnim postavkama dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem manje nego kod materijala proizvođača. Kod debljih stijenki je zbog svega navedenog, za bolju točnost rezultata, potrebno uzeti plastično svojstvo materijala koje prelazi granice ovog rada. Osim navedene plastičnosti, odstupanja od norme HRN EN ISO 178 koja propisuje razmak udaljenosti čeljusti kod testa savijanja u tri točke uvelike utječe na rezultate eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih simulacija. Prema tome, ukoliko bi se u budućnosti test savijanja u tri točke ponavljao potrebno bi bilo uz porast debljine epruvete povećavati ukupnu duljinu epruvete te razmak između čeljusti naprave.

5. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad osmišljen je kao suradnja s tvrtkom Yazaki Europe Limited u Zagrebu. Tema rada je provesti eksperimentalno ispitivanje polimernog materijala polibutilen tereftalata (PBT) dodatno ojačanog s 30% staklenih vlakana. Kako stijenke električnih konektora, koji su glavni proizvod Yazake Europe Limiteda, podružnica Zagreb, često imaju malu debljinu stijenke (manju od 1 mm) te kako staklena vlakna povećavaju čvrstoću i krutost, no negativno utječu na krhkost, potrebno je provesti istraživanje utjecaja debljine stijenke na mehanička svojstva navedenog polimernog materijala. Eksperimentalna ispitivanja provedena u ovom radu su statički vlačni test i test savijanja u tri točke, a izvode se na stroju koji se naziva kidalica. Kao rezultat statičnog vlačnog testa zaključuje se da vlačni modul elastičnosti PBT materijala sa 30% staklenih vlakana ne ovisi o debljini stijenke. Važno je napomenuti da se unatoč tome zaključuje da je vrijednost vlačnog modula elastičnosti i dalje za 30% niža nego što pokazuju vrijednosti Pocana B3235 000000 proizvedenog od strane LANXESS Performance Materials GmbH. Navedni proizvođač je mehanička svojstva odredio eksperimentalnim ispitivanjem na epruvetama većih dimenzija nego su korištene u ovom radu. Eksperimentalni rezultati savijanja u tri točke pokazali su da debljina stijenke utječe na vrijednost savojnog modula elastičnosti, te da on pada povećanjem debljine. Sukladno normi prema kojoj su rađeni testovi zaključuje se da je za stijenku debljine 0,5 mm savojni modul elastičnosti približno jednak iznosu vlačnog modula elastičnosti. S tim rezultatom, potvrđena je polazna teza da su vlačni i savojni modul sličnih vrijednosti te da se u praksi mogu poistovjetiti. Za preostalih 7 debljina epruveta uvjet testiranja, odnosno razmak između čeljusti nije prema standardu, te bi se prilikom budućih testiranja razmak morao povećavati s porastom debljine stijenke kako bi rezultati bili dosljedni normi. Numeričkom simulacijom savijanja u tri točke epruvete debljine 0,5 mm potvrđena je početna pretpostavka utjecaja debljine stijenke na mehanička svojstva. Naime, iz rezultata linearno-elastičnog modela materijala zaključuje se da prilikom istog pomaka, odnosno istog progiba epruvete postignuta sila kod materijalnih svojstava dobivenih ovim eksperimentalnim ispitivanjem 5 do 6 N manja nego kod službenog materijala Pocan B3235 000000. Zaključak koji proizlazi iz numerički simulacija epruveta debljina 2 i 4 mm se ne mogu usporediti s rezultatima epruvete debljine 0,5 mm jer za epruvete deblje od 0,5 mm ne vrijedi norma HRN EN ISO 178. Kod debljih epruveta rezultati ukazuju na velik utjecaj plastičnih svojstava materijala koji u ovo istraživanje nisu uključeni. Poučen iskustvom rada u tvrtki Yazaki Europe Limited, podružnica Zagreb, zahtjevi kupaca kod maksimalnih sila ukopčavanja i iskopčavanja električnog konektora kreću se u rasponu od 10 do 100 N. S obzirom na to, 5 do 6 N može vrlo

lako donijeti prevagu prilikom obrade rezultata odnosno presuditi je li zahtjev zadovoljen ili nije.

LITERATURA

- [1] Ivušić, V; Franz, M; Španiček, Đ; Ćurković, L; Materijali 1, FSB, Zagreb 2014.
- [2] Jelušić, T; Perić, M; Tomić, Z; Lesičar, T; Tonković, Z; Bubalo, A; Modeliranje procesa deformiranja polimernog materijala ojačanog staklenim vlaknima primjenom Mori-Tanka metode; Zbornik radova 9. susreta hrvatskog društva za mehaniku; Hrvatsko društvo za mehaniku, Zagreb, 2019
- [3] <<https://www.materialsquare.com/blog/mechanical-properties-of-polymers-en>>. Pristupljeno 11. veljače 2023.
- [4] HRN EN ISO 527-2 (1997). Plastics – determination of tensile properties – 5. part: Small specimens
- [5] <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110702352>>. Pristupljeno 11. veljače 2023.
- [6] <<https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/gom-correlate-pro>>. Pristupljeno 11. veljače 2023.
- [7] <<https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/universal-testing-machines-for-static-applications/allroundline/>>. Pristupljeno 20. veljače 2023.
- [8] <<https://www.zwickroell.com/accessories/testxpert-testing-software/>>. Pristupljeno 11. veljače 2023.
- [9] <<http://pubs.sciepub.com/ajcea/2/1/6/figure/8>>. Pristupljeno 20. veljače 2023.
- [10] HRN EN ISO 527-1 (1997). Plastics – determination of tensile properties – 10. part: Calculation of tensile modulus
- [11] HRN EN ISO 178 (1997). Plastics – determination of flexural properties
- [12] ABAQUS, „Abaqus Documentation“, Version 6.14, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2014.
- [13] Sorić, J.: *Metoda konačnih elemenata*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [14] <<https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Pocan+B3235+000000/LANXESS+Deutschland+GmbH/99/b121d29a>>. Pristupljeno 14. veljače 2023.
- [15] <<https://lanxess.com/en/Mandatory-Information/Mandatory-Information-LANXESS-Performance-Materials-GmbH>> Pristupljeno 14. veljače 2023.