

# Primjena polimernih kompozita u izradi dijela HALE letjelice

---

**Matošević, Tamara**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*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:235:454853>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tamara Matošević**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Tamara Matošević

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na zanimljivoj temi rada i podršci tijekom pisanja istog te dr.sc. Mateji Šnajdar Musa na stručnim savjetima.

Također se zahvaljujem dipl. ing. Danijelu Drezgi na stručnim savjetima i literaturi te Božidaru Bušetinčanu na velikoj pomoći u eksperimentalnom dijelu rada.

Tamara Matošević



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tamara Matošević**

Mat. br.: 0035189951

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena polimernih kompozita u izradi dijela HALE letjelice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of PMC in Manufacturing of HALE Plane Part**

Opis zadatka:

HALE (High Altitude Long Endurance) letjelice predstavljaju područje od sve većeg interesa u zrakoplovstvu. Na letne karakteristike tih letjelica, osim same konstrukcije vrlo veliki utjecaj imaju materijali od kojih su one izrađene.

U uvodnom dijelu rada potrebno je analizirati konstrukciju HALE letjelica te navesti materijale koji se koriste u izradi pojedinih dijelova. Poseban naglasak treba biti na materijalima od kojih su izrađeni pojedini dijelovi krila, konkretno ramenjača, rebra i oplata.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati dio krila HALE letjelice koji je moguće izraditi od polimernog kompozita. Uvidom u zahtjeve koji se postavljaju na taj dio potrebno je definirati materijal matrice i ojačala za njegovu izradu te tehnologiju izrade. Prema tako određenim parametrima potrebno je izraditi uzorke polimernog kompozita te analizirati njihovu strukturu i osnovna mehanička svojstva. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke o primjeni tog materijala i tehnologije u izradi dijela krila HALE letjelice.

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

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest bespilotnih letjelica .....	1
2. HALE LETJELICE .....	6
2.1. Namjena .....	6
2.2. Zahtjevi .....	6
2.3. Konstrukcija.....	7
3. KRILO KOD HALE LETJELICA .....	12
3.1. Konstrukcija krila.....	12
3.2. Materijali za izradu krila .....	14
3.2.1. Metali .....	14
3.2.2. Drvo .....	14
3.2.3. Kompoziti.....	14
3.2.4. Materijali u konstrukciji krila HALE letjelice .....	15
4. POLIMERNI KOMPOZITI.....	18
4.1. Definicija i podjela kompozitnih materijala.....	18
4.2. Vlaknima ojačani polimerni kompoziti.....	20
4.2.1. Polimerni materijali za matricu .....	22
4.2.2. Svojstva najčešće primjenjivanih polimernih matrica u zrakoplovnim konstrukcijama .....	23
4.2.2.1. PLASTOMERI .....	23
4.2.2.2. DUROMERI .....	24
4.2.3. Vlakna za polimerne kompozite .....	25
4.2.4. Vrste vlakana i njihova svojstva .....	26
4.2.4.1. Staklena vlakna .....	26
4.2.4.2. Aramidna vlakna .....	27
4.2.4.3. Ugljična vlakna .....	27
4.2.4.4. Borova vlakna .....	28
4.2.5. Oblici vlaknatih ojačanja .....	30
4.2.6. Mehanička svojstva polimernih kompozita .....	31
4.2.7. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita .....	33
4.2.7.1. Pravilo miješanja.....	33
4.2.7.2. Modul elastičnosti.....	33
4.2.7.3. Vlačna čvrstoća.....	33
4.2.7.4. Diskontinuirana vlakna .....	33
4.2.8. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita.....	34
4.2.8.1. Omjer duljine i promjera vlakana .....	34

---

4.2.8.2.	Volumni udio vlakana.....	34
4.2.8.3.	Usmjerenost vlakana.....	34
4.2.8.4.	Svojstva vlakana i matrice .....	34
4.3.	Hibridni kompoziti .....	35
4.4.	Utjecaj šupljina i vlage na svojstva polimernih kompozita .....	35
5.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	37
5.1.	Cilj eksperimentalnog rada .....	37
5.2.	Izrada kompozita.....	37
5.2.1.	Čišćenje i nanošenje odvajala .....	37
5.2.2.	Nanošenje slojeva smole i vlakana .....	38
5.2.3.	Umrežavanje i odvajanje komada od kalupa .....	40
5.3.	Izrezivanje uzoraka .....	41
5.4.	Ispitivanje mehaničkih svojstava i rezultati .....	42
5.4.1.	Ispitivanje žilavosti i rezultati .....	42
5.4.2.	Ispitivanje savojne čvrstoće i rezultati .....	45
5.4.3.	Ispitivanje vlačne čvrstoće i rezultati.....	47
6.	ZAKLJUČAK.....	49
	LITERATURA.....	50

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Aerial Target [4].....	2
Slika 2.	Kettering Bug [5].....	2
Slika 3.	Larynx [6].....	3
Slika 4.	Fieseler Fi 103 V-1 [7] .....	3
Slika 5.	Aerosonde Laima [8].....	4
Slika 6.	Global Hawk Southern Cross II [9].....	5
Slika 7.	Odnos vitkosti krila kod Global Hawk-a i Boeinga 747 [10].....	8
Slika 8.	Global Hawk [14].....	9
Slika 9.	Predator B [15] .....	9
Slika 10.	HALE PW-114 [1] .....	10
Slika 11.	HALE PW-114 [1] .....	10
Slika 12.	Aquila [16].....	11
Slika 13.	Primarne konfiguracije krila [12] .....	12
Slika 14.	Konstrukcija krila [17] .....	13
Slika 15.	Poprečni presjek krila zrakoplova HALE PW-114 [1].....	15
Slika 16.	Harve-2 [19] .....	16
Slika 17.	Krilo kod Harve-2 [19].....	16
Slika 18.	Ojačavajuća traka [19].....	17
Slika 19.	Krilce kod zrakoplova Harve-2 [19].....	17
Slika 20.	Osnovne vrste kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [20] .....	19
Slika 21.	Slaganje različito usmjerenim vlaknima ojačanih slojeva kod slojevitih kompozita [20] .....	19
Slika 22.	Shematski prikaz strukture koja se sastoji od površinskih slojeva i jezgre u obliku saća [20].....	20
Slika 23.	Osnovni načini rasporeda vlaknatih ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno položena vlakna [20].....	22
Slika 24.	Vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti različitih vrsta matrica [21].....	22
Slika 25.	Oblici, moguće prostorne raspodjele i usmjerenosti vlaknatih ojačala [21] .....	30
Slika 26.	Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [20].....	32
Slika 27.	Odvajalo i staklene ploče.....	37
Slika 28.	Otvoreni kalup .....	38
Slika 29.	Umrežavalo.....	38
Slika 30.	Poliesterska smola .....	39
Slika 31.	Staklena vlakna.....	39
Slika 32.	Opterećeni komadi kompozita.....	40
Slika 33.	Gotovi komadi kompozita .....	40
Slika 34.	Numeriranje uzoraka kompozita .....	42
Slika 35.	Charpyjev bat.....	43
Slika 36.	Kidalica.....	45
Slika 37.	Uzorak oslonjen u tri točke na kidalici.....	45
Slika 38.	Kidalica.....	47



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Zahtjevi na HALE-UAV BW konfiguraciju [1].....	7
Tablica 2. Prednosti i nedostaci vlaknima ojačanih polimernih kompozita [21] .....	21
Tablica 3. Karakteristična svojstva nekih vlakana [21].....	29
Tablica 4. Usporedba svojstava glavnih vrsta vlakana [21] .....	29
Tablica 5. Mehanička svojstva nekih vlaknima ojačanih polimera [21] .....	32
Tablica 6. Svojstva hibridnih kompozita [21] .....	35
Tablica 7. Dimenzije uzoraka za ispitivanje savojne čvrstoće prema normi HRN EN ISO 14125 .....	41
Tablica 8. Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita s dva sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici .....	44
Tablica 9. Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita s tri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici .....	44
Tablica 10. Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita sa četiri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici .....	44
Tablica 11. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita s dva sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici .....	46
Tablica 12. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita s tri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici .....	46
Tablica 13. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita sa četiri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici .....	46
Tablica 14. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita s dva sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici .....	48
Tablica 15. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita s tri sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici .....	48
Tablica 16. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita sa četiri sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici .....	48

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
<i>A</i>	-	Vitkost krila
<i>B</i>	m	Raspon krila
<i>L</i>	m	Duljina vlakna
<i>D</i>	m	Promjer vlakna
<i>E</i>	GPa	Modul elastičnosti
<i>P</i>	kg/ m <sup>2</sup>	Gustoća
<i>R<sub>m</sub></i>	MPa	Vlačna čvrstoća
<i>G</i>	GPa	Modul smičnosti
<i>N</i>	-	Poissonov koeficijent
<i>ρ<sub>c</sub></i>	kg/ m <sup>2</sup>	Gustoća kompozita
<i>ρ<sub>m</sub></i>	kg/ m <sup>2</sup>	Gustoća matrice
<i>ρ<sub>f</sub></i>	kg/ m <sup>2</sup>	Gustoća vlakana
<i>V<sub>m</sub></i>	-	Volumni udio matrice
<i>V<sub>f</sub></i>	-	Volumni udio vlakana
<i>E<sub>c</sub></i>	GPa	Modul elastičnosti kompozita
<i>E<sub>m</sub></i>	GPa	Modul elastičnosti matrice
<i>E<sub>f</sub></i>	GPa	Modul elastičnosti vlakna
<i>H</i>	mm	Debljina uzorka
<i>B</i>	mm	Širina uzorka
<i>L</i>	mm	Duljina uzorka
<i>L</i>	mm	Duljina uzorka između hvatišta stroja za mjerenje
<i>E</i>	J	Energija
<i>F</i>	N	Sila

---

**SAŽETAK**

U ovom radu analizirana je konstrukcija HALE (High Altitude Long Endurance) bespilotnih letjelica te materijali koji se koriste za njihovu izradu.

Uvodni dio opisuje prošlost bespilotnih letjelica te kada je počela upotreba HALE letjelica. Dalje su opisani polimerni kompoziti s vlaknima, čija je uloga značajna kod izrade krila HALE letjelica te njihova svojstva. U eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su polimerni kompoziti kojima su ispitana mehanička svojstva. Na temelju ispitanih mehaničkih svojstava donesen je zaključak.

Ključne riječi: HALE, polimerni kompoziti, bespilotne letjelice

---

**SUMMARY**

In this study, the structure of HALE (Long Altitude Long Endurance) unmanned aerial vehicles and materials used for their construction was analyzed.

Introduction part describes the history of unmanned aerial vehicles and the time when use of HALE aircraft began. Further, fiber-reinforced polymers and their properties are described, whose role is significant in the design of the HALE wing structure. In the experimental part, polymeric composites with fibres were made and tested for mechanical properties. Based on the examined mechanical properties, a conclusion was made.

Key words: HALE, polymeric composites, unmanned aerial vehicle

## 1. UVOD

Mnogi stručnjaci predviđaju da će se bespilotne letjelice (UAV - Unmanned Aerial Vehicle) unutar 10 godina koristiti za mnoge civilne i vojne potrebe. Da bi se to stvarno i dogodilo potreban je:

- tehnološki razvoj, pogotovo povećanje pouzdanosti, sigurnosti i poboljšanje performansi
- smanjenje troškova proizvodnje i održavanja
- veći broj letjelica u upotrebi i prihvaćenost od strane civilnih zrakoplovnih vlasti [1].

Posebnu pozornost plijene bespilotne letjelice nove generacije, takozvane HALE letjelice (High Altitude Long Endurance), koje mogu ostati dugo u zraku i to pri ekstremno velikim visinama. Dugotrajni letovi i ekstremne visine zahtijevaju posebnu konstrukciju i izdržljive materijale od kojih su izrađene HALE letjelice. Polimerni kompoziti su trenutno u širokoj upotrebi za izradu dijelova krila ovih letjelica i upravo o njima će biti nešto više rečeno u ovom radu.

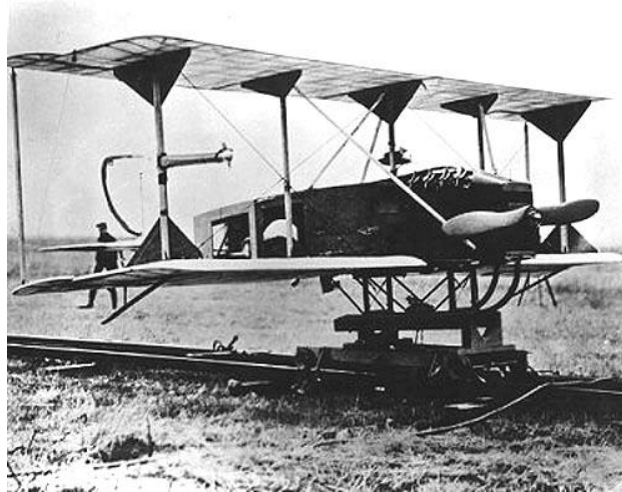
### 1.1. Povijest bespilotnih letjelica

Prvi zapisi o korištenju bespilotnih letjelica u vojne svrhe potječu iz 1849. godine kada je Austrija sa svojeg vojnog broda "Vulcano" napala Veneciju bespilotnim balonima napunjenima eksplozivom. Nekoliko balona je ispunilo svoju misiju dok je ostale vjetar otpuhao nazad preko austrijskih linija. Iako se baloni danas ne mogu svrstati u grupu bespilotnih letjelica, ovim događajem je vojska uvidjela mogućnost korištenja bespilotnih letjelica u vojne svrhe te se time i nastavio njihov razvoj.

Prvi pravi zrakoplovi bez posade izgrađeni su tijekom i kratko iza Prvog svjetskog rata [2].

Neke od važnijih godina za razvoj bespilotnih letjelica su:

- 1916. godina kada je izgrađen "Aerial Target" (Slika 1.) čija je glavna namjena bila napad na Zeppeline i kojim se upravljalo sa zemlje [3].



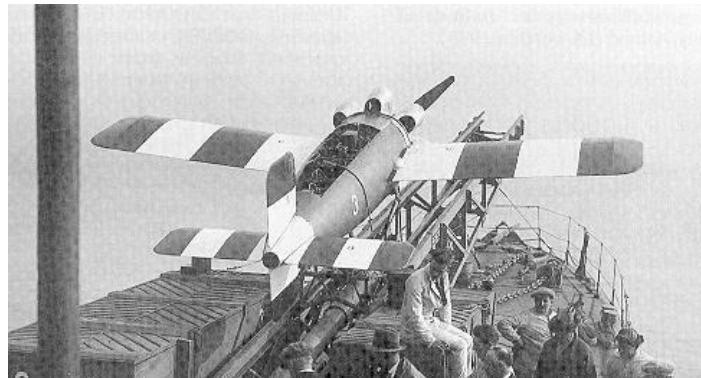
**Slika 1. Aerial Target [4]**

- 1918. godina - pojavila se prva letjelica koju je izgradila vojska za svoje potrebe, "Kettering Bug" (Slika 2.). Iako je bila jako napredna za to doba, rat je završio i njen razvoj je stao, a da nije bila ni korištena u vojne svrhe [2].



