

# Utjecaj udjela, oblika i usmjerenosti ojačala na svojstva polimernih kompozita

---

Oreški, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:848196>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad 421/PS/2023**

**Utjecaj udjela, oblika i usmjerenosti ojačala na svojstva  
polimernih kompozita**

**Martin Oreški, 0336042496**

Varaždin, rujan 2023. godine





# Sveučilište Sjever

**Proizvodno strojarstvo**

**Završni rad 421/PS/2023**

## **Utjecaj udjela, oblika i usmjerenosti ojačala na svojstva polimernih kompozita**

**Student**

Martin Oreški, 0336042496

**Mentor**

izv.prof. dr. sc. Sanja Šolić

Varaždin, rujan 2023. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Martin Oreški	JMBAG	0336042496
DATUM	11.9.2023.	KOLEGIJ	Tehnologija II
NASLOV RADA	Utjecaj udjela, oblika i usmjerenosti ojačala na svojstva polimernih kompozita		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Influence of the proportion, shape and orientation of reinforcements on the properties of polymer composites		
MENTOR	dr.sc. Sanja Šolić	ZVANJE	izvanredna profesorica
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Tanja Tomić, predsjednica		
	2. doc.dr.sc. Matija Bušić, član		
	3. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić, mentorica, član		
	4. doc.dr.sc. Zlatko Botak, zamjenski član		
	5. _____		

## Zadatak završnog rada

BROJ 421/PS/2023

OPIS

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti i opisati polimerne kompozite s naglaskom na vlaknima ojačane polimerne kompozite. U uvodnom dijelu rada potrebno je utjecaj strukture na svojstva polimernih materijala te podjelu polimera kao tehničkih materijala. Potrebno je dati prikaz polimernih kompozita s naglaskom na kompozite ojačane vlaknima. U drugom dijelu rada potrebno je detaljnije prikazati proces proizvodnje i svojstva najzastupljenijih vlakana u današnjoj primjeni kod polimernih kompozita. U trećem dijelu rada je potrebno detaljno prikazati utjecaj udjela vlakana, oblika te usmjerenosti na modul elastičnosti i čvrstoću polimernih kompozita. Na kraju rada se potrebno kritički osvrnuti na prezentirane činjenice i donijeti zaključak. U radu je potrebno obavezno navesti svu korištenu literaturu.

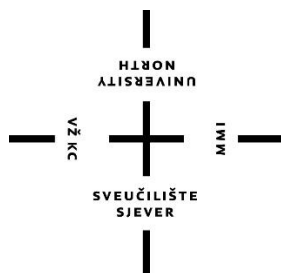
ZADATAK URUČEN

11.09.2023.



POTPIS MENTORA

Sanja Šolić



# Sveučilište Sjever

## IZJAVA O AUTORSTVU I SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, **Martin Oreški** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/seminarskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom **Utjecaj udjela, oblika i usmjerenosti ojačala na svojstva polimernih kompozita** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, **Martin Oreški** neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj udjela, oblika i usmjerenosti ojačala na svojstva polimernih kompozita** čiji sam autor/ica.

Student/ica:

## **Zahvala**

Ovim putem htio bih se zahvaliti svojim roditeljima i djevojci na pruženoj podršci tokom pisanja završnog rada. Posebno bih se htio zahvaliti mojoj mentorici izv.prof.dr.sc. Sanji Šolić na pruženim kritikama, komentarima, te savjetima koji su u cijelosti oblikovali ovaj završni rad. Htio bih se zahvaliti i samome sebi na vlastitome strpljenju, uloženom vremenu i trudu, te mnogobrojnim žrtvovanjima koji su posebno obilježili moje trogodišnje putovanje na Sveučilištu Sjever.

