

Primjena vlaknima ojačanih polimera u graditeljstvu

Kokorović, Matea

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:272947>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Matea Kokorović

PRIMJENA VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERA U GRADITELJSTVU

Završni rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni preddiplomski studij
Inženjerski materijali**

**Matea Kokorović
JMBAG: 0114029669**

PRIMJENA VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERA U GRADITELJSTVU

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstvo
Znanstveno područje/područja: Tehničke znanosti
Znanstveno polje/polja: Temeljne tehničke znanosti
Znanstvena grana/grane: Materijali

Tema završnog rada
Primjena vlaknima ojačanih polimera u graditeljstvu
Application of fiber reinforced polymers (FRP) in civil engineering

Kandidat: **MATEA KOKORVIĆ**

Kolegij: **Inženjerski materijali**

Završni rad broj: _____

Zadatak:

Zadatak kandidatkinje je pisati slijedeće:

- polimerni materijali (razvoj, klasifikacija, proizvodnja, osnovne značajke)
- kompozitni materijali (razvoj, klasifikacija, proizvodnja, osnovne značajke)
- vlaknima ojačani kompoziti (razvoj, klasifikacija, proizvodnja, svojstva, primjena)
- polimerni materijali ojačani vlaknima
- klasifikacija polimernih materijala ojačanih vlaknima
- proizvodnja polimernih materijala ojačanih vlaknima
- svojstva polimernih materijala ojačanih vlaknima (mehanička i nemehanička svojstva)
- primjena polimernih materijala ojačanih vlaknima u građevinarstvu (naglasak na primjenu FRP-a u betonskim i zidanim konstrukcijama)
- primjeri primjene polimernih materijala ojačanih vlaknima u građevinarstvu iz prakse
- zaključak

Tema rada je uručena: 21.3.2020. Mentor:

Doc. dr. sc. Natalija Bede

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Matea Kokorović

U Rijeci, 19. svibnja 2020.

SAŽETAK:

Zbog svojih izuzetno dobrih svojstava i praktičnosti primjene, vlaknima ojačani polimeri se koriste prvenstveno za sanaciju, ojačanje i obnovu postojećih betonskih konstrukcija. Današnjom modernom tehnologijom proširila se primjena polimera u svijetu pa se tako mogu koristiti i kao izolacije, premazi, ljepila, podne i zidne obloge, ali i za prozore, vrata te za zidne i krovne elemente.

Cilj ovog završnog rada je upoznavanje s polimernim i kompozitnim materijalima, te njihovim osnovnim načinima proizvodnje. Nadalje, dana je podjela kompozitnih materijala s obzirom na vrstu matrice i ojačanja. Najviše pažnje je posvećeno polimernim kompozitima ojačanim vlaknima te njihovim svojstvima i primjeni u graditeljstvu.

KLJUČNE RIJEČI: polimeri, kompoziti, vlaknima ojačani polimeri, građevinarstvo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POLIMERNI MATERIJALI	2
2.1. Povijesni razvoj.....	2
2.2. Klasifikacija	2
2.3. Proizvodnja	3
3. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	4
3.1. Povijesni razvoj.....	4
3.2. Klasifikacija	5
3.3. Proizvodnja	6
4. VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI.....	7
4.1. Povijesni razvoj.....	7
4.2. Klasifikacija vlaknima ojačanih kompozita.....	8
4.3. Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita.....	9
4.4. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita	10
4.5. Primjena vlaknima ojačanih kompozita.....	11
5. POLIMERNI MATERIJALI OJAČANI VLAKNIMA	12
5.1. Klasifikacija polimernih materijala ojačanih vlaknima.....	12
5.1.1. Polimeri ojačani staklenim vlaknima	12
5.1.2. Polimeri ojačani ugljičnim vlaknima	14
5.1.3. Polimeri ojačani aramidnim vlaknima.....	15
5.2. Proizvodnja polimernih materijala ojačanih vlaknima.....	16
5.2.1. Kontinuirani postupci preoblikovanja.....	16
5.2.2. Ciklički postupci praoblikovanja.....	19
5.3. Svojstva polimernih materijala ojačanih vlaknima	23
5.4. Primjena polimernih materijala ojačanih vlaknima u građevinarstvu	25
5.5. Primjeri primjene polimernih materijala ojačanih vlaknima u građevinarstvu	29
5.5.1. Sanacija.....	29
5.5.2. Popravak i učvršćivanje konstrukcija	32
6. ZAKLJUČAK.....	34
7. LITERATURA	35

POPIS OZNAKA I KRATICA

Kratika	Opis
FRP (eng. fibre reinforced polymer)	vlaknima ojačan polimer
PPCB	polimerni portland cementni beton
PB	polimerni beton
PIB	polimerom impregnirani beton
MAB	mikro-armirani beton

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1: Podjela kompozita ojačanih vlaknima ovisno o vrsti matrice [10]</i>	<i>5</i>
<i>Tablica 2: Vrijednosti svojstava različitih vrsta staklenih vlakana [6].....</i>	<i>13</i>
<i>Tablica 3: Svojstva aramidnih vlakana [32]</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 4: Ostale primjene FRP kompozita u građevinarstvu [15]</i>	<i>28</i>

POPIS SLIKA

Slika 1: Udjeli korištenih polimera u svijetu 2002. godine [27]	3
Slika 2: Mongolski kompozitni luk [14]	4
Slika 3: Matrice i pojačanja polimernih kompozita [10]	5
Slika 4: Stakloplastika [31]	7
Slika 5: Staklena vlakna [31]	7
Slika 6: Aramidna vlakna [16]	7
Slika 7: Ugljična vlakna [16]	7
Slika 8: Dijagram `naprezanje-istezanje` različitih vrsta vlakana [23]	8
Slika 9: Utjecaj duljine vlakana na čvrstoću kompozita [30]	9
Slika 10: Položaj vlakana u matrici [14]	9
Slika 11: Postupci proizvodnje kompozita [1]	10
Slika 12: Dijagram `naprezanje-istezanje` kompozita ojačanih vlaknima [23]	11
Slika 13: Filamenti staklenih vlakana [31]	12
Slika 14: Roving ugljičnih vlakana 600 g/m ² [28]	14
Slika 15: Postupci prerade polimera[1]	16
Slika 16: Raspored i broj valjaka u kalandru [1]	17
Slika 17: Postrojenje za prevlačenje [1]	17
Slika 18: Shematski prikaz ekstrudera [1]	18
Slika 19: Prikaz lijevanja kapljevitog polimera [1]	19
Slika 20: Shematski prikaz uređaja za injekcijsko prešanje s pužnim vijkom [1]	20
Slika 21: Postupak toplog oblikovanja skošavanjem [1]	21
Slika 22: Postupak injekcijskog puhanja [1]	22
Slika 23: Ispitivanje uzorka na rastezljivost [33]	23
Slika 24: Rezultati ispitivanja na rastezljivost [33]	23
Slika 25: Ispitivanje uzorka na savijanje [33]	23
Slika 26: Rezultat ispitivanja na savijanje [33]	23
Slika 27: Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita [25]	24
Slika 28: Modificirani i nemodificirani beton [23]	26
Slika 29: Impregnirani i neimpregnirani dio betona [23]	26
Slika 30: Polimerni beton [23]	27
Slika 31: Mikro-armirani beton [23]	27
Slika 32 i 33: Montiranje okvira ojačanja prostorne konstrukcije [34]	30
Slika 33: McKinley Tower [35]	30
Slika 34 i 35: QuakeWrp FRP Retrofit sustav [35]	31
Slika 36: Popunjavanje pukotina FRP-om [3]	32
Slika 37: Primjena FRP-a na drvenoj krovnoj konstrukciji [36]	32
Slika 38: Prvi kompozitni most, Abereldy, Škotska [37]	33
Slika 39: Second Severn Bridge, UK [38]	33
Slika 40: Buehl-Balzhofen Bridge, Njemačka [38]	33

1. UVOD

Čovjek je tisućama godina unatrag koristio prirodne polimere, sve dok nije ustanovio da ih može sam proizvoditi. U počecima samostalne proizvodnje to su bili polimeri s relativno lošim svojstvima, odnosno slabi i savitljivi čija se krutost ne može mjeriti u odnosu na drvo, metal ili kosti. Krutost drva i kosti je veća jer su to zapravo kompoziti koji se sastoje od vlakana ugrađenih u polimernu matricu [2].

Danas, raznim tehnološkim procesima i postupcima moguće je proizvesti polimere zadovoljavajućih svojstava za njihovu široku primjenu. Kako bi dobili što bolja svojstva polimernih materijala, produljenje vijeka trajanja proizvoda, te smanjenje cijene, polimeru se dodaju razni dodaci – ojačala. Ojačala mogu biti vlakna različite vrste kao što su staklena, ugljična, aramidna, ovisno o željenim svojstvima.

Polimeri ojačani vlaknima su znatno žilaviji i čvršći, međutim oni su uglavnom anizotropni pa se njihova svojstva mijenjaju s promjenom temperature [2].