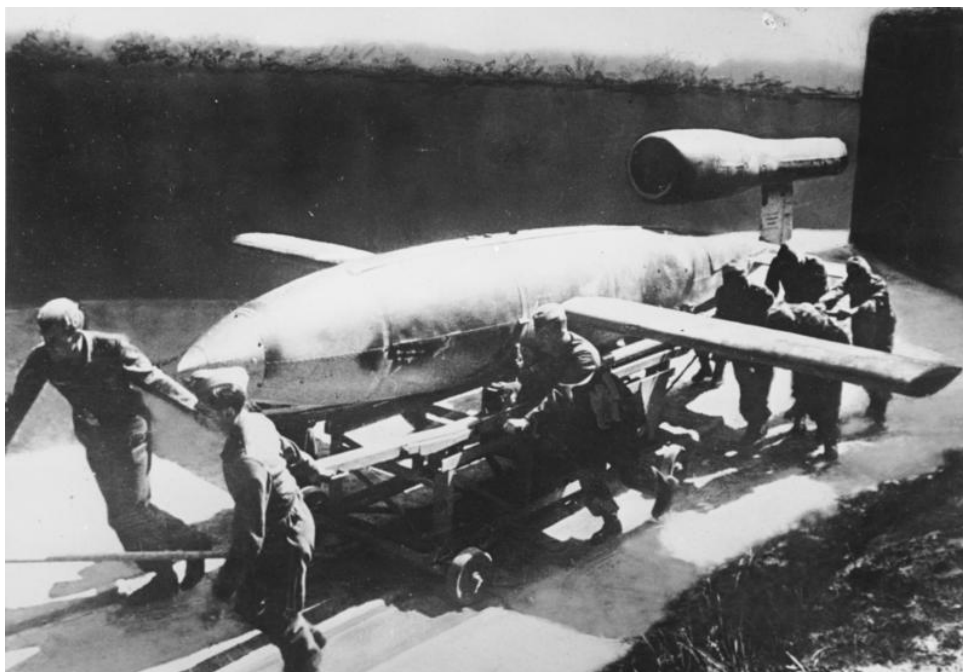
**Slika 2. Kettering Bug [5]**

- 1922. godina – prvo lansiranje bespilotne letjelice "RAE 1921 Target" s nosača zrakoplova "HMS Argus".
- 1924. godina – prvi uspješan let bespilotne letjelice "RAE 1921 Target" koji je trajao 39 minuta.
- 1927. godina – prvi let bespilotne letjelice "Larynx" (Slika 3.) Letjelica je bila monoplana jednostavnih linija koja je katapultirana sa bojnih brodova i bila je preteča današnjih krstarećih projektila [3].



**Slika 3. Larynx [6]**

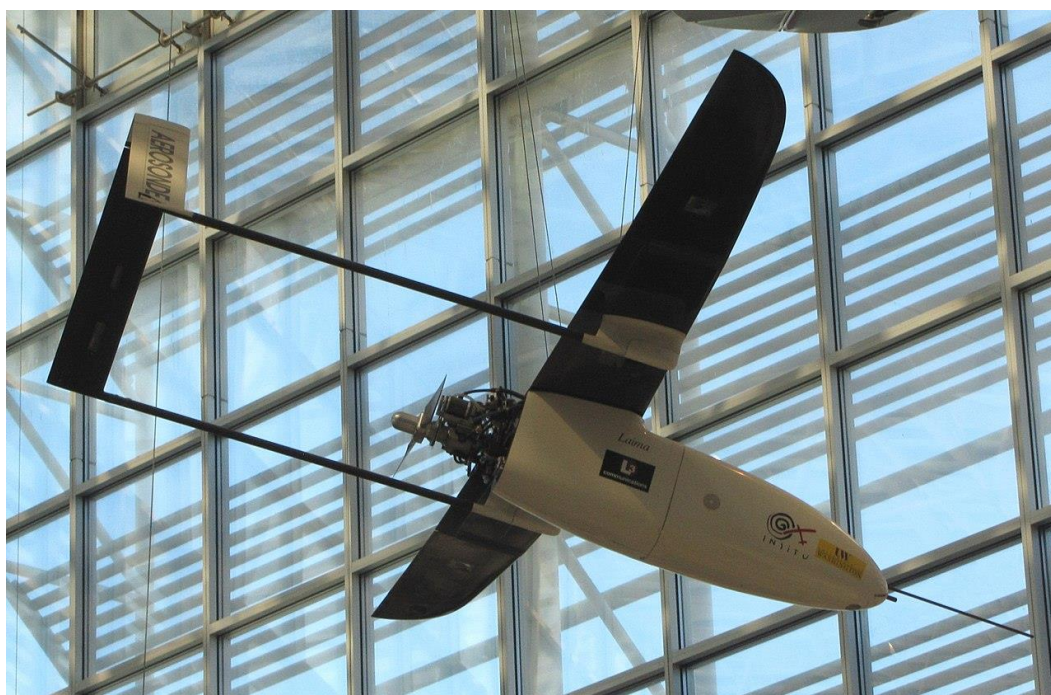
- 1931. godina - Britanci su razvili "Fairey Queen", radio upravljaju bespilotnu letjelicu i izradili tri prototipa. Prema priči samo ime, "Queen Bee" (pčela matica) dovelo je do upotrebe izraza "drone", što bi u prijevodu bilo "trut", za sve bespilotne letjelice, posebno one radio upravljive.
- 1944. godina – prvo korištenje njemačke bespilotne letjelice u ulozi krstarećeg projektila "Fieseler Fi 103 V-1" (Slika 4.) [3].



Bundesarchiv, Bild 146-1973-029A-24A  
Foto: Lystak | 1944/1945

**Slika 4. Fieseler Fi 103 V-1 [7]**

- 19. listopada 1944. godine – prvo borbeno korištenje bespilotne letjelice američke mornarice "TDR-1" koja je bombardirala japanske topničke položaje na otoku Ballale.
- 1946. godina - prvo korištenje bespilotnih letjelica za znanstvena istraživanja, provedena dronom "Northrop P-61 Black Widow" za letove u oluje od strane američkog meteorološkog ureda za prikupljanje meteoroloških podataka.
- 1955. godina - prvi let izviđačke bespilotne letjelice "Northrop Radioplane SD-1 Falcon/Observer" konstruirane od strane američke i britanske vojske [3].
- 1998. godina – prvi transatlantski let male bespilotne letjelice "Aerosonde Laima" između Kanade i Škotske, koja je konstruirana za prikupljanje meteoroloških podataka, u trajanju od 26 sati i 45 minuta (Slika 5.) [8].



**Slika 5. Aerosonde Laima [8]**

- 2001. godine – prvi transpacifički let bespilotne letjelice "Northrop Grumman Global Hawk Southern Cross II" (Slika 6.) između SAD-a i Australije u trajanju od 22 sata. To je početak ere High Altitude Long Endurance bespilotnih letjelica. Ova letjelica je mogla letjeti 36 sati do visine od 19,8 km [3,9].





**Slika 6. Global Hawk Southern Cross II [9]**

## 2. HALE LETJELICE

### 2.1. Namjena

HALE (High Altitude Long Endurance) bespilotne letjelice su letjelice koje mogu letjeti na visinama iznad 15 km te mogu biti u zraku duže od 24 sata. Najčešće se koriste za vojne potrebe izviđanja i nadzora. Naoružavaju se kako bi se smanjilo vrijeme reakcije vojske na uočavanje protivničke baze, a tako naoružane mogu se koristiti i za zračne borbe. Njima se obično upravlja pomoću računala iz zrakoplovne baze [10].

Najznačajnije primjene ovih letjelica su:

- Opasne misije gdje je uporaba bespilotnih letjelica jedino rješenje. To uključuje kretanje otrovanim okolišem, nadgledanje područja uništenih uslijed nuklearne katastrofe, ekstremno velike visine te opasni vremenski uvjeti.
- Znanstvene misije gdje je uporaba bespilotnih letjelica najbolje rješenje poput snimanja okoliša, skupljanje podataka iz atmosfere, predviđanje vremenskih uvjeta te skupljanje podataka za oceanografe.
- Komercijalne uporabe gdje bespilotne letjelice nisu jedino rješenje, ali su ekonomski održive poput snimanja i praćenja stanja u prometu, nadzora graničnih prijelaza te protupožarni nadzor divljih područja [1].

### 2.2. Zahtjevi

Zahtjevi koji se stavljaju pred konstruktora zrakoplova su:

- performanse zrakoplova (koristan teret i volumen, koliko daleko i koliko brzo će se taj teret prevoziti, koliko dugo i na kojoj visini, udobnost putnika, instrumenti i radio-oprema) i
- troškovi (cijena sustava i rezervnih dijelova, omjer sati održavanja i sati leta...) [11].

Kod bespilotnih letjelica nema putnika niti posade pa se tako udobnost putnika, masa putnika i volumen koji zauzimaju ne postavljaju kao zahtjev.

Na HALE bespilotne letjelice se postavljaju zahtjevi kao što su: velika visina leta (iznad 15 km), određena brzina leta na visini zahtijevanog kruženja, izdržljivost preko 24 sata, veliki

domet, korištenje konvencionalnih uzletišta za polijetanje i slijetanje, određena masa korisnog tereta, vrijeme penjanja do neke visine, komunikacijski i radarski sustavi [1].

Primjer glavnih zahtjeva na HALE-UAV BW konfiguraciju dan je tablicom 1:

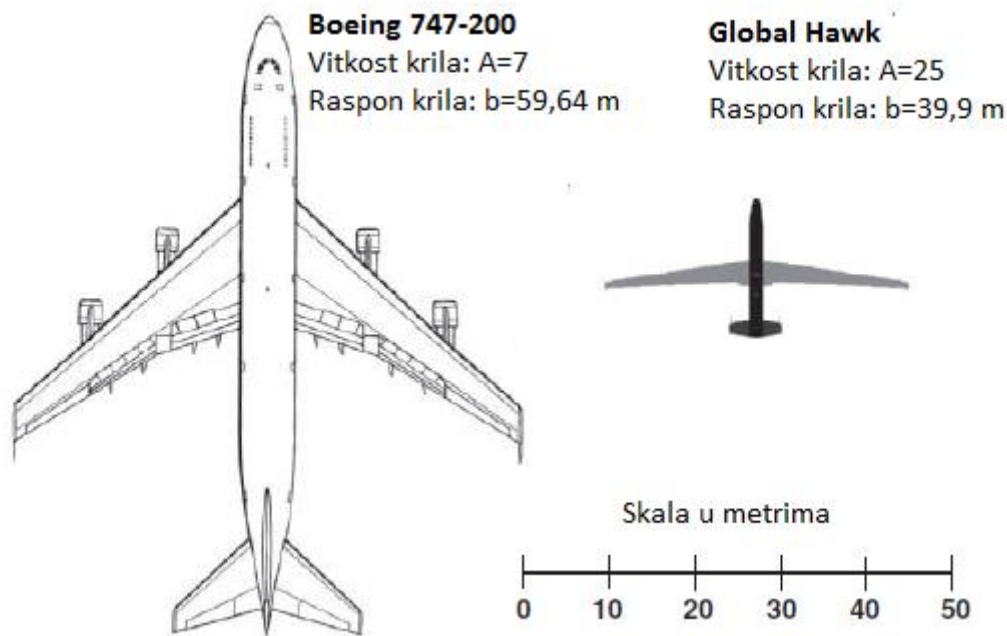
**Tablica 1. Zahtjevi na HALE-UAV BW konfiguraciju [1]**

<b>PARAMETAR</b>	<b>ZAHTJEV</b>
<b>Visina</b>	18,3 km (60 000 ft)
<b>Brzina leta na visini zahtijevanog kruženja (loiter altitude)</b>	0,6 Ma
<b>Izdržljivost</b>	24 h
<b>Domet</b>	1000 km
<b>Polijetanje i slijetanje</b>	s konvencionalnih uzletišta
<b>Masa korisnog tereta</b>	500 kg
<b>Penjanje</b>	16,76 km (55 000 ft) u 30 min
<b>Komunikacijski sustav</b>	SATCOM pojačana antena

### 2.3. Konstrukcija

Konstrukcija HALE letjelice omogućava čvrstoću i krutost uz očuvanje geometrijskog oblika. Sve komponente se pričvršćuju za glavnu konstrukciju tako da konstrukcija "drži zrakoplov na okupu". Konstrukcijski elementi podnose naprezanja uslijed savijanja, uvijanja, smicanja ili njihove kombinacije. Bepilotna letjelica podnosi opterećenja tijekom polijetanja, slijetanja, manevriranja, jakog vjetrova, upravljanja na zemlji itd. Zato je dostupna široka paleta materijala za konstrukcije, uključujući metal, drvo i kompozite [12].

HALE letjelice zahtijevaju dugačka i vitka krila za dugotrajan let na velikim visinama. Vitkost krila koja opisuje omjer kvadrata raspona krila i površine krila im je između 20 i 25 što predstavlja veliki izazov konstruktorima. Odnos vitkosti krila kod HALE letjelice Global Hawk i putničkog zrakoplova Boeing 747 može se vidjeti na slici 7.



**Slika 7. Odnos vitkosti krila kod Global Hawk-a i Boeinga 747 [10]**

Raspon krila kod "Global Hawk-a" (Slika 8.) iznosi 39,9 m, a dužina same letjelice je 14,5 m, dok je kod "Predatora B" (Slika 9.) raspon krila 20 m, a dužina 10,6 m. U oba slučaja raspon krila je veći od dužine letjelice. Iz tih razloga je bitno da su krila što lakša te čvršća zbog velikih vibracija, pa se najčešće izrađuju od polimernog kompozita s ugljičnim vlaknima i epoksidnom smolom.

Pošto su HALE letjelice bespilotne, ne zauzima se prostor za posadu i nema potrebe za nošenjem njihove mase tako da takve letjelice mogu ponijeti više goriva od zrakoplova s posadom. Vidljivost iz HALE letjelice je također nebitna jer nema posade pa trup može biti oblikovan na način da ima što manji aerodinamički otpor. Kombinacijom ove dvije stavke letjelica ima mogućnost dužeg trajanja leta nego što je to slučaj kod zrakoplova s posadom.

Repne površine su uglavnom u V izvedbi jer se tako smanjuje radarska vidljivost što je iznimno bitno kod izviđačkih letjelica kao što je "Global Hawk" i izrađuju se od polimernog kompozita s ugljičnim ili po novijem, grafitnim vlaknima, a motor je smješten na zadnjem dijelu trupa [10, 13].

U trupu se nalaze odjeljci za avioniku i korisni teret i najčešće se izrađuje od lakih metala poput aluminija i njegovih legura [13].



