

Održivi kompozitni materijali za zrakoplovne primjene

Trputec, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:728562>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karlo Trputec

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Karlo Trputec

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Ireni Žmak na ukazanom povjerenju, iznimnoj pristupačnosti, savjetima i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Karlo Trputec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Trputec**

Mat. br.: 1191240538

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Održivi kompozitni materijali za zrakoplovne primjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sustainable composite materials for aerospace applications**

Opis zadatka:

Ciljevi održivog razvoja (engl. *Sustainable development goals*, SDG) Ujedinjenih naroda objedinjuju viziju budućeg globalnog društva temeljenog na načelima održivosti. 17 ciljeva i 169 podciljeva SDG-a uključuje ekološku, ekonomsku i društvenu dimenziju održivosti. Ciljevi održivog razvoja pružaju načela i reference za nacionalne i lokalne strategije, dok se proizvođače potiče na poboljšanje održivosti proizvodnih procesa.

Materijali dobiveni iz obnovljivih izvora, materijali koji imaju što manji utjecaj na okoliš i materijali koji se što lakše recikliraju u današnje su vrijeme predmet intenzivnog istraživanja. Takvi materijali su i biokompoziti, tj. kompozitni materijali čija je barem jedna komponenta prirodnog podrijetla. Njihova primjena s vremenom je sve šira zbog sve boljih svojstava koja ti materijali postižu.


U ovom završnom radu potrebno je proučiti područje primjene biokompozitnih materijala u zrakoplovstvu te se usmjeriti na vrste, mogućnosti, svojstva, ograničenja, zakonske uvjete, trendove razvoja i slično. Pri istraživanju u okviru završnog rada potrebno je koristiti napredne znanstvene i stručne literaturne izvore.

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

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Irena Žmak


Datum predaje rada:

1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITI	2
2.1. Uvod.....	2
2.2. Podjela kompozita.....	3
2.3. Kompoziti s česticama	3
2.4. Kompoziti ojačani vlaknima	4
2.5. Strukturni kompoziti	4
2.5.1. Slojeviti kompoziti – laminati.....	4
2.5.2. Sendvič-kompoziti	5
2.6. Polimerni kompoziti.....	6
2.6.1. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima.....	6
2.6.2. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima.....	7
2.6.3. Polimerni kompoziti ojačani aramidnim vlaknima.....	7
2.7. Metalni kompoziti	8
2.8. Keramički kompoziti.....	8
3. BIOKOMPOZITI	9
3.1. Uvod.....	9
3.2. Podjela.....	10
3.3. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana	11
3.4. Kenaf.....	13
3.5. Biokompoziti na svjetskom tržištu.....	14
4. ODRŽIVI RAZVOJ.....	15
4.1. Kružno gospodarstvo	15
4.2. Ciljevi održivog razvoja.....	16
5. ODRŽIVI KOMPOZITNI MATERIJALI ZA ZRAKOPLOVNE PRIMJENE	18
5.1. Uvod.....	18
5.2. Primjeri primjene zrakoplovnih dijelova od biokompozita	22
5.2.1. Radarska kupola.....	22
5.2.2. Torzijska kutija zrakoplova.....	23
5.2.3. Unutrašnjost zrakoplova	23
5.2.4. Zrakoplovna uslužna kolica	26
5.3. Zapaljivost i zakonska ograničenja	28
5.3.1. Uvod.....	28
5.3.2. Propisi, norme i metode ispitivanja zapaljivosti materijala	30

5.3.3. Zapaljivost biokompozita.....	33
5.3.4. Zapaljivost zelenih biokompozita	34
6. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
PRILOZI.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela kompozita prema obliku ojačala [7]	3
Slika 2.	Laminat s višesmjernim polaganjem vlakana [8]	5
Slika 3.	Sendvič-kompozit s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [9]	5
Slika 4.	Staklena vlakna u obliku tkanine [10]	6
Slika 5.	Uzgoj biljke kenaf [19]	13
Slika 6.	Omjer primjene biokompozita u industriji [20]	14
Slika 7.	Shematski prikaz kružnog gospodarstva [22]	15
Slika 8.	Ciljevi održivog razvoja [27]	17
Slika 9.	Airbus A350-900 XWB [30]	19
Slika 10.	Radarska kupola na zrakoplovu [32]	22
Slika 11.	Sjedala u zrakoplovu [33]	24
Slika 12.	Unutarnja ploča zrakoplova MA600 [35]	25
Slika 13.	Zrakoplov Xian MA600 [36]	26
Slika 14.	FibriRock [38]	27
Slika 15.	Zrakoplovna uslužna kolica [40]	27
Slika 16.	Airbus A380 [41]	29
Slika 17.	Vertikalni test gorenja Bunsenovim plamenikom [44]	30
Slika 18.	Horizontalni test gorenja Bunsenovim plamenikom [45]	31
Slika 19.	Uređaj za ispitivanje graničnog indeksa kisika [17]	32
Slika 20.	Konusni kalorimeter [17]	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ušteda na masi primjenom polimernih kompozita u Boeingovim zrakoplovima [6]	2
Tablica 2. Razlika između prirodnih i sintetičkih vlakana [11]	12
Tablica 3. Razvoj kompozitnih materijala od 1970. za zrakoplove Airbus [1].....	20

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i> – Ciljevi održivog razvoja
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> – Organizacija za međunarodno civilno zrakoplovstvo
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> – Savezna uprava za civilno zrakoplovstvo
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i> – Europska agencija za sigurnost zračnog prometa
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – Društvo automobilskih inženjera
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Američko društvo za ispitivanje i materijale
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standards</i> – Federalni standardi sigurnosti motornih vozila
FAR	<i>Federal Aviation Regulations</i> – Savezni zrakoplovni propisi
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za normizaciju

SAŽETAK

Tema ovog rada su održivi kompozitni materijali za zrakoplovne primjene. Zbog sve veće brige oko zaštite okoliša održivi materijali poput biokompozita postaju sve popularniji kako bi se smanjila emisija ugljičnog dioksida, a na taj način i utjecaj na globalno zatopljenje. U radu su prikazane prednosti i nedostaci prirodnih vlakana za izradu biokompozita, kao i usporedba određenih svojstava prirodnih i sintetičkih vlakana. Nadalje, opisana je važnost kružnog gospodarstva i Ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih naroda. Također, rad prikazuje razvoj materijala u zrakoplovima te kako se kroz godine povećala upotreba kompozitnih materijala. Povrh toga, biokompoziti, kao održivi materijali, pronašli su primjenu u izgradnji radarske kupole, sjedala, stropova, podova i drugih sekundarnih konstrukcija. Naposljetku, u radu su još navedeni određeni propisi o zapaljivosti koje zrakoplovni materijali moraju zadovoljiti te razni usporeivači gorenja koji su neophodni za primjenu biokompozita u zrakoplovstvu.

Ključne riječi: biokompoziti, zrakoplov, ciljevi održivog razvoja, kružno gospodarstvo, zapaljivost

SUMMARY

The topic of this Bachelor thesis is about sustainable composite materials for aerospace applications. Due to the growing concern for the environment, sustainable materials such as biocomposites are becoming increasingly popular in order to reduce the carbon dioxide emissions and thus the impact on global warming. This thesis presents the advantages and disadvantages of natural fibres for biocomposites as well as a comparison of selected properties of natural and synthetic fibres. Furthermore, the importance of the circular economy and the United Nations Sustainable Development Goals is described. Also, the thesis shows the development of materials in aircrafts and how the use of composite materials has increased over the years. Moreover, biocomposites, as sustainable materials, have found application in the construction of aircraft radome, seats, ceilings, floors and other secondary structures. Ultimately, the thesis lists selected regulations on flammability that aircraft materials must meet and various flame retardants that are necessary for the application of biocomposites in aviation.

Key words: biocomposites, aircraft, sustainable development goals, circular economy, flammability

1. UVOD

Upotreba mnogih materijala koji se ne mogu reciklirati i obnoviti te neodgovarajuće zbrinjavanje otpada pridonijeli su nepovoljnom utjecaju na okoliš. Zbog sve veće brige za zaštitu okoliša, kako bi okoliš ostao očuvan za buduće generacije, od iznimne je važnosti istražiti sva moguća potencijalna rješenja kojima bi se smanjila emisija ugljičnog dioksida (CO₂), upotreba naftnih derivata i količina otpada koja proizlazi iz industrije. Do 2017. godine broj stanovnika na svijetu se povećao do 7,5 milijardi ljudi, dok se očekuje da će se do 2050. godine broj stanovnika još povećati i iznositi čak 9,8 milijardi ljudi te će se s takvim porastom svjetske populacije potreba za razvojem tehnologije i industrije također povećati [1]. Nadalje, zrakoplovnoj industriji se predviđa značajan rast zračnog prometa u sljedećim desetljećima. Naime i Airbus i Boeing su izračunali kako će im se flota zrakoplova do 2035. godine u odnosu na 2016. godinu udvostručiti te s obzirom na takvo povećanje zrakoplovne flote iznimno je važno smanjiti utjecaj zrakoplova na okoliš [2]. Uz potrošnju goriva, koja se pokušava smanjiti na način da se koriste neki novi alternativni materijali manje mase, još jedan veliki problem u zrakoplovnoj industriji je zbrinjavanje dijelova nakon isteka vijeka trajanja zrakoplova [3]. Kako bi industrija odgovorila na sve veće ekološke probleme posljedično dolazi do povećanja razvoja proizvoda izrađenih od materijala koji dolaze iz prirodnih izvora, kao što su na primjer biokompoziti. Istraživače takvi obnovljivi materijali posljednjih godina sve više privlače jer su održivi i ekonomični [4].

2. KOMPOZITI

2.1. Uvod

„Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.“ Na ovaj način mogu se postići kombinacije svojstava koje nisu uobičajene za druge materijale kao na primjer čvrstoća, krutost, težina, tvrdoća, kemijska postojanost, električna ili toplinska vodljivost [5]. Prednosti kompozita su brojne u usporedbi s nekim „tradicionalnim“ materijalima, a te prednosti se ostvaruju u otpornosti na koroziju, maloj gustoći, povoljnom odnosu modula elastičnosti i gustoće, povoljnom odnosu čvrstoće i gustoće, mogućnosti proizvodnje dijelova kompliciranog oblika, jednostavnom i jeftinom održavanju, duljem vijeku trajanja te mogućnosti „projektiranja“ strukture i svojstava. Korištenjem kompozitnih dijelova u odnosu na iste takve metalne dijelove može se uštedjeti na masi [Tablica 1], jer su u pravilu lakši od otprilike 20 do 30 %. U osnovi se svaki kompozitni materijal sastoji od dvije faze, a to su matrica i ojačalo te to dovodi do toga da ponašanje kompozita ovisi o: svojstvima materijala i matrice, veličini i rasporedu sastavnih dijelova (tzv. konstituenata), volumnom udjelu i obliku konstituenata te naposljetku vrsti i jačini veza između konstituenata. Povezivanje ojačala, prenošenje opterećenja na ojačala te zaštita površine ojačala od oštećivanja pripadaju osnovnim zadaćama matrice. Nasuprot tome, zadaća vlakana je ponajprije da povećaju čvrstoću i krutost te zato kao nositelji opterećenja trebaju biti što je moguće veće čvrstoće i krutosti, no također i što lakša [6].