## Sažetak

U ovom završnom radu opisani su parametri ojačala koji utječu na čvrstoću polimernih kompozita. U uvodu su kratko opisani polimeri i kompoziti, te njihova najbitnija svojstva i podjele. Zatim su predstavljeni polimerni kompoziti, te njihova podjela prema vrstama matrice i ojačala. Spomenuti su određeni procesi izrade vlakana i područja njihove primjene. Zakonom miješanja dokazan je utjecaj volumnog udjela vlakana i njihovog modula elastičnosti na čvrstoću polimernog kompozita. Krična duljina vlakana, te omjer duljine i promjera vlakana opisani su kao dva najvažnija utjecajna parametra. U završnom su dijelu rada navedeni određeni primjeri uporabe polimernih kompozita, te je opisana njihova važnost kao tehničkog materijala današnjice i budućnosti.

**Ključne riječi:** polimerni kompoziti, matrice, vlakna, krična duljina vlakana, omjer duljine i promjera, čvrstoća polimernih kompozita

## Summary

In this final thesis, parameters affecting the strength of polymer composites are described. The introduction briefly outlines polymers and composites, as well as their most important properties and classifications. Polymer composites are then introduced, along with their classification based on the types of matrices and reinforcements. Certain fiber production processes and their areas of application are mentioned. The law of mixtures demonstrates the influence of fiber volume fraction and their modulus of elasticity on the strength of the polymer composite. Critical fiber length and the aspect ratio of fibers (length-to-diameter ratio) are described as two of the most important influential parameters. In the final part of the thesis, specific examples of the use of polymer composites are provided, and their significance as a technical material in the present and future is discussed.

**Key words:** polymer composites, matrices, fibers, critical length of fibers, aspect ratio (length-to-diameter ratio), strength of polymer composites



## **Popis korištenih kratica**

PVC – Poli(vinil-klorid)

PP – Polipropilen

PE – Polietilen

PS – Polistiren

DNA – Deoksiribonukleinska kiselina

LDPE – Low-density polyethylene, polietilen niske gustoće

HDPE – High-density polyethylene, polietilen visoke gustoće

LLD-PE – Linear low-density polyethylene, linearni polietilen niske gustoće

PET – Poli(etilen-tereftalat)

MMC – Metal matrix composite, kompoziti s metalnim matricama

CMC – Ceramic matrix composite, kompoziti s keramičkim matricama

PMC – Polymer matrix composite, kompoziti s polimernim matricama

PEEK – Poli(etereterketon)

PAN – Poliakrilonitril

SAD – Sjedinjene Američke Države

EU – Europska Unija

PPTA – Poli(fenilen-tereftalamid)

DSM – Dutch State Mines

UHMWPE – Ultra-high-molecular-weight polyethylene, visokomolekularni polietilen

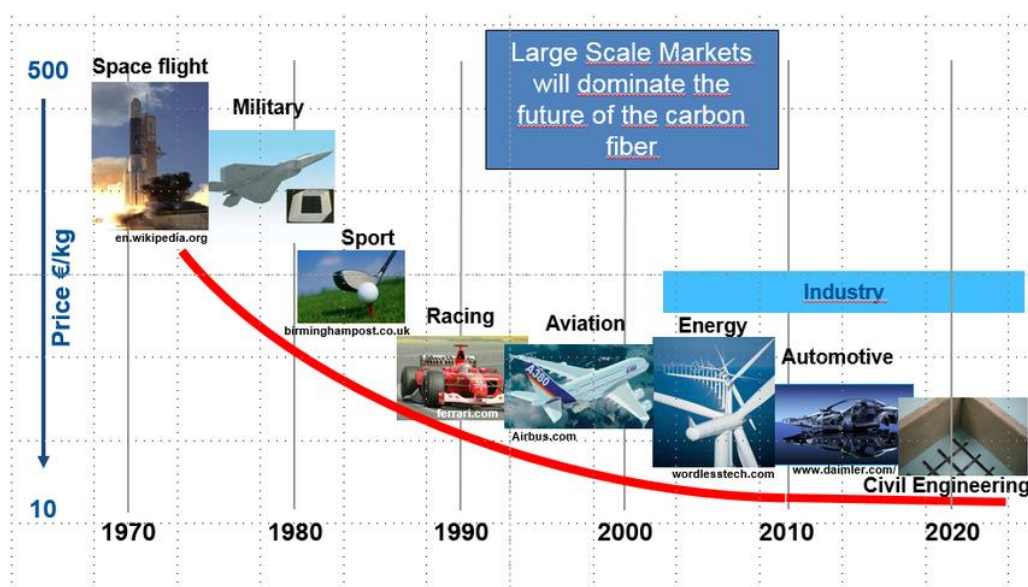
NSF – National Science Foundation, Nacionalna zaklada za znanost

