

# Gorenje i temperatura postojanosti oblika hibridnih kompozita

---

**Pintur, Karla**

**Master's thesis / Diplomski 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:235:313346>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Karla Pintur**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Karla Pintur

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Tatjani Haramini na pomoći, korisnim savjetima i prenesenim znanjima tijekom cijelog studiranja. Zahvaljujem se tehničkim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu koji su bili strpljivi i pomogli u izvođenju eksperimentalnog dijela ovog rada.

I na kraju, veliko hvala mami i tati koji su uvijek bili tu za mene i pružali mi neizmjernu podršku.

Karla Pintur



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karla Pintur**

JMBAG: 0035216353

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Gorenje i temperatura postojanosti oblika hibridnih kompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Burning and temperature of deflection under load of hybrid composites**

Opis zadatka:

Ojačavanje kompozita obnovljivim razgradivim vlaknima biljnog podrijetla, alternativa je nerazgradivim staklenim vlaknima. Budući da kompoziti s vlaknima biljnog podrijetla nemaju zadovoljavajuća svojstva za sve primjene, moguća je hibridizacija sa staklenim vlaknima.

U teorijskom dijelu rada potrebno je istražiti gorenje polimera i polimernih kompozita.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je izraditi kompozite s matricom od epoksidne smole ojačane lanenim (L) i staklenim (S) vlaknima s dva sloja staklenih i četiri sloja lanenih vlakana, s različitim rasporedom slojeva, slaganih simetrično, i to SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL. Ispitati gorivost ovih kompozita izlaganjem ruba kompozita plamenu, ispitati postojanost oblika pri povišenim temperaturama metodom Martens, i odrediti njihovu tvrdoću.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Tatjana Haramina

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivice Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Građa kompozita i svojstva.....	2
2.2. Osnovna podjela kompozita.....	4
2.2.1. Podjela prema vrsti matrice [1].....	4
2.2.2. Podjela prema vrsti ojačala [3], [4].....	5
2.3. Materijal matrice .....	6
2.3.1. Epoksidna smola .....	6
2.4. Materijal ojačala.....	8
2.4.1. Prirodna vlakna .....	8
2.4.1.1. Lanena vlakna .....	11
2.4.2. Sintetska vlakna .....	13
2.4.2.1. Staklena vlakna .....	13
2.4.3. Usporedba staklenih i lanenih vlakana [9].....	15
3. HIBRIDNI KOMPOZITI .....	16
3.1. Definicija i proces hibridizacije [14] .....	16
3.2. Vlaknima ojačani hibridni kompoziti .....	18
3.3. Svojstva hibridnih kompozita ojačanih kombinacijom prirodnih i sintetskih vlakana.....	21
3.4. Primjena hibridnih kompozita.....	22
4. GORENJE KOMPOZITNIH MATERIJALA.....	24
4.1. Mehanizmi toplinske razgradnje polimernih kompozitnih materijala .....	25
4.2. Toplinska razgradnja vlaknastih ojačanja .....	27
4.3. Svojstva kompozita u uvjetima gorenja .....	27
4.3.1. Vrijeme zapaljenja .....	27
4.3.2. Brzina oslobađanja topline.....	30
4.3.3. Gubitak mase .....	31
4.3.4. Dim .....	32
4.3.5. Toksičnost dima i opasnost izgaranja vlakana.....	32
4.4. Mehanička svojstva kompozita nakon gorenja .....	34
4.5. Ispitivanje gorivih svojstava kompozita .....	35
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	37
5.1. Materijali i izrada .....	37
5.2. Ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala .....	37

---

5.2.1. Provođenje eksperimenta .....	41
5.3. Mjerenje tvrdoće .....	43
5.4. Martens postupak ispitivanja .....	45
6. REZULTATI ISPITIVANJA .....	47
6.1. Rezultati ispitivanja gorivosti kompozitnih materijala .....	47
6.1.1. Analiza rezultata .....	52
6.2. Rezultati mjerenja tvrdoće .....	54
6.3. Rezultati Martens postupka ispitivanja .....	58
6.4. Pregled rezultata.....	59
7. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	63

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Svojstva polimernog kompozita ojačanog vlaknima [2].....	3
Slika 2.	Vrste kompozita: a) kompozit ojačan kratkima, nasumično raspoređenim vlaknima, b) kompoziti ojačan dugim, kontinuiranim vlaknima, c) kompozit ojačan česticama, d) kompozit ojačan česticama – ravne ljuskice [1] .....	5
Slika 3.	Sendvič kompozit [4] .....	6
Slika 4.	Prikaz epoksidne skupine [5] .....	6
Slika 5.	Različite vrste prirodnih vlakana [8] .....	10
Slika 6.	Građa lanenih vlakana [10] .....	11
Slika 7.	Vrste tkanja lana: a) obično tkanje, b) i c) dvije vrste keper veza, d) "dobby" tkanje [10].....	12
Slika 8.	Proizvodnja staklenih vlakana [10] .....	13
Slika 9.	Kemijski sastav uobičajenih staklenih vlakana [11] .....	14
Slika 10.	Doprinos zemalja u proizvodnji hibridnih kompozita [14] .....	17
Slika 11.	Tri različite vlaknasto-hibridne konfiguracije za jednosmjerne kompozite: a) tkanje unutar pređe, b) unutar slojno tkanje, c) međuslojno tkanje [15].....	18
Slika 12.	Rastezna čvrstoća vlaknasto-hibridnih kompozita: a) bilinearano pravilo mješavina, i primjeri dijagrama "naprezanje-deformacija" za: b) male volumne udjele vlaknastog kompozita niske istezljivosti, c) pri minimalnoj rasteznoj čvrstoći i d) za velike volumne udjele vlaknastog kompozita niske istezljivosti [15] .....	19
Slika 13.	Razlika između interlaminarne i translaminarne pukotine [15] .....	20
Slika 14.	Hibridni sustav vjetroturbina [16] .....	22
Slika 15.	Pješački most u Okinawi (Japan) napravljen od hibridnog kompozitnog materijala [16] .....	23
Slika 16.	Gorenje kompozitnog materijala [17] .....	24
Slika 17.	Shematski prikaz mehanizama uključenih u toplinsku razgradnju polimernih kompozita, prikazuju povratne veze koje uključuju toplinski tok [18].....	25
Slika 18.	Logaritamski dijagram vremena paljenja u odnosu na upadni toplinski tok za kompozite s različitim materijalom matrice [18] .....	28
Slika 19.	Učinak debljine na vrijeme paljenja fenolnog kompozita ojačanog staklenim vlaknima [18] .....	29
Slika 20.	Učinak povećanja sadržaja staklenih vlakana na brzinu oslobađanja topline kod poliesterskog kompozita pri toplinskom toku od 50 kW/h [18].....	30
Slika 21.	Prikaz gubitka mase za staklo/fenol i staklo/vinil ester kompozite [18].....	31
Slika 22.	Načini taloženja vlakana u plućnim dišnim putovima [19].....	33
Slika 23.	Shematski prikaz distribucije oštećenja nakon gorenja kod kompozita s duromernom matricom [18] .....	34
Slika 24.	Shematski prikaz izlaganja ruba plamenu [20] .....	35
Slika 25.	Izmjere ispitnog tijela .....	38
Slika 26.	Pripremljena ispitna tijela za ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala .....	38
Slika 27.	Plamenik i konstrukcija potrebni za ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala	41
Slika 28.	Prikaz hibridnog kompozita 1 (SLLLLS) tijekom gorenja i neposredno nakon gašenja .....	42
Slika 29.	Prikaz kompozita 4 (SSSSSS) tijekom gorenja i neposredno nakon gašenja .....	42
Slika 30.	Tvrdomjer Zwick 3106.....	43
Slika 31.	Uzorci pripremljeni za Martens postupak ispitivanja.....	45
Slika 32.	Uređaj za provedbu Martens ispitivanja.....	46
Slika 33.	Unutrašnjost Martens uređaja.....	46
Slika 34.	Ispitno tijelo 1 (hibridni kompozit 1) neposredno nakon gašenja .....	47



---

Slika 35.	Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (hibridni kompozit 2) nakon gorenja.....	48
Slika 36.	Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (hibridni kompozit 3) nakon gorenja.....	49
Slika 37.	Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (kompozit 4) nakon gorenja .....	50
Slika 38.	Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (kompozit 5) nakon gorenja .....	51
Slika 39.	Rezultati ispitivanja nakon mjerenja tvrdoće .....	54

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Svojstva biljnih vlakana [8].....	11
Tablica 2. Rastezna svojstva staklenih i lanenih vlakana [9].....	15
Tablica 3. Mehanička svojstva hibridnih kompozita ojačanih sintetsko-prirodnim vlaknima [14].....	21
Tablica 4. Klasifikacija materijala prilikom gorenja.....	36
Tablica 5. Debljine ispitnih tijela hibridnog kompozita 1 (SLLLLS) za izlaganje ruba plamenu.....	39
Tablica 6. Debljine ispitnih tijela hibridnog kompozita 2 (LLSSLL) za izlaganje ruba plamenu.....	39
Tablica 7. Debljine ispitnih tijela hibridnog kompozita 3 (LSLLSL) za izlaganje ruba plamenu.....	39
Tablica 8. Debljine ispitnih tijela kompozita 4 (SSSSSS) za izlaganje ruba plamenu.....	40
Tablica 9. Debljine ispitnih tijela kompozita 5 (LLLLLL) za izlaganje ruba plamenu.....	40
Tablica 10. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za hibridni kompozit 1 (SLLLLS).....	47
Tablica 11. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za hibridni kompozit 2 (LLSSLL).....	48
Tablica 12. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za hibridni kompozit 3 (LSLLSL).....	49
Tablica 13. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za kompozit 4 (SSSSSS).....	50
Tablica 14. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za kompozit 5 (LLLLLL).....	51
Tablica 15. Ukupno vrijeme $t$ , razvijanja plamena do oznake, izraženo u minutama te dodijeljena klasa. Tamnija oznaka klase označava veću otpornost gorenju. ....	52
Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće za hibridni kompozit 1 (SLLLLS).....	55
Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće za hibridni kompozit 2 (LLSSLL).....	55
Tablica 18. Rezultati mjerenja tvrdoće za hibridni kompozit 3 (LSLLSL).....	56
Tablica 19. Rezultati mjerenja tvrdoće za kompozit 4 (SSSSSS).....	56
Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdoće za kompozit 5 (LLLLLL).....	57
Tablica 21. Rezultati Martens postupka ispitivanja.....	58
Tablica 22. Pregled srednjih vrijednosti svih rezultata.....	59

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$d$	mm	debljina na zadanoj udaljenosti
$D$	mm	promjer kuglice
$E$	MPa	modul elastičnosti
$F$	N	sila opterećenja
$h_k$	mm	dubina prodiranja penetratora
$H$	MPa	tvrdoća
$H_{sr}$	MPa	srednja tvrdoća
$R_m$	MPa	rastezna čvrstoća
$P_H$	/	rezultirajuća svojstva dobivenog hibridnog kompozita
$P_{C1}$	/	svojstva ojačala
$P_{C2}$	/	svojstva matrice
$t$	min	vrijeme u kojem je plamen dosegno mjernu oznaku
$t_{sr}$	min	srednje vrijeme
$T$	° C	temperatura
$V_{C1}$	/	volumni udio komponente 1
$V_{C2}$	/	volumni udio komponente 2
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\sigma$	MPa	naprezanje
$\varepsilon$	mm/mm, %	istezanje

---

**SAŽETAK**

Hibridni kompoziti su materijali koji sadrže dvije ili više vrste vlakana kao ojačanje. Izrađeno je pet vrsta hibridnih kompozitnih materijala od epoksidne smole kao matrice te kombinacije tkanina od staklenih i od lanenih vlakana kao ojačanja, ukupno šest slojeva, od čega su dva staklena. Svaki kompozitni materijal ima različit način slaganja vlakana, odnosno negdje su staklena vlakna u vanjskim slojevima, dok su drugdje lanena. Kombinacija slaganja vlakana je sljedeća: SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL, SSSSSS, LLLLLL pri čemu S označava sloj staklenih vlakana, a L sloj lanenih vlakana. Ispitana su goriva svojstva kompozitnih materijala u ovisnosti o rasporedu slaganja vlakana. Izmjerena je i tvrdoća svakog pojedinog materijala te je proveden Martens postupak ispitivanja postojanosti oblika materijala pri povišenim temperaturama. Rezultati pokazuju kako svi ispitani materijali spadaju u klasu K2 otpornosti na gorenje. Također, kompozit izrađen od šest slojeva lanenih vlakana se pokazao najboljim pri ispitivanju otpornosti na gorenje, dok je kompozit ojačan staklom najbrže gorio. Od hibrida kompozit LSLLSL se najlošije ponaša pri gorenju, dok ima najvišu tvrdoću i temperaturu postojanosti oblika.

Ključne riječi: hibridni kompoziti, lanena vlakna, staklena vlakna, gorivost, postojanost oblika pri povišenim temperaturama, tvrdoća

---

**SUMMARY**

Hybrid composites are materials that contain two or more types of fibers as reinforcement. Five types of hybrid composite materials were made using epoxy resin as the matrix and a combination of glass and flax fibers as reinforcement, totaling six layers, two of which are glass. Each composite material has a different fiber arrangement, with glass fibers in the outer layers in some cases, while flax fibers are used elsewhere. The fiber stacking combinations are as follows: SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL, SSSSSS, LLLLLL, where S denotes a layer of glass fibers and L denotes a layer of flax fibers. The fuel properties of the composite materials were tested depending on the fiber stacking arrangement. The hardness of each individual material was measured, and the Martens procedure was used to test the shape stability of the materials at elevated temperatures. The results show that all tested materials fall into the K2 class of fire resistance. Additionally, the composite made of six layers of flax fibers performed the best in terms of fire resistance, while the glass-reinforced composite burned the fastest. Among the hybrids, the LSLLSL composite exhibited the poorest performance in terms of burning, but it had the highest hardness and shape stability temperature.

Keywords: hybrid composites, flax fibers, glass fibers, flammability, shape stability at elevated temperatures, hardness

## 1. UVOD

Razvoj i napredak tehnologije u svijetu potiče razvoj novih vrsta materijala. Jedna od njih su i kompozitni materijali koji omogućuju dizajniranje svojstava. Upravo to ih čini najboljim izborom u mnogim područjima i stoga zamjenjuju tradicionalne, već postojeće materijale. Neprestanim istraživanjem i razvojem ove skupine materijala došlo je do razvoja hibridnih kompozita.

Hibridni kompoziti su materijali koji sadrže dvije ili više vrsta vlakana kao ojačanje s ciljem da se prevladaju nedostaci jedne vrste vlakna dok se zadržavaju prednosti druge vrste vlakna. Imaju široku primjenu u inženjerstvu gdje je potrebno postići visoki omjer čvrstoće i mase, niske troškove, malu masu te jednostavnu izradu. Obično se koriste kada je potrebno postići kombinaciju svojstava različitih vrsta vlakana i kada su potrebne visoke mehaničke performanse u smjeru uzdužnih i poprečnih opterećenja. Našli su primjenu u različitim sektorima industrija poput zrakoplovne industrije, automobilske, primjene u elektronici, brodogradnji i mnoge druge. Neprestano se radi na njihovom razvitku i poboljšanju kako bi dali najbolju kombinaciju svojstava, a jedno od najvažnijih područja istraživanja je istraživanje gorivih svojstava kompozita. Važno je istražiti koliko je materijal siguran u slučaju nastanka požara, kojom brzinom se širi plamen, njegov utjecaj na okoliš, otpušta li toksične dimove koji mogu ugroziti zdravlje ljudi, ima li visoku stopu zapaljivosti i slično. Ovakva pitanja su iznimno bitna u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji gdje vrlo lako može doći do nesreća, a samim time i zapaljenja materijala.

U ovom radu izrađeno je pet vrsta hibridnih kompozitnih materijala građenih od šest slojeva vlakana (staklo i lan) kao ojačanje i epoksidne smole kao matrice. Vlakna su slagana na različite načine, tako da neki kompozitni materijali imaju lanena vlakna u vanjskim slojevima, a neki staklena. Cilj je ispitati goriva svojstva kompozitnih materijala i vidjeti kako raspored slaganja vlakana utječe na njih te postoji li razliku između gorenja prirodnih i umjetnih vlakana. Osim toga provedeno je ispitivanje stabilnosti oblika ovih materijala pri povišenim temperaturama prema Martens metodi, gdje se materijal savija i najveća naprezanja su u vanjskim slojevima. Budući da su svojstva gorenja i postojanosti oblika pri savijanju ovisna o strukturi i svojstvima u površinskim slojevima, ispitana je i tvrdoća materijala.