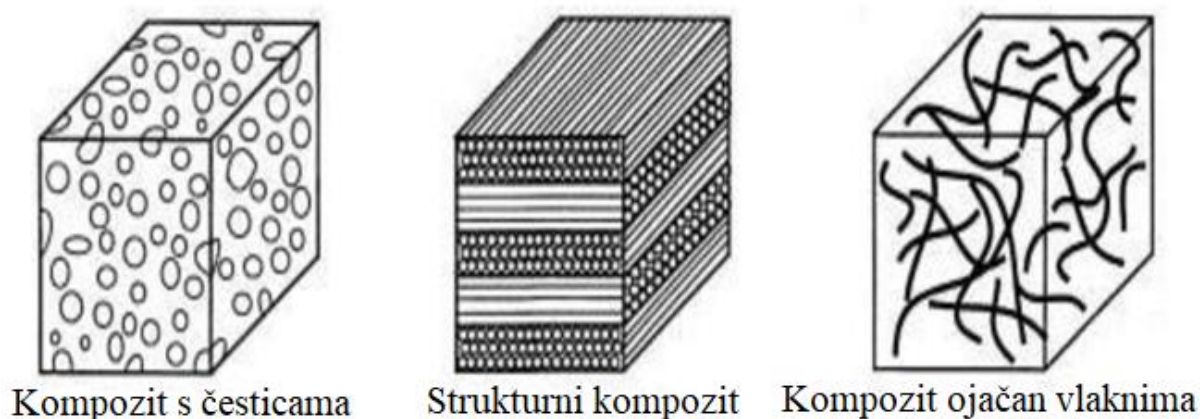
Tablica 1. Ušteda na masi primjenom polimernih kompozita u Boeingovim zrakoplovima [6]

Tip zrakoplova	Ukupna masa polimernih kompozita, kg	Ušteda na masi, kg
Boeing 737	681	272
Boeing 757	1516	676
Boeing 767	1535	636

Razvoj zrakoplova velikim je djelom uvjetovan primjenom kompozita čiji udio neprekidno raste zbog iznimno dobrih svojstava kao na primjer mogućnost postizanja složenih oblika kojima se smanjuje potreba za spajanjem, što smanjuje količinu mjesta koja potencijalno mogu biti opasna [6].

2.2. Podjela kompozita

Podjela kompozita može biti prema materijalu matrice i prema obliku ojačala. Kompoziti se prema materijalu matrice dijele na polimerne, metalne i keramičke. Prema obliku ojačala [Slika 1] kompoziti se dijele na kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite i strukturne kompozite. Strukturni kompoziti se još dijele na slojevite kompozite, odnosno laminate, i sendvič-kompozite. Kompoziti s česticama se s obzirom na veličinu čestica dijele na kompozite s disperzijom (čestice $< 0,1$ mikrometar) te kompozite s velikim česticama (čestice > 1 mikrometar). Čestice mogu biti sferičnog, pločastog ili bilo kojeg drugog pravilnog, ali i nepravilnog oblika. Kompoziti ojačani vlaknima mogu sadržavati ojačala koja su u obliku viskera, vlakana ili žica. S druge strane, hibridni kompoziti su kompoziti sastavljeni od više različitih vrsta vlaknastih ojačala, obuhvaćenih jedinstvenom matricom [6].



Slika 1. Podjela kompozita prema obliku ojačala [7]

2.3. Kompoziti s česticama

Kompoziti s česticama dijele se na kompozite s disperzijom i kompozite s velikim česticama. Kompoziti s disperzijom su oni kod kojih je volumni udio čestica do 0,15 i veličina čestica manja od 0,1 mikrometra, dok su kompoziti s velikim česticama oni kod kojih je volumni udio čestica veći od 0,2 i veličina čestica veća od 1 mikrometra. Kod kompozita očvrnutih disperzijom čestica, disperzije sitnih čestica sprječavaju gibanje dislokacija u matrici, tj. povećavaju njenu otpornost plastičnoj deformaciji, zapravo povećavaju čvrstoću matrice. Veličina disperziranih čestica, njihov volumni udio i međusoban razmak glavne su odrednice koje govore o učinkovitosti disperzije. Prednost očvrstnuća disperzijom u odnosu na precipitacijsko očvrstnuće je to što tvrde disperzirane faze predstavljaju prepreke gibanju

dislokacija i pri visokim temperaturama, dok se precipitati otapaju u čvrstoj otopini. Prednost kompozita s velikim česticama je niska cijena i dobra otpornost na trošenje koju daje punilo, ali su znatno manje učinkoviti u slučajevima kada se traži visoka čvrstoća [6].

2.4. Kompoziti ojačani vlaknima

Ugradnjom vlakana koja su čvrsta, visokog modula elastičnosti i niske žilavosti u matricu koja je niže tvrdoće i veće duktilnosti kod kompozita vlaknima ojačanih dolazi do poboljšanja određenih svojstava kao što je krutost, postiže se veća čvrstoća i žilavost te dolazi do povećanja omjera čvrstoće i gustoće, poznatog pod nazivom specifična čvrstoća. Prema karakteru i promjeru, vlakna se dijele na viskere, vlakna i žice. Viskeri su izrazito sitni monokristali s izuzetno velikim omjerom duljine i promjera. Zbog jako velikog udjela pravilne kristalne građe gotovo i ne postoji mogućnost tečenja viskera što dalje vodi do njihove iznimno visoke čvrstoće. Unatoč takvim svojstvima viskeri se ne primjenjuju u većoj mjeri kao ojačanje zbog visoke cijene i otežane, često i nemoguće, ugradnje u matricu. Vlakna su malog promjera te su polikristalna ili amorfnna, dok su žice relativno velikog promjera. Uobičajeni materijali za žice su volfram, molibden i čelik [5]. U zrakoplovstvu najčešće korištena vlakna za ojačanje polimernih kompozita su staklena, aramidna, ugljična i borova. Neki osnovni načini rasporeda vlakana u matrici su sljedeći:

- kontinuirana jednosmjerna vlakna
- slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna
- ortogonalno raspoređena vlakna
- višesmjerno položena vlakna.

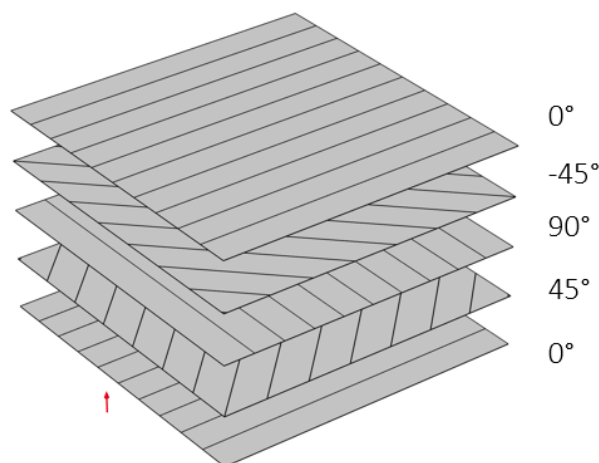
Kontinuirana vlakna su ona koja imaju veliki omjer duljine i promjera, dok su diskontinuirana vlakna ili kratka vlakna ona s manjim omjerom duljine i promjera [6].

2.5. Strukturni kompoziti

2.5.1. Slojeviti kompoziti – laminati

Slojeviti kompoziti sastavljeni su od dva ili više međusobno povezanih različitih slojeva. Razlike između slojeva mogu biti po orijentaciji ojačanja, obliku ili u materijalu. Kod kompozita ojačanih jednosmjernim polaganjem vlakana javljaju se veća čvrstoća i krutost u onom smjeru u kojemu su vlakna položena, nego što se javljaju poprečno tom smjeru. Kako bi

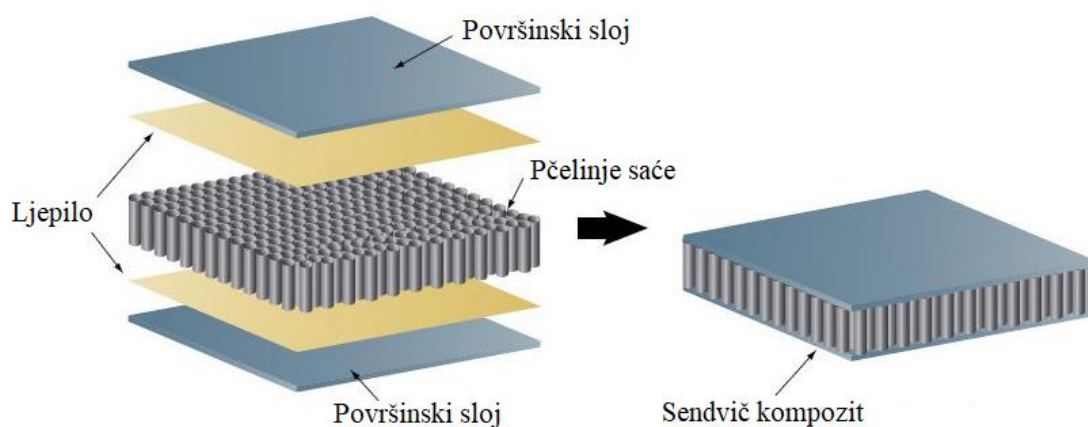
se ta anizotropija smanjila, potrebno je izraditi laminat s više slojeva i to svaki sloj s različitim usmjerenjem vlakana [Slika 2] [6].



Slika 2. Laminat s višesmjernim polaganjem vlakana [8]

2.5.2. Sendvič-kompoziti

„Sendvič-konstrukcije sastoje se od dvaju čvrstih i krutih tankih vanjskih slojeva od metala, polimera, kompozita ili drva, između kojih se nalazi jezgra od znatno lakšeg materijala.“ Zbog male mase imaju iznimno visoku specifičnu krutost i specifičnu čvrstoću [6]. Značajan primjer sendvič-kompozita koji se primjenjuje u zrakoplovstvu je onaj s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [Slika 3], odnosno to su tanki limovi, folije ili trake u obliku šesterokutnih ćelija koje su okomito usmjerene na ravninu oba površinska sloja [5].



Slika 3. Sendvič-kompozit s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [9]

2.6. Polimerni kompoziti

2.6.1. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima

Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima su oni kompoziti koji se proizvode u najvećim količinama, a kao što im i ime kaže, građeni su od polimerne matrice i u njoj sadržanih staklenih vlakana, koja mogu biti kontinuirana ili diskontinuirana. Staklena vlakna mogu biti promjera od 3 pa sve do 20 mikrometara, to je takozvano E-staklo i S-staklo. Neki od razloga zbog kojih je staklo popularan materijal kao ojačanje u kompozitima su sljedeći:

- Može ga se lako izvlačiti iz rastaljenog stanja u obliku visokočvrstih vlakana.
- Lako je dobavljivo što osigurava ekonomičnost proizvodnje.
- Ugradnjom staklenih vlakana u polimernu matricu postiže se kompozit s vrlo visokom specifičnom čvrstoćom.
- Mogućnost postizanja kemijske inertnosti, što za posljedicu daje kompozite primjenjive u raznim korozivnim okolinama [5].

Najčešći predoblici ojačanja koja se koriste za zrakoplovne konstrukcije su tkanine [Slika 4], dok su tkanine predimpregnirane polimernom smolom poznate kao preprezi [6].



Slika 4. Staklena vlakna u obliku tkanine [10]

2.6.2. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima

Uobičajeni promjeri ugljičnih vlakana su od 4 do 10 mikrometara te su dostupna kao rezana i kontinuirana. Neki od razloga primjene ugljičnih vlakana kao ojačanja u polimernim matricama su sljedeći:

- Od svih drugih vlakana, ugljična vlakna su ona s najvišim specifičnim modulom elastičnosti (tj. omjerom modula i gustoće) i najvišom specifičnom čvrstoćom.
- Ugljična vlakna također i pri povišenim temperaturama zadržavaju visoku čvrstoću, jedino što su zbog oksidacije mogući problemi.
- Pri sobnoj temperaturi ugljična vlakna ne razaraju se od strane vlage, kiseline i lužina.
- Razvijeni su relativno ekonomični postupci proizvodnje kompozita [5].