Polimerni materijali obuhvaćaju različite materijale poput plastike, ljepila, guma pa se tako primjenjuju za izradu konstrukcijskih i dekorativnih dijelova, ljepila, boja, automobilskih guma, igračaka. Značajnu ulogu imaju i u građevinarstvu gdje se koriste kao ojačanja betona, izolacije, premazi, za obnove, sanacije i rekonstrukcije starih objekata, te su vrlo korisni kod gradnje mostova.

2. POLIMERNI MATERIJALI

Polimerni materijali ubrajaju se među najvažnije tehničke materijale današnjice, a u njih se ubrajaju svi prirodni i sintetički materijali formirani od organskih makromolekula dobiveni uspostavljanjem kemijskih veza jednostavnijih molekula – monomera. Sam naziv polimer potječe od grčke riječi poly – mnogo i meros – čestica [22].

2.1. Povijesni razvoj

Jednim od najranijih i najvažnijih radova u razvoju polimera se smatra derivat celuloznih spojeva koje je 1811. godine napravio Henri Braconnot. Tridesetak godina kasnije, točnije 1845. godine Cristian Schonbein, njemački kemičar razvija nitrocelulozu iz mješavine pamuka, sumporne i dušične kiseline, koja se primarno koristila za proizvodnju eksploziva. Alexander Parkes, 1855. godine počinje proizvoditi dugmad, olovke, medaljone i češljeve pomoću parkeza – mješavine nitroceluloze i kamfora. Početkom sljedećeg stoljeća, 1907. godine Leo Baekeland stvara prvi sintetski polimer-bakelit, dobiven reakcijom formaldehida i fenola.

Iako postoje saznanja D. Stoilkovića da je još u 18. stoljeću, hrvatski znanstvenik Ruđer Bošković predvidio postojanje makromolekula, u stvarnosti se vjeruje da je Hermann Štaudinger prvi tvorac hipoteze o postojanju makromolekula (polimera), koja je predstavljena 1920. godine i zahvaljujući kojoj je H. Štaudinger dobio Nobelovu nagradu 1953. godine.

Paul Flory također dobiva Nobelovu nagradu za kemiju 1974. godine, čiji je rad na polimerima uključivao kinetiku stupnjevite reakcije lančane polimerizacije [16].

2.2. Klasifikacija

Polimeri se dijele na temelju različitih kriterija. Prema nastanku polimeri mogu biti sintetički i prirodni, a po kemijskom sastavu homogeni i kompozitni.

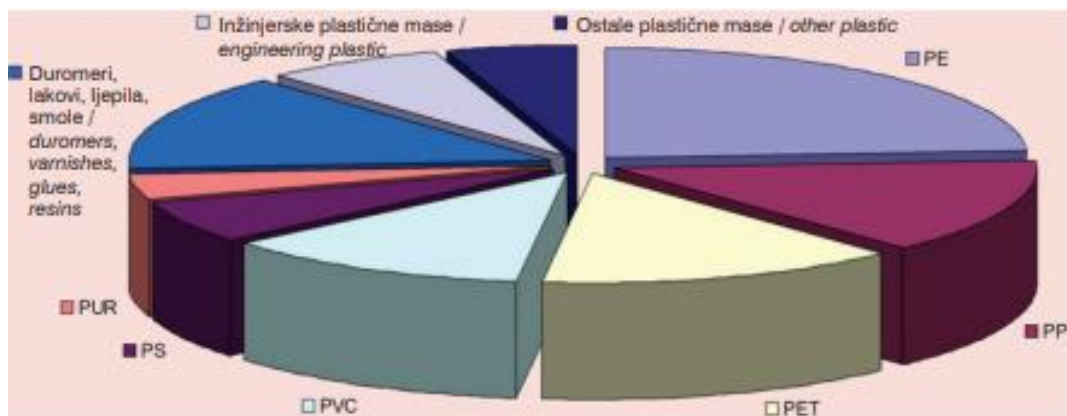
Prema najpoznatijoj podjeli polimernih materijala koja se temelji na njihovom ponašanju pri povišenoj temperaturi, razlikujemo plastomere, elastomere i duromere.

2.3. Proizvodnja

Prirodni polimeri se proizvode od prirodnih organskih materijala životinjskog i biljnog podrijetla. U njih se ubrajaju drvo, papir, koža, pamuk, guma, vuna, svila, prirodne smole, biljna i životinjska vlakna.

Sintetički polimeri se dobivaju kemijskim reakcijama polimerizacijom i vulkanizacijom. Polimerizacija je kemijska reakcija kojom se velika količina monomera povezuje kovalentnim vezama u polimere, dok se kod vulkanizacije pojedine polimerske molekule povezuju s drugim molekulama, pri čemu je krajnji rezultat guma.

Primjena polimera je raznolika pa se tako oni mogu upotrebljavati u industrijskoj proizvodnji, poljoprivredi, automobilskoj industriji, elektroindustriji, građevinarstvu (Slika 1).



Slika 1: Udjeli korištenih polimera u svijetu 2002. godine [27]

Osnovne karakteristike polimera su :

- mala gustoća i čvrstoća
- vodonepropusnost
- jednostavno oblikovanje
- otpornost prema koroziji i truljenju
- dobra izolacija zvuka, topline i električne energije
- promjena mehaničkih svojstava pri promjeni temperature
- biološka nerazgradivost

3. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijal je materijal koji sadrži dvije ili više komponente različitih fizičko-mehaničkih svojstava koje su međusobno čvrsto povezane [20]. Cilj međusobnog povezivanja komponenti je dobivanje sasvim novog materijala s potpuno novim svojstvima kakva ne posjeduje niti jedna komponenta pojedinačno. Na taj način se mogu postići neobične kombinacije svojstava kao što su krutost, čvrstoća, tvrdoća, masa, toplinska postojanost, električna ili toplinska vodljivost [6].

3.1. Povijesni razvoj

Prva upotreba kompozitnih materijala potječe još iz 3400. godine pr. n. e. kad su u Mezopotamiji nastali prvi oblici današnjih šperploča. U drevnom Egiptu, kompozitni materijali počinju se koristiti nešto kasnije, odnosno 1500. godine pr. n. e., kada naseljenici Egipta miješajući blato i slamu dobivaju opeku za gradnju čvrstih i izdržljivih građevina. Kasnije, oko 1200. godine pr. n. e. Mongoli su izradili prvi kompozitni luk koristeći drvo, životinjske kosti, rogove, debla breze i bambusa te svilu (Slika 2).



Slika 2: Mongolski kompozitni luk [14]

S vremenom proizvedeni su i prvi tehnički materijali poput željeza, bronce, čelika i betona. U najstarije kompozitne materijale ubraja se i armirani beton koji se još uvijek koristi. Beton je kao zasebni materijal vrlo čvrst i krt, a u kombinaciji sa željeznom mrežnom konstrukcijom koja je duktilna i žilava dobiva se materijal koji ima poboljšana svojstva [18].

3.2. Klasifikacija

Svaki kompozitni materijal se sastoji od dva dijela, matrice (osnovnog materijala) i ojačala (materijala za očvršćivanje) [4].

Najčešća podjela kompozita je prema :

- vrsti materijala matrice
- vrsti ojačanja

Na Slici 3 je dana podjela kompozita s obzirom na materijal matrice i ojačavala [10].



Slika 3: Matrice i pojačanja polimernih kompozita [10]

U Tablici 1 je dana podjela kompozita s dodatkom vlakana obzirom na vrstu matrice.

FRP	VLAKNO	MATRICA
1. POLIMERNA MATRICA KOMPOZITA	- staklo - ugljik - aramid - bor	- epoxy - poliester - termoplastika
2. METALNA MATRICA KOMPOZITA	- bor - borosilikatno staklo - glina - silicijev karbid	- aluminij - magnezij - titanij - bakar
3. KERAMIČKA MATRICA KOMPOZITA	- silicijev karbid - glina - silicijev nitrid	- glina - staklo-keramika
4. UGLJIK – UGLJIK KOMPOZIT	- grafitna vlakna	- grafitni ugljik

Tablica 1: Podjela kompozita ojačanih vlaknima ovisno o vrsti matrice [10]

3.3. Proizvodnja

Većina kompozita zahtijeva dva procesa prerade prije nego što zadovolje potrebne uvjete – prvi proces za proizvodnju samog kompozita i drugi za oblikovanje kompozitnog materijala do konačnog oblika [9].

Kompozitni materijali se proizvode različitim metodama o kojima ovisi njihovo ponašanje i svojstva. Metode za proizvodnju su najčešće ručno polaganje, naštrcavanje, pultrudiranje, ubrizgavanje smole u kalup, namatanje i prepreg.

