

# Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima kao budućnost održive automobilske industrije

---

**Medved, Marin**

**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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:178879>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marin Medved**

Zagreb, 2021. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Marin Medved

Zagreb, 2021. godina.

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

Zahvaljujem mentorici dr.sc. Ireni Žmak ukazanom povjerenju, strpljenju i na pomoći pri izradi rada. Zahvaljujem kolegama i prijateljima Leonu Joziću i Antoniju Gaguliću na pomoći tijekom dosadašnjeg studija. Hvala obitelji i prijateljima na podršci i naravno mojoj djevojci Lei Bošnjaković.

Marin Medved



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: **Marin Medved**

Mat. br.: 0035212284

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima kao budućnost održive  
automobilske industrije**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Carbon fibre reinforced polymer composites in the sustainable  
automotive industry's future**

Opis zadatka:

Ujedinjeni narodi postavili su Ciljeve održivog razvoja (engl. *Sustainable development goals*, SDG), koji daju viziju budućeg društva zasnovanog na principima održivosti kroz 17 definiranih ciljeva i pripadajućih 169 podciljeva, koji uključuju ekološku, ekonomsku i društvenu dimenziju održivosti. Ciljevi održivog globalnog razvoja odredili su načela i reference za nacionalne i lokalne političke strategije, a proizvođače potiču na unapređenje održivosti proizvodnih procesa.

Pristupačna i čista energija je cilj rednog broja sedam i usmjeren je na osiguranje pristupa pouzdanoj, održivoj i suvremenoj energiji po pristupačnim cijenama za sve. Jedan pristup ovom cilju smanjenja globalnih emisija zagađivača uključuje razvoj električnih vozila, a drugi pristup usmjeren je prema smanjenju mase vozila upotrebom inovativnih materijala i konstrukcijskih rješenja. Zbog niske gustoće i izvrsnih mehaničkih svojstava primjena polimernih kompozitnih materijala ojačanih ugljičnim vlaknima (engl. *Carbon fibre reinforced polymer*, CFRP) danas je uobičajena u vrhunskoj sportskoj opremi i u zrakoplovnoj industriji, no u automobilskoj industriji njihova primjena je još uvijek ograničena zbog vrlo visoke cijene. U okviru ovog završnog rada potrebno je istražiti primjenu CFRP-a u današnjoj automobilskoj industriji i trendove razvoja, koje su mogućnosti i prednosti CFRP-a u automobilima, koje su poteškoće, kakva je sigurnost takvih vozila prilikom sudara, koji su primjenjivi postupci izrade, spajanja i strojne obrade te koje su mogućnosti recikliranja otpadnih CFRP-a. 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:

Datum predaje rada:

**1. rok:** 18. veljače 2021.

**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.

**3. rok:** 23. rujna 2021.


Predvideni 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. Irena Žmak

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. GLOBALNI CILJEVI ODRŽIVOG RAZVOJA .....	2
3. KOMPOZITI .....	5
3.1. Definicija i pojam kompozita.....	5
3.2. Podjela kompozita.....	7
3.2.1. Podjela kompozita prema materijalu matrice.....	7
3.2.1.1. Keramički (CMC) kompoziti .....	8
3.2.1.2. Metalni (MMC) kompoziti .....	10
3.2.1.3. Polimerni (PMC) kompoziti .....	12
3.2.2. Podjela kompozita prema vrsti ojačala .....	14
3.2.2.1. Česticama ojačani kompoziti .....	15
3.2.2.2. Sendvič-kompoziti i laminati.....	15
3.2.2.3. Vlaknima ojačani kompoziti .....	17
3.2.3. Postupci proizvodnje polimernih kompozita ojačanih vlaknima.....	21
4. PRIMJENA POLIMERNIH KOMPOZITA OJAČANIH UGLJIČNIM VLAKNIMA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI .....	25
4.1. Potreba za novim materijalima u automobilske industriji .....	25
4.2. Polimeri ojačani ugljičnim vlaknima u superautomobilima .....	29
4.3. Primjenjivost CFRP-a u automobilima masovne proizvodnje.....	31
4.3.1. Prvi automobil u kojem je CFRP primijenjen kao dio serijske proizvodnje .....	31
4.3.2. CFRP kao materijal branika automobila.....	32
4.3.3. CFRP kao materijal okvira sjedala automobila.....	36
5. RECIKLIRANJE POLIMERNIH KOMPOZITA OJAČANIH UGLJIČNIM VLAKNIMA.....	39
5.1. Postupci recikliranja CFRP-a.....	39
5.1.1. Mehaničko recikliranje .....	39
5.1.2. Energijska uporaba.....	40
5.1.3. Kemijska uporaba .....	41
6. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	47

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Sastavnice održivog razvoja [2] .....	3
Slika 2.	CO <sub>2</sub> emisije pri proizvodnji i uporabi automobila različitih pogona [3] .....	4
Slika 3.	Odnos utjecaja matrice i vlakna na svojstva kompozita [6] .....	5
Slika 4.	Varijacije odnosa konstituenata [5] .....	7
Slika 5.	Podjela kompozita prema matrici [5] .....	7
Slika 6.	Rezni alati napravljeni od kompozita s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> matricom i SiC viskerima [9] .....	8
Slika 7.	Kočni diskovi Porsche-a 911 Turbo napravljeni od kompozita sa SiC matricom ojačanom ugljičnim vlaknima [11] .....	10
Slika 8.	Ventili automobilskog motora od Ti matrice ojačane SiC česticama [9] .....	11
Slika 9.	Porast upotrebe polimernih kompozita u kopnenom transportu u Europi [12] .....	13
Slika 10.	Prikaz vlačne čvrstoće i modula elastičnosti različitih vrsta polimernih matrica [8] .....	13
Slika 11.	Prikaz vlačne čvrstoće i modula elastičnosti raznih vlakana [8] .....	14
Slika 12.	Podjela kompozita prema ojačalu [5] .....	15
Slika 13.	Sendvič-kompozit s jezgrom u obliku saća [8] .....	16
Slika 14.	Profili jezgre sendvič-kompozita [8] .....	16
Slika 15.	Različita orijentacija slojeva laminata [13] .....	17
Slika 16.	Razne varijante rasporeda vlakana [5] .....	18
Slika 17.	Viskeri [5] .....	18
Slika 18.	Ojačanje automobilske gume [5] .....	19
Slika 19.	Prikaz usporedbe proizvodnje ugljičnih vlakana iz PAN-a i katrana [12] .....	20
Slika 20.	Prikaz postupka namotavanja kompozita [8] .....	22
Slika 21.	Vrste lijevanja vlaknima ojačanih polimernih kompozita [8] .....	23
Slika 22.	Prikaz RTM postupka [8] .....	23
Slika 23.	Pultrudiranje [8] .....	24
Slika 24.	Fordov automobil od duromernog kompozita s konopljom [15] .....	25
Slika 25.	Trabant [15] .....	26
Slika 26.	McLaren MP4/1 [15] .....	27
Slika 27.	Prikaz ekoloških zahtjeva pri proizvodnji automobila u Europi [16] .....	27
Slika 28.	Prikaz evolucije materijala u strojarstvu i građevinarstvu [17] .....	28
Slika 29.	Prikaz porasta potrošnje i pada cijene ugljičnih vlakana [18] .....	29
Slika 30.	Monokok karoserija automobila Rimac C_Two napravljen od CFRP-a [19] .....	30
Slika 31.	Interijer McLaren Senne [20] .....	30
Slika 32.	Šasija i karoserija BMW i3 automobila [22] .....	31
Slika 33.	Automatizirana proizvodnja karoserije BMW i3 od CFRP-a u Leipzigu [21] .....	32
Slika 34.	Broj stradalih ovisno o vrsti prometnih nesreća [23] .....	33
Slika 35.	Dijelovi branika automobila [24] .....	33
Slika 36.	Graf apsorbirane energije: sila i pomak apsorbera [24] .....	34
Slika 37.	Prikaz modela ispitivanja energije apsorbanja grede branika [25] .....	35
Slika 38.	Graf apsorbirane sile i pomaka grede branika [25] .....	35
Slika 39.	Kretanje stražnjeg putnika prilikom automobilske nesreće [26] .....	36
Slika 40.	Okvir sjedala BMW-a M4 G82 napravljen od CFRP-a [27] .....	38
Slika 41.	Postupci recikliranja i oporabe [29] .....	40

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti svojstava nekih vrsta vlakana [14] .....	19
Tablica 2. Karakteristična svojstva ugljičnih vlakana [8] .....	21
Tablica 3. Utjecaj materijala sjedala na faktore ozljeda [26] .....	37
Tablica 4. Usporedba svojstava materijala prije i nakon recikliranja pirolizom [31] .....	42



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
<i>E</i>	MPa	modul elastičnosti
<i>F</i>	N	sila
<i>l</i>	m	duljina
<i>m</i>	kg	masa
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
<i>t</i>	s	vrijeme
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća

## SAŽETAK

Na putu prema ostvarivanju cilja čiste i održive energije automobilska industrija mora se suočiti s problemom emisije ugljikovog dioksida. Sve stroži ekološki standardi otvorili su vrata električnim automobilima, ali i postavili ograničenja pri proizvodnji automobila s unutarnjim izgaranjem. Smanjenje mase u proizvodnji novih automobila jedno je od rješenja da bi se ti standardi zadovoljili. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima materijali su odličnih svojstava pa upravo njihova primjena kao zamjena za konvencionalne metale pri proizvodnji automobila rezultira smanjenjem mase automobila. Zbog visoke cijene izrade još uvijek nisu našli veliku primjenu u serijskoj proizvodnji, ali zbog sve veće primjene i u drugim granama industrije, očekuje se da će se tehnologija proizvodnje razviti, što bi dovelo do masovnije proizvodnje i pada cijene izrade. Recikliranje takvih materijala jedno je od rješenja prema boljoj iskoristivosti, ali i prema održivoj proizvodnji.

U ovom završnom radu prikazan je noviji razvoj polimernih kompozita ojačani ugljičnim vlaknima, njihova najnovija primjena u automobilskoj industriji i do sada, ali i zbog čega se smatra da će se oni u budućnosti primjenjivati sve više.

Ključne riječi: održivi razvoj, polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima, automobilska industrija

## **SUMMARY**

On the way to achieving the goal of clean and sustainable energy, the automotive industry must face the problem of carbon dioxide emissions. Increasingly stricter environmental standards have opened the door for electric cars, but also set limits on the production of internal combustion cars. Reducing the weight in the production of new cars is one of the solutions to meet these standards. Carbon fibre-reinforced polymer composites are materials with excellent properties, and their use as a substitute for conventional metals in car production results in a reduction in car weight. Due to the high cost of production, they have not yet found great application in serial production, but due to the increased application in other industries, production technology is expected to develop, which would lead to more mass production and lower production costs. Recycling of such materials is one of the solutions towards better efficiency, but also towards sustainable production.

This Bachelor thesis presents recent development of carbon fibre reinforced polymers, their most current application in the automotive industry as well as a brief historical overview, but also why it is believed that they will be used more in the future.

Key words: sustainable development, carbon fibre reinforced polymer, CFRP, car industry

## 1. UVOD

Potreba za novim i lakšim materijalima u masovnoj proizvodnji automobila još je više istaknuta Ciljevima održivog razvoja predstavljenima na konferenciji Ujedinjenih naroda 2015. godine. Automobili su najveći zagađivači cestovnog transporta, u neke je europske gradove zabranjeno ući automobilima proizvedenima prema starim ekološkim standardima. Svake godine ekološki standardi sve su stroži, što proizvođače automobila potiče da smanjenjem mase automobila reduciraju potrošnju goriva, a samim time i smanje štetne emisije ugljičnog dioksida.

Kompoziti se u automobilskoj industriji pojavljuju još u prošlom stoljeću. To su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala s ciljem dobivanja kombinacije svojstava kakve nema niti jedan materijal sam za sebe. Najpoznatiji automobil izrađen većinom od kompozita je popularni Trabant koji je izrađen od duromerne matrice ojačane pamučnim vlaknima. Ipak, metali poput čelika te kasnije aluminijske prevladali su serijskom proizvodnjom automobila.

Kao materijal koji se nameće kao zamjena za konvencionalne metale je polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima. Zbog svoje visoke krutosti i čvrstoće, a istovremeno niske gustoće s obzirom na metale, već dugi niz godina taj se materijal koristi u proizvodnji tzv. „superautomobila“, tj. luksuznih sportskih automobila iznimno visokih performansi, no zbog visoke cijene proizvodnje još uvijek nije nadvladao konvencionalne metale u serijskoj proizvodnji. Polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima svoju primjenu je našao i u drugim granama industrije, postao je zamjena za razne metale gdje god je potreban lakši materijal otporan na koroziju, što je zadnjeg desetljeća dovelo do dodatnog razvoja tehnologije proizvodnje. Razvojem tehnologije povećala se i sama proizvodnja, što je utjecalo na pad cijena, ali je došlo do pojave kumuliranja otpada.

Recikliranje polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima rješenje je koje dovodi do većeg iskorištenja samog materijala. Postupkom recikliranja postiže se održiva i „zelenija“ proizvodnja, što je za veću implementaciju polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima od velike važnosti.