2.6.3. Polimerni kompoziti ojačani aramidnim vlaknima

Aramidna vlakna uvedena su u primjenu ranih 1970-ih, visokočvrsti i visokomodulni su materijal te su posebno poželjna zbog izuzetnog omjera čvrstoće i gustoće. „Kevlar“ i „Nomex“ su komercijalni nazivi za dva najuobičajenija tipa aramidnih vlakana. Neka svojstva po kojima su poznata aramidna vlakna su sljedeća:

- krutost
- žilavost
- otpornost umoru materijala
- otpornost na puzanje
- otpornost zapaljenju i stabilnost pri relativno visokim temperaturama
- podložnost degradaciji u jakim kiselinama i lužinama, no relativno su inertni prema drugim kemikalijama i otapalima [5].

2.7. Metalni kompoziti

Ovo su kompoziti kod kojih je matrica metal. Neke prednosti metalnih kompozita u odnosu na kompozite s polimernom matricom su:

- primjena pri višim temperaturama
- negorivost
- veća otpornost prema degradaciji uzrokovanoj djelovanjem organskih kapljevina.

Međutim, zbog znatno više cijene od polimernih kompozita, uporaba metalnih kompozita je prilično ograničena. Materijali matrice mogu biti superlegure, legure aluminija, titanija, magnezija i bakra. Ojačala metalnih kompozita mogu biti u obliku viskera, čestica te kontinuiranih i diskontinuiranih vlakana i to s volumnim udjelom koji je u granicama od 10 do 60 %. Kao materijali kontinuiranih vlakana koriste se ugljik, bor, aluminijev oksid, silicijev karbid i tvrdi metali, dok se za materijale diskontinuiranih ojačala koriste viskeri silicijeva karbida, čestice karbida i aluminijeva oksida te sjeckana vlakna od aluminijeva oksida i ugljika [5].

2.8. Keramički kompoziti

Keramički materijali pokazuju otpornost prema oksidaciji kao i općenito otpornost na slabljenje svojstava pri povišenim temperaturama, ali sklonost prema krhkom lomu loše je svojstvo keramičkih materijala. Usporedno s metalima, keramika ima iznimno nisku lomnu žilavost, no s razvojem na području keramičkih kompozita lomna žilavost je znatno povećana [5].

3. BIOKOMPOZITI

3.1. Uvod

Biokompoziti su kompozitni materijali kojima bilo koja od njegovih faza, bilo ojačanje ili matrica, dolazi iz prirodnog izvora [3]. Zeleni biokompoziti su posebna vrsta biokompozita koja spada u još održivije materijale, naime to je kompozit s biorazgradivom matricom ojačanom prirodnim vlaknima. Do danas su napravljena mnoga istraživanja za razvoj zelenog biokompozita kako bi se postigao potpuno biorazgradiv kompozit [11].

Zabrinutost za okoliš kontinuirano raste, a uporaba neobnovljivih izvora, kao što je nafta, tu zabrinutost još i više povećava. Emisije ugljičnog dioksida kao rezultat ljudskih aktivnosti stalna su tema rasprava u znanstvenoj zajednici. Kao posljedica razmatranja potencijalnih najboljih rješenja za što je boljom mogućom zaštitom okoliša, korištenje materijala iz obnovljivih izvora sve više raste. Posljednjih godina mnoge su industrije u raznim proizvodnim sektorima prepoznale potrebu prilagodbe ekološki prihvatljivih proizvodnih tehnologija i proizvoda [12].

Godinama su provedena opsežna istraživanja o zelenim i ekološkim materijalima, međutim temeljna istraživanja vezana za prirodna vlakna produbljena su tek posljednjih godina zbog sve većih zahtjeva za boljom zaštitom okoliša. Polimerni kompoziti ojačani prirodnim vlaknima postaju materijali od iznimne važnosti zbog svoje niske cijene i zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, što ih čini atraktivnim zbog dostupnosti i obnovljivosti sirovina. Na taj način prirodna vlakna postaju alternativa sintetičkim vlaknima u transportu, uključujući zrakoplovnu industriju [13].

Biopolimeri su oni polimeri koji su biorazgradivi, na biološkoj osnovi ili oboje. Ojačanje biopolimera s prirodnim vlaknima je strategija za proizvodnju naprednih kompozitnih materijala, održivih i ekonomičnih. Izradom kompozitnih materijala s biopolimernom matricom ojačanom prirodnim vlaknima može se smanjiti ovisnost o materijalima na bazi nafte [12].

3.2. Podjela

Prirodna vlakna se prema podrijetlu dijele na biljna, koja mogu biti drvena (meko i tvrdo drvo) i nedrvena, životinjska te mineralna, čiji je predstavnik azbest. Glavna komponenta životinjskih vlakana su bjelančevine, dok je glavna komponenta biljnih vlakana celuloza. Biljna vlakna (osim pamuka) uglavnom se sastoje od organskih komponenata topivih u vodi, lignina, voskova, celuloze, hemiceluloze i pektina. Ovisno o vrsti biomase, kemijski sastav vlakana može se jako razlikovati. Detaljnija podjela prirodnih vlakana je u nastavku te ona mogu biti:

- životinjska
 - dlaka
 - svila
 - vuna
 - pero
- mineralna
 - azbest
- biljna
 - drvena
 - nedrvena.

Drvena vlakna dijele se na meka i tvrda, dok je čak pet vrsta nedrvenih vlakana te su ona s nekoliko reprezentativnih primjera sljedeća:

- stabljika: konoplja, lan, juta, kenaf, ramija
- list: sisal, ananas, abaka
- sjeme/voće: kokos, kapok, pamuk
- slama: pšenica, riža, soja
- trava/trska: bambus, miskantus.

Općenito, vlakna koja su dio kore stabljike poželjna su za primjene koje zahtijevaju visoku vlačnu čvrstoću i krutost [12].

3.3. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana

Svojstva kao što su obnovljivost, biorazgradivost i neutralnost ugljičnog dioksida (CO₂) prirodna vlakna čine ekološkim materijalima [12].

Obnovljivost prirodnih vlakana podrazumijeva da se mogu proizvesti dovoljno brzo da idu u korak s brzinom potrošnje [14].

Biorazgradivost označava da se prirodna vlakna mogu razgraditi uz prisustvo bakterija i drugih organizama koji žive u tlu, što im daje sposobnost povratka u prirodu bez ostavljanja toksina; nakon razgradnje ne bi trebalo ostati ništa osim vode i ugljičnog dioksida, koji su biljkama ostavljeni kao hrana koja im je potrebna [15].

Ujednačen odnos emisije ugljikovog dioksida i njegove apsorpcije iz atmosfere naziva se ugljična neutralnost. S druge strane, ponor ugljika je onaj sustav koji emitira manje ugljikovog dioksida u odnosu na količinu ugljikovog dioksida koju apsorbira; u te sustave se ubrajaju šume, oceani i tlo. Iznimno je bitno smanjiti emisiju ugljikovog dioksida kako bi se postigla klimatska neutralnost, a na taj način i smanjilo globalno zatopljenje [16]. Korištenjem prirodnih vlakana smanjuje se emisija stakleničkih plinova, kao što je ugljikov dioksid, a time i utjecaj na klimatske promjene [12].

Prirodna vlakna dostupna su po nižoj cijeni od sintetičkih vlakana, stoga je moguća upotreba i neke skuplje matrice ili iste matrice uz jeftiniji konačni proizvod. Nekoliko zemalja uvelo je ozbiljna ograničenja na odlaganje proizvoda izrađenih od staklenih vlakana na odlagališta otpada, što daje dodatan prostor prirodnim vlaknima koja im mogu biti učinkovita zamjena. Prirodna vlakna imaju ekološki prihvatljiv proizvodni postupak i mogućnost odlaganja u usporedbi sa sintetičkim vlaknima te se prirodna vlakna mogu preraditi u konvencionalnoj opremi za obradu, jer za razliku od staklenih vlakana, prirodna vlakna su neabrazivna za obradne strojeve koji se koriste za proizvodnju kompozitnih materijala, što rezultira ukupnom boljom učinkovitošću. Prirodna vlakna poput jute, lana, kenafa i drugih imaju visoku specifičnu čvrstoću i modul elastičnosti te nisku gustoću u usporedbi s E-staklenim vlaknima te su kompoziti ojačani prirodnim vlaknima lakši materijali u usporedbi s kompozitima ojačanim staklenim vlaknima, pod uvjetom da razina punjenja vlakana ostaje ista. Još jedna od prednosti prirodnih vlakana je ta što kada se kompoziti s prirodnim vlaknima spaljuju za dobivanje energije (tj. energetske oporabljuju), nastaju bezopasni ostaci u obliku pepela bez tragova štetnih teških metala. Nadalje, korištenje velikih količina ostataka lignoceluloze može donijeti novi izvor prihoda poljoprivrednicima te to može pomoći u stvaranju novih radnih mjesta u

ruralnim poljoprivrednim zajednicama. Također, prirodna vlakna imaju relativno siguran proizvodni postupak sa smanjenom iritacijom kože i dišnog sustava te pokazuju dobra svojstva zvučne izolacije [12].

Jedan od nedostataka prirodnih vlakana je taj što su hidrofilna, što može dovesti do negativnih utjecaja na svojstva nastalih kompozita. Zato se prije nanošenja polimerne matrice moraju provesti odgovarajuće metode sušenja. Još jedan problem za prirodna vlakna je loša kompatibilnost između hidrofobne polimerne matrice i hidrofilnih prirodnih vlakana, no ovaj problem se može riješiti različitim fizikalnim ili kemijskim modifikacijama vlakana [12]. Glavni nedostatak prirodnih vlakana je iznimno laka zapaljivost, ali i ovaj nedostatak se može ukloniti i to raznim usporivačima gorenja [17].

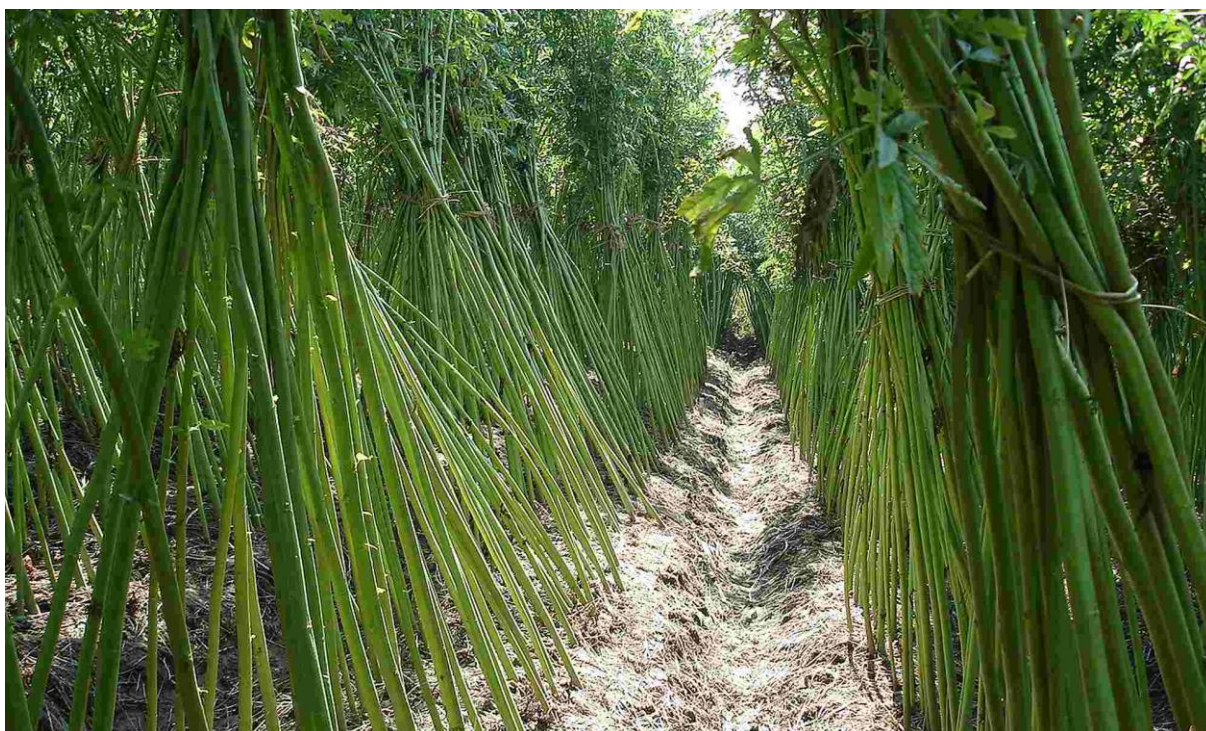
[Tablica 2] prikazuje neke temeljne razlike između prirodnih i sintetičkih vlakana.