**Slika 8. Global Hawk [14]**

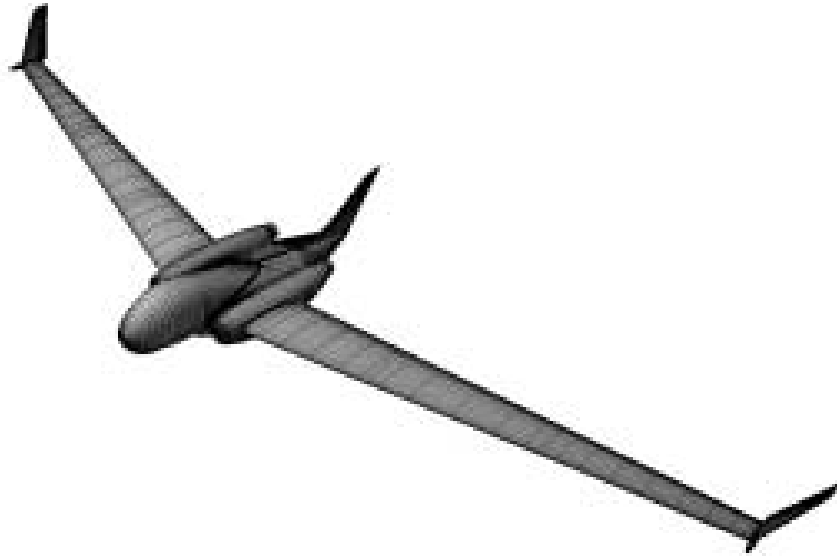


**Slika 9. Predator B [15]**

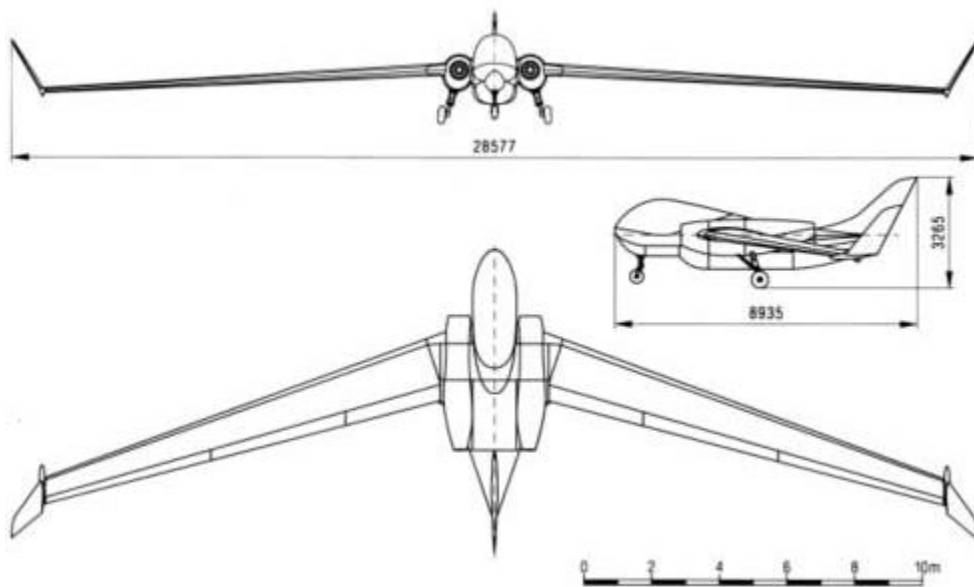
Također, postoje i konfiguracije "spojeno krilo" (BW – Blendend Wing) kao što je to slučaj kod "HALE PW-114" (Slika 10. i 11.), kod koje se ne raspoznaje sasvim očito linija razdvajanja krila i trupa te je kod te konfiguracije letjelica napravljena od metala i kompozitnih materijala. Kontrolne površine na krilu "HALE PW-114" omogućavaju stabilnost oko uzdužne osi zrakoplova dok vertikalni stabilizator zajedno s vrhovima krila omogućava stabilnost oko vertikalne osi. Horizontalnog stabilizatora na ovoj letjelici nema.

"HALE PW-114" je opremljen s uvlačećim podvozjem te s kontroliranom prednjom nogom koja dopušta polijetanje (i slijetanje) sa konvencionalnih uzletišta.

Sustavi korisnog tereta su postavljeni u posebne odvojive spremnike do kojih je lako doći i lako ih je zamijeniti pa se konfiguracija može smatrati modularnom [1].



Slika 10. HALE PW-114 [1]



Slika 11. HALE PW-114 [1]

Danas popularne, solarno pogonjene letjelice imaju za cilj omogućiti konstantan let kroz više ciklusa dan-noć. Najveći tehnički izazov je omogućiti takvim letjelicama dugotrajan let, pri velikim visinama i uz jak vjetar.

Kod solarnih i svih drugih HALE letjelica, specifično opterećenje krila koje je jednako omjeru ukupne mase zrakoplova i površine krila, trebalo bi biti što manje. Uz manje specifično opterećenje krila, manja je i potrebna snaga za pogon letjelice uz povećanje površine postavljenih solarnih ćelija pričvršćenih na krilu. Također, kod solarnih HALE letjelica je potrebna lagana, fina konstrukcija, korištenje odgovarajućih kompozitnih materijala te tanka oplata [12].

Potrebu za solarno pogonjenom HALE letjelicom je uvidio i "Facebook" konstruirajući jednu takvu letjelicu naziva "Aquila" (Slika 12.) koja će imati mogućnost kontinuiranog letenja pri 18,3 km (60 000 ft), 3 mjeseca zbog iznimno male potrošnje energije uz konstantno punjenje. Zbog "Aquile", Internet će biti dostupan velikom broju ljudi u najteže dostupnim područjima [16].



**Slika 12. Aquila [16]**

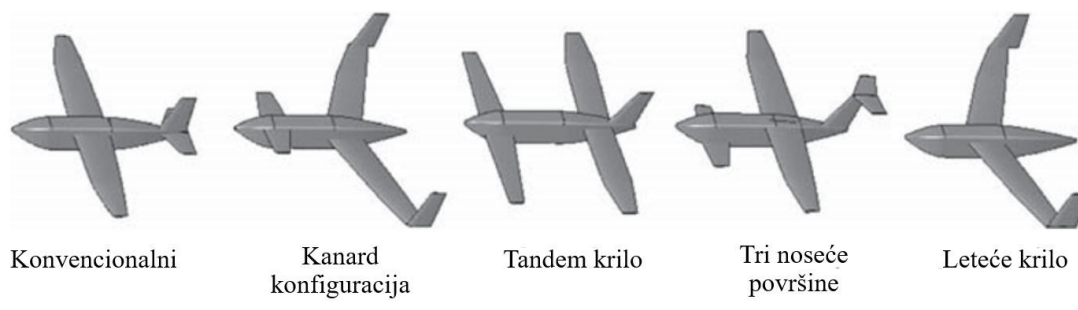
### 3. KRILO KOD HALE LETJELICA

#### 3.1. Konstrukcija krila

Krilo je glavna aerodinamička noseća površina aviona na kojoj se stvara sila uzgona. Najvažniji je dio zrakoplova. O njegovoj konstrukciji i aerodinamičkim osobinama ovise i osobine cijelog zrakoplova.

Konstrukcija krila mora imati dobru čvrstoću kao i dobru krutost. Ukoliko krila velike vitkosti imaju samo dobru čvrstoću, a nedovoljnu krutost, događa se prekomjerno izvijanje u letu i prilikom operacija na zemlji. Zato se zahtijevaju dodatni lagani konstrukcijski materijali da bi se spriječila izvijanja i povećala krutost.

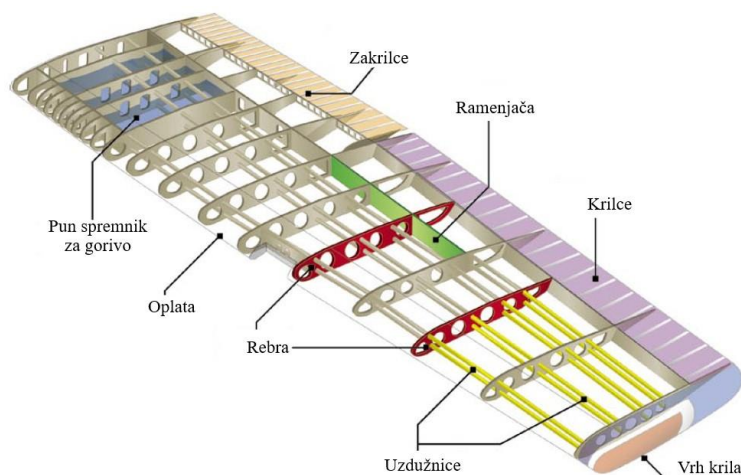
Primarne konfiguracije krila kod bespilotnih HALE letjelica su: konvencionalna konfiguracija, konfiguracija s kanarima (kanard), tandem krilo, tri noseće površine te leteće krilo koje su prikazane na slici 13 [12].



**Slika 13. Primarne konfiguracije krila [12]**

Krila se uglavnom sastoje od ramenjače, uzdužnica, rebara te oplata kako je prikazano na slici 14.





**Slika 14. Konstrukcija krila [17]**

**Ramenjače** su osnovni dio konstrukcije krila. U krilu može biti ugrađena jedna (na manjim zrakoplovima s malim opterećenjima tijekom leta) ili više ramenjača, glavna i pomoćne. Ramenjača na sebe preuzima sve koncentrirane sile koje se javljaju, ona je glavni nosivi element krila koji zajedno s ostalim elementima daje dovoljnu torzijsku krutost i formu krila. Pojas ramenjače na sebe preuzima opterećenja nastala uslijed savijanja, a struk ramenjače preuzima opterećenja nastala uslijed uvijanja i poprečnih sila.

**Uzdužnice** preuzimaju opterećenja uslijed savijanja kao i pojas ramenjače te daju formu krilu.

**Oplata** daje formu krilu, preuzima na sebe aerodinamička opterećenja te zajedno s ostalim elementima daje torzijsku krutost. U izvedbi monoblok krila, oplata na sebe preuzima i opterećenja nastala uslijed savijanja.

**Rebra** povećavaju torzijsku krutost, daju formu krila te podnose aerodinamička opterećenja. Napadni rub je dio krila ispred prednje ramenjače. Kao najizloženija površina krila tijekom leta prima velika dinamička opterećenja. Konstruktivno su ojačana gušćim postavljanjem uzdužnica te pojačavanjem prednjeg dijela rebara. Izlazni rub je stražnji, najtanji dio aerodinamičke površine.

**Vrh krila** (terminezon) je vanjski završetak krila zrakoplova. U novije vrijeme se izrađuje kao winglet, što je mala uzdignuta površina, obično približno okomita na strukturu krila. On sprječava izjednačavanja tlakova na vrhu krila. Uslijed razlike tlakova između donje (pretlak) i gornje (podtlak) strane krila strujnice zraka nastoje prijeći s donje na gonju stranu krila, što dovodi do vrtloženja. Ugradnjom "winglet"-a smanjuje se vrtloženje oko vrha krila čime se

dodatno smanjuje njegov inducirani otpor. Rezultat je smanjenje potrošnje goriva, a ujedno i povećanje doleta zrakoplova [18].

### **3.2. Materijali za izradu krila**

Zrakoplovne konstrukcije izrađuju se od brojnih vrsta metala, drva i kompozitnih materijala. Izbor ovisi o više čimbenika uključujući čvrstoću, krutost, otpornost na lom, otpornost na širenje pukotine, gustoću, radni temperaturni raspon, otpornost na udar, otpornost na koroziju, proizvodni postupak i trošak [12].

#### **3.2.1. Metali**

Metali su uobičajeni kod zrakoplova s posadom, a rijetki kod bespilotnih letjelica. Aluminij, titan i čelik su najčešće korišteni metali u zrakoplovnim konstrukcijama. Aluminij najčešće dolazi u obliku legure gdje legura uz aluminij sadrži i cink, magnezij i bakar. Titan ima veliki odnos čvrstoće i mase, dobru otpornost na toplinu i koroziju, ali i visoku cijenu. Čelik je čvrst i jeftin materijal, ali ima veliku gustoću. Ima dobru otpornost na povišene temperature te dobra mehanička svojstva. Često se koristi kod rešetkastih konstrukcija kao nosač motora.

Prednosti metala su: niska cijena, jednostavnost održavanja, dobra mehanička svojstva, izdržljivost u nepovoljnom okolišu (temperatura, vlažnost, UV, itd.). Razlozi zbog kojih sve bespilotne letjelice, a tako i HALE letjelice, češće koriste kompozite u izradi su ti da kompoziti imaju veći odnos čvrstoće i mase te su lakši za izradu u malim dimenzijama [12].

#### **3.2.2. Drvo**

Drvo je danas rijetko korišteno kao primarni konstrukcijski materijal za bespilotne letjelice. Češće se koristi za sekundarne konstrukcijske i kao jezgra u sendvič kompozitima.

Mnoge ranije bespilotne letjelice su bile od drveta s oplatom od tkanine.

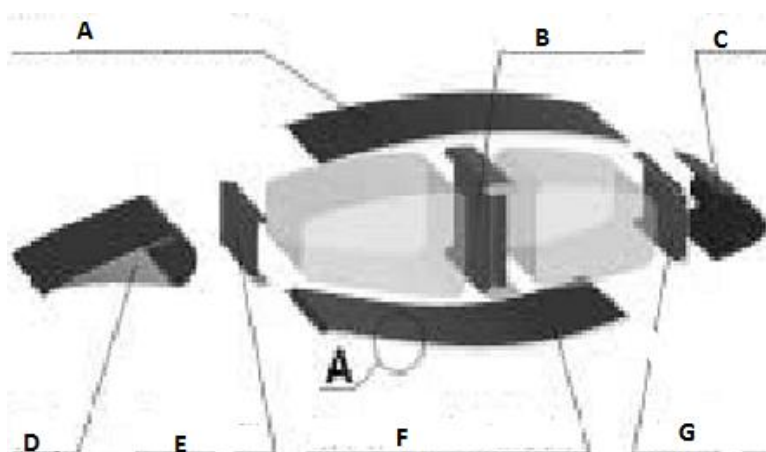
Drvena konstrukcija je otporna na oštećenja i lako se popravlja, a oštećene dijelove je lako uočiti. Glavni nedostaci takve konstrukcije su slaba otpornost na vlagu i nehomogenosti unutar materijala [12].

#### **3.2.3. Kompoziti**

U odnosu na metale, s kompozitima se postiže velika ušteda na masi, oko 20-25%. Ta ušteda na masi proizlazi iz većeg odnosa čvrstoće i gustoće, smanjenja broja potrebnih dijelova te eliminacije velikog broja spojnih elemenata poput, na primjer, zakovica. Dodatna prednost je poboljšana otpornost na koroziju. Uslijed malo jačeg udara može se dogoditi delaminacija slojeva ispod površine što može biti teško uočljivo. Za detekciju takvih oštećenja koriste se nerazorne metode ispitivanja materijala poput ultrazvuka [12].

### 3.2.4. Materijali u konstrukciji krila HALE letjelice

Kompoziti se najviše koriste za izradu dijelova krila kod HALE letjelica. Primjerice, kod letjelice HALE PW-114 (Slika 5. i 6.), krilo je napravljeno tako da su gornja i donja oplata napravljene od sendvič kompozita s jezgrom od poliuretanske pjene. Torzijska kutija koja osim gornje i donje oplate, sadrži i prednju, stražnju i glavnu ramenjaču, izrađena je od ugljik/epoksi kompozita. Pojasevi ramenjače su izrađeni od ugljičnih vlakana (rovinga), a struk ramenjače od sendvič kompozita s jezgrom od poliuretanske pjene i površinskim slojem od ugljičnih vlakana. Kontrolne površine (nos, zakrilca, krilca, elevoni (spoj kormila visine i krilca)) također su napravljene od sendvič kompozita s ugljičnim vlaknima. Poprečni presjek krila je prikazan slikom 15 [1].