## 2. GLOBALNI CILJEVI ODRŽIVOG RAZVOJA

Živimo u svijetu gdje niti jedna država ne može sama napraviti pozitivnu promjenu, zato su Ujedinjeni narodi (UN) 25. rujna 2015. godine predstavili program naziva „Globalni ciljevi održivog razvoja“ i tako postavili ciljeve k napretku čovječanstva koji su planirani da se ostvare do 2030. godine. Hrvatska kao aktivna članica Ujedinjenih naroda jedna je 193 države potpisnice ovog programa i također je sudjelovala u samoj izradi programa zalažući se posebno za područja mira i sigurnosti, vladavine prava, dobrog upravljanja, zaštite ljudskih prava (posebice prava žena, djece i drugih ranjivih skupina) te transparentnost. Sva ta područja našla su svoje mjesto među 17 ciljeva održivog razvoja koje čine [1]:

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1. Svijet bez siromaštva                  | 10. Smanjenje nejednakosti            |
| 2. Svijet bez gladi                       | 11. Održivi gradovi i zajednice       |
| 3. Zdravlje i blagostanje                 | 12. Odgovorna potrošnja i proizvodnja |
| 4. Kvalitetno obrazovanje                 | 13. Odgovor na klimatske promjene     |
| 5. Rodna ravnopravnost                    | 14. Očuvanje vodenog svijeta          |
| 6. Čista voda i sanitarni uvjeti          | 15. Očuvanje života na kopnu          |
| 7. Pristupačna i čista energija           | 16. Mir, pravda i snažne institucije  |
| 8. Dostojanstven rad i ekonomski rast     | 17. Partnerstvom do ciljeva.          |
| 9. Industrija, inovacije i infrastruktura |                                       |

Kako bi se osigurala usklađenost politika održivog razvoja, potrebno je uzeti u obzir učinke svih javnih politika na održivi razvoj, kako na lokalnoj, regionalnoj i nacionalnoj razini tako i na globalnoj razini. Globalni ciljevi održivog razvoja univerzalni su i primjenjivi u svim zemljama i zajednicama. [1]

Ciljevi održivog razvoja logičan su nastavak na program UN-ov program naziva „Milenijski razvojni ciljevi“ iz 2000. godine s kojima se djelomično preklapaju i na koje se nadovezuju. Međutim, geopolitička događanja u svijetu od 2000. do 2015. godine i sam neuspjeh Milenijskih ciljeva doveli su do saznanja da novi ciljevi ne smiju biti usmjereni samo na države u razvoju, kao što je to bio slučaj s ciljevima iz 2000., nego to moraju postati globalni ciljevi, koji se jednako odražavaju na sve države svijeta kako bi se postigli što bolji rezultati. [2]

U Ciljeve održivog razvoja ugrađen je stav da očuvanje okoliša nije samo dodatak ili nešto što je suprotstavljeno održivom razvoju, nego ono što se nalazi u podlozi svih ciljeva. Stoga Ciljevi

održivog razvoja uključuju nova područja kako bi se pokazalo da se okoliš, gospodarstvo i društvo međusobno obuhvaćaju, a ne da se međusobno natječu. [2]

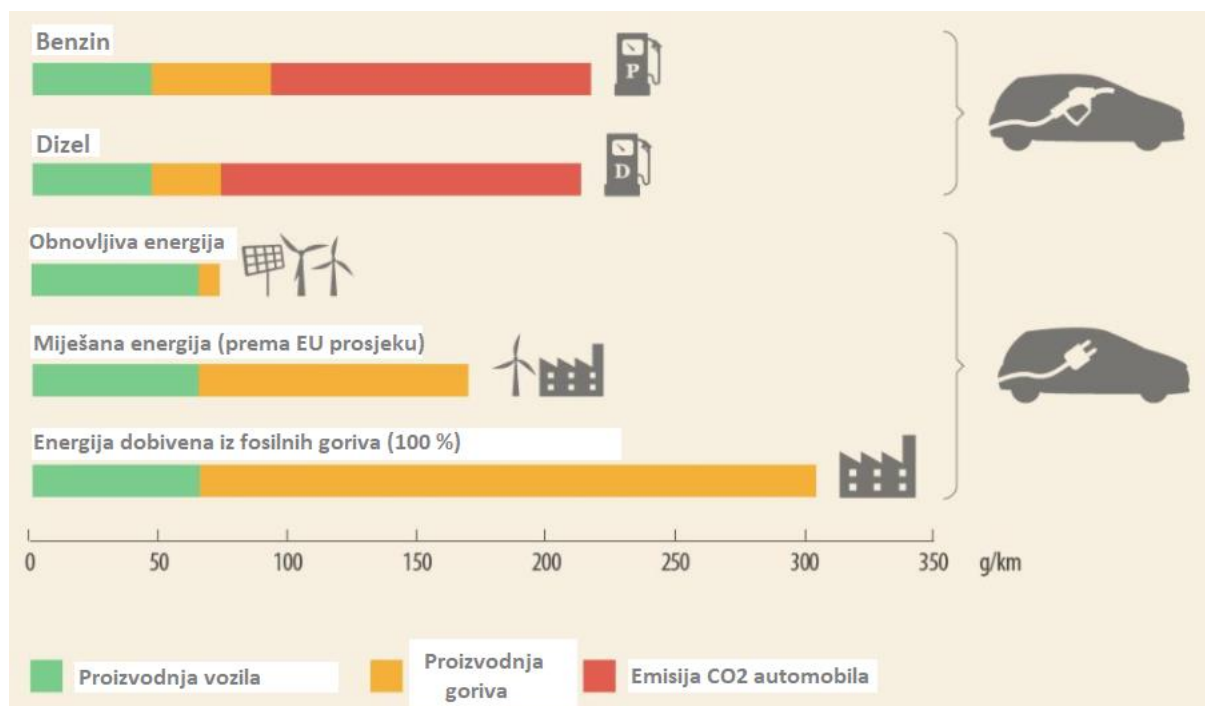


**Slika 1. Sastavnice održivog razvoja [2]**

Tema ovog završnog rada vezana je uz više ciljeva održivog razvoja, a najviše je vezana uz ciljeve pristupačne i čiste energije, ali je usko povezana i s ciljevima na industriju, inovacije i infrastrukturu, ciljevima odgovorne potrošnje i proizvodnje, kao i s ciljevima vezanim uz klimatske promjene.

Ciljevi pristupačne i čiste energije imaju velike zahtjeve prema automobilskoj industriji. Razvoj električnih automobila jedno je od rješenja prema zahtjevima Ciljeva pristupačne i čiste energije, dok je drugo proizvodnja automobila što manje mase, što rezultira manjom potrošnjom goriva, a time i manjom emisijom CO<sub>2</sub>. Niti električni automobili nisu pogonjeni čistom energijom jer električna energija dobivena za pogon takvih automobila još uvijek većinom nije iz obnovljivih izvora energije (Slika 2), no smatra se da će u budućnosti obnovljivi izvori energije prevladati nad neobnovljivima. [3]

Transport je odgovoran za otprilike 30 % od ukupne vrijednosti emisija CO<sub>2</sub>, a od toga 72 % dolazi iz cestovnog transporta. Najveći zagađivači su automobili koji čine 60,2 % od ukupne vrijednosti CO<sub>2</sub> emisija cestovnog prometa. Svake godine udio novoregistriranih električnih automobila iznosi tek 1,5 %. [3]



**Slika 2. CO<sub>2</sub> emisije pri proizvodnji i uporabi automobila različitih pogona [3]**

Sve su veći zahtjevi na proizvođače automobila s unutarnjim izgaranjem što se tiče emisije ugljičnog dioksida. Tako je 2015. na snagu stupio standard EURO 6, prema kojem svaki novi proizvedeni automobil ne smije imati emisiju CO<sub>2</sub> veću od 130 g/km, a već 2020. godine na snagu je stupio standard EURO 6d prema kojem novi automobili ne smiju emitirati više od 95 g/km ugljičnog dioksida. [4]

Primjena lakših materijala u proizvodnji automobila jedno je od rješenja na zahtjeve za manjom emisijom CO<sub>2</sub>. Smanjenje mase automobila uporabom lakših materijala nije neka novost: prvo je aluminij zamijenio čelik u nekim dijelovima automobila, a zatim je pojava različitih kompozita ponudila nova rješenja zahtjevima smanjenja mase. Posljednjeg desetljeća razvitkom tehnologije proizvodnje polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima (engl. *Carbon fibre reinforced polymer* - CFRP) počinju se implementirati u serijskoj proizvodnji automobila, prvo kod električnih automobila, čiji je cilj da su što „zeleniji“ (manjeg negativnog utjecaja na okoliš), a sve više i u automobilima sa unutarnjim izgaranjem.

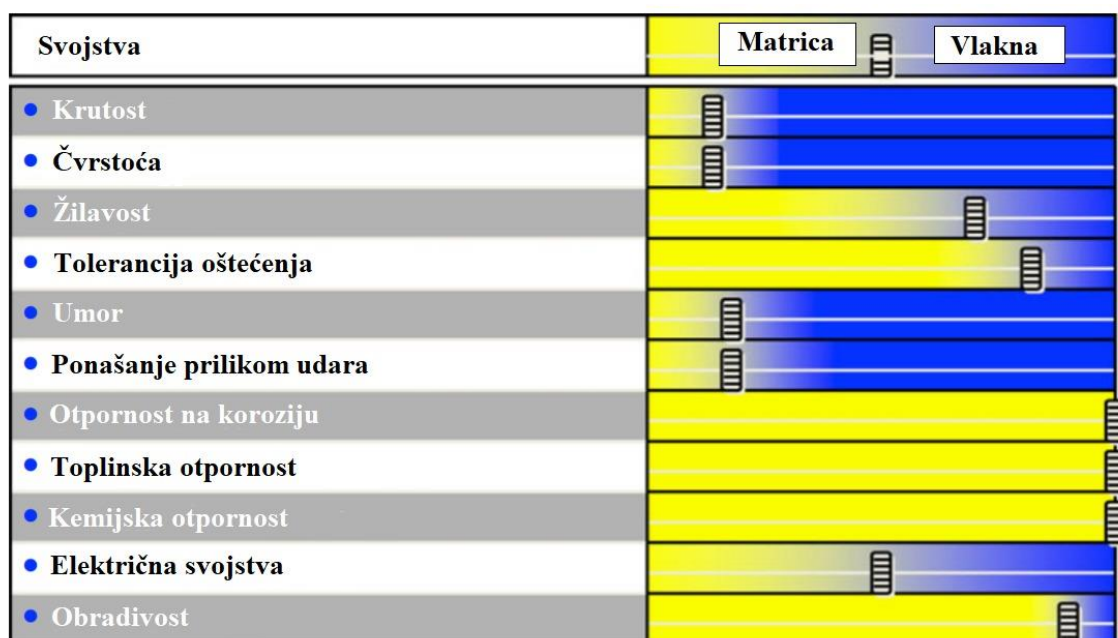
### 3. KOMPOZITI

#### 3.1. Definicija i pojam kompozita

„Kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih, u cilju dobivanja materijala takvih svojstava kakve ne posjeduje niti jedan materijal sam za sebe“. [5]

Sastoje se od dvije osnovne faze:

- matrice (kontinuirana faza)
- ojačala (disperzivna faza).



Slika 3. Odnos utjecaja matrice i vlakna na svojstva kompozita [6]

Na slici 3 je prikazan odnos matrice i ojačala (u ovom slučaju vlakana) na svojstva kompozita. Na krutost i čvrstoću daleko više utječe ojačalo, što je i njegova zadaća. Matrica daleko više utječe na žilavost (udarni rad loma), a u potpunosti određuje kakva će biti otpornost na koroziju, toplinska i kemijska stabilnost. Obradivost kompozita ovisi također o materijalu njegove matrice.

Zadaća matrice je da [5]:

- drži ojačala zajedno
- štiti ojačala od vanjskih utjecaja



- ima važnu ulogu u prijenosu opterećenja na ojačalo
- određuje njegovo ponašanje s obzirom na djelovanje atmosfere
- daje vanjski oblik kompozitnog proizvoda itd.

Zadaća ojačala je da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju [5]:

- visoki modul elastičnosti (krutost)
- visoku čvrstoću
- otpornost na trošenje.

Neke od prednosti uporabe kompozita pred konvencionalnim materijalima [5]:

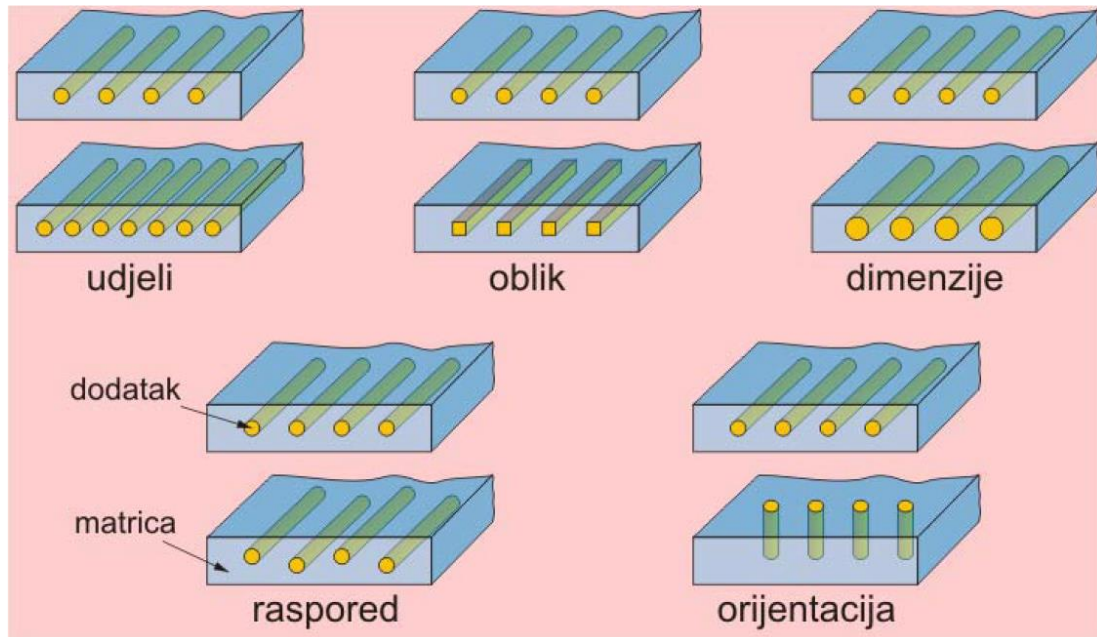
- Moguće ih je spajati za vrijeme postupka proizvodnje.
- Moguće je izraditi proizvode složenog oblika.
- Smanjeni su troškovi naknadne obrade materijala.
- Dimenzijski su stabilni pri ekstremnim radnim uvjetima.
- Otporni su na koroziju.
- Moguće je dizajnirati svojstva prema zahtjevima uporabe.

Neki od nedostataka kompozitnih materijala pred konvencionalnim [7]:

- Mehanička karakterizacija kompozita kompliciranija je od metalne.
- Popravak kompozitnog dijela kompliciraniji je u usporedbi s metalnim.
- Troškovi proizvodnje kompozita su visoki.
- Kompoziti nemaju povoljnu kombinaciju čvrstoće i otpornosti širenje pukotine.
- Kompoziti ne daju uvijek bolja svojstva pri izboru materijala, kao što su: čvrstoća, žilavost, otpornost na koroziju, oblikovljivost, mogućnost spajanja itd.

Kako bi se posljednji navedeni nedostatak izbjegao pri izboru kompozita, važno je znati što sve utječe na svojstva kompozita [8]:

- svojstva matrice i ojačala (konstituenta)
- veličina i raspodjela ojačala
- oblik ojačala
- volumni udio ojačala
- priroda i jakost veza između konstituenta (slika 4.).



Slika 4. Varijacije odnosa konstituenata [5]

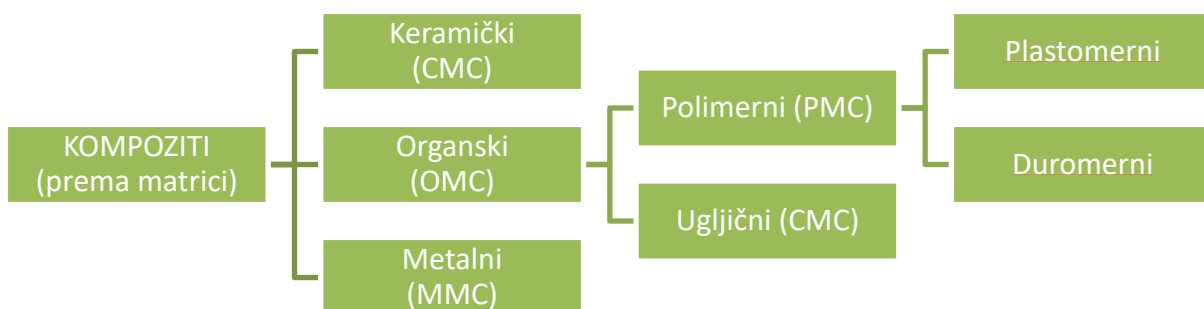
Na slici 4. se nalazi prikaz odnosa matrice i ojačala koje je u obliku vlakana, no ovaj odnos vrijedi i kada se u obliku ojačala pojavljuju čestice.

### 3.2. Podjela kompozita

Postoji više podjela kompozita, a najčešće se dijele prema:

- materijalu matrice
- obliku ojačala.