Tablica 2. Razlika između prirodnih i sintetičkih vlakana [11]

Svojstva	Prirodna vlakna	Sintetička vlakna
Resurs	Neograničen	Ograničen
Obnovljivost	Obnovljiva	Neobnovljiva
Recikličnost	Dobra	Umjerena
Biorazgradivost	Da	Ne
CO ₂ neutralizacija	Da	Ne
Gustoća	Niska	Visoka
Mehanička svojstva	Umjerena	Dobra
Osjetljivost na vlagu	Visoka	Niska
Toplinska osjetljivost	Visoka	Niska
Abrazivnost	Niska	Visoka
Toksičnost	Ne	Da
Trošak	Nizak	Viši od prirodnih vlakana
Potrošnja energije	Niska	Visoka

3.4. Kenaf

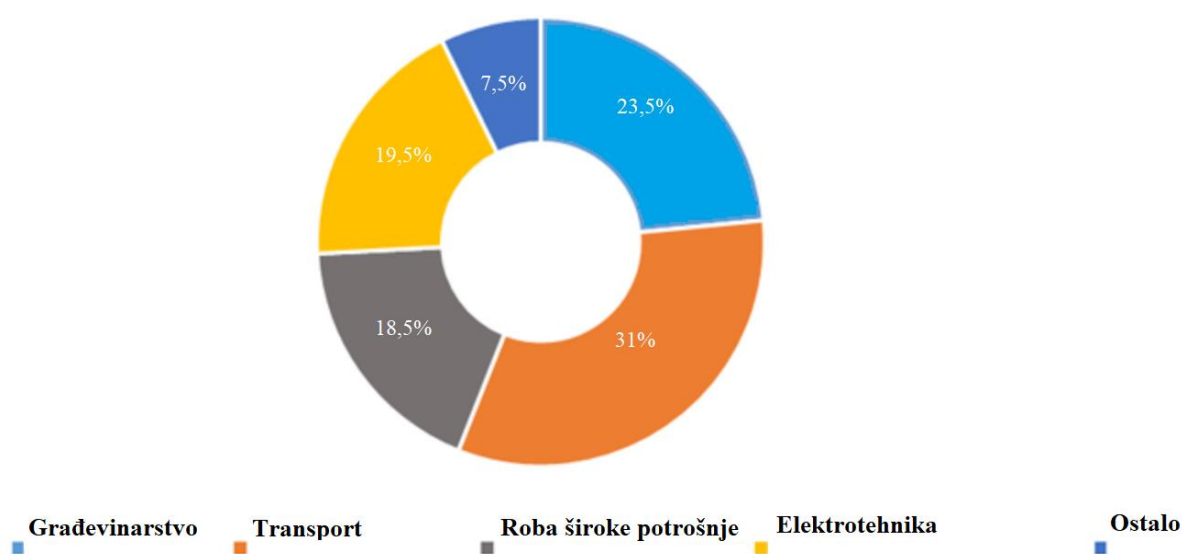
Kenaf [Slika 5] postaje značajna biljka sa stajališta ekološke prihvatljivosti zbog visoke sposobnosti čišćenja zraka trošenjem velikih količina ugljičnog dioksida (CO₂), koji je glavni uzrok efekta staklenika te apsorpiranjem viška dušika i fosfora iz tla, zaostalih od umjetnih gnojiva. Vlakna kenafa zamišljena su kao alternativa sintetičkim vlaknima u proizvodnji kompozita, a zbog vrlo dobrih mehaničkih svojstava to i mogu biti. Specifična krutost usporediva je sa staklenim vlaknima, a cijena je dva do tri puta niža od staklenih vlakana. Vlakna kenafa porijeklom su iz Afrike i Azije, a najveći svjetski proizvođači kenafa su Indija i Kina. Agronomski gledano, kenaf ima prednosti što se tiče otpornosti na klimatske ekstreme, štetnike i bolesti [18]. Jedna od atraktivnih značajki kenafa je velika brzina rasta: kenaf može narasti od sjemena pa do 3 do 4 metara visokih biljaka u roku od svega pet do šest mjeseci, što naposljetku dovodi do povećanja sklonosti industrije za upotrebom vlakana kenafa u odnosu na neka druga prirodna vlakna [4].



Slika 5. Uzgoj biljke kenaf [19]

3.5. Biokompoziti na svjetskom tržištu

Predviđa se rast globalnog tržišta biokompozita i to s prosječnom godišnjom stopom rasta od 10,8 % te da će s 22,43 milijarde američkih dolara (USD) u 2019. godini doći do 51,32 milijarde američkih dolara (USD) u 2027. godini. Glavni trendovi rasta tržišta za industriju biokompozita su čimbenici poput povećanja svijesti ljudi o ekološki prihvatljivim proizvodima te politike od strane određenih vlada kako bi se neki neodrživi materijali zamijenili biorazgradivim i ekološkim materijalima. Značajne prednosti koje nude biokompoziti su mala masa i biorazgradivost, što su također ključni razlozi za njihov nedavni uspjeh među proizvođačima i potrošačima. Posljednjih godina upotreba inovativnih materijala na bazi prirodnih vlakana sve više raste s porastom ekološke svijesti te zbog ostvarivanja visokih performansi po pristupačnoj cijeni. U Sjevernoj Americi i Europi potražnja za zelenim materijalima je općenito velika, pa tako i za zelenim biokompozitima koji su 100 % biorazgradivi i ne ostvaruju štetne posljedice po okoliš. Međutim, iako biokompoziti od sintetičkih smola nisu u potpunosti biorazgradivi, zbog svoje visoke čvrstoće i male mase često ostvaruju veliku potražnju kod potrošača [20]. Povećanje interesa za polimernim kompozitima ojačanim prirodnim vlaknima očekuje se u zrakoplovnom, automobilskom i građevinskom sektoru te također i u sektorima za sport i razonodu. S obzirom na potencijal primjene koji posjeduju polimerni kompoziti ojačani prirodnim vlaknima, očekuje se samo daljnji porast tržišta za takvim materijalom [1]. [Slika 6] prikazuje u kojim industrijama se najviše koriste biokompozitni materijali.



Slika 6. Omjer primjene biokompozita u industriji [20]

4. ODRŽIVI RAZVOJ

4.1. Kružno gospodarstvo

Kružno gospodarstvo [Slika 7] je ekonomski i ekološki koncept koji se temelji na ideji da se otpad pretvori u nove resurse, što bi značilo ponovnu upotrebu otpadnog materijala. Ovaj koncept nastao je kao rezultat sve veće osviještenosti stanovništva o problemima očuvanja okoliša, klimatskih promjena i neodržive tradicionalne proizvodne prakse. Ova alternativa ne samo da proizvodnju i razvoj čini kompatibilnima s okolišem, već joj je cilj i povećanje dobiti te promicanje konkurentnosti. Ovo su neka od glavnih načela kružnog gospodarstva:

- ekološka odgovornost
- recikliranje
- ponovna upotreba bilo kojeg otpada koji nije prikladan za recikliranje
- korištenje obnovljivih izvora energije
- promicanje ekološki prihvatljivih sporazuma [21].



Slika 7. Shematski prikaz kružnog gospodarstva [22]

Suprotno kružnom gospodarstvu, linearno gospodarstvo je model koji se temelji na proizvodnji, potrošnji i otpadu. Ovaj model datira iz doba industrijske revolucije i od tada je prevladavajući na tržištu gdje se resursi smatraju neograničenima, a ekonomske koristi se stavljaju na prvo mjesto. Ipak, linearno gospodarstvo postaje neodrživo i zahvaća veliku skupinu problema kao što su:

- prekomjerna proizvodnja
- smanjenje životnih ciklusa proizvoda
- nakupljanje otpada.

Kružno gospodarstvo usmjereno je na rješavanje ovih problema, uz istovremeno smanjenje troškova [23].

4.2. Ciljevi održivog razvoja

Održivi razvoj je kao novi pojam prvi put predstavljen 1987. godine i to od Svjetske komisije za okoliš i razvoj te je definiran kao onaj razvoj s kojim su potrebe današnjice zadovoljene, bez ugrožavanja potreba narednih generacija. Program Ujedinjenih naroda o održivom razvoju do 2030. godine (tzv. Agenda 2030) usvojen je 2015. godine te je osnovna zamisao predstavljena u 17 ciljeva održivog razvoja (engl. *Sustainable Development Goals*, SDG) [Slika 8], koji su na detaljan način razrađeni u 169 međusobno usko povezanih podciljeva [24]. Ciljevi održivog razvoja ove agende prepoznaju koliko je bitno ukidanje siromaštva, poboljšavanje zdravlja i obrazovanja, smanjivanje nejednakosti, poticanje gospodarskog rasta te borba protiv klimatskih promjena i očuvanje oceana i šuma. Ciljevi su sljedeći:

- Ne siromaštvu (engl. *No poverty*)
- Ne gladi (engl. *Zero hunger*)
- Dobro zdravlje (engl. *Good health and well-being*)
- Kvalitetno obrazovanje (engl. *Quality education*)
- Ravnopravnost spolova (engl. *Gender equality*)
- Čista voda i kanalizacija (engl. *Clean water and sanitation*)
- Pristupačna i obnovljiva energija (engl. *Affordable and clean energy*)
- Dobra radna mjesta i gospodarski rast (engl. *Decent work and economic growth*)
- Industrija, inovacija i infrastruktura (engl. *Industry, innovation and infrastructure*)

- Smanjiti nejednakosti (engl. *Reduced inequalities*)
- Održivi gradovi i zajednice (engl. *Sustainable cities and communities*)
- Odgovorna potrošnja i proizvodnja (engl. *Responsible consumption and production*)
- Klimatsko djelovanje (engl. *Climate action*)
- Život ispod vode (engl. *Life below water*)
- Život na kopnu (engl. *Life on land*)
- Mir, pravda i snažne institucije (engl. *Peace, justice and strong institutions*)
- Partnerstvom do ciljeva (engl. *Partnerships for the goals*) [25].

Od Ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih naroda očekuje se da će do 2030. godine biti pokretači nacionalnog razvoja i međunarodne pomoći. Nadalje, ciljevi su zamišljeni kao međusobno povezani dijelovi jedinstvenog programa u kojemu su ciljevi zaštite okoliša sastavni dio postizanja cjeline [26].



