

# Ovisnost rasteznih svojstava poliestera ojačanog staklenim vlaknima o tipu ispitnih tijela i smjeru opterećenja

---

**Kužnar, Maks**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:235:670273>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Maks Kužnar**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Maks Kužnar

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svima.

Maks Kužnar



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: **Maks Kužnar**

Mat. br.: 0035197609

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ovisnost rasteznih svojstava poliestera ojačanog staklenim vlaknima o tipu ispitnih tijela i smjeru opterećenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of type and load direction of glass fibers reinforced polyester samples on tensile test results**

Opis zadatka:

Određivanje rasteznih svojstava materijala na kidalici pokriveno je normama za različite materijale u kojima su određeni uvjeti ispitivanja, oblik ispitnih tijela, vrednovanje dobivenih rezultata i dr. Rastezna svojstva izotropnih i ortotropnih polimernih kompozita određuju se u skladu s normom HRN EN ISO 527-4. Prema navedenoj normi postoje 3 tipa ispitnih tijela, koji se razlikuju po širini i prihvatu.

U radu je potrebno:

- ručnim laminiranjem napraviti kompozite na bazi poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima;
- ispitati pod jednoosnim opterećenjem rastezna svojstva za ispitna tijela tipa 1 i tipa 3, i to za dva smjera opterećenja, pod  $90^\circ$  ;
- usporediti dobivene rezultate.

Zadatak zadan:  
26. travnja 2018.

Datum predaje rada:  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2018.  
**3. rok:** 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2018.  
**3. rok:** 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

# Sadržaj

1. UVOD .....	11
2. TEORIJA.....	12
2.1. Kompozitni materijali.....	12
2.1.1. Općenito o kompozitima.....	12
2.1.2. Kompoziti s česticama.....	13
2.1.3. Vlaknima ojačani kompoziti.....	14
2.2. Podjela vlakana po materijalu.....	15
2.2.1. Staklena vlakna.....	15
2.2.2. Aramidna vlakna.....	16
2.2.3. Ugljična vlakna.....	18
2.2.4. Ostali materijali koji se mogu koristiti za vlakna.....	21
2.2.5. Usporedba nekih svojstava vlakana.....	21
2.2.5.1. Anizotropija.....	22
2.3. Polimerne matrice.....	23
2.3.1. Općenito o matricama.....	23
2.3.2. Neke vrste duromernih matrica.....	23
2.3.2.1. Nezasićene poliesterske smole.....	23
2.3.2.2. Vinil-esterske smole.....	24
2.3.2.3. Epoksidne smole.....	25
2.3.2.4. Fenolne smole.....	25
2.4. Rastezna svojstva kompozita.....	26
3. PRIPREMA UZORAKA I RASTEZNO ISPITIVANJE.....	28
3.1. Izrada kompozitnih ploča.....	28
3.2. Izrada ispitnih tijela.....	30
3.3. Statičko rastezno ispitivanje.....	33
3.3.1. Dimenzije ispitnih tijela.....	34
4. REZULTATI.....	35
4.1. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja.....	35
4.2. Usporedba dobivenih rezultata.....	38
4.2.1. Usporedba rezultata provjerom hipoteze uzorak-uzorak.....	43
4.2.1.1. Usporedba rastezne čvrstoće.....	43
4.2.1.2. Usporedba modula elastičnosti.....	48
5. ZAKLJUČAK.....	54
6. LITERATURA.....	55

## Popis slika

Slika 2.1. Podjela kompozita prema tipu ojačala: kompoziti s česticama, kompoziti s vlaknima (4) .....	12
Slika 2.2. Slaganje različito usmjerenim vlaknima ojačanih slojeva kod laminatnih konstrukcija (4) .....	13
Slika 2.3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala (4).....	14
Slika 2.4. Razgradnja E-staklenih vlakna, REM snimka (6).....	16
Slika 2.5. Struktura aromatskih poliamida (PPTA) (6).....	17
Slika 2.6. Proces izrade aramidnih vlakna (6).....	17
Slika 2.7. Idealna struktura jednog ugljikovog vlakna (6) .....	18
Slika 2.8. Podjela ugljičnih vlakana (6) .....	19
Slika 2.9. Proizvodnja ugljičnih vlakana iz PAN-a (6) .....	20
Slika 2.10. Usporedba vlakana u $\sigma$ - $\varepsilon$ dijagramu (6).....	21
Slika 2.11. Utjecaj temperature na rastezna svojstva (6) .....	21
Slika 2.12. Dijagram "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita obzirom na njegve komponente (4) .....	26
Slika 3.1. Ambalaža korištene smole .....	28
Slika 3.2. Roving staklena vlakna .....	28
Slika 3.3. Laminiranje 1 .....	29
Slika 3.4. Laminiranje 2 .....	29
Slika 3.5. Laminiranje 3 .....	30
Slika 3.6. Priprema za rezanje .....	30
Slika 3.7. Tip 1 ispitno tijela .....	31
Slika 3.8. Tip 2 i tip 3 ispitna tijela .....	31
Slika 3.9. Ljepljenje tabova.....	32
Slika 3.10. Kidalica proizvođača VEB Thüringer Industrierwerk, Rauenstein, Njemačka; razredom točnosti 1,0 u mjernom području 0-4800 N .....	33
Slika 4.1. Usporedba ispitnog tijela tipa 1 s orijentacijom jedan.....	38
Slika 4.2. Usporedba ispitnog tijela tipa 1 s orijentacijom dva.....	39
Slika 4.3. Usporedba ispitnog tijela tipa 2 s orijentacijom jedan.....	39
Slika 4.4. Usporedba ispitnog tijela tipa 2 s orijentacijom dva.....	40

## **Popis tablica**

Tablica 2.1. Općenita usporedba svojstva vlakana (6).....	22
Tablice 3.1. Dimenzije ispitnih tijela tipa 1, orijentacija jedan.....	34
Tablice 3.2. Dimenzije ispitnih tijela tipa 1, orijentacija dva.....	34
Tablice 3.3. Dimenzije ispitnih tijela tipa 2, orijentacija jedan.....	34
Tablice 3.4. Dimenzije ispitnih tijela tipa 2, orijentacija dva.....	34
Tablice 4.1. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 1, orijentacije jedan .....	35
Tablice 4.2. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 1, orijentacije dva.....	35
Tablice 4.3. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 2, orijentacije jedan .....	36
Tablice 4.4. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 2, orijentacije dva.....	37
Tablice 4.5. Rezultati ispitnih tijela tipa 1, orijentacije jedan.....	41
Tablice 4.6. Rezultati ispitnih tijela tipa 1, orijentacije dva.....	41
Tablice 4.7. Rezultati ispitnih tijela tipa 2, orijentacije jedan.....	41
Tablice 4.8. Rezultati ispitnih tijela tipa 2, orijentacije dva.....	42



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	sila
$\sigma$	$\text{N} / \text{mm}^2$	naprezanje
T	K	temperatura
$\epsilon$	$\text{mm} / \text{mm}$	istezanje
E	$\text{N} / \text{mm}^2$	Young - ov modul elastičnosti
t	s	vrijeme
m	kg	masa
$\Delta l$	mm	produljenje ispitnog tijela
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
s	$\text{N} / \text{mm}^2$	nepristrana procjena varijance
$\sigma$	$\text{N} / \text{mm}^2$	varijanca
$\mu$	$\text{N} / \text{mm}^2$	očekivanje
$\Delta x$	$\text{N} / \text{mm}^2$	apsolutna vrijednost

## SAŽETAK

Ispitana je ovisnost rastezних svojstava nezasićenog poliestera ojačanog roving staklenim vlaknima o tipu ispitnih tijela i smjeru opterećenja. Svojstva ovih polimernih kompozita određena su u skladu s normom HRN EN ISO 527-4:2008. Uspoređena su dva tipa ispitnih uzoraka, tip 1 i tip 3, rezana u dva međusobno okomita smjera. Ova dva tipa imaju velike razlike u dimenzijama te je promatran utjecaj orijentacije i tipa ispitnih uzoraka na rezultate ispitivanja rastezne čvrstoće i na modul elastičnosti. Na temelju provedenog eksperimenta i statističke analize zaključeno je da orijentacija nema značajan utjecaj na svojstva, dok je velik utjecaj prihvata i dimenzija. Na temelju analize prihvaćeno je da tip 1 daje točniji rezultat, ali uz veće rasipanje. Stoga je potrebno raditi ispitivanja na većem broju ispitnih tijela.

## **SUMMARY**

The dependence of stretch properties of unsaturated polyester roving fiber reinforced composites on the type of test body and the load direction was studied. The properties of these polymeric composites were determined according to HRN EN ISO 527-4: 2008. Two types of test specimens, type 1 and type 3, were cut into two mutually perpendicular directions. These two types have large differences in dimensions and the influence of orientation and type of test specimens on the results of stretching test results and the modulus of elasticity was observed. Based on the experiment carried out and the statistical analysis it was concluded that the orientation does not have a significant effect on the properties, while the influence of acceptance and dimension is great. Based on the analysis, it was accepted that type 1 gave a more accurate result, but with greater dispersion. Therefore, testing on a large number of test bodies is required.

## 1. UVOD

Staklenim vlaknom ojačani plastični kompoziti su postali inženjerski vrlo bitni materijali zbog svoje male mase. Povoljan omjer mase i čvrstoće, niska gustoća, visoka kemijska postojanost, visoka otpornost na umor samo su neka svojstva zbog kojih su u mnogim slučajevima pogodniji materijali od tradicionalnih. Primjena tih kompozita je veoma široka te obuhvaća područja poput autoindustrije, zrakoplovstva, pomorstva, sporta te primjene pri veoma niskim temperaturama. (1)

Iz samog sastava teško je predvidjeti kakva će svojstva imati konačni proizvod. Svojstva će ovisiti o načinu slaganja vlakana, o stupnju umreženosti matrice, o sadržaju šupljina, nečistoćama i sl. Sam način izrade kompozita ima veliki utjecaj na svojstva gotovog proizvoda. (2) Stoga je nužno ispitivanje svojstava materijala, a zbog same složenosti kompozita i osjetljivosti na različite uvjete ispitivanja su normirana. Normiranje takvih ispitivanja je vrlo kompleksno. Iz literature je poznato da rezultati ispitivanja takvih materijala ovise o mnogim faktorima, a naročito i o brzini ispitivanja (1) i temperaturi (3). Jedna od normi koje su u čestoj primjeni je norma za ispitivanje rastezних svojstava kompozita, HRN EN ISO 527-4 *Plastika -- Određivanje rastezних svojstava -- 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima* (4). Norma propisuje različite oblike ispitnih tijela, a preporuka je i da se ona izrezuju u dva međusobno ortogonalna smjera. Zbog niže cijene ispitivanja i kraćeg vremena često se ispituje samo jedan smjer rezanja materijala. O obliku ispitnih tijela često se odlučuje na temelju debljine ploče i ograničenja u količini dostupnog materijala.

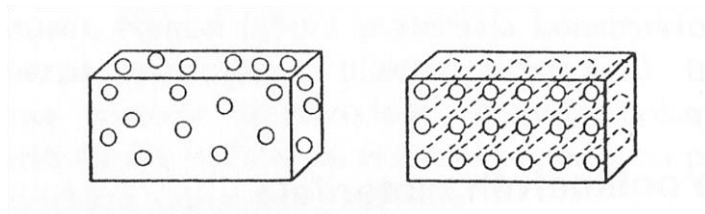
Jednoosno rastezno ispitivanje najjednostavniji je oblik opterećenja, a iznos naprezanja koje se izaziva opterećenjem dobiva se kao omjer sile i početne površine poprečnog presjeka. Kako je ispitivanje matematički dobro pokriveno, nisu očekivana velika odstupanja u rezultatima ispitivanja, međutim pokazalo se da kod kompozita ono ima utjecaj. Iz tih razloga u radu je napravljena usporedba ispitivanja dvaju različitih smjerova i dvaju tipova ispitnih tijela.