#### 3.2.1. Podjela kompozita prema materijalu matrice



Slika 5. Podjela kompozita prema matrici [5]

### 3.2.1.1. Keramički (CMC) kompoziti

Keramički materijali zbog svojih su ionskih i kovalentnih veza vrlo tvrdi, imaju izvrsnu kemijsku i toplinsku postojanost, otporni su na koroziju, a veliki nedostatak im je sklonost krhkom lomu. Upravo zbog mnogih prednosti, i keramički materijali se koriste kao materijal matrice kompozita, pa se ojačalom pokušava riješiti problem krhkosti.

Ugradnjom čestica ili viskera jednog keramičkog materijala u matricu od druge vrste keramike lomna žilavost može se povećati i do deset puta. To se postiže međudjelovanjem propagirajuće pukotine i ojačala, pri čemu čestice ili viskeri sprečavaju napredovanje pukotine. [8]

Kompoziti keramičke matrice proizvode se postupcima vrućeg prešanja (HP), vrućeg izostatičkog prešanja (HIP) i sinteriranja. Primjenjuju se za mehanički i tribološki opterećene dijelove izložene visokim radnim temperaturama ( $> 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), kao što su primjerice pojedini dijelovi motora. [8]

Matrice mogu biti [9]:

**OKSIDNE:**

- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Slika 6.)
- Mulit  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- $\text{SiO}_2$
- Ba-, Li- i Ca - aluminosilikat

**NEOKSIDNE:**

- SiC (Slika 7.)
- $\text{B}_4\text{C}$
- $\text{Si}_3\text{N}_4$
- AlN



**Slika 6. Rezni alati napravljeni od kompozita s  $\text{Al}_2\text{O}_3$  matricom i SiC viskerima [9]**

Oksidne matrice imaju bolju toplinsku i kemijsku stabilnost, a neoksidne matrice imaju bolja mehanička svojstva. [10]

Materijali ojačala kompozita s matricom od keramike mogu biti [9]:

- diskontinuirana ojačala (viskeri, pločice, čestice diskontinuirana vlakna):
  - $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiC (slika 7),  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ , AlN, BN.
  - SiC je najzastupljeniji zbog stabilnosti u oksidnim i neoksidnim keramičkim matricama, a primjenjuje se pri izradi reznih alata.
- kontinuirana vlakna:
  - staklo, mulit, C,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC.
  - SiC vlakna najviše se koriste zbog visoke tvrdoće, čvrstoće i toplinske stabilnosti.

Diskontinuirana vlakna daju nešto niža mehanička svojstva, no mogu se proizvoditi nekim od klasičnih postupaka proizvodnje monolitne keramike što ih čini jeftinijima, dok kontinuirana daju bolja mehanička svojstva, no dobivaju se složenijim postupcima što ih čini skupljima. [5]

Prednosti keramičkih kompozita [9]:

- visoka otpornost na koroziju
- stabilnost na ekstremno visokim temperaturama
- velika tvrdoća
- mala gustoća
- otpornost na toplinski šok.

Nedostatak keramičkih kompozita [9]:

- sklonost krhkom lomu.



**Slika 7. Kočni diskovi Porsche-a 911 Turbo napravljeni od kompozita sa SiC matricom ojačanom ugljičnim vlaknima [11]**

### 3.2.1.2. Metalni (MMC) kompoziti

Metalni (MMC, prema engl. *Metal matrix composite*) kompoziti su kompoziti čija je matrica metalna, u pravilu duktilna. Takva matrica ojačava se ojačalima u obliku čestica, kontinuiranih i diskontinuiranih vlakana da bi se poboljšala svojstva matrice, ono što je osobito značajno povećava se specifična čvrstoća i specifična krutost te poboljšava otpornost puzanju. [8]

Značajna prednost metalnih kompozita u odnosu na polimerne je mogućnost njihove primjene pri znatno višim radnim temperaturama. Međutim, ovi su kompoziti znatno skuplji od polimernih pa je njihova uporaba prilično ograničena. [8]

Kao materijal matrice metalnih kompozita većinom se pojavljuju legure, dok su ojačala pretežito čisti metali.

- Materijal matrice MMC-a [9]:
  - superlegure (Ni-Co)
  - legure aluminija, magnezija, titanija (Slika 8.) i bakra.
- Materijal ojačala:
  - čestice i kontinuirana vlakna: ugljik, silicijev karbid, bor, aluminijev oksid i tvrdi metali

- diskontinuirana vlakna i viskeri: silicijev karbid (Slika 6.), sjeckana vlakna od ugljika i aluminijevog oksida i čestice aluminijevog oksida i karbida, dijamant.



**Slika 8. Ventili automobilskog motora od Ti matrice ojačane SiC česticama [9]**

Prerada kompozita s metalnom matricom u načelu se sastoji od najmanje dva koraka. Prvi korak predstavlja sjedinjenje (npr. ulaganje ojačala u matricu), a drugi je oblikovanje. U tu svrhu razvijene su mnoge metode od kojih su neke prilično sofisticirane, dok se npr. metalni kompoziti s diskontinuiranim vlaknima oblikuju uobičajenim postupcima kao što su kovanje, valjanje i ekstrudiranje. [8]

Postupci proizvodnje MMC-a [10]:

- u tekućem stanju:
  - lijevanje miješanjem
  - lijevanjem u poluskrućenom stanju
  - tlačno precizno lijevanje
  - oblikovanje u poluskrućenom stanju
  - oblikovanje naštrcavanjem
  - infiltracija:
    - spontana infiltracija
    - prisilna infiltracija (centrifugalna, vakuumska, pod tlakom, ultrazvučna, infiltracija mehaničkim pritiskom)
  - brzo skrućivanje,

- u čvrstom stanju:
  - difuzijsko spajanje
  - hladno prešanje
  - metalurgija praha
  - vruće prešanje (HP) i vruće izostatičko prešanje (HIP).

Iz priloženog vidi se da postoji puno različitih postupaka proizvodnje kompozita s metalnom matricom, no svaki od njih je relativno zahtjevan što samim time proizvodnju čini skupom.

Prednosti metalnih kompozita [10]:

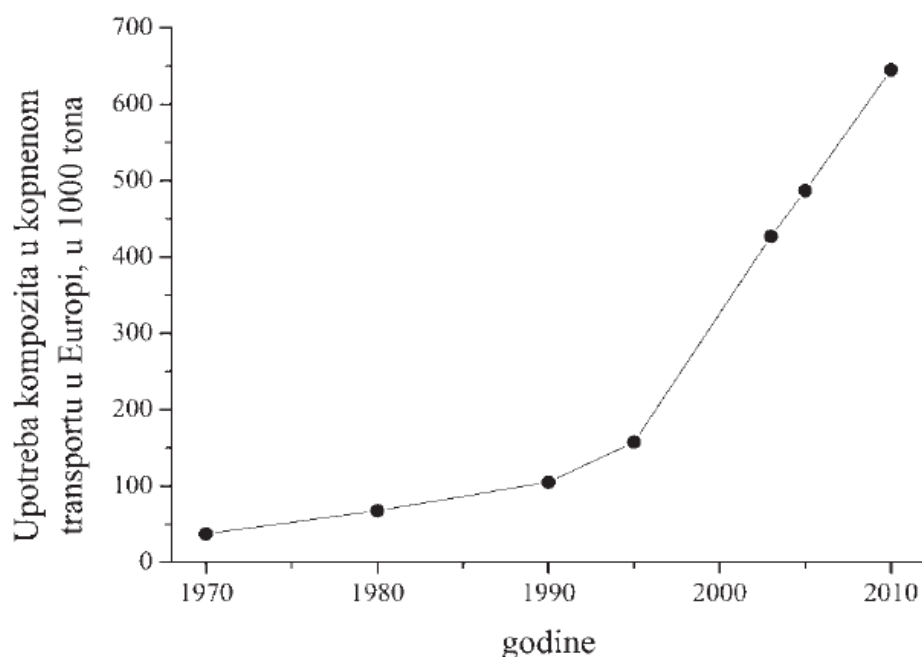
- vrlo visoka specifična čvrstoća i specifična krutost
- visoka toplinska i električna vodljivost i niska toplinska rastezljivost
- vrlo dobra mehanička i druga svojstva pri visokim temperaturama
- vrlo dobra otpornost na trošenje.

Nedostatci metalnih kompozita:

- komplicirana proizvodnja
- vrlo visoka cijena
- nedovoljno podataka o svojstvima materijala
- još uvijek nema dovoljno smjernica za konstruiranje
- loša recikličnost.

### 3.2.1.3. Polimerni (PMC) kompoziti

Polimerni kompoziti (engl. *Polymer matrix composite*, PMC) su industrijski najvažnija vrsta kompozita iz razloga što nude bolja svojstva nego drugi materijali uz znatno manju gustoću. Također, otpornost na koroziju je svojstvo zbog kojeg su često primjenjivi jer se predmeti izrađeni od polimernih kompozita ne trebaju zaštićivati protiv korozije, samim time duži je vijek trajanja takvih materijala u usporedbi s metalnim. Potreba za primjenom polimernih kompozita u bilo kojoj grani transporta rapidno raste iz razloga što su zbog sve više i više ekoloških zahtjeva potrebni materijali manje gustoće radi manje potrošnje goriva (Slika 9.). [12]

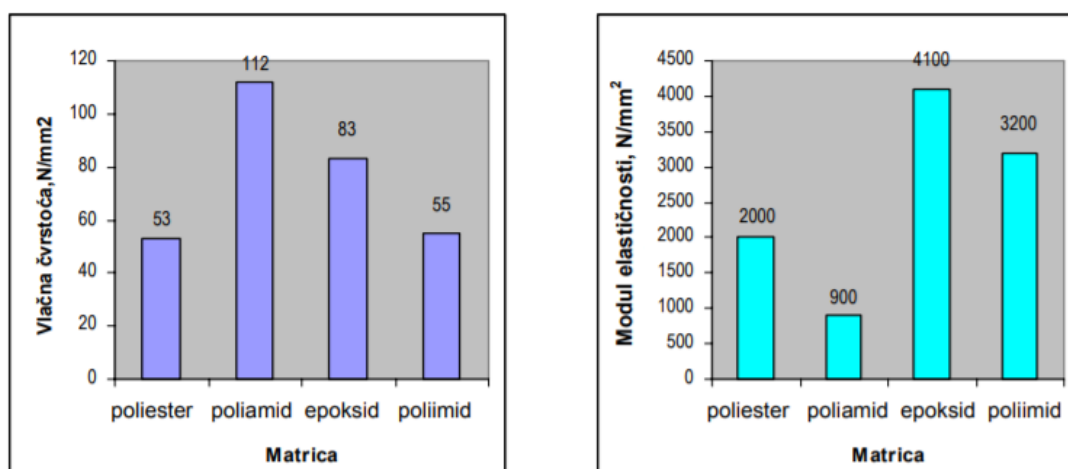


**Slika 9. Porast upotrebe polimernih kompozita u kopnenom transportu u Europi [12]**

Materijali matrice polimernih kompozita [9]:

- plastomeri: polipropilen (PP), poliamid (PA), polietilen (PE), akrilonitril-butadienstiren (ABS), polivinil-klorid (PVC), visokotemperaturni plastomeri: polieter-eterketon (PEEK), polifenilen-sulfid (PPS)
- duromeri: poliesterske, epoksidne, vinil-esterske, fenolne smole itd.

Kao materijal matrice češće se koriste duromeri, dok u većini slučajeva kada je riječ o matrici od plastomera, u pitanju je polipropilen (PP).

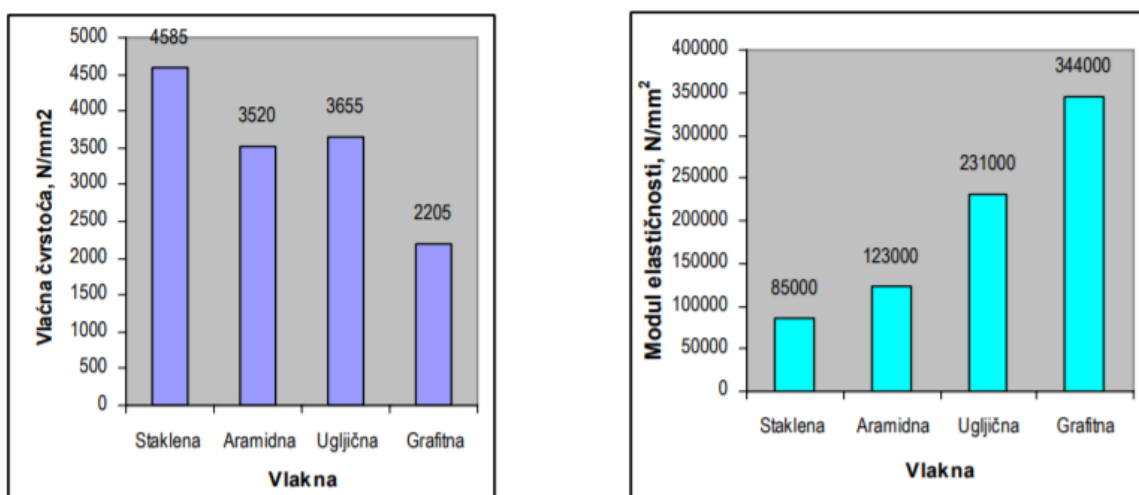


**Slika 10. Prikaz vlačne čvrstoće i modula elastičnosti različitih vrsta polimernih matrica [8]**



Materijal ojačala polimernih matrica [11]:

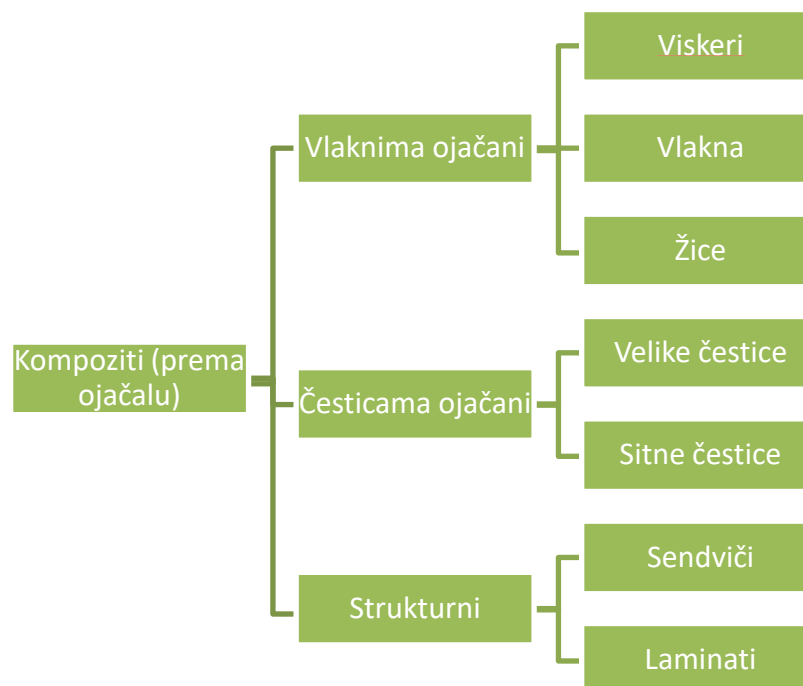
- ugljična vlakna
- staklena vlakna
- aramidna vlakna
- ostali vlaknasti materijali (B, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



Slika 11. Prikaz vlačne čvrstoće i modula elastičnosti raznih vlakana [8]

### 3.2.2. Podjela kompozita prema vrsti ojačala

Postoje tri velike skupine kompozita prema vrsti ojačala, a to su: kompoziti ojačani česticama, kompoziti ojačani vlaknima i strukturni kompoziti. Najupotrebljivija vrsta su kompoziti ojačani vlaknima, koji su i tema ovog završnog rada.