Slika 8. Ciljevi održivog razvoja [27]

5. ODRŽIVI KOMPOZITNI MATERIJALI ZA ZRAKOPLOVNE PRIMJENE

5.1. Uvod

U prvim danima zrakoplovstva odabir materijala za zrakoplovne primjene temeljio se prvenstveno na funkcionalnosti, a ne na bilo čemu drugom. Orville i Wilbur Wright priznati su kao prvi koji su letjeli kontroliranim i kontinuiranim letom sa svojim Wright Flyerom 1903. godine. Prilikom dizajniranja Wright Flyera jedan od glavnih prioriteta bio je maksimiziranje brzine uzdizanja zrakoplova te da bi to postigli trebali su smanjiti ukupnu masu zrakoplova koristeći najbolje materijale koji su bili dostupni u to vrijeme. Jedno od otkrića tijekom razvoja zrakoplova bila je upotreba lijevane aluminijske legure za blok motora radi smanjenja mase. Aluminijskom legurom s gustoćom od samo jedne trećine željeza, koje se u to vrijeme često koristilo za proizvodnju blokova automobilskih motora, braća Wright uspjela su steći značajnu prednost u pogledu odnosa snage i mase [1].

Danas zrakoplovna industrija ne teži samo tome kako poboljšati postojeći materijal, već kako razviti materijal s optimalnim svojstvima za određene primjene, a kompoziti su upravo jedan takav suvremeni materijal čija se svojstva, zahvaljujući ciljanom projektiranju, mogu prilagoditi složenim eksploatacijskim uvjetima [6].

Upravo vlaknima ojačani polimerni kompoziti su jedna od bitnih skupina zrakoplovnih materijala koja ima dugu povijest korištenja zbog visokog omjera čvrstoće prema masi i otpornosti na koroziju [28]. Nadalje, u prošlosti su glavni pokretači upotrebe kompozita ojačanih vlaknima za komponente zrakoplova bili smanjenje troškova i poboljšavanje performansi dok je sada naglasak prebačen na pitanja zaštite okoliša, stoga su glavni pokretači sada smanjenje upotrebe goriva, smanjenje zagađenja te smanjenje buke. Povećana upotreba kompozita za zamjenu aluminijske konstrukcije donosi brojne prednosti u izvedbi poput potencijala za smanjenje mase (zbog veće specifične čvrstoće i modula elastičnosti), povećane fleksibilnosti dizajna (zbog sposobnosti izgradnje performansi u određenim smjerovima), veće otpornosti na koroziju i poboljšane otpornosti na umor. Smanjenje mase zrakoplova izrazito je važno jer dovodi do poboljšane iskoristivosti goriva. Nadalje, smanjeni broj elemenata za pričvršćivanje na kompozitnoj strukturi zrakoplovu daje aerodinamičniju površinu u usporedbi s aluminijem koji se pričvršćuje zakovicama [29].

Zbog sve većih cijena nafte i plina, potražnja za laganim materijalima u zrakoplovnoj industriji je ogromna te čak i u općem zrakoplovstvu troškovi goriva čine oko 50 % operativnih troškova

[29]. Smanjenje mase zrakoplova za od jedan kilogram može smanjiti emisiju ugljikovog dioksida za 0,94 kg u slučaju Boeinga 747-400 i za 0,475 kg u Airbusu A330-300. Smanjenje od 1 kg emisije ugljikovog dioksida može uštedjeti i do 0,3 kg zrakoplovnog goriva. Do sada su u modernim putničkim zrakoplovima legure aluminija ostale kao materijali koji čine većinu mase zrakoplova, a osim aluminija korišteni su i drugi materijali kao što su kompoziti, titanij, čelik i razni drugi materijali. Na primjer, u masenim udjelima Boeing 777 se sastoji od 70 % aluminija, 11 % kompozita, 7 % titanija, 11 % čelika i 1 % ostalih materijala; međutim, trend se nedavno promijenio kada su uvedeni noviji zrakoplovi poput Boeinga 787 Dreamliner i Airbusa A350 [Slika 9] [1].



Slika 9. Airbus A350-900 XWB [30]

Primjena kompozitnih materijala znatno je povećana do te mjere da su kompoziti sada glavni prinositelji u ukupnoj masi zrakoplova. U Boeingu 787 maseni udjeli različitih materijala su takvi da je čak 50 % mase zrakoplova od kompozitnog materijala, zatim slijede aluminijske legure s 20 %, 15 % je titanija, 10 % čelika i 5 % ostalih materijala. Upotreba kompozitnih materijala još je i veća za Airbus A350 [Tablica 3], odnosno čak 52 % ukupne mase zrakoplova. Ovaj novi trend promjene materijala motiviran je prvenstveno smanjenjem mase, što se pretvara u poboljšanje performansi, učinkovitosti goriva i dometa leta [1]. Slijedom toga, tijekom

posljednja tri desetljeća uporaba vlaknima ojačanih polimernih kompozita u zrakoplovnim primjenama se iznimno povećala [29].

Tablica 3. Razvoj kompozitnih materijala od 1970. za zrakoplove Airbus [1]

Godina	Model Airbus zrakoplova	Maseni udio kompozita
1970. – 1980.	A300	4 %
1980. – 1990.	A310-200	6 %
	A320	10 %
1990. – 2000.	A340-300	10 %
2000. – 2010.	A340-600	11 %
	A380	25 %
	A400M	30 %
2010. i poslije	A350-900 XWB	52 %

Uobičajena sintetička vlakna koja se koriste u zrakoplovnim strukturama su staklena, ugljična i aramidna. Trenutno razvijeni materijali imaju pozitivne i negativne utjecaje na održivost okoliša. Istraživanje nekih novih održivih materijala potaknuto je s ciljem kako bi se smanjila emisija ugljičnog dioksida (CO₂) i upotreba fosilnih izvora. Iako polimerni kompoziti ojačani sintetičkim vlaknima imaju vrhunska mehanička svojstva, toplinsku stabilnost, otpornost na koroziju i dinamičku izdržljivost, oni nisu biorazgradivi. Povećanje svijesti o zagađivanju okoliša i iscrpljivanju naftnih resursa potaknulo je istraživače na korištenje prirodnih izvora koji su biorazgradivi i ne nanose štetu okolišu [3].

Povijest kompozita ojačanih prirodnim vlaknima započela je u zrakoplovnom sektoru uvođenjem materijala naziva Gordon Aerolite, odnosno fenolne smole ojačane lanenim vlaknima. Mala gustoća te visoka vlačna čvrstoća i krutost su Gordon Aerolite učinili prikladnim za uporabu kao zrakoplovni materijal. Korišten je 1930-ih godina kao eksperimentalni dio krila zrakoplova bombardera Bristol Blenheim, međutim upotreba Gordon Aerolitea smanjila se s povećanjem dostupnosti novijih materijala [29].

Prirodna vlakna imaju neka svojstva bolja od sintetičkih, kao što su biorazgradivost, niska cijena i gustoća, ali glavni nedostaci korištenja prirodnih vlakana su loša otpornost na plamen i apsorpcija vlage. Da bi se poboljšala adhezija s polimerima na bazi nafte, prirodna vlakna moraju se tretirati kemikalijama. Znanstvenici su proučavali niz različitih metoda za poboljšanje kompatibilnosti vlakana i matrice i te metode uključuju mercerizaciju i acetilaciju.

Također, prijanjanje vlakana i matrice poboljšano je površinskim modifikacijama vlakana kao što je alkalna obrada. Osim korištenja isključivo prirodnih vlakana, moguća je i njihova kombinacija sa sintetičkim vlaknima, odnosno korištenje hibridnih kompozita, tj. onih kompozita koji sadrže više različitih nekontinuiranih faza ugrađenih u kontinuiranu fazu, odnosno matricu. Hibridni kompoziti koji su izrađeni od dva različita prirodna vlakna su rjeđi od onih izrađenih od prirodnog i sintetičkog vlakna, ali također su korisni materijali s obzirom na pitanja zaštite okoliša. Potpuna zamjena postojećih sintetičkih vlakana prirodnim vlaknima nekada nije moguća zbog boljih svojstava sintetičkih vlakana, ali djelomična zamjena sintetičkih vlakana prirodnim vlaknima smanjit će štetnost i povećati biorazgradivost postojećih kompozita na bazi sintetičkih vlakana [3]. Danas biokompoziti šire svoju primjenu prema zrakoplovnoj industriji, koja je veliki potrošač kompozitnih materijala. Trenutno se širom svijeta proizvodi više od 200 komercijalnih, civilnih i vojnih komponenata zrakoplova od biokompozitnih materijala. Značajne prednosti biokompozitnih materijala uključuju smanjenu potrošnju goriva, smanjenu masu, nižu emisiju stakleničkih plinova, smanjenje buke, dulji razmak između održavanja, bolje performanse i veću pouzdanost [11].

Po nekim procjenama čak 60 % ukupne cijene zrakoplova čini materijal zrakoplova te je zato iznimno bitno kontinuirano voditi istraživanja na području razvoja materijala kako bi u konačnici performanse zrakoplova bile što je moguće bolje, uz što je moguće nižu cijenu materijala, a samim time bi se i ukupna cijena zrakoplova snizila. Što se tiče funkcionalnih i eksploatacijskih zahtjeva za zrakoplovne materijale, oni su sljedeći:

- mala gustoća
- održavanje visoke mehaničke otpornosti za vrijeme statičkog opterećenja i visoka specifična čvrstoća
- zadovoljavajuća krutost te specifična krutost (omjer između modula elastičnosti i gustoće)
- otpornost na umor
- otpornost naglom širenju pukotina
- korozijska postojanost
- otpornost na puzanje
- otpornost na gorenje
- apsorpcija vibracije i zvuka [6].

5.2. Primjeri primjene zrakoplovnih dijelova od biokompozita

5.2.1. Radarska kupola

Radarska kupola (engl. *Radome*) [Slika 10] je struktura u obliku kupole koja štiti radarske antene od vremenskih utjecaja, aerodinamičkog opterećenja i udara ptica. Koristi se na zrakoplovima i na zemaljskim radarskim sustavima. Materijal koji se koristi za radarsku kupolu mora imati malu dielektričnu konstantu i visoku žilavost. Dielektrična svojstva su iznimno važan čimbenik pri odabiru materijala za radarsku kupolu te se dielektrična konstanta za tkano E-staklo s poliesterskom i epoksidnom smolom kreće od 4,03 do 4,43, dok prirodna vlakna imaju dielektrične konstante u rasponu od 2,8 do 3,2. Vlakna kenafa imaju bolja mehanička svojstva od ostalih prirodnih vlakana za upotrebu kao ojačanje u kompozitu za radarsku kupolu. Ta vlakna imaju usporedivu krutost sa staklenim vlaknima i nisku dielektričnu konstantu stoga su prikladna za izradu radarskih kupola. Kombinacijom vlakana kenafa sa staklenim vlaknima i dobivanjem hibridnog kompozita postižu se još bolja svojstva koja će poboljšati mehanička svojstva kompozita i otpornost prema vanjskim utjecajima [3]. Hibridni kompozit s matricom od epoksidne smole ojačanom staklenim vlaknima i vlaknima kenafa, obrađenima s natrijevim hidroksidom (NaOH), može biti potencijalni materijal za primjenu u izradi radarske kupole [31].