## Sadržaj

1.	Uvod.....	1
1.1.	Općenito o polimerima.....	2
1.2.	Općenito o kompozitima .....	5
2.	Polimerni kompoziti.....	8
2.1.	Vrste polimernih matrica.....	9
2.2.	Procesi izrade i vrste vlakana .....	10
2.2.1.	<i>Staklena vlakna</i> .....	12
2.2.2.	<i>Ugljična vlakna</i> .....	14
2.2.3.	<i>Aramidna vlakna</i> .....	18
2.2.4.	<i>Ostale vrste vlakana</i> .....	20
3.	Utjecaj parametara vlakana na čvrstoću kompozita.....	23
4.	Polimerni kompoziti danas .....	31
5.	Zaključak.....	34
6.	Popis slika .....	35
7.	Literatura.....	37

# 1. Uvod

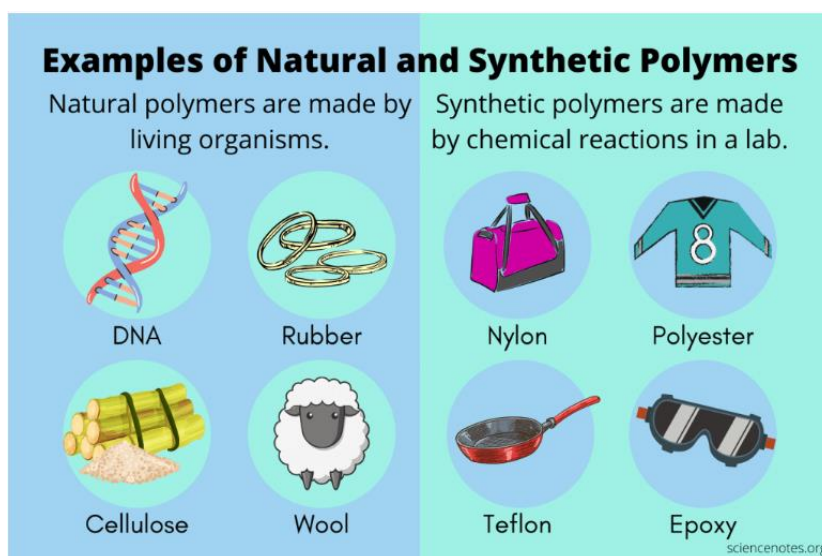
Kompozitni su materijali spoj dvaju ili više različitih materijala, čija mehanička i kemijska svojstva nadmašuju obilježja zasebnih komponenata. Kombinacija riječi kompozitni materijali dolazi od latinskih naziva *compositus* što bi u prijevodu značilo “skupa sastavljeno“, i od *materialis*, tj. “ono od čega je nešto napravljeno“. Iako kompozitni materijali asociraju na moderne i sofisticirane materijale, tj. materijale razvijene do visokog stupnja složenosti, njihovo “otkriće“ i uporaba započeli su u davnoj prošlosti. Sumerani u Mezopotamiji i Egipćani u Egiptu, kombinirali su glinu sa slamom kako bi dobili ojačani građevinski materijal, dok su čamce napravljene od pletene trstike premazivali smolama raznih drveća (koja su primjerice prirodni kompoziti) i biljaka kako bi ih učinili vodonepropusnima, te kako bi dodatno ojačali spojeve trstike [1]. Današnji kompoziti, pa tako i polimerni kompoziti, zbog svojih su posebnih svojstva i karakteristika često korišteni u vodećim industrijama, kao što su npr. automobilska i zrakoplovna industrija, no također se koriste i u ekstremnim uvjetima, tj. u svemirskoj industriji gdje su materijali izloženi vrlo visokim/niskim temperaturama i velikim naprezanjima. Otkrićem sintetskih polimera u 19. stoljeću, te kasnijim istraživanjima, posebice u 20. stoljeću, polimeri su bili razvijeni do te razine da su se masovno koristili kao polazni materijal za izradu proizvoda široke potrošnje. Mehanička su svojstva veliki faktor prilikom izbora materijala, no isti utjecaj ima i njihova cijena i dostupnost. Na slici 1 možemo vidjeti tok kretanja cijene ugljičnih vlakna koja se koriste pri proizvodnji polimernih kompozita u raznim strojarским industrijama.