**Slika 12. Podjela kompozita prema ojačalu [5]**

### 3.2.2.1. Česticama ojačani kompoziti

Za ojačanje kompozitnog materijala mogu se koristiti ne samo vlakna, već i čestice od tvrdog i krhkog materijala, koje su jednolično raspoređene u mekanijoj i duktilnijoj matrici. S obzirom na veličinu čestica i način na koji utječu na ukupna svojstva, razlikujemo kompozite s disperzijom i kompozite s velikim česticama. Kod kompozita s disperzijom volumni se udio čestica kreće do 15 %, a za kompozite s velikim česticama taj je udio veći od 20 %. [8]

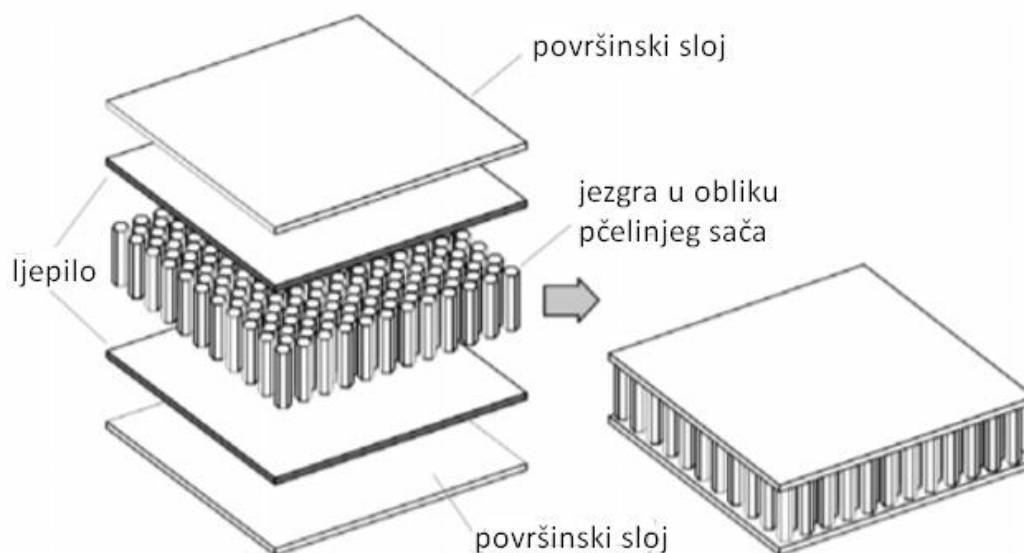
### 3.2.2.2. Sendvič-kompoziti i laminati

Sendvič-kompoziti sastoje se od dva tanka, ali čvrsta i kruta sloja na vrhu i dnu, između kojih se nalazi laki materijal, tj. jezgra. U pravilu su ta dva tanka sloja čvrsta i kruta, no moguće je da iako niti matrica, niti vanjski slojevi nisu kruti i čvrsti, kompozit ima dobra oba ta svojstva. Spajanje jezgre i vanjskih slojeva najčešće se ostvaruje pomoću ljepljiva.

Kao materijali jezgre koriste se [4]:

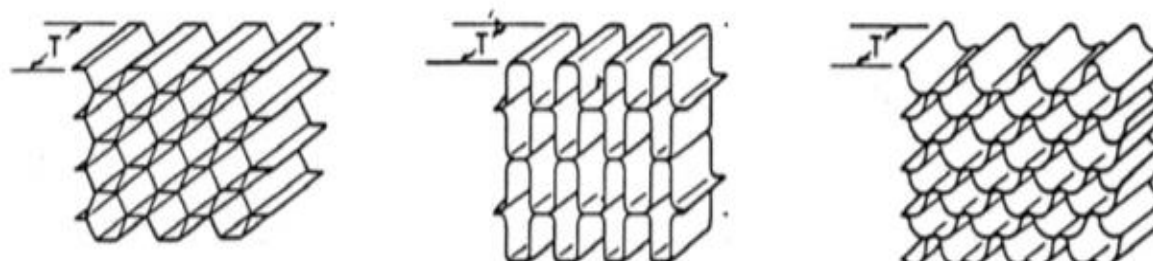
- polimerne pjene od polivinil-klorida (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PUR), polieterimida (PEI) i akrilne pjene; primjenjuju se pjene gustoće od 40 do 200 kg/m<sup>3</sup> i debljine 5 do 50 mm

- aluminij ili polimerni kompoziti (aramidna vlakna u kombinaciji s akrilonitril-butadienstirenskom (ABS), polikarbonatnom (PC), polipropilenskom (PP) ili polietilenskom (PE) matricom u izradi saća)
- drvo (balza, cedar).



**Slika 13. Sendvič-kompozit s jezgrom u obliku saća [8]**

Na Sliku 13 nalazi se sendvič-konstrukcija čija je jezgra u obliku pčelinjeg saća, koja se najčešće koristi u zrakoplovnoj industriji. Materijal jezgre ove sendvič-konstrukcije je aluminij, dok je materijal vanjskog sloja također najčešće aluminij. Saće može biti kružnog presjeka, kao što je prikazano na slici 13, a profiliranjem limova mogu se postići i drugi oblici presjeka saća, slika 14.

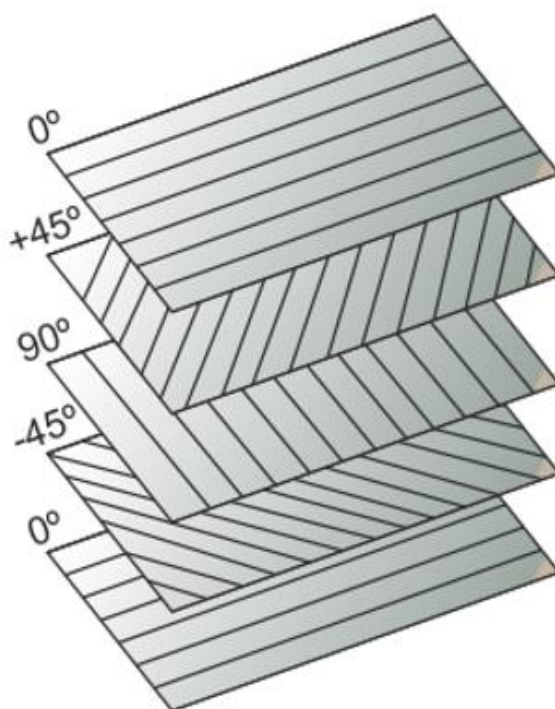


**Slika 14. Profili jezgre sendvič-kompozita [8]**

Slojeviti kompoziti ili laminati sadrže više slojeva ojačanja položenih u matricu. Laminati su, osim u vrlo specifičnim slučajevima, još uvijek anizotropni, ali razlika između svojstava za različite smjerove nije toliko značajna kao kod kompozita s jednosmjernim vlaknima. Na

temelju ovog pristupa razvijaju se laminati s tako orijentiranim slojevima koji osiguravaju najbolja svojstva u smjeru djelovanja opterećenja. Time se ostvaruje ušteda na materijalu i prema tome na masi, što je čimbenik od primarne važnosti. [8]

Laminati se često koriste kao vanjski slojevi sendvič-konstrukcija.

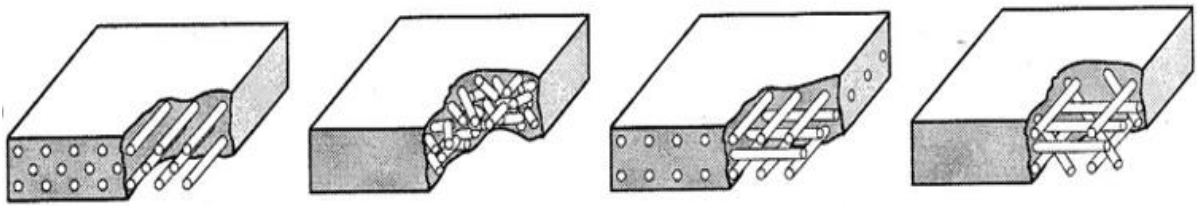


Slika 15. Različita orijentacija slojeva laminata [13]

### 3.2.2.3. *Vlaknima ojačani kompoziti*

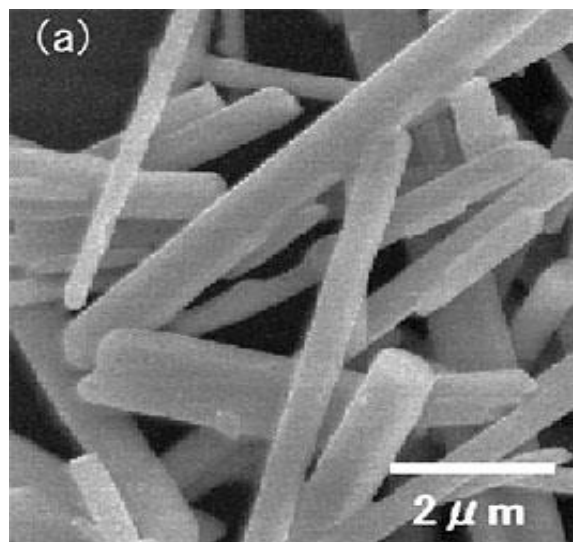
Ova vrsta kompozita nastaje tako što se vlakna (ili žice i viskerei) umiješaju u matricu. Vlakna mogu imati neodređenu orijentaciju i poravnanje ili mogu biti grupirana u materijalu. S obzirom na to da su vlakna glavni izvor čvrstoće i tvrdoće toga kompozita, orijentacija i poravnanje vlakana najviše utječu na mehanička i toplinska svojstva kompozita. Što je više vlakana poravnato u smjeru opterećenja, veća će biti čvrstoća kompozita u tom smjeru. Osnovna podjela je na [5]:

- viskere
- žice
- vlakna.



Slika 16. Razne varijante rasporeda vlakana [5]

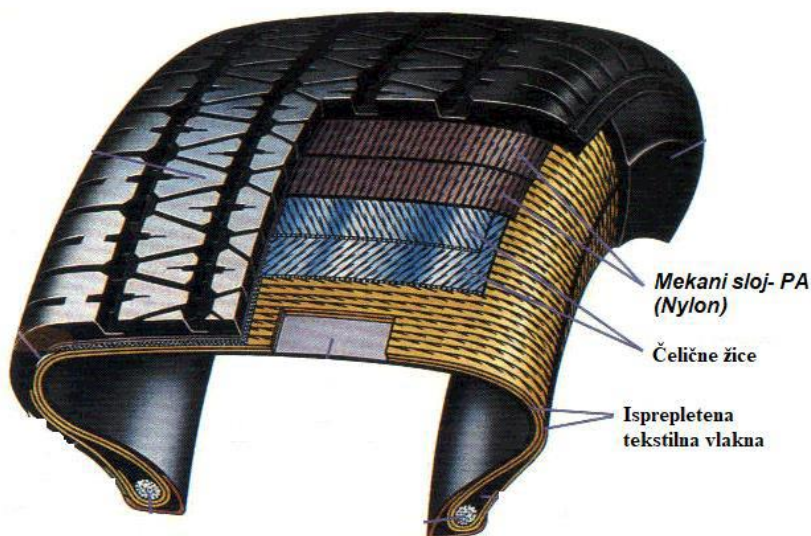
Viskeri su sitni monokristali koji imaju ekstremno veliki omjer „duljina/promjer“. Zbog svojih malih dimenzija imaju veliki udio pravile kristalne građe, što za posljedicu daje nemogućnost tečenja, zbog čega imaju izuzetno visoku čvrstoću. Unatoč svim nabrojenim svojstvima, ne primjenjuju se značajno zbog komplicirane proizvodnje i visoke cijene. Naime, vrlo ih je teško ugraditi u matricu. [5]



Slika 17. Viskeri [5]

Viskeri mogu biti od grafita (ugljika), silicijeva karbida, silicijeva nitrida i aluminijeva oksida. [5]

Žice za ojačanje kompozita su relativno velikog promjera, a najčešće su izrađene od čelika, molibdena i volframa. Primjenjuju se npr. pri radijalnom čeličnom ojačavanju (armiranju) automobilskih guma (Slika 18) te pri omotavanju visokotlačnih cijevi. [5]



Slika 18. Ojačanje automobilske gume [5]

Vlakna kao sastavna komponenta kompozita imaju funkciju povećati čvrstoću i krutost materijala matrice u svrhu zadovoljenja određenih konstrukcijskih zahtjeva. U principu, vlakna kao nositelj opterećenja trebaju biti što čvršća i kruća te istovremeno i male gustoće. Stoga se za vlakna preferiraju materijali visoke specifične čvrstoće i visoke specifične krutosti (specifični modul elastičnosti). [8]

Vlakna su malog promjera i mogu biti polikristalna ili amorfna. Materijali vlakana su polimerni ili keramički (aramid, staklo, ugljik, bor, aluminijev oksid i silicijev karbid). [5]

Tablica 1. Vrijednosti svojstava nekih vrsta vlakana [14]

Materijal vlakana	cijena kn/kg	$R_m$ , MPa	$E$ , GPa	$A$ , %	$d$ , $\mu\text{m}$	$\rho$ , $\text{g/cm}^3$
Staklo	15...19	3400...4800	70...85	3...5	3...13	2,4...2,5
Aramid	190...230	2400...3150	59...146	2	12	1,4...1,47
Ugljik	38...190	3100...4300	235...290	0,5...1,9	5...10	1,74...1,82
Bor	< 2600	3000...4000	370...440	0,4	50...140	2,4...2,6
SiC	1900...10000	1200...3000	130...400	0,6...1,5	10...15	2,3...3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1900...3800	1400...2000	150...470	0,8	10...20	2,7...3,9

Aramidna vlakna, čije ime dolazi od aromatični poliamidi, pripadaju skupini plastomera, ali za razliku od plastomera koji se mekšaju i tale pri povišenim temperaturama, ova su vlakna stabilna u području povišenih temperatura. Aramidna vlakna zadržavaju mehaničku otpornost pri temperaturama od -200 do 200 °C. Vlakna su karakteristične žute boje, higroskopna, relativno slabe adhezijske veze s matricom, skuplja od staklenih vlakana, nemagnetična, osjetljiva na ultraljubičasto zračenje te na djelovanje kiselina i lužina, ali su relativno inertna prema drugim otapalima i kemikalijama. Osim toga poznata su po svojoj krutosti i žilavosti (otpornosti na udar), otpornosti na puzanje, kao i na pojavu umora. [8]

Najstarija i najpoznatija komercijalna aramidna vlakna poznata su pod nazivom kevlar, a koriste se za izradu zaštitnih prsluka, tzv. pancirki, koji štite vojnike ili policajce od metaka.

Staklena vlakna su bijele ili prozirne boje, visoke su čvrstoće, ali nisu osobito kruta, što djelomično ograničava njihovu primjenu. Nadalje, područje uporabe staklom ojačanih kompozita ograničeno je temperaturom od najviše 200 °C. Pri višim temperaturama većina polimera počinje teći ili dolazi do znatne degradacije svojstava. [8]

Ugljična vlakna zbog svoje niže gustoće u odnosu na metale, u kombinaciji s polimernom matricom čine gotovo idealni konstrukcijski materijal.