Slika 15. Poprečni presjek krila zrakoplova HALE PW-114 [1]

A – gornja oplata od sendvič kompozita

B – glavna ramenjača

C – napadni rub krila

D – izlazni rub krila

E – stražnja ramenjača

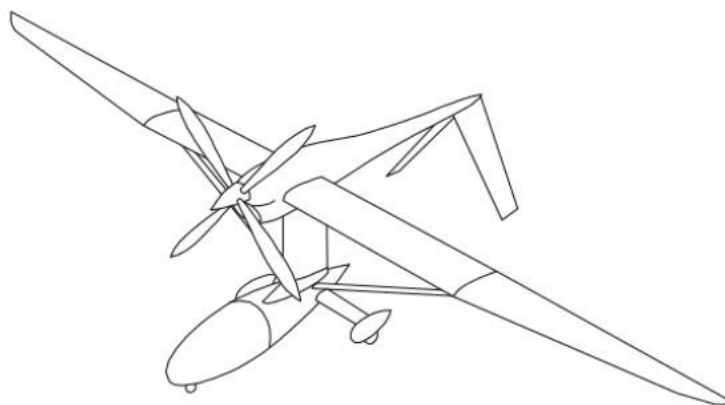
F – donja oplata od sendvič kompozita

G – prednja ramenjača [1]

Tako izrađeno krilo može podnijeti opterećenja nastala usljed savijanja do 20 MPa na najopterećenijem dijelu krila, tj. u korijenu. [1].

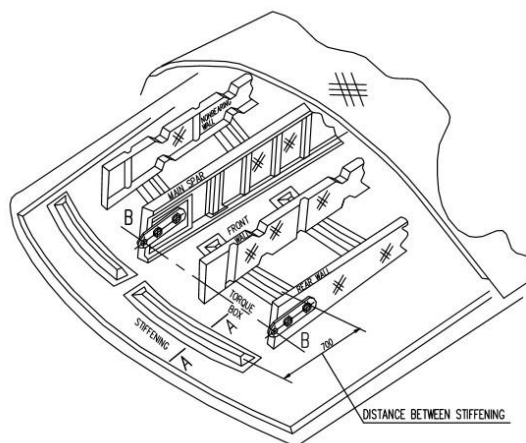
Većina bespilotnih letjelica koriste kompozitne dijelove proizvedene u kalupima. Kompozitni dijelovi koji imaju praznine, poput na primjer rebara, koriste kalupe izrađene pomoću CNC strojeva (Computer Numerically Controlled). Ti kalupi su najčešće od pjene visoke gustoće ili aluminija [12].

Još jedan primjer korištenja kompozitnih materijala u konstrukciji krila, je kod zrakoplova "Harve-2" (Slika 16.) [19].



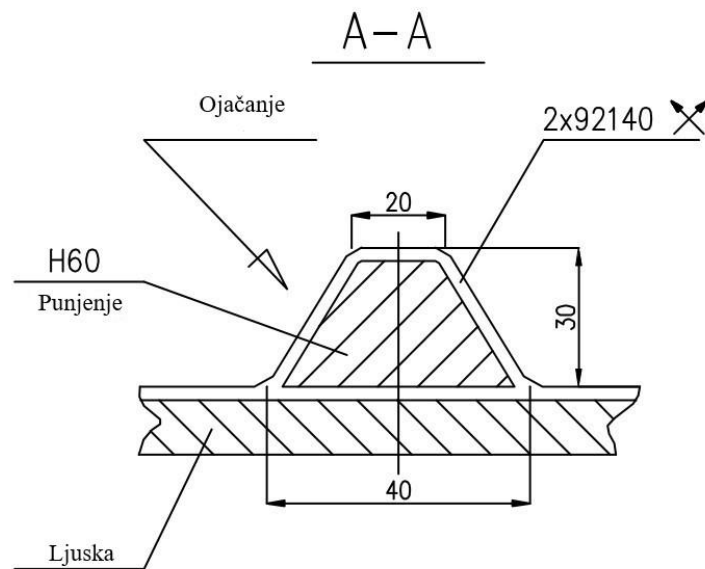
**Slika 16. Harve-2 [19]**

Krilo se sastoji od oplata koja je od sendvič kompozita, glavne ramenjače, rebara i ojačavajućih traka duž tetive koje su od kompozita ojačanih vlaknima. (Slika 17.) Svi kompoziti ojačani vlaknima koriste istu polimernu smolu kao matricu [19].



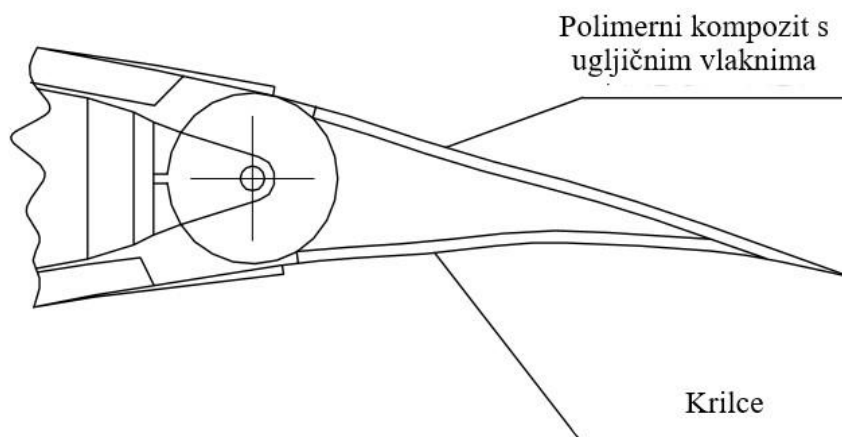
**Slika 17. Krilo kod Harve-2 [19]**

Ojačavajuće trake koje su postavljene paralelno s tetivom aeroprofila, prikazane su na slici 18. Vanjska strana te trake sadrži dva sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici, a unutrašnje punjenje nije navedeno u literaturi [19].



Slika 18. Ojačavajuća traka [19]

Krilce je također napravljeno od polimernog kompozita s vlaknastim ojačanjem kao što prikazuje slika 19.



Slika 19. Krilce kod zrakoplova Harve-2 [19]

## 4. POLIMERNI KOMPOZITI

### 4.1. Definicija i podjela kompozitnih materijala

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti su proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakve ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Na taj način kompoziti (pogotovo polimerni kompoziti), u odnosu prema uobičajenim materijalima, iskazuju brojne prednosti kao što su: mala masa, otpornost na koroziju, kombinacija čvrstoće, krutosti i tvrdoće, dulji vijek trajanja, jednostavno i jeftino održavanje, mogućnost proizvodnje dijelova složenih oblika, itd. [20].

Svaki kompozitni materijal sadrži matricu i ojačalo. Stoga je ukupno ponašanje kompozita određeno sljedećim utjecajnim faktorima:

- svojstvima materijala matrice i ojačala
- veličinom i rasporedom konstituenata
- volumnim udjelom konstituenata
- oblikom konstituenata
- prirodom i jakošću veza među konstituentima.

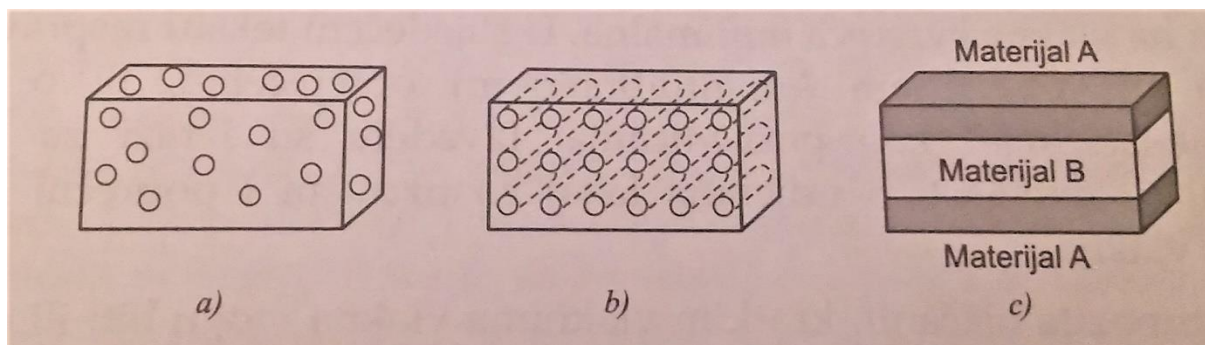
Osnovna zadaća matrice je povezivanje ojačala, prijenos opterećenja na ojačala i njihova zaštita od površinskog oštećivanja.

Temeljna podjela kompozita je ona prema vrsti matrice koja može biti metalna, keramička i polimerna pa tako imamo metalne (MMC), keramičke (CMC) i polimerne (PMC) kompozite.

Metali i polimeri se rabe kao materijali matrice da bi se ostvarila tražena duktilnost, dok se keramičke matrice dodatno ojačavaju radi poboljšanja lomne žilavosti.

Nova skupina kompozitnih materijala koja se koristi u zrakoplovstvu je ugljik/ugljik kompozit (C/C) načinjen ulaganjem ugljičnih vlakana u piroliziranu ugljičnu matricu, a sve značajniji su i hibridni kompoziti koji sadrže ojačanje od barem dviju vrsta različitih vlakana.

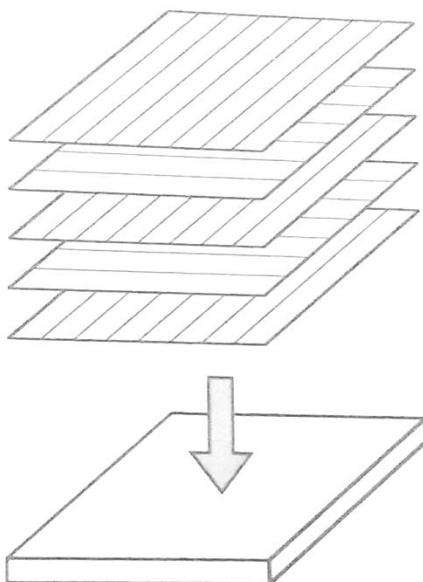
Prema obliku ojačala razlikujemo kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite, slojevite i sendvič kompozite (Slika 20.). Slojeviti kompoziti (laminati) i sendvič kompoziti pripadaju skupini strukturnih kompozita [21].



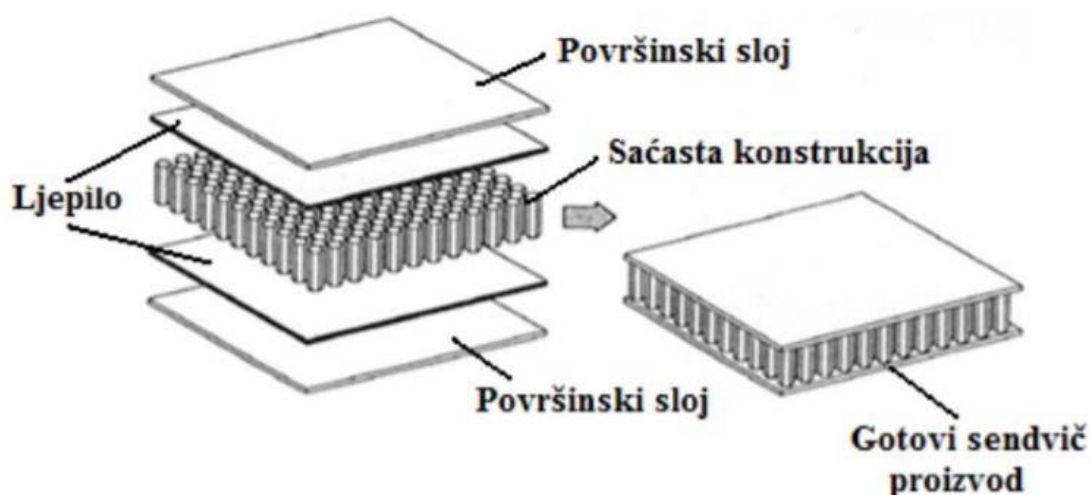
**Slika 20. Osnovne vrste kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [20]**

Kod kompozita s česticama diskretne jednolično raspoređene čestice – tvrd i krhak materijal, obavijene su mekanijom i duktilnijom matricom. Obzirom na veličinu čestica i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita, kompoziti s česticama dijele se na dvije skupine: kompozite s disperzijom (promjer čestice manji od  $0,1 \mu\text{m}$ ) i kompozite s velikim česticama (promjer čestice veći od  $0,1 \mu\text{m}$ ).

Strukturni kompoziti koji se dijele na laminare i sendvič kompozite, sastavljeni su od homogenog i kompozitnog materijala čija svojstva ne ovise samo o svojstvima konstitutivnih materijala, već i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije (Slika 21. i 22.) [20].



**Slika 21. Slaganje različito usmjerenim vlaknima ojačanih slojeva kod slojevitih kompozita [20]**



**Slika 22.** Shematski prikaz strukture koja se sastoji od površinskih slojeva i jezgre u obliku saća [20]

Najrašireniju primjenu u zrakoplovstvu imaju vlaknima ojačani kompoziti s polimernom matricom zahvaljujući njihovoj maloj gustoći, visokoj specifičnoj čvrstoći i specifičnoj krutosti i izvrsnoj dinamičkoj žilavosti. Uporabom polimernih kompozita u izradi zrakoplovnih konstrukcija značajno se može smanjiti masa zrakoplova i time ostvariti manja potrošnja goriva. Još jedna prednost polimernih kompozita je mogućnost oblikovanja u izratke složenog oblika čime se smanjuje ne samo broj pozicija nekog sklopa, već i potreba za pričvršćivanjem i spajanjem. Prednosti su dvostruke: uz manji broj pozicija skraćuje se vrijeme potrebno za montažu, ali se smanjuje i broj potencijalno opasnih mjesta iniciranja napukline budući da elementi kao što su vijci i različiti provrti djeluju kao koncentratori naprezanja [21].

#### 4.2. Vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Najraširenija vrsta kompozita su upravo vlaknima ojačani polimeri za koje je tipično da sadrže čvrsta, kruta vlakna u duktilnoj, žilavoj i lakoj polimernoj osnovi.

Kompoziti s vlaknima sadrže vlaknasta ojačala u obliku vlakana, žica ili viskera. Vlakna imaju znatno veću duljinu ( $l$ ) od promjera ( $d$ ) i karakterizira ih omjer  $l/d$ . Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala visoke čvrstoće s velikim omjerom  $l/d$ .

Prednosti i nedostaci vlaknima ojačanih polimernih kompozita nalaze se u tablici 2 [21].