Slika 1 – Kretanje cijena 1 kilograma ugljičnih vlakana [2]

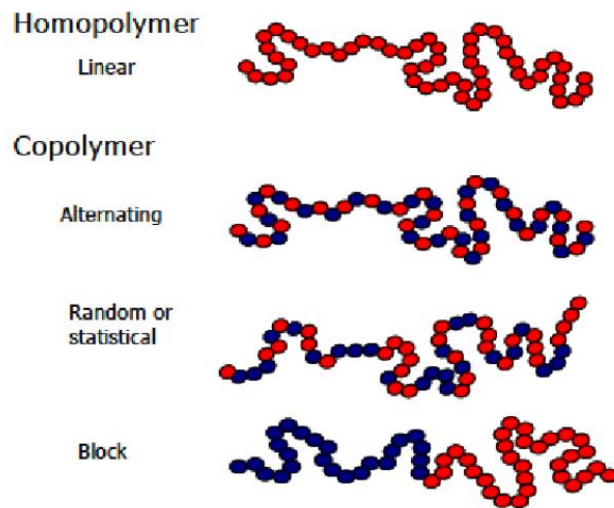
## 1.1. Općenito o polimerima

Riječ polimer dolazi od grčkih riječi *πόλη* – mnogo i *μέρος* – dio, što bi se moglo prevesti kao “mnogo dijelova“, tj. nešto što je građeno od velikog broja manjih jedinica. Polimeri su tvari građene od makromolekula, koje nastaju različitim procesima povezivanja vrlo velikog broja jednostavnijih kemijskih spojeva, monomera [3]. Još od davnina neki od prirodnih kompozita koji su bili u svakodnevnoj upotrebi bili su drvo, koža i kosti. Švedski je kemičar Jöns Jakob Berzelius 1833. godine uveo pojam *polimer*, a 1889. godine Charles Goodyear procesom vulkanizacije, tj. dodavanjem sumpora u zagrijani kaučuk, proizvodi tehnički upotrebljiv elastomer [4]. Njihovim daljnjim razvojem, polimeri su se počeli koristiti u gotovo svakoj industriji (prehrambena, tekstilna, automobilska, zrakoplovna, svemirska, vojna i mnoge druge). Polimere možemo podijeliti prema podrijetlu, prema reakcijskom mehanizmu spajanja, prema vrsti ponavljanih jedinica, prema oblicima makromolekula, prema strukturi i prema ponašanju pri zagrijavanju, odnosno hlađenju. Polimeri se prema podrijetlu dijele na prirodne i sintetske. Neki od prirodnih su keratin, vuna, pamuk i celuloza. Sintetske možemo podijeliti na polu-sintetske, organske sintetske (npr. PVC, PP, PE i PS) i na anorganske sintetske polimere. Organski sintetski polimeri za bazu sadrže ugljik, dok anorganski sintetski za bazu sadrže neke druge elemente kao što su bor, sumpor, vodik i silicij [5]. Na slici 2 prikazani su neki primjeri prirodnih i sintetskih polimera.