## 2. TEORIJA

### 2.1. Kompoziti materijali

#### 2.1.1. Općenito o kompozitima

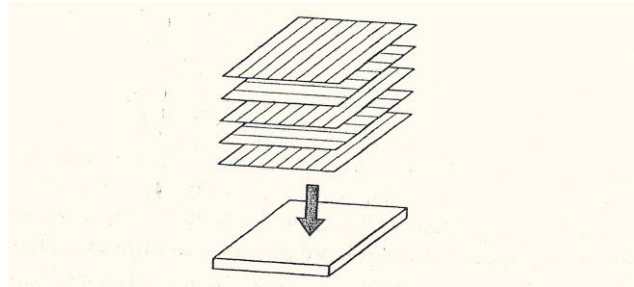
Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava, kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Drugim riječima kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju svojstava konstitutivnih faza prilikom čega je obično jedna faza (matrica) kontinuirana i okružuje ostale (disperzirane faze). Tim putem mogu se postići neobične kombinacije svojstava, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, smanjena masa, toplinska svojstva, kemijska postojanost, tvrdoća ili vodljivost (električna ili toplinska). Temeljna podjela kompozita prema vrsti matrice je na metalne, keramičke i polimerne, a prema tipu ojačala se dijele na kompozite s česticama i kompozite s vlaknima (slika 2.1). (5) Prednosti kompozitnih materijala u odnosu na druge materijale su visoka čvrstoća uz malu masu, mogućnost izrade složenih oblika, korozijska otpornost, dimenzijska stabilnost. (6) Svojstva kompozitnih materijala ovise o svojstvima matrice i ojačala, veličini i rasporedu konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, tipu ojačala te prirodi i jakosti veza između konstituenata. (5)



Slika 2.1. Podjela kompozita prema tipu ojačala: kompoziti s česticama, kompoziti s vlaknima (5)

Slojeviti kompozitni materijali ili skraćeno laminati su slojevite konstrukcije – to jest odgovarajući kompoziti sastavljeni od dvo-dimenzionalnih slojeva ili ploča („panela“) s preferiranim smjerom visoke čvrstoće, kao što se npr. susreće kod drva, odnosno kod usmjerenih vlakana ojačanih polimernih materijala. Slojevi su složeni i dodatno međusobno čvrsto povezani, a svojstva variraju obzirom na orijentiranje vlakana (smjerovi visoke čvrstoće) u pojedinim slojevima. Iz toga se može zaključiti da su sastavljeni od homogenog i kompozitnog materijala čija svojstva ne ovise samo o svojstvima konstitutivnih materijala već

i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Primjer mogućeg slaganja može se vidjeti na slici 2.2.



**Slika 1.2. Slaganje različito usmjerenim vlaknima ojačanih slojeva kod laminatnih konstrukcija (5)**

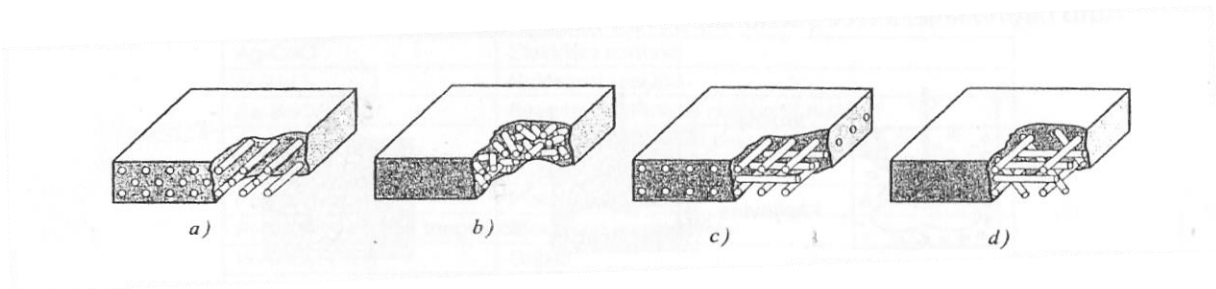
Slojeviti kompoziti proizvode se različitim postupcima koji uključuju različite tehnike deformiranja i spajanja kao što su valjanje, spajanje eksplozivom, koekstrudiranje, prešanje, lemljenje i slično. (5)

### ***2.1.2. Kompoziti s česticama***

Kod kompozita s česticama diskretne jednolično raspoređene čestice (u pravilu tvrd i krhak materijal) obavijene su mekšom i duktilnijom matricom. S obzirom na veličinu čestica i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita dijele se u dvije velike skupine: kompozite s disperzijom i kompozite s velikim česticama. Kompoziti s disperzijom sprečavaju gibanje dislokacija iz razloga što male čestice vode do efekta ojačavanja. Velike čestice ne djeluju izravno na sprečavanje gibanja dislokacija. Kompoziti s velikim česticama proizvode se u cilju postizanja takvih kombinacija svojstava kojima prvenstvena svrha nije osiguranje čvrstoće. (5)

### 2.1.3. *Vlaknima ojačani kompoziti*

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće žilavosti, krutosti te povećanja omjera „čvrstoće i gustoće“ uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekšu, duktilniju matricu. Budući da vlakna nose veći dio opterećenja, materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost. Sama vlakna se dijele po načinu rasporeda i vrsti materijala. Po načinu rasporeda se dijele na (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna (slika 2.3.). (5)



Slika 2.3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala (5)

Vlakna se također razlikuju prema promjeru i karakteru te postoje tri skupine: viskeri, vlakna i žice. Pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita potrebno je uzeti u obzir brojne faktore kao što su: omjer duljina/promjer vlakana, volumni udio vlakana, usmjerenost vlakana, svojstva vlakana te svojstva matrice. (5)

## 2.2. Podjela vlakana po materijalu

### 2.2.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna izrađuju se u pećnici izrađenoj od vatrostalnog materijala. Tijekom procesa temperature znaju biti do 1400 °C. (7) Staklena vlakna se rade u debljini od 3 do 20 μm. (5) Nakon rastezanja vlakna se premazuju vodenom emulzijom koja ima niz zadaća poput:

- lijepljenja filamenata zbog lakšeg rukovanja;
- zaštite osjetljive površine vlakana;
- poboljšanja povezivanja organskih smola i anorganskih vlakana.

Neka svojstva staklenih vlakana:

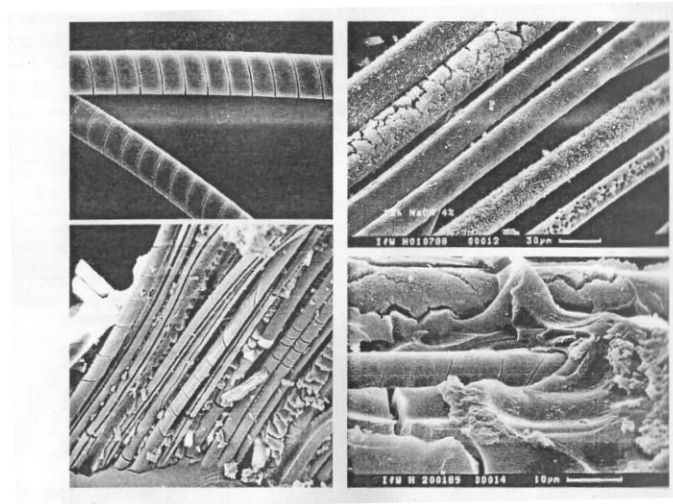
- staklena vlakna su izotropna (svojstva u smjeru rastezanja su ista i u poprečnom smjeru);
- modul elastičnosti je visok (otprilike kao kod aluminijske);
- rastezna čvrstoća premašuje većinu organskih i anorganskih materijala za izradu vlakana;
- niska gustoća  $\rho \sim 2,5 \text{ g/cm}^3$ ;
- ne ponašaju se viskoelastično kao većina materijala za vlakna, ponaša se elastično (do 3% rastezanja prije pucanja);
- relativno dobra toplinska vodljivost;
- mogu se dugotrajno opteretiti pri temperaturama do 250 °C;
- ne gore;
- niski koeficijent toplinske rastezljivosti.

Budući da se staklena vlakna u površinskom sloju brže hlade i očvršćuju, prilikom izvlačenja vlakana naprezanja se prenose samo u tom sloju što rezultira istežanjem. Istovremeno rastaljena masa u unutrašnjosti je pod vrlo malim naprežanjem. Nakon očvršćivanja u cijelom presjeku i rasterećenja po izvlačenju u površinskom sloju zaostaju rastezne radijalna i aksijalna naprezanja, nasuprot kojih u unutrašnjosti djeluju tlačna naprezanja. Stoga u određenim uvjetima dolazi do ljuštenja vlakana. (7)

Staklena vlakna sastoje se uglavnom od  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kao i  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Lako difundirajući elektroliti mogu otopiti značajnu količinu sastojaka. U razrijeđenoj otopini



kiseline u vodi (5-10%  $H_2SO_4$ ) primjećen je gubitak Al, Mg, Ca uz istovremeno povećanje promjera do 20 % i skraćivanje vlakana. S vremenom su vlakna toliko osiromašena da preostane samo kostur od silicija. Naknadnim sušenjem vlakana zbog gubitka materijala dolazi do nastanka spiralnih i aksijalnih pukotina te površina postaje grublja (slika 2.4.). (7)

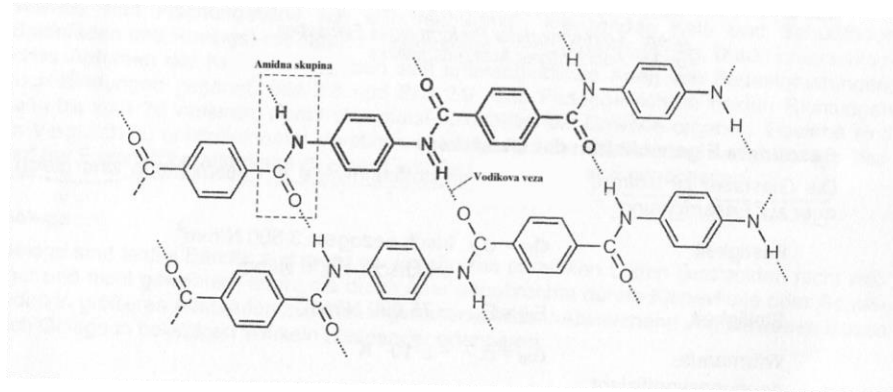


Slika 2.4. Razgradnja E-staklenih vlakna, REM snimka (7)

Podjele i oznake vlakana nisu ujednačene u svijetu. Ipak, najčešće korištena staklena vlakna su E-staklena vlakna, čija je zastupljenost na tržištu oko 90 %. Prefiks E dobiven je zbog odličnih elektroizolacijskih svojstava, međutim vlakna su višenamjenska prihvatljive cijene. Povećanjem udjela  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$  poboljšava se čvrstoća. Postoje još i R ili S vlakna poboljšane čvrstoće, C vlakna poboljšane kemijske postojanosti, itd. (3)

### 2.2.2. Aramidna vlakna

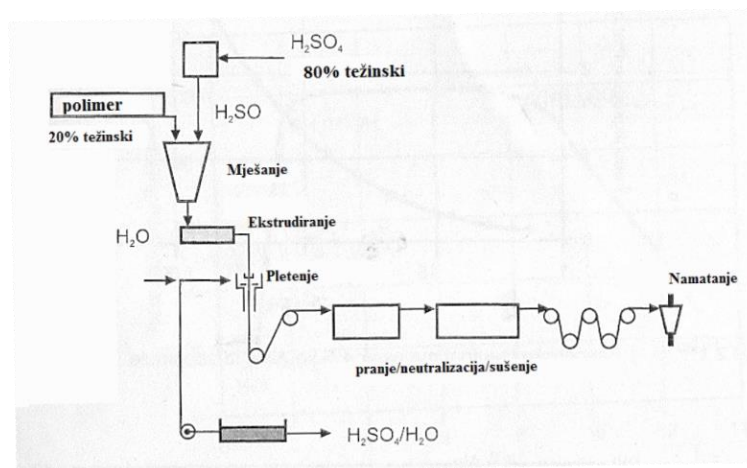
Aramidna vlakna su linearni, organski polimerni materijali visoke čvrstoće i krutosti koji su u primjenu uvedeni ranih 1970-ih. (4, 6) Kovalentne veze polimernih makromolekula su usmjerene u smjeru vlakana dok su veze između makromolekula vodikove (slika 2.5.). (7)



Slika 2.5. Struktura aromatskih poliamida (PPTA) (7)

Ona su posebno poželjna radi izuzetnog omjera čvrstoće - gustoće povoljnijeg nego kod metala. Kemijski, ova skupina materijala poznata je kao „poli-parafenilen-tereftalamid“. (5) Općenito, riječ je o pravilnim strukturama fenilnih prstena i aramidnih skupina. (7) Komercijalna imena dvaju najuobičajenijih su „Kevlar“ i „Nomex“. U vezi s prethodnim postoje različiti tipovi koji se razlikuju po mehaničkim svojstvima (modul elastičnosti i elongacija). (5) Proizvode se s kružnim poprečnim presjekom od otprilike 12  $\mu\text{m}$ .