**Tablica 2. Prednosti i nedostaci vlaknima ojačanih polimernih kompozita [21]**

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> <li>• visoka specifična čvrstoća i krutost</li> <li>• postojanost prema većini kiselina i lužina</li> <li>• velika mogućnost prigušenja vibracija</li> <li>• dobra dinamička izdržljivost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• osjetljivost na povišene radne temperature</li> <li>• osjetljivost na raslojavanje i mrvljenje</li> <li>• slaba duktilnost</li> <li>• mogućnost širenja napuklina duž vlakna</li> <li>• zaostala naprezanja izazvana skupljanjem matrice u proizvodnji kompozita i tijekom eksploatacije</li> <li>• visoka cijena nekih vlakana.</li> </ul>

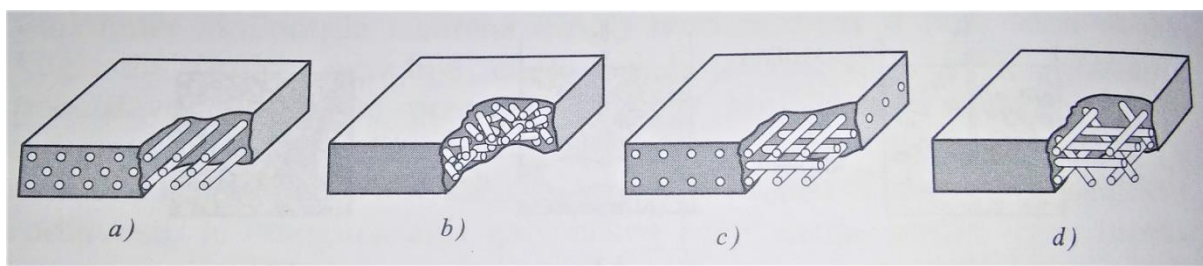
Na svojstva vlaknatih kompozita utječu sljedeći faktori koji se utvrđuju tijekom projektiranja njihove strukture: svojstva materijala matrice, vrsta materijala vlakna i njihova svojstva, promjer vlakna, omjer duljine i promjera, stanje površine vlakana – hrapavost i prevlake, volumni udio vlakana, usmjerenost vlakana.

Tijekom proizvodnje kompozita, utjecaji na uporabna svojstva su čvrstoća veze između matrice i vlakana te moguće pogreške – poroznost, zračni mjehurići i sl. [21].

Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja.

U uporabi su vrlo raznoliki materijali ojačala. Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit uporabiv za transportna sredstva te primjenu u zrakoplovstvu. Vlakna načinjena od bora, ugljika i polimera osiguravaju izrazito ojačavanje. Za ojačanje se rabe i prije spomenuti viskeri.

Ojačavala mogu biti raspoređena na različite načine kao što prikazuje slika 23. Kontinuirana jednosmjerna vlakna u polimernoj matrici se primjenjuju za izradu proizvoda promišljenih anizotropnih svojstava te imaju veći omjer duljine i promjera od slučajno usmjerenih diskontinuiranih vlakana. Od vlakana se također mogu izraditi tkanine ili trake gdje vlakna mogu biti raspoređena ortogonalno ili višesmjerno usmjerena [20].

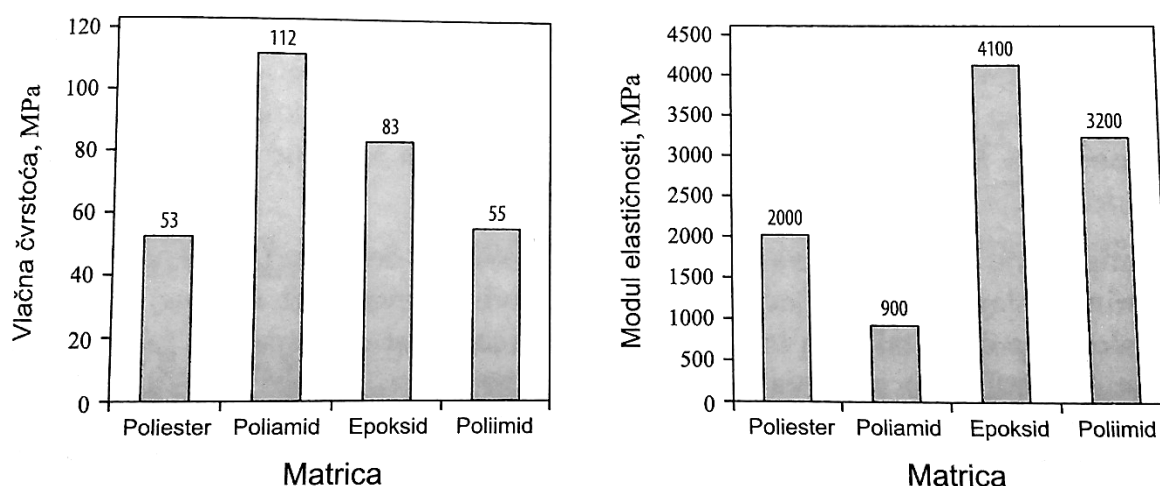


**Slika 23. Osnovni načini rasporeda vlaknatih ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno položena vlakna [20]**

#### 4.2.1. Polimerni materijali za matricu

Kao što je već rečeno, materijali matrice su žilavi i duktilni te prenose opterećenje na vlakna. No, osim te, osnovne zadaće matrice su: povezivanje vlakana, sprečavanje naglog širenja napuklina, oblikovanje kompozitne konstrukcije te zaštita kompozita od utjecaja okoline.

S obzirom na ponašanje pri povišenim temperaturama, polimerne matrice dijele se na plastomerne i duromerne. Duromerne matrice koriste se za zahtjevnije zrakoplovne konstrukcijske primjene. Najčešće u primjeni su epoksidne smole koje su otpornije prema vlazi i pokazuju bolja mehanička svojstva u odnosu prema drugim vrstama duromera i naročito plastomera kao što pokazuje slika 24 [21].



**Slika 24. Vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti različitih vrsta matrica [21]**

## **4.2.2. Svojstva najčešće primjenjivanih polimernih matrica u zrakoplovnim konstrukcijama**

### **4.2.2.1. PLASTOMERI**

#### **4.2.2.1.1. Poli(fenilen-oksidi) – PPO**

PPO odlikuje se izvanrednim mehaničkim svojstvima u temperaturnom rasponu od -30 do 150°C. Kemijska postojanost je vrlo dobra. Ima odličnu postojanost prema puzanju, visoke je istezljivosti te ima dobra dielektrična svojstva. Kompoziti s ovom matricom, ojačani staklenim vlaknima, primjenjuju se pri istovremenim zahtjevima za velikom stabilnošću dimenzija i dobrim mehaničkim svojstvima [21].

#### **4.2.2.1.2. Visoko temperaturni plastomeri**

Razvojem plastomera povišene toplinske stabilnosti uklonjena je jedna od bitnih prednosti duromernih plastika za kompozite. Plastomerne matrice imaju i neka druga povoljna svojstva u odnosu prema duromernim: preprezi se mogu neograničeno dugo skladištiti pri sobnoj temperaturi, proces prerade se može automatizirati te postoji mogućnost postizanja visoke kompaktnosti kompozita. Među temperaturno visoko postojeće plastomere se ubrajaju: plastomeri koji sadrže sumpor, poliimid (PI), poli(eter-keton) (PEK), poli(eter-eter-keton) (PEEK) i sl. Plastomeri koji sadrže sumpor iskazuju dobra mehanička svojstva od -100 do 200 °C te dobru postojanost oblika i otpornost na starenje pri povišenim temperaturama [21].

#### **4.2.2.1.3. Poli(fenilen-sulfid) – PPS**

PPS ima veliku postojanost prema djelovanju plamena (samogasiv je) i ima malu žilavost. Temperatura taljenja PPS-a iznosi oko 285 °C, a talina ima nisku viskoznost što je povoljno za preradu. Kemijski je postojan prema velikom broju otapala, mineralnih i organskih kiselina. Toplinska postojanost je među najvišima kod konstrukcijskih plastomera.

Često se primjenjuje za unutrašnju opremu zrakoplova, ali i za konstrukcijske dijelove zrakoplova kao matrica kompozita. U zrakoplovnoj industriji ovaj materijal se najčešće koristi kao zamjena za aluminij jer se njegovom uporabom smanjuje masa krila za oko 20% [21].

#### **4.2.2.1.4. Poliimid – PI**

Poliimidi mogu zadržati dobra mehanička svojstva u rasponu od 250 do 300 °C uz dugotrajno opterećenje. Uglavnom su kemijski inertni, no nisu postojani prema djelovanju koncentriranih kiselina, alkila, oksidacijskih agensa te u nekim slučajevima vodene pare. Imaju dobru otpornost na puzanje pri višim temperaturama, izvrsnu otpornost prema gorenju, veliku otpornost na trošenje u širokom rasponu temperatura te nizak faktor trenja.

Kompoziti s PI matricom se zbog svojih svojstava najčešće rabe u zrakoplovstvu, no glavni im je nedostatak vrlo visoka cijena [21].

#### 4.2.2.1.5. Poli(eter-eter-keton) – PEEK

PEEK ima kristalastu strukturu, a s dodatkom 30 posto staklenih vlakana može se rabiti do 300 °C. Pri sobnoj temperaturi je čvrst i krut, dok pri povišenim temperaturama ima dobru duktilnost. Talište mu je oko 335 °C, a dobra mehanička svojstva pri dugotrajnom opterećenju zadržava do 200 °C. PEEK, ojačan staklenim i ugljičnim vlaknima, posjeduje izvrsnu dimenzijsku stabilnost pri povišenim temperaturama. Ima dobru savojnu i vlačnu čvrstoću, veliku žilavost i odličnu dinamičku izdržljivost. Netopiv je u svim običnim otapalima, a neotporan je na koncentriranu sumpornu kiselinu [21].

#### 4.2.2.2. DUROMERI

##### 4.2.2.2.1. Nezasićene poliesterske smole - UP

Glavne prednosti poliesterskih smola su: mala početna viskoznost, niska cijena sirovine, jednostavna proizvodnja te izvrsna otpornost atmosferskim utjecajima. Zbog skupljanja se mogu očekivati znatna zaostala naprezanja. Moguća je pojava krhkosti, a slaba je kemijska otpornost prema nekim spojevima (lužinama) [21].

##### 4.2.2.2.2. Epoksidne smole – EP

Epoksidi koji polimeriziraju pri sobnoj temperaturi pogodni su za primjene do 50 °C. Epoksidi su najčešće dvokomponentni, pri čemu se u procesu proizvodnje dodaje očvršćivalo koje omogućuje umrežavanje smole. Miješanjem epoksida i očvršćivala, uz djelovanje topline, dolazi do skrućivanja koje se odvija nekoliko sati. Da bi im se modificirala mehanička svojstva, epoksidima se mogu dodati različite tvari u svrhu smanjena viskoznosti prilikom obrade, povećanja lomnog istezanja uz smanjenje modula elastičnosti, poboljšanja otpornosti na širenje napuklina itd. Prednosti epoksida su: mogućnost modificiranja svojstava, mogućnost kontrole žilavosti te laka i sigurna prerada, malo skupljanje i zaostala naprezanja nakon očvršćivanja, dobra kemijska otpornost, mala toplinska rastezljivost te kao matrice kompozita pokazuju dobru prionjivost uz ojačala. Glavni nedostaci su: izrazita krhkost, visoka cijena, osjetljivost na vlagu, sporo polimeriziraju i mala je otpornost prema nekim organskim spojevima. Kompoziti s epoksidnom matricom najviše se rabe za konstrukcijske dijelove zrakoplova gdje visoka cijena materijala nije toliko važna [21].

#### 4.2.2.2.3. Vinil-esterne smole – VE

Otporne su na djelovanje nekih kiselina, lužina i drugih otapala. Standardne VE mogu se primijeniti do oko 125 °C. Često se rabe različiti dodaci kojima se poboljšava otpornost na djelovanje UV zraka te vatrootpornost. Umrežavanje se odvija pri relativno niskim temperaturama, a konačna svojstva daju dobru kemijsku otpornost uz jednostavnu proizvodnju kompozita i dobru prionjivost vlakna i matrice [21].

#### 4.2.2.2.4. Fenol-formaldehidne smole – PF

PF se koriste ako se traži toplinska postojanost i vatrootpornost. Samogasive su, tvrde i imaju povišenu postojanost prema utjecaju organskih otapala i kiselina. Česta im je pojava šupljina, uključaka zraka i površinskih nepravilnosti stoga su pri proizvodnji kompozita s PF matricom nužni visoki tlakovi. Krhke su i slabijih mehaničkih svojstava od epoksidnih i poliesterskih smola [21].

#### 4.2.2.2.5. Bismaleimidne smole – BMI

Očvršćivanje im se odvija pri 180 do 235 °C u trajanju od 1 do 2 sata, a potom slijedi naknadno polimeriziranje. Toplinski su vrlo postojani i samogasivi, a maksimalna temperatura uporabe im je do 150 °C. Izvorno su krhki materijali što se ublažava pomoću aditiva. Prednost pred epoksidima im je bolja toplinska stabilnost što je važno u zrakoplovnoj primjeni kod borbenih zrakoplova koji lete velikim brzinama i na velikim visinama. Kod nove generacije lovaca, kompoziti s BMI matricom predstavljaju vrlo značajan konstrukcijski materijal koji istiskuje kompozite s epoksidnom matricom. Glavni su im nedostaci viši proizvodni troškovi u odnosu na epokside [21].

### 4.2.3. *Vlakna za polimerne kompozite*

Vlakna kao glavni nositelji opterećenja bi trebala imati što veću čvrstoću i krutost uz istovremenu što manju masu. Stoga se za vlakna u polimernim kompozitima u zrakoplovnim konstrukcijama primjenjuju staklena, aramidna, ugljična i borova vlakna.

Kao što prikazuje slika 23 te kao što je već rečeno, kontinuirana vlakna imaju velik omjer duljine i promjera, dok diskontinuirana vlakna imaju manji omjer duljine i promjera. Bolje je da promjer vlakana bude što manji jer se time povisuje njihova čvrstoća, ali nažalost i cijena. Tako danas najčvršći, ali i najskuplji kompoziti, imaju ojačanja u obliku ugljičnih nanocjevčica čiji vanjski promjer iznosi samo nekoliko nanometara. Zbog njihove veće fleksibilnosti vlakna se u proizvodnji pletenjem lakše dobivaju u ojačanje.

Snaga i krutost kompozita također ovise i o usmjerenosti i načinu slaganja kompozita. U slučaju kontinuiranih usmjerenih vlakana, čvrstoća u smjeru vlakana je vrlo visoka, dok je okomito na

njih znatno niža. Kompoziti ojačani slučajno usmjerenim kratkim vlaknima imaju ujednačenija svojstva.

Ojačanje s diskontinuiranim vlaknima je jeftinije, ali se primjenjuje za kompozite kod kojih nije presudna visoka čvrstoća i modul elastičnosti (krutost). Kompozitne komponente s kontinuiranim vlaknima često su izvedene u obliku laminata s laganjem više jednosmjerno ojačanih slojeva pri čemu se slojevi polažu tako da imaju različitu usmjerenost ojačanja [21].

#### 4.2.4. Vrste vlakana i njihova svojstva

Materijali u obliku vlakana imaju vrlo mali volumen u odnosu prema duljini pa je velika vjerojatnost pojave napuklina jer je ona obrnuto proporcionalna volumenu materijala. Tehnologijom izrade vlakana nastoji se smanjiti broj mikroskopskih napuklina za što je posebno odgovorna čistoća polazne sirovine. Napukline se također mogu zatvoriti nanošenjem prevlaka (tzv. apretura).