Slika 10. Radarska kupola na zrakoplovu [32]

5.2.2. Torzijska kutija zrakoplova

Tijekom istraživanja, nakon početnog probira prirodnih vlakana, onih koja bi se mogla koristiti kao ojačanje u kompozitu za primjenu u izgradnji torzijske kutije zrakoplova (engl. *Wing box*), odabrana su vlakna konoplje, sisala, lana i ramije. Konačno je odabrano vlakno ramije zbog visokog modula elastičnosti i visoke granice razvlačenja. Tijekom korištenja kompozita ojačanog vlaknima ramije, utvrđeno je da smanjenje mase iznosi oko 12 do 14 % u odnosu na korištenje aluminijske legure. Izradom modela zrakoplova za civilni prijevoz (Airbus A320-200) ustanovljeno je da je kompozit ojačan vlaknima ramije pogodan za izradu torzijske kutije zrakoplova. Uporabom kompozita ojačanog vlaknima ramije smanjila se masa torzijske kutije bez ikakvih negativnih posljedica na svojstva koja torzijska kutija mora imati u eksploataciji [3].

5.2.3. Unutrašnjost zrakoplova

Neki od primjera primjene održivog kompozitnog materijala u konstrukcijama unutrašnjosti zrakoplova su sljedeći:

- sjedala [Slika 11]
- obloge kabine (engl. *Cabin linings*)
- police za pakete
- podovi
- stropovi
- vrata
- pregrade
- odjeljci za odlaganje
- obloge za teret (engl. *Cargo-hold liners*) [3, 29].

Unutrašnje konstrukcije zrakoplova izrađene su od kompozita s ugljičnim ili staklenim vlaknima zbog velikog omjera čvrstoće i gustoće te aerodinamičke učinkovitosti. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima koriste se u zrakoplovnim konstrukcijama od sredine 20. stoljeća, no tijekom procesa proizvodnje sintetičkih vlakana i oblikovanja samih proizvoda od kompozita koriste se štetne kemijske tvari. Kako bi se to prevladalo počinju se koristiti održivi kompozitni materijali, oni ojačani prirodnim vlaknima. Prirodna vlakna poput konoplje, kenafa, lana itd. koriste se kao ojačanje za unutarnje konstrukcije zrakoplova. Sendvič-kompoziti koji

se sastoje od saćastih jezgri uklještenih između tkanih lanenih vlakana prikladni su za unutarnje ploče kabine zrakoplova [3].



Slika 11. Sjedala u zrakoplovu [33]

Također su razvijeni duromerni i plastomerni površinski slojevi koji su ojačani prirodnim vlaknima kao materijali za unutarnje ploče zrakoplova (engl. *Aircraft interior panels*). Utvrđeno je da ploče posjeduju potrebnu otpornost na plamen i toplinu, omogućujući lako recikliranje i odlaganje, također su jeftinije i nude značajnu uštedu na masi u odnosu na uobičajene ploče sendvič-kompozita. Nadalje, za svaki kilogram smanjenja mase u tipičnom komercijalnom zrakoplovu procjenjuje se smanjenje od 0,02 do 0,04 kilograma potrošnje goriva na sat. Ako se pretpostavi da uobičajeni vijek trajanja linijskog putničkog zrakoplova iznosi 100 000 sati, onda se svakim kilogramom uštedene mase postiže smanjenje potrošnje goriva u iznosu od 4 tone i smanjenje emisije ugljikovog dioksida (CO₂) od 12,5 tona od početka do kraja vijeka trajanja zrakoplova. Uobičajeni putnički zrakoplov koji koristi unutarnje ploče izrađene od kompozita, kojemu je ojačalo u obliku prirodnih vlakana, za sekundarne konstrukcije poput stropova, podova, bočnih stijenki, pregrada, odjeljaka za odlaganje i drugih dijelova u kabini rezultira smanjenjem mase od 200 do 500 kg za ploče izrađene od anorganske smole i od 100 do 250 kg za ploče izrađene od plastomerne smole. Smanjenje mase također je jednako smanjenju emisije CO₂ za 2500 do 6500 tona tijekom vijeka

trajanja zrakoplova za ploče izrađene od anorganske smole i smanjenju emisije CO₂ za 1300 do 3250 tona tijekom vijeka trajanja zrakoplova za ploče izrađene od plastomerne smole. Štoviše, daljnje uštede po pitanju CO₂ bi se mogle postići na kraju radnog vijeka zrakoplova zbog lakšeg recikliranja i odlaganja sendvič-kompozitnih ploča [29].

Glavna funkcija saćaste jezgre sendvič-kompozita je smanjenje količine upotrijebljenog materijala i postizanje minimalne mase te minimalnih troškova materijala u proizvodnom procesu. Uobičajeni materijali koji se koriste u izradi jezgre u obliku heksagonskih ćelija (pčelinjeg saća) su aluminij i aramid, no sve veći interes za razvojem kompozitnih struktura s ojačanjem od prirodnih vlakana potaknuo je istraživanja u izradi saća od prirodnih vlakana. Kompozit od prirodnih vlakana koji se koristi u izradi saćastih jezgri smanjuje masu proizvoda, poboljšava mehanička svojstva i funkcionalne mogućnosti poput odvođenja topline, kontrole vibracija i rasipanja energije. Na taj način je primjena prirodnih vlakana proširena s pretežno sekundarnih komponenata i na nosive konstrukcije [13].

Unutarnja bočna ploča [Slika 12] kineskog zrakoplova MA600 [Slika 13] proizvedena je uporabom AGMP 3600 preprega (kojemu je oko 30 % sastava na prirodnoj osnovi) u autoklavu. Kompozitne ploče proizvedene na ovaj način su čvrste, lagane, vatrootporne, dekorativne i nepropusne za plijesan i insekte [34].



Slika 12. Unutarnja ploča zrakoplova MA600 [35]



Slika 13. Zrakoplov Xian MA600 [36]

5.2.4. Zrakoplovna uslužna kolica

Proizvodnjom kompozita s dva ili više različitih vlakana za ojačanje matrice, odnosno hibridnog kompozita, moguće je postići kompozit s boljim mehaničkim svojstvima te nadalje boljim utjecajem za okoliš ako je barem jedan tip ojačanja prirodno vlakno. FibriRock [Slika 14] je hibridni kompozit napravljen od matrice, biosmole poli(furfuril-alkohol), ojačane kombinacijom lanenih i bazaltnih vlakana. FibriRock proizvodi francuska tvrtka EcoTechnilin te pri proizvodnji zahtijeva nisku temperaturu i tlak pri oblikovanju, što dovodi do smanjenih troškova. Nadalje, FibriRock je zeleni održivi materijal koji zahtijeva malo energije tijekom proizvodnje preprega te u masenim udjelima sadrži 30 % lana, 35 % bazalta i 35 % smole [37]. Novi biokompozit ispunjava najstrože zahtjeve zrakoplovne i automobilske industrije jer kombinira čvrstoću i trajnost s malom masom i ekološkom održivošću. Zrakoplovna industrija je u velikoj potrebi za održivim materijalima, posebno onima koji mogu brzo očvrnuti, a EcoTechnilin predstavio je upravo takav materijal na tržište. FibriRock ploče mogu se stvrdnuti za manje od 150 sekundi što je između 10 i 20 puta brže od konvencionalnih kompozitnih materijala. Preko 30 % kompozita su vlakna bazalta, koja su zelenija od stakla i usto otpornija na visoke temperature od stakla. Kompozit sadrži jezgru izrađenu od materijala aramida, materijala koji je dobro poznat po izvrsnim protupožarnim svojstvima i maloj gustoći. Novi

biokompozit korišten je za zrakoplovna uslužna kolica [Slika 15] male mase. Uz to, ovaj kompozit također pronalazi primjenu i u pregradama, stolovima te naslonima sjedala u zrakoplovima. FibriRock je osvojio nagradu za održivost na sajmu JEC Composites 2015. godine u Parizu [38].



Slika 14. FibriRock [38]

FibriRock daje krut, lagan i brzo stvrdnjavajući kompozit uz upotrebu zelenih i održivih materijala te također zadovoljava sve stroge testove zapaljivosti, ispuštanja dima i toksičnosti koje zrakoplovna industrija zahtjeva [39].



Slika 15. Zrakoplovna uslužna kolica [40]

5.3. Zapaljivost i zakonska ograničenja

5.3.1. Uvod

„Zapaljivost i gorivost govore o tome može li se neki materijal pod djelovanjem topline ili otvorenog plamena zapaliti i gorjeti određeno vrijeme, plamteći ili tinjajući.“ Vrijeme do samogašenja ili potpunog izgaranja, količina i gustoća dima te vrste i otrovnost plinova su neki od dodatnih kriterija koji se uzimaju u obzir kada je riječ o zapaljivosti materijala [6].

Nadalje, također bitne informacije kada je riječ o zapaljivosti materijala su temperatura zapaljenja, tj. najniža početna temperatura okoline kada uz djelovanje standardnog plamena počinje gorenje i temperatura samozapaljenja, tj. najniža početna temperatura zraka okoline kod koje bez drugog izvora topline dolazi do samozapaljenja. Otpornost materijala na zapaljenje ili gorenje određuje se na način da se gleda vrijeme za koje materijal zadovoljava zadane kriterije kao što su dostizanje dozvoljenog povećanja temperature na strani koja nije izložena požaru, vrijeme zapaljenja, trajanje gorenja, veličina plamena, gubitak integriteta ispitnog tijela i tako dalje [6].

Jedan od vodećih uzroka materijalne štete i gubitka života je požar. Samo u Sjedinjenim Američkim Državama više od 3000 smrtnih slučajeva i oko 20 000 ozlijeđenih uzrokuje požar svake godine te čini preko 11 milijardi američkih dolara (USD) materijalne štete. Stoga, kompozitni proizvodi koji se koriste u građevinarstvu te zrakoplovnoj i automobilskoj industriji moraju udovoljavati propisima o zaštiti od požara kako bi se ti gubici umanjili. Da bi se zadovoljili strogi standardi zaštite od požara, kompozitni proizvodi tretiraju se usporivačima gorenja kako bi se spriječilo zapaljenje materijala i širenje plamena. Napravljeno je nekoliko studija za dobivanje kompozita s potrebnom vatrootpornošću uz pomoć korištenja usporivača gorenja. Biokompoziti moraju proći stroge sigurnosne propise za upotrebu u građevinarstvu, automobilskoj i zrakoplovnoj industriji pa je tretiranje biokompozita usporivačima gorenja nužan korak u njihovoj proizvodnji i razvoju. Obrada s usporivačima gorenja osigurava bezopasno odlaganje biokompozita na kraju životnog vijeka i pridonosi pojačanoj javnoj sigurnosti [17]. U modernoj eri zrakoplovstva sigurnost je od najveće važnosti u zrakoplovnoj proizvodnji. Postoji nekoliko milijuna komponenata u širokotrupnim linijskim putničkim zrakoplovima kao što su Boeing 747 i Airbus A380 [Slika 16], a budući da su takvi zrakoplovi obično konstruirani za rad do 30 godina, kvar bilo koje kritične komponente tijekom letenja mogao bi završiti katastrofalnom nesrećom. Srećom, danas civilno zrakoplovstvo dobro reguliraju upravljačka tijela kao što su Organizacija za međunarodno civilno zrakoplovstvo

(engl. *International Civil Aviation Organization*, ICAO) i Savezna uprava za civilno zrakoplovstvo (engl. *Federal Aviation Administration*, FAA) Sjedinjenih Američkih Država. U Sjedinjenim Američkim Državama uloge Savezne uprave za civilno zrakoplovstvo uključuju certificiranje i odobrenje za proizvodnju, plovidbenost zrakoplova, certificiranje osoblja zrakoplova i sve ostalo što je povezano sa sigurnošću [1].