Sva komercijalno proizvedena ugljikova vlakna dobivaju se od poliakrilonitrila (PAN), ugljena, regenerirane celuloze ili katrana. [12]



**Slika 19. Prikaz usporedbe proizvodnje ugljičnih vlakana iz PAN-a i katrana [12]**

Ugljična vlakna najčešće se koriste za ojačanje suvremenih polimernih kompozita. Razlozi za to su [8]:

- Ugljična vlakna imaju najveću specifičnu krutost i najveću specifičnu čvrstoću od svih vlaknastih ojačala.
- Imaju visoki vlačni modul elastičnosti i visoku čvrstoću, koje zadržavaju i pri povišenim temperaturama.
- Vlakna su otporna na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina.
- Razvijeni su relativno jeftini postupci proizvodnje vlakana i kompozita.

Prema krutosti ova se vlakna mogu podijeliti u četiri skupine [8]:

- standardnog modula elastičnosti (SM)
- srednjeg ili prijelaznog modula elastičnosti (HT)
- visokog modula elastičnosti (300 GPa)
- ultravisokog modula elastičnosti (UHM), **Tablica 2.**

**Tablica 2. Karakteristična svojstva ugljičnih vlakana [8]**

	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	Modul elastičnosti, GPa	Vlačna čvrstoća, MPa
SM	1,74	228	3600
HT	1,82	294	7100
UHM	2,18	966	3100

Ojačanje vlaknima, osim pojedinačnim vlaknom, može se ostvariti i tkanjem tkanina odnosno trakama napravljenih od tkanina. Postoji više vrsta tkanja, a svaka vrsta daje kompozitu različita svojstva zbog različitog rasporeda tkanja.

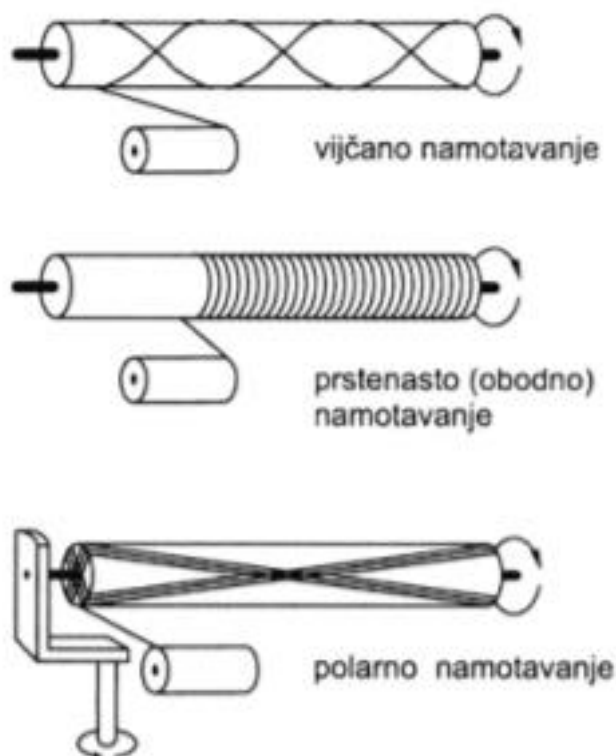
### **3.2.3. Postupci proizvodnje polimernih kompozita ojačanih vlaknima**

Neki od postupaka proizvodnje vlaknima ojačanih polimernih kompozita [8]:

- namotavanje
- lijevanje ili prešanje
- pultrudiranje.



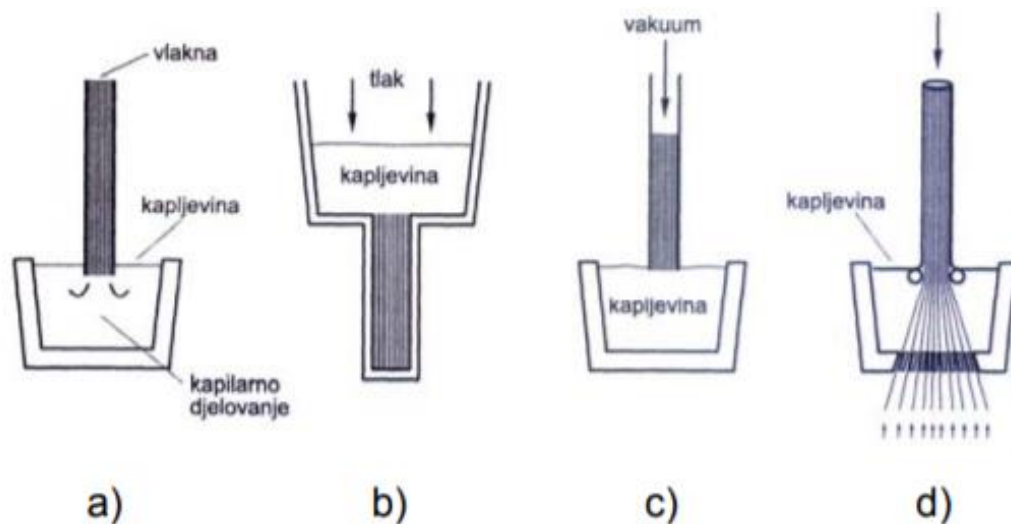
Namotavanje je postupak pri kojem se kontinuirana vlakna, koja služe kao ojačalo, namotavaju na model (obično cilindrični) tako da oblikuju šuplji dio. Vlakna se najprije vode kroz kupku koja sadrži smolu, a zatim se kontinuirano namotavaju na cilindrični model, često primjenom automatizirane opreme za namotavanje. Nakon nanošenja niza slojeva slijedi otvrdnjavanje u peći ili pri sobnoj temperaturi, nakon čega se model odstranjuje. [4]



Slika 20. Prikaz postupka namotavanja kompozita [8]

Kompozit koji je nastao namotavanjem ima vrlo visok omjer čvrstoće i gustoće jer je vlakno pravilno orijentirano.

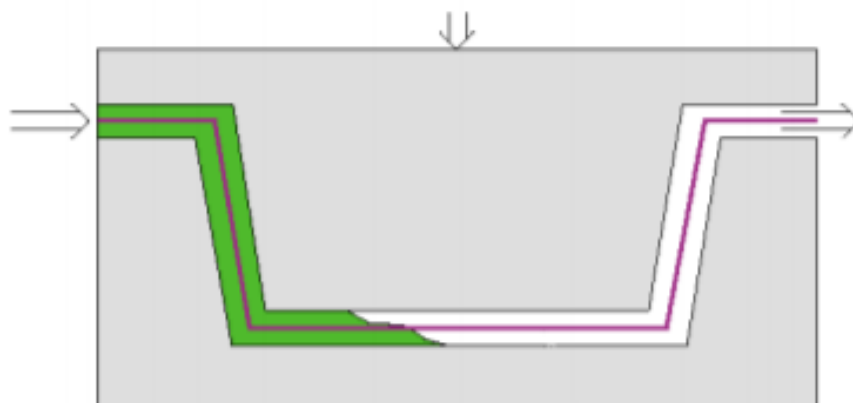
Različitim postupcima lijevanja također se može proizvesti vlaknima ojačani polimerni kompozit, slika 21. Ovisno o načinu kako se kapljevina polimerne smole unosi među vlakna razlikuje se: a) kapilarno djelovanje, b) tlačno lijevanje, c) vakuumsko infiltriranje i d) kontinuirano lijevanje. [4]



Slika 21. Vrste lijevanja vlaknima ojačanih polimernih kompozita [8]

RTM-postupak tlačnog lijevanja (prema engl. *Resin transfer moulding*), Slika 22, često se primjenjuje. Drugi naziv ovog postupka je injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom. Koristi se za lijevanje gotovo svih vrsta smole u gotovo sve vrste ojačala.

Polimerna smola ulijeva se pod tlakom u kalupnu šupljinu i raspoređuje oko ojačala, a nakon polimerizacije potaknute zagrijavanjem kalup se uklanja i dobiva izradak gotovog oblika. [4]



Slika 22. Prikaz RTM postupka [8]

Prednosti postupka RTM [8]:

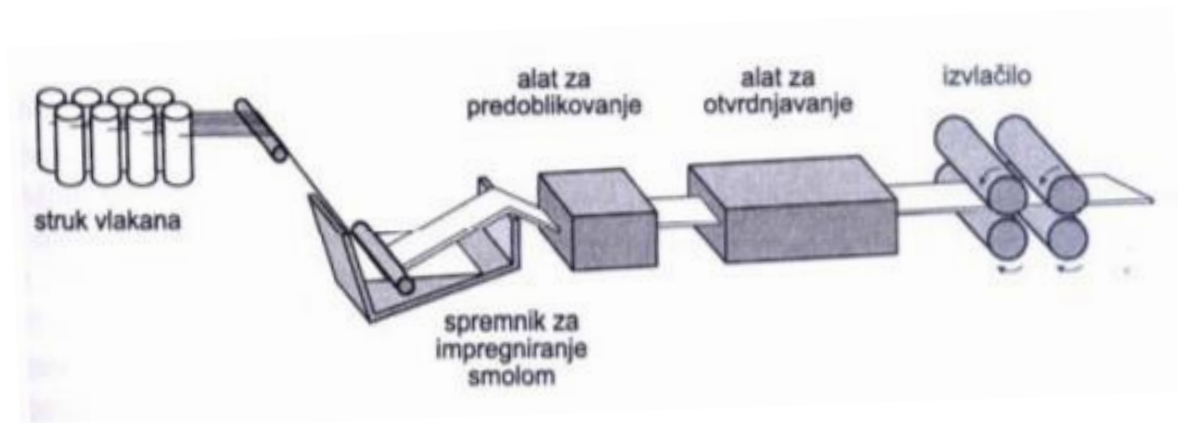
- veliki volumni udjel ojačala
- niski sadržaj uključaka zraka

- dobri radni uvjeti te mogućnost automatizacije postupka.

Dok su nedostaci:

- visoka cijena alata
- ograničenje na izratke malih dimenzija.

Pultrudiranje se primjenjuje za proizvodnju kompozitnih proizvoda konstantnog poprečnog presjeka (npr. štapovi, cijevi, grede itd.). Ovim postupkom, shematski prikazanim na Slika 23., snop kontinuiranih vlakna prethodno impregniran duromernom smolom provlači se kroz alat odgovarajućeg oblika i nakon toga slijedi otvrdnjavanje, čime se dobiva konačan oblik. Uređaj za izvlačenje vuče izradak kroz alate te time određuje brzinu procesa. [8]



Slika 23. Pultrudiranje [8]

## 4. PRIMJENA POLIMERNIH KOMPOZITA OJAČANIH UGLJIČNIM VLAKNIMA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

### 4.1. Potreba za novim materijalima u automobilske industriji

Automobilska industrija jedna je od najvažnijih i najvećih na svijetu, ne samo zbog prihoda i broja zaposlenih ljudi, već i zbog toga što uz sebe veže mnoge druge industrije. Ona uključuje sve tvrtke koje su uključene u dizajn, razvoj, proizvodnju, marketing i prodaju automobila. Najbitniji je faktor mnogih svjetskih gospodarstava. Iako pogođena korona-krizom, razvoj ove industrije je neminovan.

Početak masovne proizvodnje automobila obilježili su automobili proizvedeni većinom od metalnih materijala koji su još uvijek najzastupljeniji materijali u proizvodnji automobila.

Povijest primjene polimernih kompozita u automobilske industriji počinje 1939. kada je Henry Ford konstruirao prvi automobil u kojem su uporabljena staklena i sojina vlakna te vlakna konoplje u kombinaciji s duromernom matricom. U unutrašnjosti vozila prevladavali su kompoziti s kokosovim vlaknima, koji su u ono vrijeme bili revolucionarni. Polimerni kompoziti prevladavali su karoserijom, blatobranima te u poklopcu motora. [15]



Slika 24. Fordov automobil od duromernog kompozita s konopljom [15]

Zbog Drugog svjetskog rata razvoj ovog automobila je stao. Ipak, nakon rata na istočnoj strani razdijeljene Njemačke, pojavio se najpoznatiji automobil izrađen većinom od kompozitnih materijala.

Trabant, ili popularno zvan „Trabi“ (Slika 25), bio je mnogima slabijeg imovinskog stanja jedina opcija pri kupnji automobila. Kvaliteta je bila upitna, a veći dio karoserije bio je izrađen od duromera ojačanog pamučnim vlaknima. Proizvedena su tri milijuna primjeraka te je stoga Trabant najpoznatiji povijesni automobil napravljen od polimernog kompozita. U samom početku proizvodnje bio je jedan od tehnološki naprednijih automobila, no problem je što je od 1957. do 1991. ostao gotovo nepromijenjen. [15]



**Slika 25. Trabant [15]**

Za razliku od Trabanta, automobili izrađeni od kompozita većinom nisu doživjeli uspjeh, pa su do danas automobili izrađeni od konvencionalnih metala prevladavali tržištem.

Kroz povijest bitno je i još jedno vozilo izrađeno od kompozita, odnosno riječ je o prvoj formuli čija je šasija u potpunosti izgrađena od polimernog kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima, McLaren MP4/1 iz 1982. (Slika 26.). Bolid je bio mnogo čvršći i laganiji nego konkurentski bolidi, tako da su uspjeh i probijanje kompozita u moto-sportu obećavali. U povijesti Formule 1 time je počelo novo doba, takozvano „doba ugljika“. [15]



Slika 26. McLaren MP4/1 [15]

Sve veća i veća ekološka osviještenost ljudi dovela je i do mnogih ekoloških zahtjeva prema automobilskoj industriji, pa se sve više novaca ulaže u razvitak automobila s manjom potrošnjom goriva, kao i električnih i hibridnih. Jedan od ciljeva koji se želi postići je smanjenje mase automobila, što posljedično daje povoljniji rezultat potrošnje goriva, pa će i zagađenje biti manje. Taj cilj vrijedi i za električne automobile, kod kojih je najveći problem domet zbog nedovoljno efikasnih spremnika energije, odnosno baterija.

