

Rastezna i goriva svojstva hibridnih kompozita s polimernom matricom

Grgurić, Iva

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:235:713275>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Grgurić

Zagreb, 2023. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Iva Grgurić

Zagreb, 2023. godina

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Tatjani Haramini na prihvaćanju mentorstva za završni rad te na njenoj stalnoj pomoći i podršci tijekom izrade istoga. Izrazito se želim zahvaliti i tehničkim suradnicima Božidaru Bušetinčanu i Mireli Petranović na danim savjetima i pomoći oko provođenja eksperimentalnog dijela rada. Na kraju bih se zahvalila svojoj obitelji koja mi je bila od velike važnosti tijekom studiranja.

Posebna zahvala mom ocu kojem posvećujem ovaj završni rad jer mu život nije dao mogućnost da bude ovdje i dijeli ovaj poseban trenutak sa mnom.

Iva Grgurić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Iva Grgurić**

JMBAG: **0035226122**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rastezna i goriva svojstva hibridnih kompozita s polimernom matricom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tensile and burning properties of hybrid polymer based composites**

Opis zadatka:

Vlakna dobivena od biljaka često su dobra alternativa staklenim vlaknima za ojačavanje polimera. Ipak, neka svojstva staklenih vlakana su bolja. Kombinacijom biljnih i staklenih vlakana dobiva se hibridni kompozit. Redoslijed slaganja vlakana može se razlikovati, pri čemu se dobivaju različita svojstva. U radu je potrebno ispitati rastezna i goriva svojstva hibridnih kompozita ojačanih biljnim i staklenim vlaknima s različitim redoslijedom slaganja tkanina.

Potrebno je opisati različite tipove hibridnih polimernih kompozita s naglaskom na gorivost kompozita s biljnim vlaknima. Detaljno proučiti norme za ispitivanje svojstava gorenja polimera i polimernih kompozita, kao i za ispitivanje rasteznih svojstava. Usporediti mehanička svojstva hibridnih kompozita s različitim planom laminiranja pri rasteznom opterećenju. Pri tome treba odrediti rastezni modul, rasteznu čvrstoću, deformaciju prilikom loma, i maseni udio vlakana. Usporediti dobivena svojstva s pravilima Hrvatskog registra brodova za kompozite sa staklenim vlaknima.

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 zadala:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI	2
2.1. Definicija i osnovna podjela	2
2.2. Osnovni konstituenti	3
2.2.1. Uloga matrice	3
2.2.2. Uloga ojačala	3
2.3. Kompoziti s polimernom matricom	3
2.3.1. Epoksidna smola	4
2.4. Kompoziti ojačani vlaknima	4
2.4.1. Staklena vlakna	6
2.5. Prirodna ojačala.....	8
2.5.1. Lanena vlakna	10
2.6. Hibridni kompoziti.....	11
2.6.1. Svojstva hibridnih kompozita	11
2.6.2. Ručno laminiranje	13
2.6.3. Potlačno ulijevanje	14
2.7. Mehanička svojstva.....	15
2.7.1. Priprema ispitnog tijela	15
2.7.2. Rastezna čvrstoća.....	16
2.7.3. Rastezni modul elastičnosti.....	17
2.8. Goriva svojstva	17
2.8.1. Ispitivanje gorivih svojstava.....	18
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
3.1. Ispitivanje mehaničkih svojstava	19
3.1.1. Materijali i maseni udio vlakana	19
3.2. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti	19
3.3. Provođenje ispitivanja gorivosti materijala.....	24
3.3.1. Priprema hibridnog kompozita.....	24
3.3.2. Priprema ispitnog tijela	25
3.3.3. Materijali i maseni udio vlakana.....	27
3.3.4. Postupak provođenja ispitivanja	28
4. REZULTATI ISPITIVANJA I USPOREDBA	31
4.1. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava	31
4.1.1. Usporedba rasteznih svojstava kompozita sa pravilima Hrvatskog registra brodova	34
4.1.2. Grafička usporedba rezultata	35
4.2. Rezultati ispitivanja gorivosti	37
4.2.1. Izlaganje ruba plamenu	37
4.2.2. Izlaganje površine plamenu	39

4.3. Usporedba rezultata ispitivanja gorivosti materijala.....	40
5. ZAKLJUČAK	41
LITERATURA.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1. Kompoziti: (a) ojačani česticama, (b) slojeviti, (c) ojačani vlaknima [3].....	2
Slika 2. Epoksidna skupina [6].....	4
Slika 3. (a) ugljična, (b) aramidna, (c) staklena vlakna [8].....	5
Slika 4. Raspored vlaknastih ojačala: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna [10].....	5
Slika 5. Viskeri [10].....	6
Slika 6. Cijev ojačana žicom [10].....	6
Slika 7. Niti staklenih vlakana. [11].....	7
Slika 8. Mogući oblici staklenih vlakana [4].....	8
Slika 9. Vrste prirodnih vlakana [12].....	9
Slika 10. Podjela prirodnih vlakana [16].....	10
Slika 11. Tkanje lana [18].....	10
Slika 12. Ugljična i aramidna vlakna [10].....	12
Slika 13. Aramidna i staklena vlakna [10].....	12
Slika 14. Ugljična i staklena vlakna [10].....	13
Slika 15. Vrste vlaknima ojačanih kompozita pri laminiranju (a) jednosmjerna, (b) dvosmjerna, (c) diskontinuirana, (d) tkanja [22].....	13
Slika 16. Slaganje slojeva pri laminiranju [21].....	14
Slika 17. Ispitno tijelo za rastezna ispitivanja.....	15
Slika 18. Izlaganje ruba plamenu.....	18
Slika 19. Izlaganje površine plamenu.....	18
Slika 20. Univerzalna kidalica Shimadzu AGS – X.....	20
Slika 21. Program Trapezium X.....	20
Slika 22. Vrsta ispitivanja i smjer sile.....	21
Slika 23. Mjerni parametri.....	21
Slika 24. Opisivanje ispitnog tijela.....	22
Slika 25. Priprema kompozita za ispitivanje gorivih svojstava.....	24
Slika 26. Izmjere ispitnog tijela i oznake udaljenosti za mjerenja debljine za izlaganje ruba plamenu.....	25
Slika 27. Izmjere ispitnog tijela i oznake udaljenosti za mjerenja debljine za izlaganje površine plamenu.....	26
Slika 28. Priprema radne površine.....	28
Slika 29. Početak ispitivanja paljenjem ruba ispitnog tijela.....	29
Slika 30. Gorenje ispitnog tijela izlaganjem ruba plamenu.....	29
Slika 31. Početak ispitivanja paljenjem površine ispitnog tijela.....	30
Slika 32. Gorenje ispitnog tijela izlaganjem površine plamenu.....	30
Slika 33. Rezultati ispitivanja rasteznih svojstava: epoksid/staklo i lan (lijevo), epoksid/staklo (desno).....	31
Slika 34. Dijagram naprezanje – istezanje dobiven ispitivanjem rasteznih svojstava za kompozit epoksid / staklo i lan (1-2-1).....	32
Slika 35. Dijagram naprezanje – istezanje dobiven ispitivanjem rasteznih svojstava za kompozit epoksid / staklo (4).....	33
Slika 36. Vrijednosti rastezne čvrstoće ispitivanih kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a za staklena vlakna.....	35
Slika 37. Vrijednosti rasteznog modula elastičnosti ispitivanih kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a za staklena vlakna.....	36
Slika 38. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 1 nakon izlaganja ruba plamenu.....	37
Slika 39. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2 nakon izlaganja ruba plamenu.....	38

Slika 40. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 1 nakon izlaganja površine plamenu	39
Slika 41. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2 nakon izlaganja površine plamenu	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasificiranje gorenja	18
Tablica 2. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće za kompozit epoksid/staklo i lan (1+2+1).....	22
Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće za kompozit epoksid/ staklo (4)	23
Tablica 4. Debljine ispitnih tijela hibridnih kompozita za izlaganje ruba plamenu.....	25
Tablica 5. Debljine ispitnih tijela hibridnih kompozita za izlaganje površine plamenu	26
Tablica 6. Početne mase vlakana u hibridnom kompozitu.....	27
Tablica 7. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (epoksid / staklo i lan).....	31
Tablica 8. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (epoksid / staklo).....	32
Tablica 9. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja rastezne čvrstoće.....	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	mm ²	površina poprečnog presjeka ispitnog tijela
b	mm	širina
b_1	mm	širina vrata ispitnog tijela 10±0,2
b_2	mm	širina glave ispitnog tijela 20±0,2
E	MPa	rastezni modul elastičnosti
F_{\max}	N	maksimalna sila
h	mm	debljina ispitnog tijela od 2 do 10
h	mm	debljina
L	mm	početni razmak između hvatišta 115±1
L_0	mm	početna mjerna duljina ispitnog tijela 50±0,5
L_1	mm	duljina uskog dijela s paralelnim stranicama 60 ± 0,5
L_3	mm	ukupna duljina ispitnog tijela ≥ 150
R	mm	radijus ≥ 60
m_k	g	masa cijelog kompozita
m_v	g	masa vlakna
ε	mm/mm	istezanje
ε_k	mm	deformacija prilikom loma
σ	MPa	rastezno naprezanje ispitnog tijela uslijed djelovanja sile
σ_m	MPa	rastezna čvrstoća
ΔL_0	mm	promjena duljine ispitnog tijela
Δt	s	razlika vremena početka i završetka testiranja

SAŽETAK

Kompoziti ojačani staklenim vlaknima hibridizirani su lanenim. Provedena je analiza rasteznih svojstava i svojstva gorivosti u ovisnosti o vrsti i slaganju ojačala. Za potrebe ispitivanja mehaničkih svojstava postupkom potlačnog ulijevanja dobivene su dvije vrste kompozita: prvi kompozit sastoji se od četiri sloja vlakana sa staklenim vlaknima u vanjskom sloju i lanenim u sredini. Drugi kompozit sastoji se samo od četiri sloja staklenih vlakana. Kompoziti su povezani epoksidnom smolom. Na njima su provedena ispitivanja u skladu s normom HRN EN ISO 527 – 4: 1997 Plastica – Određivanje rasteznih svojstava – 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima. Određene su vrijednosti rastezne čvrstoće, rasteznog modula elastičnosti i konačnog istezanja. Rezultati su uspoređeni s minimalnim zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za kompozite ojačane staklenim vlaknima. Rezultati su pokazali da oba kompozita zadovoljavaju zahtjeve. Za potrebe ispitivanja gorivih svojstava postupkom ručne laminacije dobivene su dvije vrste kompozita ojačanih s dva sloja staklenih vlakana i tri sloja lanenih. Kod prvog su staklena tkanja u vanjskim slojevima i tri lanena između njih, dok su kod drugog naizmjenično slagana tkanja, počevši i završivši s lanenim. Ispitivanje je provedeno prema normi DIN 53 438, na dva načina za obje vrste kompozita: I. izlaganje ruba plamenu, gdje su rezultati pokazali da će kompozit s lanenim vlaknima u vanjskom sloju brže gorjeti i II. površinsko izlaganje plamenu, pri kojem nije došlo do zapaljenja ni kod jednog kompozitnog materijala.

Ključne riječi: hibridni kompoziti, staklena vlakna, lanena vlakna, epoksidna smola, rastezna čvrstoća, rastezni modul elastičnosti, goriva svojstva

SUMMARY

Composites reinforced with glass fibers are hybridized with flax. An analysis of tensile properties and fire properties were made depending on the type and stacking of the reinforcements. For the purposes of testing the mechanical properties, two types of composites were obtained by the vacuum infusion: the first composite was made of four layers of fibers with glass fibers in the outer layer and flax fibers in the middle. The second composite was made of four layers of glass fibers only. Composites are connected with epoxy resin. Tests were conducted on them in accordance with the standard HRN EN ISO 527 – 4: 1997 Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fiber – reinforced plastic composites. The values of tensile strength, tensile modulus of elasticity and ultimate elongation were determined. The results were compared with the minimum requirements of the Croatian Register of Shipping (CRS) for composites reinforced with glass fibers. The results showed that both composites meet the requirements. For the purposes of testing fire properties, two types of composites were made by manual lamination. In the first one, there are glass weaves in the outer layers and three linens between them, while in the second one, the weaves are arranged alternately, starting and ending with the linen. The test was carried out according to DIN 53 438, in two ways for both types of composites. Firstly, exposing the edge to a flame, where the results showed that the composite with flax fibers in outer layer will burn faster and secondly, surface exposure to flame, during which no composite material ignited.