Aramidna vlakna nije moguće proizvoditi taljenjem jer je talište iznad temperature toplinske razgradnje materijala. Sama proizvodnja počinje otapanjem polimera u visokokonzentriranoj sumpornoj kiselini u omjeru 20/80 te se ta otopina ekstrudira i rasteže (slika 2.6.). (7)



Slika 2.6. Proces izrade aramidnih vlakna (7)

Mehanički gledano, ova vlakna imaju visoku uzdužnu rasteznu čvrstoću, rastezni modul elastičnosti, krutost, žilavost, otpornost na udar, vatrootpornost, otpornost na puzanje i otpornost umoru materijala. (5) Lošija su tlačna svojstva i otpornost na zračenje (npr. UV). (7)

Imaju nisku gustoću ( $\rho \sim 1,45 \text{ g/cm}^3$ ) te široki raspon temperatura kod kojih zadržava visoka mehanička svojstva (od  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ). (4, 6) Aramidna vlakna su vrlo anizotropna. (7)

Kemijski gledano, aramidna vlakna su podložna degradaciji s jakim kiselinama i lužinama, ali su relativno inertni prema drugim otopinama i kemikalijama.

Najčešće se koriste kod kompozita s polimernom matricom, najčešće na bazi s epoksidnih i poliesterskih smola. (5)

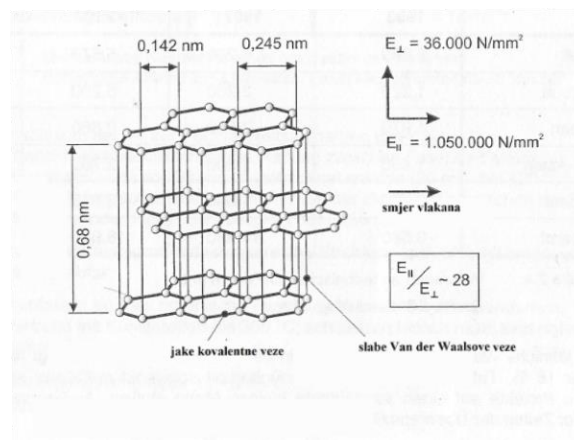
### 2.2.3. Ugljična vlakna

Ugljična vlakna imaju visoku čvrstoću i krutost, ali vrlo nisku istezljivost. Sadrže 90 %C, <7 % N, <1 %O, <0,3 %H. (7)

Neki od razloga za korištenje ugljičnih vlakna su:

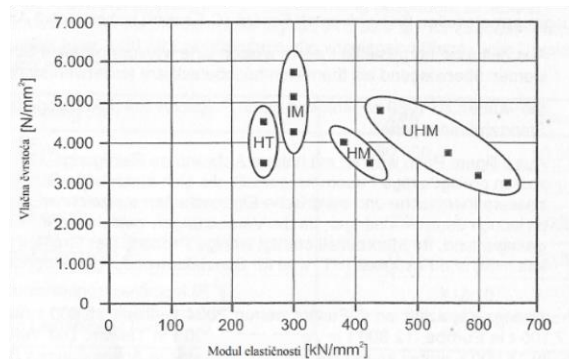
- najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću od svih vlaknastih materijala;
- visok rasteznini modul i visoku čvrstoću zadržavaju i pri povišenim temperaturama, osim što može biti problema zbog oksidacije pri visokim temperaturama;
- kod sobne temperature vlaga i niz otapala, kiselina i lužina ne razaraju ugljična vlakna;
- razvijeni su postupci proizvodnje vlakana i kompozita koji su relativno jeftini. (5)

Imaju visoki omjer čvrstoća/gustoća, vrlo niska tlačna svojstva te su iznimno anizotropna. Modul elastičnosti i čvrstoća variraju te ovise o stupnju orijentacije umiješanih C-slojeva koji nastaju tijekom proizvodnje. Općenito, mehanička svojstva proizlaze iz kovalentnih veza grafitnih kristala u smjeru vlakana (Slika 2.7.).



Slika 2.7. Idealna struktura jednog ugljikovog vlakna (7)

Promjer im je između 5 i 10  $\mu\text{m}$ . (7) Najčešća podjela ugljičnih vlakana je prema rasteznom modulu, na temelju kojeg se razlikuju četiri tipa standardni (HT), srednjekruti (IM), visokokruti (HM) i ultravisokokruti (UHM) (slika 3.5.). (5)



Slika 2.8. Podjela ugljičnih vlakana (7)

Proizvodnja ugljičnih vlakana počine odabirom polaznog materijala o čemu ovise dobivena svojstva vlakana. Postoje dva tehnički bitna načina proizvodnje ugljičnih vlakana iz PAN-a i iz katrana.

Materijali od kojih se mogu izraditi ugljična vlakna:

- celuloza -dobiva se manje savršena struktura  
-vlakna imaju izolacijska svojstva
- PAN - poliakrilonitril  
-današnji standard za svojstva ugljičnih vlakana
- jeftinija smola (katran) - jeftina izrada vlakana visoke čvrstoće i odličnih toplinskih i električnih svojstava s lošijim tlačnim svojstvima (zbog smanjenog broja veza između grafitnih ravnina).

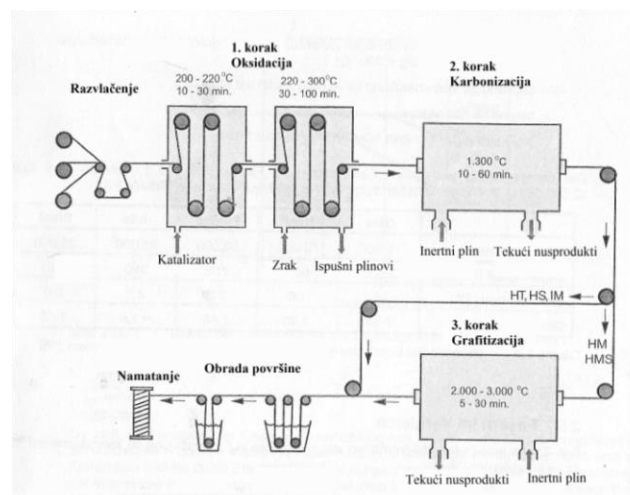
Neke dodatne posebnosti ugljičnih vlakana su:

- imaju progresivno ponašanje pri naprezanju npr. modul elastičnosti se povećava s povećanjem opterećenja;
- vatrostalni su pri temperaturama do 500 °C;
- lagani  $\rho=1,6-2,0 \text{ g/cm}^3$ ;
- dobra električna i toplinska provodnost;
- biokompatibilni;
- vrlo lomljiva/krhka i osjetljiva na pucanje;

- ne reflektiraju zrake, odnosno otporna su radarsku detekciju;
- dugim skladištenjem gube elastičnost;
- odlična mehanička svojstva pri dinamičkom opterećenju. (7)

Opis proizvodnje ugljičnih vlakana iz PAN-a:

Stvara se *prekursor*, odnosno vlakna od PAN-a koja se zatim opterećuju rastezno pri temperaturi između 200 i 300 °C (stabilizacijsko tretiranje u zraku). Tim postupkom PAN dehidrira i ciklizacijom nitrilne skupine se pretvara u polimerne ljestve. U sljedećem koraku polimerni lanci pirolizom na temperaturi do 1600 °C u inertoj atmosferi prelaze u grafitne slojeve. Kao rezultat rasteznog opterećenja početnih PAN-vlakana grafitni slojevi su orijentirani u smjeru vlakana. Time se stvaraju vlakna koja se mogu, ali i ne moraju dodatno toplinski obrađivati pri temperaturi od oko 2500 °C čime se dobiju znatno bolja mehanička svojstva. Shema cijelog procesa se može vidjeti na slici 2.9. (7)



Slika 2.9. Proizvodnja ugljičnih vlakana iz PAN-a (7)

Opis proizvodnje ugljičnih vlakana iz katrana:

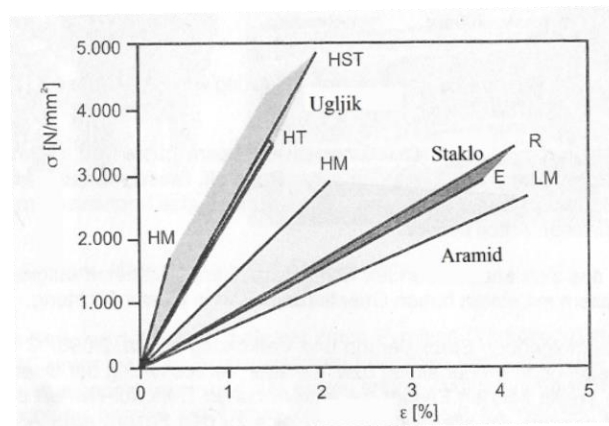
Prvi korak je toplinska obrada katrana pri temperaturi preko 350 °C. Stvara se međufazni materijal iznimno anizotropnih svojstava s visokim udjelom tekućih kristala. Ta taljevina se prede te nastaju vlakna s visokim stupnjem orijentacije u smjeru rastezanja. Sljedi naknadna stabilizacija pri temperaturi do 2000 °C (dodatno poboljšanje orijentacije). Zadnji korak podrazumijeva rekristalizacijski proces do 3000 °C. (7)

#### 2.2.4. Ostali materijali koji se mogu koristiti za vlakna

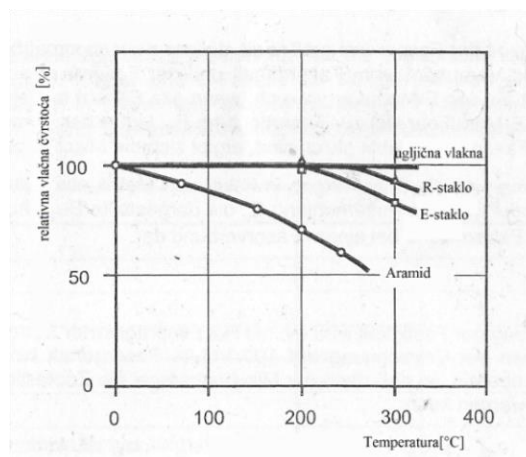
Za vlakna se rijede mogu koristiti materijali poput bora, silicijeva karbida, aluminijska oksida ili pak neke celulozne materijale (npr. lan, konoplja, juta, pamuk i sl.) (4, 6)

#### 2.2.5. Usporedba nekih svojstava vlakana

Na slikama 2.10. i 2.11. te u tablici 2.1. su grafički i tablično prikazane neke razlike između navedenih tipova vlakana.



Slika 2.10. Usporedba vlakana u σ-ε dijagramu (7)



Slika 2.11. Utjecaj temperature na rastezna svojstva (7)

**Tablica 2.1. Općenita usporedba svojstva vlakana (7)**

	Staklena vlakna	Aramidna vlakna	Ugljična vlakna
Gustoća	+ -	++	+
Rastezna čvrstoća	+	+	+
Modul elastičnosti	-	+	++
Tlačna čvrstoća	+	-	+
Otpornost na udar	+	+	-
Prigušivanje vibracija	-	+	-
Ponašanje pri dinamičkom i statičkom ponašanje	+	+	++
Povezivanje s matricom	++	-	+
Upijanje vlage	+	-	+
Cijena	++	+ -	-

### 2.2.5.1. Anizotropija

Anizotropija vlakana je svojstvo koje je rezultat nepravilne ili usmjerene mikrostrukture vlakana. Omjer modula elastičnosti u smjeru vlakna s modulom elastičnosti poprečno od smjera vlakna je jasan pokazatelj anizotropije. Čim je vrijednost tog omjera veća, tim je izraženija anizotropija. Samo su staklena vlakna u potpunosti izotropna. (7)

## **2.3. Polimerne matrice**

### ***2.3.1. Općenito o matricama***

Pod matricom se podrazumijeva materijal kojim se vlakna impregniraju čime se stvara iskoristiv proizvod. (7) Matrica ima nekoliko zadaća: služi kao medij kojim se izvana nametnuto naprezanje prenosi i raspoređuje na vlakna (samo vrlo mali dio nametnutog opterećenja prenosi matrica) te služi za zaštitu pojedinačnih vlakana od površinskog oštećivanja do kojeg može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskim reakcijama s okolnim medijem. (5) Polimerne matrice se prvotno dijele na duromerne i plastomerne. Duromeri su češći i podrazumijevaju smole koje miješanjem s nekom reakcijskom tvari umrežavaju i pritom očvršćuju. (8) Reakcijskom dodaci podrazumijevaju tvari poput katalizatora ili umrežavala. (7)