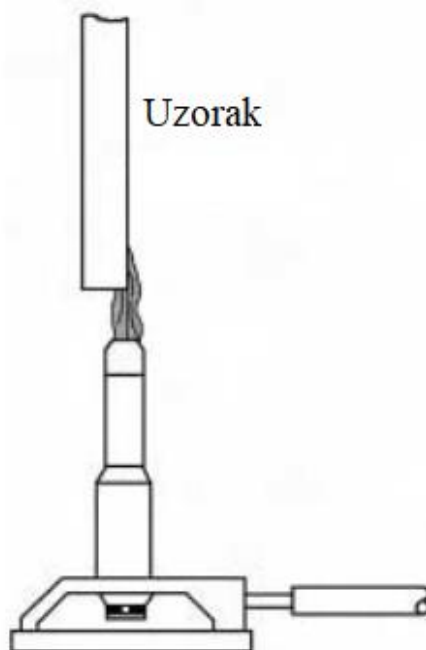
Slika 16. Airbus A380 [41]

Uz FAA uvjeti ispitivanja i ocjenjivanja materijala ili gotovih dijelova letjelica su također definirani prema normama ili propisima Europske agencije za sigurnost zračnog prometa (engl. *European Union Aviation Safety Agency*, EASA) [6]. Nadalje, sustav AS9100C, koji su predstavili Društvo automobilskih inženjera (engl. *Society of Automotive Engineers*, SAE) i Europsko udruženje zrakoplovnih industrija (engl. *European Association of Aerospace Industries*), široko je prihvaćen kao norma za upravljanje kvalitetom u zrakoplovnoj industriji. Što se tiče ispitivanja materijala, Američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials*, ASTM International) trenutno ima gotovo 160 normi koje se odnose na ocjenu materijala, dijelova i uređaja koji se obično koriste u zrakoplovnoj industriji [1].

5.3.2. Propisi, norme i metode ispitivanja zapaljivosti materijala

Materijal za upotrebu u zrakoplovima mora biti u skladu sa strogim propisima o zaštiti od požara, poput američkog Federalnog standarda sigurnosti motornih vozila br. 302 (engl. *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 302*, FMVSS 302) i uredbe Saveznih zrakoplovnih propisa (engl. *Federal Aviation Regulations*, FAR) 25.853 za automobilsku i zrakoplovnu industriju. Norma FMVSS 302 o zapaljivosti unutrašnjih materijala u automobilima navodi da uzorak ne bi trebao gorjeti i prenositi plamen preko svoje površine brzinom većom od 4 inča (101,6 milimetara) u minuti. Uredba 25.853 Saveznih zrakoplovnih propisa (FAR) određuje da materijali za unutrašnjost zrakoplova moraju biti u skladu s vertikalnim testom gorenja [Slika 17] u trajanju od 12 i 60 sekundi, horizontalnim testom gorenja od 15 sekundi, testom gustoće dima i testom ispuštanja topline [42].

Magnezijske legure su u prošlosti pripadale jednoj od zabranjenih skupina materijala u zrakoplovstvu, no promjenom propisa uporaba im je omogućena pod uvjetom da ispunjavaju sve zahtjeve o zapaljivosti materijala. Nakon mnogo godina rada britanska tvrtka Magnesium Elektron pokazala je da se magnezijeve legure mogu sigurno koristiti za izgradnju sjedala u zrakoplovima. Njihova legura Elektron 43 prošla je sve testove zapaljivosti i na taj način uklonila povijesnu zabranu koju su magnezijeve legure imale u zrakoplovstvu. Ovime je pokazano kako se od u potpunosti zabranjenog materijala uz mnoga istraživanja može postići materijal koji će zadovoljavati sve stroge zrakoplovne propise [43].



Slika 17. Vertikalni test gorenja Bunsenovim plamenikom [44]

Vertikalni test gorenja Bunsenovim plamenikom prvi put je upotrijebljen od strane Boeinga 1962. godine te je za njega korišteni uzorak bio jednake veličine kao i za tada već ranije korišteni horizontalni test gorenja Bunsenovim plamenikom od 15 sekundi [Slika 18], odnosno 76 milimetara širok i 305 milimetara dugačak. Vertikalni test gorenja Bunsenovim plamenikom je 1972. godine nadograđen na način da uključi ograničeno vrijeme samogasivosti za plastomere i tekstil. Također te godine uvedeni su vertikalni test gorenja Bunsenovim plamenikom u trajanju od 60 sekundi za velike površine kao što su stropovi i test gorenja Bunsenovim plamenikom u trajanju od 30 sekundi pod kutom od 60 stupnjeva za izolaciju električnih vodiča [44].



Slika 18. Horizontalni test gorenja Bunsenovim plamenikom [45]

Neke od standardnih metoda za utvrđivanje sklonosti gorenju za polimerne materijale su granični indeks kisika [Slika 19] (HRN EN ISO 4589, ASTM D 2866), UL klase materijala prema Underwriter Laboratories (UL-94) i ASTM D 635. Određivanjem graničnog indeksa kisika (najmanji postotni udio kisika u smjesi koji je potreban da bi materijal izgarao u normiranim uvjetima) dobivaju se informacije o relativnoj zapaljivosti u smjesi plinova kontroliranog sastava (kisik i dušik). Prema metodi UL-94 uzorak definiranih dimenzija se s jedne strane učvrsti, a s druge izlaže plamenu. Ispod uzorka se nalazi neobrađena medicinska vata na koju padaju čestice izgorjelog materijala te ovisno o brzini i trajanju gorenja i

eventualnoj sposobnosti čestica da zapale vatu, materijali se svrstavaju u razne klase gorivosti koje su sljedeće:

- UL-94 V-0 (najstroža klasa)
- UL-94 V-1
- UL94 V-2
- UL-94 V-5 i druge.

Metoda prema normi ASTM D 635 je slična metodi UL-94, samo što se materijali ovisno o kriterijima proglašavaju negorivim, odnosno samogasivim (to su oni polimeri koji sadrže takve elemente koji usporavaju proces gorenja), a brzina gorenja se izražava u cm/min [6].



Slika 19. Uređaj za ispitivanje graničnog indeksa kisika [17]

Nadalje, diferencijalna pretražna kalorimetrija, termogravimetrijska analiza, metoda konusnog kalorimetra [Slika 20] i ispitivanje žarnom žicom su neke od mnogo različitih eksperimentalnih metoda za ispitivanje toplinskih svojstava i zapaljivosti materijala. Oprema korištena u eksperimentalnim metodama je različitih veličina, od jako malih uređaja za ispitivanje uzoraka mase svega nekoliko miligrama pa sve do uređaja za ispitivanje velikih gotovih konstrukcija. Međunarodne norme za ispitivanje prema Američkom društvu za ispitivanje i materijale (ASTM International) i Međunarodnoj organizaciji za normizaciju (engl. *International*

Organization for Standardization, ISO) donesene su za točno određene uređaje i toplinska svojstva, odnosno svojstva zapaljivosti. Stoga, potrebno je odabrati odgovarajući uređaj za ispitivanje i protokol ovisno o primjeni materijala i traženom svojstvu [17].



Slika 20. Konusni kalorimetar [17]

5.3.3. Zapaljivost biokompozita

Jedna od najbitnijih stavki što se tiče primjene zrakoplovnih konstrukcija je zadovoljavanje normi za vatru, dim i toksičnost. Upravo se iz ovog razloga usporivači gorenja moraju nanijeti na površinu prirodnih vlakana, jer je vatrootpornost prirodnih vlakana umjerena u usporedbi s postojećim sintetičkim vlaknima [3].

Komercijalno korišteni usporivači gorenja za celulozna vlakna su fosfati, fosforne kiseline, tetrakis (hidroksimetil) fosfonijeve soli (THPX), kombinacije antimona s halogenim elementima, spojevi bora i dušika te kositrov dioksid. Usporivači gorenja izrađeni od spojeva kositra imaju nisku toksičnost [3].

Nadalje, nehalogeni usporivači gorenja postaju sve popularniji zbog svoje neškodljivosti za okoliš i ljudsko zdravlje, međutim iako su nehalogeni usporivači gorenja vrlo učinkoviti u smanjenju zapaljivosti polimernih kompozita, oni obično snižavaju mehanička svojstva kompozita [17].

Vuna je potencijalno prirodno ojačalo koje bi istodobno moglo poboljšati vatrootporna i mehanička svojstva polimernih kompozita. Također, gluten iz pšenice može potencijalno zamijeniti sintetičku polimernu matricu jer pokazuje neka poželjna svojstva otpornosti na gorenje. Međutim, prije nego što se ovi novi materijali potpuno integriraju u trenutno tržište kompozita, potrebna su dodatna istraživanja kako bi se procijenila mogućnost postizanja još veće otpornosti na gorenje koristeći ih zajedno s nehalogenim usporivačima gorenja. Usmjerenost prema materijalima na biološkoj osnovi s određenim stupnjem vatrootpornosti je početak za nova istraživanja i razvoj biokompozita koji bi pokazivali bolja toplinska svojstva, odnosno bolju otpornost na plamen [17].

5.3.4. Zapaljivost zelenih biokompozita

Svjetski interes za iskorištavanjem zelenih biokompozita sve više raste zahvaljujući njihovoj maloj gustoći i biorazgradivosti te još većom održivošću od biokompozita. Međutim, strogi protupožarni propisi ograničili su upotrebu zelenih biokompozita u praktičnoj primjeni zbog osjetljivosti njihovih konstituenata na toplinu i vatru, odnosno gorenje. Iz tog razloga, dubinsko proučavanje toplinske razgradnje i ponašanja zelenih biokompozita prilikom gorenja je neizbježno radi boljeg usporavanja plamena, otkrivanja usporivača gorenja koji su prikladniji i ekološki prihvatljiviji te odabira odgovarajućih prirodnih vlakana i biopolimera za razvoj zelenog biokompozita koji je siguran od požara te koji postiže što bolju otpornost gorenju [42]. Trenutna istraživanja su usredotočena na razvoj onih zelenih biokompozita koji su izrađeni od prirodnih vlakana i biorazgradivih polimera poput polilaktične kiseline (PLA), plastomernog škroba (TPS) i polibutilen sukcinata (PBS). Veliki je problem taj što od svih vrsta biokompozita, zeleni biokompoziti su oni koji imaju najmanji stupanj otpornosti na gorenje, a to postavlja pitanje njihove sigurne uporabe u zrakoplovnoj industriji gdje su propisi po pitanju zapaljivosti materijala iznimno strogi. Srećom, posljednjih godina postoji rastući trend u broju istraživačkih radova na temu poboljšavanja svojstava koja se tiču zapaljivosti zelenih biokompozita, što ukazuje na to da su naponi sada usmjereni na suzbijanje ovog problema. Osjetljivost na vatru zelenih biokompozita jedan je od glavnih problema s kojima se suočava prometna industrija u iskorištavanju punog potencijala zelenih biokompozita, a ovo ograničenje nije vezano samo uz lošija toplinska svojstva prirodnih vlakana koja ograničavaju njihovu preradu na visokim temperaturama, već i u samim po sebi zapaljivim plastomernim

biopolimerima, kao što su polilaktična kiselina (PLA), plastomerni škrob (TPS) i polibutilen sukcinat (PBS) [42].

Nekoliko istraživača predložilo je brojne usporivače gorenja, kao što su amonijev polifosfat (APP), aluminijev trihidrat (ATH), nanogline, grafen, višeslojne ugljične nanocijevi itd. kako bi se poboljšala sigurnost zelenih biokompozita što se tiče zapaljivosti. Do sada izvedba većine zelenih biokompozita nije zadovoljavajuća u ispunjavanju propisa o protupožarnoj sigurnosti, stoga su potrebni veliki naponi kako bi se riješio ovaj problem uz očuvanje ekološki prihvatljivih karakteristika zelenih biokompozita i minimalnu količinu usporivača gorenja [42].