Key words: hybrid composite, glass fibers, flax fibers, epoxy resin, tensile strength, tensile modulus of elasticity, fire properties

1. UVOD

Kompozitni materijali sežu daleko u prošlost. I prvi ljudi su stvarali kompozite od slame i blata za gradnju nastamba za život. Od tada pa sve do danas proizvodnja kompozitnih materijala znatno je napredovala, a njihova primjena postala je od velike važnosti za automobilsku i zrakoplovnu industriju te brodogradnju. Kompoziti su poznati po svojoj trajnosti, odličnoj kvaliteti, maloj masi i visokoj čvrstoći. Najviše su korištena staklena vlakna u proizvodnji kompozita, ali staklena vlakna se teško recikliraju pa ih se sve više želi zamijeniti prirodnim vlaknima. Prirodna vlakna poput lana, jute, konoplja, ekološki su prihvatljivija, mogu se razgraditi, a pristupačna su i cijenom. Lanena vlakna imaju upola manju gustoću od staklenih vlakana, što utječe na masu konstrukcije, a samim time i na uštedu goriva. Glavni nedostaci su hidrofilna priroda biljnih vlakana, što utječe na lošiju vezu matrice i ojačala. Kompoziti dobiveni od prirodnih vlakna su novitet u proizvodnji te nisu u potpunosti istraženi te mogu rezultirati lošijom kvalitetom proizvoda.

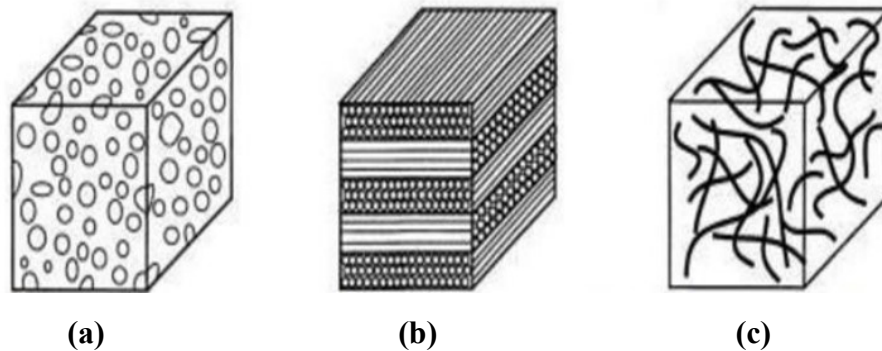
U završnom radu su izrađene četiri vrste kompozita za čiju izradu je korištena epoksidna smola kao matrica te staklena i lanena vlakna kao ojačala. Nad kompozitima je provedeno ispitivanje za dobivanje rasteznih i gorivih svojstava. Svrha ispitivanja bila je usporedba dobivenih mehaničkih svojstava s minimalnim zahtjevima za kompozite ojačane staklenim vlaknima koje je propisao Hrvatski registar brodova. Na temelju usporedbe moguće je donositi zaključke o tome kako bi prirodna vlakna, konkretno u ovom radu lanena vlakna, utjecala na promjenu svojstava kompozita u slučaju kada bi se kombinirala sa staklenim vlaknima ili se koristila samostalno. Također su ispitana i goriva svojstva, tj. promatrano je kako se vlakna ponašaju u dodiru s plamenom, koliko brzo gore te gore li uopće.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Definicija i osnovna podjela

Kompozitni materijali ili kompoziti čine smjesu dvaju ili više različitih materijala. Da bismo neki materijal definirali kao kompozit potrebno je zadovoljiti tri kriterija. Prvi kriterij je da oba materijala moraju biti prisutni u odgovarajućim omjerima, prema drugom kriteriju oba materijala su različitih svojstava te prema trećem, nastali kompozit ima drugačija svojstva od svakog materijala iz smjese zasebno. [1]

Kod kompozita imamo mogućnost prilagođavanja svojstava prema određenim zahtjevima. Zbog većeg omjera čvrstoće, poželjnih dinamičkih svojstava, dobre otpornosti na koroziju, jednostavnog održavanja, malog utjecaja na okoliš, ali i mogućnosti proizvodnje u gotovo bilo kojem obliku, što omogućuje širok raspon dizajna, kompoziti su postali vrlo privlačni za današnju industrijsku proizvodnju. Širokoprimjenjivi su u medicini, građevini, zrakoplovnoj, automobilskoj, pomorskoj industriji, a njihova primjena je sve veća iz dana u dan. S druge strane nedostaci kompozita su nelinearno ponašanje materijala, složeniji popravak kompozitnih proizvoda, konstrukcijski problemi pri spajanju dijelova te bez obzira na sve svoje prednosti još uvijek nisu nadjačali metale. [2]



Slika 1. Kompoziti: (a) ojačani česticama, (b) slojeviti, (c) ojačani vlaknima [3]

Struktura kompozita je heterogena i sastavljena od dviju ili više faza čiji spojevi su međusobno netopivi. Faze mogu biti dispergirane u matrici ili neprekinute (kontinuirane) pa prema tome možemo i razlikovati vrste kompozita. Osnovna podjela kompozita je na metalne, keramičke i organske (polimerne, ugljične) s obzirom na vrstu matrice. Podijeliti ih možemo i s obzirom na vrstu ojačala na kompozite ojačane česticama, kompozite ojačane vlaknima i strukturne kompozite koji su još podijeljeni na slojevite kompozite i sendvič konstrukcije (Slika 1.). [2]

2.2. Osnovni konstituenti

Kompoziti su sastavljeni od matrice, koja je ujedno i osnovna komponenta i ojačala. Svojstva kompozita povezana su i ovisit će o svojstvima konstituenata, njihovoj veličini i raspodjeli, volumnom udjelu, obliku, ali i o prirodi i jakosti veza između njih. [2]

2.2.1. Uloga matrice

Matrica može biti metalna, keramička i polimerna te je zovemo kontinuiranom fazom s mnogobrojnim zadaćama. Ona drži ojačala zajedno i štiti ih od vanjskih utjecaja, prenosi opterećenje na ojačalo, onemogućuje širenje pukotine od mjesta nastanka u vlaknima, mora biti određene čvrstoće koja pridonosi cjelokupnoj čvrstoći kompozita te daje vanjski oblik kompozitne tvorevine. [4]

2.2.2. Uloga ojačala

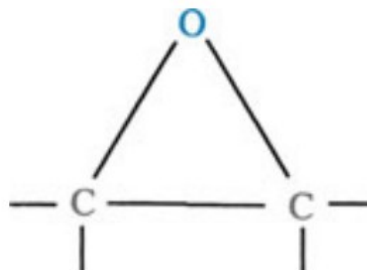
Ojačala mogu biti čestice i vlakna te ih nazivamo dispergiranim fazom. Ojačalo mogu biti sitne čestice koje dispergiraju i utječu na gibanje dislokacija, tj. usporavaju ih u materijalu te na taj način povećavaju čvrstoću. Čestice mogu biti i velike te ne djeluju izravno na usporavanje gibanja dislokacija pa takve kompozite koristimo kada nemamo izražen zahtjev za čvrstoću proizvoda. Uloga ojačala je osiguravanje visoke čvrstoće, visokog modula elastičnosti i otpornosti na trošenje. Ojačavanje vlaknima je najčešći način ojačavanja, razlog tome je što je većina materijala jača i čvršća u vlaknastom obliku, nego u nekom drugom. [4]

2.3. Kompoziti s polimernom matricom

Polimerna matrica je iznimno složene strukture i visoke viskoelastičnosti te je najčešći tip materijala matrice. Materijal matrice može biti od plastomera, elastomera i duromera, a poznavanje i razumijevanje razlika među materijalima pomaže nam u donošenju odluke oko izbora samog materijala. Sukladno odabiru materijala matrice direktno utječemo na svojstva budućeg kompozita. Duromeri se u neočvrstnutom stanju sastoje od malih molekula monomera koje će se povezivati u makromolekulske lance procesom polimerizacije. Dugi i umreženi lanci uzrokovat će skrućivanje materijala. Duromerna smola je pri sobnoj temperaturi kapljevinna pa to omogućuje izradu kompozita pri sobnoj temperaturi. Zbog svega navedenog, duromeri su najčešći materijali matrice i predstavljaju 80% ukupno upotrijebljenih materijala. Kod plastomera se dovodenjem topline može postići temperatura iznad temperature tališta pa se materijal tali, a njegova viskoznost izaziva poteškoće pri impregniranju vlakana. Elastomerna matrica je primjenjiva na uzak spektar proizvoda. [5]

2.3.1. Epoksidna smola

Epoksidna smola je često korišten materijal matrice pri izradi kompozitnih materijala zbog svojih odličnih adhezijskih svojstava. Kemijski gledano, epoksidna skupina je tročlani prsten od atoma kisika i dva atoma ugljika (Slika 2.). Epoksidi se očvršćuju na dva načina, katalizom kod koje molekule reagiraju jedna s drugom u reakciji koju započinje katalizator ili poliadicijom uz učvršćivače (npr. poliamidi, polisulfidi, organske kiseline itd.) umiješane u smole. Pri polimerizaciji se događaju egzotermne kemijske reakcije, što znači da dolazi do oslobađanja topline, te iz tog razloga treba biti oprezan s količinom očvršćivala, ali i temperaturom polimerizacije. Previsoka temperatura može dovesti do degradacije matrice, a samim time i kompozita. Sama epoksidna matrica je krhka, a za poboljšavanje ovog svojstva, ali i drugih mehaničkih svojstava (smanjenje viskoznosti, otpornost širenja pukotine, promjena gustoće, zaštita od UV zračenja, itd.) epoksidima dodajemo elastomere i druge vrste polimera. Epoksidne smole su skuplje od poliesterskih, ali imaju bolju otpornost na vlagu, višu temperaturu uporabe, rad sa smolama je siguran s obzirom da ispuštaju malu količinu štetnih tvari i toplinski su stabilne. Nedostaci su mala otpornost nekim organskim spojevima (npr. organske kiseline) i ograničena radna temperatura 120 °C. [4], [6]



Slika 2. Epoksidna skupina [6]

2.4. Kompoziti ojačani vlaknima

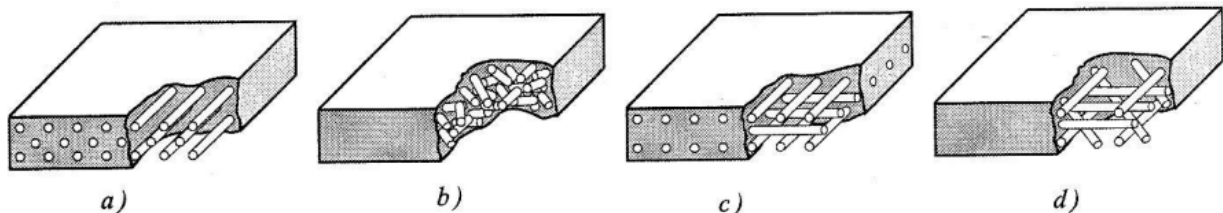
Vlakna su lagana, čvrsta i jaka što pogoduje kompozitima. Razlog tome je orijentacija molekula duž vlakana te smanjen broj defekata u vlaknima. Rastezna čvrstoća se smatra srednjom vrijednošću dobivenom pri više ispitivanja na pojedinim vlaknima ili na snopovima vlakana koji mogu, ali i ne moraju biti impregnirani smolom i stvrdnuti u kompozitno vlakno. Koristimo ih kao kontinuirana ojačanja u kompozitima i to na način da se poveže veći broj vlakana u tanku ploču koju nazivamo laminom. Širok je izbor vlakana koja se koriste kao ojačanje u konstrukcijskim primjenama. Mogu se opisati prema duljini (kratka i duga) i kemijskom sastavu (organska i anorganska). Organska vlakna koja se koriste u kompozitima su

polimerna vlakna, a najčešća anorganska vlakna su aramid, staklo, ugljik, bor, keramika, minerali. (Slika 3.) Odabirom vrste vlakana utječe se na odnos između mehaničkih svojstava, svojstava okoliša i cijene. [7]