### ***2.3.2. Neke vrste duromernih matrica***

#### ***2.3.2.1. Nezasićene poliesterske smole***

Nezasićene poliesterske smole (e. unsaturated polyester resin, UPR) su poznate od 1936. godine i koriste se u mnogim područjima. Oko 70 % od ukupno proizvedenog nezasićenog poliestera koristi se za vlaknom ojačane kompozite. Neki razlozi zašto se koristi za vlaknom ojačane kompozite su niska viskoznost, dobro prijanjanje za vlakna, fleksibilna brzina umreženja, niska cijena i sl. Bezbojne su do lagano žute boje. Sastoje se od oligomernih linearnih molekula koje sadrže reaktivne dvostruke veze. Standardnim smolama nezasićenog poliestera smatraju se one na bazi ortoftalne kiseline, a postoje i smole na bazi iso- odnosno tereftalne kiseline. One imaju bolja svojstva i dulje lance, ali vrlo su viskozne. Duljina, ponašanje i broj dvostrukih veza utječe na reaktivnost smole. Umreživanje kod nezasićenog poliestera je egzotermna reakcija te dolazi do skupljanja oko 5-9 % volumena materijala. Ne dolazi do stvaranja tekućih nusproizvoda prilikom umreživanja. S povećanjem reaktivnosti smanjuje se vrijeme umreživanja, ali raste količina otpuštene topline i raste skupljanje samog materijala. Skupljanje se može smanjiti dodavanjem LS (e. Low-Shrink) i LP (e. Low-Profile) dodataka (za potrebe visoko kvalitetne proizvodnje). Većina smola nezasićenog poliestera dozrijeva pri sobnoj temperaturi uz prisutnost zraka. Sama viskoznost smole ovisi o udjelu stirena - u pravilu između 30 i 50 %. Povećanjem stirena smanjuje se viskoznost, ali previše stirena uzrokuje krhkost.



Sama svojstva poliestera ovise o dopunskim komponentama. Neke moguće dopunske komponente su: stiren, parafin, kreda, kaolin i sl. Ne postoji neka univerzalna smjesa poliesterske smole, nego se miješa s obzirom na primjenu. Neke opće karakteristike su: niska cijena, pouzdanost, livljivost, obradljivost ovisna o udjelu stirena i reakcijske tvari, veliko skupljanje materijala s umreživanjem, a zbog prisutnog toksičnog stirena materijal nije pogodan za okoliš. (7)

Opis procesa umreživanja:

Kod ovih smola umreživanje je proces radikalne kopolimerizacije, pri čemu se oslobađaju dvostruke kovalentne veze i vežu s molekulama stirena. Umrežavalo je organski peroksid koji se razlaže na radikale zbog djelovanja topline ili katalizatora. Umreživanje može biti toplo ili hladno ovisno o upotrebljenom umrežavalu i katalizatoru. (7)

#### *2.3.2.2. Vinil-esterske smole*

Vinil-esterske smole razlikuju se od nezasićenih poliesterskih smola po umreživanju metakrilatnih skupina. Kao i ostale nezasićene smole, one posjeduju dvostruke kovalentne veze te se prerađuju na sličan način. Imaju iste osnovne komponente kao fenolne smole, ali su reaktivnije, imaju kraće molekulske lance, nižu viskoznost i bolju obradivost. Umrežavaju se u prisutnosti peroksida. Najzastupljenije vrste-vinil esterskih smola su: Bisphenol A-Epoksidna-VE smola, Novolak-Epoksidna-VE smola te vinilester-uretanska hibridna smola. Prve dvije su komercijalno bitne, dok se kod treće novije odvijaju sekundarne reakcije OH skupine vinilestera pri čemu se dobivaju bolja mehanička svojstva, toplinska postojanost, bolja kemijska postojanost i sl.

Vinilester se koristi za proizvode izložene agresivnim medijima. To je materijal visoke kvalitete i visoke cijene. Prednosti naspram nezasićenih poliestera su: viša tvrdoća, viša otpornost na utjecaj kemikalija, dobra rastezna svojstva i dobra žilavost. Prednosti naspram epoksidne smole su: niža viskoznost, lakša obrada, brže i prilagodljivije vrijeme umreživanja. (7)

#### 2.3.2.3. Epoksidne smole

Epoksidne smole imaju najmanje jednu, a u većini slučaja dvije epoksidne skupine u molekuli. One djeluju kao funkcionalne skupine pomoću kojih dolazi do nastanka makromolekule. Umrežavalo se nalazi u tekućem ili praškastom stanju. Sastoji se od aktivnih vodikovih atoma koji reagiraju s kisikom epoksidne skupine. Ne radi se o lančanoj reakciji kao kod nezasićenih poliestera i viliestera. Epoksidna smola i umrežavalo moraju se miješati u stehiometrijskom omjeru. Koliko epoksidnih skupina ima neka smjesa po jedinici mase zove se epoksidni ekvivalent te je bitan podatak za određivanje stehiometrijskog omjera. Umreživanjem epoksidne smole dobiva se visoko kvalitetan duromer s dobrim mehaničkim svojstvima, odličnom dimenzijskom stabilnošću, odličnog ponašanja pri dinamičkom opterećenju, s visokom adhezivnošću i dobrim izolacijskim svojstvima. Možda čak i najvažnije svojstvo je odlična dimenzijska stabilnost koja je rezultat skupljanja materijala dok je materijal još u kapljevitom stanju. Odabirom epoksidne smole, umrežavala i dodataka mogu se optimizirati neka svojstva. Tek približno 8 % sveukupne proizvodnje materijala na bazi epoksidne smole koristi se za vlaknima ojačane kompozite. Neki nedostaci su relativno visoka viskoznost, slabija obradivost - pogotovo pri nižim temperaturama i duže trajanje umreživanja (moguće je ubrzavanje pomoću katalizatora, ali puno ograničenije nego kod nezasićenog poliestera). (7) Epoksidne smole u pravilu zahtijevaju naknadno očvršćivanje pri povišenim temperaturama, što je često izrazito skupo s obzirom na dimenzije proizvoda poput turbina vjetroelektrana ili jedrilica.

#### 2.3.2.4. Fenolne smole

One nastaju polikondenzacijskom reakcijom fenola i formaldehida. Prilikom umreženja dolazi do stvaranja niskomolekulskih nusproizvoda (voda, amonijak, ...). Samo umreživanje je egzotermno, ali da bi do njega došlo treba doći do endoternog isparivanja nusprodukata - što znači da je potrebno hlađenje nakon početne opskrbe toplinom. Fenol je lomljivi, krhki materijal ograničene primjene zbog otpuštanja tekućih nusprodukata. Vrlo je zapaljiv, a tijekom gorenja otpušta toksične plinove. Fenol također pod utjecajem svjetlosti posmeđi što je i razlog zašto se tijekom proizvodnje tamno boji. Razlozi korištenja su visoka toplinska postojanost, dimenzijska stabilnost i visoka otpornost na utjecaj određenih kemikalija. (7)

Opis procesa umreživanja:

Nakon početnog zagrijavanja na 60-80 °C paralelno dolazi do isparavanja nusprodukata i do omekšavanja još neočvrstnutog materijala. Oba procesa su endotermna i odvijaju se pri temperaturama do 110 °C. Nakon 160 °C dolazi do egzotermne reakcije te time i do umreženja.

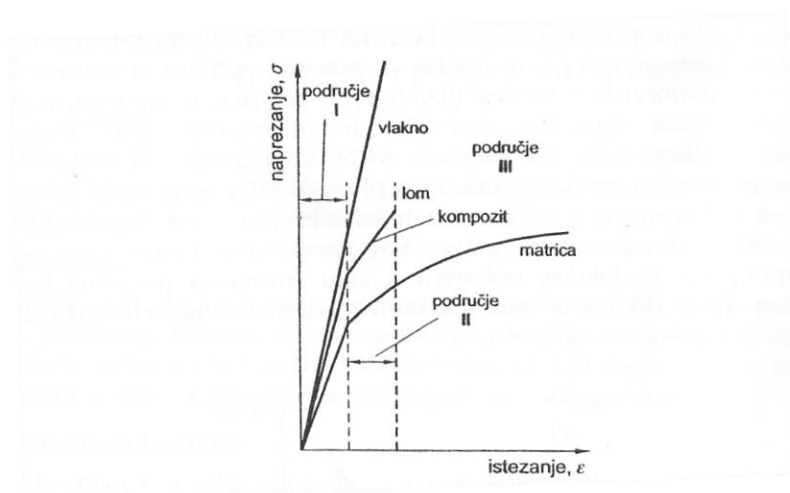
Tri su faze umreživanja: 1. Resol ili Novolak: linearna struktura, tekuće ili čvrsto agregatno stanje;

2. Nedefinirano međustanje ili „Resitol“: obradivo na višim temperaturama, ograničene čvrstoće;

3. „Resit“ stanje: dobrih svojstava, finalno stanje.

#### 2.4. Rastezna svojstva kompozita

Statičko rastezno ispitivanje je postupak ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na kidalici. Njime se utvrđuju glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala, ali i njihovu deformabilnost, odnosno čvrstoću i krutost te sposobnost apsorpcije energije prije pucanja. Iz materijala kojeg se ispituje izrađuje se uzorak za ispitivanje propisanog oblika i dimenzija, a to je epruveta ili ispitno tijelo.



Slika 2.12. Dijagram "napreznosti-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita obzirom na njegve komponente (5)

Na slici 2.12. prikazan je dijagram ovisnosti napreznosti o istezanju za kruto vlakno, deformabilnu matricu i kompozit. Stakleno vlakno ne podnosi plastičnu deformaciju, dok

polimerna matrica ponekad podnosi, naročito kad je načinjena od plastomera. Duromerna matrica, ako je dobro umrežena, ne podnosi plastičnu deformaciju, već je to krhki materijal.

Na dijagramu je vidljivo da vlakna i kompozit podnose jednako istezanje. Poprečni presjek kompozita sastoji se od čvrstih vlakna i od slabije matrice. Iz same krivulje za kompozit nije vidljivo da je neposredno prije pucanja kompozita u samom vlaknu naprezanje puno veće nego u matrici. Ono puca u trenutku kada vlakno ne može više podnijeti narinuto naprezanje, a matrica nije u mogućnosti preuzeti nastalo naprezanje te cijeli kompozit puca.

Nagib pravca u linearnom području daje vrijednost modula elastičnosti, dok rastezna čvrstoća odgovara naprezanju pri maksimalnoj sili, a računa se prema izrazu:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A}, \text{ gdje je } F_{max} \text{ najveća sila i } A \text{ površina presjeka ispitnog tijela.}$$

U inženjerstvu, ispitivanja mehaničkih svojstava normirana su. Premda su norme preporuka, a ne obaveza, za ispitivanja svojstva anizotropnih materijala posebno je važno održati usporedivost rezultata. Iz tog razloga važno je držati se neke prihvaćene norme. U Hrvatskoj je prihvaćena norma za ispitivanje rasteznih svojstava polimernih kompozita HRN EN ISO 527-4:2008 (4). Ova norma propisuje pripremu materijala, dimenzije i oblik epruvete, pločice (en. tabs), način izrezivanja epruveta i tabova, smjerove rezanja epruveta, svojstva ljepila potrebnog za tabove, režim ispitivanja te preporuča mjerne uređaje. Materijal bi se trebao pripremiti slijedeći normu ISO 1268. S obzirom na oblik postoje 3 vrste epruveta koje proizvoljno odabiremo uzimajući u obzir uvjete ispitivanja koji su na raspolaganju. Pločice su elementi karakteristični za tip 3 ispitna tijela. One osiguravaju bolji prihvat ispitni tijela. Pločice se prihvaćaju na ispitna tijela ljepilom normiranih svojstava (smična čvrstoća iznad 30 MPa, a da je pri tome ljepilo još uvijek fleksibilno). Bilo bi idealno da se ispitna tijela režu parametrima normiranim u normi ISO 2818. U HRN EN ISO 527-4:2008 (4) je samo istaknuto da treba osigurati najmanji mogući utjecaj unešene topline na ispitna tijela prilikom rezanja te da nema vidljivih površinskih nepravilnosti nastalih uslijed rezanja. Preporuka norme je da se iz ravne ploče izrezuju ispitna tijela za najmanje dva smjera, ortogonalno jedan u odnosu na drugi. Preporučeno je i korištenje mikrometra s razlučivošću od 0,01 mm za određivanje točnih dimenzija ispitnih tijela. Za brzinu rasteznog ispitivanja se preporuča 2 mm/min. (4)