Pri izboru određenog vlakna za neki kompozit, treba uzeti u obzir sljedeće činjenice:

- matrica mora biti dobro prionjiva na vlakna radi smanjenja vjerojatnosti nastajanja šupljina,
- između matrice i vlakana ne bi smjelo doći do jačih kemijskih reakcija,
- u slučaju ugljičnih vlakana veza je mehaničke prirode i određena je razlikom toplinske rastezljivosti između vlakana i matrice, i s povezivanjem matrice s površinskim nepravilnostima na vlaknima,
- razlika u toplinskim rastezanjima između matrice i vlakana ne smije biti prevelika kako ne bi došlo do pojave značajnijih toplinskih naprezanja prilikom ohlađivanja ili zagrijavanja kompozita [21].

##### 4.2.4.1. Staklena vlakna

Staklo je vrlo raširen materijal za ojačavanje iz nekoliko razloga:

- lako se izvlači iz rastaljenog stanja u obliku visokočvrstih vlakana,
- ekonomična proizvodnja staklenim vlaknima ojačanih kompozita,
- kompozit postiže vrlo visoku specifičnu čvrstoću,
- mogućnost kombiniranja staklenih vlakana s različitim polimernim matricama uz postizanje kemijske inertnosti i mogućnosti primjene u korozivnoj okolini.

Staklena vlakna rabe se u obliku mata, tkanine, runa itd. Osjetljiva su na vodu i krhka što otežava njihovu preradu. Promjer im je 10-15  $\mu\text{m}$ . Prije uporabe vlakna je potrebno apretirati radi boljeg prianjanja uz polimernu matricu.

Staklena vlakna su bijele boje ili prozirna, visoke vlačne čvrstoće, ali niske krutosti. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima primjenjuju se do temperature od oko 200°C. Za zrakoplovne primjene koriste se staklena vlakna visoke čistoće koja u kombinaciji s visokotemperaturnom polimernom matricom (npr. PI) mogu podnijeti temperature do 300°C.

Prema kemijskom sastavu i svojstvima, staklena vlakna se dijele na:

- A – vlakna opće namjene; povišene su žilavosti i koriste se za izradu zvučnih i toplinskih izolacijskih materijala,
- E – vlakna povoljne otpornosti na vlagu i blaže agresivne medije; lošije su žilavosti od A, ali dobre vlačne čvrstoće i krutosti te su jeftini,
- C – vlakna povišene kemijske postojanosti,
- R, S, T – trgovački nazivi za vlakna poboljšanih mehaničkih svojstava koji su rezultat smanjenog promjera vlakna [21].

#### 4.2.4.2. Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su visokočvrsta i visokokruta, vrlo dobrog omjera čvrstoće i gustoće. Postoji više vrsta aramidnih vlakana (Kevlar i Twaron su komercijalni nazivi aramidnih vlakana različitih proizvođača) koja se razlikuju po mehaničkim svojstvima. Ova vlakna zadržavaju mehaničku otpornost pri temperaturama od -200 do 200 °C. Karakterizira ih žuta boja, imaju relativno slabe adhezijske veze s matricom, skuplja su od staklenih vlakana, osjetljiva su na UV zračenje i na djelovanje kiselina i lužina, ali su relativno inertna prema drugim otapalima i kemikalijama. Osim toga, poznata su po svojoj žilavosti, otpornosti na udar, otpornosti na puzanje i pojavu umora [21].

#### 4.2.4.3. Ugljična vlakna

Ugljična vlakna se upotrebljavaju zbog sljedećih razloga:

- otporna su na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina,
- imaju najveći odnos čvrstoće i gustoće te modula elastičnosti i gustoće od svih vlaknastih ojačala,
- visok modul elastičnosti i čvrstoću zadržavaju i pri povišenim temperaturama,
- imaju malu toplinsku rastezljivost,
- razvijeni su relativno jeftini postupci proizvodnje vlakana.

Ugljična vlakna sadrže približno 95% ugljika i karboniziraju pri 980-1480 °C dok grafitna sadrže 99% ugljika i najprije karboniziraju, a zatim grafitiziraju pri 1985-3035 °C. Grafitizacija rezultira povećanjem modula elastičnosti i električne vodljivosti.

Prema čvrstoći i krutosti, ugljična vlakna mogu se podijeliti na:

- visokočvrsta vlakna (HS),
- vlakna standardnog modula elastičnosti (SM);  $E=220$  GPa,
- vlakna srednjeg ili prijelaznog modula elastičnosti (IM);  $E=240$  GPa,
- vlakna visokog modula elastičnosti (HM);  $E=300$  GPa,
- vlakna ultravisokog modula elastičnosti (UHM);  $E=450$  GPa.

Ugljična vlakna se mogu kombinirati s različitim materijalima matrica, ali u proizvodnji CFRP-a (Carbon Fiber Reinforced Polymers) prevladavaju epoksidne smole. Od ostalih duromernih materijala matrica, koriste se poliesterske, vinil-esterske te fenolne smole. Od plastomernih materijala matrica, u kombinaciji s ugljičnim vlaknima, koriste se poliamidi, polikarbonati, polisulfoni te poliimidi.

Za ojačanje koriste se vlakna promjera između 4 i 10  $\mu\text{m}$  koja mogu biti kontinuirana ili rezana. Kompoziti s ugljičnim vlaknima koriste se u izradi kućišta raketnih motora kao i brojnih drugih konstrukcijskih elemenata vojnih i civilnih letjelica (npr. dijelovi krila, trupa, vrata itd.) [21].

#### 4.2.4.4. Borova vlakna

Borova vlakna su zapravo ugljična ili metalna (volfram) vlakna koja su postupkom napanjanja prevučena tankim slojem bora čime se znatno poboljšavaju mehanička svojstva takvih vlakana. Koristila su se u zrakoplovstvu prije pojave ugljičnih vlakana visokih performansi. Danas se gotovo više niti ne koriste zbog visoke cijene i teške obradljivosti. Njihova primjena ograničena je samo za mehanički i toplinski visokopterećene dijelove zrakoplovnih konstrukcija.

Borova vlakna imaju znatno veći promjer od ostalih vlakana, oko 100  $\mu\text{m}$ , što im također smanjuje primjenu. Odlikuju se dobrim svojstvima obzirom na tlačna, uvojna (torzijska) i druga kombinirana opterećenja te imaju visoku tvrdoću [21].

Tablicom 3 prikazana su karakteristična svojstva najčešćih vrsta vlakana, a u tablici 4 navedene su njihove glavne prednosti i nedostaci.



**Tablica 3. Karakteristična svojstva nekih vlakana [21]**

Vlakno	$\rho$ , kg/ m <sup>2</sup>	E, GPa	R <sub>m</sub> , MPa
<i>Staklena vlakna</i>			
E-vlakno	2580	76-79	3100-3800
S-vlakno	2480	88-91	4400
<i>Aramidna vlakna</i>			
LM	1390	70	3000
IM	1450	121	3100
HM	1470	179	3500
<i>Ugljična vlakna</i>			
SM	1740	228	3600
IM	1820	294	7100
UHM	2180	966	3100

Oznake: LM – niski modul elastičnosti (E), IM – srednji E, HM – visok E, SM – standardni E, UHM – ultravisok E

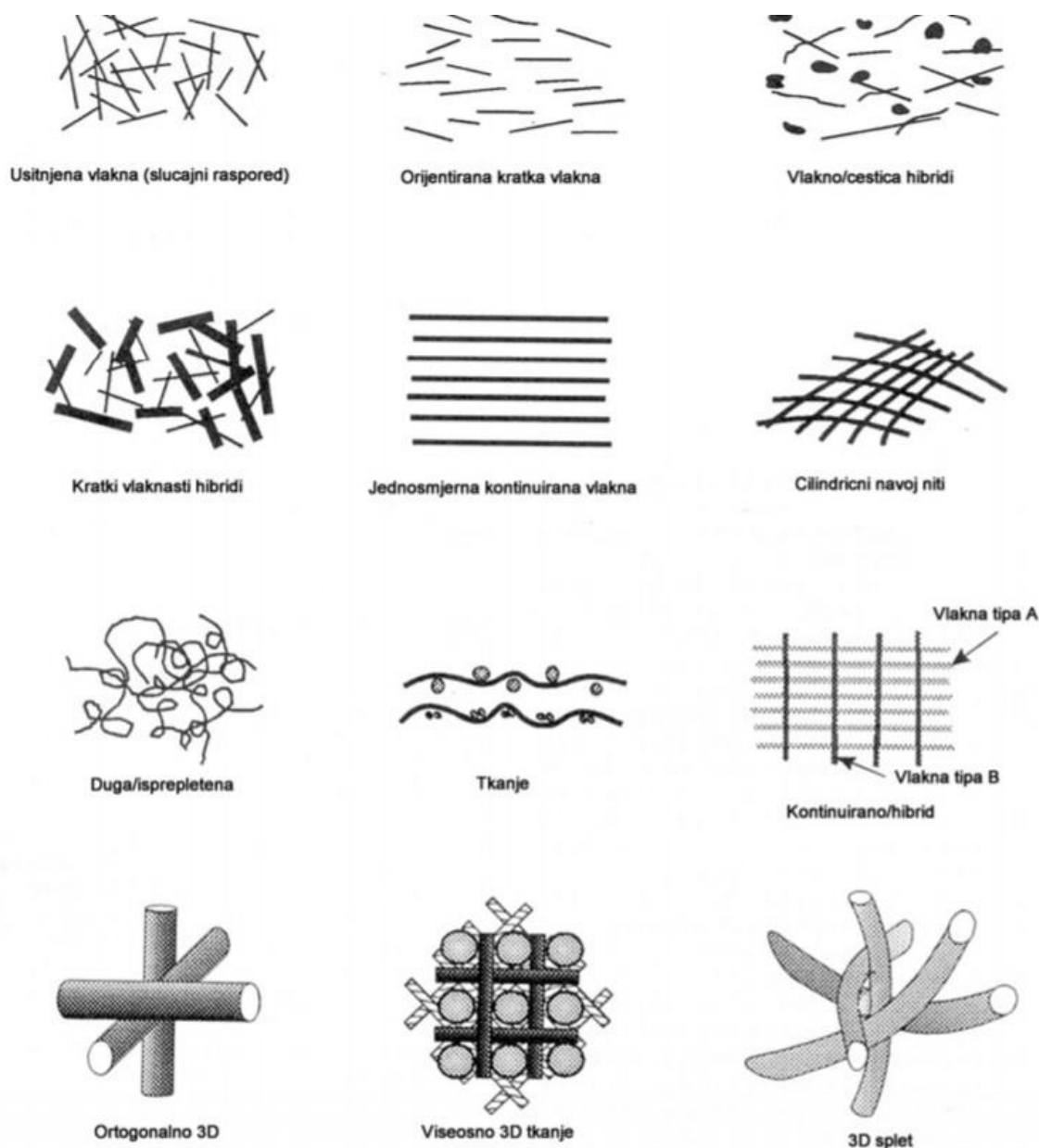
**Tablica 4. Usporedba svojstava glavnih vrsta vlakana [21]**

Svojstvo	Staklena vlakna	Aramidna vlakna	Ugljična vlakna
Vlačna čvrstoća	B	A	B
Modul rastezljivosti i modul savitljivosti	B	A	C
Modul stlačivosti	B	A	C
Tlačna i savojna čvrstoća	C	A	B
Žilavost	A	C	B
Međuslojna čvrstoća	B	A	A
Gustoća	B	B	C
Dinamička izdržljivost	B	A	C
Vatrootpornost	A	C	A
Toplinska izolacija	A	C	B
Električna izolacija	B	C	A
Mala toplinska rastezljivost	A	A	A
Cijena	C	C	A

A – odlično, B – srednje, C – loše

#### 4.2.5. Oblici vlaknatih ojačanja

Vlakna se na tržištu pojavljuju u obliku svitaka pojedinačnih vlakana (niti), mata, rovinga (beskonačnih strukova), tkanina satkanih od dugih kontinuiranih vlakana ili kao sjeckana kratka vlakna. Ojačanja vlaknima moguće je izvesti na različite načine, ovisno o obliku njihova polaganja i dimenzijama vlakna kao što prikazuje slika 25 [21].



Slika 25. Oblici, moguće prostorne raspodjele i usmjerenosti vlaknatih ojačanja [21]

**Tkanine**, odnosno trake, čine isprepletana vlakna i to su najčešći predoblici ojačanja za zrakoplovne konstrukcije. Slojevi tkanina mogu se različito usmjeravati. Ovisno o njihovom načinu polaganja i vrsti tkanja, mijenjaju se svojstva kompozita. Pod tkanjem se podrazumijeva način prepletanja niti (vlakana).

Osnovne vrste tkanja su: ravno tkanje (Plain), jednoliko tkanje (Leno), savitljivo tkanje (Eight Harness Satin - Weave) i tkanje za manje zakrivljene površine (Four Harness Satin – Crowfoot). Kod ravnog tkanja jedno vlakno naizmjenice prolazi ispod i iznad vlakna osnove čime se postiže maksimalna mehanička otpornost. Jednoliko tkanje koristi se pri izradi laganih membrana, a savitljivo za zakrivljene dijelove zrakoplova i projektila. U savitljivom tkanju vlakno nakon podvlačenja ispod jedne niti osnove prelazi preko sedam osnovnih niti. Kod tkanja za manje zakrivljene površine vlakno prije podvlačenja prelazi preko tri osnovne niti [21].

**Matovi** sadrže vlakna duljine oko 50 mm, slučajno raspoređena i prešana. Najzastupljeniji su oblik ojačala. Vlakna moraju biti tako povezana da u svim smjerovima jednoliko preuzimaju opterećenja.

Pri postupcima naštrcavanja vlakana, upotrebljavaju se **rovinzi** koje je sjeckanjem moguće pretvoriti u kratka slučajno raspoređena vlakna. Tako usitnjena vlakna pri nanošenju se natapaju smolom.

**Preprezi** (PREimPREGnated) su tkanine ili snopovi vlakana natopljeni polimernim materijalom u jednom ili više slojeva. Čvrsti kompozitni izradak nastaje prešanjem slojeva preprega uz zagrijavanje u autoklavu tako da polimerna smola omekša i polimerizira.

**Osmoljeni list** (pločasti prepreg) izrađuje se od smjese nezasićene poliesterske smole, očvršćivala, mineralnih punila, vlaknatih ojačala i još nekih dodataka te se ta smjesa preša. Debljina osmoljenog lista iznosi 2-3 mm, a vlakna su duljine 12-50 mm i mogu biti slučajno raspoređena i usmjerena [21].