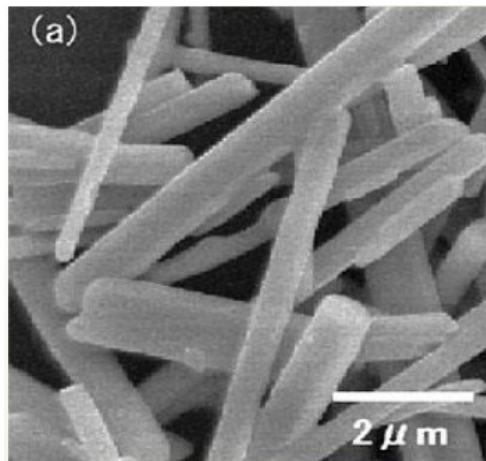
Slika 3. (a) ugljična, (b) aramidna, (c) staklena vlakna [8]

Kompoziti ojačani vlaknima spadaju u skupinu anizotropnih materijala zbog toga što imaju znatno bolja svojstva u smjeru vlakana te su tada čvrstoća i krutost maksimalni. U okomitom smjeru na smjer vlakana čvrstoća i krutost će biti minimalni. Postoji različit način rasporeda vlaknastih ojačala (Slika 4.), a vlaknasta ojačala dijelimo na viskere, vlakna i žice. [9]



Slika 4. Raspored vlaknastih ojačala: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna [10]

Viskeri su sitni monokristali velikog omjera duljine i promjera, gotovo da nemaju mogućnost tečenja što vodi do visoke čvrstoće. Viskeri mogu biti od grafita, silicijeva karbida, silicijeva nitrida i aluminijevog oksida. Usprkos svojstvima nisu primijenjivi zbog zahtjevne proizvodnje i visoke cijene (Slika 5.). Žice su većih promjera, mogu biti od čelika, molibdena, volframa. Primjenjuju se kod radijalnog čeličnog ojačavanja automobilskih guma ili omatanja visokotlačnih cijevi (Slika 6.). [10]



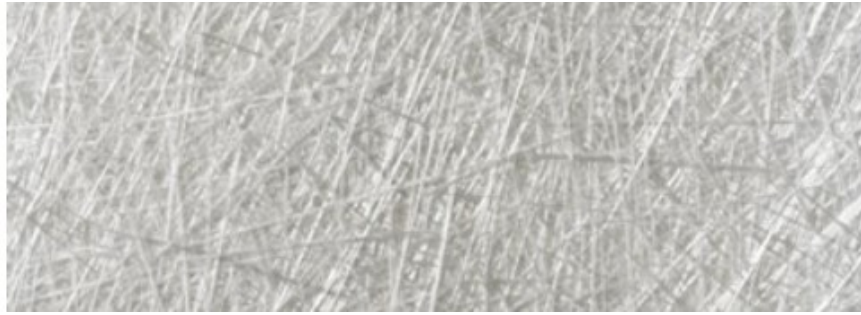
Slika 5. Viskeri [10]



Slika 6. Cijev ojačana žicom [10]

2.4.1. Staklena vlakna

Velika većina vlakana korištenih u industriji kompozita su upravo staklena vlakna. Staklena vlakna zbog svojih svojstava, veće otpornosti na udarce i većeg istežanja do loma mogu se koristiti za zamjenu težih metalnih dijelova. Ovisno o vrsti stakla, promjeru filamenata, kemijskom sastavu premaza i obliku vlakana, može se postići širok raspon svojstava. [11]



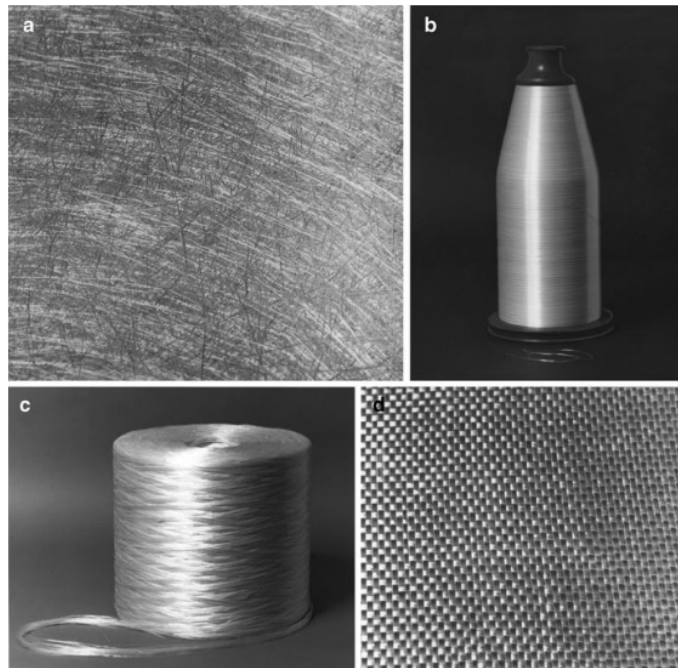
Slika 7. Niti staklenih vlakana. [11]

Staklena se vlakna dobivaju od masovnog stakla proizvedenog od mješavine pijeska, vapnenca i drugih oksidnih spojeva, a glavni sastavni dio je silicijev dioksid (46 – 75 %). Osnovna svojstva stakla su tvrdoća, otpornost na koroziju, inertnost, fleksibilnost, mala masa i relativno niska cijena. Sva staklena vlakna imaju sličnu krutost, ali se razlikuju u vrijednostima čvrstoće i različitoj otpornosti na degradaciju okoliša.

Razlikujemo:

- E – staklo: (E= električno) koristi se kada je potrebna visoka rastezna čvrstoća i dobra kemijska postojanost
- S – staklo: (S= čvrstoća) ima najveću čvrstoću i visoku cijenu, zamjenjuju se ugljičnim vlaknima
- C – staklo: (C= korozija) primjenjuje se kada je potrebna visoka otpornost na koroziju
- D – staklo: (D= dielektrično) koristi se ojačanje jezgre keramičkih izolatora
- A – staklo: (A= alkalijsko) koristi se za lagane površine
- R – staklo: europski pandan S – stakla visoke čvrstoće i otpornosti prema umoru, pogodni za oblikovanje limova

Otpornost vlakana na koroziju ovisi o sastavu vlakana, korozivskoj otopini i vremenu u kojem se vlakna izlažu koroziji. Rastezna čvrstoća im pada porastom temperature, ali i kemijskom korozijom jer su vlakna osjetljiva na kemikalije. Zbog korozije dolazi i do rasta i širenja mikropukotina. [7]



Slika 8. Mogući oblici staklenih vlakana [4]

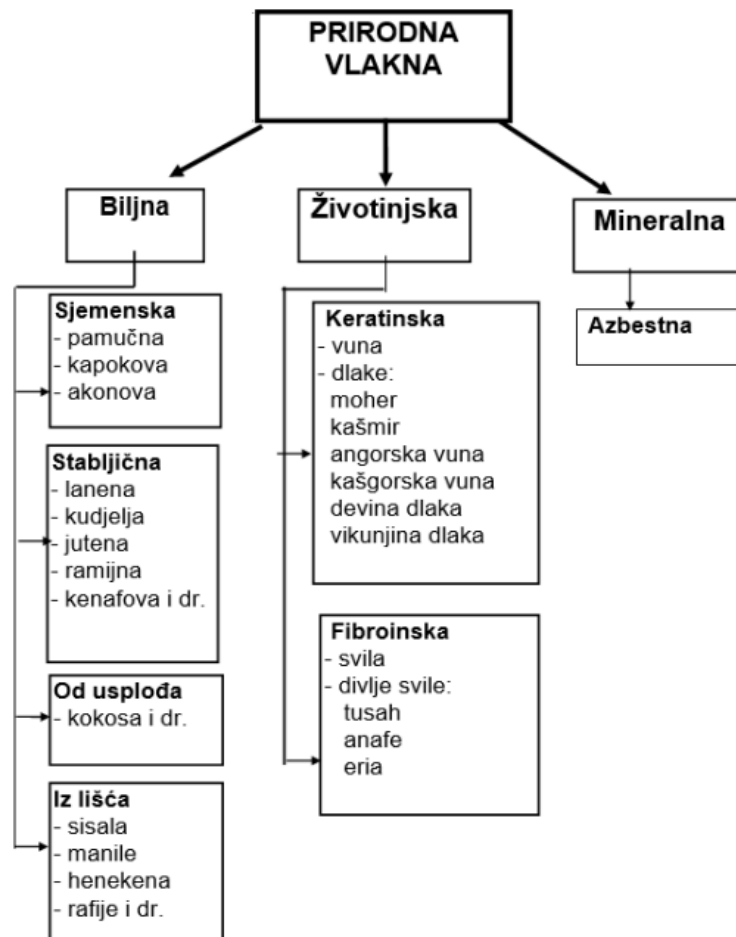
2.5. Prirodna ojačala

Prirodna vlakna mogu se pronaći u stabljici, lišću ili sjemenu različitih biljaka. Primjeri vlakana prikupljenih iz stabljike su lan, konoplja i juta. Agava i abaka su vlakna lišća, a koriste se za krute vezivne konopce i morsku vodu. U sjemenska vlakna ubrajamo pamuk i kokos. Promjer prirodne niti je reda veličine 10 μm , a tri osnovne kemijske komponente prirodnih vlakana su celuloza, hemiceluloza i lignin. Pri izradi kompozita od biljnih vlakana najzastupljeniji su lan, konoplja, kenaf, juta i sisal (Slika 9.). [7]



Slika 9. Vrste prirodnih vlakana [12]

Prirodna vlakna dijele se prema podrijetlu nastanka na biljna, životinjska i mineralna. (Slika 10.) Prirodna vlakna su ekološki prihvatljiva, lagana, obnovljiva, biorazgradiva i pristupačna cijenom. Kompoziti od prirodnih vlakana su često korišteni u industriji zbog niske gustoće i mnogih ekoloških prednosti u odnosu na konvencionalne kompozite. Takvi kompoziti su veoma isplativi materijali široke primjene (npr. građevina, uređenje unutrašnjosti automobila i željezničkih vagona). [14] Glavni nedostatak im proizlazi iz njihove hidrofilne prirode što dovodi do visoke osjetljivosti na upijanje vlage i niske otpornosti na vlažnu i mokru okolinu. [15]



Slika 10. Podjela prirodnih vlakana [16]

2.5.1. Lanena vlakna

Lanena vlakna se ekstrahiraju iz lišća ili kože stabljike biljke lana. Vlakna su raspoređena u obliku tankih niti koje su grupirane u uzdužne snopove. Laneno vlakno je mekano, sjajno, savitljivo, male gustoće, jače od pamučnog vlakna, ali manje elastično. (Slika 11.) [17]



Slika 11. Tkanje lana [18]

Njihova primjena u ulozi ojačala u proizvodnji kompozita postaje sve veća. Najviše se primjenjuju u automobilske industriji kao podloge za unutrašnjost automobila. U mnogim primjenama gdje se koriste staklena vlakna, lan se pokazao kao učinkovita zamjena. [19]

Lan je ekološki prihvatljiv materijal te se iz tog razloga sve više razmatra za upotrebu u kompozitima. Vlakna zahtijevaju između dva i pet puta manje energije za proizvodnju po jedinici mase od staklenih vlakana. Ipak, konvencionalna ojačala kao što su staklena ili ugljična vlakna imaju znatno bolju mehaničku učinkovitost u usporedbi s lanom. Staklena vlakna su oko četiri puta jača od lanenih vlakana, a ugljična oko pet puta. [20]

2.6. Hibridni kompoziti

Postupkom hibridizacije se vlakna međusobno kombiniraju u jedinstvene matrice, a različitim načinom slaganja postizemo strukturu hibridnih kompozita različitih oblika. Najpoznatije su slojevite (laminatne) konstrukcije i sendvič konstrukcije. [21] Promišljenom upotrebom različitih vrsta ojačala i načinom na koji se slažu, uvelike se može utjecati na učinkovitost i isplativost te na postizanje najveće čvrstoće na jako opterećenim dijelovima materijala. [4]

2.6.1. Svojstva hibridnih kompozita

Prirodna i sintetska vlakna primjenjuju se u hibridnoj formi kako bi novonastali kompozit mogao imati pogodna mehanička i tribološka svojstva dobivena kombinacijom obje vrste vlakana. Ono što znamo o prirodnim vlaknima je da su biorazgradiva, fleksibilna, imaju malu gustoću, pokazuju električnu otpornost, veću otpornost pojavi loma, toplinska i zvučna izolacijska svojstva. Iako imaju svoje prednosti, prirodna vlakna i dalje nemaju bolja mehanička svojstva od sintetskih vlakana. Staklena vlakna imaju malu krhkost i krutost, veću rasteznu čvrstoću, dobru toplinsku vodljivost, visok modul elastičnosti. Poznavanjem ovih svojstava za obje vrste vlakana i njihovim međusobnim kombiniranjem moguće je dobiti kompozitni materijal još boljih svojstava.