### 3. PRIPREMA UZORAKA I RASTEZNO ISPITIVANJE

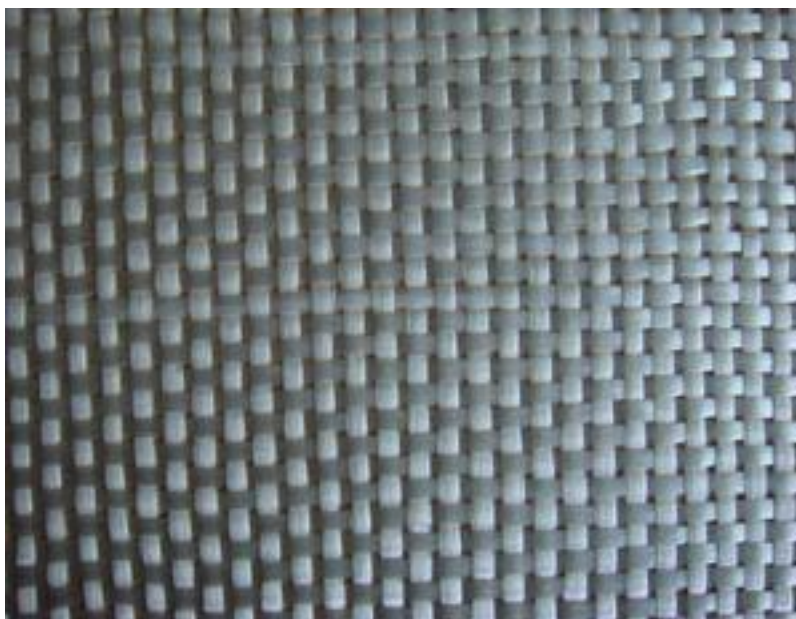
#### 3.1. Izrada kompozitnih ploča

Polimerna osnova kompozitne ploče je nezasićena poliesterska smola na bazi ortoftalne kiseline proizvođača *Sirca* (HA184TPR20) (Slika 3.1.).



Slika 3.1. Ambalaža korištene smole

Polimerna matrica ojačana je staklena vlaknima pletenim u roving (slika 3.2.). Roving je jednostavna ukrižana tkanina koja sadrži međusobno ortogonalno postavljenu osnovu i potku i najčešće jednakih debljine strukova. Takva vlakna imaju bolja svojstva u dva izražena smjera, a lošija za sve međusmjerove. (9)

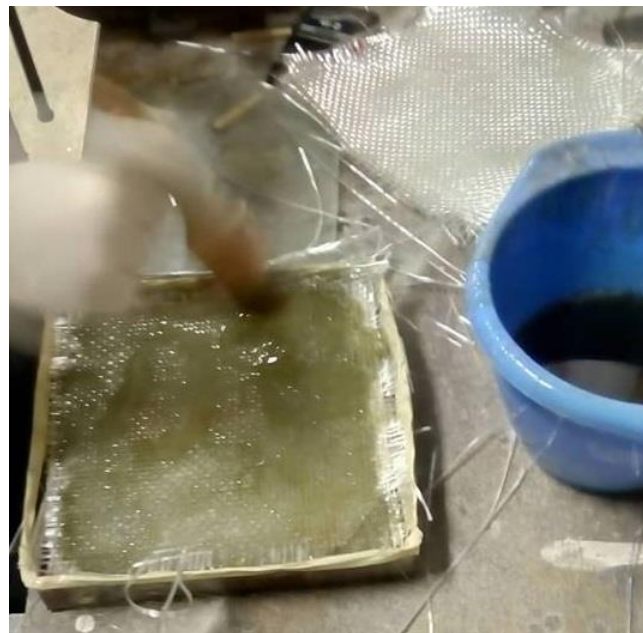


Slika 3.2. Roving staklena vlakna

Posloženo je prvih dva do tri slojeva staklenih vlakana u kalup. Temeljito je izmiješana poliesterska smola s 2 % umrežavala na bazi peroksida (2-butanon peroksid u dimetil ftalatu) *Metox-50w*. Staklena vlakna natapaju se i premazuju kistom te se ravnaju i uklanjaju eventualni mjehurići zraka (slike 3.3. i 3.4.). Na to se stavlja još dva do tri slojeva staklenih vlakana i proces se ponavlja sve dok se ne dobije debljina od približno 4 mm, što odgovara ukupno 14 slojeva rovinga od staklenih vlakana. Kalupi se ostavljaju preko noći tako da matrica očvrstne (slika 3.5.).



**Slika 3.3. Laminiranje 1**



**Slika 3.4. Laminiranje 2**



Slika 3.5. Laminiranje 3

### 3.2. Izrada ispitnih tijela

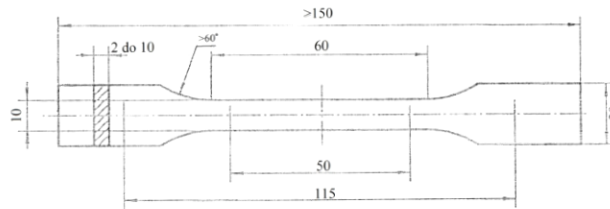
Ispitna tijela izrezuju se iz kompozitne ploče prema planu rezanja. Na slici 18 prikazan je plan rezanja ispitnih tijela za tip 2. Prilikom izrade plana rezanja potrebno je uzeti u obzir širinu pile (slika 3.6.).



Slika 3.6. Priprema za rezanje

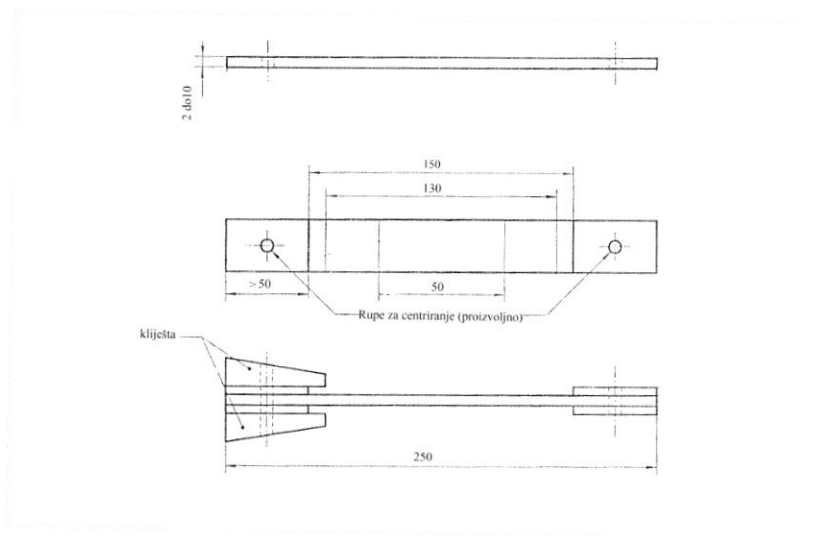
Izrezana su dva tipa ispitnih uzoraka po normi HRN EN ISO 527-4:2008 (4) i dvije orijentacije okomito jedna na drugu (slika 3.6.). Prema navedenoj normi postoje tri tipa

ispitnih tijela. Tip 1 je manja epruveta (slika 3.7.), istovrsna onoj za ispitivanje neojačane plastike.



Slika 3.7. Tip 1 ispitno tijelo (4)

Tip 2 i 3 su veće epruvete koje su dimenzijski međusobno iste, a razlikuju se samo po tome što tip 3 ima naljepljene pločice (en. tabs) na krajevima, odnosno na mjestima prihvata u čeljusti, kao što se može vidjeti na slici 6.8.



Slika 3.8. Tip 2 i tip 3 ispitna tijela (4)

Zbog očekivanog gnječenja epruveta tipa 2 u dostupnim čeljustima, za usporedbu su odabrani tip 1 i tip 3. Sila u čeljustima povećava se s opterećenjem što može uzrokovati gnječenje ispitnog tijela i u konačnici pucanje ispitnog tijela na mjestu prihvata. Podebljanje krajeva uz pomoć pločica kod tipa 3 ispitnih tijela bi možda omogućilo ispitivanje na takvoj kladalici. Normom je opisana izrada ispitnog tijela tipa 3. On zahtijeva poseban način izrade ispitnih tijela uz prethodno lijepljenje pločica. Pločice su napravljene od istog materijala kao i ispitna tijela, ali debljine između 1 i 3 mm. Lijepljenje pločica mora se provesti pažljivo, jer ljepilo



ima slabija svojstva od kompozita i očekivano je da će doći do prevelikog smičnog naprezanja. Norma preporuča fleksibilno ljepilo koje podnosi smično naprezanje od 30 MPa. Za spajanje pločica na ispitno tijelo korišteno je *LOCTITE HY 4092 GY*, koje prema deklaraciji podnosi smično naprezanje do 15,4 MPa i istezanje od 72 %. Ovo ljepilo je dvokomponentno, samonivelirajuće cijanoakrilatno/epoksidno hibridno, a namijenjeno je za zahtjevne primjene zalijevanja kao i za strukturno lijepljenje. Ljepilo nažalost nije u potpunosti u skladu s normom zbog toga što je nešto nižeg smičnog naprezanja nego što je to preporučeno, ali je ipak bilo odabrano jer je svojstvima bilo najbliži od svih nama dostupnih ljepila. Prije lijepljenja potrebno je površine na ispitnim tijelima, koje su u dodiru s pločicama i površine na pločicama, pogrubiti s brusnim papirom i očistiti s prikladnim otapalom (također predložila norma). Po normi je bilo potrebno rezati kompozitnu ploču zajedno s pločicama nakon lijepljenja, što nije izvedeno zbog vremenskog ograničenja. Po uputstvima ljepilu treba nekih 10 do 15 minuta da se stegne.



**Slika 3.9.** Ljepljenje tabova

Testiranje tipa 3 pokazalo se nemoguće jer ljepilo nije izdržalo smično naprezanje. Pločice su skinute i provedeno je ispitivanje ispitnih tijela koje su bez pločica odgovarale tipu 2. Tijekom ispitivanja ispitnih tijela tipa 2 očekivano je došlo je do gnječenja epruvete i u konačnici njezinog pucanja u blizini prihvata u gotovo svim slučajevima, što je uzrokovalo pucanje ispitnih tijela pri konzistentno nižim naprezanjima u usporedbi s tipom 1.

### 3.3. Statičko rastezno ispitivanje



**Slika 3.10. Kidalica proizvođača VEB Thüringer Industriewerk, Rauenstein, Njemačka; razredom točnosti 1,0 u mjernom području 0-4800 N**

Ispitna tijela tipa 1 i 3 imaju veliku razliku u poprečnom presjeku pa je i područje potrebne sile različito. Manja ispitna tijela ispitana su na univerzalnoj kidalici proizvođača ZWICK, maksimalne nazivne sile 50 kN, u mjernom području 25 kN. Ova kidalica nema dovoljnu silu za ispitivanje većih ispitnih tijela tipa 2 i 3. Zbog toga su velika ispitna tijela ispitana na univerzalnoj kidalici WPM EU mod 40, proizvođača Heckert, maksimalne nazivne sile 400 kN. Slabija kidalica ima odgovarajući priхват, dok je priхват jače kidalice prilagođen metalima te postoji opasnost da pri većim opterećenjima ošteti ispitno tijelo.

### 3.3.1. Dimenzije ispitnih tijela

Dimenzije svih ispitnih tijela su izmjerene pomičnim mjerilom prije kidanja. Dimenzije ispitnih tijela tipa 1 za dva ortogonalna smjera su prikazane u tablicama 3.1. i 3.2.

**Tablica 3.1. Dimenzije ispitnih tijela tipa 1, orijentacije jedan**

Ime epruvete	<u>2.1.1</u>	<u>2.1.2</u>	<u>2.1.3</u>	<u>2.1.4</u>	<u>2.1.5</u>
Širina[mm]	10,22	10,12	9,78	9,98	9,28
Debljina[mm]	4,00	4,06	3,98	4,04	4,14
Površina[mm <sup>2</sup> ]	40,88	41,087	38,924	40,319	38,419

**Tablica 3.2. Dimenzije ispitnih tijela tipa 1, orijentacije dva**

Ime epruvete	<u>2.2.1</u>	<u>2.2.2</u>	<u>2.2.3</u>	<u>2.2.4</u>	<u>2.2.5</u>
Širina[mm]	10,50	10,72	10,22	10,36	10,64
Debljina[mm]	4,06	4,46	4,36	4,28	4,16
Površina[mm <sup>2</sup> ]	42,63	47,811	44,559	44,341	44,262

Dimenzije ispitnih tijela tipa 2 za dva ortogonalna smjera su prikazane u tablicama 3.3. i 3.4.