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

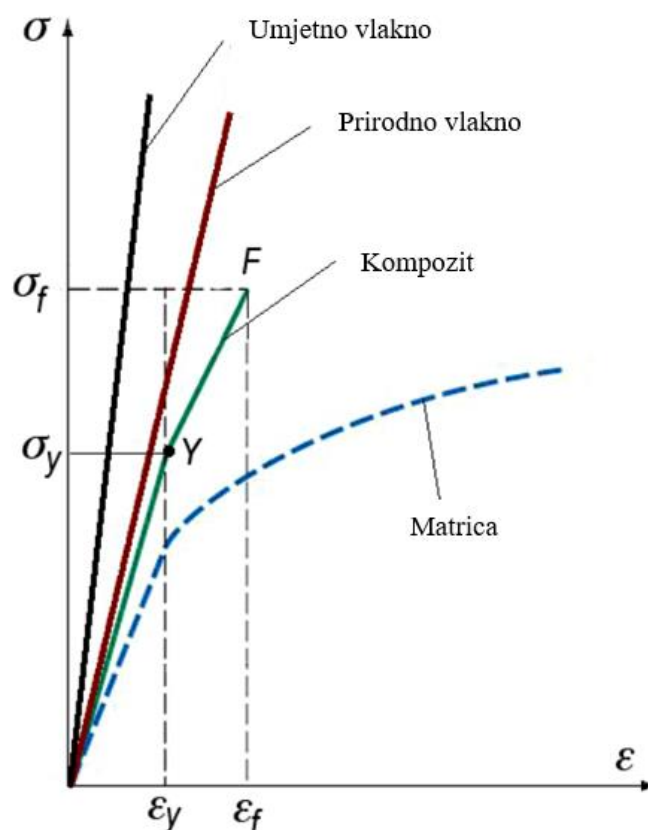
Kompozitni materijal (ili skraćeno kompozit) je materijal izrađen od dva ili više sastavnih materijala sa značajno različitim fizikalnim ili kemijskim svojstvima koja, kada se kombiniraju, daju materijal s karakteristikama kakve nema niti jedna komponenta sama za sebe. Pojedinačne komponente ostaju odvojene i različite unutar gotove strukture. Novi materijal može biti poželjan iz više razloga, neki od njih su da uključuje materijale koji su jači, lakši ili jeftiniji u usporedbi s tradicionalnim materijalima. Kako kompozitni materijali posjeduju odlična svojstva kojima mogu zamijeniti razne druge konvencionalne materijale njihovo istraživanje sve više napreduje i razvija se. [1]

### 2.1. Građa kompozita i svojstva

Tipični kompozitni materijal je sustav materijala dobiven miješanjem te vezanjem dva ili više materijala na makroskopskoj razini. Na primjer, beton se sastoji od cementa, pijeska, kamenja i vode. Ako se sastav javlja na mikroskopskoj razini, odnosno molekulskoj, novi materijal se tada naziva legura.

Općenito, kompozitni materijali sastoje se od ojačala (vlakna, čestice) ugrađenog u matricu (polimerna, metalna ili keramička). Matrica omogućuje postizanje željenog oblika i daje vanjsku formu kompozitu te ga štiti od utjecaja okoline, dok ojačalo poboljšava ukupna mehanička svojstva matrice te daje čvrstoću i krutost. Kada se pravilno dizajnira novostvoreni materijal pokazuje bolju čvrstoću nego svaki pojedinačni materijal. Također, kompozite karakterizira izvrsna otpornost na koroziju, fleksibilnost i prilagođavanje svojstava u procesu izrade, dulji vijek trajanja, otpornost na djelovanje okoliša, mala masa, niži troškovi proizvodnje u odnosu na ostale konvencionalne materijale i mnoge druge prednosti. [1]

Slika 1 prikazuje svojstva kompozita dobivenog spajanjem smole (matrica) i vlakana (ojačalo), kakva nema niti jedna komponenta zasebno.



Slika 1. Svojstva polimernog kompozita ojačanog vlaknima [2]

Općenito svojstva kompozita određena su:

- svojstvima vlakna
- svojstvima smole
- omjerom vlakana i smole u kompozitu (volumni udio vlakna)
- geometrijom i orijentacijom vlakana u kompozitu [1]

Omjer vlakana i smole proizlazi uglavnom iz procesa proizvodnje, međutim također je pod utjecajem odabira vrste smole koja se koristi i oblika u kojem su vlakna ugrađena. Budući da vlakna mnogo više utječu na mehanička svojstva od smole, što je veći udio vlakana biti će bolja mehanička svojstva kompozita. U praksi za to postoje ograničenja iz razloga što vlakna moraju biti potpuno okružena smolom kako bi bila učinkovita i kvalitetno impregnirana.



Geometrija vlakana u kompozitu također je važna budući da vlakna imaju najbolja mehanička svojstva po svojoj duljini, a ne širini. To dovodi do visoko anizotropnih svojstava kompozita gdje, za razliku od metala, mehanička svojstva mogu se bitno razlikovati kada se testiraju u različitim smjerovima. Taj čimbenik je bitno uzeti u obzir kada se razmatra veličina i smjer opterećenja na kompozit. Kada se razumije problematika anizotropnosti svojstava kompozita to može biti i vrlo povoljno svojstvo jer je potrebno materijal staviti samo tamo gdje će biti opterećenje, a time se izbjegava suvišan materijal što znači ujedno manja težina i niži troškovi.

Specifičnost kod kompozita je da kompozitni materijal nastaje u isto vrijeme kada i sama struktura, odnosno prilikom izrade proizvoda, stvara se konačna struktura kompozita, a time i njegova svojstva. To znači da proizvodni proces ima izuzetno veliku ulogu u stvaranju proizvoda. Isto tako bitan je i izbor smole, vlakana, udio vlakana, način slaganja, vrsta tkanja itd. Kod metalnih materijala je to puno jednostavnije, svojstva u velikoj mjeri određuje dobavljač materijala, dok prerađivač ima manji utjecaj na konačna svojstva. [1], [3]

## **2.2. Osnovna podjela kompozita**

### **2.2.1. Podjela prema vrsti matrice [1]**

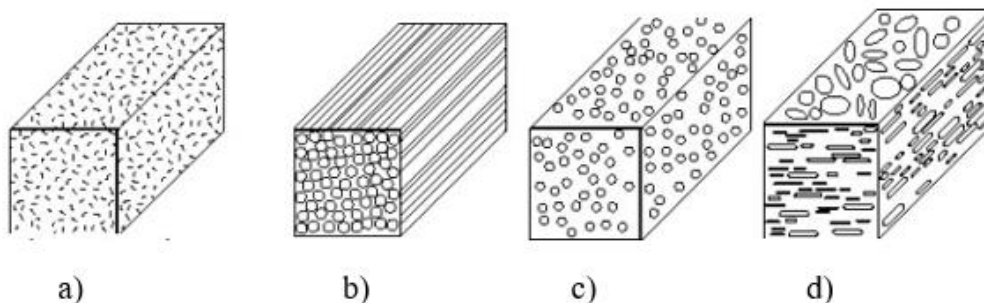
Prva podjela kompozita je prema vrsti materijala matrice i mogu se podijeliti u tri glavne skupine. Prva skupina su kompoziti s polimernom matricom (PMC), oni su najčešći te su poznati i kao vlaknima ojačani polimeri (e. Fibre Reinforced Polymers – FPR). Ovi materijali koriste smolu na bazi polimera kao matricu te razna vlakna kao što su staklo, karbon i aramid kao ojačanje. Ta vrsta kompozita je korištena i u ovom radu. Druga skupina su kompoziti s metalnom matricom (MMC) – građeni su od aluminijske matrice koja je ojačana vlaknima poput silicijevog karbida te se najčešće koriste u automobilske industriji. I posljednja skupina su kompoziti s keramičkom matricom (CMC) koji se koriste u okruženjima pri vrlo visokim temperaturama jer sadrže keramiku kao matricu te su najčešće ojačani vlaknima silicij karbida ili bor nitrida.

### 2.2.2. Podjela prema vrsti ojačala [3], [4]

Druga razina klasifikacije odnosi se na oblik ojačala – kompoziti ojačani vlaknima, laminarni kompoziti te kompoziti ojačani česticama.

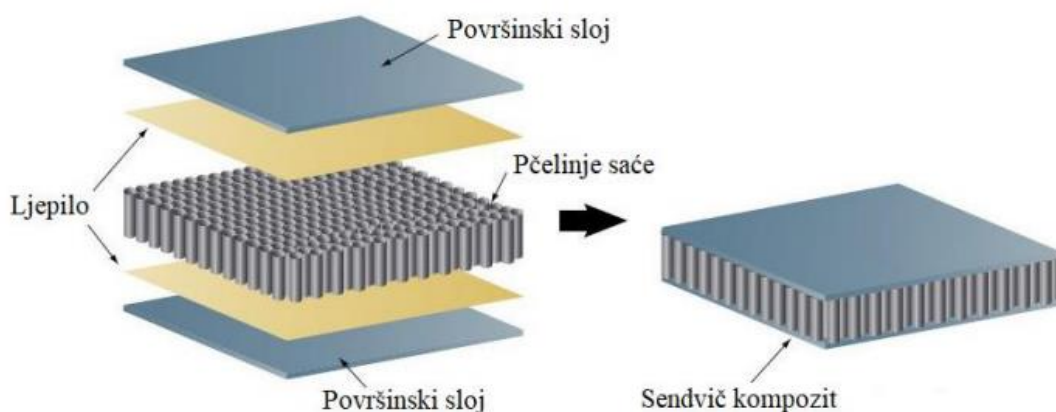
Vlaknima ojačani kompoziti (FRP) sastoje se od vlakana ugrađenih u materijal matrice i mogu se dalje podijeliti na one koji sadrže diskontinuirana ili kontinuirana vlakna. Kod kompozita s diskontinuiranim, kratkim, slučajno usmjerenim vlaknima svojstva su identična u svim smjerovima. S druge strane, kompoziti s dugim, kontinuiranim vlaknima pokazuju anizotropna mehanička svojstva (čvrstoća maksimalna u smjeru vlakana, a minimalna okomito na njih). Vlakna su malog promjera i kada su postavljena aksijalno lako se savijaju iako imaju jako dobra rastezna svojstva. Ova vlakna moraju biti poduprta kako bi se spriječilo savijanje i izvijanje svakog pojedinog vlakna.

Kompoziti ojačani česticama sastoje se od čestica ugrađenih u tijelo matrice (čestice u obliku pahuljica, ljuskica ili praha). Slika 2 prikazuje vrste kompozita s obzirom na oblik ojačala.



**Slika 2. Vrste kompozita: a) kompozit ojačan kratkima, nasumično raspoređenim vlaknima, b) kompozit ojačan dugim, kontinuiranim vlaknima, c) kompozit ojačan česticama, d) kompozit ojačan česticama – ravne ljuskice [1]**

Laminarni kompoziti sastoje se od slojeva materijala koje zajedno povezuje matrica. Tu spadaju i sendvič konstrukcije što je prikazani na slici 3. U ovom slučaju matricu čini pčelinje saće.



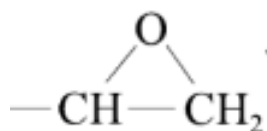
Slika 3. Sendvič kompozit [4]

### 2.3. Materijal matrice

Najčešće korišteni materijali matrice su polimeri. Polimeri su glavna komponenta većine kompozitnih materijala, a čine ih dvije glavne skupine – plastomerna smola i duromerna smola. Duromerna smola uključuje epoksidnu smolu, fenolnu, poliestersku te vinilestersku smolu, dok plastomerna smola uključuje poliamide, poliestere, polisulfone i slično.

#### 2.3.1. Epoksidna smola

Epoksidna smola je vrsta sintetičke smole koja se neprestano razvija i ima raznoliku primjenu. Može se koristiti kao ljepilo, premaz, matrica kompozita ojačanih vlaknima, a naširoko se koristi u mehaničkim, električnim, kemijskim, zrakoplovnim, automobilskim i mnogim drugim industrijskim sektorima. Epoksidna smola je vrsta organskog prepolimera čije molekule sadrže dvije ili više epoksidnih skupina što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Prikaz epoksidne skupine [5]

Epoksidne skupine mogu biti smještene na kraju, u sredini molekuskog lanca ili u prstenastoj strukturi. Zbog aktivnih epoksidnih skupina u molekuskaj strukturi, mogu se umrežiti i svojim povezivanjem stvoriti netopljivi polimer trodimenzionalne mrežaste strukture.

Karakterizira ih velik broj varijacija i raznolika primjena. Očvrsnuta epoksidna smola ima izvrsna mehanička svojstva te dobre električne performanse u širokom frekvencijskom i temperaturnom rasponu što je čini dobrim izolacijskim materijalom i otpornom na površinsko curenje. Ima odličnu kemijsku i dimenzijsku stabilnost, te je poprilično otporna na djelovanje bioloških organizama i može se koristiti u teškim tropskim uvjetima. Odabirom različitih umrežavala sustav epoksidnih smola može očvršćivati pri temperaturama u rasponu od 0 °C do 180 °C. Prednost je i što joj inherentna polaritetna hidroksilna i eterska veza omogućuju jaku adheziju s različitim tvarima. Također nisko skupljanje kod očvršćivanja epoksidne smole pomoći će u stvaranju čvrstog, prionjivog spoja s malim unutarnjim naprežanjem.

Epoksidna smola se razlikuje od drugih duromernih smola jer ne proizvodi nusprodukte u procesu očvršćivanja. Epoksid umrežava egzotermnom reakcijom, odnosno dok molekule reagiraju stvaraju toplinu. Za nemodificirani sustav, njegova stupanj skupljanja je manja od 2 % dok očvršćivanje fenolne smole ili poliesterske ima značajno veću kontrakciju. [5]

## 2.4. Materijal ojačala

Kompozitni materijali ojačani vlaknima dijele se na kompozite ojačane sintetskim vlaknima i kompozite ojačane prirodnim vlaknima. Zahtjevi zaštite okoliša i novi propisi o recikliranju kompozitnih materijala potaknuli su na to da se razviju novi materijali koji proizlaze iz obnovljivih izvora. Uvođenje prirodnih vlakana u polimerne matrice (biorazgradive ili ne) može donijeti velike prednosti u odnosu na vlakna koja se tradicionalno koriste u kompozitima (npr. staklena vlakna).

Sve češće se stavlja naglasak na njihovu kombinaciju. Kombiniranje vlakana omogućuje stvaranje kompozitnog materijala koji je lakši, a zadržava odlična mehanička svojstva i može se koristiti u zrakoplovnoj industriji što je jedna od glavnih prednosti danas. Mehanička svojstva prirodnih vlakna vrlo su slična onima sintetskih vlakna stoga daljnjim istraživanjem i razvojem imaju potencijala za njihovu zamjenu. Sintetska vlakna kao što su staklena, ugljična i aramidna koriste se u kombinaciji s prirodnim vlaknima za izradu hibridnih struktura s dobrim mehaničkim svojstvima. Takvi kompoziti nude visoku čvrstoću i krutost, otpornost na koroziju, otpornost na umor materijala, smanjenje iritacije kože i potencijalnih respiratornih problema uzrokovanih sintetskim vlaknima te mnoge druge prednosti koje će biti opisane u narednim poglavljima. Korozija, umor materijala, niska čvrstoća, uzrokovanje zdrastvenih problema i apsorpcija vode samo su neki od problema koje treba prevladati kako bi materijal bio pogodan za izradu kompozita. [6]

### 2.4.1. Prirodna vlakna

Kompoziti od prirodnih vlakana mogu se definirati kao kompoziti u kojima je faza ojačanja sastavljena od prirodnih vlakana, dok je matrična faza ili bio-bazirani ili sintetski polimer. Ova vrsta kompozita sada privlači sve više pozornosti jer su lagani, ekološki prihvatljivi i dostupni. Također, prirodna vlakna poput lana, konoplje, jute i bambusa karakterizira niska gustoća, dobra specifična čvrstoća, umjereni troškovi te smanjenje iritacije dišnog sustava i respiratornih problema što doprinosi brizi o zdravlju. Mogu se svrstati u dvije osnovne skupine – biljna i životinjska vlakna. Biljna vlakna su ona koja se dobivaju iz biljnih izvora, a životinjska vlakna od životinjskih, npr. vuna i svila. Vuna se dobiva od ovaca, koza i deva te se njihovo runo prerađuje u vunu.

Glavne prednosti prirodnih vlakana su održivost, visoka učinkovitost te lakoća i sigurnost. Održivost se odnosi na to da su prirodna vlakna dobivena iz obnovljivih izvora i mogu smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> kompozitnih dijelova za 60 – 80% u usporedbi s dijelovima od staklenih vlakana. Osim što su biorazgradiva, mogu se reciklirati na kraju životnog vijeka. Visoka učinkovitost – prirodna vlakna imaju specifična rastezna svojstva jednaka staklenim vlaknima i imaju veću toplinsku i zvučnu izolaciju od staklenih i ugljičnih vlakana. I posljednje, prirodna vlakna imaju gotovo upola manju gustoću od staklenih vlakana, sigurna su u rukovanju (ne zahtijevaju nikakvu dodatnu zaštitnu opremu) i neabrazivna su za dijelove stroja tijekom obrade.

Međutim, ovi materijali imaju i neke nedostatke. Nedostatak je varijabilna kvaliteta prirodnih vlakana ovisno o podrijetlu, loše prijanjanje između vlakana i matrice što zahtijeva korištenje odgovarajućih fizikalnih i kemijskih tretmana, slaba disperzija vlakana te osjetljivost na upijanje vlage. Zbog svog hidrofilnog karaktera, prirodna vlakna igraju važnu ulogu u starenju biokompozita u vlažnoj atmosferi ili prilikom uranjanja u vodu. Apsorpcija vode je kočnica u razvoju upotrebe prirodnih vlakana u kompozitima jer se mehanička svojstva kompozita smanjuju pri vlažnim uvjetima. Mogućnost upotrebe ovih novih materijala na otvorenom zahtijeva proučavanje i analizu njihovog mehaničkog ponašanja u agresivnom okruženju, osobito vlažnom, tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Nekoliko studija pokazuje kako biokompozit postepeno gubi rasteznu čvrstoću kako voda prodire u materijal i gubitak je izravno povezan s apsorpcijom vode. Prijenos vode može biti olakšan i difuzijom unutar matrice i/ili nesavršenostima u matrici koje su nastale tijekom obrade (mikropukotine, pore, pukotine). Nedostatak je i njihova zapaljivost. Dodaju se različiti usporedivi gorenja i/ili se koriste za tretiranje prirodnih vlakana kako bi se poboljšala njihova otpornost na plamen. [6], [7], [8]

Slika 5 prikazuje različite vrste prirodnih vlakana.