Primjerice, hibridizacijom prirodnih sa sintetskim vlaknima poboljšavaju se čvrstoća, krutost i otpornost na vlagu, točnije rečeno nedostaci prirodnih vlakana zamjenjuju se prednostima sintetskih i obratno. Prednost hibridizacije odnosi se na smanjenje troškova i poboljšavanje ekoloških čimbenika. [21]

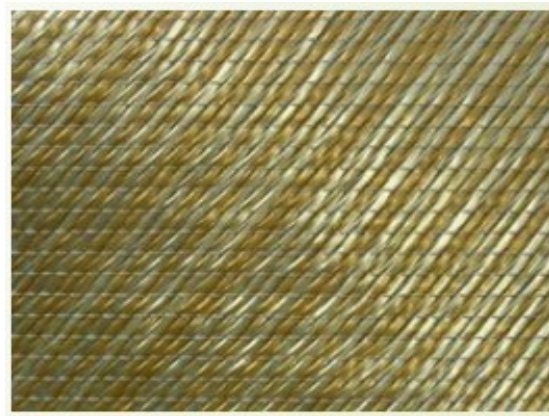
Neke od najčešćih kombinacija vlakana u industriji:

- ugljik + aramid: tlačna i rastezna čvrstoća ugljičnih vlakana i dobra žilavost te rastezna čvrstoća aramidnih vlakana (Slika 12.)



Slika 12. Ugljična i aramidna vlakna [10]

- aramid + staklo: mala gustoća, žilavost i rastezna čvrstoća aramidnih vlakana te tlačna i rastezna čvrstoća staklenih vlakana (Slika 13.)



Slika 13. Aramidna i staklena vlakna [10]

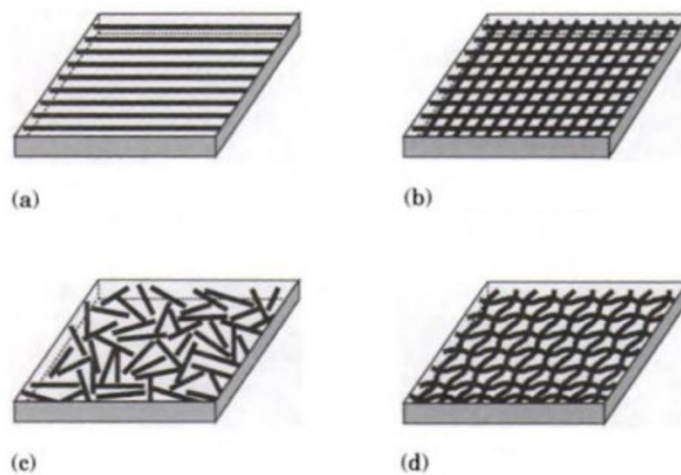
- ugljik + staklo: tlačna i rastezna čvrstoća, krutost i gustoća ugljičnih vlakana te tlačna i rastezna čvrstoća i cijena staklenih vlakana (Slika 14.) [10]



Slika 14. Ugljična i staklena vlakna [10]

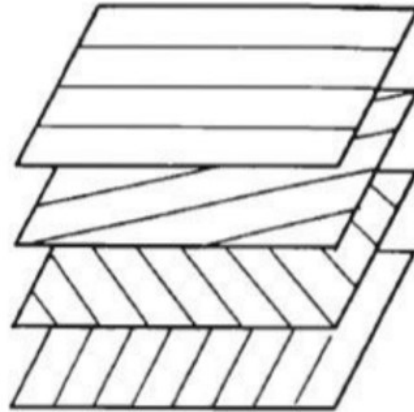
2.6.2. Ručno laminiranje

Postupak laminiranja odnosi se na slaganje vlakana u slojeve da bi se postigla željena krutost i debljina. Vlakna koja se primijenjuju u shemi slaganja mogu biti kontinuirana, diskontinuirana, tkanja, jednosmjerna ili dvosmjerna. (Slika 15.) [22]



Slika 15. Vrste vlaknima ojačanih kompozita pri laminiranju (a) jednosmjerna, (b) dvosmjerna, (c) diskontinuirana, (d) tkanja [22]

Slojevi se mogu slagati u istim ili različitim smjerovima, kao što je prikazano na slici 16., a povezuje ih se matricom te s obzirom na orijentaciju vlakana u pojedinim slojevima varirat će i svojstva. Loša povezanost između vlakna i matrice rezultirat će lošijim svojstvima i nedostacima. Moguće je raslojavanje koje se javlja uslijed pojave smičnih napreznja u slojevima. Nedostaci se mogu javiti i u samoj proizvodnji zbog oštećenja vlakana, loše osmišljenog načina slaganja slojeva, interlaminarnih pukotina te različitih debljina slojeva. [22]



Slika 16. Slaganje slojeva pri laminiranju [21]

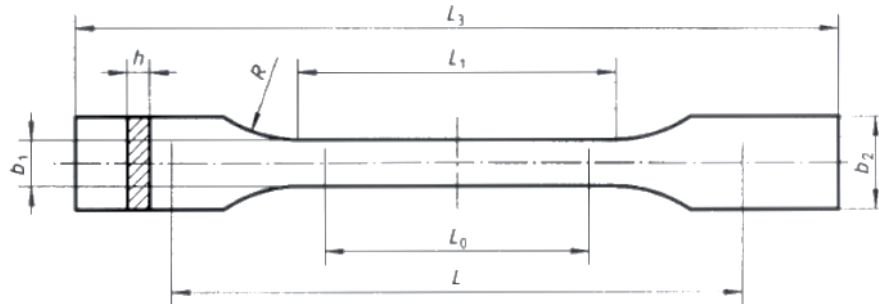
2.6.3. Potlačno ulijevanje

Potlačno ulijevanje je tehnika izrade koja koristi vakuumski pritisak za ubacivanje smole u laminat. Suhi materijali koji se polažu u kalup izloženi su vakuumskom tlaku prije uvođenja smole. Nakon što se postigne potpuni vakuum smola se potiskuje u laminat pomoću vakuumske cijevi i vakuumske pumpe ili generatora. Ovim procesom postiže se bolji omjer vlakana i smole od ručnog laminiranja. Primjenom vakuuma isisan je višak smole iz laminata te je poboljšán odnos matrice i ojačala. Infuzija je pogodna za izradu kompozitnih materijala jer omogućuje dobivanje visokokvalitetnog kompozita s minimalnom količinom otpada. [23]

2.7. Mehanička svojstva

2.7.1. Priprema ispitnog tijela

Za ispitivanje mehaničkih svojstava pripremljeno je ispitno tijelo prema normi HRN EN ISO 527 – 4. (Slika 17.)



Slika 17. Ispitno tijelo za rastezna ispitivanja

Pri čemu su izmjere ispitnog tijela:

L_3 [mm] – ukupna duljina ispitnog tijela ≥ 150

L_1 [mm] – duljina uskog dijela s paralelnim stranicama $60 \pm 0,5$

R [mm] – radijus ≥ 60

b_2 [mm] – širina glave ispitnog tijela $20 \pm 0,2$

b_1 [mm] – širina vrata ispitnog tijela $10 \pm 0,2$

h [mm] – debljina ispitnog tijela od 2 do 10

L_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela $50 \pm 0,5$

L [mm] – početni razmak između hvatišta 115 ± 1

2.7.2. Rastezna čvrstoća

Mjerenje istezanja i modula istežljivosti su najvažniji pokazatelji čvrstoće materijala. Rastezno ispitivanje je mjerenje sposobnosti materijala da izdrži sile koje ga nastoje razdvojiti i odrediti u kojoj se mjeri materijal rasteže prije loma. Ispitivanje se provodi na način da se ispitno tijelo postavlja okomito u hvataljke stroja za ispitivanje. Drške su zategnute ravnomjerno i čvrsto da bi se spriječilo klizanje. Kako se ispitno tijelo izdužuje pod djelovanjem sile, tako se povećava i otpor ispitnog tijela tom djelovanju. Ispitno tijelo se nastavlja opterećivati sve dok se ne primijeti puknuće. Uređaj bilježi sve promjene te ih izražava u obliku brojčanih vrijednosti. [24]

Rastezna čvrstoća računa se kao omjer maksimalne sile (sila u trenutku loma ispitnog tijela) rastezanja i početne površine poprečnog presjeka ispitnog tijela:

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (1)$$

Kod izračuna naprezanja i istezanja ispitnog tijela koriste se izrazi:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3)$$

pri čemu je:

σ_m [MPa] – rastezna čvrstoća

F_{max} [N] – maksimalna sila

A_0 [mm²] – površina poprečnog presjeka ispitnog tijela

σ [MPa] – rastezno naprezanje ispitnog tijela uslijed djelovanja sile

ε [mm/mm] – istezanje

L_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela

ΔL_0 [mm] – promjena duljine ispitnog tijela

2.7.3. Rastezni modul elastičnosti

Rastezni modul elastičnosti E [MPa] se određuje iz nagiba pravca pomoću Hookeovog zakona prema izrazu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

2.8. Goriva svojstva

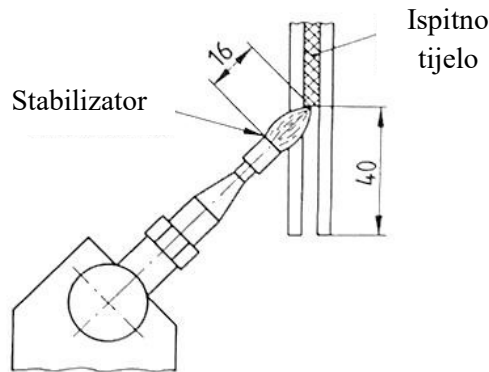
Polimeri općenito imaju veću toplinsku rastezljivost od metala i keramike. Njihovi koeficijenti toplinskog širenja nisu konstantni, tj. polimeri se značajno šire na nelinearan način s porastom temperature. Kada se kompozit zagrije na dovoljno visoku temperaturu polimerna matrica i organska vlakna, ukoliko postoje, će se toplinski razgraditi. Razgradnja se događa nizom reakcija koje razlažu polimerne lance u hlapljive tvari niske molekulske mase koje difundiraju u plamen. Većina organskih smola i vlakana koja se koriste u kompozitima toplinski se razgrađuju procesom nasumičnog cijepanja lanaca. To u osnovi uključuje razgradnju dugih organskih lanaca u male fragmente na mjestima gdje veza ima najnižu energiju.