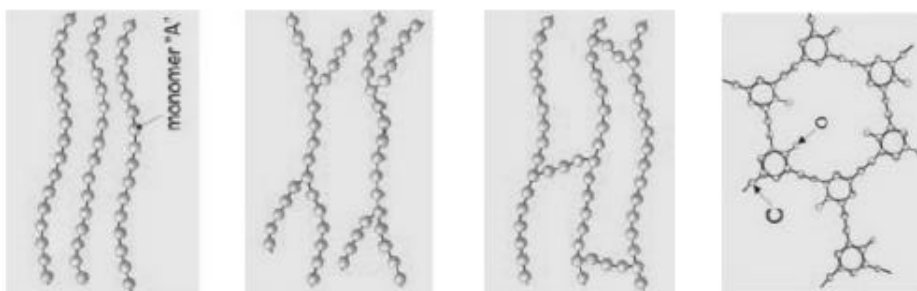
Slika 2 – Primjeri prirodnih i sintetskih polimera [19]

Prema reakcijskom mehanizmu spajanja, polimere dijelimo na adicijske i kondenzacijske. Adicijom se najčešće spaja jedna vrsta monomera, a svojstva dobivenog polimera uvelike ovise o stupnju polimerizacije. Kondenzacijski polimeri nastaju spajanjem velikog broja dvaju različitih polimera i nusprodukt reakcije su često male molekule, npr. voda ili ugljični dioksid [5]. Prema vrsti ponavljanih jedinica postoje homopolimeri i kopolimeri. Homopolimeri, kao što i sama riječ kaže, su sačinjeni od jedne vrste ponavljanih jedinica, dok su kopolimeri sačinjeni od više vrsta ponavljanih jedinica (slika 3) [5].



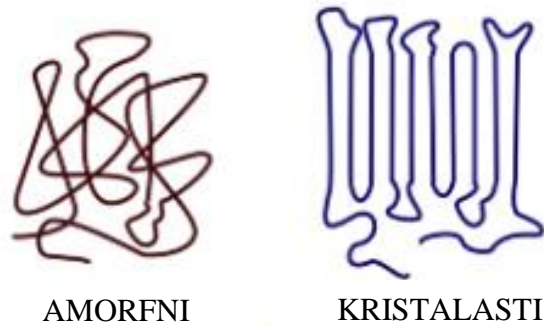
Slika 3 – Podjela polimera prema vrsti ponavljanih jedinica [20]

Na slici 4 možemo vidjeti podjelu polimera prema oblicima makromolekula, a to su linearni, granati, poprečno vezani i mrežasti polimeri. Monomeri su međusobno povezani kovalentnim vezama, dok su lanci povezani Van der Waalsovima [5].



Slika 4 – Podjela polimera prema oblicima makromolekula [5]

Prema strukturi polimeri se dijele na amorfne i “kristalaste“ (slika 5). Amorfni sadržavaju nepravilan raspored makromolekula, tj. ne postoji trodimenzionalna kristalna uređenost kao što postoji kod npr. metala. Oni su uglavnom fleksibilniji materijali s boljom udarnom žilavošću u odnosu na kristalaste polimere, te su prozirni. Kristalasti polimeri imaju do određene razine pravilno organiziranu strukturu makromolekula, neprozirni su, ali imaju veću čvrstoću i otpornost na kemikalije u usporedbi s polimerima amorfne strukture .