**Tablica 3.3. Dimenzije ispitnih tijela tipa 2, orijentacije jedan**

Ime epruvete	<u>1.1.1</u>	<u>1.1.2</u>	<u>1.1.3</u>	<u>1.1.4</u>	<u>1.1.5</u>
Širina[mm]	25,10	25,78	24,94	24,34	25,90
Debljina[mm]	4,62	4,8	4,72	4,64	4,84
Površina[mm <sup>2</sup> ]	115,962	123,744	117,7168	112,9376	125,356

**Tablica 3.4. Dimenzije ispitnih tijela tipa 2, orijentacije dva**

Ime epruvete	<u>1.2.1</u>	<u>1.2.2</u>	<u>1.2.3</u>	<u>1.2.4</u>	<u>1.2.5</u>
Širina[mm]	24,78	25,46	25,48	25,02	25,08
Debljina[mm]	4,3	4,58	4,5	4,06	3,84
Površina[mm <sup>2</sup> ]	106,554	116,607	114,66	101,581	96,307

## 4. REZULTATI

### 4.1. Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja

Tijekom rasteznog pokusa bilježila su se produljenja svake epruvete za proizvoljno odabrane sile. Početna kontrolirana duljina ekstenzometra je 50 mm, a vrijednosti  $\Delta l$  su dobivene kao srednja vrijednosti očitanih na ekstenzometru s dva sata, lijevo i desno. Produljenja uzorka tipa 1 za dva ortogonalna smjera rezanja ispitnih tijela prikazana su u tablicama 4.1. i 4.2.

Tablica 4.1. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 1, orijentacije jedan

F[N]	$\Delta l_{211}$ [mm]	$\Delta l_{212}$ [mm]	$\Delta l_{213}$ [mm]	$\Delta l_{214}$ [mm]	$\Delta l_{215}$ [mm]
980		0,04	0,0045	0,025	0,035
1960	0,09	0,105	0,08	0,08	0,09
2942		0,17	0,14	0,14	0,15
3923	0,24	0,245	0,225	0,21	0,23
4903		0,32	0,305	0,29	0,3
5884	0,39	0,4	0,385	0,37	0,38
6865		0,48	0,475	0,45	0,47
7845	0,585	0,58	0,575	0,54	0,57
8826		0,66	0,66	0,58	0,65
9810	0,81	0,75	0,78	0,73	0,74
10787		0,86	0,87	0,82	0,83
<b>Sile pucanja[N]</b>	11474	13533	11768	10885	13827

Tablica 4.2. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 1, orijentacije dva

F[N]	$\Delta l_{221}$ [mm]	$\Delta l_{222}$ [mm]	$\Delta l_{223}$ [mm]	$\Delta l_{224}$ [mm]	$\Delta l_{225}$ [mm]
980	0,0015	0,003	0,003	0,005	0,0035
1960	0,0055	0,0055	0,008	0,013	0,009
2942	0,0135	0,0085	0,0135	0,02	0,016
3923	0,0215	0,0155	0,02	0,026	0,023
4903	0,0305	0,0225	0,027	0,033	0,03
5884	0,0395	0,0295	0,0345	0,039	0,0375
6865	0,0485	0,0365	0,041	0,047	0,0445

7845	0,0605	0,044	0,05	0,054	0,053
8826	0,0715	0,0515	0,058	0,062	0,063
9810	0,0835	0,0595	0,067	0,069	0,0695
10787	0,0915	0,0675	0,075	0,077	0,0775
11768	0,1125	0,076	0,083	0,084	0,0865
12749		0,085	0,092	0,093	0,0965
<b>Sile pucanja[N]</b>	12160	13239	14416	13827	15053

Produljenja uzorka tipa 2 za dva ortogonalna smjera rezanja ispitnih tijela prikazana su u tablicama 4.3. i 4.4.

Tablica 4.3. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 2, orijentacije jedan

<b>F[N]</b>	$\Delta l_{111}$ [mm]	$\Delta l_{112}$ [mm]	$\Delta l_{113}$ [mm]	$\Delta l_{114}$ [mm]	$\Delta l_{115}$ [mm]
2000	0,0025	0,0010	0,0015	0,0005	0,0010
3000	0,0060				
4000	0,0090	0,0065	0,0060	0,0020	0,0040
5000	0,0130				
6000	0,0160	0,0075	0,0110	0,0070	0,0090
7000	0,0190				
8000	0,0220	0,0175	0,0170	0,0120	0,0140
9000	0,0250				
10000	0,0280	0,0225	0,0230	0,0180	0,0190
11000	0,0310				
12000	0,0340	0,0300	0,0290	0,0250	0,0250
13000	0,0370				
14000	0,0400	0,0360	0,0350	0,0320	0,0310
15000	0,0430				
16000		0,0430	0,0410	0,0390	0,0370
18000		0,0490	0,0490	0,0465	0,0440
20000		0,0560	0,0545	0,0525	0,0500
22000		0,0640	0,0635	0,0605	0,0560
24000		0,0710	0,0705	0,0680	0,0630
26000			0,0750	0,0755	0,0705
28000					0,0775
30000					0,0850
<b>Sile pucanja[N]</b>	27792	31362	27974	26827	31756

Tablica 4.4. Rezultati rasteznog ispitivanja ispitnog tijela tipa 2, orijentacije dva

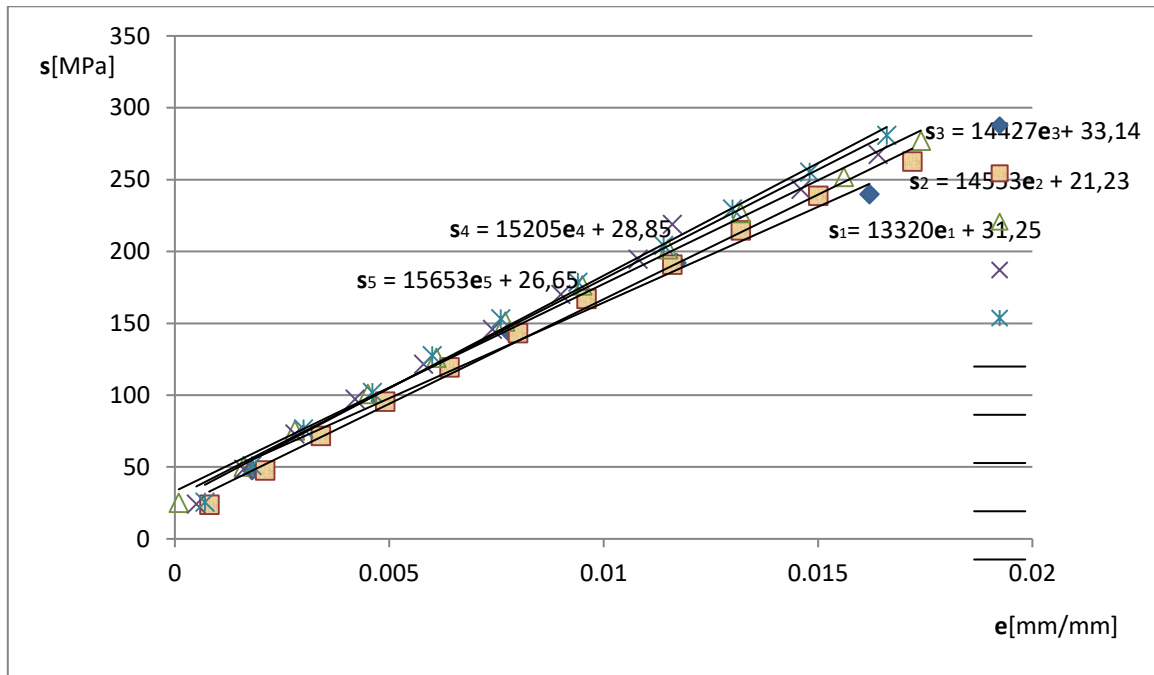
<b>F[N]</b>	$\Delta l_{121}$ [mm]	$\Delta l_{122}$ [mm]	$\Delta l_{123}$ [mm]	$\Delta l_{124}$ [mm]	$\Delta l_{125}$ [mm]
2000	0,0025	0,0025	0,0025	0,0065	0,004
4000	0,0095	0,006	0,007	0,0145	0,0085
6000	0,016	0,0125	0,013	0,0215	0,0155
8000	0,023	0,0175	0,020	0,0285	0,0235
10000	0,029	0,0235	0,026	0,0355	0,031
12000	0,035	0,0305	0,033	0,0435	0,039
14000	0,043	0,0365	0,0385	0,0505	0,047
16000	0,050	0,0435	0,0455	0,0595	0,056
18000	0,058	0,050	0,0525	0,0675	0,066
20000	0,066	0,058	0,0605	0,0755	0,075
22000	0,073	0,065	0,0685	0,0845	
24000		0,073	0,0755	0,0945	
26000		0,081	0,0835		
28000		0,088			
<b>Sile pucanja[N]</b>	24327	29668	27340	24482	21119

## 4.2. Usporedba dobivenih rezultata

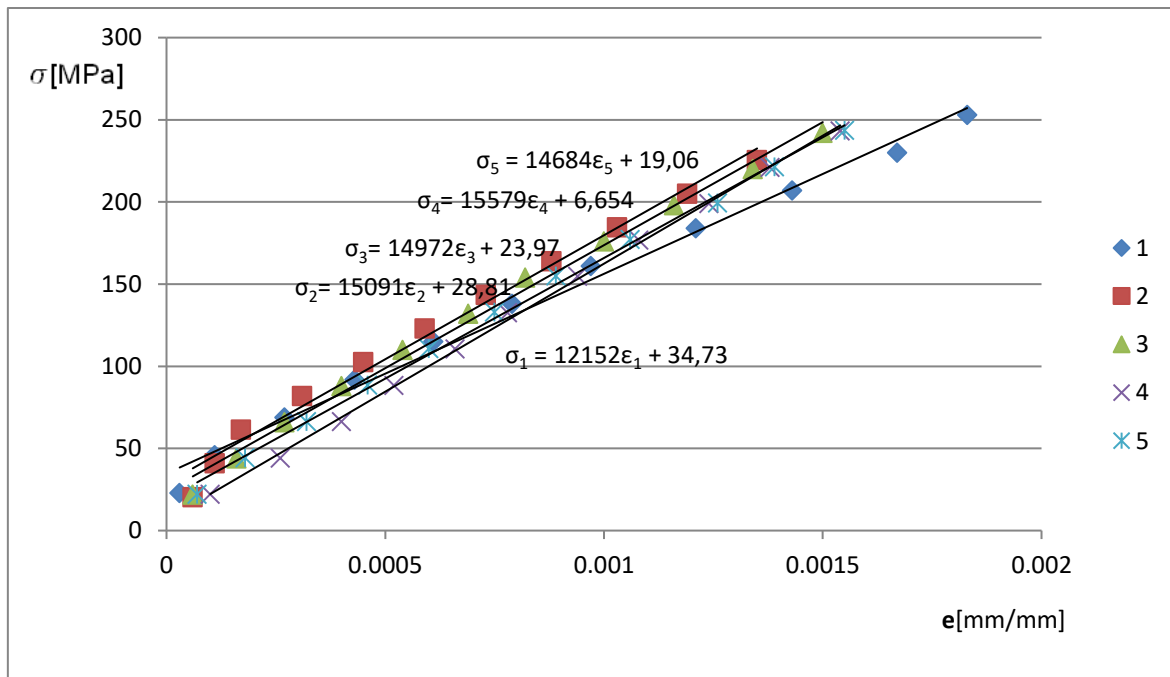
Rezultati ispitivanja prikazani su tablično i grafički te su uspoređeni statističkom analizom.

Iz sile i produljenja dobivene su vrijednosti napreznja i istežanja te su rezultati prikazani grafički  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagramima.

Ispitivanje uzorka tipa 1 za dva ortogonalna smjera rezanja ispitnih tijela prikazani su na slikama 4.1 i 4.2. Jedan ortogonalni smjer podrazumijeva 5 ispitnih tijela.