Prirodna vlakna i epoksidna smola su više gorivi od staklenih vlakana. Staklena vlakna su kemijski inertna i zadržavaju kemijsku i fizičku stabilnost prvi visokoj temperaturi i toplinskom toku. E – stakleno vlakno, koje je najčešće korišten tip vlakana, ostaje nepromijenjeno sve dok se ne zagrije na oko 830 °C kada započinje mekšanje i viskozno strujanje, dok taljenje nastupa na oko 1700 °C. Mehanička svojstva poput čvrstoće i otpornosti na puzanje padaju već u rasponu temperature znatno ispod temperature mekšanja. [25]

2.8.1. Ispitivanje gorivih svojstava

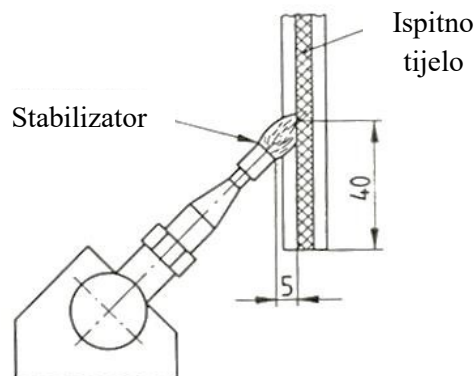
Postupak ispitivanja provodi se prema normi DIN 53 438. Ispitivanje se provodi na dva načina:

- izlaganje ruba plamenu



Slika 18. Izlaganje ruba plamenu

- izlaganje površine plamenu



Slika 19. Izlaganje površine plamenu

Plamenik je potrebno nagnuti za 45° , visina plamena je 20 mm, a ispitna tijela se postavlja u dvodjelni okvir koji predstavlja držač. Materijal se klasificira prema tablici 1.

Tablica 1. Klasificiranje gorenja

Klasa	
K1	samogasiv (nije dosegnuta mjerna oznaka)
K2	plamen do mjerne oznake za $t > 20$ s
K3	plamen do mjerne oznake za $t < 20$ s

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Ispitivanje mehaničkih svojstava

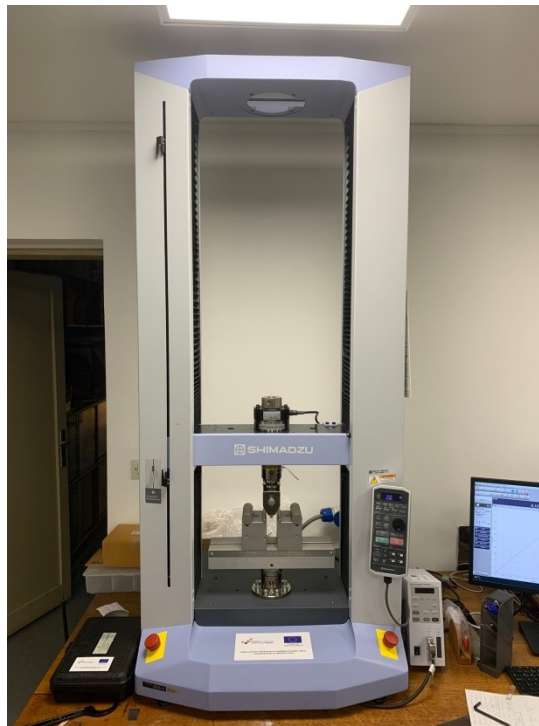
Cilj eksperimentalnog dijela rada je određivanje mehaničkih svojstava polimernog kompozita čiji su ispitni uzorci izrađeni postupkom potlačnog ulijevanja pri temperaturi od 25 °C, vlazi od 45 % i vakuumu od 90 %. Uspoređuje se kakve će rezultate dati hibridni kompozit od četiri sloja pri čemu su staklena vlakna u vanjskom sloju, a lanena između njih, u odnosu na kompozit sa samo četiri sloja staklenih vlakana. Iz svakog kompozita izrezana su ispitna tijela odgovarajućih oblika i izmjera koja služe za ispitivanje mehaničkih svojstava.

3.1.1. Materijali i maseni udio vlakana

Matrica je načinjena od epoksidne smole InfuGreen 810 (Sicomina, Francuska), a ojačala su lanena vlakna ApliTEx 500 (Bcomp, Švicarska) i staklena vlakna Triaxial 1200 (Hebei, Kina). U prvom slučaju kompozit od četiri sloja vlakana u vanjskom sloju ima staklena vlakna, a između lanena vlakna, a u drugom slučaju kompozit je načinjen samo od staklenih vlakana, također u četiri sloja vlakana. Hibridni kompozit u svome sastavu ima 55 % vlakana.

3.2. Ispitivanje rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti

Iz kompozita je izrezan određen broj ispitnih tijela pravokutnog poprečnog presjeka i provedeno je ispitivanje u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 527 – 4. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici Shimadzu AGS – X mjernog područja 50 kN prikazanoj na slici 20. Izrezano je ukupno 12 ispitnih tijela, dakle 6 ispitnih tijela za svaki od kompozita.



Slika 20. Univerzalna kidalica Shimadzu AGS – X

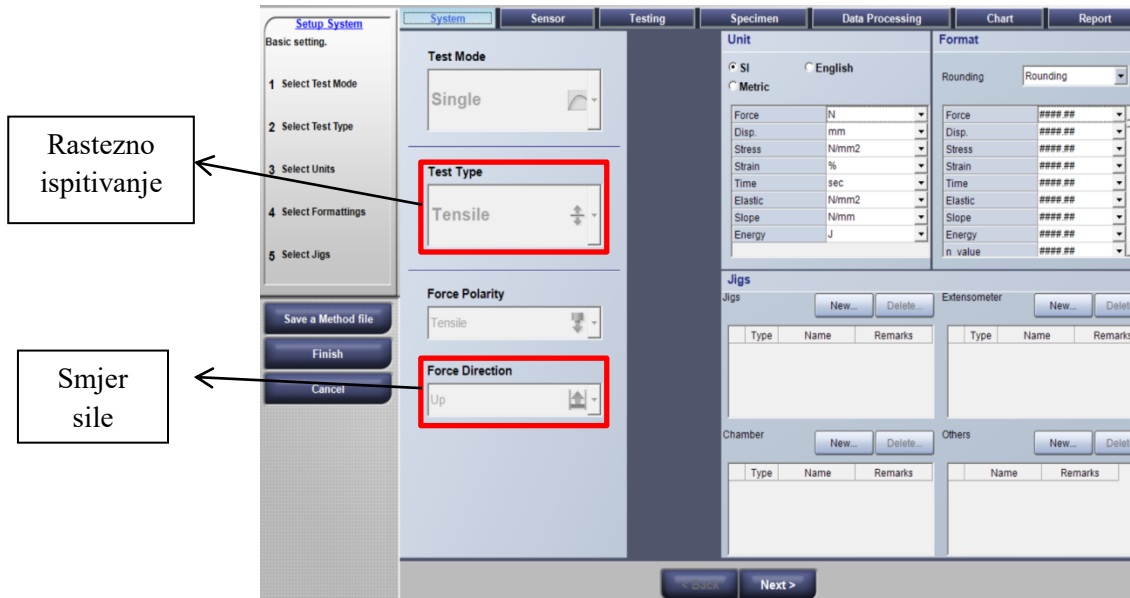
Kidalicom se upravlja pomoću programa Trapezium X (Slika 21.) te rezultate ispitivanja dobivamo u elektronskom obliku po završetku mjerenja. Brzina ispitivanja bila je 2 mm/min.



Slika 21. Program Trapezium X

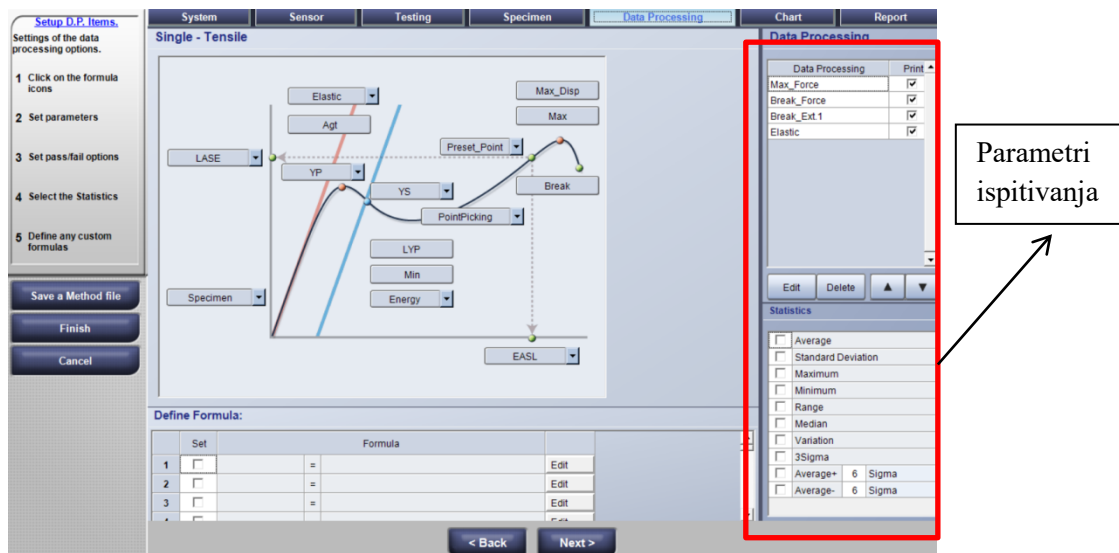
Pri pokretanju programa potreban je:

- odabir vrste ispitivanja i smjera sile



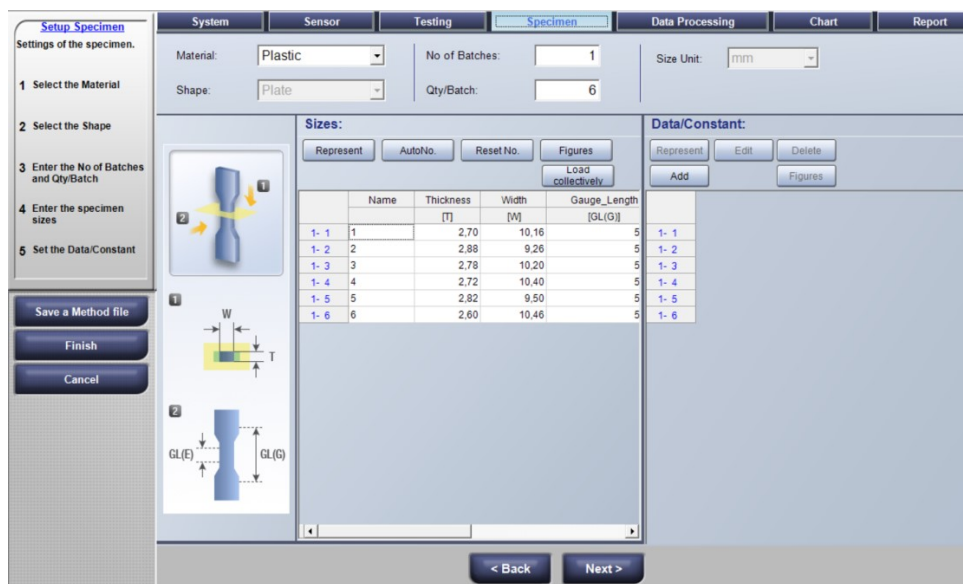
Slika 22. Vrsta ispitivanja i smjer sile

- odabir parametara koji će se mjeriti tijekom ispitivanja



Slika 23. Mjerni parametri

- odabir vrste materijala, oblika ispitnog tijela te unos izmjera



Slika 24. Opisivanje ispitnog tijela

U sljedećim tablicama prikazane su dimenzije ispitnih tijela dvaju kompozita. U oznakama za ispitno tijelo prvi broj je oznaka kompozita, a drugi broj u oznaci predstavlja redni broj ispitnog tijela, npr. oznaka 1-1 znači da se radi o prvom kompozitu i ispitnom tijelu broj jedan.