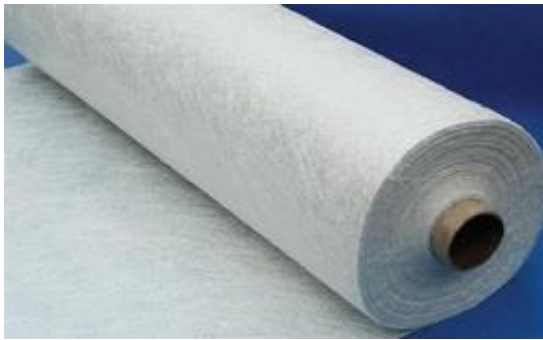
Osnovna svojstva kompozita ovise [14]:

- vrsti matrice i njezinim svojstvima
- ojačanju (svojstvima, raspodjeli, veličini i vrsti)
- orijentaciji ojačanja unutar matrice
- volumnom omjeru matrice i ojačala
- kvaliteti povezivanja matrice i ojačala

4. VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI

4.1. Povijesni razvoj

Značajniji razvoj kompozita u novijem dobu započinje razvojem plastike. Do tada, prirodna smola dobivena od biljaka i životinja bila je jedini izvor za proizvodnju ljepila i veziva. Kasnije, 1900. godine započeo je razvoj plastike kao što je vinil, polistiren i poliester. Međutim, sama plastika nije mogla osigurati dovoljno snage za strukturne primjene pa je bilo potrebno ojačanje za pružanje čvrstoće i krutosti. Owens Corning, 1935. godine predstavlja prvo stakleno vlakno, stakloplastiku (fiberglass) koja u kombinaciji sa plastičnim polimerom stvara vrlo čvrstu strukturu (Slika 4 i 5) [7].



Slika 4: Stakloplastika [31]



Slika 5: Staklena vlakna [31]

Nekoliko godina nakon toga, razvoj kompozitnog materijala se nastavlja te 1970. godine, američka firma DuPont razvija aramidna vlakna, danas poznatija kao Kevlar (Slika 6). Nedugo nakon toga su se razvila i ugljična vlakna (Slika 7) i ostali vlaknasti materijala za ojačanje.



Slika 6: Aramidna vlakna [16]



Slika 7: Ugljična vlakna [16]

4.2. Klasifikacija vlaknima ojačanih kompozita

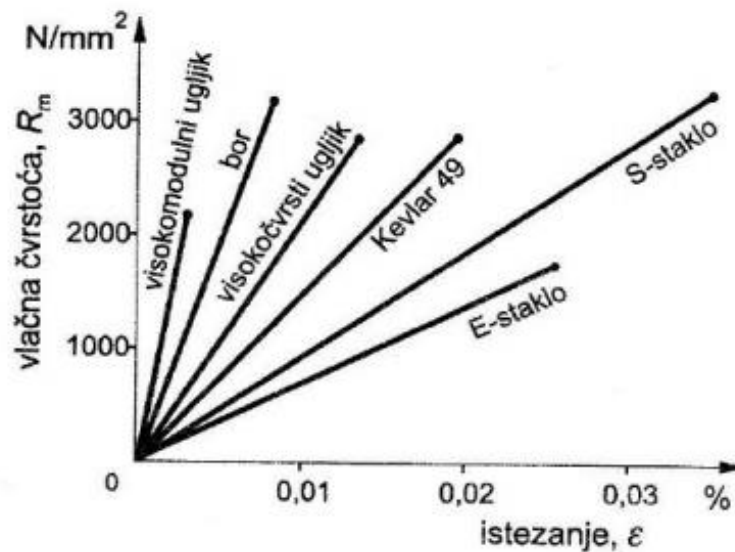
Na osnovi promjera vlakna se mogu podijeliti na :

- viskere
- vlakna
- žice

Prema vrsti i obliku vlakana razlikujemo [28]:

- prirodna vlakna (lan, pamuk, itd.)
- staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- ugljikova vlakna (Carbon)
- aramidna vlakana (Kevlar, Twaron, itd.)
- poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- metalna vlakana (žica ili žičano pletivo)
- celuloza (drvo/papirna vlakana i slama)
- borova vlakna

U dijagramu `naprezanje-istezanje` (Slika 8) dana je usporedba čvrstoće različitih vrsta vlakana. Najveću čvrstoću imaju staklena vlakna (S-staklo i E-staklo), dok najmanju imaju ugljična vlakna.



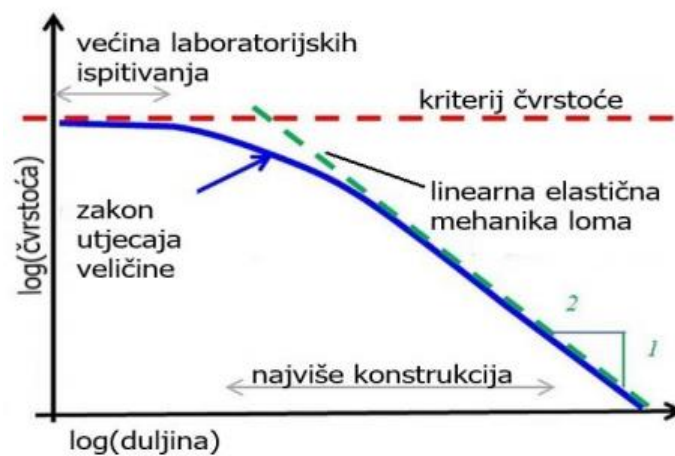
Slika 8: Dijagram `naprezanje-istezanje` različitih vrsta vlakana [23]

Podjela vlakana s obzirom na duljinu:

- kratka vlakna (mikrovlakna)
- duga vlakna (makrovlakna)

Osnovna karakteristika kratkih vlakana je da imaju manje pukotina pa samim time i veću čvrstoću (Slika 9), laganu i brzu izradu te nižu cijenu u odnosu na duga vlakna.

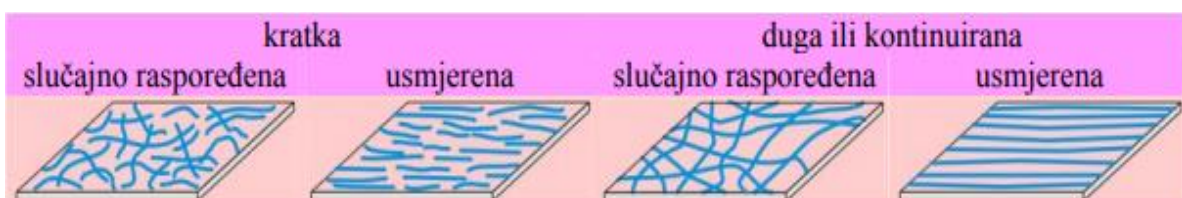
Prednosti dugih vlakana su: kratka i lagana obrada, otpornost na udarno opterećenje i dimenzijska stabilnost [29].



Slika 9: Utjecaj duljine vlakana na čvrstoću kompozita [30]

4.3. Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita

Kako bi se postigla što bolja svojstva kompozita, vlakna se u matricu polažu na odgovarajući način, odnosno treba se obratiti pažnja na raspored i razmak vlakana te njihovu duljinu. Vlakna pomiješana sa materijalom matrice mogu biti slučajno raspoređena ili usmjerena (Slika 10).



Slika 10: Položaj vlakana u matrici [14]

Na slici su prikazani primjeri postupaka proizvodnje kompozita s vlaknima (Slika 11).



Slika 11: Postupci proizvodnje kompozita [1]

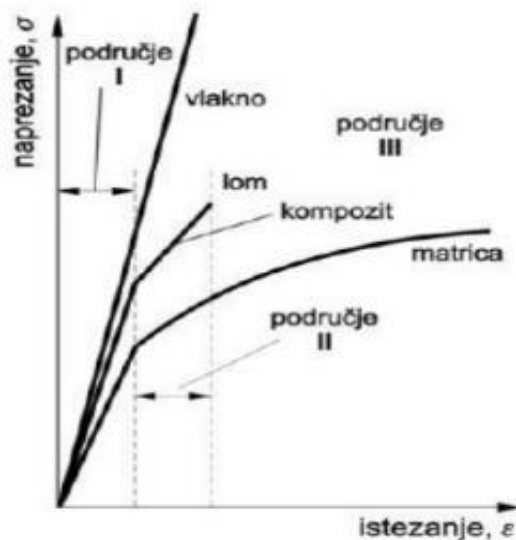
4.4. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita

Funkcije matrice u kompozitu su da objedinjuje vlakna i prenosi opterećenje na njih, osigurava krutost i oblik konstrukcije, osigurava dobru kvalitetu površine, te osigurava zaštitu vlakana od kemijskih utjecaja i mehaničkih oštećenja [20]. Osnovni zadatci vlakana u kompozitu su da prihvaća opterećenje, osigurava čvrstoću, krutosti, toplinsku stabilnost i električnu vodljivost ili izolaciju.

Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita ovise o [19]:

- omjer duljina-promjer vlakana
- volumni udio vlakana
- usmjerenost (raspored) vlakana
- svojstva vlakana
- svojstva matrice

Pri visokom naprezanju dolazi do deformacije matrice pa dijagram `naprezanje-istezanje` više nije linearan već dolazi do laganog zaobljenja (Slika 12).



Slika 12: Dijagram `naprezanje-istezanje` kompozita ojačanih vlaknima [23]

4.5. Primjena vlaknima ojačanih kompozita

Primjena kompozitnih materijala u svijetu je vrlo raznolika. S vremenom i razvojem, kompoziti su postali sastavni dio mnogih industrijskih grana i proizvoda.

Najčešća primjena kompozita ojačanih vlaknima je u zrakoplovstvu zbog male težine i nezapaljivosti pa se tako koriste za konstrukcijske dijelove putničkih zrakoplova, jedrilice, kupole, usmjerivače zraka, krilca, krakove helikoptera, propelere, itd.

U građevinarstvu se ponajviše koriste za stambene jedinice, dimnjake, betonske konstrukcije, različite pokrove, bazene za plivanje, pročelja zgrada, vrata, namještaj, kupaone...