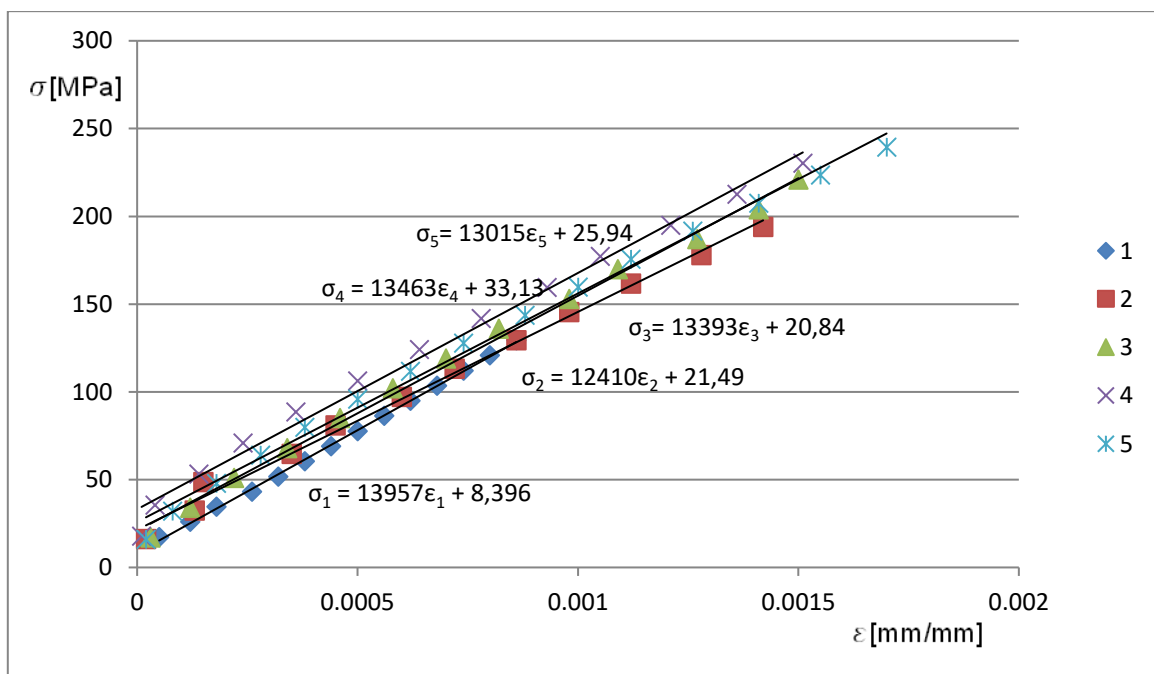


Slika 4.1. Usporedba ispitnog tijela tipa 1 s orijentacijom jedan



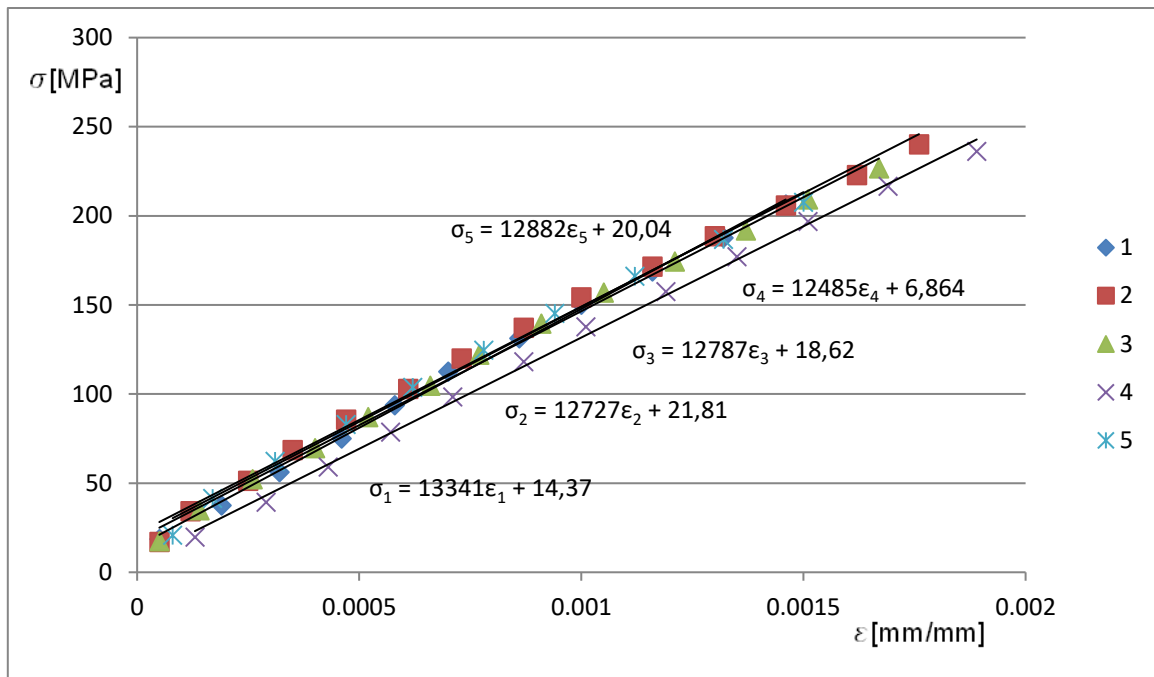
Slika 4.2. Usporedba ispitnog tijela tipa 1 s orijentacijom dva

Ispitivanje uzorka tipa 2 za dva ortogonalna smjera rezanja ispitnih tijela prikazani su na slikama 4.3 i 4.4. Jedan ortogonalni smjer podrazumijeva 5 ispitnih tijela.



Slika 4.3. Usporedba ispitnog tijela tipa 2 s orijentacijom jedan





Slika 4.4. Usporedba ispitnog tijela tipa 2 s orijentacijom dva

Rezultati statičkog rasteznog ispitivanja su prikazani i tablično.

Ispitivanje uzorka tipa 1 za dva ortogonalna smjera rezanja ispitnih tijela prikazani su u tablicama 4.5. i 4.6.

Tablica 4.5. Rezultati ispitnih tijela tipa 1, orijentacije jedan

Epruveta	b, mm	h, mm	Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti pri rasteznom opterećenju, N/mm <sup>2</sup>
2.1.1.	10,22	4,00	280,67	13320
2.1.2.	10,12	4,06	329,38	14553
2.1.3.	9,78	3,98	302,33	14427
2.1.4.	9,98	4,04	269,98	15205
2.1.5.	9,28	4,14	359,91	15653
<b>Prosječna vrijednost</b>	<b>9,876</b>	<b>4,044</b>	<b>308,454</b>	<b>14631,6</b>
<b>Nepriistrana procjena standardne devijacije</b>	<b>0,372</b>	<b>0,0623</b>	<b>36,658</b>	<b>886,056</b>

Tablica 4.6. Rezultati ispitnih tijela tipa 1, orijentacije dva

Epruveta	b, mm	h, mm	Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti pri rasteznom opterećenju, N/mm <sup>2</sup>
2.2.1.	10,50	4,06	285,25	12152
2.2.2.	10,72	4,46	276,899	15091
2.2.3.	10,22	4,36	323,52	14972
2.2.4.	10,36	4,28	311,84	15579
2.2.5.	10,64	4,16	340,09	14684
<b>Prosječna vrijednost</b>	<b>10,488</b>	<b>4,264</b>	<b>307,519</b>	<b>14495,6</b>
<b>Nepriistrana procjena standardne devijacije</b>	<b>0,203</b>	<b>0,158</b>	<b>26,31</b>	<b>1349,367</b>

Ispitivanje uzorka tipa 2 za dva ortogonalna smjera rezanja ispitnih tijela prikazani su u tablicama 4.7. i 4.8.

Tablica 4.7. Rezultati ispitnih tijela tipa 2, orijentacije jedan

Epruveta	b, mm	h, mm	Rastezna čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti pri rasteznom opterećenju, N/mm <sup>2</sup>
1.1.1.	25,10	4,62	239,66	13957
1.1.2.	25,78	4,8	253,44	12410
1.1.3.	24,94	4,72	237,64	13393
1.1.4.	24,34	4,64	237,53	13463
1.1.5.	25,90	4,84	253,327	13015

<b>Prosječna vrijednost</b>	<b>25,212</b>	<b>4,724</b>	<b>244,3194</b>	<b>13247,6</b>
<b>Nepristrana procjena standardne devijacije</b>	<b>0,6409</b>	<b>0,096</b>	<b>8,3178</b>	<b>575,8609</b>

Tablica 4.8. Rezultati ispitnih tijela tipa 2, orijentacije dva

<b>Epruveta</b>	<b>b, mm</b>	<b>h, mm</b>	<b>Rastezna čvrstoća, N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Modul elastičnosti pri rasteznom opterećenju, N/mm<sup>2</sup></b>
1.2.1.	24,78	4,3	228,307	13341
1.2.2.	25,46	4,58	254,43	12727
1.2.3.	25,48	4,5	238,44	12787
1.2.4.	25,02	4,06	241,01	12485
1.2.5.	25,08	3,84	219,29	12882
<b>Prosječna vrijednost</b>	<b>25,164</b>	<b>4,256</b>	<b>236,2954</b>	<b>12844,4</b>
<b>Nepristrana procjena standardne devijacije</b>	<b>0,301</b>	<b>0,307</b>	<b>13,31</b>	<b>313,96</b>

#### **4.2.1. Usporedba rezultata hipotezom uzorak-uzorak**

Dobivene iznose rastezne čvrstoće i modula elastičnosti vrijedi usporediti metodom provjere hipoteze uzorak-uzorak. Njome se prvo provjeravaju varijance (F-test). Varijancom se smatra prosječno kvadratno odstupanje svakog podatka od aritmetičke sredine. Nakon toga se provodi T-test. T-testom uspoređujemo očekivanja dva uzorka. Ako se očekivanja tih uzoraka poklapaju možemo zaključiti da uzorci nemaju različite vrijednosti provjerenih svojstava te se ponašaju pravilno ponašajući se po nekoj raspodjeli oko neke očekivane vrijednosti. (10)

##### *4.2.1.1. Usporedba rastezne čvrstoće*

Tip 1 usporedba utjecaja orijentacije

Apsolutne vrijednosti:

$$\bar{x}_1 = 308,454 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\bar{x}_2 = 307,519 \text{ N/mm}^2 .$$

Nepristrana procjena standardne devijacije:

$$s_1 = 36,658 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$s_2 = 26,31 \text{ N/mm}^2 .$$

F-test (testiranje varijanci):

Provjera hipoteze  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  [sigma je varijanca].

$$F_{ra\check{c}} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 1,94 ,$$

$$F_0 = \begin{cases} k_n = 4 \\ k_b = 4 \text{ [iz statističkih tablica]} = 6,39 , \\ \alpha = 0,05 \end{cases}$$

$F_{ra\check{c}} < F_0$  Prihvatanje hipoteze  $H_0$ .

T-test:

Provjera hipoteze  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  [ $\mu$  predstavlja očekivanje].

Aritmetička sredina svakog uzorka rasipat će se oko očekivanja skupa iz kojeg uzorak potječe.

Standardna pogreška varijable  $d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ :

$$s_d = \sqrt{\frac{((n_1-1)s_1^2) + ((n_2-1)s_2^2)}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}} = 20,18.$$

Varijabla Studentove t-razdiobe pogodna za testiranje nulte hipoteze:

$$|t_{\text{rač}}| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} = 0,046.$$

$$t_0 = \begin{cases} k = n_1 + n_2 - 2 = 8 \\ \alpha = 0,05 \end{cases} \text{ [iz statističkih tablica] } = 2,306$$

$t_{\text{rač}} < t_0$  Prihvatanje hipoteze  $H_0$  uz mogućnost pogreške 2. vrste. To znači da orijentacija ne bi trebala imati utjecaja na rasteznu čvrstoću za tip 1.

Tip 2 usporedba utjecaja orijentacije

Apsolutne vrijednosti:

$$\bar{x}_1 = 244,3194 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\bar{x}_2 = 236,2954 \text{ N/mm}^2 .$$

Nepristrana procjena standardne devijacije:

$$s_1 = 8,3178 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$s_2 = 13,31 \text{ N/mm}^2 .$$

F-test (testiranje varijanci):

Provjera hipoteze  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ .

$$F_{rač} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 2,561 ,$$

$$F_0 = \begin{cases} k_n = 4 \\ k_b = 4 \text{ [iz statističkih tablica]} = 6,39 , \\ \alpha = 0,05 \end{cases}$$

$F_{rač} < F_0$  Prihvatanje hipoteze  $H_0$ .