Tablica 2. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće za kompozit epoksid/staklo i lan (1+2+1)

Ispitno tijelo	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]	Početna mjerna duljina ispitnog tijela, L_0 [mm]
1 – 1	2,70	10,16	50,00
1 – 2	2,88	9,26	50,00
1 – 3	2,78	10,20	50,00
1 – 4	2,72	10,40	50,00
1 – 5	2,82	9,50	50,00
1 – 6	2,60	10,46	50,00

**Tablica 3. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rastezne čvrstoće za kompozit epoksid/
staklo (4)**

Ispitno tijelo	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]	Početna mjerna duljina ispitnog tijela, L_0 [mm]
2 – 1	2,70	10,16	50,00
2 – 2	2,88	9,26	50,00
2 – 3	2,78	10,20	50,00
2 – 4	2,72	10,40	50,00
2 – 5	2,82	9,50	50,00
2 – 6	2,60	10,46	50,00

3.3. Provođenje ispitivanja gorivosti materijala

3.3.1. Priprema hibridnog kompozita

Postupkom ručnog laminiranja izrađena su dva hibridna kompozita od ukupno pet slojeva: triju lanenih (AmpliTEX 500, Bcomp, Švicarska) i dvaju staklenih vlakana (Triaxial 1200, SAERTEX, Njemačka) s različitim načinom slaganja, međusobno povezanih epoksidnom smolom (Nova-chem d.o.o., Karlovac). Prvi hibridni kompozit ojačan je staklenim vlaknima s vanjske strane, a između su lanena vlakna. Drugi hibridni kompozit ima naizmjenično slaganje lanenih i staklenih vlakana, počevši s lanenim vlaknima u površinskom sloju.



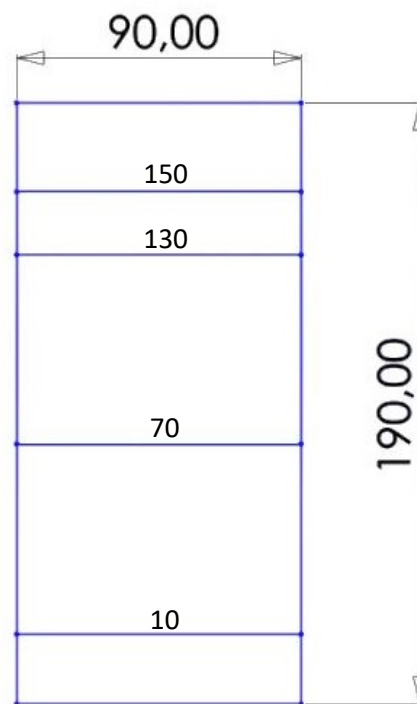
Slika 25. Priprema kompozita za ispitivanje gorivih svojstava

Neočvrsnuti kompoziti su nakon pažljive pripreme opterećeni utezima kako se među slojevima ne bi zadržao zrak koji loše djeluje na povezivanje vlakana s matricom, a samim time rezultat je kompozit lošijih svojstava. Nakon pripreme kompoziti su dodatno opterećeni u kalupu utegom mase 5 kg i ostavljeni da se suše.

3.3.2. Priprema ispitnog tijela

Za potrebe ispitivanja gorivosti prema prethodno spomenutoj normi DIN 53 438 potrebno je pripremiti ispitna tijela i izmjeriti im debljine na određenim točkama (udaljenostima) definiranim ovisno o postupku izlaganja ruba ili površine plamenu.

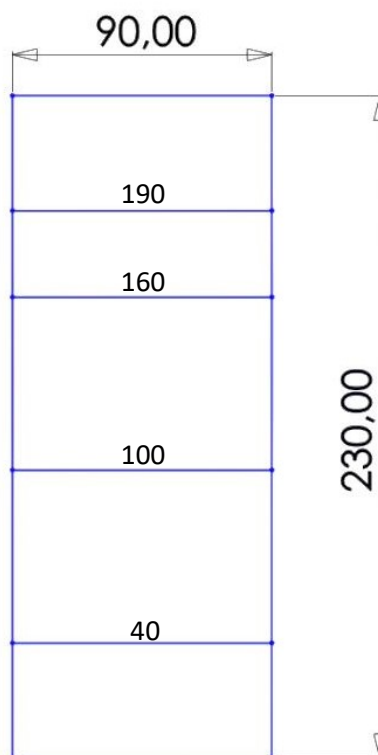
Najveća udaljenost na skici predstavlja liniju do koje se mjeri doseg plamena prilikom gorenja. Za metode prikazane i opisane skicom na slikama 26. i 27. dobvene su debljine ispitnih tijela prikazane tablicama 4. i 5.



Slika 26. Izmjere ispitnog tijela i oznake udaljenosti za mjerenja debljine za izlaganje ruba plamenu

Tablica 4. Debljine ispitnih tijela hibridnih kompozita za izlaganje ruba plamenu

		Ispitno tijelo 1 (hibridni kompozit 1)	Ispitno tijelo 2 (hibridni kompozit 2)
Debljina na zadanoj udaljenosti [mm]:	10 mm	5,33	5,12
	70 mm	5,34	5,16
	130 mm	5,33	5,11



Slika 27. Izmjere ispitnog tijela i oznake udaljenosti za mjerenja debljine za izlaganje površine plamenu

Tablica 5. Debljine ispitnih tijela hibridnih kompozita za izlaganje površine plamenu

		Ispitno tijelo 1 (hibridni kompozit 1)	Ispitno tijelo 2 (hibridni kompozit 2)
Debljina na zadanoj udaljenosti [mm]:	40 mm	5,19	5,14
	100 mm	5,20	5,11
	160 mm	5,18	5,15

3.3.3. Materijali i maseni udio vlakana

Određen je i maseni udio vlakana za svako ispitno tijelo prema izrazu:

$$\text{udio vlakana} = \frac{m_v}{m_k} \times 100\% \quad (5)$$

pri čemu je:

m_v [g] – masa vlakana

m_k [g] – masa cijelog kompozita

Tablica 6. Početne mase vlakana u hibridnom kompozitu

	Hibridni kompozit 1	Hibridni kompozit 2
Masa cijelog kompozita [g]	296,5	299,7
Masa (staklena vlakna) [g]	24,6	24,7
Masa (lanena vlakna) [g]	69,7	70,0
Maseni udio vlakna [%]	31,8	31,6

3.3.4. Postupak provođenja ispitivanja

Za postupak je potreban plamenik i dvodjelni okvir (Slika 28.). Cilj ispitivanja je određivanje hoće li, i u kojem vremenu, vrh plamena dosegnuti određenu oznaku na ispitnom tijelu, bilježe se opažanja, a mjeri se:

vrijeme gorenja – Δt između početka testiranja plamenom do gašenja plamena ispitnog tijela, ili dok vrh plamena ne dodirne mjernu oznaku.

Pri čemu je:

Δt [s] – razlika vremena početka i završetka testiranja



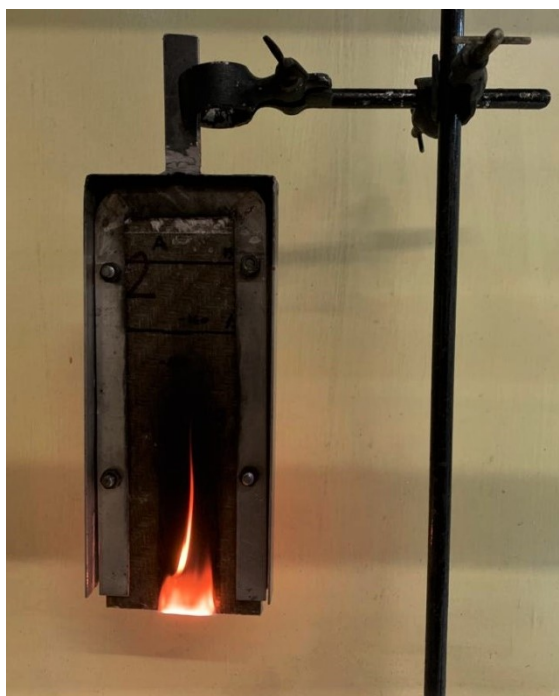
Slika 28. Priprema radne površine

1. Izlaganje ruba plamenu

Plamenik mora gorjeti jednu minutu prije nego se krene s ispitivanjem. Izlaz plamenika je na udaljenosti 16 mm od donjeg ruba ispitnog tijela. Na ispitno tijelo se djeluje plamenom 15 sekundi, pa se ukloni, pri čemu se pazi da se ne uznemiruje plamen.



Slika 29. Početak ispitivanja paljenjem ruba ispitnog tijela



Slika 30. Gorenje ispitnog tijela izlaganjem ruba plamenu

2. Izlaganje površine plamenu

Plamenik mora gorjeti jednu minutu prije nego se krene s ispitivanjem. Izlaz plamenika je na udaljenosti 5 mm od površine ispitnog tijela i na visini 40 mm od ruba ispitnog tijela. Na ispitno tijelo se djeluje plamenom 15 sekundi ili dok ne dođe do gorenja.



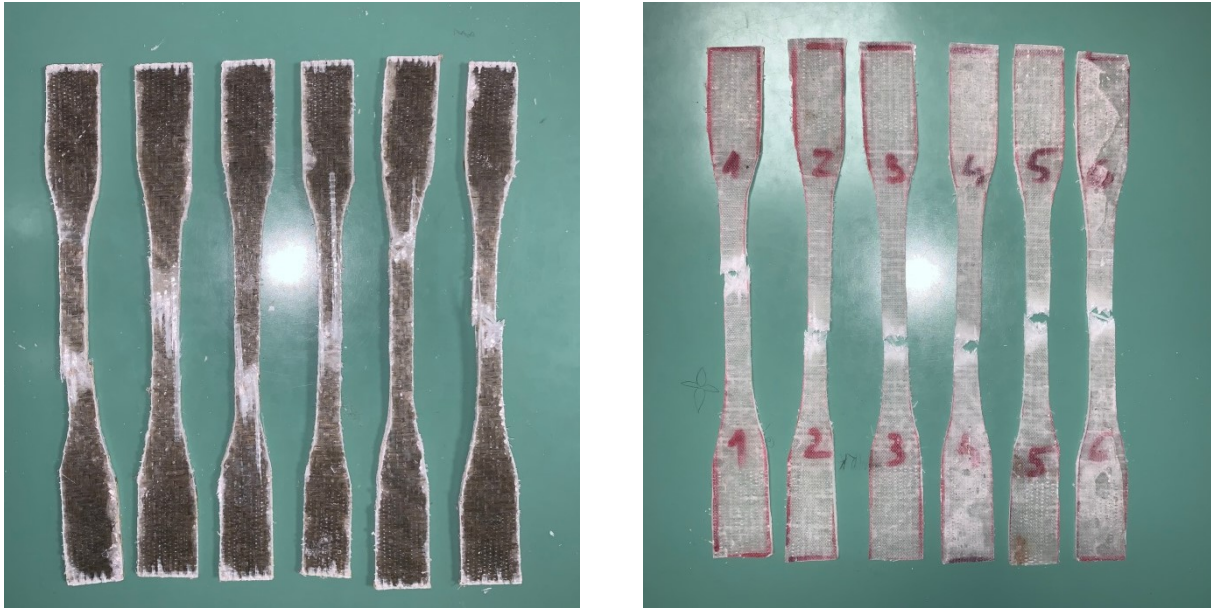
Slika 31. Početak ispitivanja paljenjem površine ispitnog tijela



Slika 32. Gorenje ispitnog tijela izlaganjem površine plamenu

4. REZULTATI ISPITIVANJA I USPOREDBA

4.1. Rezultati ispitivanja rastezних svojstava

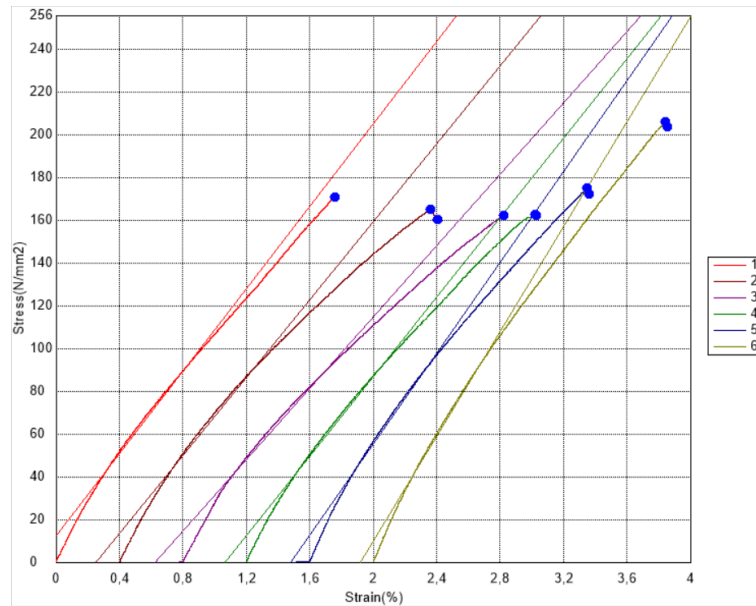


Slika 33. Rezultati ispitivanja rastezних svojstava: epoksid/staklo i lan (lijevo), epoksid/staklo (desno)

U tablici 7. vidljive su izmjerene vrijednosti rastezne čvrstoće, rasteznog modula elastičnosti, deformacije prilikom loma i maksimalne sile kompozita s epoksidnom matricom i dva sloja staklenih i lanenih vlakana (1+2+1).