**Slika 5. Različite vrste prirodnih vlakana [8]**

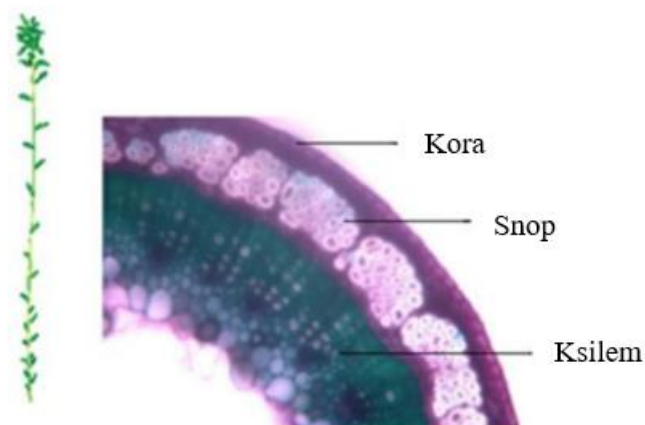
Vlakna od korijena su po prirodi namijenjena kao ojačanje za stabljiku biljke, pa su obično tanja, tvrđa i čvršća. Tu spada lan, kenaf, juta i konoplja. Dok su vlakna lista po prirodi namijenjena da budu cjevovod unutar listova biljke i služe za prijenos vlage i hranjivih tvari, tako da ta vlakna imaju tendenciju da budu grublja i šuplja s većom deformacijom i većom žilavošću, kao što je prikazano u tablici 1. [8]

Tablica 1. Svojstva biljnih vlakana [8]

Vlakno	Gustoća, gm/cm <sup>3</sup>	Promjer, μm	Duljina, mm	Celuloza, wt. %	Lignin, wt. %	Rastezna čvrstoća, MPa	Modul elastičnosti, GPa	Istezanje, %
Lan	1,4 – 1,5	40 – 600	5 – 900	70 – 75,2	2,2 – 5	345 – 900	27 – 80	1,2 – 1,6
Kenaf	1,2 – 1,45	12 – 37	4 – 110	45 – 57	8 – 13	295 – 930	53	1,6 – 6,9
Konoplja	1,4 – 1,48	10 – 500	5 – 55	70 – 75,1	3,5 – 8	300 – 800	30 – 70	1,6
Juta	1,3 – 1,5	25 – 200	1,5 – 120	61 – 75,5	5 – 13	200 – 900	10 – 55	1,8
Sisal	1,2 – 1,5	8 – 200	900	47,6 – 78	8 – 14	100 – 800	9,4 – 28	2 – 3
Abaka	1,1 – 1,5	132 – 266	900	56 – 63,7	15,1	705 – 1041	9,8 – 14,8	3 – 12
Kokos	1,1 – 1,46	10 – 460	20 – 150	32 – 43	40 – 45	13 – 220	4 – 6	15 – 40

#### 2.4.1.1. Lanena vlakna

Lanena vlakna potječu od biljke lana koja je široko rasprostranjena u Zapadnoj Europi. Promjer stabljike lana je u rasponu od 1 do 2 mm, a visina oko 80 cm. Slika 6 prikazuje da postoje tri sloja u stabljici lana – kora, snop i ksilem. Vanjski sloj kore djeluje kao zaštitni omotač i štiti od utjecaja okoliša.



Slika 6. Građa lanenih vlakana [10]

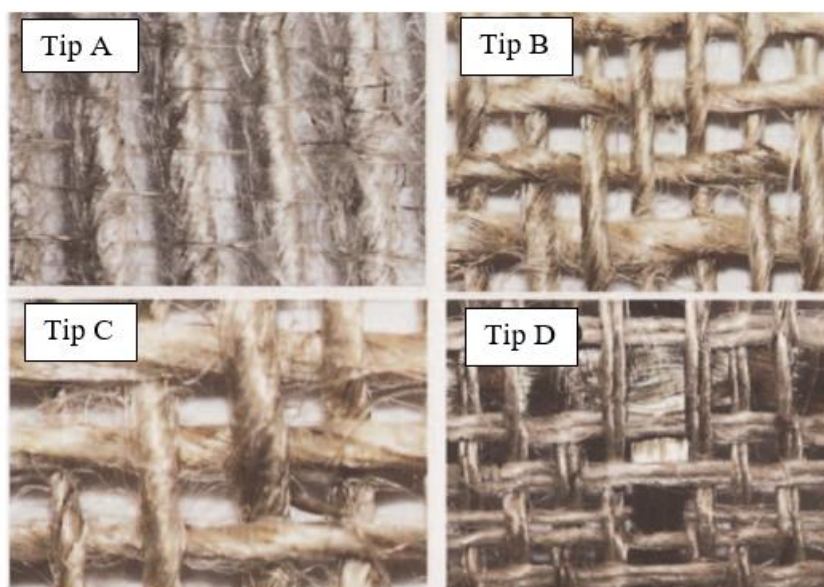


Razgradnja lanenih vlakana ključni je aspekt u razvoju kompozita od prirodnih vlakana i stoga ima utjecaja na temperaturu očvršćivanja. Celuloza je glavna komponenta prirodnih vlakana i na taj način kontrolira glavno degradacijsko ponašanje lanenih vlakana. Glikolizne jedinice se razgrađuju na niskoj temperaturi nakon čega slijedi njihova depolimerizacija na visokim temperaturama.

Poput uobičajenih polimernih kompozita, plastomeri ili duromeri mogu se kombinirati s lanenim vlaknima i nude različita mehanička svojstva. Provedena su istraživanja ponašanja kompozita lan/epoksid u pogledu rastezne deformacije. Zaključci pokazuju nelinearan odnos "naprezanje – deformacija" pod rasteznim opterećenjem s obzirom na adheziju lana i matrice. S druge strane, istraživanja gdje se proučavao hibridni epoksidni kompozit ojačan lanom (platno ravnog tkanja i rebrasta pletena struktura) pokazuju kako tlačnim svojstvima uglavnom pridonosi matrica, dok su rastezna svojstva pod velikim utjecajem volumnog udjela lana. [10]

Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima (npr. konoplja, lan, juta i sisal) koji zamjenjuju kompozite ojačane staklom su već nekoliko godina dobro rasprostranjeni zbog sve većeg utjecaja na svijest o brizi za okoliš. Ipak, zbog polimernih matrica na bazi nafte (npr. PP), kompoziti nisu u potpunosti razgradivi, što dovodi do poteškoća u procesu recikliranja. Dakle, potrebno je nastaviti razvijati i istraživati potpuno biorazgradive materijale. [10]

Slika 7 prikazuje moguće načine tkanja lanenih vlakana.

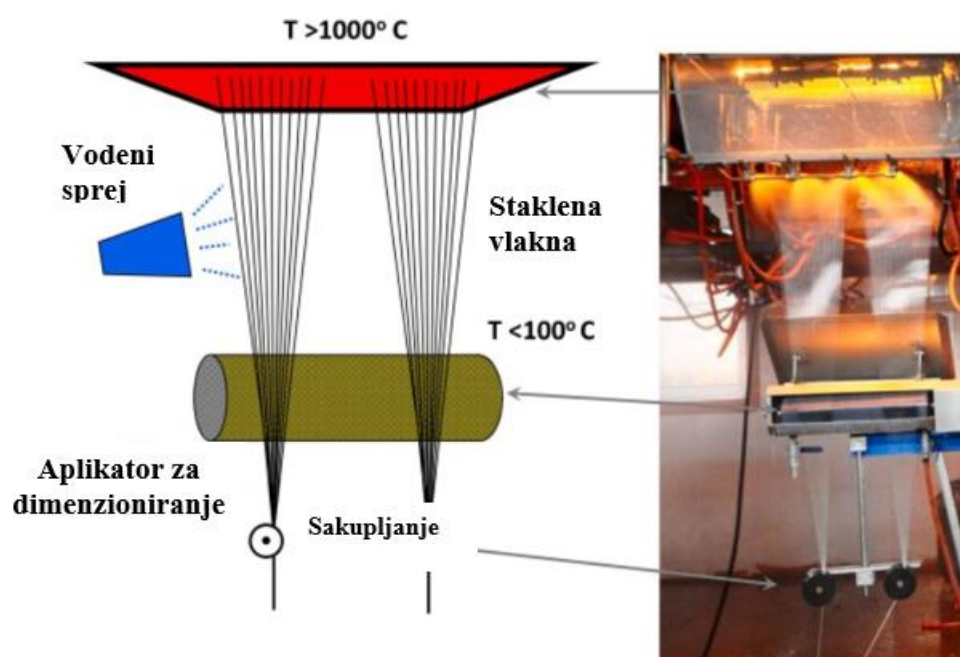


**Slika 7. Vrste tkanja lana: a) obično tkanje, b) i c) dvije vrste keper veza, d) "dobby" tkanje [10]**

## 2.4.2. Sintetska vlakna

### 2.4.2.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna su najčešće korištena sintetska vlakna i čine više od 95 % vlakana za ojačanje koja se koriste u industriji kompozita. Jedan od glavnih razloga je visok omjer učinka i cijene, no nedostatak se krije u njihovoj kompleksnoj proizvodnji. Formiranje staklenih vlakana uključuje kombinaciju ekstruzije i izvlačenja niti iz rastaljenog stakla te namatanja na brzorotirajući valjak što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Proizvodnja staklenih vlakana [10]

Uobičajena staklena vlakna su komercijalno dostupna u nizu različitih kemijskih sastava. Većina staklenih vlakana je na bazi silicijevog dioksida (50 – 60 %  $\text{SiO}_2$ ) i sadrži niz drugih oksida kalcija, bora, natrija, aluminijska, željeza, itd. Slika 9 prikazuje sastave nekih najčešće korištenih staklenih vlakana u kompozitima. Vrijednosti su izražene u postocima. [11]

Spoj	E-staklo	C-staklo	S-staklo
SiO <sub>2</sub>	55.2	65.0	65.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.0	4.0	25.0
CaO	18.7	14.0	
MgO	4.6	3.0	10.0
Na <sub>2</sub> O	0.3	8.5	0.3
K <sub>2</sub> O	0.2		
Li <sub>2</sub> O	7.3	5.0	

**Slika 9. Kemijski sastav uobičajenih staklenih vlakana [11]**

Oznaka E označava električno jer je E-staklo dobar električni izolator te ima dobru čvrstoću, C označava koroziju jer C-staklo ima najbolju otpornost na kemijsku koroziju, S označava visok sadržaj silicija i S-staklo može izdržati više temperature od ostalih. Većina proizvedenih kontinuiranih staklenih vlakana je tipa E-stakla zbog niske cijene i ranog razvoja u usporedbi s drugim vlaknima. E-staklena vlakna imaju relativno niske module elastičnosti u usporedbi s drugim ojačanjima. Osim toga, E-staklena vlakna su osjetljiva na puzanje i pucanje. Toplinska i električna vodljivost staklenih vlakana je niska, a polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima često se koriste kao toplinski i električni izolatori. [11], [12]

Staklena vlakna se koriste bez matrice kao filteri i vlaknasti pokrivači za toplinsku i zvučnu izolaciju. Koriste se i kao ojačanje polimera u raznim područjima kao što su zrakoplovstvo, automobilska industrija, brodogradnja, oprema za sport i slobodno vrijeme te građevinska industrija i niskogradnja. [13]

### 2.4.3. Usporedba staklenih i lanenih vlakana [9]

U nekim područjima lanena vlakna su konkurentna staklenim vlaknima i stoga su prihvatljiva kao zamjena. Osim specifičnih svojstava lanenih vlakana koja su prikazana u tablici 2 postoje još tri glavna razloga koja upotrebu lanenih vlakana čine sve privlačnijom. Prvi razlog je da su jeftinija od staklenih vlakana, drugo manje su toksična te nisu štetna za zdravlje i treće, pružaju visok omjer čvrstoće i težine. Osim što imaju relativno nisku cijenu u usporedbi sa staklenim vlaknima, sumnja se da staklena vlakna uzrokuju rak pluća i mogu izazivati dišne probleme. Prednost je i toplinsko recikliranje lanenih vlakana – spaljivanje uz vrlo malo zaostale troske.

**Tablica 2. Rastezna svojstva staklenih i lanenih vlakana [9]**

Svojstvo	E – staklo	Lanena vlakna
Promjer, $\mu\text{m}$	8 – 14	10 – 80
Gustoća, $\text{g/cm}^3$	2,56	1,4
E-modul, GPa	76	50 – 70
Rastezna čvrstoća, GPa	1,4 – 2,5	0,5 – 1,5
Specifični E-modul, $\text{GPa/g cm}^{-3}$	30	36 – 50
Specifična rastezna čvrstoća, $\text{GPa/g cm}^{-3}$	0,5 – 1	0,4 – 1,1

### 3. HIBRIDNI KOMPOZITI

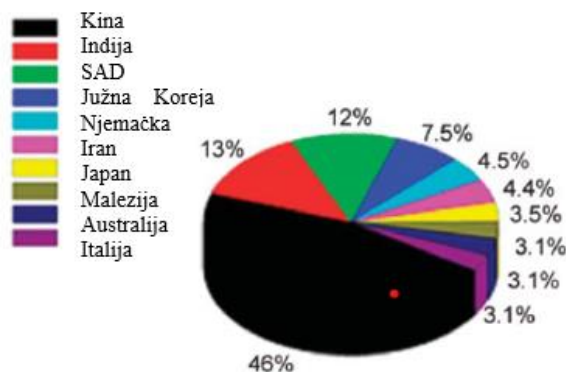
Kombinacija sintetskih i prirodnih vlakana zaslužuje posebnu pozornost zbog svojih superiornih svojstava u odnosu na prirodna ili sintetska vlakna zasebno. Razni aspekti, poput uvjeta rasta, staništa i zrelosti, utječu na svojstva prirodnih vlakana. Ograničenja sintetskih vlakana uključuju njihovo nakupljanje u okolišu i odlagalištima, visoke troškove i proizvodnju iz ograničenih resursa tj. fosilnih goriva, čime se oslobađaju razni plinovi (npr. CO<sub>2</sub>, metan) koji doprinose zagađenju okoliša. Zato njihova kombinacija omogućuje međusobno nadopunjavanje i poboljšanje svojstava kompozita te čine novu grupu kompozitnih materijala pod nazivom hibridni kompoziti.

#### 3.1. Definicija i proces hibridizacije [14]

Proteklih godina javlja se sve veći interes kombinirati dva ili više ojačala u zajedničku matricu. Razlog je poboljšanje svojstva dobivenog kompozitnog materijala kako bi se postigla željena svojstva i bolji učinak u odnosu na klasične kompozite. Glavni cilj je prevladati ograničenja matrice ojačane jednom vrstom ojačala na način da se dodaju dodatna ojačala koja imaju slična ili čak bolja svojstva u odnosu na početno vlakno.

Ovaj novi koncept naziva se hibridizacija i podrazumijeva ugradnju dva ili više ojačala u zajedničku matricu kako bi se prevladali nedostaci drugog ojačala. Ovaj koncept se također odnosi na miješanje dva ili više polimera ojačanih jednom ili više vrsta ojačala te ponovnim dodavanjem istog tog ojačala, ali u dvije ili više veličina i dimenzija, naziva se autohibridizacija. Proces hibridizacije se koristi u mnogim područjima kao što su mehanika, kemija, fizika, elektrokemija, znanost o polimerima, metalurgija te metalurško inženjerstvo.

Slika 10 prikazuje prvih deset zemalja koje prednjače u proizvodnji i razvoju hibridnih kompozita. Podaci su od 7. srpnja 2018. godine te se vidi kako je Kina najaktivnija, a slijede je Indija i SAD.



**Slika 10. Doprinos zemalja u proizvodnji hibridnih kompozita [14]**

Hibridni kompozit općenito se definira kao kombinacija dva ili više ojačala ugrađenih u zajedničku matricu. Matrica može biti polimerna, metalna ili keramička. U slučaju polimernih materijala, definicija hibrida može se dalje proširiti na mješavinu od dva ili više polimera ojačanih s jednim ili više ojačala. U slučaju iste vrste ojačala koje su različitih veličina/dimenzija koristi se naziv auto-hibrid.