Također, česta primjena kompozita je u elektrotehnici, strojarstvu, brodogradnji autoindustriji, željezničkom i cestovnom prometu.

5. POLIMERNI MATERIJALI OJAČANI VLAKNIMA

Polimeri ojačani vlaknima (FRP - fibre reinforced polymer) predstavljaju kompozitni materijal sastavljen od polimerne matrice koja može biti armirana organskim ili anorganskim vlaknima. Polimerne matrice mogu biti napravljene na temelju duromernih smola, kaučukovih smjesa i plastomera.

Polimerni kompoziti istovremeno mogu postići: visoku krutost i malu masu, visoku čvrstoću, postojanost na različite medije i druge kombinacije svojstava. Također, jedna od karakteristika polimernih materijala je dimenzijska stabilnost pri ekstremnim uvjetima rada [5].

5.1. Klasifikacija polimernih materijala ojačanih vlaknima

U industriji se danas najviše primjenjuju vlaknasta ojačala s najboljim fizikalnim i mehaničkim svojstvima, po čemu se posebno ističu [12]:

- staklena vlakna
- ugljična vlakna i
- aramidna vlakna.

5.1.1. Polimeri ojačani staklenim vlaknima

Staklena vlakna su najčešće upotrebljavana ojačanja za plastomerne kompozite. Dobivaju se miješanjem staklenog otpada i ostalih sirovina za proizvodnju stakla, a na temperaturi od 1600°C mješavina se pretvara u tekuće staklo. Tekućina, zatim prolazi kroz "vatrostalna sita" uz istovremeno hlađenje kako bi se oblikovale sitne staklene niti – filamenti (Slika 13). Zatim slijedi namotavanje na koloture koje se rotiraju velikom brzinom [5].



Slika 13: Filamenti staklenih vlakana [31]

Postoje četiri glavne klase stakla [7]:

- visokoalkalno (A-staklo)
- električna klasa (E-staklo)
- kemijski otporna modificirana E klasa (ECR-staklo)
- klasa visoke čvrstoće (S-staklo)

U Tablici 2 su prikazane vrijednosti tipičnih svojstava različitih vrsta staklenih vlakana.

Materijal	Gustoća (kg/m³)	Rastezna čvrstoća (Mpa)	Youngov modul (GPa)	Koeficijent toplinskog rastezanja (10⁻⁶/K)	Prekidno istezanje (%)
E-staklo	2620	3450	81	5,0	4,9
S-staklo	2500	4590	89	5,6	5,7
A-staklo	2500	3050	69	8,6	5,0

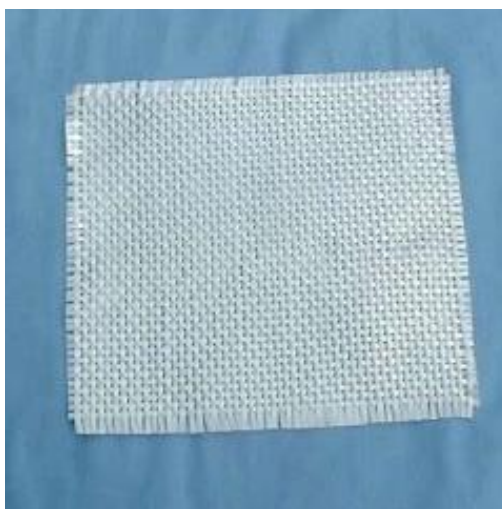
Tablica 2: Vrijednosti svojstava različitih vrsta staklenih vlakana [6]

Karakteristika staklenih vlakana je da se lako izvlače iz rastaljenog stanja u obliku čvrstih vlakana te se korištenjem brojnih tehnika proizvodnje mogu ekonomično proizvoditi. Kada se vlakna polože u polimernu matricu, dobije se kompozit relativno visoke čvrstoće.

5.1.2. Polimeri ojačani ugljičnim vlaknima

Ugljična ili karbonska vlakna dobivaju se iz već oblikovanih organskih vlakana karbonizacijom ili pirolizom. Često su to poliakrilonitrilna vlakna velike čvrstoće, a u manjoj količine celulozna vlakna i katran [8]. Temeljni procesi proizvodnje su namotavanje, stabiliziranje, karboniziranje i oblikovanje na određenu mjeru.

Na Slici 14 je prikazan roving ugljičnih vlakana.



Slika 14: Roving ugljičnih vlakana 600 g/m² [28]

Promjer vlakana se kreće od 4 do 10 μm , a mogu biti rezana ili kontinuirana. Ugljična vlakna su često presvučena zaštitnim epoksidnim slojem, što doprinosi boljem vezanju s polimernom matricom. Primjenjuju se za proizvodnju jakih, laganih, žilavih i toplinsko otpornih materijala.

5.1.3. Polimeri ojačani aramidnim vlaknima

Aramidna vlakna se dobivaju od aromatskih poliamida s minimalno 85% amidnih veza u makromolekuli koje povezuju dva aromatska prstena. Prerađuju se uobičajenim postupcima prerade tekstila budući da su relativno fleksibilna. Najpoznatija vrsta aramidnih vlakana je Kevlar koji je i do pet puta izdržljiviji od metala te dobro podnosi visoke temperature [12]. Danas razlikujemo tri vrste Kevlara: Kevlar 29, Kevlar 49 i Kevlar 149, koji se razlikuju po mehaničkim svojstvima (Tablica 3).

Tip vlakna	Gustoća (kg/cm ³)	Youngov modul (GPa)	Rastezna čvrstoća (GPa)	Promjer (μm)	Prekidno istezanje (%)
Kevlar 29 (visoka žilavost)	1440	85	3,0 - 3,6	12	4,0
Kevlar 49 (visok modul elastičnosti)	1440	131	3,6 - 4,1	12	2,8
Kevlar 149 (ultravisoki modul elastičnosti)	1470	186	3,5	12	2,0

Tablica 3: Svojstva aramidnih vlakana [32]

Budući da se dobivaju od aromatskih poliamida, ova su vlakna toplinski stabilna, odnosno zadržavaju mehaničku otpornost pri temperaturama od -200 do 200°C. Aramidna vlakna su otporna na kemikalije, udarce, abraziju, puzanje dok su izuzetno osjetljiva na dugotrajno izlaganje UV zrakama te zbog toga sklona propadanju.

5.2. Proizvodnja polimernih materijala ojačanih vlaknima

Postoji mnogo različitih postupaka (Slika 15) za proizvodnju polimernih materijala, stoga je bitno odabrati optimalan postupak kako bi se dobio proizvod određenih karakteristika i cijene.

Postupci se međusobno razlikuju po kvaliteti gotovog proizvoda, vremenu trajanja i troškovima izrade, a dijele se na postupke praoblikovanja (preradba) i na postupke preoblikovanja (promjena oblika).



Slika 15: Postupci prerade polimera[1]

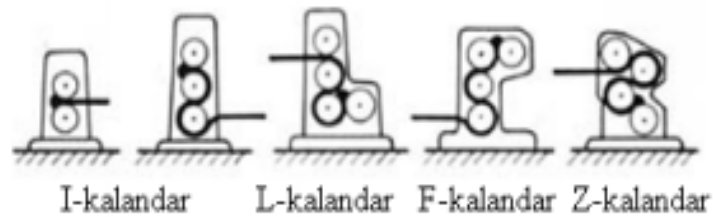
5.2.1. Kontinuirani postupci preoblikovanja

Kalandriranje

Kalandriranje je kontinuirani postupak izrade beskonačnih traka omekšanog polimera između parova valjaka kalandra pri čemu valjci pritišću polimer, a tvorevina u obliku traka - kalandrat očvršćuje procesima hlađenja, umreživanja i istovremeno geliranja i hlađenja [1].

Najvažniji element ovog postupka je kalandar, kojem je osnovna uloga da razvalja omekšani polimer na određenu debljinu. Prolaskom polimernog materijala kroz kalandar postiže se glatkost i finoća gotovog proizvoda.

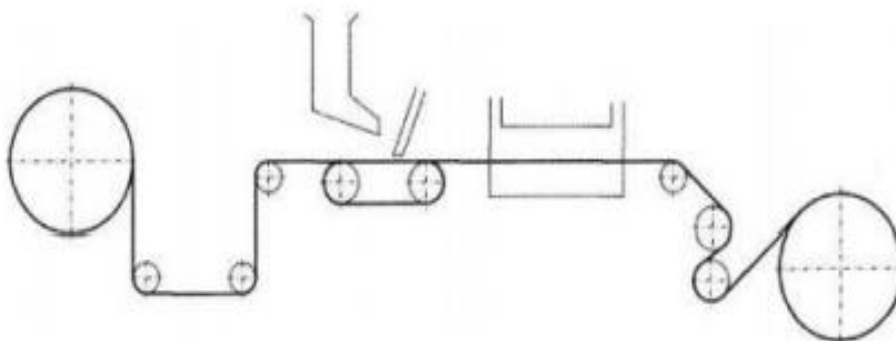
Na Slici 16 prikazan je raspored i broj valjaka u kalandru.