Tablica 7. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (epoksid / staklo i lan)

Ispitno tijelo	Rastezna čvrstoća, σ_m [MPa]	Rastezni modul elastičnosti, E [MPa]	Deformacija prilikom loma, ε_k [mm]	Maksimalna sila, F_{max} [N]
1 – 1	171,04	9643,21	0,88	4691,99
1 – 2	165,00	9117,48	1,00	4400,25
1 – 3	162,54	8349,40	1,01	4609,01
1 – 4	162,71	9302,22	0,92	4602,74
1 – 5	175,08	10632,97	0,88	4690,33
1 – 6	205,97	12267,90	0,93	5601,66
Srednja vrijednost	173,72	9885,53	0,94	4766,00
Standardna devijacija	16,561	1384,407	0,057	422,990

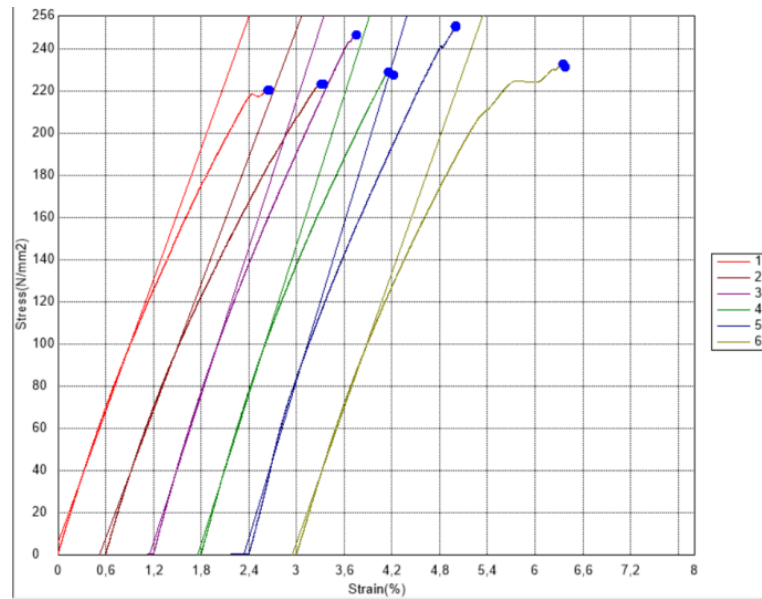


Slika 34. Dijagram naprezanje – istežanje dobiven ispitivanjem rasteznih svojstava za kompozit epoksid / staklo i lan (1-2-1)

U tablici 8. vidljive su izmjerene vrijednosti rastezne čvrstoće, rasteznog modula elastičnosti, deformacije prilikom loma i maksimalne sile kompozita s epoksidnom matricom i četiri sloja staklenih vlakana (4).

Tablica 8. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (epoksid / staklo)

Ispitno tijelo	Rastezna čvrstoća, σ_m [MPa]	Rastezni modul elastičnosti, E [MPa]	Deformacija prilikom loma, ε_k [mm]	Maksimalna sila, F_{max} [N]
2 – 1	220,60	10407,23	1,33	6051,40
2 – 2	223,43	10066,82	1,37	5958,64
2 – 3	246,92	11669,65	1,28	7001,73
2 – 4	228,97	11842,80	1,21	6477,13
2 – 5	251,15	12479,78	1,30	6728,36
2 – 6	232,77	10690,32	1,69	6330,41
Srednja vrijednost	233,97	11192,77	1,36	6424,61
Standardna devijacija	12,483	942,724	0,169	398,341



Slika 35. Dijagram naprezanje – istežanje dobiven ispitivanjem rasteznih svojstava za kompozit epoksid / staklo (4)

4.1.1. Usporedba rastezних svojstava kompozita sa pravilima Hrvatskog registra brodova

U tablici 9. prikazana su rastezna svojstva kompozita. Navedene su srednje vrijednosti rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti. Kompoziti su poredani kako su prethodno označeni u tablicama uz dodatni kompozit: epoksidna smola i šest slojeva lana sa svojim vrijednostima rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti iz završnog rada Petra Dundovića [26]. Dobiveni podaci su uspoređeni s minimalnim vrijednostima za kompozite ojačane staklenim vlaknima propisanim u Hrvatskom registru brodova [27]. Usporedbe se provode sa staklenim vlaknima jer za lanena vlakna još nema posebnih zahtjeva.

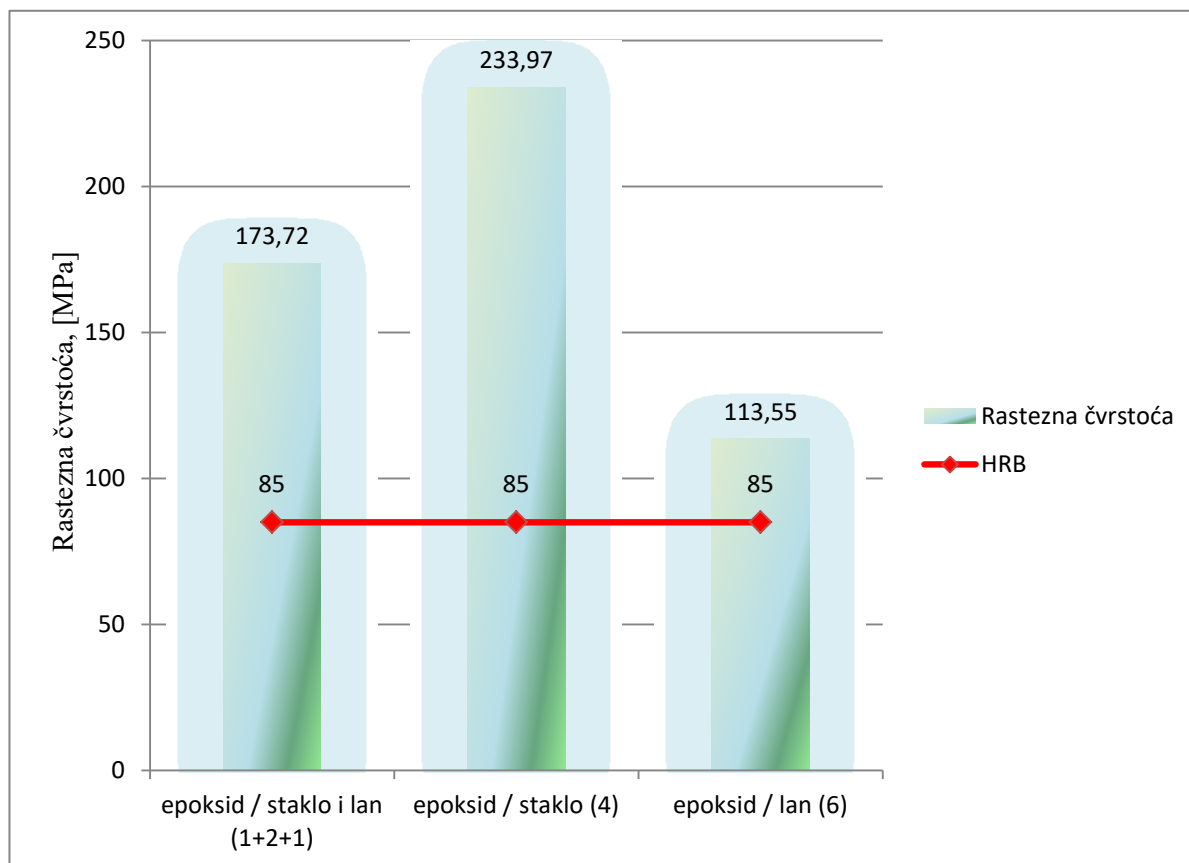
Tablica 9. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja rastezne čvrstoće

Vrsta kompozita	Rastezna čvrstoća, σ_m [MPa]	Rastezni modul elastičnosti, E [MPa]
epoksid / staklo i lan (1+2+1)	173,72	9885,53
epoksid / staklo (4)	233,97	11192,77
epoksid / lan (6)	113,55	7907,14
HRB	85	6500

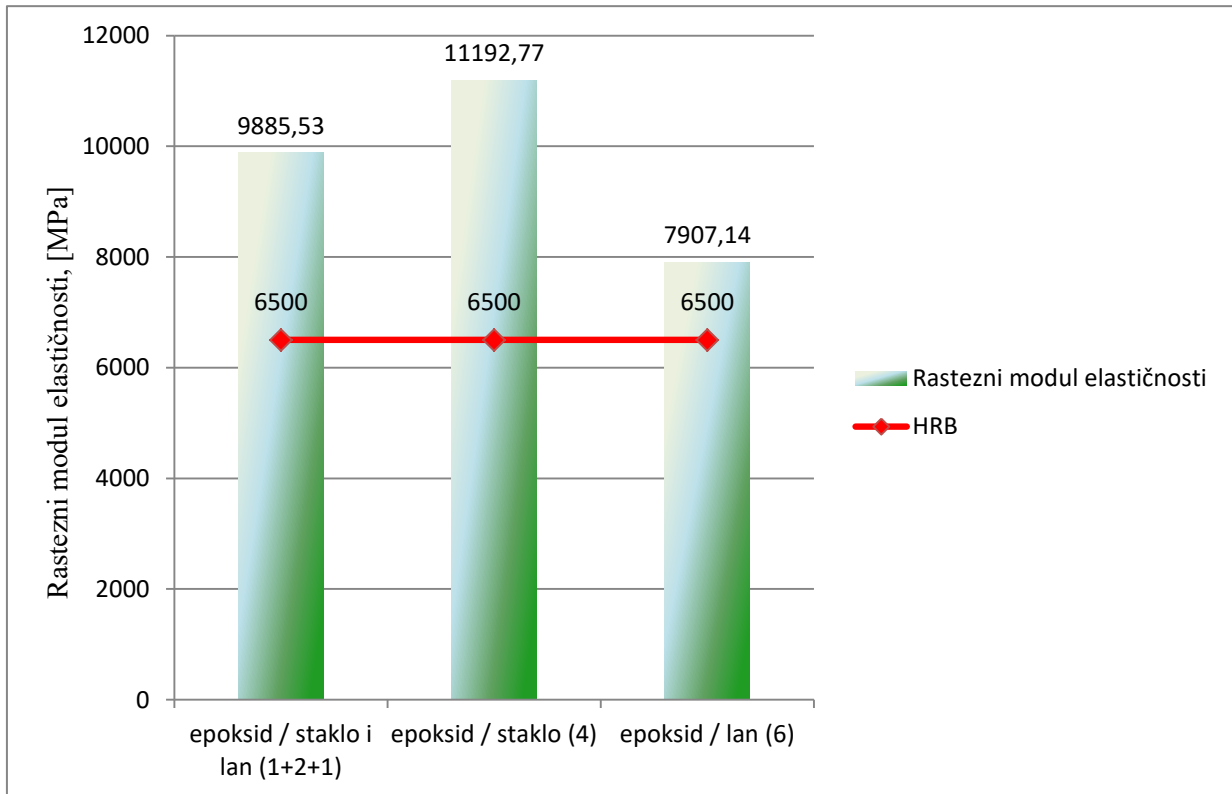
Prema dobivenim rezultatima iz tablice 9. vidljivo je kako su kompoziti zadovoljili uvjete Hrvatskog registra brodova, tj. zadovoljeni su minimalni zahtjevi. Staklena vlakana zasebno, ali i u hibridnom kompozitu daju najveće vrijednosti rastezne čvrstoće i rasteznog modula elastičnosti što opravdava teorijsku podlogu da staklena vlakna podnose veće istezanje prije pojave loma. Stoga su staklena vlakna poželjna komponenta kompozitnih materijala u industrijskoj proizvodnji, barem po pitanju svojstava. Epoksidna smola ima dobra adhezijska svojstva što se vidi u zadovoljavajućim iznosima rastezne čvrstoće. Epoksidna smola i lanena vlakna su iz tog razloga bolja varijanta nego li primjerice poliesterska smola i lanena vlakna zbog toga što je lan hidrofilan, a polimer hidrofoban pa može doći do loše povezanosti matrice i ojačala.