Hibridizacija nudi mogućnost proširenja primjene kompozitnih materijala. Tri su glavna parametra koja imaju značajan učinak na svojstva dobivenog hibridnog kompozita. Prvi su korišteni materijali (matrica i ojačalo) koji prvenstveno ovise o primjeni određenog kompozita. Npr. istraživanja pokazuju kako juta/staklo hibrid pokazuje veću izdržljivost pod tlačnim opterećenjem u odnosu na bambus/staklo hibrid, dok je suprotno kada se radi o rasteznom opterećenju. Svaka primjena zahtijeva određena svojstva kako bi se postigao željeni cilj. Drugi faktor uključuje način pripreme i treći, najvažniji, uključuje interakciju između matrice i ojačala. Tu spada obrada i tretiranje vlakana i/ili uporaba sredstva za spajanje, posebno za prirodna vlakna, kako bi se poboljšala međupovršinska adhezija između komponenti što će rezultirati poboljšanjem ukupnih svojstva hibridnog kompozita. Željena svojstva se mogu predvidjeti korištenjem pravila jednadžbe miješanja smjese (2.1) uz pretpostavku da nema kemijske/fizikalne interakcije između ojačala:

$$P_H = P_{C1}V_{C1} + P_{C2}V_{C2} \quad (2.1)$$

gdje su:

$P_H$  – rezultirajuća svojstva dobivenog hibridnog kompozita

$P_{C1}$  – svojstva ojačala

$P_{C2}$  – svojstva matrice

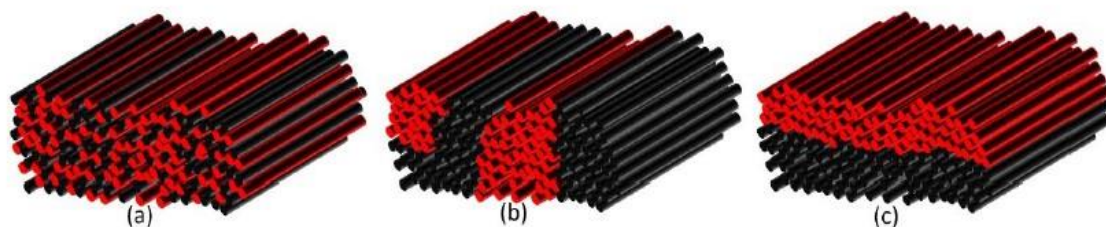
$V_{C1}, V_{C2}$  – volumni udjeli pojedinih komponenti, što prikazuje sljedeća jednačba:

$$V_{C1} + V_{C2} = 1 \quad (2.2)$$

### 3.2. Vlanknima ojačani hibridni kompoziti

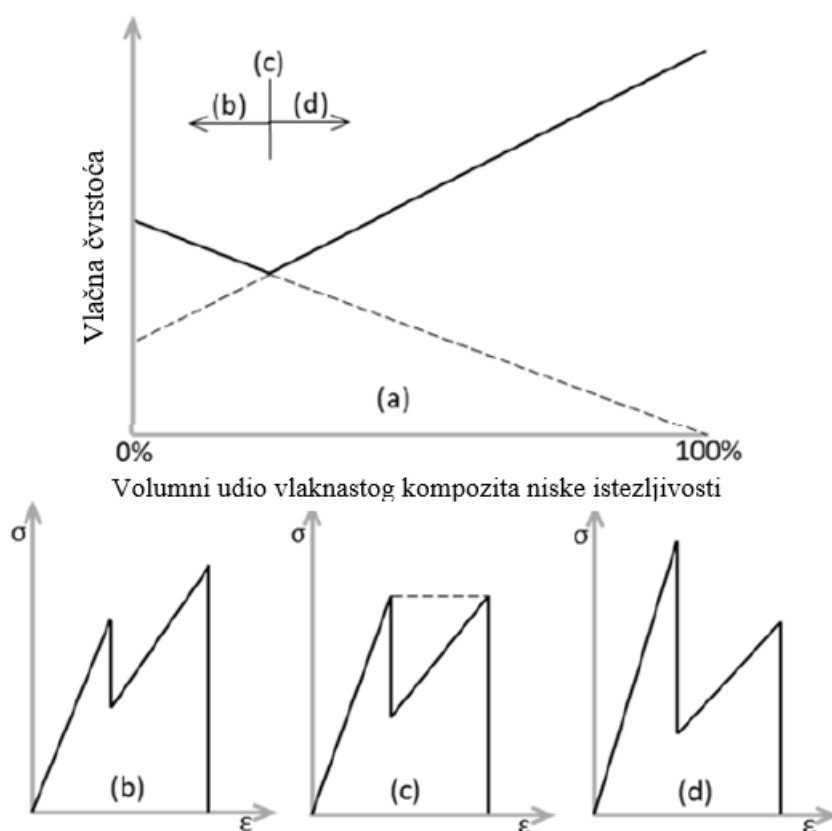
S obzirom na to da je sloboda dizajna ključna prednost kompozita u odnosu na druge skupine materijala, inženjeri i znanstvenici neprestano nastoje proširiti mogućnosti područja dizajna. Logičan korak koji je slijedio je korištenje dvije vrste vlakana umjesto jedne, što je rezultiralo hibridnim kompozitom ojačanim vlaknima. Često se koristi i naziv "vlaknasti hibridi".

Vlanknasti hibridi mogu se konstruirati u različite konfiguracije što je prikazano na slici 11. Slika 11 ilustrira tri opcije: tkanje unutar pređe (interpređa), unutar-slojno tkanje i međuslojno tkanje. Ova jednostavna ilustracija prikazuje primjere samo za jednosmjerno vlaknaste hibride, no oni također mogu biti i višesmjerni. Primjer je tkanina tkana s pređom od ugljičnih i staklenih vlakana položenih u različitim smjerovima. Također, ove vlakno – hibridne konfiguracije se mogu kombinirati zajedno. [15]



**Slika 11. Tri različite vlaknasto-hibridne konfiguracije za jednosmjerne kompozite: a) tkanje unutar pređe, b) unutar-slojno tkanje, c) međuslojno tkanje [15]**

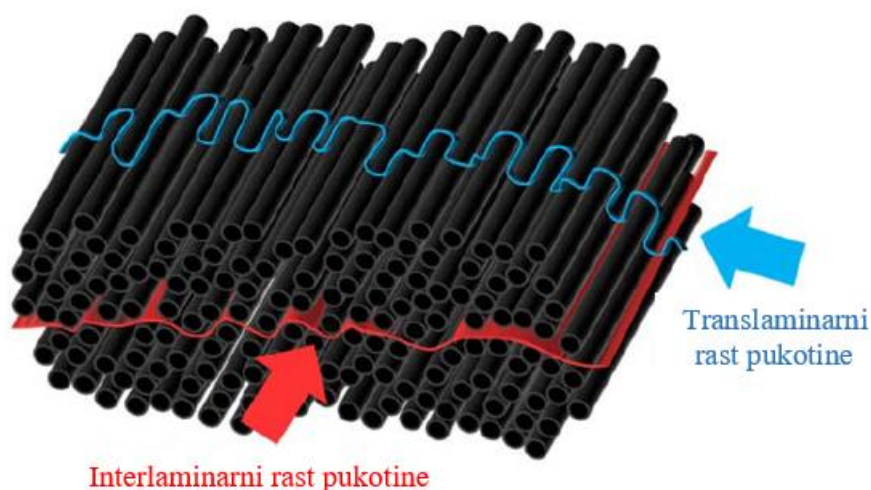
Kada se dva vlakna kombiniraju, mehanička svojstva vlaknasto – hibridnog kompozita često završavaju između svojstava sastavnih kompozita. Općenito se očekuje da krajnja rastezna čvrstoća vlaknasto – hibridnih kompozita slijedi bilinearno pravilo smjesa što je shematski prikazano na slici 12. Prema ovom pravilu, predviđena svojstva hibridnog kompozita dobivaju se linearnom interpolacijom svojstava sastavnih kompozita.



**Slika 12. Rastezna čvrstoća vlaknasto-hibridnih kompozita: a) bilinearno pravilo mješavina, i primjeri dijagrama "naprezanje-deformacija" za: b) male volumne udjele vlaknastog kompozita niske istezljivosti, c) pri minimalnoj rasteznoj čvrstoći i d) za velike volumne udjele vlaknastog kompozita niske istezljivosti [15]**



Važno je i razumijeti razliku između interlaminarne (međuslojne) i translaminarne lomne žilavosti što je ilustrirano na slici 13. Interlaminarna lomna žilavost je otpornost kompozita na širenje pukotine između slojeva. Delaminacija se odvija između dva sloja iste vrste vlakana. Za tkanja unutar pređe i unutar-slojna tkanja mogu se koristiti iste metode ispitivanja, no kod unutar-slojnih vlaknasto – hibridnih kompozita treba pažljivo razmotriti asimetriju. Translaminarna lomna žilavost je otpornost na širenje pukotine kroz sam sloj materijala, paralelno s vlaknima/slojevima. Za razliku od interlaminarne lomne žilavosti, ovaj način loma zahtijeva lomljenje vlakana/slojeva te je glavna razlika u smjeru lomljenja. U kompozitima ojačana lomljivim vlaknima, ova žilavost ima dva glavna energetska doprinosa: energija odvajanja vlakna/matrice i energija izvlačenja. [15]



Slika 13. Razlika između interlaminarne i translaminarne pukotine [15]

### 3.3. Svojstva hibridnih kompozita ojačanih kombinacijom prirodnih i sintetskih vlakana

Hibridni polimerni kompoziti ojačani kombinacijom sintetskih i prirodnih vlakana koriste se za poboljšanje performansi dobivenog materijala. Cilj je smanjiti apsorpciju vlage, uravnotežiti troškove vlakana, smanjiti negativan utjecaj na okoliš i ugljični otisak. Kao što je već spomenuto, prirodna vlakna su hidrofilne prirode i bubre u kontaktu s vodom/vlagom što rezultira nezadovoljavajućim svojstvima. Koriste se razne metode modifikacije površine kako bi se riješio ovaj problem, no većina tih metoda uključuje korištenje jakih kemikalija koje nisu ekološki sigurne. Hibridizacija je zamjena za kemijsko tretiranje vlakana. Ova metoda kombinira prirodna i sintetska vlakna te pruža istovremeno smanjenje upijanja vode i poboljšava svojstva kompozitnog materijala.

Postoje mnoge kombinacije vlakna, ovisno o tome kakva svojstva se žele postići. Istraživanja pokazuju kako npr. ubacivanje staklenih vlakana u poliesterski kompozit ojačan jutenim vlaknima poboljšava rastezna i savojna svojstva dobivenog hibrida. Također, dodatak staklenih vlakana smanjuje apsorpciju vode. Ubacivanje ugljičnih vlakana čini materijal znatno jačim i čvršćim. [14]

Tablica 3 u nastavku pokazuje neke od kombinacija sintetsko – prirodnih vlakana koje se koriste pri izradi hibridnih kompozita i njihove prednosti.

**Tablica 3. Mehanička svojstva hibridnih kompozita ojačanih sintetsko-prirodnim vlaknima [14]**

Kombinacija vlakana	Svojstva	Prednosti
<b>Staklo – juta</b>	- bolja mehanička svojstva u usporedbi s nehibridnim jutenim kompozitom - smanjenje degradacije jutenih vlakana	- usklađivanje performansi i troškova - smanjenje upijanja vlage - poboljšana mehanička svojstva
<b>Ugljik – lan</b>	- bolja mehanička svojstva u usporedbi s nehibridnim lanenim kompozitom	- poboljšana mehanička svojstva
<b>Ugljik – juta</b>	- bolja mehanička svojstva u usporedbi s nehibridnim jutenim kompozitom	- poboljšana mehanička svojstva - hibrid može u potpunosti zamijeniti nehibridni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima

### 3.4. Primjena hibridnih kompozita

Primjena u komercijalnim zrakoplovima najvažnija je upotreba hibridnih kompozita. Kod konstruiranja zrakoplova, za razliku od ostalih vozila, veći naglasak treba staviti na sigurnost i težinu. Osim mehaničkih svojstava, bitno je i svojstvo zapaljivosti. Koristi se kombinacija usporivača gorenja i vlakana kako bi se proizveo hibridni kompozit s visokom otpornošću na zapaljivost. Ojačani kompoziti često se koriste u stropnim pločama, unutarnjim zidnim pločama, pregradama, strukturama kuhinje te pretincima za odlaganje stvari. Vlaknasti epoksidni kompoziti koriste se u motorima zrakoplova za poboljšanje performansi. Vrata pilotske kabine zrakoplova također se proizvode od hibridnih smolastih kompozita i oni se koriste i u drugim transportnim sredstvima. Bor-grafitni hibridni materijali primjenjuju se u borbenim zrakoplovima. Noviji materijali koji se sve više upotrebljavaju su naravno ugljična vlakna u svojim različitim oblicima te u manjoj mjeri aramidna. Ove materijale karakterizira visoka specifična čvrstoća i još važnije visoka specifična krutost. Koriste se i kod proizvodnje automobila jer omogućuju značajnu uštedu goriva i smanjenje zagađenja okoliša. [16]

Hibridni kompoziti (posebice kombinacija vlakana ugljik – staklo) sve se više koriste za izradu vjetroturbina, odnosno lopatica prikazanih na slici 14. Primjena hibridnih kompozita ojačanih vlaknima u ovom području omogućuje značajno smanjenje troškova kod proizvodnje lopatica bez značajnog gubitka fizikalno – mehaničkih svojstva materijala.



Slika 14. Hibridni sustav vjetroturbina [16]

Sljedeća značajna kategorija je primjena u brodogradnji. Brodovi su konstantno izloženi uvjetima okoliša i velika većina trupova broda je izrađena od uobičajenih ugljičnih čelika koji su osjetljivi na koroziju. Osim toga, moraju se zavarivati, a zavarivanje stvara brojne zone utjecaja topline što rezultira područjima s izrazitom koncentracijom naprezanja. Potrebni su i skupi zaštitni premazi. Sve to rezultira velikim troškovima izgradnje i održavanja brodova pa se sve više okreće prema izgradnji trupova broda od hibridnih kompozitnih materijala. U odnosu na ugljični čelik oni osiguravaju puno veći omjer snage i težine, sposobnost oblikovanja u složene oblike, otpornost na umor materijala, visoku izdržljivost, niže zahtjeve za održavanjem i u konačnici niže troškove.

Značajno je napredovao i razvoj hibridnih kompozita u niskogradnji. Prvi potpuno hibridni most izgrađen je u Okinawi (Japan) 2001. godine, prikazano na slici 15. Izgrađen je od hibridnog kompozita upravo iz razloga što je okružen oceanom i nalazi se u vrlo korozivnom okruženju. [14], [16]



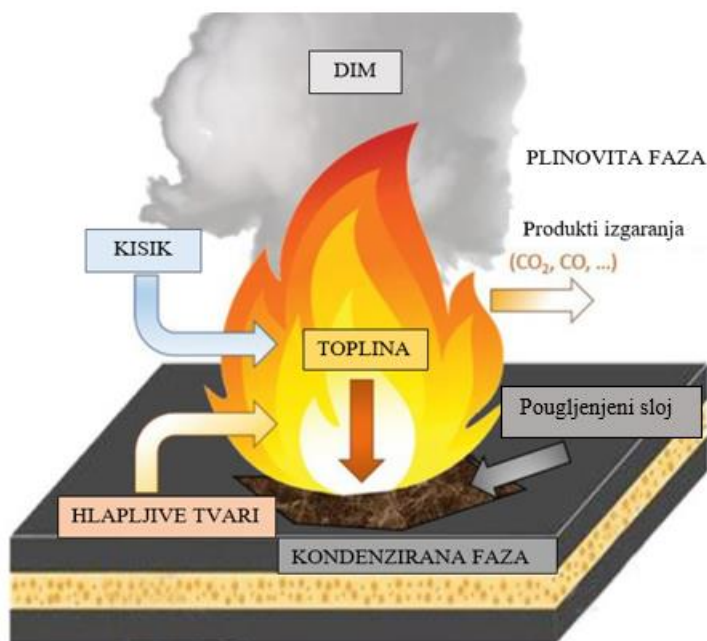
**Slika 15. Pješački most u Okinawi (Japan) napravljen od hibridnog kompozitnog materijala [16]**

## 4. GORENJE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Uz sve, već nabrojane, prednosti kompozitnih materijala, postoji jedan nedostatak – slaba učinkovitost u požaru. Kada su kompoziti izloženi visokim temperaturama (obično iznad 300 – 400 °C) matrica se razgrađuje uz oslobađanje topline, dima, čađe i otrovnih hlapljivih tvari. Vlakna, kao što su aramid i polietilen, također se razgrađuju i doprinose stvaranju topline, dima i pare. Kompoziti također omekšavaju i deformiraju se pri zagrijavanju već pri umjerenim temperaturama (> 100 – 200 °C) što može rezultirati izvijanjem i lomom nosivih konstrukcija. Toplina, dim i plinovi koji se oslobađaju prilikom gorenja kompozita uzrokuju da gašenje požara nije nimalo jednostavno, povećava se vjerojatnost ozbiljnih ozljeda pa čak i smrti.