Slika 16: Raspored i broj valjaka u kalandru [1]

Kontinuirano prevlačenje

Prevlačenje je postupak nanošenja polimera na podlogu u obliku traka, koja može biti od tekstila, papira te metala, a također se mogu proizvoditi i trake od polimernog materijala bez podloge (Slika 17). Za prevlačenje, najprikladniji su polimerni materijali koji se mogu lijevati kao paste pa se u tu svrhu najviše upotrebljava poli (vinil – klorid), poznatiji kao sintetička koža [21].



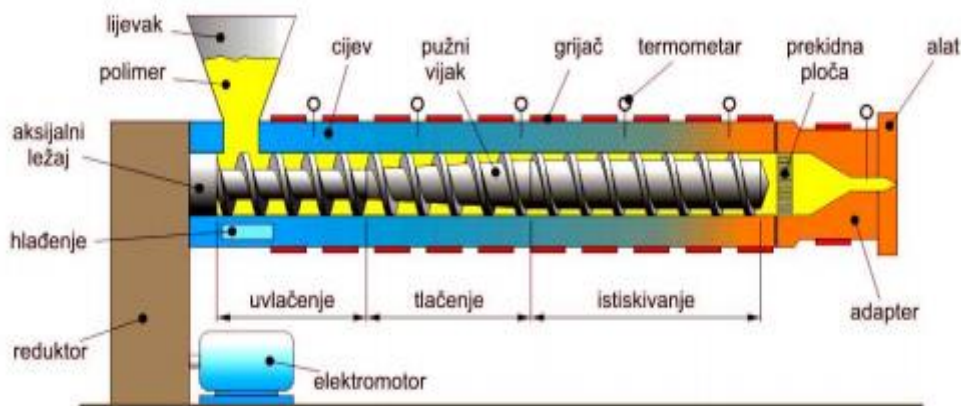
Slika 17: Postrojenje za prevlačenje [1]

Ekstrudiranje

Ekstrudiranje je postupak praoblikovanja polimernog materijala kojim se dobiju tzv. beskonačni proizvodi, odnosno proizvodi kojima dimenzije nisu konačne poput cijevi, štapova, vlakna, punih i šupljih profila.

Osnovni element ovog postupka je ekstruder, pomoću kojeg se potiskuje prethodno omekšani polimer kroz mlaznicu (Slika 18). Potiskuje se pužnim vijcima, pločama ili valjcima.

Najčešće se upotrebljavaju jednapužni ekstruderi, a nešto manje ekstruderi s dva ili više pužnih vijaka. Pužni vijak je najvažniji dio ekstrudera, koji služi za transport praha ili granula kroz cilindar, miješanje i homogenizaciju smjese te usmjeravanje taljevine prema mlaznici i istiskivanje kroz mlaznicu uz pritisak [1].



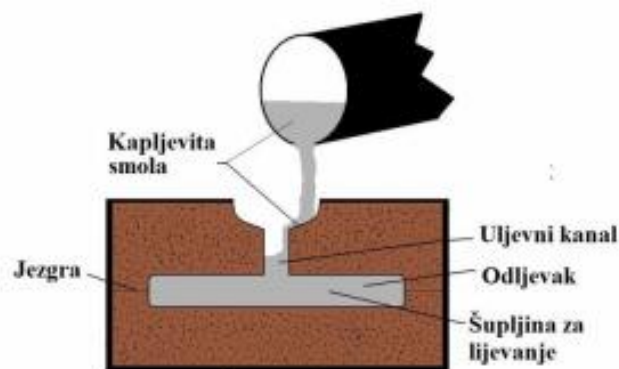
Slika 18: Shematski prikaz ekstrudera [1]

Pri postupku ekstrudiranja uzima se u obzir vrsta polimera, omjer kompresije, veličina granula, ponašanje pri taljenju, a odabir ekstrudera ovisi o broju pužnih vijaka, omjeru duljine i promjera, promjeru te vremenu hlađenja ekstrudata, brzini izvlačenja i specifičnom utrošku energije[21].

5.2.2. Ciklički postupci praoblikovanja

Lijevanje

Lijevanje se provodi ulijevanjem niskoviskoznih tvari u temperirani kalup (Slika 19). Lijevati se mogu već stvoreni polimeri u obliku otopine, paste ili niskoviskozne taljevine ili kapljeviti monomeri. Polimerni materijal u kalupu nastaje isparavanjem otapala, geliranjem kemijskom reakcijom – umrežavanjem. Lijevanjem se mogu dobiti proizvodi kao što su blokovi, ploče, ali i proizvodi kompliciranijeg oblika [1][21].



Slika 19: Prikaz lijevanja kapljevito polimera [1]

Kod procesa lijevanja, razlikujemo običan i rotacijski lijev. Običan lijev se koristi za lijevanje kapljeviti monomera te služi za proizvodnju cijevi, dok kod rotacijskog lijeva kalup rotira u horizontalnom ili vertikalnom smjeru tako da smjesa u kalupu jednoliko prione uz stijenke te se na taj način proizvode šuplji zatvoreni predmeti.

Prešanje

Prešanje spada u cikličke procese praoblikovanja kojim se mogu prešati plastomeri, ali i duromeri i elastomeri. Gotov proizvod nakon prešanja poprima oblik kalupa, koji se sastoji od gornjeg dijela (patrice) i donjeg dijela (matrice). Prešanje dijelimo s obzirom na način prešanja na: izravno (obično), posredno i injekcijsko prešanje [1].

Izravno prešanje

Postupak prešanja se provodi tako da se polimerni materijal u obliku praha (duromeri), priprema (duromeri i elastomeri) ili granulata (plastomeri) stavlja u kalup. U donjem dijelu kalupa se postavlja matrica, a gornji dio kalupa se zatvara. Zatim se materijal u kalupu rastali i formira prema matrici i patrici, a očvršćava procesima umreživanja ili hlađenja, ovisno o kojem se polimernom materijalu radi. Nakon formacije proizvoda u kalup, kalup se otvara i izvadi se gotovi proizvod.

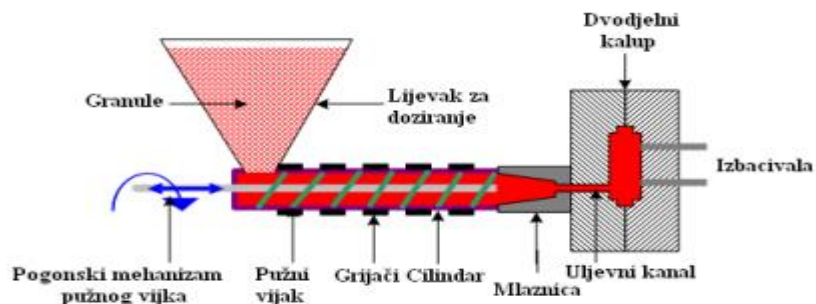
Posredno prešanje

Kod posrednog prešanja, kalup se sastoji od tri dijela: gornji dio – patrica, donji dio – matrica i središnji dio u koji se stavlja masa za prešanje. Polimerni materijal se stavlja u komoru za ubrizgavanje u kojoj dolazi do omekšavanja materijala, odnosno polimer se pretvara u taljevinu koja se pomoću klipa ubrizgava u donji dio kalupa. Prednost posrednog prešanja u odnosu na izravno je mogućnost postizanja boljih svojstava i dimenzijske stabilnosti gotovog proizvoda.

Injekcijsko prešanje

Injekcijsko prešanje (ubrizgavanje) spada pod cikličke postupke preradbe polimera, a izvodi se ubrizgavanjem polimerne tvari u temperirani kalup određenog oblika [21]. Postupak se sastoji od nekoliko osnovnih koraka: zatvaranje kalupa, ubrizgavanje, zadržavanje taljevine u kalupu, hlađenje, otvaranje kalupa i vađenje otpreska.

Injekcijskim prešanjem (Slika 20) se mogu prerađivati svi materijali, ali najčešće plastomeri. Veliki nedostatak ovog postupka je što zahtjeva veliku količinu opreme, koja je pritom poprilično skupa.



Slika 20: Shematski prikaz uređaja za injekcijsko prešanje s pužnim vijkom [1]

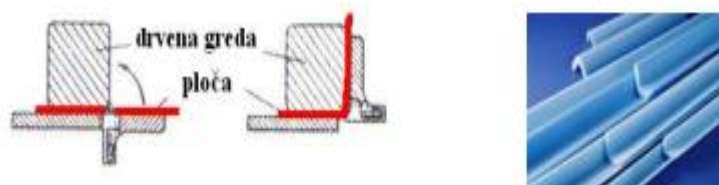
Srašćivanje u kalupu

Srašćivanje je ciklički postupak praoblikovanja polimernog praha u kalupu, na način da se čestice polimera spajaju pri povišenoj temperaturi. Kalup se ispuni prahom, zatim se zatvara i zagrijava do potpunog rastaljivanja. Konačni oblik proizvoda se dobiva hlađenjem [1].

Toplo i hladno preoblikovanje

Osnovni cilj postupaka preoblikovanja je postizanje određenog oblika uz promjenu oblika pripremljenog dobivenog ekstrudiranjem ili kalandriranjem. Procesi preoblikovanja se mogu podijeliti na toplo i hladno oblikovanje.