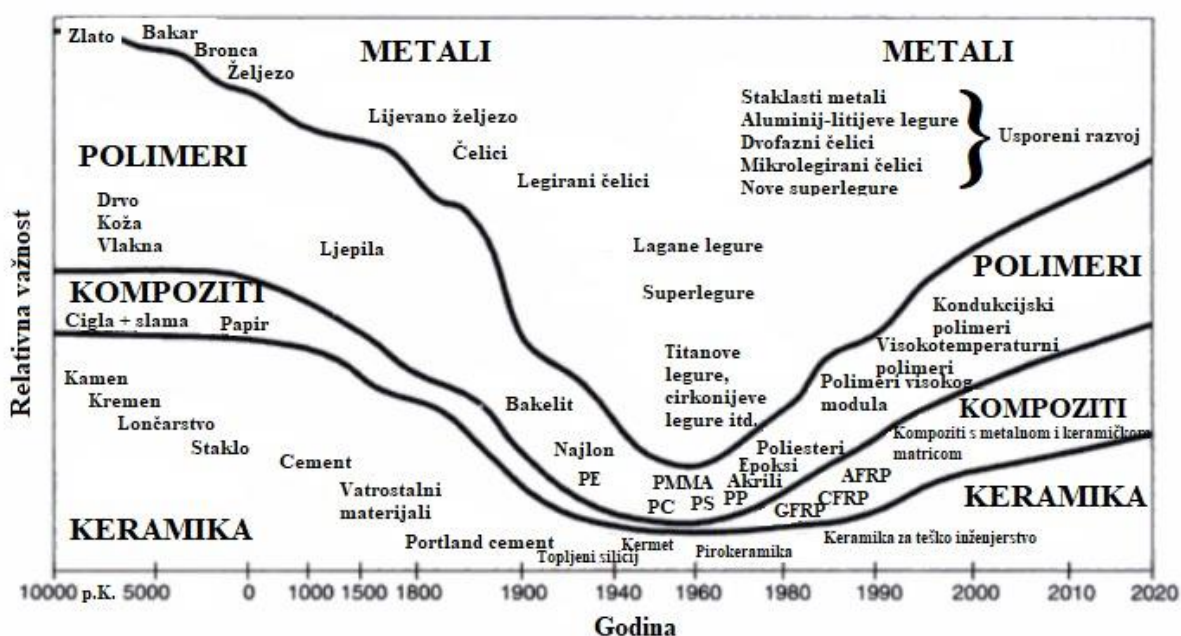
Ekološki zahtjevi na proizvođače automobila svake godine su sve stroži, što se može vidjeti sa slike 27. Zbog posljednjeg zahtjeva Europske unije da svaki novi automobil proizvodi manje od 95 g/km emisije CO<sub>2</sub> na primjer tvrtka Volkswagen iz Njemačke suočit će se s kaznom većom od 100 milijuna eura jer to nisu uspjeli postići s automobilima proizvedenima 2020.



Slika 27. Prikaz ekoloških zahtjeva pri proizvodnji automobila u Europi [16]

Da bi se riješio problem visoke emisije CO<sub>2</sub>, automobili bi trebali trošiti što manje goriva, a tu se javlja potreba za novim i lakšim materijalima od kojih su automobili sastavljeni, a kao najbolji nameće se polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima (CFRP). Iako se već duže vremena koriste pri izradi tzv. superautomobila, proizvodnja ugljičnih vlakana je skupa pa se iz toga razloga kompoziti koji sadrže ugljična vlakna još uvijek relativno malo koriste pri izradi automobila masovne proizvodnje.

Ugljična vlakna zbog svojih se svojstava sve više se koriste i u drugim granama industrije, pa je pretpostavka takva da će se u budućnosti više proizvoditi i da će napretkom tehnologije proizvodnje njihova cijena biti manja.



Slika 28. Prikaz evolucije materijala u strojarstvu i građevinarstvu [17]

Sa Slikom 28, iako nije riječ o prikazu materijala korištenih u automobilskoj industriji, može se zaključiti da se od 80-ih godina prošlog stoljeća različiti kompoziti sve više i više koriste, vrlo često u funkciji koja je nekad bila rezervirana za konvencionalne metale. Takav slučaj imamo i u automobilskoj industriji, a razvitkom tehnologije proizvodnje ugljičnih vlakana smatra se da će u skorijoj budućnosti polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima prevladati nad metalima. Pad cijene ključan je za takav razvoj događaja, a sa Slikom 29. možemo vidjeti da je cijena ugljičnih vlakana u padu posljednjeg desetljeća.



Slika 29. Prikaz porasta potrošnje i pada cijene ugljičnih vlakana [18]

#### 4.2. Polimeri ojačani ugljičnim vlaknima u superautomobilima

Kada je riječ o superautomobilima, prva njihova karakteristika koja dolazi u pitanje je najveća brzina koju mogu postići, a zatim koliko je vremena potrebno da takav automobil ubrza iz stanja mirovanja do 100 km/h. Svake godine proizvođači automobila natječu se tko će napraviti automobil koji će imati najveću brzinu i najbolje ubrzanje, odnosno automobil najboljih performansi. Mnogi kažu da je masa automobila neprijatelj svih performansi automobila, bilo benzinskih ili električnih i da će najbrži automobil napraviti onaj tko napravi automobil najmanje mase.

Upravo iz tog razloga polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima koriste se kao jedan od glavnih materijala izrade superautomobila posljednjih desetljeća.

U utrku izrade najbržeg automobila na svijetu 2016. godine uključila se i tvrtka Rimac Automobili d.o.o. iz Hrvatske, tako što je na automobilskom sajmu u Ženevi predstavila svoj model „Concept One“, najbrži proizvedeni električni automobil do tada, a već 2020. godine predstavila je drugi model naziva „C\_Two“. On još nije u prodaji jer mora proći homologacije, odnosno testiranja na sigurnost, ali najavljeno je da će novi model brzinu od 0 do 100 km/h moći postići za manje od 2 sekunde.





**Slika 30. Monokok karoserija automobila Rimac C\_Two napravljen od CFRP-a [19]**

„Monokok“ karoserija automobila je jednodijelna karoserija napravljena iz jednog komada bez ikakvih spojeva i kao takva nosivi je dio automobila. Rimčeva monokok-karoserija sa Slika 30. posebna je jer je prva monokok-karoserija od CFRP-a u svijetu u koju je integrirana baterija električnog automobila. [17]

Tvrtka McLaren u svoj najsnažniji model „Senna“ također je ugradila monokok-šasiju od CFRP-a. No nije samo šasija izrađena od CFRP-a: McLaren je u interijer svoje perjanice ugradio CFRP u cilju smanjenja mase ali i zbog njegovog atraktivnog izgleda, slika 31.



**Slika 31. Interijer McLaren Senne [20]**

### 4.3. Primjenjivost CFRP-a u automobilima masovne proizvodnje

Kao što je već navedeno, CFRP se još uvijek slabije koristi kao materijal izrade automobila masovne proizvodnje, ali se nalazi u pojedinim dijelovima, pogotovo kod onih skupljih automobila serijske proizvodnje.

U ovom poglavlju prikazano će biti gdje se sve do sada CFRP koristio u automobilima serijske proizvodnje, kao i usporedbu s istim tim dijelovima, ali izrađenima od konvencionalnih metala.

#### 4.3.1. Prvi automobil u kojem je CFRP primijenjen kao dio serijske proizvodnje

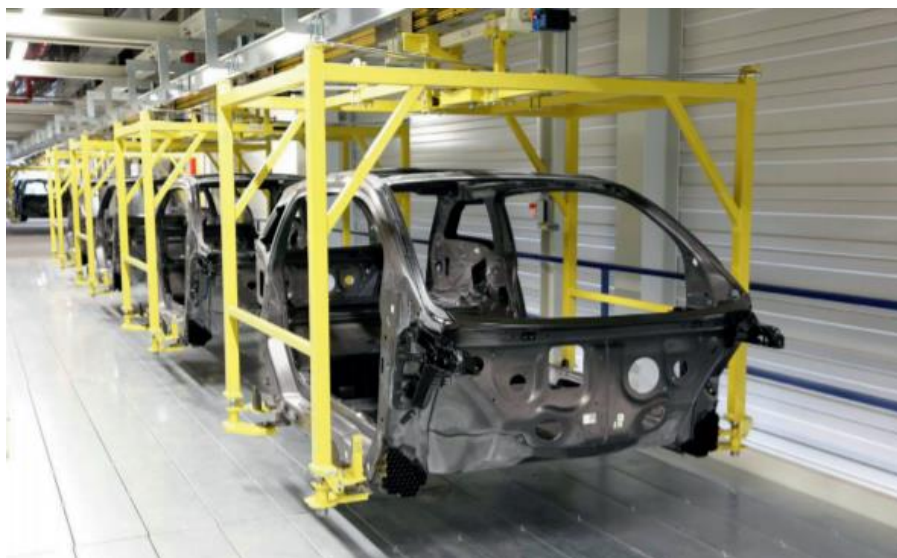
Gotovo svi današnji automobili proizvedeni su na način da više nemaju šasiju, na koju se u prošlosti stavljala karoserija, slika 32. Danas je karoserija sama nosivi dio automobila, a šasije se još uvijek koriste pri izradi kamiona i nekih superautomobila. Unatoč tome, BMW je 2013. godine svoj model „i3“ napravio po starom principu „šasija plus karoserija“.

Riječ je o konstrukciji dizajniranoj specifično za električne automobile, čija je baza napravljena od polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima (CFRP-a) fiksirana na aluminijsku šasiju. BMW je odlučio zadržati proizvodnju CFRP-a „unutar kuće“ pa su investirali velika financijska sredstva da bi to bilo moguće. Kako se ne bi morali oslanjati na vanjske dobavljače, sami su počeli s proizvodnjom ugljičnih vlakana, te su ušli u zajednički pothvat s proizvođačem ugljičnih vlakana, tvrtkom „SGL Carbon“ i počeli s proizvodnjom. [21]



Slika 32. Šasija i karoserija BMW i3 automobila [22]

BMW tvrdi da automatizacija procesa omogućava proizvodnju karoserija visoke kvalitete napravljenih od CFRP-a koja je i ekonomična. Automatizacija proizvodnje omogućila je da se troškovi proizvodnje karoserije od CFRP-a smanje za otprilike 50 %. [21]



**Slika 33. Automatizirana proizvodnja karoserije BMW i3 od CFRP-a u Leipzigu [21]**

BMW je svojim dostignućem pokazao da je implementacija CFRP-a u serijskoj proizvodnji moguća. Ovdje se radilo o električnom automobilu koji je i dalje bio dosta skup pa takva proizvodnja karoserije do danas nažalost nije zaživjela u proizvodnji jeftinijih automobila koji kao pogon koriste neku vrstu goriva. Međutim, CFRP se ipak počeo koristiti kao materijal nekih dijelova skupljih automobila serijske proizvodnje.

#### **4.3.2. CFRP kao materijal branika automobila**

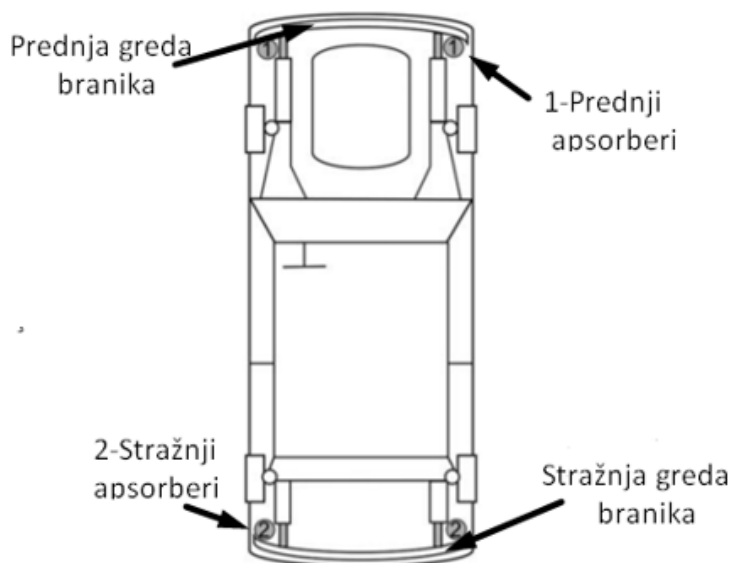
Materijal branika automobila od velike je važnosti ne samo iz razloga što je poželjno da bude što lakši, već da branik apsorbira što više energije, a to je bitno prilikom automobilskih nesreća. Postoje dvije vrste branika, prednji i stražnji. Mnogo bitniji od ta dva branika je prednji branik jer većina prometnih nesreća završi sa smrtnim posljedicama kada je riječ o frontalnom sudaru, o naletu na pješaka ili o slijetanju automobila s prometnice. U 100 % slučajeva prednji branik je prva dodirna točka kada je riječ o frontalnom sudaru i o nalijetanju na pješaka, dok je većinom prva dodirna točka i za druge vrste automobilskih nesreća.

Vrste prom.nesreća		2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.
Sudar vozila u pokretu	iz suprotnih smjerova	68	71	68	68	61	70	68	68	48	54
	bočni smjer	24	28	31	27	22	29	16	26	21	21
	u uspored. vožnji	1	3	-	3	3	3	1	2	1	2
	u vožnji u slijedu	23	18	15	12	13	10	16	13	14	17
	u vožnji unazad	1	-	1	-	-	3	-	1	0	0
<b>UKUPNO</b>	<b>117</b>	<b>120</b>	<b>115</b>	<b>110</b>	<b>99</b>	<b>115</b>	<b>101</b>	<b>110</b>	<b>84</b>	<b>94</b>	
Udar u parkirano vozilo		1	4	3	4	4	2	2	2	2	-
Slijetanje vozila s ceste		129	141	125	103	81	91	70	95	95	110
Nalet na bicikl		20	18	15	12	11	23	20	16	16	11
Nalet na pješaka		96	65	65	63	71	58	59	53	64	59
Nalet na motocikl ili moped		6	7	3	5	6	7	6	6	1	1
Sudar s vlakom		4	7	7	6	1	4	1	4	6	2
Udar voz. u objekt na cesti		5	2	4	1	-	3	1	2	5	1
Udar voz. u objekt kraj ces		8	13	9	10	5	6	12	14	14	13
Nalet na životinju		-	2	1	1	-	1	-	-	1	-
Ostalo		16	6	8	13	6	7	7	5	9	6
<b>SVEUKUPNO</b>		<b>402</b>	<b>385</b>	<b>355</b>	<b>328</b>	<b>284</b>	<b>317</b>	<b>279</b>	<b>307</b>	<b>297</b>	<b>297</b>

Slika 34. Broj stradalih ovisno o vrsti prometnih nesreća [23]

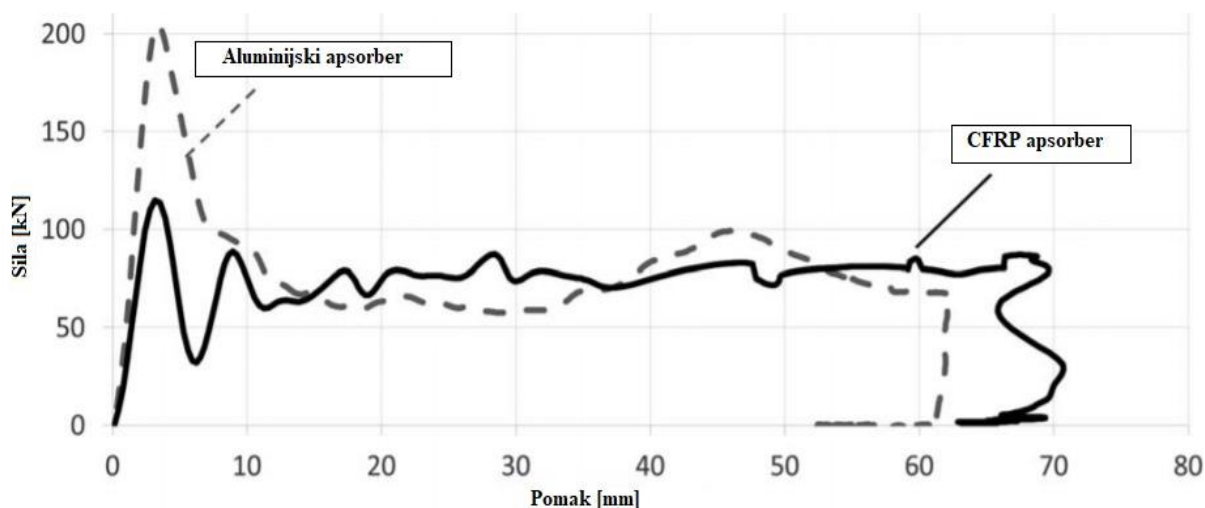
Sa slike 34. vidi se da se je broj prometnih nesreća svake godine u padu, ali i da se u više od 40 % nesreća sa smrtnom posljedicom u 2019. radilo o naletu na pješaka ili frontalnom sudaru. Više je poginulih bilo jedino u slijetanju vozila s ceste, što znači da je branik jedan od ključnih dijelova automobila koji bi trebao apsorbirati što više energije.