S druge strane, kompoziti imaju izvrsna svojstva toplinske izolacije i sporo izgaraju. Brzina provođenja topline kroz kompozite je mnogo sporija nego kod metala, a to je značajna prednost kod širenja požara. Mogu pružiti i učinkovitu zaštitnu barijeru protiv plamena, topline, dima i otrovnih para. Međutim, kada se većina organskih vlakana i polimernih matrica izloži visokim temperaturama i vatri, razložit će se na nezapaljive hlapljive tvari i zapaljive hlapljive tvari. Zapaljive hlapljive tvari reagiraju s kisikom i razvijaju dim koji može uključivati otrovne pare što je prikazano na slici 16, a detaljnije opisano u poglavlju 3.1. [17], [18]

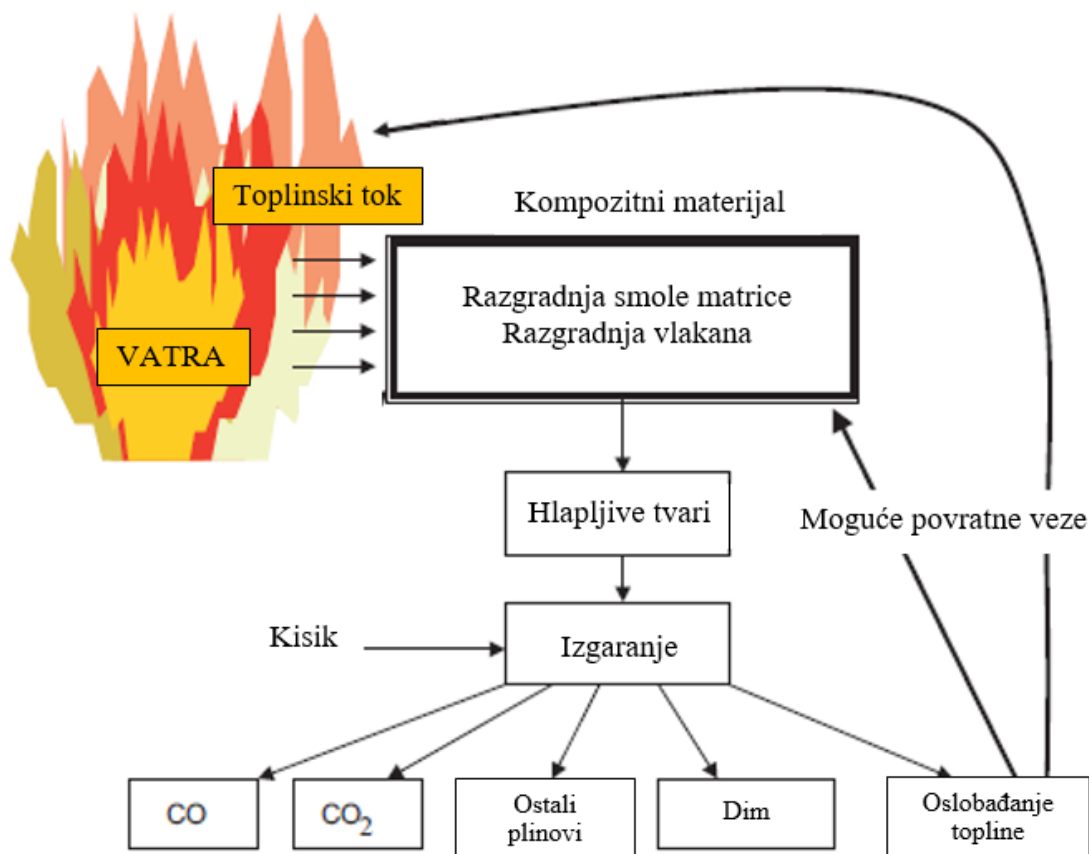
Također, radi se na razvijanju kompozita kao zaštite od topline u područjima gdje je visok rizik od požara, kao što su morske naftovodne platforme.



Slika 16. Gorenje kompozitnog materijala [17]

#### 4.1. Mehanizmi toplinske razgradnje polimernih kompozitnih materijala

Toplinska razgradnja polimernih kompozitnih materijala sažeto je prikazana na slici 17. Kada je materijal izložen dovoljno velikom toplinskom zračenju iz vatre, polimerna matrica i organska vlakna toplinski će se razgraditi na hlapljive tvari i čestice čađe u zraku, odnosno dim. Hlapljive tvari se sastoje od raznih para i plinova – zapaljivih (npr. ugljikov monoksid, metan) i nezapaljivih (npr. ugljikov dioksid, voda). Zapaljive hlapljive tvari reagiraju s kisikom iz atmosfere što dovodi do stvaranja konačnih produkta izgaranja (obično ugljikov dioksid, čestice dima i mala količina ugljikovog monoksida) popraćenih oslobađanjem topline.



Slika 17. Shematski prikaz mehanizama uključenih u toplinsku razgradnju polimernih kompozita, prikazuju povratne veze koje uključuju toplinski tok [18]

Cjelokupni proces je složen te vatra pokreće početnu razgradnju i samo zapaljenje kompozita. To može biti izvor paljenja poput električnog kvara, pregrijanih strojeva, toplina plamenika ili slično. Polimeri se razgrađuju nizom kemijskih reakcija kada se zagriju do dovoljno visoke temperature. Ove promjene imaju dramatičan učinak na životni vijek i svojstva polimernog materijala. Glavni mehanizmi koji smanjuju molekulsku masu su nasumično cijepanje lanaca, koje se može dogoditi na krajevima lanaca ili na nasumičnim mjestima u lancu. U slučaju cijepanja kraja lanca, oslobađaju se monomeri. Ovaj proces je poznat kao otkopčavanje, depropagacija ili depolimerizacija krajnjeg lanca. Ukoliko dođe ipak do nasumičnog cijepanja glavnog lanca, dolazi do stvaranja monomera i oligomera (kratki lanci s deset ili manje mera). I posljednji mehanizam je uklanjanje bočnih skupina lanca. Koji od ovih mehanizama će dominirati ovisi o temperaturi i vrsti polimera. [18]

Često se dodaju usporivači gorenja koji djeluju tako da usporavaju razgradnju kompozita, oslobađanje topline i širenje plamena putem jednog ili više najčešćih mehanizama:

- endotermno hlađenje – razgradnja određenih dodataka je endotermna, hlađenje površine ispod razine zapaljivosti
- razrjeđivanje – razgradnjom određenih dodataka nastaje voda i nezapaljivi plinovi koji razrjeđuju koncentraciju zapaljivog plina
- zaštitni sloj – razgradnja određenih dodataka proizvodi ugljen, porozni čvrsti sloj koji štiti kompozit od daljnjeg raspadanja pružajući toplinsku izolaciju, otpornost na gorenje te stabilnost strukture. Također, drugi dodaci mogu proizvesti plinoviti sloj koji isključuje kisik, gušeći vatru i osiguravajući toplinsku izolaciju.

Najučinkovitiji usporivači obično kombiniraju sva tri mehanizma. Neki uobičajeni usporivači gorenja su aluminij trihidroksid ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), magnezijev hidroksid ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), cinkov borat ( $\text{ZnB}$ ), melamin te amonijev polifosfat (APP). [17]

## 4.2. Toplinska razgradnja vlaknastih ojačanja

Staklo je bez sumnje najčešće korišteno ojačalo u proizvodnji kompozitnih materijala. Staklena vlakna su kemijski inertna u vatri i zadržavaju kemijsku i fizikalnu stabilnost pri visokim temperaturama. E-staklo, koje je najčešće korišteno stakleno vlakno, ostaje nepromijenjeno sve do temperature od približno 830 °C, dok se omekšavanje i taljenje događa pri približno 1070 °C. Međutim, mehanička svojstva kao što su čvrstoća i otpornost na puzanje opadaju već prije temperature omekšavanja. Zatim, S-staklo je superiornije u usporedbi s E-staklom. Temperature omekšavanja i taljenja S-staklenih vlakana su oko 1050 °C, odnosno 1500 °C. No temperature požara su većinom u rasponu od 500 do 1100 °C stoga E-staklena vlakna imaju izvrsnu vatrootpornost.

Dok staklena vlakna posjeduju izvrsnu otpornost na vatru, organska sredstva sadržana u većini premaza za vlakna nemaju to svojstvo. Staklena vlakna su obično prekrivena tankim slojem maziva kako bi se osiguralo kemijsko prijanjanje s polimernom matricom, bolje vezivanje i lakše rukovanje. Takva sredstva kemijski se razgrađuju u vatri i oslobađaju zapaljive hlapljive tvari. Međutim, budući da je sloj vrlo tanak i maseni udio mali (< 2 % ukupne mase vlakana) ne narušava protupožarna svojstva staklom ojačanih kompozita. [18]

## 4.3. Svojstva kompozita u uvjetima gorenja

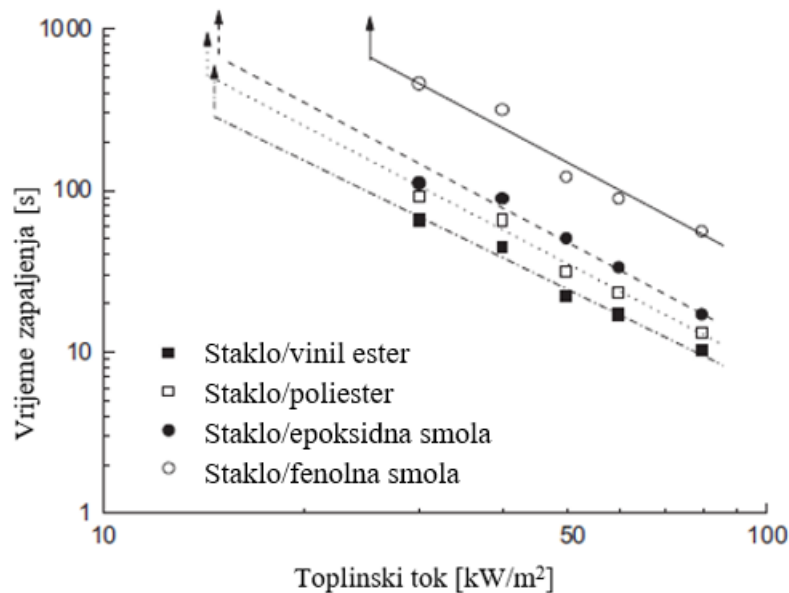
### 4.3.1. Vrijeme zapaljenja

Vrijeme do paljenja, vrijeme zapaljenja ili zapaljivost je važno svojstvo zapaljivih materijala jer definira početak plamenog izgaranja. Organske smole (npr. poliesteri, vinil esteri, epoksidna smola) koje čine matricu kompozita mogu se zapaliti u vrlo kratkom vremenskom razdoblju izlaganja vatri. Nakon paljenja kompoziti često gore jakim plamenom visoke temperature koji se može brzo proširiti i zato je zapaljivost važno svojstvo kod opisivanja opasnosti od požara kompozitnih materijala.

Do paljenja obično dolazi kada se površina kompozita izložena vatri zagrije do temperature endotermne razgradnje polimerne matrice. Termalna reakcija razgradnje matrice proizvodi zapaljive hlapljive plinove koji istječu iz kompozita prema vatri. Kada je količina hlapljivih tvari na spoju kompozit/vatra dosegne kritičnu koncentraciju, tada će doći do paljenja i izgaranja. Najviše hlapljivih tvari nastaje endotermnom razgradnjom polimerne matrice, a ovisno o vrsti smole može uključivati mješavinu zapaljivih komponenti. [18]



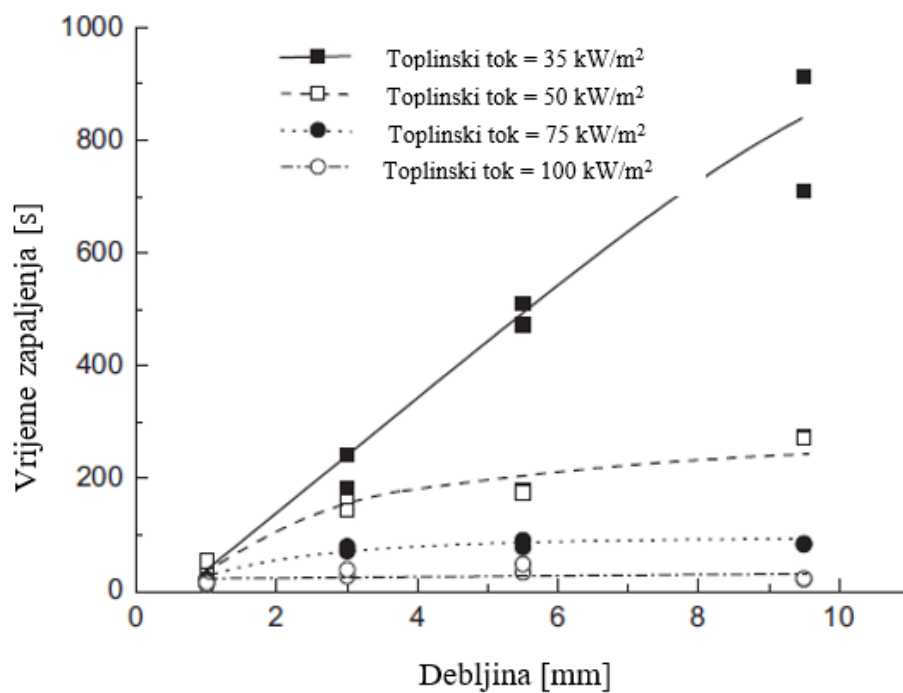
Velika pažnja usmjerena je na kompozite koji se koriste u zrakoplovstvu i brodogradnji gdje je otpornost na gorenje iznimno bitna. Zbog toga su provedena istraživanja otpornosti materijala matrice na gorenje. Slika 18 prikazuje logaritamski dijagram učinka vanjskog toplinskog toga na vrijeme zapaljenja za kompozite s različitim materijalima matrice.



**Slika 18. Logaritamski dijagram vremena paljenja u odnosu na upadni toplinski tok za kompozite s različitim materijalom matrice [18]**

Sa grafa je vidljivo kako je vrijeme zapaljenja za fenolnu smolu duže nego za sve ostale materijale. To je jedan od glavnih razloga upotrebe fenolnih kompozita u područjima gdje je visok rizik od požara.

Vrijeme zapaljenja također ovisi o debljini. Slika 19 prikazuje učinak debljine uzorka na vrijeme paljenja. Ispitan je fenolni kompozit ojačan staklenim vlaknom. Vidi se da je osjetljivost na debljinu najizraženija kod niskog toplinskog toka. Kod 35 kW/m<sup>2</sup> vrijeme paljenja raste brzo i kontinuirano s debljinom, no kod viših toplinskih tokova vrijeme paljenja se postupno povećava s debljinom do 3 mm, a iznad te vrijednosti gotovo je potpuno neovisno o debljini. [18]

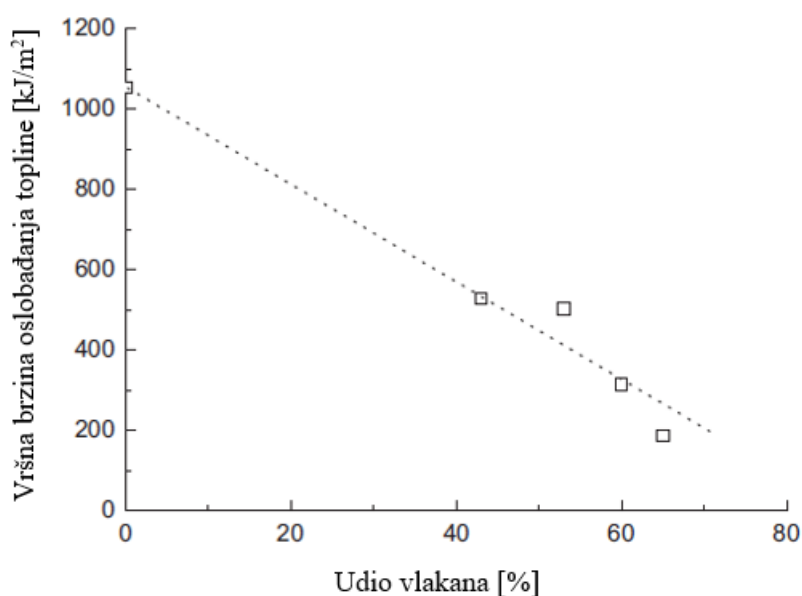


Slika 19. Učinak debljine na vrijeme paljenja fenolnog kompozita ojačanog staklenim vlaknima [18]

### 4.3.2. Brzina oslobađanja topline

Brzina oslobađanja topline (e. heat release rate, HRR) važno je svojstvo jer toplina koju oslobađa materijal dok gori može osigurati dodatnu potrebnu toplinsku energiju za rast i širenje požara. Oslobađanje topline je proizvedena toplinska energija po jedinici površine.

Slika 20 pokazuje nagli pad vršne brzine oslobađanja topline s povećanjem udjela vlakna za poliesterski kompozit ojačan staklenim vlaknima. Uzrok tome je manja dostupnost materijala polimerne matrice za stvaranje topline tijekom toplinske razgradnje. Mnoga istraživanja otkrivaju da vrsta tkanine koja se koristi za ojačanje kompozita utječe na svojstva oslobađanja topline.