Toplo oblikovanje se većinom koristi za preoblikovanje plastomera pri visokoj temperaturi. Plastomeri zagrijani iznad temperature taljenja prelaze u plastomerne taljevine koje se mogu značajno deformirati. U praksi se razlikuje toplo oblikovanje skošenjem (Slika 21), savijanjem, razvlačenjem, duboko vučenjem i podtlačno oblikovanje.



Slika 21: Postupak toplog oblikovanja skošavanjem [1]

Hladno oblikovanje se zasniva na hladnom tečenju materijala, za koje je potrebno visoko mehaničko naprezanje i visoki modul elastičnosti kako bi se ostvarila plastična deformacija. Oblikovanje se može izvoditi pri sobnoj temperaturi, na različite načine: valjanjem, prešanjem, istiskivanjem i izvlačenjem, te dubokim vučenjem [21].

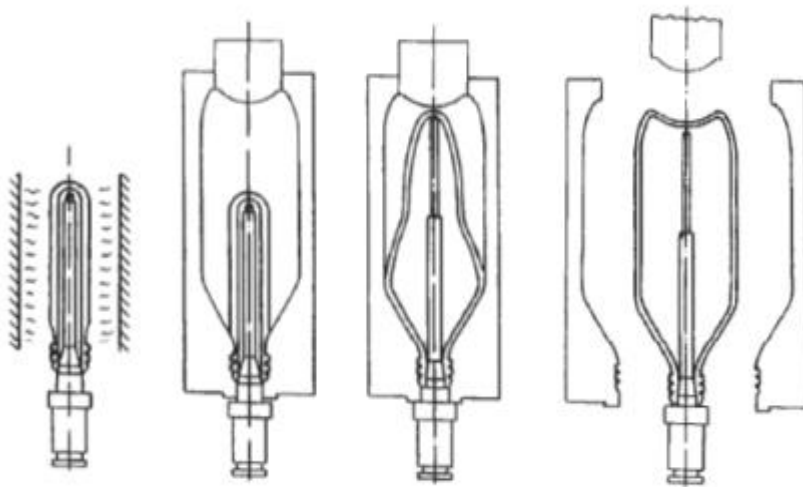
Izvlačenje

Postupak izvlačenja temelji se na preoblikovanju neorijentiranog priprema orijentiranjem makromolekularnog priprema u smjeru rastezanja pri kojem se pripremak može produljiti i do nekoliko puta.

Izvlačenje se uglavnom nastavlja na proces praoblikovanja ekstrudiranjem ili kalandriranjem. Ovim postupkom se postiže povećanje čvrstoće vlakana, traka, niti ili vrpce.

Puhanje šupljih tijela

Puhanje je postupak preoblikovanja djelovanjem stlačenog zraka u šuplje tijelo čiji se konačni oblik formirao hlađenjem. Dva osnovna postupka puhanja su injekcijsko (Slika 22) i ekstruzijsko puhanje. Bitna razlika između injekcijskog i ekstruzijskog puhanja je ta što kod injekcijskog puhanja proizvodi imaju kvalitetniju površinu bez zavarenih rubova zbog čega nema otpadnog materijala [21].



Slika 22: Postupak injekcijskog puhanja [1]

5.3. Svojstva polimernih materijala ojačanih vlaknima

Polimerni kompoziti se zbog svojih povoljnih mehaničkih svojstava sve više primjenjuju u zrakoplovstvu, građevinarstvu, brodogradnji i raznim drugim granama industrije.

Najvažnija mehanička svojstva polimernih kompozita su :

- čvrstoća
- rastezljivost
- žilavost
- krutost

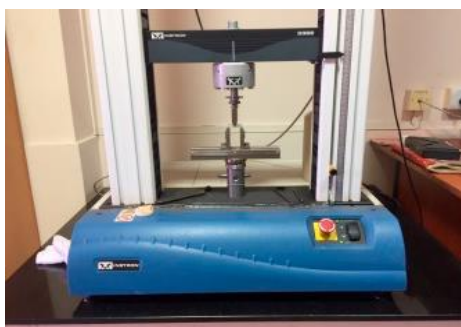
Kako bi se odredila mehanička svojstva, polimerni kompoziti se ispituju na čvrstoću, krutost, rastezljivost (Slika 23 i 24), izdržljivost i na savijanje (Slika 25 i 26).



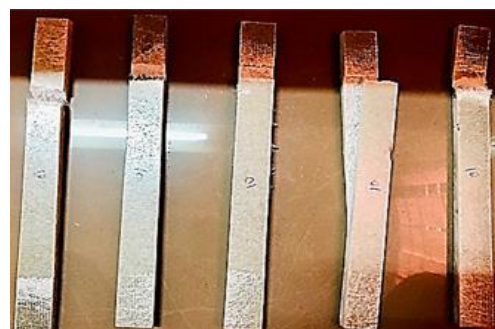
Slika 24: Ispitivanje uzorka na rastezljivost [33]



Slika 23: Rezultati ispitivanja na rastezljivost [33]



Slika 25: Ispitivanje uzorka na savijanje[33]



Slika 26: Rezultat ispitivanja na savijanje[33]

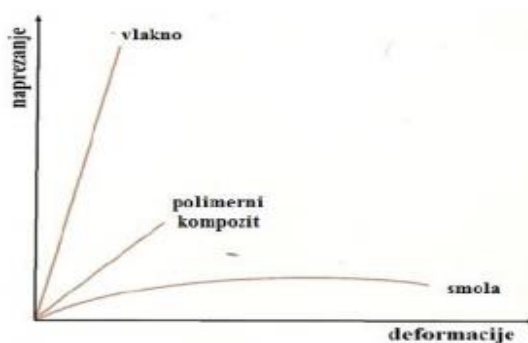
Nemehanička svojstva su :

- smanjena apsorpcija vlage
- nizak koeficijent toplinskog širenja
- čvrstoća pri visokim temperaturama
- kemijska otpornost

Budući da se polimerni kompoziti sastoje isključivo od smole ojačane vlaknima, njihova svojstva ovise o svojstvima smole, svojstvima vlakna, volumnom omjeru vlakana i smole, te o orijentaciji i geometriji vlakana u kompozitu. Također, kemijski sastav polimerne matrice znatno utječe na svojstva polimernih kompozita. Različite vrste poliesterske matrice uz istu vrstu ojačanja mogu pokazati različita svojstva te je zbog toga važna ne samo vrsta i oblik ojačanja, nego i njegova orijentacija i raspodjela u matrici.

Kod polimernih kompozita važna je kompatibilnost matrice i ojačanja te se zbog toga često koriste organske matrice s anorganskim ojačanjem (staklom). Takvi materijali uglavnom sadrže šupljine različitih veličina nastalih zbog lošeg kvašenja vlakna ili neuklopljenih mjehurića zraka tijekom izrade što dovodi do smanjenja svojstava. Najvažnija karakteristika polimera je da se njihova svojstva mogu oblikovati prema željama i potrebama gotovog proizvoda [25].

Na Slici 27 prikazan je polimerni kompozit koji sadrži svojstva kompozitnih materijala koje nema niti jedna njegova komponenta pojedinačno.



Slika 27: Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita [25]

Neke od prednosti polimernih kompozita su: povoljne vrijednosti specifične krutosti i specifične čvrstoće, mala gustoća, dobro prigušenje vibracija, otpornost na koroziju, dobra kemijska postojanost, relativno laka i jeftina proizvodnja konstrukcijskih dijelova te montaža istih.

Nedostatci polimera u odnosu na druge materijale su: krutost (nedeformabilnost), anizotropnost svojstava, skupe komponente i mogućnost raslojavanja i mrvljenja.

5.4. Primjena polimernih materijala ojačanih vlaknima u građevinarstvu

U zadnjih nekoliko desetljeća došlo je do značajnog rasta primjene FRP-a kao materijala u građevinarstvu. Ovakvi materijali smatraju se korisnim za izgradnju novih zgrada i mostova te za rekonstrukciju i obnovu postojećih građevina. Konstrukcije poput mostova i stupova izgrađene u potpunosti od FRP kompozita pokazale su izuzetnu trajnost i otpornost na učinke okoliša. Budući da FRP kompoziti ublažuju oštećenja uslijed smicanja, koriste se i za seizmičko ojačanje betonskih konstrukcija, a zbog otpornosti na koroziju, pogodni su i za primjenu na unutarnjim i vanjskim konstrukcijskim elementima [13] [15].