Struktura karoserije uobičajenog automobila uključuje prednje i stražnje branike koji imaju gredu, čija je funkcija da drži masku branika i apsorbere, ali da i ona sama apsorpira energiju. Apсорberi se ponašaju kao amortizeri opterećenja sudara. [24]



Slika 35. Dijelovi branika automobila [24]

Kako bi se vidjela usporedba između apsorbera od CFRP-a i aluminijskog apsorbera, koji je u širokoj primjeni, napravljeno je ispitivanje na način da je s 2,5 metara visine na svaki od apsorbera bačen teret mase 200 kilograma. Kao rezultat, dobiven je graf sile i pomaka (slika 36), iz kojeg se integracijom može izračunati apsorbirana energija. [24]



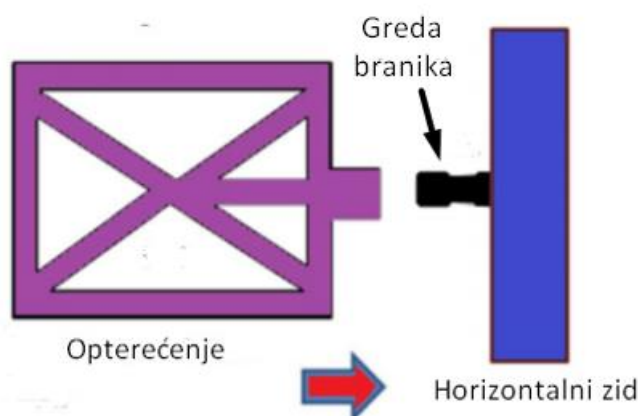
Slika 36. Graf apsorbirane energije: sila i pomak apsorbera [24]

Apsorberi napravljeni od aluminijskog i od CFRP-a u principu prikazuju slično ponašanje u grafu sila – pomak. Graf pokazuje da je krajnji pomak apsorbera od aluminijskog 62 mm, a od CFRP-a 72 mm. Kada se u obzir uzme taj krajnji pomak, te iz grafa integralom (površina ispod grafa) dobije ukupna energija za svaki materijal, izračunata srednja sila koja pritišće apsorbera za 14 % je manja kod apsorbera napravljenog od CFRP-a. Apsorberi su istih dimenzija, a razlika u masi je i više nego značajna: apsorber napravljen od CFRP-a lakši je čak za 44 %. [24]

Iz navedenog ispitivanja proizlazi zaključak da se implementacijom CFRP-a kao materijala apsorbera postižu bolji rezultati apsorbiranja energije, uz znatnu uštedu na masi. Takav apsorber već se koristi u nekim automobilima, ali zbog cijene ugljičnih vlakana još uvijek nije našao primjenu kod većine automobila.

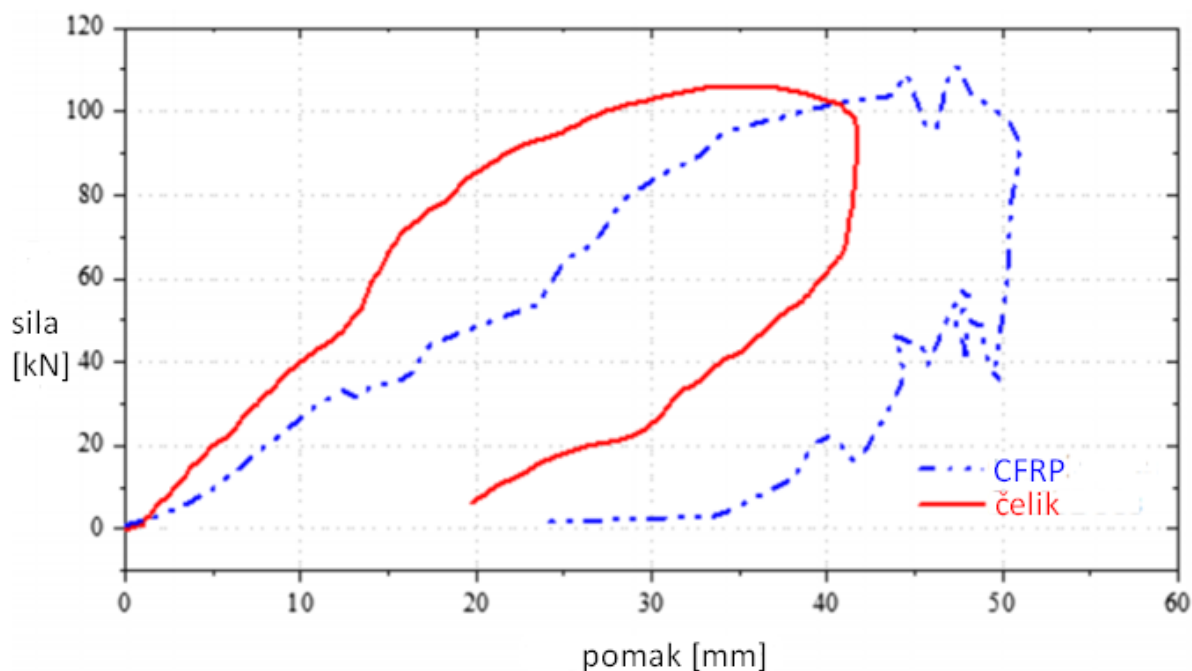
Nisu samo apsorberi ti koji prihvaćaju energiju sudara: dio energije prihvaća gređa branika pa je materijal njezine izrade također od velikog značaja za ishod automobilske nesreće.

Ispitivanje gređe branika napravljeno je na uzorcima napravljenih od čelika i CFRP-a. Model ispitivanja je u ovom slučaju drugačiji: gređe su postavljene na vertikalni zid, a u njih je horizontalnim gibanjem udarilo opterećenje mase 321,34 kg, brzinom od 4 m/s (14,4 km/h). [25]



Slika 37. Prikaz modela ispitivanja energije apsoriranja grede branika [25]

Kao rezultat opet je dobiveno slično ponašanje materijala (slika 38). Krajnja deformacija grede branika od CFRP-a je veća nego od metalne izvedbe grede, slično kao i u slučaju apsorbera. To je rezultat smičnog naprezanja kod loma grede od CFRP-a, što uzrokuje veću trajnu deformaciju, odnosno veći pomak udarnog elementa, što nije slučaj kod čelične grede. [25]



Slika 38. Graf apsorbirane sile i pomaka grede branika [25]

Površina ispod grafa sila – pomak prikazuje iznos apsorbirane energije, iz čega proizlazi da greda napravljena od CFRP-a apsorpira 17 % više energije nego ona čelična. [25]

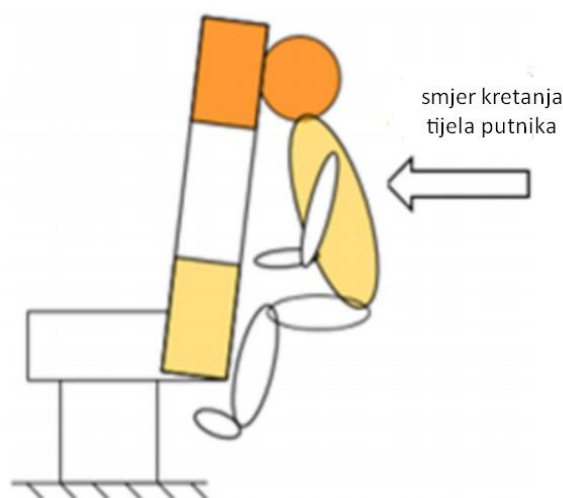
Iako nije eksplicitno navedeno u ispitivanju, s obzirom na to da su dimenzije greda iste, iz omjera gustoće može se izračunati da je ušteda na masi kada bi čeličnu gredu zamijenili gredom od CFRP-a otprilike 80 %, što je i više nego značajno. Ova procjena slijedi iz podataka o gustoći CFRP-a, koja se kreće se između 1500 i 1600 kg/m<sup>3</sup>, dok je gustoća čelika između 7800 i 8000 kg/m<sup>3</sup>.

Zaključak je takav da se primjenom CFRP-a za izradu grede branika i apsorbera umjesto konvencionalnih materijala, kao što su čelik i aluminij, postiže znatna ušteda na masi samog dijela, što je bitno u pogledu manje potrošnje goriva, ali se postiže i bolje svojstvo apsorpiranja energije, što je bitno u pogledu sigurnosti prilikom sudara.

Maske branika automobila vanjski su dio branika i kao takve vrlo često izložene su manjim oštećenjima. Iz toga razloga CFRP se ne koristi u njihovoj izradi zbog svoje visoke cijene i manje mogućnosti popravka u odnosu na konvencionalne polimere koji se danas većinom primjenjuju.

#### 4.3.3. CFRP kao materijal okvira sjedala automobila

Materijal sjedala automobila od velike je važnosti ne samo zbog udobnosti, dobrog položaja i osjećaja vozača u samoj vožnji, već i prilikom automobilske nesreće. Kada je riječ o automobilima sa zadnjim sjedištem, ako se prilikom same nesreće tamo nalazi putnik, važno je da prednje sjedalo upije što više energije ako je intenzitet nesreće velik toliko da taj putnik udari u prednje sjedalo s različitim dijelovima tijela. Daleko će manja ozljeda nastupiti ako je putnik vezan sigurnosnim pojasom, no to, nažalost, nije uvijek slučaj.



Slika 39. Kretanje stražnjeg putnika prilikom automobilske nesreće [26]

Do kontakta između prednjeg sjedala i putnika na stražnjem dijelu automobila može doći bio taj putnik vezan sigurnosnim pojasom ili ne, a to ovisi o razmaku između prednjeg i stražnjeg sjedala, o intenzitetu same nesreće, ali i o visini putnika.

Zbog svojih odličnih svojstava apsorpcije energije, CFRP se i u ovome slučaju nameće kao materijal od kojega se može napraviti okvir sjedala automobila. Jedan od tradicionalnih materijala okvira sjedala je čelik. Iz toga razloga napravljeno je ispitivanje u kojem se uspoređuje utjecaj sjedala od ta dva materijala na ozljede prilikom sudara. Usporedba je napravljena prema indeksima ozljede glave, prsa i prema silama opterećenja na noge lutke koja je korištena pri testiranju. [26]

**Tablica 3. Utjecaj materijala sjedala na faktore ozljeda [26]**

Materijal	HIC	ThAC, g	FAC, kN
Čelik	696	29,6	9,2
CFRP	321	26,7	5,7

Kratice označavaju [26]:

- HIC – indeks ozljede glave
- ThAC – indeks ozljede prsnog koša
- FAC – silu opterećenja na noge.

Iz Tablica 3. saznajemo da sjedalo napravljeno od CFRP-a daje znatno bolje rezultate kada se radi o sigurnosti putnika na zadnjem sjedištu. Rezultati kažu da je indeks ozljede glave manji za više od 50 %, ozljede prsnog koša su neznatno manje, a opterećenje na noge 35 % je manje kod sjedala napravljenog od CFRP-a. Što se tiče uštede na masi okvira sjedala, ona bi korištenjem CFRP-a umjesto čelika mogla biti više od 50 %. [26]

Okviri sjedala napravljeni od CFRP-a zbog visoke cijene ugljičnih vlakana trenutno se koriste samo u proizvodnji skupocjenih sportskih automobila zbog uštede na masi te zbog boljih sigurnosnih uvjeta koji pružaju u odnosu na konvencionalne materijale, ali i zbog atraktivnog izgleda samih ugljičnih vlakana (slika 40).





Slika 40. Okvir sjedala BMW-a M4 G82 napravljen od CFRP-a [27]

## 5. RECIKLIRANJE POLIMERNIH KOMPOZITA OJAČANIH UGLJIČNIM VLAKNIMA

Globalna potražnja za CFRP-om naglo raste zbog njegove široke primjene i u drugim granama industrije pored automobilske kao što: zrakoplovna industrija, vojna industrija, medicina, sport itd. Taj kompozitni materijal zbog svojih svojstava može se primjenjivati kao zamjena konvencionalnima gdje god postoji potreba za smanjenjem mase, ali i za poboljšanjem nekih svojstava. Osim potražnje, jednako raste i količina otpada od CFRP-a, a veliki dio tog otpada nastane prilikom same proizvodnje nekog proizvoda od CFRP-a zbog postupaka njegova oblikovanja. Na početku taj otpad zbrinjavao se na način da se odlagao na odlagališta ili se spaljivao, no takve metode zbrinjavanja vrlo brzo su dovele do sve veće svjesnosti oko zagađenja okoliša što je rezultiralo potrebom za novim održivim metodama zbrinjavanja kako bi se preveniralo kumuliranje otpada. Potreba za recikliranjem nastaje ne samo iz ekoloških razloga, nego i iz ekonomskih razloga. Zbog visokih troškova proizvodnje ugljičnih vlakana, cilj je veća iskoristivost materijala, a time i veća profitabilnost.

### 5.1. Postupci recikliranja CFRP-a

Oporaba (engl. *Recovery*) „otpada je svaki postupak čiji je glavni rezultat uporaba otpada u korisne svrhe kada otpad zamjenjuje druge materijale koje bi inače trebalo uporabiti za tu svrhu“. [28] Ovisno o produktima, razlikujemo energijsku, materijalnu i kemijsku oporabu te biorazgradnju. Recikliranje ili materijalna oporaba podrazumijeva postupke kojima se dobivaju ponovo upotrebljivi materijali. Slično tome, energijskom oporabom iz otpada dobivamo energiju, a kemijskom oporabom iskoristive kemijske tvari.