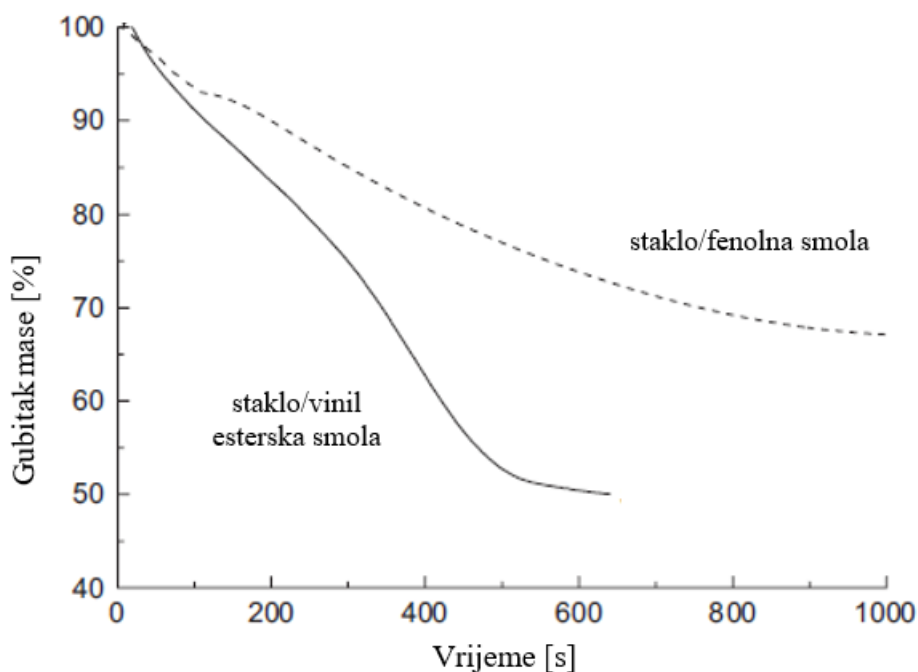


**Slika 20.** Učinak povećanja sadržaja staklenih vlakana na brzinu oslobađanja topline kod poliesterskog kompozita pri toplinskom toku od 50 kW/h [18]

Kao i vrijeme zapaljenja, brzina oslobađanja topline također ovisi o debljini. Brzo se smanjuje povećavajući debljinu do oko 8 mm, nakon toga postaje neosjetljivo na povećanje debljine. [18]

### 4.3.3. Gubitak mase

Gubitak mase je važno svojstvo kod ponašanja materijala u požaru jer daje kvantitativni podatak količine materijala koja će se razgraditi u vatri. Gubitak mase gorućeg kompozita nije konstantan. Razlog tome je da je gubitak mase kontroliran od strane nekoliko toplinskih procesa koji se mijenjaju tijekom vremena kao što su paljenje, izgaranje te stanjivanje. Krivulja na slici 21 pokazuje nagli pad gubitka mase za staklo/vinil ester kompozit zbog brze razgradnje površinskog sloja bogatog smolom koja brzo gori. Nakon tog početnog vrhunca gubitka mase, pad se ravnomjerno smanjuje s povećanjem vremena. [18]



Slika 21. Prikaz gubitka mase za staklo/fenol i staklo/vinil ester kompozite [18]

#### 4.3.4. *Dim*

Kompoziti tijekom gorenja stvaraju gusti dim i to uzrokuje jedan od glavnih sigurnosnih problema. Dim koji proizvode je mješavina malih fragmenata vlakana i čađe. Kratkotrajna izloženost ovakvom dimu ne uzrokuje nužno odmah zdravstvene probleme, no dim je izrazito gust pa uzrokuje smanjenu vidljivost, dezorijentaciju i otežavanje gašenja požara. Vrsta vlakana kojima je kompozit ojačan može utjecati na količinu dima koju kompozit oslobađa. Što je veći udio vlakna, smanjuje se količina dima jer je dostupno manje organskog materijala (smole) za proizvodnju dima. Organska ljepila te vezivna sredstva mogu povećati gustoću. Gustoću dima kontrolira i intenzitet požara jer se gustoća povećava ovisno o vanjskoj toplini zbog povećanja brzine otpuštanja čestica. [18], [19]

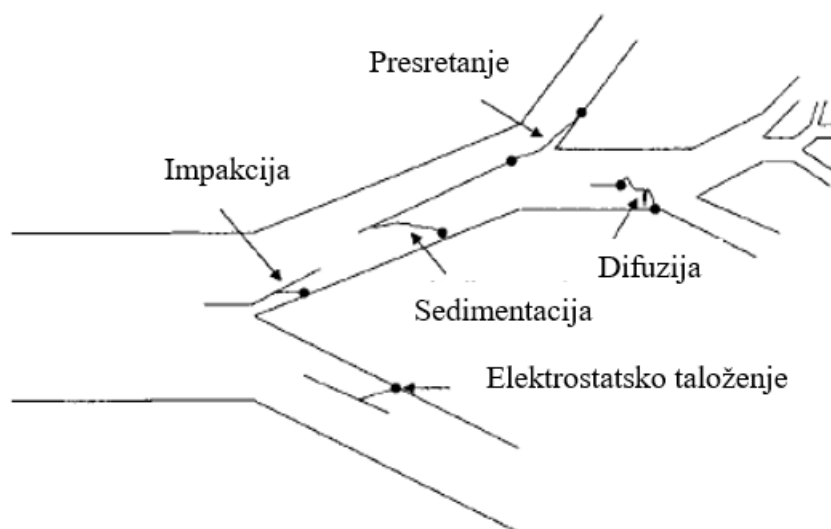
#### 4.3.5. *Toksičnost dima i opasnost izgaranja vlakana*

Izgaranjem se često oslobađaju otrovni plinovi opasni po zdravlje. Opće je poznato da je glavni uzrok smrti u požarima toksičnost produkata izgaranja, a plin koji predstavlja najveću opasnost je ugljikov monoksid. Količina CO koji se proizvede izgaranjem kompozita ovisi o sastavu kompozitnog materijala, temperaturi vatre i dostupnosti kisika, no već i male količine mogu uzrokovati onesposobljenost čovjeka ili čak smrt.

Velika opasnost javlja se kod udisanja sadržaja koji nastaje izgaranjem vlakana, a posljedice uveliko ovise o dimenzijama i kemijskom sastavu vlakna. Zdravstveni problemi uglavnom se pripisuju oslobađanju ultra-malih fragmenata vlakna. Slika 22 prikazuje pet načina taloženja vlakana u bronhima dišnih puteva. Doprinos svakog mehanizma varira u različitim područjima dišnog trakta. Područje dišnih puteva u ljudskim plućima sastoji se od niza razgranatih kanala koji se nazivaju bronhi i progresivno se smanjuju, a služe za dovod zraka u pluća. Penetracija vlakana u plućima uzrokuje alveolitis pluća, a posljedica su ožiljci na stijenkama pluća uslijed napora da se izbore s ovom bolešću. Takav ožiljak uzrokovan taloženjem vlaknaste tvari naziva se plućna fibroza.

Najopasniji požari su oni koji uključuje strukturne komponente zrakoplova. Čestice ugljičnih vlakana oslobođena uslijed izgaranja kompozita su veličine koja se može udisati te su kontaminirana različitim kemikalijama. Nedavna istraživanja nesreća pokazuju kako vatrogasci prijavljuju razne zdravstvene probleme poput iritacije kože, senzibilizaje, bolove u očima te

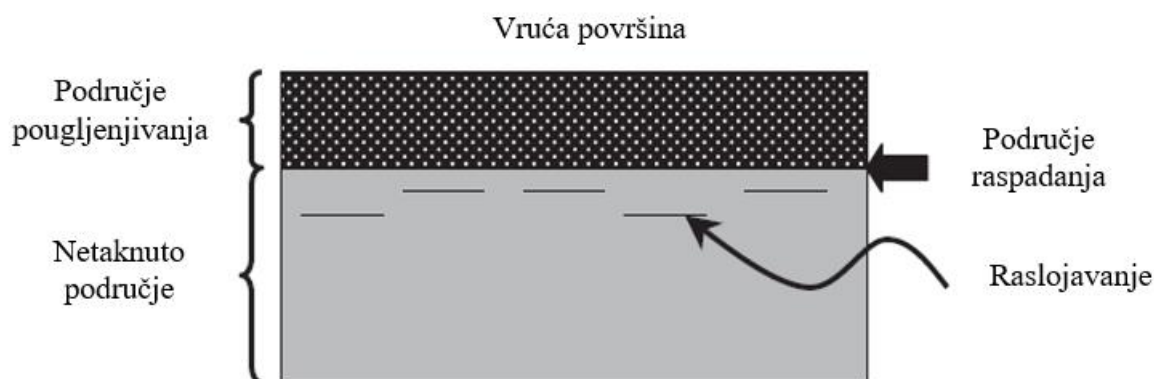
ozbiljne respiratorne probleme od udisanja čestica vlakana. Mnogi zdravstveni problemi su zasad i neistraženi. Zbog toga su razvijene smjernice za odgovarajuće rukovanje i odlaganje kompozitnih olupina kako bi se osigurala zaštita osoblja. [18], [19]



Slika 22. Načini taloženja vlakana u plućnim dišnim putovima [19]

#### 4.4. Mehanička svojstva kompozita nakon gorenja

Mehanička svojstva kompozita s duromernom matricom smanjuju se nakon gorenja zbog toplinske degradacije i oštećenja. Šteta uzrokovana požarom proteže se ispod vruće površine u zonama nazvanim – područje pougljenjivanja, područje raspadanja i netaknuto područje, prikazano na slici 23. Ugljen proizveden od razgradnje polimerne matrice glavni je razlog pogoršanja mehaničkih svojstva nakon gorenja.



**Slika 23. Shematski prikaz distribucije oštećenja nakon gorenja kod kompozita s duromernom matricom [18]**

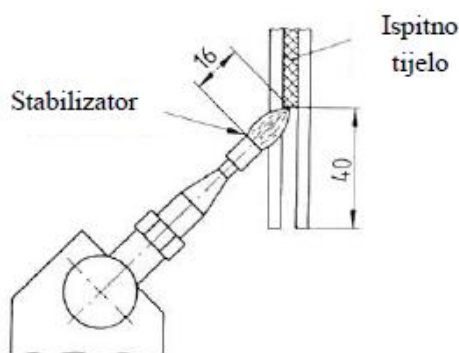
Mehanička svojstva pougljenjenog područja vrlo su niska. Veličina tog područja brzo se povećava s porastom temperature i vremena zagrijavanja pa tako i svojstva duromernih kompozita nakon gorenja brzo degradiraju. Dolazi do progresivnog pada čvrstoće kako se povećava količina ugljeniziranog materijala. Povećanje debljine ugljeniziranog sloja dovodi do smanjenja modula elastičnosti, tlačne, savojne te smične čvrstoće. Područje razgradnje također doprinosi niskim svojstvima kompozita nakon gorenja. Smola matrice je jako napuknuta i oštećena što znači da su svojstva ovog područja značajno narušena.

Često dolazi i do raslojavanja unutar netaknutog područja. Razlog je visok unutarnji tlak koji nastaje zbog stvaranja hlapljivih plinova uslijed degradacije smole i isparavanja vlage. Istraživanja pokazuju kako šteta od požara ima veći utjecaj na tlačna svojstva nego na rastezna. Tlačna čvrstoća više ovisi o ulozi matrice i zato je osjetljivija na posljedice gorenja. Prisutnost raslojavanja je također pokazni faktor jer do izvijanja slojeva može doći uslijed tlačnog opterećenja. [18]

#### 4.5. Ispitivanje gorivih svojstava kompozita

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedeno je ispitivanje gorivih svojstava kompozita. Ispitivanje je provedeno prema normi DIN 53 438:1984 – Ispitivanje zapaljivih materijala: Odgovor na paljenje malim plamenom. Ova norma opisuje metodu ispitivanja za određivanje reakcije materijala na paljenje.

Postoje dva moguća načina izvedbe: izlaganje ruba plamenu i izlaganje površine plamenu. Za potrebe ovog rada korištena je metoda izlaganja ruba plamenu, a shema je prikazana na slici 24.



Slika 24. Shematski prikaz izlaganja ruba plamenu [20]

Eksperiment se odvija na način da se prvo plamenik zagrijava jednu minutu prije nego počinje ispitivanje. Visina plamena je 20 mm, a plamenik treba nagnuti za  $45^\circ$  prilikom zagrijavanja ispitnog tijela. Ispitno tijelo se postavlja u dvodijelni okvir koji služi kao držač. Određuje se je li vrh plamena, i u kojem vremenu, dosegno određenu oznaku na ispitnom tijelu. Mjerna oznaka se zacrti na udaljenosti 150 mm od donjeg ruba. Na ispitno tijelo se djeluje 15 sekundi pazeći da se ne uznemiruje plamen. Vrijeme se mjeri od početka paljenja uzorka pa sve do gašenja vatre ili dok plamen ne dosegne mjernu oznaku. Ukoliko je plamen dosegno mjernu oznaku, a ispitno tijelo i dalje gori ono se polijeva i gasi. Nakon toga potrebno je okvir ohladiti na sobnu temperaturu.

Materijali se klasificiraju prema tablici 4. Ova podjela pomaže pri izboru kompozitnih materijala u primjenama gdje je potrebno postići sigurnost od požara, procijeniti zapaljiva svojstva kompozitnog materijala i slično.



**Tablica 4. Klasifikacija materijala prilikom 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

Osim toga provedeno je i ispitivanje tvrdoće kompozitnih materijala te Martens postupak ispitivanja što je detaljno opisano u poglavlju 4.

## **5. EKSPERIMENTALNI DIO**

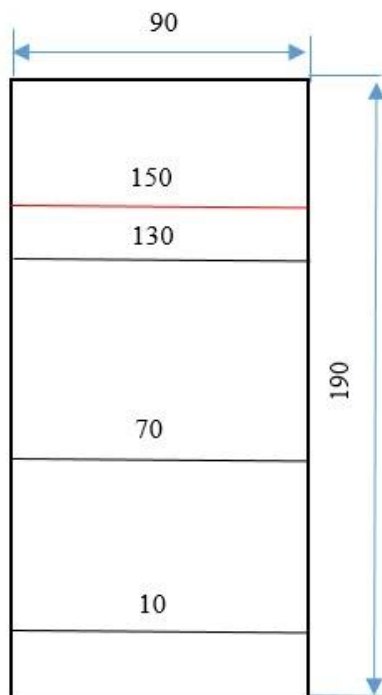
Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada je odrediti goriva svojstva hibridnih kompozitnih materijala od epoksidne smole kao matrice ojačane kombinacijom staklenih i lanenih vlakana. Izrađeno je pet vrsta kompozitnih materijala s različitim kombinacijama slaganja vlakana. Kompoziti se sastoje od 6 slojeva vlakana slaganih na sljedeći način: SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL, SSSSSS, LLLLLL pri čemu slovo S predstavlja sloj staklenih vlakana, a L predstavlja sloj lanenih vlakana. Iz svakog kompozita izrezana su ispitna tijela odgovarajućih oblika i dimenzija u skladu s odgovarajućim normama. Proveden je eksperiment ispitivanja gorivosti kompozitnih materijala, mjerenje tvrdoće te postojanost oblika pri povišenim temperaturama u ovisnosti o redoslijedu slaganja vlakana.

### **5.1. Materijali i izrada**

Ploče su izrađene postupkom ručnog laminiranja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za polimere i kompozite. Korištena je epoksidna smola Novapox veza, proizvođača NOVA-chem d.o.o. (Karlovac), staklena vlakna proizvođača Keltteks (Karlovac) te lanena vlakna Bcomp (Švicarska).

### **5.2. Ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala**

Za ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala potrebno je pravilno pripremiti ispitna tijela prema normi DIN 53 438:1984. Izrezana su po dva ispitna tijela od svakog kompozitnog materijala (ukupno 10 ispitnih tijela). Debljina ploče mjeri se na određenim udaljenostima od donjeg ruba (10, 70 i 130 mm) kao što je prikazano na slici 25. Kao što je već spomenuto, na udaljenosti od 150 mm se ucrtava mjerna oznaka koju plamen mora dosegnuti. Slika 26 prikazuje pripremljena ispitna tijela.



Slika 25. Izmjere ispitnog tijela



Slika 26. Pripremljena ispitna tijela za ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala

Tablice od 5 do 9 prikazuju izmjerene debljine na spomenutim udaljenostima za svako ispitno tijelo svakog kompozitnog materijala.

**Tablica 5. Debljine ispitnih tijela hibridnog kompozita 1 (SLLLLS) za izlaganje ruba plamenu**

		Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
Debljina na zadanoj udaljenosti, mm	10 mm	5,56	5,32
	70 mm	5,82	5,74
	130 mm	5,42	5,26
Srednja vrijednost		5,60	5,44

**Tablica 6. Debljine ispitnih tijela hibridnog kompozita 2 (LLSLL) za izlaganje ruba plamenu**

		Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
Debljina na zadanoj udaljenosti, mm	10 mm	5,60	5,52
	70 mm	5,20	5,90
	130 mm	5,40	5,96
Srednja vrijednost		5,40	5,79

**Tablica 7. Debljine ispitnih tijela hibridnog kompozita 3 (LSLLSL) za izlaganje ruba plamenu**

		Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
Debljina na zadanoj udaljenosti, mm	10 mm	5,60	5,72
	70 mm	5,54	6,20
	130 mm	5,32	5,60
Srednja vrijednost		5,49	5,84

**Tablica 8. Debljine ispitnih tijela kompozita 4 (SSSSSS) za izlaganje ruba plamenu**

		<b>Ispitno tijelo 1</b>	<b>Ispitno tijelo 2</b>
Debljina na zadanoj udaljenosti, mm	10 mm	3,74	3,16
	70 mm	2,54	2,80
	130 mm	2,90	2,70
Srednja vrijednost		3,06	2,89

**Tablica 9. Debljine ispitnih tijela kompozita 5 (LLLLLL) za izlaganje ruba plamenu**

		<b>Ispitno tijelo 1</b>	<b>Ispitno tijelo 2</b>
Debljina na zadanoj udaljenosti, mm	10 mm	6,94	6,56
	70 mm	6,62	6,40
	130 mm	6,86	6,52
Srednja vrijednost		6,81	6,49

### 5.2.1. Provođenje eksperimenta

Nakon što su uzorci pravilno pripremljeni i izmjereni provodi se ispitivanje gorivosti u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Potreban je plamenik i konstrukcija kao što je prikazano na slici 27. Konstrukcija se sastoji od dvodijelnog okvira koji služi kao držač ispitnog tijela. Ispitno tijelo na slici je već učvršćeno i spremno za ispitivanje. Ono se izlaže plamenu i mjeri se vrijeme u kojem će plamen dosegnuti mjernu oznaku od 150 mm kao što je već opisano u poglavlju 3.5. Plamenik se zagrijava jednu minutu prije nego se približi ispitnom tijelu.



**Slika 27. Plamenik i konstrukcija potrebni za ispitivanje gorivosti kompozitnih materijala**

Plamenik je nagnut za  $45^\circ$  prilikom zagrijavanja ispitnog tijela i na njega se djeluje 15 sekundi. Prilikom toga pazi se da plamen miruje i da se ne djeluje na njega. Slika 28 prikazuje ispitno tijelo hibridnog kompozita 1 (SLLLLS) tijekom gorenja i neposredno nakon gašenja, odnosno nakon što je plamen dosegnuo ucrtanu mjernu oznaku od 150 mm. Slika 29 prikazuje ispitno tijelo kompozita 4 (SSSSSS) tijekom gorenja i neposredno nakon gašenja. Postupak je ponovljen za svaki kompozitni materijal.