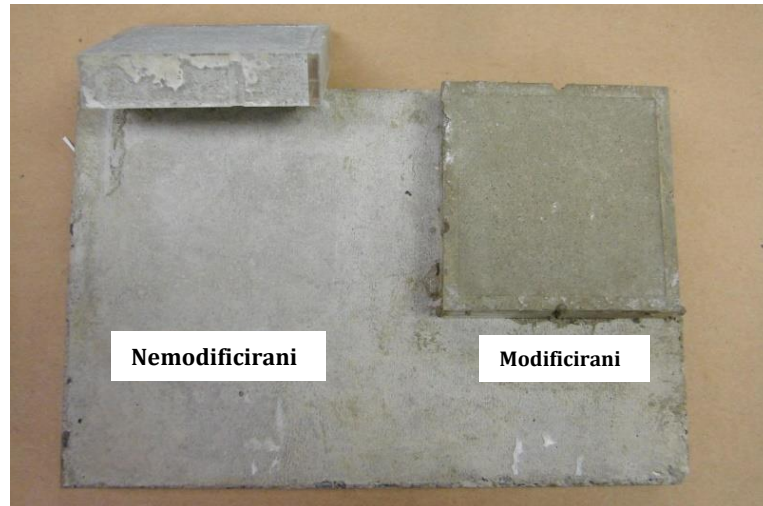
FRP kompoziti se najčešće primjenjuju u betonskim konstrukcijama, odnosno u samoj pripremi betona pa prema tome razlikujemo 4 vrste betona ojačanog polimerima[17]:

- polimerni portland cementni beton (PPCB)
- polimerni beton (PB)
- polimerom impregnirani beton (PIB)
- mikro-armirani beton (MAB)

Polimerni portland cementni beton (PPCB)

Polimerni portland cementni beton je uobičajeni portland cementni beton kojem se za vrijeme miješanja dodaje voda sa topljivim polimernim materijalom ili njegovom emulzijom. Dodavanjem polimera smanjuje se potreba za vodom za postizanje potrebne konzistencije te se tako povećava tečenje i obradljivost betona bez dodatne vode. Postupak miješanja je sličan kao i kod običnog betona.

Prva tri dana, uzorci se njeguju pri 100%-oj vlažnosti, a nakon toga na zraku u normalnim atmosferskim uvjetima prilikom kojih višak vode isparava. Na Slici 28 dan je primjer modificiranog (PPCB) i nemodificiranog (običnog) betona.



Slika 28: Modificirani i nemodificirani beton [23]

Polimerom impregnirani beton (PIB)

Impregnacija je postupak natapanja materijala tekućinom koja u daljnjem postupku prelazi u čvrsto stanje. Budući da je beton porozan materijal, postupak impregnacije betona je moguće uraditi primjenom odgovarajućih monomera. Polimernom impregnacijom se može ostvariti relativna nepropustljivost betona, visoka čvrstoća, modul elastičnosti, otpornost na vodu, otpornost na habanje, soli, kiseline te na smrzavanje (Slika 29).

Impregnirani dio betona

Nemipregnirani dio betona



Slika 29: Impregnirani i neimpregnirani dio betona [23]

Polimerni beton

Polimerni beton ili “mineralni lijev” je vrsta betonske mješavine u koju se umjesto standardnog veziva dodaje termostabilni polimer (Slika 30)[23]. Sastavljen je u najvećem dijelu od prirodnih minerala kao što su bazalt, granit i kvarc, koji se u obliku pijeska ili šljunka miješaju sa polimerom. Osnovne značajke ovog betona su: plastičnost, vodonepropustljivost, otpornost na mraz i sol te visoka cijena [17]. Polimer beton kroz svoju dugu trajanje doprinosi smanjenju otpada. Može se potpuno reciklirati te ponovo vratiti u proces proizvodnje.



Slika 30: Polimerni beton [23]

Mikro-armirani beton (MAB)

Mikro-armirani beton (Slika 31) je vrsta betona kojem se u procesu miješanja uz uobičajene sastojke betona dodaje i mikro armatura u obliku vlakana. Budući da dodana vlakna ne mogu zamijeniti standardnu armaturu, ona se koriste isključivo kako bi se poboljšala svojstva betona. Najčešća primjena mikro-armiranog betona je kod trotoara, parkinga, podova, pista, bazena, temelja, tunela i slično [23].



slika 31: Mikro-armirani beton [23]

U Tablici 4 su navedene ostale primjene FRP kompozita u građevinarstvu.

ELEMENT	PODRUČJA PRIMJENE
LEŽAJEVI	mostovi, visokogradnja, industrijska postrojenja
BRTVILA	brtvljenje spojnica mostova, stambenih zgrada i industrijskih postrojenja
CIJEVI I FAZONSKI ELEMENT	vodovodne i kanalizacijske cijevi, elementi uređaja za pročišćavanje voda, plinovodi
ZVUČNO-ZAŠTITNI ELEMENT	zidni i stropni elementi stambenih i industrijskih zgrada, koncertnih dvorana, skladišta
TOPLINSKO-ZAŠTITNI ELEMENTI I OBLOGE	stambene zgrade, dvorane
HIDROIZOLACIJA	betonske i zidane konstrukcije
ZIDNI I KROVNI ELEMENTI	ploče i zidovi stambenih i industrijskih zgrada, kupole od sendvič-konstrukcija i sl., prozirni elementi, krovna odvodnja, ventilacija
PROZORI, VRATA	stambene zgrade i industrijska postrojenja
PODNE I ZIDNE OBLOGE I SLOJEVI	obloge i slojevi industrijskih postrojenja, garaža, dvorana, igrališta i stepenica
OPLATE	oplate betonskih konstrukcija, oplate za oblikovanje betonskih fasada
LJEPILA	lijepljenje drvenih, metalnih, kamenih i betonskih konstrukcija, lijepljenje polimernih proizvoda
SANACIJSKI MATERIJALI	sanacija pukotina i oštećenih konstrukcija od betona, metala, kamena i opeke

Tablica 4: Ostale primjene FRP kompozita u građevinarstvu [15]

5.5. Primjeri primjene polimernih materijala ojačanih vlaknima u građevinarstvu

FRP materijali se zbog svojih povoljnih svojstava primjenjuju u raznim dijelovima građevinarstva pa tako ponajviše u betonskim konstrukcijama za sanaciju, popravke oštećenja ili učvršćivanje konstrukcije.

5.5.1. Sanacija

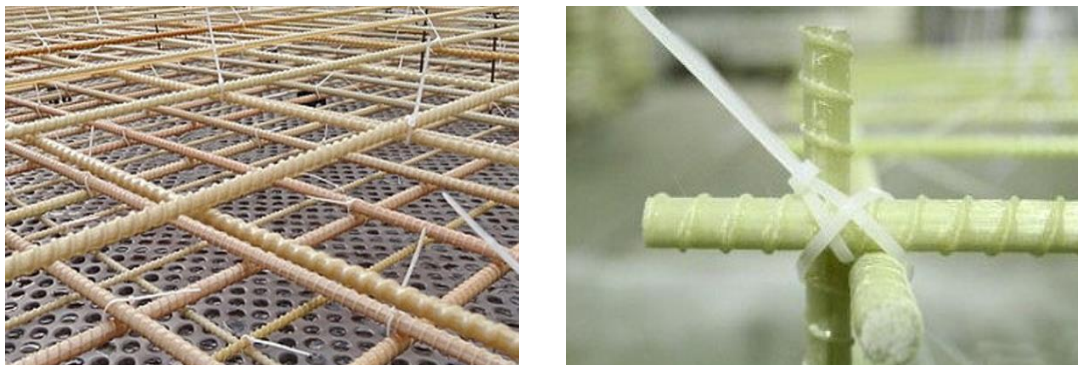
Sanacijski radovi se uglavnom sastoje od popravka oštećenja nastalih uslijed seizmičkih aktivnosti i drugi prirodnih nepogoda. Do oštećenja dolazi najčešće zbog duge trajnosti i izloženosti građevine ili loše kvalitete konstrukcije, te je potrebno strukturalno ojačanje konstrukcije pri kojem se koriste polimerni materijali [3]. FRP materijali se mogu koristiti za sanaciju u sljedećim situacijama :

- uporaba nekvalitetnih materijala i loša kvaliteta gradnje
- kratak vijek materijala koji utječe na nosivost građevine
- prirodne nepogode, požari, potresi

FRP je učinkovit seizmički materijal za nove i postojeće betonske konstrukcije. Kada je u pitanju autentičnost armiranja stakloplastikama u seizmičkim regijama, Japan je vodeća zemlja po primjeni armirano ojačanih polimera za beton budući da je Japan zemlja s najviše potresa u svijetu.

Studije za ispitivanje mogućih nedostataka betonskih konstrukcija u seizmičkim regijama otkrivaju da je glavni propust stupova nastao zbog nedovoljne duktilnosti i čvrstoće na smicanje. Strukturni nedostatak postojećih zgrada u takvim regijama je kritični problem pa je unatrag nekoliko godina u seizmičkim aktivnim dijelovima svijeta dokazano da je za poboljšanje strukturnih nedostataka betonskih konstrukcija najznačajnija primjena staklenih vlakana (engl. fiber glass).

Kako bi se spriječile štete uslijed prirodnih nepogoda, izvode se okviri ojačanja (Slika 32 i 33). Okvir se izrađuje montiranjem armaturnih šipki prostorne konstrukcije koje su pričvršćene na armaturne stezaljke okvira izrađene od kompozitnog materijala.



Slika 32 i 33: Montiranje okvira ojačanja prostorne konstrukcije [34]

Primjer: McKinley Tower, Aljaska

Zgrada McKinley Tower (nekadašnja zgrada MacKay), 1964. godine preživjela je najjači potres Sjeverne Amerike izmjeren do danas, magnitude 9.2 koji je prouzročio velike štete. Nedostatak čelika za armiranje doveo je do značajnih oštećenja greda, zidova i spojnih greda, a prethodni projekti seizmičke obnove otkazani su zbog visokih troškova.