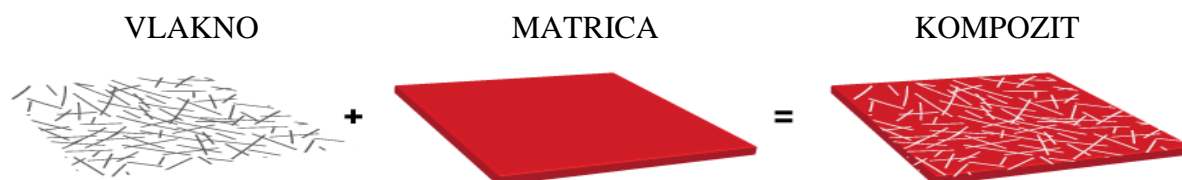


*Slika 5 – Prikaz strukture amorfnog i kristalastog polimera [21]*

Iz tehničkog gledišta najzanimljivija i najbitnija podjela jest prema ponašanju pri zagrijavanju, odnosno hlađenju polimera. Najvažnija su mehanička svojstva, kao što su čvrstoća i žilavost, na različitim temperaturama kako bismo mogli odrediti temperaturno-radna područja u kojima će se polimeri koristiti, naravno uz faktor sigurnosti. Dijelimo ih na plastomere, duromere, elastomere i elastoplastomere. Plastomeri, kao najrasprostranjenija skupina zbog svojih izrazito dobrih preradbenih i uporabnih svojstava, čine oko 80% ukupne proizvodnje polimernih tvorevina, među kojima su najzastupljeniji LDPE, HDPE, LLD-PE, PVC, PP, PS i PET. Duromeri su zbog svoje gusto umrežene strukture kruti i nedeformabilni, ali mogu podnijeti veće temperature u odnosu na plastomere. Elastomeri imaju vrlo veliku sposobnost elastične deformacije, te su nepropusni za npr. zrak i vodu, postojani su pri povišenim temperaturama ili ostaju savitljivi pri nižim temperaturama u usporedbi s plastomerima. Elastoplastomeri se prerađuju postupcima karakterističnima za plastomere, a uporabna su im svojstva slična elastomerima [5].

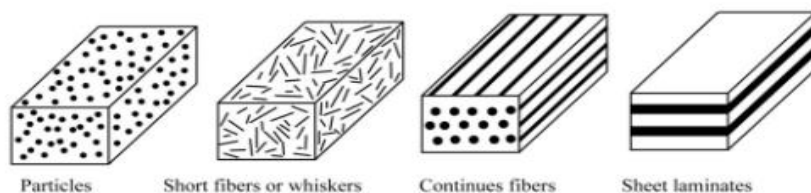
## 1.2. Općenito o kompozitima

Kompoziti su materijali sačinjeni od dvaju ili više kemijski i fizički različitih faza, odnosno konstituenata, koje dijeli jasno vidljiva granica. Zasebni su konstituenti na takav način spojeni, odnosno povezani, da čine ravnotežni sustav sa znatno boljim mehaničkim, funkcionalnim, uporabnim i ostalim svojstvima nego bilo koji zasebni element unutar kompozita. Možemo zamisliti kako svojstva zasebnih konstituenata, spojenih zajedno, dolaze do izražaja. Tako dobivamo materijale sa npr. niskom gustoćom, visokom otpornošću na koroziju, visokom otpornošću na umor materijala i ostalim dobrim svojstvima [6]. Kompoziti se sastoje od dvije komponente, matrice i ojačala, što vidimo na slici 6, te je važno napomenuti kako imaju vrlo različita mehanička svojstva. Iako je na slici 6 za ojačalo napisano vlakno, postoje i ostale vrste ojačala kao što su npr. čestice različitih promjera, od onih nama vidljivih oku, do onih mikroskopskih veličina.