#### **4.2.6. Mehanička svojstva polimernih kompozita**

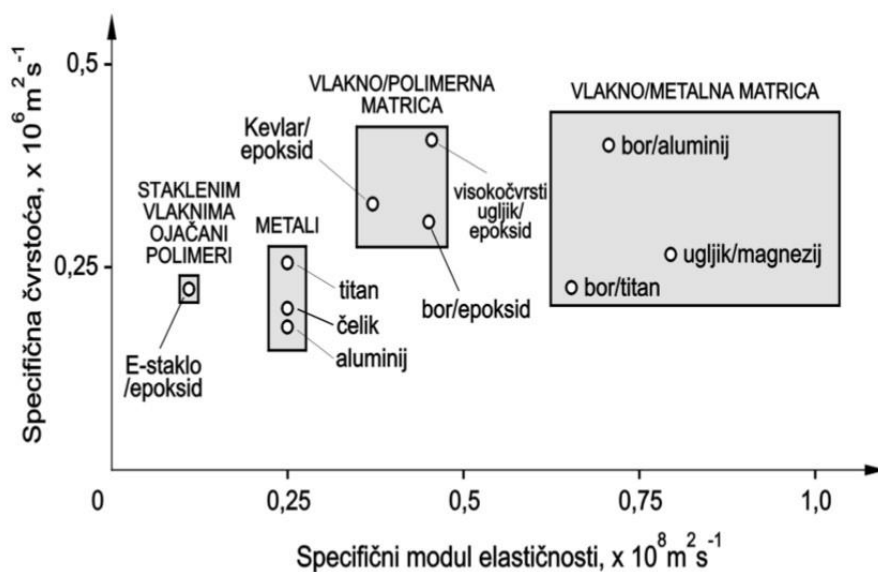
Vrijednosti osnovnih mehaničkih svojstava za usporedbu različitih polimernih kompozita sadrži tablica 5.

Mehanička svojstva u tablici vrijede za uzdužni smjer opterećivanja u smjeru vlakana, a u zagradama su dane i vrijednosti za poprečni smjer opterećenja okomito na smjer polaganja vlakana [21].

Tablica 5. Mehanička svojstva nekih vlaknima ojačanih polimera [21]

Vrsta kompozita	Udio vlakana, %	Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	Modul elastičnosti $E$ , GPa	Modul smičnosti $G$ , GPa	Poissonov koeficijent $\nu$
epoksid/borova vlakna	50	1364 (56)	200 (22)	5,35	0,17 (0,02)
epoksid/S-staklena vlakna	72	1282 (46)	60 (25)	11,93	0,23 (0,09)
epoksid/HM-ugljična vlakna	45	837 (42)	189 (7)	6,17	0,10
poliimid/HM-ugljična vlakna	45	802 (15)	215 (5)	4,46	0,20 (0,02)
epoksid/HS-ugljična vlakna	70	1495 (40)	144 (10)	6,86	0,28 (0,01)
epoksid/aramidna vlakna (Kevlar 49)	54	1180 (11)	84 (4,8)	2,81	0,32 (0,02)

Slikom 26 prikazana je usporedba specifičnih modula elastičnosti te specifične čvrstoće nekoliko kompozita (polimernih i metalnih) s metalima.



Slika 26. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [20]

#### 4.2.7. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita

##### 4.2.7.1. Pravilo miješanja

Zakonom miješanja uvijek se može predvidjeti gustoća vlaknima ojačanih kompozita:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f$$

gdje se indeks "m" odnosi na matricu, a "f" na vlakno.

Osim toga, zakonom miješanja može se predvidjeti električna i toplinska vodljivost vlaknima ojačanog materijala u smjeru vlakana ako su vlakna kontinuirana i jednosmjerna [20].

##### 4.2.7.2. Modul elastičnosti

Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima (uzdužno), zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f$$

gdje je:  $E_c$  - modul elastičnosti kompozita,  $E_m$  - modul elastičnosti matrice i  $E_f$  - modul elastičnosti vlakna

U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana (poprečno), komponente djeluju neovisno jedna o drugoj. Modul elastičnosti može se predvidjeti izrazom: [20]

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

##### 4.2.7.3. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja [20].

##### 4.2.7.4. Diskontinuirana vlakna

Svojstva vlaknima ojačanih kompozita teže se predviđaju ako su vlakna diskontinuirana. To je zbog toga što krajevi svakog vlakna nose manje opterećenja nego srednji dio vlakna. Ispitivanjem utvrđena čvrstoća bit će manja od one proračunate primjenom zakona miješanja. Odstupanje je manje ukoliko je stvarna duljina vlakna veća od kritične duljine, odnosno ako je omjer duljine i promjera vlakna veći od kritičnog. Na veličinu kritičnog omjera vlakna utječe

nekoliko faktora: relativna čvrstoća vlakna i matrice, oblik i geometrija vlakna, međuslojna čvrstoća te volumni udio vlakana [20,21].

#### **4.2.8. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita**

Pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita, potrebno je uzeti u obzir brojne faktore kao što su: omjer duljine i promjera vlakna, volumni udio vlakana, usmjerenost vlakana te svojstva vlakana i matrice [20].

##### *4.2.8.1. Omjer duljine i promjera vlakana*

Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstava, često se teško proizvode i ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom duljine i promjera lakše se ugrađuju u matricu i dovode do materijala visoke krutosti i čvrstoće [20].

##### *4.2.8.2. Volumni udio vlakana*

Viši volumni udio vlakana vodi do povišenja čvrstoće i krutosti kompozita. Najviše vrijednosti čvrstoće i krutosti postižu se kontinuiranim vlaknastim ojačanjima s udjelima koji u praksi dosežu i 70 %. Iz pravila miješanja može se zaključiti da postoji linearna ovisnost između modula elastičnosti kompozita i udjela kontinuiranih vlakana za uzdužni smjer polaganja. Općenito, modul elastičnosti je niži u poprečnom smjeru i pokazuje nelinearnu ovisnost pri većim udjelima vlakana [21].

##### *4.2.8.3. Usmjerenost vlakana*

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima ( $0^\circ$ ), ali umjesto u jednom smjeru vlakna se mogu polagati ortogonalno ( $90^\circ$ ) ili pod nekim drugim kutom; time se žrtvuje maksimalna čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva kompozita [20].

##### *4.2.8.4. Svojstva vlakana i matrice*

Vlakna trebaju biti čvrsta, lagana, kruta, a također bi trebala imati visoko talište. Kao materijali za vlakna, preferiraju se materijali visokog specifičnog modula elastičnosti ili čvrstoće.

Materijali matrice su uobičajeno žilavi i duktilni tako da prenose opterećenja na vlakna te onemogućavaju da pukotine od prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit [20].

### 4.3. Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti se dobivaju uporabom više vrsta vlakana, kao ojačala u jedinstvenoj matrici. Prednost im je bolja kombinacija svojstava u odnosu na kompozite ojačane jednom vrstom vlakana. Najčešća kombinacija vlakana i matrice je ona s ugljičnim i staklenim vlaknima u polimernoj matrici. Ugljična vlakna imaju relativno visoku čvrstoću i krutost te malu gustoću no imaju i visoku cijenu. Nasuprot njima, staklena vlakna imaju nisku cijenu, ali i lošija mehanička svojstva. Kombiniranjem tih vlakana dobije se kompozit veće čvrstoće i žilavosti uz nisku cijenu [21].

Svojstva nekoliko različitih hibridnih kompozita prikazana su sljedećom tablicom.

**Tablica 6. Svojstva hibridnih kompozita [21]**

Ojačanje ugljičnim i aramidnim vlaknima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida</li> <li>- Dobra tlačna i vlačna čvrstoća od ugljičnih vlakana</li> <li>- Niska gustoća, ali visoka cijena</li> </ul>
Ojačanje aramidnim i staklenim vlaknima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala gustoća, dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida</li> <li>- Tlačna i vlačna čvrstoća dobra od stakla</li> <li>- Niska cijena</li> </ul>
Ojačanje ugljičnim i staklenim vlaknima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobra tlačna i vlačna čvrstoća, krutost i niska gustoća od ugljičnih vlakana</li> <li>- Niska cijena</li> </ul>

### 4.4. Utjecaj šupljina i vlage na svojstva polimernih kompozita

Ponašanje vlaknima ojačanih kompozita ovisi o gustoći šupljina na graničnoj površini vlakno/matrica jednako kao i u međusloju. U međusloju je česta pojava šupljina koje potječu od mjehurića zraka i raznih uključaka nastalih tijekom izrade polimernog kompozita. Na pojavu i gustoću šupljina u međusloju utječe niz faktora kao što su: matrica (vrsta i kemijski sastav matrice, sposobnost vlaženja, sporedni produkti koji nastaju isparavanjem tijekom očvršćivanja matrice pri visokim temperaturama), vlakna te postupak izrade polimernog kompozita. Šupljine se mogu pojaviti u više oblika i veličina, a nastaju iz dva glavna razloga. Prvi razlog proizlazi

iz činjenice da zrak ulazi u polimerni kompozit tijekom izrade pri čemu se stvaraju mjehurići u viskoznoj matrici. Drugi razlog nastajanja šupljina je taj da se mogu javiti kao posljedica vlačnih i tlačnih naprezanja nastalih tijekom očvršćivanja matrice zbog različite deformabilnosti konstituenata. U vlaknima ojačanim polimernim kompozitima šupljine uzrokuju degradaciju mehaničkih svojstava, a posebice međuslojne smične čvrstoće, čvrstoće u smjeru i okomito na vlakna, modula elastičnosti te otpornosti na umor materijala [21].

Utjecaj vlage na svojstva polimernih kompozita je izraženiji kod duromera nego kod plastomera. Mnogi duromeri apsorbiraju vlagu iz okoline i time se smanjuje temperatura staklišta polimera. Količina apsorbirane vlage ovisi o vrsti materijala matrice i o relativnoj vlažnosti te bitno smanjuje mehaničku otpornost kompozita. Povišenjem temperature povećava se i stupanj apsorpcije vlage. Upijanjem vlage polimerna matrica bubri i oslobađa zaostala toplinska naprezanja od umrežavanja. Rezultat toga mogu biti deformacije pri čemu se velike ploče mogu jače izvijati. Tijekom ugrijavanja upijena vlaga expandira što može dovesti do pojave pukotina u matrici [21].



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1. Cilj eksperimentalnog rada

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je izrada uzoraka kompozita te ispitivanje njihovih mehaničkih svojstava. U cilju eksperimentalnog rada bilo je pokazati utjecaj strukture kompozita (vrsta matrice i ojačala) na njegova mehanička svojstva.

### 5.2. Izrada kompozita

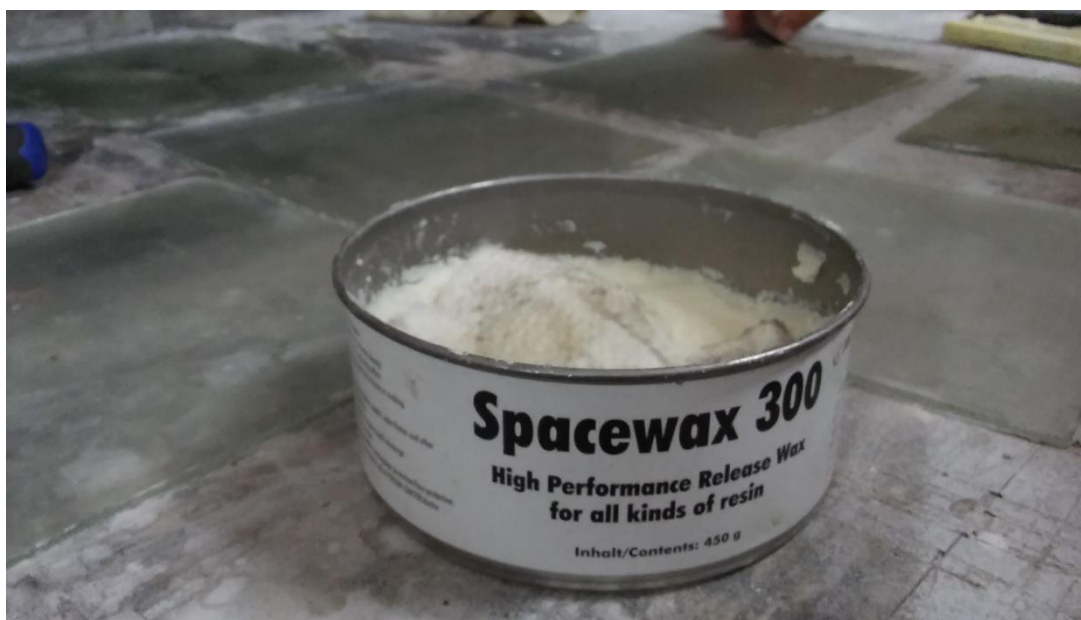
Komadi kompozita izrađeni su laminiranjem – ručnim polaganjem u otvorenom kalupu. Duromerna smola korištena za matricu je poliesterska smola, a kao ojačalo korištena su staklena vlakna ispletena u tkaninu (ravno tkanje).

Postupak izrade kompozita laminiranjem može se raščlaniti u pet faza: čišćenje, nanošenje odvajala, nanošenje slojeva smole i vlakana, umrežavanje te skidanje komada s kalupa.

#### 5.2.1. Čišćenje i nanošenje odvajala

Staklene ploče očišćene od prašine i ostalih nečistoća premazane su voskom koji je korišten kao odvajalo (Slika 27.).

Ploče premazane s odvajalom su zatim ispolirane i umetnute u otvoreni kalup (Slika 28.).



Slika 27. Odvajalo i staklene ploče



**Slika 28. Otvoreni kalup**

### **5.2.2. Nanošenje slojeva smole i vlakana**

Za potrebe ovog rada izrađeni su kompoziti s 2, 3 i 4 sloja staklenih vlakana. Umrežavalo (2%) (Slika 29.) i 400 g poliesterske smole (Slika 30.) su pomiješani te se je ta smjesa koja čini matricu nanijela kistom na staklenu ploču s odvajalom.



**Slika 29. Umrežavalo**



**Slika 30. Poliesterska smola**

Na matricu se nanosi ojačalo (tkanina sa staklenim vlaknima) (Slika 31.) te se na nju ponovno kistom nanosi matrica. Postupak nanošenja matrice i ojačala se ponavlja toliko puta koliko je potrebno slojeva ojačala (u ovom slučaju to su 3 kompozita s 2, 3 i 4 sloja ojačala). Na zadnji sloj ojačala se također nanosi matrica kistom te se cijeli kompozit pritišće s gornje strane staklenom pločom na koju je prethodno nanoseno odvajalo.



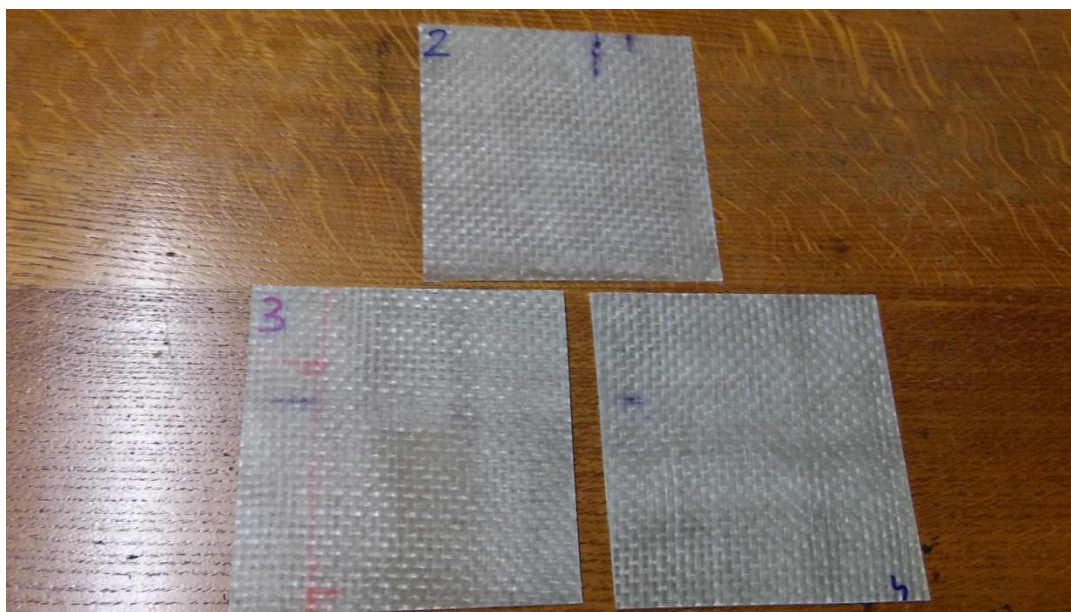
**Slika 31. Staklena vlakna**

### 5.2.3. Umrežavanje i odvajanje komada od kalupa

Na gotov komad kompozita postavlja se ravnomjerno raspoređen teret od 4 kg kako bi se istisnuli svi mjehurići zraka zarobljeni unutar njega (Slika 32.). Postupak umrežavanja se odvijao 24 sata pri sobnoj temperaturi. Nakon umrežavanja, komadi su izvađeni iz kalupa (Slika 33.).