Slika 28. Prikaz hibridnog kompozita 1 (SLLLLS) tijekom gorenja i neposredno nakon gašenja



Slika 29. Prikaz kompozita 4 (SSSSSS) tijekom gorenja i neposredno nakon gašenja

### 5.3. Mjerenje tvrdoće

U Laboratoriju za polimere i kompozite provedeno je i mjerenje tvrdoće već spomenutih, hibridnih kompozitnih materijala. Ispitivanje je provedeno pomoću tvrdomjera Zwick 3106 (slika 30).



Slika 30. Tvrdomjer Zwick 3106

Tvrdoća se mjeri prema normi HRN EN ISO 2039-1:2013 Plastika – Određivanje tvrdoće – 1. dio: Metoda utiskivanjem kuglice (e. Plastics – Determination of hardness — Part 1: Ball indentation method) na način da se kuglica promjera 5 mm utiskuje u materijal. Točan iznos tvrdoće se ne očitava na tvrdomjeru, već samo dubina prodiranja kuglice. Opterećenje se ostvaruje dodavanjem utega. Prema navedenoj normi, dubina prodiranja kuglice smije biti između 0,15 i 0,35 mm. Ovaj uvjet ispunjen je uz pomoć opterećenja od 36,5 kP, odnosno 357,94 N. Kuglica se otiskuje na 10 različitih mjesta pritom pazeći da se ne utiskuje preblizu rubu. Rezultati se očitavaju na 10, 30 i 60 sekundi opterećenja. Nakon što se očitaju potrebne dubine prodiranja kuglice, tvrdoća se računa prema sljedećoj formuli:

$$H = \frac{1}{\pi D} \frac{F}{h_k}, \quad (4.1)$$



gdje je:

$F$  [N] – sila opterećenja

$H$  [N/mm<sup>2</sup>] – tvrdoća

$D$  [mm] – promjer kuglice

$h_k$  [mm] – dubina prodiranja penetratora.

Uvrštavanjem promjera kuglice u izraz 4.1 dobije se sljedeća formula prema kojoj se računa tvrdoća:

$$H = 0,06366 \frac{F}{h_k} \quad (4.2)$$

#### 5.4. Martens postupak ispitivanja

Proveden je Martens postupak ispitivanja temperature postojanosti oblika pri opterećenju prema normi DIN 53458:1998 Ispitivanje plastike – Određivanje temperature postojanosti oblika (Martensova metoda). Martensova otpornost na toplinu je svojstvo materijala da zadrži svoj oblik, mehaničku čvrstoću i ostala mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. Ti podaci su iznimno bitni kod primjene kompozitnih materijala u raznim industrijama gdje mogu biti izloženi visokim temperaturama (npr. zrakoplovna, automobilska industrija i slično).

Postupak se provodi tako da se pravilno pripreme i izrežu uzorci kao što je prikazano na slici 31. Izrezana su po tri ispitna tijela u obliku kvadra od četiri različita kompozitna materijala.



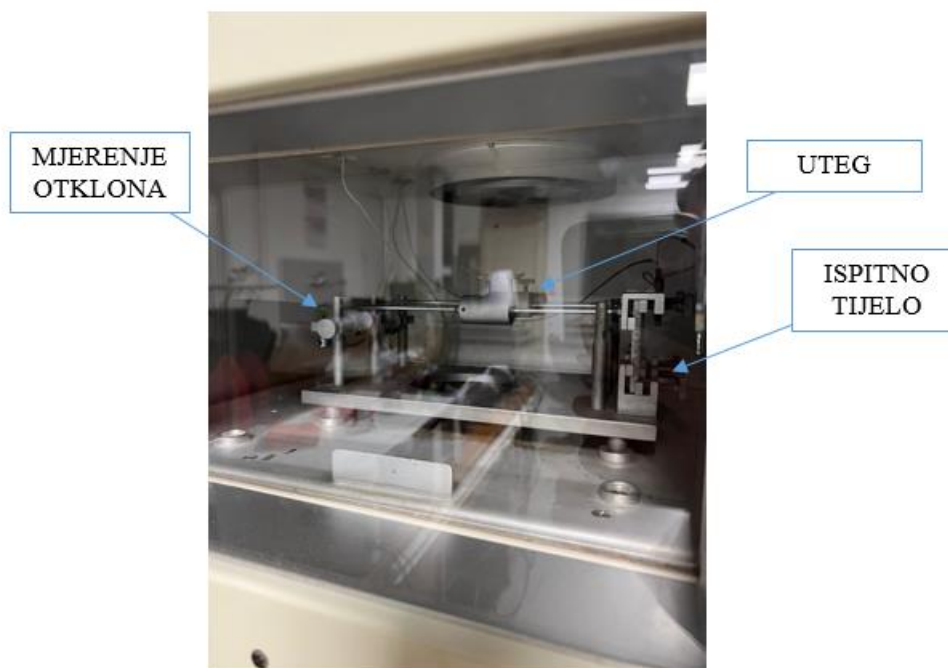
**Slika 31. Uzorci pripremljeni za Martens postupak ispitivanja**

Zatim se po tri ispitna tijela istovremeno postavljaju u uređaj prikazan na slici 32, a slika 33 prikazuje unutrašnjost tog istog uređaja. Ispitno tijelo postavljeno je vertikalno, a opterećuje se utegom. Položaj utega definiran je normom. Temperatura se postupno povećava te se primjenom opterećenja ispitno tijelo savija za određeni iznos, što izaziva otklon konzole s utegom. Martensova otpornost na toplinu je mjerena pri otklonu od 6 mm, kada se očitava temperatura. Iznad očitane temperature testirani kompozitni materijal nije pouzdan za primjenu,

može doći do deformacije, oštećenja i općenito pada mehaničkih svojstava te je opasan za upotrebu.



Slika 32. Uređaj za provedbu Martens ispitivanja



Slika 33. Unutrašnjost Martens uređaja

## 6. REZULTATI ISPITIVANJA

### 6.1. Rezultati ispitivanja gorivosti kompozitnih materijala

Tablica 10 prikazuje izmjereno vrijeme u minutama (za hibridni kompozit 1) u kojem je plamen dosegnuo ucrtanu mjernu oznaku 150 mm od donjeg ruba.

**Tablica 10. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za hibridni kompozit 1 (SLLLLS)**

Hibridni kompozit 1	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
<i>t</i> , min	1:39	1:28

Kod ispitnog tijela 1 plamen je dosegnuo mjernu oznaku za 1 minutu i 39 sekundi, a kod ispitnog tijela 2 za 1 minutu i 28 sekundi. Tijekom eksperimenta primjećuje se kako su gorile obje strane, čulo se pucketanje, čađilo je i dim je bio izrazito crne boje. Čestice su letjele svuda po zraku te je ispitno tijelo bilo potrebno ugaziti. Gašenje je bilo otežano te nakon samog gašenja i dalje izlazi crni dim iz ispitnog tijela i osjeća se miris gorenja (slika 34).

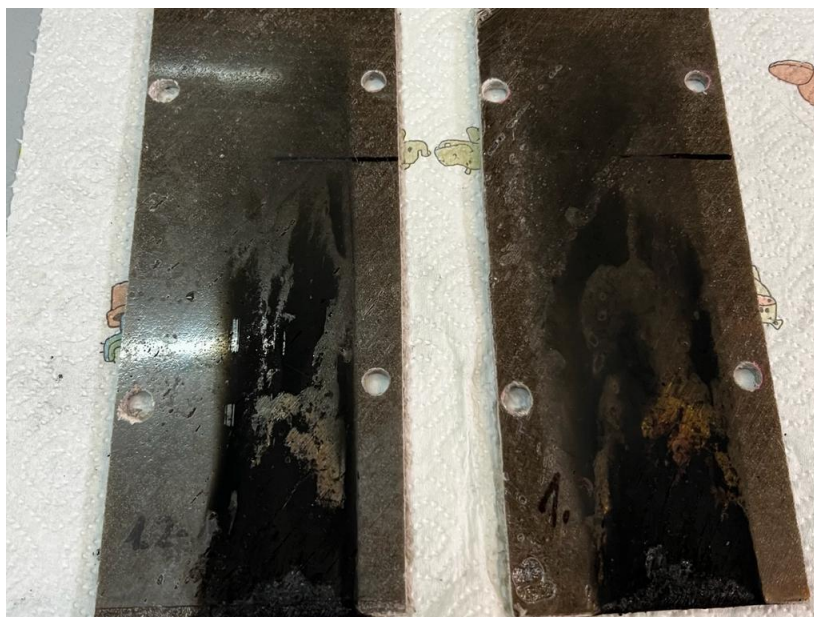


**Slika 34. Ispitno tijelo 1 (hibridni kompozit 1) neposredno nakon gašenja**

Tablica 11 prikazuje izmjereno vrijeme u minutama (za hibridni kompozit 2) u kojem je plamen dosegnuo ucrtanu mjernu oznaku 150 mm od donjeg ruba. Tijekom gorenja ispitna tijela su pucketala, gore s obje strane, ali ne lete čestice po zraku. Gorenje je slabije i ispitno tijelo se lakše i brže gasi te nema toliko dima. Slika 35 prikazuje ispitna tijela nakon gorenja.

**Tablica 11. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za hibridni kompozit 2 (LLSLL)**

Hibridni kompozit 2	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
<i>t</i> , min	1:33	1:27



**Slika 35. Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (hibridni kompozit 2) nakon gorenja**

Tablica 12 prikazuje izmjereno vrijeme u minutama (za hibridni kompozit 3) u kojem je plamen dosegnuo ucrtanu mjernu oznaku 150 mm od donjeg ruba. Slično kao i prethodni kompozitni materijal, i u ovom slučaju se čuje pucketanje te ispitno tijelo gori s obje strane. Čestice lete po zraku, ali u manjoj mjeri nego kod hibridnog kompozita 1. Gašenje je relativno jednostavno. Slika 36 prikazuje ispitna tijela nakon gorenja.

**Tablica 12. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za hibridni kompozit 3 (LSLLSL)**

Hibridni kompozit 3	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
$t$ , min	1:10	1:01

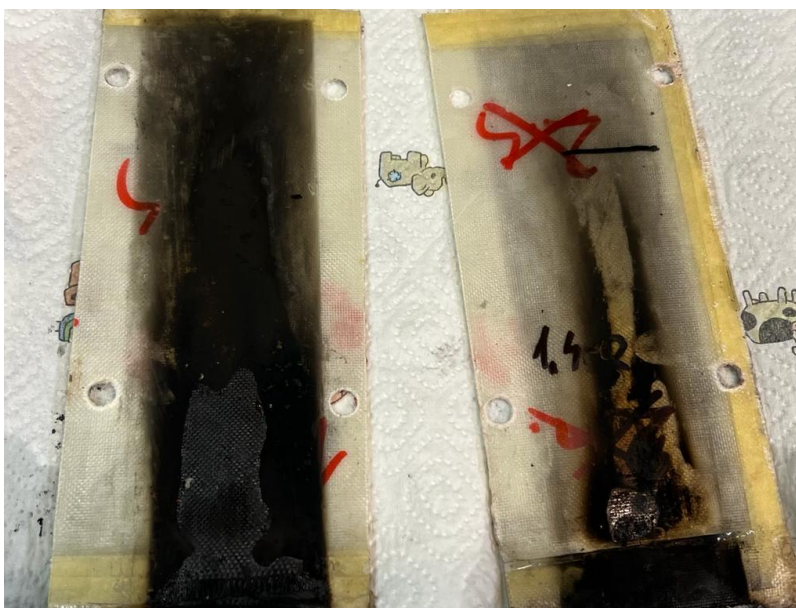


**Slika 36. Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (hibridni kompozit 3) nakon gorenja**

Tablica 13 prikazuje izmjereno vrijeme u minutama (za kompozit 4) u kojem je plamen dosegnuo ucrtanu mjernu oznaku 150 mm od donjeg ruba. Ispitna tijela su dosegla ucrtanu mjernu oznaku za 39 sekundi, što znači da gore neočekivano brzo i gore s obje strane. Čuje se lagano pucketanje, ne lete čestice, samo se oslobađa dim, no nije gust i crn kao kod hibridnog kompozita 1. Slika 37 prikazuje ispitna tijela nakon gorenja.

**Tablica 13. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za kompozit 4 (SSSSSS)**

Kompozit 4	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
<i>t</i> , min	0:65	0:65



**Slika 37. Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (kompozit 4) nakon gorenja**

Tablica 14 prikazuje izmjereno vrijeme u minutama (za kompozit 5) u kojem je plamen dosegnuo ucrtanu mjernu oznaku 150 mm od donjeg ruba. Ispitna tijela gore s obje strane, čađi, čuje se lagano pucketanje i lete čestice. Lako se gasi. Slika 38 prikazuje ispitna tijela nakon gorenja.

**Tablica 14. Izmjereno vrijeme u kojem je plamen dosegnuo mjernu oznaku od 150 mm za kompozit 5 (LLLLL)**

Kompozit 5	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2
<i>t</i> , min	1:41	1:37



**Slika 38. Rezultati ispitivanja ispitnih tijela (kompozit 5) nakon gorenja**



### 6.1.1. Analiza rezultata

Tablica 15 prikazuje ukupan popis izmjerenih vremena u kojima je dostignuta ucrtana mjerna oznaka za svaki pojedini kompozitni materijal te njihovu klasu koja se dodjeljuje prema pravilu navedenom u tablici 3. Svi uzorci pripadaju istoj klasi pa im je stoga moguće dodjeliti klasu K2. Ukoliko bi dva uzorka od njih pet pripadalo nižoj klasi, a tri višoj, dodjeljuje im se niža klasa. Ako jedan uzorak pripada nižoj klasi potrebno je ispitati još pet uzoraka.

**Tablica 15. Ukupno vrijeme  $t$ , razvijanja plamena do oznake, izraženo u minutama te dodijeljena klasa. Tamnija oznaka klase označava veću otpornost gorenju.**

Kompozit	Karakteristike	Ispitno tijelo 1		Ispitno tijelo 2		Klasa
		Vrijeme, min	Vrijeme, min	$t_{sr}$ , min	$d_{sr}$ , mm	
		Debljina, mm	Debljina, mm			
SLLLLS	pucketanje, čađa, gori s obje strane, gusti, crni dim	1:39	1:28	1:34		K2
		5,60	5,44	5,52		
LLSSLL	pucketanje, gori s obje strane, ne lete čestice, manje dima	1:33	1:27	1:30		K2
		5,40	5,79	5,60		
LSLLSL	pucketanje, gori s obje strane, manja količina čestica koje lete	1:10	1:01	1:06		K2
		5,49	5,84	5,67		
SSSSSS	pucketanje, brzo gorenje s obje strane, ne lete čestice	0:65	0:65	0:65		K2
		3,06	2,89	2,98		
LLLLLL	lagano pucketanje, gori s obje strane, lako se gasi	1:41	1:37	1:39		K2
		6,81	6,49	6,65		

Klasa K2 označava materijale s ograničenom učinkovitošću u požarima, odnosno materijal se može relativno lako zapaliti i brzo gorjeti pritom oslobađajući veliku količinu dima. Međutim, količina i toksičnost dima ipak nije toliko opasna kao kod materijala klase 3. Materijali ove klase nisu samogasivi, ne pružaju najvišu razinu zaštite od požara i njihova primjena je ograničena u nekim industrijama poput zrakoplovne i transportne gdje je otpornost na požar od izuzetne važnosti. U takvim slučajevima, potrebno je odabrati materijale iz klase K1 koji su samogasivi i gdje plamen ne bi uopće dosegno mjernu oznaku.

Na temelju rezultata iz tablice 15 vidljivo je kako je najdulje vrijeme potrebno da se dostigne mjerna oznaka od 150 mm potrebno kompozitu 5 čija je kombinacija slaganja vlakana LLLLLL i ono iznosi 1 minutu i 39 sekundi (zeleno polje u tablici). S druge strane, najkraće vrijeme iznosi 39 sekundi i to za kompozit 4 čija je kombinacija slaganja vlakana SSSSSS (crveno polje u tablici). Rezultati ispitivanja su vrlo neočekivani jer staklena vlakna su obično ta koja imaju veću otpornost na gorenje i nisku zapaljivost, dok su prirodna vlakna (lanena) brže zapaljiva. Drugi po redu s najduljim vremenom je hibridni kompozit 1 (SLLLLS) gdje su ipak staklena vlakna u vanjskim slojevima, no već sljedeći je hibridni kompozit 2 (LLSSLL) gdje su ponovno lanena vlakna u vanjskim slojevima. U većini primjena cilj je da kompozitni materijal bude samogasiv i da plamen uopće ne dosegne mjernu oznaku zbog veće sigurnosti i sprječavanja širenja požara, no s obzirom da u ovom eksperimentu to nije slučaj potrebno je ostvariti čim dulje vrijeme gorenja. U slučaju požara to vrijeme pruža mogućnost spašavanja i evakuacije ljudi. U ovom eksperimentu lanena vlakna su se pokazala iznenađujuće dobrim u pogledu gorivih svojstava.

Razlog zašto je rezultat eksperimenta ovakav može biti to što goriva svojstva kompozita ovise o vrsti, svojstvima i načinu slaganja vlakana kao i o materijalu matrice te o stupnju adhezije između matrice i vlakana. Moguće je da je prilikom izrade kompozita došlo do stvaranja šupljina, odnosno zaostalog zraka, što uzrokuje stvaranje puteva za brže širenje plamena i stoga staklena vlakna gore brže od lanenih. Prilikom proizvodnje kompozitnog materijala važno je osigurati dobru impregnaciju vlakana, a to se može postići dodatkom raznih dodataka ili tretiranjem vlakana lužinom što poboljšava i mehanička svojstva samog kompozita. Razlog može biti i količina i raspored vlakana u kompozitu što je također i jedan od čimbenika koji utječe na stupanj adhezije.