T-test:

Provjera hipoteze  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ .

Standardna pogreška varijable  $d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ :

$$s_d = \sqrt{\frac{((n_1-1)s_1^2) + ((n_2-1)s_2^2)}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}} = 7,019.$$

Varijable Studentove t-razdiobe pogodna za testiranje nulte hipoteze:

$$|t_{rač}| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} = 1,143.$$

$$t_0 = \begin{cases} k = n_1 + n_2 - 2 = 8 \\ \alpha = 0,05 \end{cases} \text{ [iz statističkih tablica] } = 2,306$$

$t_{\text{rač}} < t_0$  Prihvaćanje hipoteze  $H_0$  uz mogućnost pogreške 2. vrste. To znači da orijentacija ne bi trebala imati utjecaja na rasteznu čvrstoću za tip 2.

## Usporedba tipa 1 s tipom 2

Budući da se gore dobivenim rezultatima može zaključiti kako nema utjecaja orijentacije na lomnu čvrstoću grupiramo uzorke samo po tipu.

Apsolutne vrijednosti:

$$\bar{x}_1 = 307,99 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\bar{x}_2 = 240,307 \text{ N/mm}^2 .$$

Nepristrana procjena standardne devijacije:

$$s_1 = 30,086 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$s_2 = 11,286 \text{ N/mm}^2 .$$

F-test (testiranje varijanci):

Provjera hipoteze  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ .

$$F_{rač} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 7,11 ,$$

$$F_0 = \begin{cases} k_n = 9 \\ k_b = 9 \text{ [iz statističkih tablica]} = 3,18 , \\ \alpha = 0,05 \end{cases}$$

$F_{rač} > F_0$  Odbijanje hipoteze  $H_0$ .

T-test:

Provjera hipoteze  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ .

Standardna pogreška varijable  $d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ :

$$s_d = \sqrt{\frac{((n_1-1)s_1^2) + ((n_2-1)s_2^2)}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}} = 10,16.$$

Varijabla Studentove t-razdiobe pogodna za testiranje nulte hipoteze:

$$|t_{rač}| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} = 6,66.$$

$$t_0 = \begin{cases} k = n_1 + n_2 - 2 = 18 \\ \alpha = 0,05 \end{cases} \text{ [iz statističkih tablica]} = 2,101$$

$t_{rač} > t_0$  Odbijanje hipoteze  $H_0$  uz mogućnost pogreške 1. vrste. To znači da je očekivana vrijednost rastezne čvrstoće tipa 1 različita od očekivane vrijednosti rastezne čvrstoće tipa 2.



#### 4.2.1.2. Usporedba modula elastičnosti

Tip 1 usporedba utjecaja orijentacije

Apsolutne vrijednosti:

$$\bar{x}_1 = 14631,6 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\bar{x}_2 = 14495,6 \text{ N/mm}^2 .$$

Nepristrana procjena standardne devijacije:

$$s_1 = 886,056 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$s_2 = 1349,367 \text{ N/mm}^2 .$$

F-test (testiranje varijanci):

Provjera hipoteze  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  [sigma je varijanca].

$$F_{rač} = \frac{s_2^2}{s_1^2} = 2,32 ,$$

$$F_0 = \begin{cases} k_n = 4 \\ k_b = 4 \text{ [iz statističkih tablica]} \\ \alpha = 0,05 \end{cases} = 6,39 ,$$

$F_{rač} < F_0$  Prihvatanje hipoteze  $H_0$ .

T-test:

Provjera hipoteze  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  [ $\mu$  predstavlja očekivanje].

Aritmetička sredina svakog uzorka rasipat će se oko očekivanja skupa iz kojeg uzorak potječe.

Standardna pogreška varijable  $d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ :

$$s_d = \sqrt{\frac{((n_1-1)s_1^2) + ((n_2-1)s_2^2)}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}} = 721,926.$$

Varijabla Studentove t-razdiobe pogodna za testiranje nulte hipoteze:

$$|t_{\text{rač}}| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} = 0,1884.$$

$$t_0 = \begin{cases} k = n_1 + n_2 - 2 = 8 \\ \alpha = 0,05 \end{cases} \text{ [iz statističkih tablica] } = 2,306$$

$t_{\text{rač}} < t_0$  Prihvaćanje hipoteze  $H_0$  uz mogućnost pogreške 2. vrste. To znači da orijentacija ne bi trebala imati utjecaja na modul elastičnosti za tip 1.

Tip 2 usporedba utjecaja orijentacije:

Apsolutne vrijednosti:

$$\bar{x}_1 = 13247,6 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\bar{x}_2 = 12844,4 \text{ N/mm}^2 .$$

Nepriistrana procjena standardne devijacije:

$$s_1 = 575,8609 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$s_2 = 313,96 \text{ N/mm}^2 .$$

F-test (testiranje varijanci):

Provjera hipoteze  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  [sigma je varijanca].

$$F_{rač} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 3,36 ,$$

$$F_0 = \begin{cases} k_n = 4 \\ k_b = 4 \text{ [iz statističkih tablica]} = 6,39 , \\ \alpha = 0,05 \end{cases}$$

$F_{rač} < F_0$  Prihvatanje hipoteze  $H_0$ .

T-test:

Provjera hipoteze  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  [ $\mu$  predstavlja očekivanje].

Aritmetička sredina svakog uzorka rasipat će se oko očekivanja skupa iz kojeg uzorak potječe.

Standardna pogreška varijable  $d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ :

$$s_d = \sqrt{\frac{((n_1-1)s_1^2) + ((n_2-1)s_2^2)}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}} = 295,488.$$

Varijabla Studentove t-razdiobe pogodna za testiranje nulte hipoteze:

$$|t_{\text{rač}}| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} = 1,3645.$$

$$t_0 = \begin{cases} k = n_1 + n_2 - 2 = 8 \\ \alpha = 0,05 \end{cases} \text{ [iz statističkih tablica] } = 2,306$$

$t_{\text{rač}} < t_0$  Prihvatanje hipoteze  $H_0$  uz mogućnost pogreške 2. vrste. To znači da orijentacija ne bi trebala imati utjecaja na modul elastičnosti za tip 2.

Usporedba tipa 1 s tipom 2:

Budući da se gore dobivenim rezultatima može zaključiti kako nema utjecaja orijentacije na lomnu čvrstoću grupiramo uzorke samo po tipu.

Apsolutne vrijednosti:

$$\bar{x}_1 = 14563,6 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$\bar{x}_2 = 13046 \text{ N/mm}^2 .$$

Nepristrana procjena standardne devijacije:

$$s_1 = 1078,568 \text{ N/mm}^2 ,$$

$$s_2 = 486,16 \text{ N/mm}^2 .$$

F-test (testiranje varijanci):

Provjera hipoteze  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ .

$$F_{rač} = \frac{s_1^2}{s_2^2} = 4,92 ,$$

$$F_0 = \begin{cases} k_n = 9 \\ k_b = 9 \text{ [iz statističkih tablica]} = 3,18 , \\ \alpha = 0,05 \end{cases}$$

$F_{rač} > F_0$  Odbijanje hipoteze  $H_0$ .

T-test:

Provjera hipoteze  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  .

Standardna pogreška varijable  $d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ :

$$s_d = \sqrt{\frac{((n_1-1)s_1^2) + ((n_2-1)s_2^2)}{n_1+n_2-2}} \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}} = 374,12.$$

Varijabla Studentove t-razdiobe pogodna za testiranje nulte hipoteze:

$$|t_{rač}| = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} = 4,06.$$

$$t_0 = \begin{cases} k = n_1 + n_2 - 2 = 18 \text{ [iz statističkih tablica]} = 2,101 \\ \alpha = 0,05 \end{cases}$$

$t_{rač} > t_0$  Odbijanje hipoteze  $H_0$  uz mogućnost pogreške 1. vrste. To znači da je očekivana vrijednost modula elastičnosti tipa 1 različita od očekivane vrijednosti modula elastičnosti tipa 2.

## ZAKLJUČAK

Zbog velike razlike u dimenzijama ispitnih tijela tipa 1 i 3 za kompozit iste debljine nije bilo moguće provesti ispitivanja na istom uređaju. Uz dimenzije i oblik, različiti prihvat utječu na rezultat ispitivanja.

Na temelju dobivenih vrijednosti može se doći do sljedećih zaključaka:

- Kod ovog ispitivanja orijentacija rezanja ispitnih tijela nema utjecaja na rezultate rastezne čvrstoće. Odkakanje nekih rezultata od očekivanih vrijednosti može se shvatiti kao posljedica relativno nepreciznog ručnog laminiranja ili greške prilikom rezanja;
- Također orijentacija rezanja ispitnih tijela nema utjecaja na modul elastičnosti;
- Tip ispitnog tijela ima veliki utjecaj na rasteznu čvrstoću. Rezultati dobiveni ispitnim tijelima tipa 2 znatnosu niži nego kod tipa 1. Prilikom ispitivanja ispitnih tijela tipa 2 dolazi, zbog neadekvatnog prihvata na kidalici, do gnječenja što rezultira iniciranjem pukotina, zarezanim djelovanjem i pucanjem.
- Tip ispitnog tijela ima veliki utjecaj na modul elastičnosti. Rezultati dobiveni ispitnim tijelima tipa 2 su niži nego kod tipa 1.
- Iz dobivenih podataka dijagrama naprezanje-istezanje može se primijetiti značajno veće rasipanje modula elastičnosti kod ispitnih tijela tipa 1 što bi bio rezultat teže pripreme. Iz tog razloga potrebno je za tip 1 ispitati veći broj ispitnih tijela.
- Rezultati ispitivanja ispitnih tijela tipa 2 poboljšali bi se na uređaju s drugačijim prihvatom, dok bi se kod ispitivanja tipa 1 trebao ispitati veći uzorak od 10 ispitnih tijela.

## LITERATURA

1. **K K Mahato, M Biswal, D K Rathore, R K Prusty, K Dutta and B C Ray.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. *Effect of loading rate on tensile properties and.* [Online] Composite Materials Group, Metallurgical and Materials Engineering Department, National Institute of Technology, Rourkela-769008, India, 2016. [Cited: 9 7, 2018.] <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/115/1/012017/meta>.
2. **Dave Kim, Daniel John Hennigan, Kevin Daniel Beavers.** International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. *Effect of fabrication processes on mechanical properties of glass fiber reinforced polymer composites for 49 meter (160 foot) recreational yachts.* [Online] Society of Naval Architects of Korea, 3 2010. [Cited: 9 14, 2018.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209267821630231X>.
3. **Alsalihi, Mohammed AbdulqaderJalil.** Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars After Exposure to Elevated Temperatures. *UWM Digital Commons.* [Online] University of Wisconsin Milwaukee, 12 2014. [Cited: 9 14, 2018.] <https://dc.uwm.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1659&context=etd>.
4. **Plastika -- Određivanje rasteznih svojstava -- 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima. s.l. : International Organisation for Standardization, 2008. Vol. 1. HRN EN ISO 527-4:2008.**
5. **Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof.** *Svojstva i primjena materijala.* Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
6. **Prof.dr.sc. Tomislav Filetin, doc.dr.sc. Gojko Marić.** Postupci proizvodnje kompozita, Napredne tehnologije materijala. [Mrežno] Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013. [Citirano: 20. 8 2018.] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf).
7. **Ehrenstein, Gottfried W.** *Faserverbund-Kunststoffe.* München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006.
8. **Filetin, Prof.dr.sc. Tomislav.** Postupci proizvodnje kompozita. *Napredne tehnologije materijala.* [Mrežno] Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015. [Citirano: 31. 8 2018.] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1431694359-0-ntmpmckompoziti\\_15\\_1.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1431694359-0-ntmpmckompoziti_15_1.pdf).
9. **Konstrukcija malih brodova. 234 OJAČANJA.** [Online] Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2005. [Cited: 8 30, 2018.] <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm>.
10. **Cajner, Dr. Sc. Hrvoje.** eučenje. *Optimiranje i planiranje pokusa, Osnovne teorije uzoraka.* [Online] Fakultet strojarstva i brodogradnje. [Cited: 8 30, 2018.] [http://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/49926/mod\\_resource/content/1/Osnove\\_teorije\\_uzoraka/Osnove\\_teorije\\_uzoraka\\_OPTIPLAPOK\\_2014.pdf](http://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/49926/mod_resource/content/1/Osnove_teorije_uzoraka/Osnove_teorije_uzoraka_OPTIPLAPOK_2014.pdf).