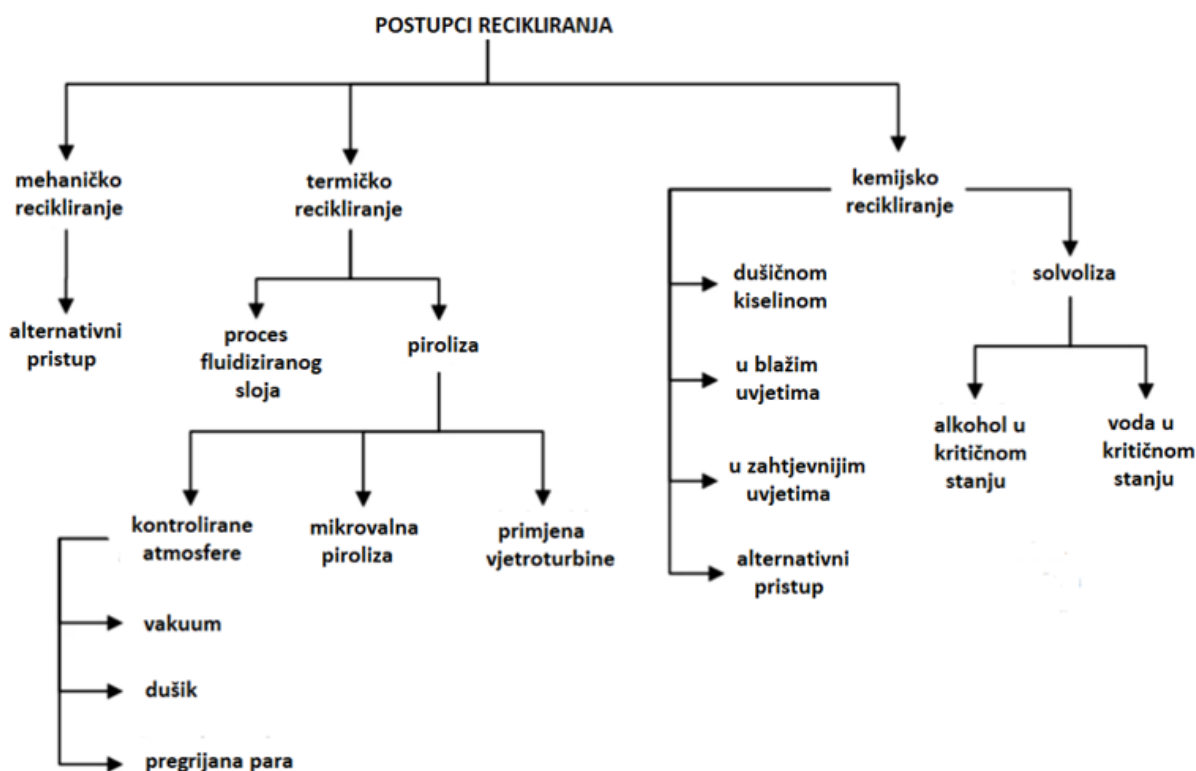
Prema Zakonu o održivom gospodarenju otpadom, „recikliranje je svaki postupak oporabe, uključujući ponovnu preradu organskog materijala, kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu osim uporabe otpada u energetske svrhe, odnosno prerade u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za zatrpavanje“. [28]

#### 5.1.1. Mehaničko recikliranje

Mehaničko recikliranje uključuje smanjenje veličine i/ili pulverizaciju (pretvaranje u prah) mljevenjem ili drobljenjem. Ovaj proces recikliranja obično zahtjeva dvije faze. Prva faza sadrži redukciju na veličinu 50 do 100 mm sporim rezanjem ili korištenjem mlina za drobljenje,

dok drugu fazu čini redukciju na 10-50 mm korištenjem mlinova velikih brzina ili udarnog mlina. Nakon usitnjavanja, materijali se prosijavaju. Ova metoda se rjeđe koristi za recikliranje CFRP-a zato što nastali reciklat imaju znatno lošija mehanička svojstva nego prvobitni CFRP i taj se proces češće koristi kod recikliranja staklom ojačanih polimernih kompozita. [30]

Alternativna metoda uključuje proces u kojoj se redukcija veličine postiže korištenjem struje velikih napona. Jedna takva metoda je elektrodinamička fragmentacija (EDF, engl. *Electro dynamic fragmentation*), u kojoj se puls visokog napona (između 50 i 200 kV) pušta kroz ioniziranu kupku u kojoj se nalazi CFRP materijal. Tim procesom dobivaju se čista i dugačka vlakna i zbog toga je alternativa mehaničkom recikliranju. Nedostatak ovog procesa je gubitak mase materijala i smanjeno uklanjanje smole. [29]



Slika 41. Postupci recikliranja i uporabe [29]

### 5.1.2. Energijska uporaba

Obrada otpada uz upotrebu toplinske energije naziva se energijska uporaba. Oporaba uključuje više različitih postupaka, gdje je toplina iskorištena kako bi razdvojila kompozit na

konstituente. Najčešće korišteni postupci uporabe CFRP-a su piroliza i izgaranje u fluidiziranom sloju.

Piroliza je proces recikliranja CFRP-a i općenito kompozita ojačanim vlaknima gdje se kompozitni otpad zagrijava u odsutnosti kisika, što rezultira degradacijom polimerne matrice u stanje plina i tekućina. Temperature procesa su između 400 i 700 °C, ovisno o strukturi kompozita. Ovom metodom rekuperiraju se vlakna sa zadržanim visokim vrijednostima mehaničkih svojstava i zbog toga je ova metoda često primjenjiva. Kao i svaka druga metoda, piroliza ima neke nedostatke poput pojave zaostale čađe na vlaknima, koja može utjecati na mehanička svojstva recikliranih vlakana, no postoje naknadni postupci otapanja kojima se čađa može ukloniti. [29]

Postupak izgaranja u fluidiziranom sloju je postupak recikliranja CFRP-a, gdje brza struja vrućeg zraka prolazi kroz sloj silikatnog pijeska kako bi razgradio kompozit. Koristi se tanki sloj silikatnog pijeska, koji se fluidizira tako što kroz njega prolazi vrući zrak temperature 450 do 550 °C. Unutar fluidiziranog sloja sitni dijelovi kompozita se odvajaju na vlakna i matricu, koje ista ta struja vrućeg zraka iznosi kao zasebne čestice. Nakon toga, u drugoj komori temperature 1000 °C polimerne čestice oksidiraju i vlakna se razdvajaju. Proces se koristi za recikliranje i ugljičnih i staklenih vlakana. [29]

Ova dva procesa energijske uporabe zahtijevaju prethodno usitnjavanje kompozita na manje dijelove te su najčešći procesi korišteni za recikliranje CFRP-a.

### **5.1.3. Kemijska uporaba**

Kemijska uporaba, uključuje procese u kojima dolazi do raspada polimerne matrice kompozitnog otpada zbog djelovanja kiselina, baza ili otapala. Kiseline i otapala odabiru se prema materijalu matrice, a sam kompozitni otpad je prije toga mehanički reduciran na određenu veličinu. Nakon što je matrica otopljena, reciklirana vlakna treba oprati kako bi se uklonio nastali talog. Vlakna nakon kemijske uporabe ostaju velike duljine (ovisno o dimenzijama na koje smo otpad prethodno usitnili) i dobrih su mehaničkih svojstava. U modernom kemijskom recikliranju uklanjanje polimerne matrice s otpadnog kompozita postiže se solvolizom i hidrolizom. Gdje god se to može postići, nastoji se koristiti hidroliza jer se kompozitni otpad otapa u vodi, a ne u nekom agresivnom otapalu, kako ne bi bilo štetnog utjecaja na okoliš. [29]

Iako postoji više metoda kojima se CFRP reciklira, nijednom metodom ne može se postići da ugljična vlakna nakon recikliranja imaju ista svojstva kao što imaju u prvobitnom stanju, tj. uporabna svojstva vlakana se recikliranjem smanjuju. To se događa prije svega jer se duljina ugljičnih vlakana smanji, ali i samo poravnanje vlakana više nije isto. [31]

**Tablica 4. Usporedba svojstava materijala prije i nakon recikliranja pirolizom [31]**

Materijal	Modul elastičnosti, GPa	Čvrstoća, MPa	Istezljivost, %
CFRP s novim vlaknima	65,9	731	1,11
CFRP s recikliranim vlaknima	52,0	614	0,89
CFRP s dvaput recikliranim vlaknima	40,4	279	0,52

U Tablica 4. vidljivo je da se već nakon prvog recikliranja svojstva CFRP-a smanjuju. Već nakon drugog recikliranja vlakana, modul elastičnosti kompozita s recikliranim vlaknima smanjuje se za 17 % dok se čvrstoća smanjuje za više od 55 %.

Recikliranje CFRP-a važan je korak bitan za ostvarivanje ciljeva održivog razvoja koji vodi postizanju čiste i održive energije, ali drugih ciljeva koji se tiču očuvanja okoliša.

## 6. ZAKLJUČAK

Neki od Ciljeva održivog razvoja koje su Ujedinjeni narodi predstavili su pristupačna i čista energija, odgovorna potrošnja i proizvodnja te odgovor na klimatske promjene. U funkciji tih ciljeva automobilska industrija sve više u proizvodnji koristi polimerne kompozite ojačane ugljični vlaknima. Svojstva poput visoke čvrstoće i krutosti te niska gustoća materijala omogućavaju izradu automobila manje mase kako bi se smanjila potrošnja goriva, a time i za okoliš štetna emisija ugljikovog dioksida. Potvrđeno je da dijelovi automobila od kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima daju bolja ili gotovo ista svojstva u odnosu na konvencionalne metale poput čelika i aluminija, uz znatnu uštedu na masi. Takvi kompoziti svoju primjenu već duže vremena imaju u izradi superautomobila, ali i u izradi dijelova serijski proizvedenih automobila koji su izrazito skupi. Najveći nedostatak takvih kompozita je cijena njihove proizvodnje, no napretkom tehnologije i masovnijom proizvodnjom smatra se da će cijena proizvodnje pasti, što se i dogodilo u posljednjem desetljeću. Visoka cijena ugljičnih vlakana, ali i ekološki zahtjevi za smanjenjem potrošnje sirovina i za smanjenjem odlaganja otpada, kao rješenje nameću recikliranje takvih kompozita. To omogućuje i veću iskoristivost jer pri samoj proizvodnji polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima nastane i do 30 % otpada, ali i veću brigu za okoliš jer tada dolazi do manje potrebe za spaljivanjem ili odlaganjem.

## LITERATURA

- [1] Dobrovoljni nacionalni pregled o provedbi Programa UN-a za održivi razvoj 2030., Vlada Republike Hrvatske, <https://www.hgk.hr/documents/dobrovoljni-nacionalni-pregled-ciljevi-odrzivog-razvoja-hrvatska5d2daef212fdc.pdf> (5. 1. 2021.)
- [2] Gudelj I. Ciljevi održivog razvoja - provedba na globalnoj razini i provedbeni status u Republici Hrvatskoj. *Hrvatske vode*. 2019; 27(109):245-251
- [3] CO2 emissions from cars\_ facts and figures (infographics), News - European Parliament, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics> (5. 1. 2021.)
- [4] Reducing CO2 emissions from passenger cars - before 2020, Climate Action, [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en) (6. 1. 2021.)
- [5] Podloge za predavanja iz kolegija „Materijali 2“, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1590438804-0-mat2\\_kompozitnimaterijali2020\\_p3.pptx](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1590438804-0-mat2_kompozitnimaterijali2020_p3.pptx) (10. 1. 2021.)
- [6] Friedrich K, Almajid A A. Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Applied Composite Materials*, 2013;20:107-128. doi 10.1007/s10443-012-9258-7
- [7] Thori P, Sharma P, Bhargava M. An approach of composite materials in industrial machinery: advantages, disadvantages and applications. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013 Dec;2(12):350-355
- [8] Ćorić D, Filetin T. Materijali u zrakoplovstvu. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2012.
- [9] Podloge za predavanja iz kolegija „Materijali 2“, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/?action=view&site\\_id=43&id=6619](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=43&id=6619) (10. 1. 2021.)
- [10] Filetin T, Marić G. Postupci proizvodnje metalnih i keramičkih kompozita, podloge za predavanja iz kolegija „Napredne tehnologije materijala“, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426605056-0-pred7.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426605056-0-pred7.pdf) (12. 1. 2020.)
- [11] Zašto su karbon-keramičke kočnice toliko skupe, Quattroruote Hrvatska, <https://quattroruote.hr/tech/zasto-su-karbon-keramicke-kocnice-toliko-skupe/> (12. 1. 2021.)
- [12] Milardović G. Kompoziti u automobilskoj industriji. *Polimeri: časopis za plastiku i gumu*. 2011;32(3-4): 139-142

- [13] Oxyblack - Laminates & Sandwiches, <https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites/laminates-sandwiches> (15. 1. 2021.)
- [14] Filetin T. Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju; 2000.
- [15] Špoljar M, Maja Rujnić-Sokele M. Plastični kompoziti u automobilima. *Polimeri: časopis za plastiku i gumu*. 2015;36(1-2):27-33
- [16] UK passes EU new car CO2 emissions landmark – SMMT, <https://www.smmt.co.uk/2014/03/uk-passes-eu-new-car-co2-emissions-landmark/> (15. 1. 2021.)
- [17] Tomas Astrom B. Manufacturing of Polymer Composites. London: Taylor & Francis Group; 1997.
- [18] Shama Rao N, Simha TGA, Rao KP, Ravi Kumar GVV. Carbon composites are becoming competitive and cost effective, <https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/documents/carbon-composites-cost-effective.pdf> (15. 1. 2021.)
- [19] Petrány M. What Makes Rimac's Carbon Fiber Monocoque Unique, <https://www.roadandtrack.com/new-cars/car-technology/a26885102/what-makes-rimacs-carbon-fiber-monocoque-unique/> (17. 1. 2021.)
- [20] McLaren Senna revealed – pictures, Evo, <https://www.evo.co.uk/mclaren/20490/mclaren-senna-revealed-pictures> (17. 1. 2021.)
- [21] Jacob J. Carbon fibre and cars – 2013 in review. *Reinforced Plastics*. 2014;58(1):18-19. doi 10.1016/S0034-3617(14)70036-0
- [22] BMW i3 chassis, <https://www.pinterest.cl/pin/365987907214362601/> (18. 1. 2021.)
- [23] Bilten\_promet\_2019, [https://mup.gov.hr/UserDocsImages/statistika/2020/Pokazatelji%20javne%20sigurnosti/bilten\\_promet\\_2019.pdf](https://mup.gov.hr/UserDocsImages/statistika/2020/Pokazatelji%20javne%20sigurnosti/bilten_promet_2019.pdf) (19.1.2021.)
- [24] Makinejad MD, Sapuan SM, Yunus R. Conceptual design of a polymer Composite automotive bumper energy absorber. *Materials & Design*. 2008;29(7):1447-1452. doi 10.1016/j.matdes.2007.07.011
- [25] Szlosarek R, Bombis F, Mühler M, Kröger M, Karall T: Development of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) crash absorbers with stable crushing behaviour considering the connection to the bumper system. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2016;47(11):1099–1108. doi 10.1002/mawe.201600634



- [26] Zhang J, Chen J, Li Z, Ji M, Sang T. Optimisation design of CFRP passenger car seat backplane based on impact characteristics. *International Journal of Crashworthiness*, 2020;1-13. doi: 10.1080/13588265.2020.1717919
- [27] A Closer Look at the New M3 And M4 Carbon Fiber Bucket Seats – autoevolution, <https://www.autoevolution.com/news/a-closer-look-at-the-new-m3-and-m4-carbon-fiber-bucket-seats-149653.html#> (22. 1. 2021.)
- [28] Zakon o održivom gospodarenju otpadom, Narodne novine 94/2013, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013\\_07\\_94\\_2123.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_07_94_2123.html) (22. 1. 2021.)
- [29] Gopalraj SK, Karki T. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycles analysis, *SN Applied Sciences*. 2020;2(433). doi. 10.1007/s42452-020-2195-4
- [30] Anane-Fenin K, Akinlabi E. Recycling of Fibre Reinforced Composites: A Review of Current Technologies. DII–2017 4th International Conference on Development and Investment in Infrastructure - Strategies for Africa 2017, October 2017
- [31] Longana ML, Ong N, Yu HN, Potter KD. Multiple closed loop recycling of carbon fibre composites with the HiPerDiF method, *Composite Structures*. 2016;153:271-277. doi. 10.1016/j.compstruct.2016.06.018

## **PRILOZI**

### I. Optički disk