4.1.2. Grafička usporedba rezultata

Na slikama 36. i 37. prikazana je grafička usporedba dobivenih rezultata ispitivanja s minimalnim zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za kompozite sa staklenim vlaknima.



Slika 36. Vrijednosti rastezne čvrstoće ispitivanih kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a za staklena vlakna



Slika 37. Vrijednosti rasteznog modula elastičnosti ispitivanih kompozita uspoređenih s minimalnim zahtjevom HRB-a za staklena vlakna

4.2. Rezultati ispitivanja gorivosti

4.2.1. Izlaganje ruba plamenu

Za ispitno tijelo 1 (hibridni kompozit 1) plamen dodiruje udaljenost 150 mm za 1:31:08 minuta.

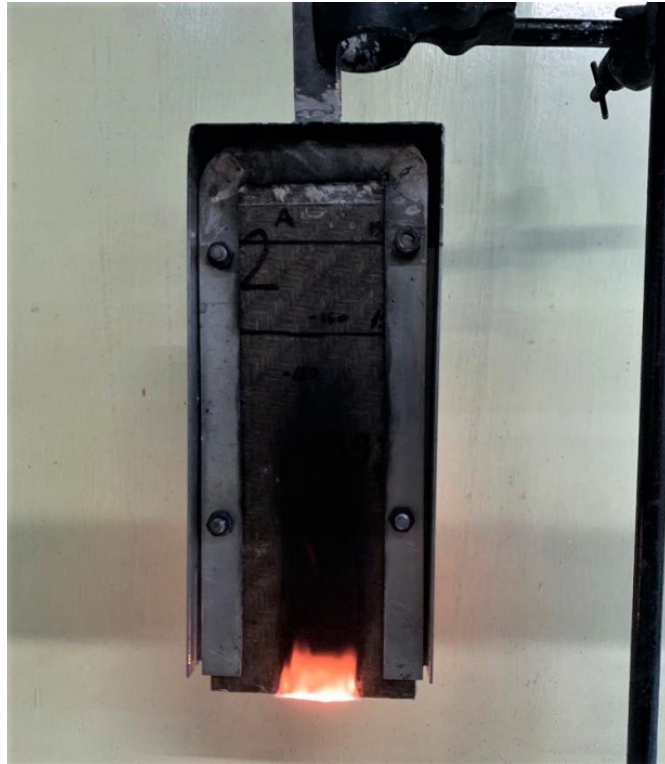
Opažanjem se primjećuje kako su gorile obje strane, ispitno tijelo je čađilo, žarilo, čulo se pucketanje, osjećao se miris gorenja, dim je bio izrazito crne boje, pri gašenju je dim i dalje bio crne boje, a čestice su se razletjele po zraku. Nakon težeg gašenja ispitno tijelo je i dalje zračilo toplinu dok se čekalo potpuno hlađenje. Rezultati su prikazani na slici 38.



Slika 38. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 1 nakon izlaganja ruba plamenu

Za ispitno tijelo 2 (hibridni kompozit 2) plamen dodiruje udaljenost 150 mm za 1:21:21 minuta.

Opažanjem se primjećuje kako su gorile obje strane, ispitno tijelo je čađilo i gorilo slabijim plamenom od ispitnog tijela 1. Gorenje je bilo jednoličnije, plamen se sužavao, pri gašenju su se čestice razletjele po zrak, a miris je bio intenzivan. Nakon gašenja ispitno tijelo i dalje zrači toplinu dok čeka potpuno hlađenje. Rezultati su prikazani na slici 39.



Slika 39. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2 nakon izlaganja ruba plamenu

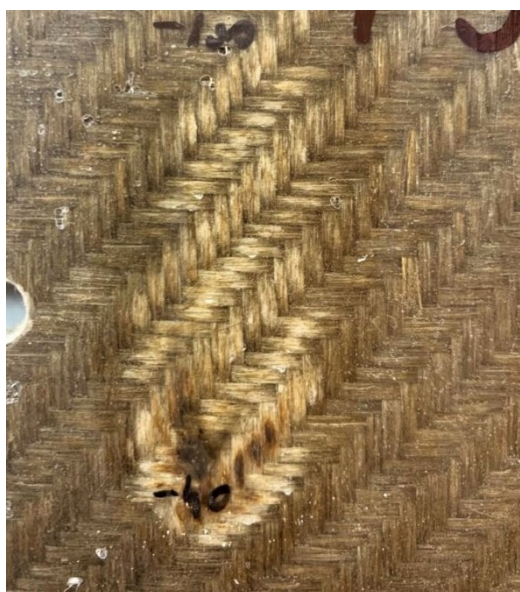
4.2.2. Izlaganje površine plamenu

Za ispitno tijelo 1 (hibridni kompozit 1) nije došlo do zapaljenja unutar 15 sekundi. Rezultati su prikazani na slici 40.



Slika 40. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 1 nakon izlaganja površine plamenu

Za ispitno tijelo 2 (hibridni kompozit 2) nije došlo do zapaljenja unutar 15 sekundi. Opažanjem se primjećuje da iako nije došlo do zapaljenja čulo se pucketanje i bio je vidljiv dim, ali neznatno, a već pri odmicanju plamenika prestaje bilo kakav oblik zapaljenja. Rezultati su prikazani na slici 41.



Slika 41. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela 2 nakon izlaganja površine plamenu

4.3. Usporedba rezultata ispitivanja gorivosti materijala

Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem gorivih svojstava kompozita dolazimo do zaključka da pri paljenju ruba kompozita, brže dolazi do zapaljenja u slučaju hibridnog kompozita 2 (lanena vlakna u vanjskim slojevima) za 9:87 sekundi, što je bilo i očekivano jer su lanena vlakna brže i lakše zapaljiva od staklenih vlakana koja su stabilnija pri povišenju temperature. Za metodu izlaganja površine plamenu ne dolazi do zapaljenja ni u jednom slučaju.

5. ZAKLJUČAK

Potlačnim ulijeivanjem načinjeni su kompoziti od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima, lanenim vlaknima i njihovom kombinacijom, pri istim parametrima. Usporedbom njihovih rasteznih svojstava vidljivo je da sva tri materijala zadovoljavaju rastezna svojstva pravila HRB-a. Pritom je rastezna čvrstoća kompozita epoksid / lan 106 % niža od kompozita epoksid / staklo i 53 % niža od hibrida epoksid /staklo i lan, dok je modul epoksid / lan 42 % niži od kompozita epoksid /staklo i 25 % niži od hibrida epoksid /staklo i lan.

Ručnim laminiranjem izrađeni su hibridni kompoziti s različitim slaganjem staklenih i lanenih vlakana. Provedeno je ispitivanje gorenja za dva slučaja, u prvom slučaju se rub izlagao plamenu, a u drugom slučaju površina. U prvom slučaju oba kompozita su zapaljiva, dok su u drugom kompoziti samogasivi. Kompozit s lanenim vlaknima u vanjskim slojevima gori brže od kompozita sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima, budući da plamen doseže označenu liniju u kraćem vremenu i to za 9:87 sekundi prije nego u slučaju kompozita sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima.

Osim što je slaganje sa staklenim vlaknima u vanjskim slojevima bolje u slučaju požara, očekuje se da se takav kompozit i pri savijanju bolje ponaša, budući da se pri savijanju u donjoj plohi javljaju rastezna naprezanja, a staklena vlakna imaju bolju rasteznu čvrstoću i modul.

LITERATURA

- [1] Matthews, F. L., Rawlings R. D.: *Composite materials: Engineering and science*, Second edition, CRC Press, Boca Raton, 1999.
- [2] Knight, M., Curliss, D.: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third edition, 2003.
- [3] Sreenivasulu, R. Aero Space Applications of GFRP Composites: Review. 2013: https://www.researchgate.net/publication/259568833_Aero_Space_Applications_of_GFRP_Composites_Review%27
- [4] Chawla, K. K.: *Composite Materials: Science and Engineering*, Third edition, Springer, New York, 2012.
- [5] Ngo, T. D.: *Introduction to Composite Materials*, First edition, IntechOpen, 2020.
- [6] Rubin, I. I.: *Plastic materials and technology*, John Wiley & Sons, Inc., Kanada, 1990.
- [7] Barbero, E. J.: *Introduction to Composite Materials Design*, Third edition, CRC Press, Boca Raton, 2018.
- [8] Asmatulu, E., Alonayni, A., Alamir, M., Safety concerns in composite manufacturing and machining, SPIE, Denver, Colorado, SAD, 2014.
- [9] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [10] Haramina, T.: *Polimeri i kompoziti – nastavni materijali*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
- [11] <https://www.compositesworld.com/articles/composites-101-fibers-and-resins> , pristupljeno 04.02.2023.
- [12] Maric, G.: *Materijali II*, autorizirano predavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [13] Bongarde, U. S., Shinde, V. D.: *Review on natural fiber reinforcement polymer composite*, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2014.
- [14] Akil, H. M., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S., Ishak, Z. A. M., Abu Bakar, A.: *Kenaf fiber reinforced composites: A review*, *Materials & Design*, 32(8-9), 2011.
- [15] Fiore, V.: *Natural fibers and their composites*, *Polymers*, 12(10), 2020.
- [16] Čunko, R., Andrassy, M.: *Vlakna*, Zrinski d.d., Zagreb, Hrvatska, 2005.
- [17] Chand, N., Fahim, M.: *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites*, Second edition, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Sawston, 2021.
- [18] <https://www.revivo.si/platna---papierji--preje-in-folije/surova--nenapeta-platna/laneno-platno-305-cm--205-g/m2-----2m>, pristupljeno 07.02.2023.

- [19] Jones, D., Brischke, C.: *Performance of Bio-based Building Materials*, Elsevier Ltd., Amsterdam, 2017.
- [20] <https://www.easycomposites.co.uk/learning/flax-fibre-in-composites20>., pristupljeno 07.02.2023.
- [21] Khan, A.: *Hybrid Fiber Composites: Materials, Manufacturing, Process Engineering*, Wiley-VCH, 2020.
- [22] Reddy, J. N.: *Mechanics of laminated composite plates and shells, Theory and analysis*, second edition, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [23] <https://www.fibreglast.com/category/Vacuum-Infusion-Projects>, pristupljeno 13.02.2023.
- [24] Shah, V.: *Handbook of plastics testing and failure analysis*, Third edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [25] Mouritz, A. P., Gibson, A. G.: *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, Nizozemska, 2006.
- [26] Dundović, P.: *Rastezna svojstva polimernih kompozita ojačanih lanenim vlaknima* [Internet] 2022. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:958588>
- [27] Hrvatski registar brodova: *Rules for the classification of ships: Part 24 – non – metallic materials*, Split, 2009.