Slika 33: McKinley Tower [35]

Rješenje

Kao rješenje za nastala seizmička oštećenja odabran je QuakeWrap FRP Retrofit sustav (Slika 35). QuakeWrap FRP sustav je polimer ojačan karbonskim i staklenim vlaknima, a osnovna namjena mu je za ojačanje postojećih zidova te spojeva gredastup na posmik (protupotresno ojačanje). Takvo rješenje nije povećalo masu same građevine, seizmički zahtjevi na zgradi su zadovoljeni te su sveukupni troškovi sanacije smanjeni [35].



Slika 34 i 35: QuakeWrp FRP Retrofit sustav [35]

Prilikom sanacije betonskih konstrukcija, bitno je razlikovati popravljanje, jačanje i nadogradnju konstrukcije. Kod popravljanja konstrukcija, FRP materijali se koriste za učvršćivanje strukturalnih ili funkcionalnih nedostataka poput pukotina. Jačanje strukture je specifično u slučajevima u kojima bi dodatak ili dodatna primjena FRP kompozita poboljšala postojeću razinu učinkovitosti. Nadogradnja konstrukcije se najčešće upotrebljava za seizmičku nadogradnju objekta koja smanjuje mogućnost od oštećenja uslijed potresa.

5.5.2. Popravak i učvršćivanje konstrukcija

Popravak sa FRP kompozitima se uspješno koristi za betonske (Slika 36), drvene (Slika 37), metalne i zidane konstrukcije. Prevladavajuća uloga betona kao konstrukcijskog građevinskog materijala potaknula je primjenu FRP kompozita za popravke betonskih konstrukcija, ponajviše mostova [3].



Slika 36: Popunjavanje pukotina FRP-om [3]



Slika 37: Primjena FRP-a na drvenoj krovnoj konstrukciji [36]

Osnovna tehnika učvršćivanja FRP-om koja se najčešće primjenjuje, uključuje ručnu primjenu mokrih ili montažnih sustava vezanih hladnim ljepilom. U ovim tehnikama uobičajeno je da je vanjska armatura položena na betonsku površinu tako da vlakna budu paralelna. Osim osnovnih tehnika, razvijeno je i vlažno polaganje koje se može koristiti za popunjavanje pukotina na mostovima.

Popravljanje i učvršćivanje greda, ploča ili kolničkih ploča i kolničkih zastora mosta sa FRP kompozitima je najpoznatija primjena FRP-a kod izgradnje mostova. Primjena FRP kompozita za izgradnju mostova je porasla u zadnjih nekoliko godina isključivo zbog njihove otpornosti na koroziju i vrlo jednostavnog rukovanja.

Prvi potpuno kompozitni pješački most je izgrađen 1992. godine u Abereldy, Škotska (Slika 38). Zatim su se kompozitni mostovi počeli graditi diljem Azije, Europe i Sjeverne Amerike.



Slika 38: Prvi kompozitni most, Abereldy, Škotska [37]

Prednosti FRP pješačkih mostova u odnosu na one izrađene od konvencionalnih materijala su mala težina, jednostavna ugradnja i ne zahtjevno održavanje. Ove prednosti omogućile su lako postavljanje pješačkih mostova u područjima koja su nepristupačna teškim građevinskim strojevima [37].

Primjeri FRP mostova u Europi (Slika 39 i 40)



Slika 39: Second Severn Bridge, UK [38]



Slika 40: Buehl-Balzhofen Bridge, Njemačka [38]

6. ZAKLJUČAK

U prvom djelu rada ukratko su opisani polimerni i kompozitni materijali, procesi proizvodnje te njihova svojstva i karakteristike. Naglasak rada je stavljen na najčešće upotrebljavane kompozitne materijale odnosno kompozite s polimernom matricom ojačane vlaknima. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita ovise o svojstvima matrice i vrste ojačala, njegovom volumnom udjelu, obliku, veličini i raspodjeli.

Budući da je upotreba polimernih materijala rasprostranjena po cijelom svijetu u raznim granama industrije, od kemijske do automobilske industrije, u brodogradnji pa sve do raznih primjena u građevinarstvu, može se reći da su polimeri postali neizostavan dio ljudskih života. Današnji trendovi u građevinarstvu temelje se na sve većoj upotrebi vlaknima ojačanih kompozita s ciljem smanjenja mase konstrukcija, poboljšanja svojstava i smanjenja troškova.

Iz dana u dan polimerni kompoziti ojačanim vlaknima se razvijaju, pronalaze nove načine primjene u raznim granama industrije i na taj način zamjenjuju postojeće konvencionalne materijale, pa se u budućnosti očekuje još veća upotreba što će znatno doprinijeti razvoju građevinske industrije.

7. LITERATURA

- [1] Bajsić Govorčin E.: *Prerada polimera*, Interna skripta, Zagreb, 2017.
- [2] Balabanić G.: *Materijali*, Interna skripta GRADRI
- [3] Dawood M., Rizkalla S.: *FRP for Transportation and Civil Engineering Infrastructure: Reality and Vision*, 2003
- [4] Duplančić I., Krnić N.: *Kompozitni materijali*, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [5] *Fibre Reinforced Polymer (FRP) in Construction, Types and Uses*, <https://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-polymer/1583/>, dostupno 01.05.2020.
- [6] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2011.
- [7] Glass fibers, <https://www.scribd.com/document/23688480/GLASS-FIBRE>, dostupno 01.05.2020.
- [8] Kalman T., Bjegović D., Sigmund V. : Trajnost polimera armiranih vlaknima u betonskim konstrukcijama, dostupno 01.05.2020.
- [9] Kompozitni materijali, <https://www.scribd.com/document/269543274/Kompozitni-materijali>, dostupno 01.05.2020.
- [10] *Kompoziti*, <https://www.scribd.com/document/46102598/08-Kompoziti>, dostupno 01.05.2020
- [11] Krizbergs J., Gutakovskis V.: *Kompozitni materijali*, nastavni materijal, 2016.
- [12] Lončar A., Komar D., Vojvodić D.: *Vlaknima ojačani polimeri*, Prvi dio: osnove i problematika izgradnje, 2006.
- [13] Masuelli M. A.: *Fiber Reinforced Polymers – Technology applied for concrete repair*, 2013
- [14] Marić G.: *Polimeri i kompoziti*, 2013.
- [15] Nizam E. H.: *Applications of Fiber Reinforced Polymer Composites (FRP) in Civil Engineering*, International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, 2014.
- [16] *Polimeri*, <https://www.scribd.com/document/57779466/07-Polimeri>, dostupno 01.05.2020.

- [17] *Polimerom modificirani betoni i mortovi - betoni i mortovi za sanaciju i ojačanje*
<http://www.gfos.unios.hr/>, dostupno 01.05.2020.
- [18] *Povijest polimera*,
https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer#Historical_development, dostupno 01.05.2020.
- [19] Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L, Linul E.: *Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications*, 2019.
- [20] Schauerl Z.: *Kompozitni materijali ("Kompoziti")*, 2009.
- [21] Šimunić Ž.: *Polimeri u graditeljstvu*, Zagreb, 2006.
- [22] Rogić A., Čatić I., Godec D.: *Polimeri i polimerne tvorevine*, Zagreb, 2008.
- [23] *Betoni posebnih namjena – Mikroarmirani beton*,
www.gfos.unios.hr > betoni-posebnih-namjena-3, dostupno 01.05.2020.
- [24] Sonički N. : *Tehnički materijali*, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [25] Kunej W.: *Poliesterski kompoziti*, 2. Prošireno izdanje, Zagreb, 2006.
- [26] *Polimer*, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Polimer>, dostupno 01.05.2020.
- [27] Bonato J., Šablja Đ.: *Tehnološki razvoj i prve primjene polimernih materijala*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2012.
- [28] *Ojačanja*, <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm>, dostupno 01.05.2020.
- [29] Kaw A.K., *Mechanics of composite materials*, CRC Press, New York 2006.
- [30] Picazo A., Alberti M.G., Gálvez J.C. , Enfedaque A. and Vega A.C., *The Size Effect on Flexural Fracture of Polyolefin Fibre-Reinforced Concrete*, The Size Effect on Flexural Fracture of Polyolefin Fibre-Reinforced, 2009.
- [31] *Staklena vlakna*, <http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/staklena-vlakna>, dostupno 09.06.2020.
- [32] Miracle D.B., Donaldson S.L., *ASM Handbook Volume 21: Composites*, ASM International, Ohio, 2001
- [33] *Engineering Fundamentals Refresh: Strength vs Stiffness vs Hardness*,
<https://www.fictiv.com/hwg/design/engineering-fundamentals-refresh-strength-vs-stiffness-vs-hardness>, dostupno 09.06.2020.
- [34] *Armature frames*, <http://www.vscomposite.com/fasteners/armature-frames>, dostupno 09.06.2020.
- [35] *Seismic Retrofit of the McKinley Tower*, <http://quakewrap.com/pdfs/FRP-Retrofit-of-McKinley-Tower.pdf>, dostupno 09.06.2020.

[36] *The Use of Fiber Reinforced Polymer*, <https://www.civilax.com/the-use-of-fiber-reinforced-polymer/>, dostupno 09.06.2020.

[37] Yail J. K.: *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair*, United Kingdom, 2014.

[38] Potyrała P. B.: *Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge*, 2011.