## 6.2. Rezultati mjerenja tvrdoće

Slika 39 prikazuje hibridni kompozit 1 nakon provedenog mjerenja tvrdoće. Vidljivi su tragovi utiskivanja kuglice.



**Slika 39. Rezultati ispitivanja nakon mjerenja tvrdoće**

Tablice od 16 do 20 prikazuju očitane vrijednosti dubine prodiranja kuglice na 10, 30 i 60 sekundi za pojedini ispitivani hibridni kompozit. Nakon toga vrijednosti su uvrštene u formulu 4.2 i dobiveni su rezultati mjerenja tvrdoće. Na kraju je izračunata srednja vrijednost tvrdoće ( $H_{sr}$ ) za pojedini kompozitni materijal.

Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće za hibridni kompozit 1 (SLLLLS)

10 s		30 s		60 s	
Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>
0,2140	118,0833	0,2210	113,9709	0,2310	108,5695
0,2450	101,8140	0,2560	97,0685	0,2650	93,5027
0,2600	95,4507	0,2710	91,2676	0,2760	89,4850
0,2310	108,5695	0,2410	103,6568	0,2480	100,4744
0,2210	113,9709	0,2290	109,6084	0,2340	107,0475
0,2350	106,5496	0,2430	102,7272	0,2480	100,4744
0,2730	90,5461	0,2800	88,1083	0,2850	86,4459
0,2050	123,8279	0,2120	119,3133	0,2160	116,8784
0,2060	123,1622	0,2140	118,0833	0,2200	114,5408
0,2380	105,0833	0,2480	100,4744	0,2550	97,4815
$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>108,7057</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>104,4279</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>101,4900</b>
St. dev.	<b>10,6023</b>		<b>10,1919</b>		<b>9,6980</b>

Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće za hibridni kompozit 2 (LLSSLL)

10 s		30 s		60 s	
Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>
0,2070	122,5035	0,2160	116,8784	0,2230	112,8481
0,2340	107,0475	0,2430	102,7272	0,2490	100,0356
0,2600	95,4507	0,2700	91,6326	0,2750	89,8359
0,2000	127,2676	0,2070	122,5035	0,2130	118,6951
0,2030	125,1812	0,2120	119,3133	0,2180	115,6978
0,2160	116,8784	0,2250	111,7471	0,2300	109,0865
0,2080	121,8519	0,2150	117,4777	0,2210	113,9709
0,2000	127,2676	0,2090	121,2072	0,2150	117,4777
0,2070	122,5035	0,2170	116,2851	0,2250	111,7471
0,2170	116,2851	0,2260	111,2047	0,2310	108,5695
$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>118,2237</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>113,0977</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>109,7964</b>
St. dev.	<b>9,5440</b>		<b>9,0012</b>		<b>8,3622</b>

Tablica 18. Rezultati mjerenja tvrdoće za hibridni kompozit 3 (LSLLSL)

10 s		30 s		60 s	
Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>
0,1940	131,6561	0,2000	127,2676	0,2050	123,8279
0,2170	116,2851	0,2270	110,6674	0,2340	107,0475
0,2250	111,7471	0,2340	107,0475	0,2380	105,0833
0,2170	116,2851	0,2260	111,2047	0,2340	107,0475
0,1960	130,1600	0,2040	124,5009	0,2090	121,2072
0,1900	134,7539	0,1990	127,9785	0,2040	124,5009
0,2100	120,5693	0,2180	115,6978	0,2250	111,7471
0,2100	120,5693	0,2190	115,1164	0,2240	112,2949
0,1930	132,4171	0,2000	127,2676	0,2050	123,8279
0,2020	125,8690	0,2090	121,2072	0,2140	118,0833
$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>124,0312</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>118,7955</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>115,4667</b>
St. dev.	<b>7,6109</b>		<b>7,4235</b>		<b>7,3124</b>

Tablica 19. Rezultati mjerenja tvrdoće za kompozit 4 (SSSSSS)

10 s		30 s		60 s	
Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>
0,1840	139,6839	0,1870	137,1746	0,1900	134,7539
0,1700	152,7211	0,1740	148,7543	0,1760	146,8472
0,1740	148,7543	0,1790	144,0765	0,1810	142,2867
0,1740	148,7543	0,1780	144,9884	0,1810	142,2867
0,1970	129,4246	0,2000	127,2676	0,2040	124,5009
0,2140	118,0833	0,2180	115,6978	0,2210	113,9709
0,2390	104,6035	0,2450	101,8140	0,2490	100,0356
0,2360	106,0563	0,2410	103,6568	0,2440	102,2686
0,2380	105,0833	0,2440	102,2686	0,2460	101,3635
0,2260	111,2047	0,2300	109,0865	0,2340	107,0475
$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>126,4369</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>123,4785</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>121,5362</b>
St. dev.	<b>18,7650</b>		<b>18,1866</b>		<b>17,8687</b>

Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdoće za kompozit 5 (LLLLL)

10 s		30 s		60 s	
Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>	Dubina prodiranja, mm	Tvrdoća, N/mm <sup>2</sup>
0,2220	113,4067	0,2320	108,0574	0,2390	104,6035
0,2060	123,1622	0,2150	117,4777	0,2200	114,5408
0,2000	127,2676	0,2080	121,8519	0,2130	118,6951
0,2050	123,8279	0,2130	118,6951	0,2200	114,5408
0,2000	127,2676	0,2090	121,2072	0,2150	117,4777
0,2490	100,0356	0,2570	96,6589	0,2640	93,8859
0,2240	112,2949	0,2310	108,5695	0,2360	106,0563
0,1950	130,9038	0,2030	125,1812	0,2080	121,8519
0,2370	105,5676	0,2450	101,8140	0,2500	99,6007
0,2250	111,7471	0,2340	107,0475	0,2400	104,1280
$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>117,5481</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>112,6560</b>	$H_{sr}$ , N/mm <sup>2</sup>	<b>109,5381</b>
<b>St. dev.</b>	<b>9,8330</b>		<b>9,0391</b>		<b>8,7067</b>

### 6.3. Rezultati Martens postupka ispitivanja

Tablica 21 prikazuje očitane temperature pri kojima se ostvarila deformacija od 6 mm. Ispitana su po tri ispitna tijela od svakog kompozitnog materijala.

**Tablica 21. Rezultati Martens postupka ispitivanja**

		Ispitno tijelo	Ispitno tijelo	Ispitno tijelo	$T_{sr}$ , °C
		1	2	3	
<b>SLLLS</b>	$T$ , °C	50	53	51	51,3
<b>LLSSL</b>	$T$ , °C	51	51	50	50,7
<b>LSLSS</b>	$T$ , °C	63	59	59	60,3
<b>LLLLL</b>	$T$ , °C	54	51	54	53

Iz tablice je vidljivo kako hibridni kompozit 3 s kombinacijom slaganja vlakana LSLSS ima najvišu izmjerenu temperaturu pri kojoj je došlo do deformacije uzorka. To znači da se taj materijal pokazao najboljim za primjenu pri povišenim temperaturama jer će najduže zadržati svoj prvobitni oblik, strukturu i mehanička svojstva. Također, karakterizira ga manja sklonost deformacijama ili oštećenjima pod utjecajem toplinskog opterećenja. Najsigurniji je za primjenu u automobilske, zrakoplovne te drugim industrijama gdje je toplinska stabilnost materijala iznimno važna. Zanimljiva je činjenica da je takva svojstva pokazao upravo hibridni kompozit 3 koji ima lanena vlakna u vanjskim slojevima, ali ujedno sadrži i staklena vlakna. S obzirom da su staklena vlakna čvrsta i kruta, kada se nalaze u unutarnjim slojevima mogu pridonijeti dodatnoj mehaničkoj potpori cijele strukture čime povećavaju stabilnost oblika i otpornost na deformacije. Može se zaključiti kako kombinacija prirodnih i sintetskih vlakana zaista pruža prednosti u odnosu na svaka vlakna zasebno.

## 6.4. Pregled rezultata

U tablici 22 dan je pregled svih rezultata, kao i redoslijed kvalitete za ispitana svojstva.

**Tablica 22. Pregled srednjih vrijednosti svih rezultata**

Kompozit	Debljina, mm	Gorenje, min	Tvrdća, N/mm <sup>2</sup>			Martens temp., °C	Gorenje red.*	Tvrdća red.**	Martens temp. red.***
			10 s	30 s	60 s				
<b>SLLLLS</b>	5,52	1:34	109	104	101	51,3	2	1	1
<b>LLSSLL</b>	5,60	1:30	118	113	110	50,7	2	2	1
<b>LSLLSL</b>	5,67	1:06	124	119	115	60,3	4	4	4
<b>SSSSSS</b>	2,98	0:65	126	123	122	-	5	5	-
<b>LLLLLL</b>	6,65	1:39	118	113	110	53	1	2	3

\* Od najsporijeg gorenja prema bržem

\*\* Od najmanje tvrdoće prema većoj

\*\*\* Od najniže temperature postojanosti oblika prema najvišoj

Vidljivo je da kompozit ojačan staklom gori vrlo brzo, dok onaj ojačan lanom gori najsporije. Hibridi SLLLLS i LLSSLL gore tek nešto brže od čistog lana, što može biti i greška u mjerenju. Hibrid LSLLSL gori primjetno brže, no ipak puno sporije nego kompozit ojačan staklom. Kompozit ojačan samo staklom neočekivano se najlošije ponaša pri gorenju, međutim treba uzeti u obzir da su staklena vlakna u ovom istraživanju puno tanja od lanenih pa je i ta ploča gotovo upola tanja od hibrida, dok je kompozit ojačan samo lanenim vlaknima najdeblji. Iz tog razloga najbolje je usporediti hibride, gdje se pri gorenju LSLLSL ponaša najlošije, a preostala dva podjednako.

Kompozit ojačan samo staklenim vlaknima ima najvišu tvrdoću. Međutim njegova debljina od približno 3 mm je manja od preporučene debljine od 4 mm, koja je propisana kako bi se izbjegao utjecaj čelične podloge na rezultat. Stoga je najviša tvrdoća ovog kompozita možda posljedica pretanke ploče. Od hibrida, kompozit LSLLSL ima najvišu tvrdoću dok hibrid sa staklenim vlaknima u površinskom sloju SLLLLS, suprotno očekivanjima, ima najnižu tvrdoću.



---

Hibrid LSLLSL je superioran ostalim hibridima i po temperaturi postojanosti oblika, koja se mjeri pod opterećenjem. Preostala dva hibrida imaju podjednaku temperaturu postojanosti oblika.

## 7. ZAKLJUČAK

Hibridni kompoziti su suvremeni materijali koji se koriste u mnogim industrijama zbog svojih povoljnih svojstava. Mogućnost kombinacije različitih vrsta vlakana i dizajniranja željenih svojstava je ljudima uveliko olakšala život, no kao i za sve ostale materijale, ključno pitanje je kako će se oni ponašati u slučaju nepredviđenih situacija poput požara i koliko su sigurni za upotrebu i zdravlje ljudi. Zbog toga je provedeno istraživanje gorivih svojstva kompozitnih materijala, mjerenje tvrdoće i Martens postupak ispitivanja otpornosti na toplinu.

Za potrebe ovog rada izrađeno je pet vrsta hibridnih kompozitnih materijala koji su građeni od epoksidne smole kao matrice i staklenih te lanenih vlakana kao ojačalo. Svaki kompozit ima šest slojeva vlakana, no ona su slagana na različite načine. Kombinacije su bile: SLLLLS, LLSSLL, LSLLSL, SSSSSS, LLLLLL, pri čemu S označava sloj staklenih vlakana, a L sloj lanenih vlakana. Cilj je bio istražiti kako raspored slaganja vlakana utječe na goriva svojstva kompozita i postoji li razlika kada su staklena, odnosno lanena vlakna, u vanjskim slojevima kompozita. S obzirom na svojstva vlakana, očekivanje je bilo da će se među hibridima kompozit sa staklenim vlaknima u površinskom sloju ponašati superiorno ostalim hibridima.

Rezultati pokazuju kako svi testirani materijali spadaju u klasu K2 otpornosti na gorenje. Ova klasa obuhvaća materijale s ograničenom učinkovitošću na požare, odnosno nije moguća primjena u industrijama poput zrakoplovne gdje je otpornost na gorenje zahtjev od najveće važnosti. Kompozit 5 izrađen od šest slojeva lanenih vlakana se pokazao najboljim pri ispitivanju otpornosti na gorenje s najduljim vremenom potrebnim da plamen dosegne mjernu oznaku. S druge strane, kompozit 4 sa šest slojeva staklenih vlakana je bio najlošiji i bilo je potrebno samo 36 sekundi da plamen dosegne mjernu oznaku. Rezultati su poprilično neočekivani jer su staklena vlakna ta koja imaju manju zapaljivost i veću otpornost na gorenje. Najvjerojatniji razlog je mala debljina ploče sa staklenim vlaknima. Također, mogući razlog zašto je to tako je postojanje šupljina i zaostalog zraka nastalih pri proizvodnji, ali i činjenica da su lanena vlakna prilikom izrade kompozita upila veliku količinu smole.

Od hibrida kompozit LSLLSL se najlošije ponaša pri gorenju, dok ima najbolja mehanička svojstva. Nejasno je, međutim, zbog čega među hibridima onaj sa staklom u vanjskim slojevima SLLLLS nema najbolju otpornost gorenju, najvišu tvrdoću i otpornost savijanju pri povišenoj temperaturi, s obzirom da su vanjski slojevi pri savijanju navise opterećeni, a staklo je relativno neosjetljivo na povišene temperature. Za razumijevanje ovog ponašanja potrebna je dublja analiza mikrostrukture hibrida.

---

Ispitivanje gorivih svojstava hibridnih kompozitnih (i ostalih) materijala je vrlo važno jer se time može unaprijediti otpornost materijala na požare, poboljšati njihova svojstva, razviti novi izdržljiviji materijali i ono najvažnije – povećati sigurnost ljudi.

**LITERATURA**

- [1] Nagavally, R. R.: Composite materials – History, types, fabrication, techniques, advantages, and applications, Kakatiya Institute of Technology & Science, India, 2017.
- [2] Lambrache, N., Renagi, O., Olaru, L., N'Drelan, B.: Composite Materials with Natural Fibers, National University of San Luis, Argentina, 2022.
- [3] SP Systems Guide to Composites
- [4] Admatis Ltd. - Material science, sandwich structures, composites, honeycom, metal foam, aluminium foam sandwich, AFS, dostupno na: [https://www.admatis.com/eng/competencies\\_material\\_science\\_sandwich.html](https://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html) (zadnji pristup 7.3.2023.)
- [5] Wang, R. M., Zheng S. R., Zheng, Y. P.: Polymer matrix composites and technology, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, UK, 2011.
- [6] Mohammed, I., Abu Talib, A. R., Hameed Sultan, M. T., Jawaid, M., Ariffin, A. H., Saadon, S.: Mechanical Properties of Fibre-Metal Laminates Made of Natural/Synthetic Fibre Composites, Selangor, 2018.
- [7] Assarar, M., Scida, D., El Mahi, A., Poilane, C., Ayad, R.: Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax–fibres and glass–fibres, France, 2010.
- [8] Natural fiber composites – a practical guide for industrial utilization, dostupno na: <https://www.fiberjournal.com/natural-fiber-composites-a-practical-guide-for-industrial-utilization/> (zadnji pristup 9.3.2023.)
- [9] Zhu, J., Zhu, H., Njugwana, J., Abhyankar, H.: Recent Development of Flax Fibres and Their Reinforced Composites Based on Different Polymeric Matrices, Cranfield University, Cranfield, 2013.
- [10] Wisnom, M. R.: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, University of Bristol, UK, 2023.
- [11] Chawla, K. K.: Encyclopedia of Materials: Science and Technology, USA, 2001.
- [12] Zweben, C. H.: Encyclopedia of Condensed Matter Physics, USA, 2005.
- [13] Shioya, M., Kikutani, T.: Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology, University of London, UK, 2015.
- [14] Mochane, M. J., Mokhena, T. C., Mokhothu, T. H., Mtibe, A., Sadiku, E. R., Ray, S. S., Ibrahim, I. D., Daramola, O. O.: Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review, South Africa, 2018.

- 
- [15] Swolfsa, Y., Verpoesta, I., Gorbatikha, L.: Recent advances in fibre-hybrid composites: Materials selection, opportunities and applications, Department of Materials Engineering, Belgium, 2019.
- [16] Gururaja, M. N., Hari Rao, A. N.: A Review on Recent Applications and Future Prospectus of Hybrid Composites, Department of Mechanical Engineering, India, 2011.
- [17] CompositesWorld: Measuring and improving fire resistance in composites, dostupno na: <https://www.compositesworld.com/articles/measuring-and-improving-fire-resistance-in-composites> (zadnji pristup 22.3.2023.)
- [18] Mouritz, A. P., Gibson, A. G.: Fire Properties of Polymer Composite Materials, RMIT University, University of Newcastle-upon-Tyne Centre for Composite Materials Engineering, England, UK, 2006.
- [19] Gandhi, S., Lyon, R., Speitel, L.: Potential Health Hazards from Burning Aircraft Composites, Federal Aviation Administration, New Jersey, 1999.
- [20] Norma DIN 53 438 - Ispitivanje zapaljivih materijala: Odgovor na paljenje malim plamenom