Svaka vrsta usporivača gorenja ima svoje prednosti i nedostatke, neki usporivači gorenja stvaraju otrovni plamen pri izgaranju, dok drugi uzrokuju brzu razgradnju proizvoda. Nužno je potražiti odgovarajuće usporivače gorenja, bez ugrožavanja sigurnosti i mehaničkih svojstava materijala [42].

Trenutačno istraživanje potencijalnih usporivača gorenja na biološkoj osnovi poput lignina, taninske kiseline, fitinske kiseline i β – ciklodekstrina pokazuje optimizam u postizanju boljeg usporavanja gorenja zelenih biokompozita. Nedavni razvoj na području nanotehnologije za usporavanjem gorenja je još jedno obećavajuće područje; eksfolirani grafit (EG), nanogline (NCs), ugljične nanocijevi (CNTs), montmorilonit (MMT) i slojeviti silikat (LS) pokazali su se vrlo učinkovitima čak i pri niskim udjelima. Stoga je utjecaj sinergijske uporabe prirodnih vlakana s multifunkcionalnim nanočesticama i nekonvencionalnim usporivačima gorenja donio važan napredak u sigurnoj uporabi vatrootpornih zelenih biokompozitnih materijala. Međutim, i dalje su potrebni dodatni naponi kako bi se postigla dobra ravnoteža između mehaničkih svojstava i zapaljivosti zelenih biokompozita bez smanjenja njihove ekološke prihvatljivosti [42].

6. ZAKLJUČAK

Održivi kompozitni materijali su budućnost zrakoplovne industrije zbog sve strožih propisa o zaštiti okoliša. Biokompoziti već sada pronalaze svoju primjenu u sekundarnim konstrukcijama zrakoplova kao što su sjedala, vrata, podovi, stropovi itd., kao i u izgradnji radarske kupole. Uporaba biokompozita u zrakoplovnoj industriji nosi sa sobom višestruke prednosti u odnosu na uporabu konvencionalnih kompozita. Uz to što su biokompoziti iznimno dobri za okoliš zbog svoje biorazgradivosti, oni su dobri i zbog neutralizacije ugljikovog dioksida, koja se izvršava od strane biljaka čija se vlakna koriste kao ojačalo. Također, uporaba biokompozita je i ekonomična jer su prirodna vlakna jeftinija od sintetičkih. Nadalje, proizvodi od biokompozita su manje mase od konvencionalnih kompozita, što dovodi do smanjenja potrošnje goriva zrakoplova. Time se smanjuju emisije ugljikovog dioksida, što daje povoljan utjecaj na okoliš u smislu borbe protiv globalnog zatopljenja. Također, na taj način se generira ušteda zbog smanjenih troškova za gorivo, što je još jedan pokazatelj ekonomičnosti biokompozita. Nedostatak primjene biokompozitnih materijala u zrakoplovima su njihova lošija svojstva što se tiče zapaljivosti, no taj problem se rješava usporivačima gorenja. Nažalost, upotreba zelenih biokompozita još nije toliko zaživjela u zrakoplovnoj industriji jer puno teže prolaze stroge zrakoplovne testove vezane za zapaljivost materijala od „običnih“ biokompozita. S obzirom na to da se već sada radi na mogućnosti primjene zelenih biokompozita u zrakoplovstvu, u budućnosti bi i oni mogli pronaći svoju primjenu u određenim konstrukcijama kako bi se dobio 100 % biorazgradiv i ekološki održiv materijal.

LITERATURA

- [1] Verma D, Fortunati E, Jain S, Zhang X. Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy: Construction, biomedical, and other industrial applications. Elsevier; 2019.
- [2] Bachmann J, Hidalgo C, Bricout S. Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review. *Science China Technological Sciences* 2017;60:1301–17. doi. 10.1007/s11431-016-9094-y.
- [3] Jawaid M, Thariq M. Sustainable composites for aerospace applications. Elsevier; 2018.
- [4] Jawaid M, Sapuan SM, Allothman OY. Green Biocomposites Manufacturing and Properties. Springer International Publishing; 2017.
- [5] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2019.
- [6] Čorić D, Filetin T. Materijali u zrakoplovstvu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2012.
- [7] Some Composite Material Types Fiber reinforced composites are usually... | Download Scientific Diagram: https://www.researchgate.net/figure/Some-Composite-Material-Types-Fiber-reinforced-composites-are-usually-used-in-the-forms_fig1_259568833 (23.1.2021.).
- [8] Introducing the Composite Materials Module | COMSOL Blog: <https://www.comsol.com/blogs/introducing-the-composite-materials-module/> (23.1.2021.).
- [9] Admatis Ltd. - Material science, sandwich structures, composites, honeycom, metal foam, aluminium foam sandwich, AFS, rohacell: https://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html (23.1.2021.).
- [10] Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) – Technology in Architecture: <https://technologyinarchitecture.wordpress.com/2018/06/30/glass-fiber-reinforced-polymer-gfrp/> (27.1.2021.).
- [11] Jawaid M, Sapuan SM, Allothman OY. Green Biocomposites Design and Applications. Springer International Publishing; 2017.
- [12] Misra M, Pandey JK, Mohanty AK. Biocomposites: Design and Mechanical Performance. Elsevier; 2015.

- [13] Manan NH, Majid DL, Romli FI. Mould design and manufacturing considerations of honeycomb biocomposites with transverse fibre direction for aerospace application. IOP Conf. Series: Materials Science Engineering 152 (2016) 012013. doi. 10.1088/1757-899X/152/1/012013.
- [14] Renewable & Nonrenewable Materials: <https://sciencing.com/renewable-nonrenewable-materials-5258188.html> (24.1.2021.).
- [15] What Does Biodegradable Mean? Probably Not What You Think: <https://ecofreek.com/biodegradable/what-does-biodegradable-mean/> (24.1.2021.).
- [16] Što je ugljična neutralnost i kako do nje doći do 2050.? | Vijesti | Europski parlament: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20190926STO62270/sto-je-ugljicna-neutralnost-i-kako-do-nje-doci-do-2050> (30.12.2020.).
- [17] Jawaid M, Thariq M, Saba N. Durability and life prediction in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites. Elsevier; 2019.
- [18] Ogunbode EB, Mohamad Yatim J, Ishak MY, Masoud R, Meisam R. Potentials of kenaf fibre in bio-composite production: A review. Jurnal Teknologi 2015;77:23–30. doi. 10.11113/jt.v77.6304.
- [19] Kenaf – International Natural Fiber Organization: https://naturalfibersinfo.org/?page_id=85 (27.12.2020.).
- [20] Biocomposites Market | Size, Share | Outlook, 2020-2027: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/biocomposites-market> (28.12.2020.).
- [21] C-Voucher - What is circular economy: <https://c-voucher.com/what-is-circular-economy/> (21.12.2020.).
- [22] Kružno gospodarstvo EU - Ekonomska klinika: <https://www.ekonomskaklinika.hr/2020/07/26/kruzno-gospodarstvo/> (27.12.2020.).
- [23] C-Voucher - Circular economy vs. linear economy: <https://c-voucher.com/circular-economy-vs-linear-economy/> (21.12.2020.).
- [24] MVEP • Održivi razvoj: <http://www.mvep.hr/hr/vanjska-politika/multilateralni-odnosi0/globalne-teme/odrzivi-razvoj/> (30.12.2020.).
- [25] THE 17 GOALS | Sustainable Development: <https://sdgs.un.org/goals> (21.12.2020.).
- [26] Biodiversity, Nature and the UN Sustainable Development Goals | Conservation Research Institute: https://www.conservation.cam.ac.uk/Key_Programmes/biodiversity-nature-and-the-un-sustainable-development-goals (27.12.2020.).
- [27] Provedba Globalnih ciljeva održivog razvoja u EU-u - Ekovjesnik:

- <https://www.ekovjesnik.hr/clanak/1738/provedba-globalnih-ciljeva-odrzivog-razvoja-u-eu-u> (27.12.2020.).
- [28] Mouritz AP. Introduction to aerospace materials. Woodhead Publishing Limited; 2012.
- [29] Rana S, Figueiro R. Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering Processing, Properties and Applications. Elsevier; 2016.
- [30] History of Airbus A350 XWB, its next-generation wide-body plane - Business Insider: <https://www.businessinsider.com/history-of-airbus-a350-xwb-next-generation-widebody-plane-2020-2> (25.1.2021.).
- [31] Haris MY, Laila D, Zainudin ES, Mustapha F, Zahari R, Halim Z. Preliminary Review of Biocomposites Materials for Aircraft Radome Application. Key Engineering Materials Vols. 471-472 (2011) pp 563-567. doi. 10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.563.
- [32] A prepreg material for advanced radome systems | JEC Group: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/prepreg-material-advanced-radome-systems> (27.12.2020.).
- [33] Aerospace's Adhesive Flammability Tests - Bostik Blog: <https://www.bostik-industrial.com/aerospace-adhesive-flammability-tests/> (2.2.2021.).
- [34] Yi X-S, Zhang X, Ding F, Tong J. Development of Bio-Sourced Epoxies for Bio-Composites. Aerospace 2018;5:65. doi. 10.3390/aerospace5020065.
- [35] Aerospace | Free Full-Text | Development of Bio-Sourced Epoxies for Bio-Composites: <https://www.mdpi.com/2226-4310/5/2/65> (27.12.2020.).
- [36] MA600 airplane and the composite side panel made of AGMP3600/honeycomb... | Download Scientific Diagram: https://www.researchgate.net/figure/MA600-airplane-and-the-composite-side-panel-made-of-AGMP3600-honeycomb-sandwich_fig2_325797705 (27.12.2020.).
- [37] Dhakal HN, Ismail SO, Jiang C, Zhang Z, Sweatman T. Influence of barely visible impact damage on post-impact residual flexural properties of hybrid Fibri Rock – Aero Eco-composites. Materials Letters 2018;233:233–7. doi. 10.1016/j.matlet.2018.09.036.
- [38] FibriRock: new material based on basalt fiber in the biocomposite market: <https://basalt.today/2016/10/7759/> (15.12.2020.).
- [39] Bio-sourced composite for aircraft applications cures 15 to 20 times faster | Plastics: <https://www.plastics.gl/processing-misc/bio-sourced-composite-for-aircraft-applications-cures-15-to-20-times-faster/> (15.12.2020.).

-
- [40] Aerospace Interiors - The “SmartCart” Aircraft Galley Cart - ACT: <https://www.applied-components.com/aircraft-galley-smart-cart/> (15.12.2020.).
- [41] A380 - Passenger aircraft - Airbus: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380.html> (2.2.2021.).
- [42] Rashid M, Chetehouna K, Cablé A, Gascoin N. Analysing Flammability Characteristics of Green Biocomposites: An Overview. *Fire Technology* 2020;57:31–67. doi. 10.1007/s10694-020-01001-0.
- [43] Magnesium alloys to be used in aircraft seats as ban is lifted - Runway GirlRunway Girl: <https://runwaygirlnetwork.com/2015/08/20/magnesium-alloys-to-be-used-in-aircraft-seats-as-ban-is-lifted/> (2.2.2021.).
- [44] Apte VB. Flammability testing of materials used in construction, transport and mining. Woodhead Publishing Limited; 2006.
- [45] Horizontal Burn | Aeroblaze Laboratory: <https://www.aeroblazelab.com/tests/horizontal-burn> (2.2.2021.).

PRILOZI

I. Optički disk