Slika 32. Opterećeni komadi kompozita



Slika 33. Gotovi komadi kompozita

### 5.3. Izrezivanje uzoraka

Uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava izrezani su električnom ubodnom pilom. Dimenzije za izrezivanje određene su normama. Dimenzije za izrezivanje uzoraka namijenjenih za ispitivanje vlačne čvrstoće određene su normom HRN EN 527-4, a one za ispitivanje savojne čvrstoće u tri točke i žilavosti određene su normom HRN EN ISO 14125.

U tablici 7 prikazane su dimenzije koje su određene normom prema debljini  $h$  za ispitivanje savojne čvrstoće i to za kompozite s dva, tri i četiri sloja ojačala. Duljina  $L$  je određena formulom iz norme:  $L=16h$  i predstavlja duljinu između hvatišta stroja za ispitivanje, a duljina  $l$  je određena formulom:  $l = 20h$  i predstavlja ukupnu duljinu uzorka.

**Tablica 7. Dimenzije uzoraka za ispitivanje savojne čvrstoće prema normi HRN EN ISO 14125**

Broj slojeva ojačala	Debljina $h$ , mm	Širina $b$ , mm	Duljina $L$ , mm	Duljina $l$ , mm
2 sloja	2,215	15	35,44	44,3
3 sloja	3	15	48	60
4 sloja	4	10	64	80

Dimenzije uzoraka za ispitivanje žilavosti su jednake za uzorke s dva, tri i četiri sloja ojačala i iznose:  $l = 80$  mm,  $b = 10$  mm.

Dimenzije uzoraka za ispitivanje vlačne čvrstoće su također jednake za uzorke s različitim brojem slojeva jer je debljina  $h$  svih uzoraka veća od 2 i manja od 10 mm te iznose: ukupna duljina  $l = 150$  mm, duljina između hvatišta stroja  $L = 115$  mm, širina  $b = 10$  mm.

Za svako ispitivanje izrezano je više uzoraka s istim brojem slojeva ojačala. Tako se na slici 34 vidi da za ispitivanje vlačne čvrstoće postoje tri uzorka s dva sloja ojačala, tri uzorka s tri sloja ojačala te tri uzorka s četiri sloja ojačala. Uzorci namijenjeni za ispitivanje žilavosti i savojne čvrstoće su numerirani na isti način. Numeriranje uzoraka služi kao pomoć pri razlikovanju tijekom ispitivanja mehaničkih svojstava.



Slika 34. Numeriranje uzoraka kompozita

## 5.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava i rezultati

### 5.4.1. Ispitivanje žilavosti i rezultati

Svaki uzorak je nakon izrezivanja još jednom izmjeren pomoću pomičnog mjerila.

Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije, uzrokovane vanjskim, uglavnom udarnim opterećenjem, putem plastične deformacije



**Tablica 8. Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita s dva sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Energija $E$ , J
1	10,76	2,22	1,3
2	10,98	2,1	1,3
3	10,64	2,14	1,15
4	10,64	2,2	1,1
5	10,62	2,2	1,5

**Tablica 9. Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita s tri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Energija $E$ , J
1	8,51	3,11	2,7
2	8,07	3,21	3,75
3	7,92	3,02	1,6
4	7,75	3	2,6
5	8,06	3,16	3,7

**Tablica 10. Rezultati ispitivanja žilavosti kompozita sa četiri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Energija $E$ , J
1	7,62	3,1	3,4
2	7,92	3,25	3,97
3	7,9	3,8	3,87
4	8	3,68	3,9
5	8,8	3,98	3,9



### 5.4.2. Ispitivanje savojne čvrstoće i rezultati

Savojna čvrstoća je ispitivana na kidalici čije mjerno područje iznosi 0-950 N (Slika 36. i 37.). Brzina savijanja je 7 mm/min. Tablicama 11, 12 i 13 prikazane su dimenzije uzoraka nakon izrezivanja te sila  $F$  pri kojoj je došlo do loma uzorka. Duljina  $L$  je ponovno određena formulom  $L=16h$ . Nakon što su izmjerene sve debljine  $h$  uzoraka s određenim brojem ojačala, pronađena je njena srednja vrijednost s kojom se računala srednja duljina  $L$  prikazana u tablicama 11, 12, 13.



Slika 36. Kidalica



Slika 37. Uzorak oslonjen u tri točke na kidalici

**Tablica 11. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita s dva sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Srednja duljina $L$ , mm	Sila $F$ , N
1	14,76	2,22	34	232
2	14,86	2,22	34	218
3	14,84	2,18	34	200
4	15	2,12	34	268
5	14,22	2,12	34	212

**Tablica 12. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita s tri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici**

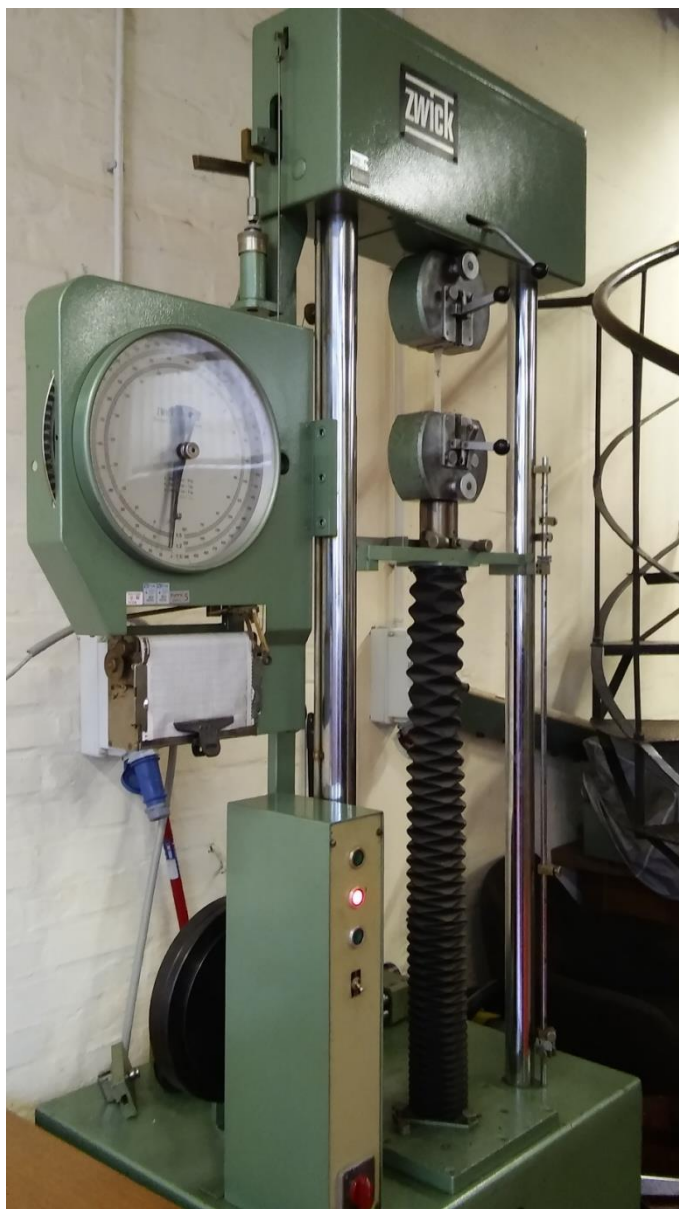
Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Srednja duljina $L$ , mm	Sila $F$ , N
1	15,6	3,02	50	424
2	15,1	3,18	50	400
3	14,82	3	50	388
4	15,14	3,12	50	450
5	15,46	3,02	50	438

**Tablica 13. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita sa četiri sloja staklenih vlakana u poliesterskoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Srednja duljina $L$ , mm	Sila $F$ , N
1	11,1	4,12	64	442
2	10,92	4,02	64	444
3	10,52	3,94	64	344
4	10,76	3,94	64	382
5	9,92	4,06	64	336

### 5.4.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće i rezultati

Za ispitivanje vlačne čvrstoće izrađena su po tri uzorka od svakog kompozita. Ispitivanje se odvijalo na kidalici s većim mjernim područjem nego što je to bilo kod ispitivanja savojne čvrstoće (Slika 38.).



Slika 38. Kidalica

Tablicama 14, 15 i 16 prikazane su dimenzije uzoraka nakon izrezivanja te sila  $F$  pri kojoj je došlo do loma uzorka. Duljina  $L$  je ovoga puta za sve uzorke jednaka i iznosi 115 mm. Sila na kidalici je izražena u kilopondima. U 5. stupcu tablica 14, 15, 16 sila u kilopondima je pomnožena s 9,80665 da bi se dobila ta ista sila u njutnima.

**Tablica 14. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita s dva sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Sila $F$ , kp	Sila $F$ , N
1	10,32	2,02	565	5540,76
2	10,34	2,06	515	5050,42
3	10,16	2,14	515	5050,42

**Tablica 15. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita s tri sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Sila $F$ , kp	Sila $F$ , N
1	10,12	3,06	755	7404,02
2	10,42	3	660	6472,39
3	10,02	3	605	5933,02

**Tablica 16. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita sa četiri sloja staklenih vlakana u polimernoj matrici**

Broj uzorka	Širina $b$ , mm	Debljina $h$ , mm	Sila $F$ , kp	Sila $F$ , N
1	10,16	4,1	875	8580,82
2	10	4,08	965	9463,42
3	10,24	4,04	985	9659,55

## 6. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu rada određena su mehanička svojstva za tri, staklenim vlaknima ojačana, polimerna kompozita čija je matrica od poliesterske smole.

Ispitivanjem žilavosti utvrđeno je da se s povećanjem broja slojeva ojačala povećava i žilavost tog kompozita. Naravno, na taj način raste i masa kompozita pa se mora naći optimalno rješenje. Iz rezultata se, također, može vidjeti da su mehanička svojstva više uzoraka kompozita s jednakim brojem slojeva ojačala, poprilično različita. Iz toga se može zaključiti da staklena vlakna slabo prijanjaju uz polimernu matricu te da je nastala nehomogena struktura kompozita zbog utjecaja čovjeka (ručnim polaganjem nanosena veća količina matrice na nekim mjestima i sl.).

Što se tiče savojne čvrstoće ovog kompozita, ona raste s brojem slojeva ojačala. Savojna čvrstoća staklenim vlaknima ojačanog polimera je manja od savojne čvrstoće ugljikovim ili aramidnim vlaknima ojačanog jednakog polimera. Zato bi se za izradu konstrukcijskog dijela letjelice, načinjenog od ovog kompozita, trebao uzeti onaj s više slojeva ojačala. No, ispitivanje je pokazalo da je savojna čvrstoća kompozita s tri sloja staklenih vlakana malo manja ili čak jednaka savojnoj čvrstoći kompozita s četiri sloja staklenih vlakana. U tom slučaju, zbog uštede na masi, uzeo bi se kompozit s tri sloja staklenih vlakana za izradu nekog dijela konstrukcije.

Vlačna čvrstoća kod staklenih vlakana je visoka što potvrđuju rezultati. Kompozit ojačan staklenim vlaknima ima jako dobru vlačnu čvrstoću koja raste s brojem slojeva vlakana. Sila pri kojoj dolazi do loma polimera ojačanog s četiri sloja staklenih vlakana je gotovo dva puta veća od one pri kojoj dolazi do loma polimera ojačanog s dva sloja staklenih vlakana.

Daljnja ispitivanja trebala bi se usmjeriti na povećanje savojne čvrstoće kod ovog kompozita uz zadržavanje dobre vlačne čvrstoće i moguće poboljšanje žilavosti tako da se u poliestersku matricu uz staklena vlakna dodaju aramidna.

---

**LITERATURA**

- [1] Z. Goraj; A. Frydrychewicz; R. Świtkiewicz; B. Hernik; J. Gadomski; T. Goetzendorf-Grabowski; M. Figat; St. Suchodolski; W. Chajec, High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle of a New Generation – a Design Challenge for a Low Cost, Reliable And High Performance Aircraft, 2004.
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_unmanned\\_aerial\\_vehicles](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_unmanned_aerial_vehicles)
- [3] I. Švehla, Namjena i perspektiva razvoja sustava bespilotnih letjelica, Diplomski rad Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.
- [4] <https://sites.google.com/site/uavuni/1910-s>
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kettering\\_Bug](https://en.wikipedia.org/wiki/Kettering_Bug)
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/RAE\\_Larynx](https://en.wikipedia.org/wiki/RAE_Larynx)
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Fieseler\\_Fi\\_103](https://hr.wikipedia.org/wiki/Fieseler_Fi_103)
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/AAI\\_Aerosonde](https://en.wikipedia.org/wiki/AAI_Aerosonde)
- [9] <http://www.spacedaily.com/news/uav-01d.html>
- [10] R. Austin, Unmanned Aircraft Systems – UAVS Design, Development and Deployment, 2010.
- [11] P. Prebeg, Osnivanje zrakoplova, Uvod u projektiranje zrakoplova
- [12] J. Gundlach, Designing Unmanned Aircraft Systems; A Comprehensive Approach, 2012.
- [13] B. Kinzig; MacAulay-Brown, Inc., Global Hawk Systems Engineering Case Study, 2010.
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop\\_Grumman\\_RQ-4\\_Global\\_Hawk](https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_RQ-4_Global_Hawk)
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Atomics\\_MQ-9\\_Reaper](https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper)
- [16] <http://www.newseveryday.com/articles/46668/20160722/facebook-connectivity-lab-aquila-aircraft-takes-flight.htm>
- [17] <http://aerospaceengineeringblog.com/aircraft-structures/>
- [18] I. Smojver, predavanja iz kolegija Konstrukcije zrakoplova 1
- [19] Z. Goraj; T. Ueda, Ultra Light Wing Structure For High Altitude Long Endurance UAV, 2000.
- [20] T. Filetin; F. Kovačičević; J. Indof, Svojstva i primjena materijala, 2011.
- [21] D. Ćorić; T. Filetin, Materijali u zrakoplovstvu, 2012.
- [22] M. Perković, Utjecaj uvjeta ispitivanja na udarni rad loma, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.