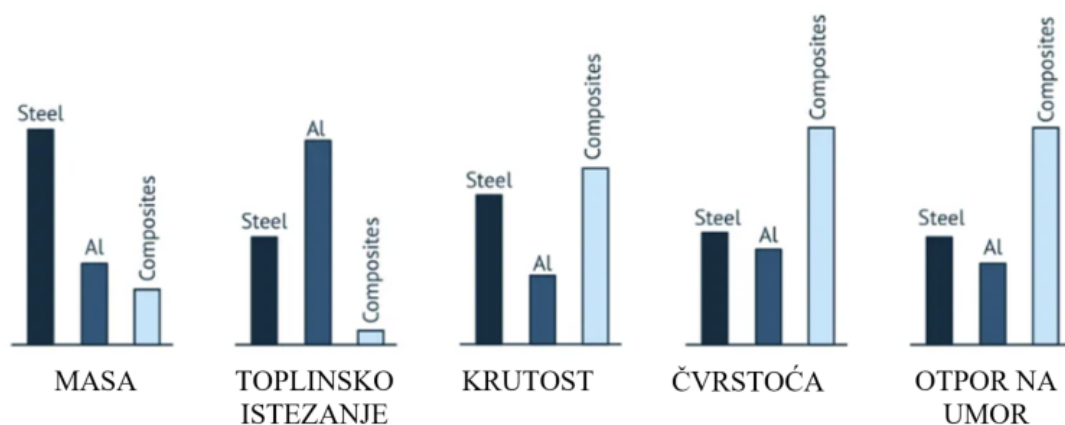
Slika 6 – Jednostavan prikaz sastava kompozita [22]

Glavna je svrha matrice da prenese mehaničko opterećenje na ojačala, te da štiti ojačala od vanjskih faktora, kao što su atmosfera, vlaga, elektromagnetsko zračenje, štetni plinovi i ostalo. Matrice se dijele na metalne (MMC – Metal Matrix Composites), keramičke (CMC – Ceramic Matrix Composites) i polimerne (PMC – Polymer Matrix Composites). Matrica obuhvaća ojačala, no ne mora nužno biti u većinskom volumnom ili pak masenom udjelu. Zadaća je ojačala da na sebe “preuzme“ mehanička naprezanja i da ih naravno uspije podnijeti. Ojačala mogu biti u obliku čestica, vlakana (mogu biti i kontinuirana, tj. neprekinuta preko cijele matrice) ili je pak kompozit napravljen slojevito ( tzv. “sendvič konstrukcije“), što je sve prikazano na slici 7.



Slika 7 – Vrste ojačala unutar kompozita [23]

Prilikom izrade kompozita možemo utjecati na sljedeće faktore: maseni/volumni udio matrice/ojačala, izbor vrste ojačala (čestica ili vlakno), te ako smo odabrali vlakna, njihov smjer i vrstu veze između matrice i ojačala. Napravimo li 100 kompozitnih materijala od istih matrica i istih ojačala, no na svakome promijenimo gore navedene faktore, dobivamo 100 kompozitnih materijala sa različitim mehaničkim svojstvima. Kod kompozita kod kojih su korištena ojačala u obliku čestica, javlja se izotropija, odnosno, ujednačenost mehaničkih i ostalih svojstava u svim smjerovima, dok se kod kompozita ojačanih vlaknima javlja anizotropija, tj. karakteristike i svojstva nisu jednaka u svim smjerovima u odnosu na primijenjena opterećenja, već su svojstva bolja u smjera kretanja vlakana. Moguće je stoga zaključiti kako će čvrstoća samoga kompozita najviše ovisiti o udjelu ojačala u matrici, no važno je i napomenuti kako mora biti dobro osiguran prijenos naprezanja s matrice na ojačalo. Adhezijske sile u spoju matrice i ojačala moraju osigurati dobru povezanost među konstituentima, pa tako i automatski prijenos opterećenja na ojačalo [7]. Postoji mnogo različitih podjela kompozitnih materijala, a neke od njih su podjela prema: **1.** vrsti ojačala (čestice, vlakna ili pak slojevita struktura), **2.** svrsi (konstrukcijski ili funkcionalni/uporabni kompozitni materijali), **3.** vrsti matrice (MMC, CMC ili PMC), **4.** načinu raspršenosti/orijentiranosti ojačala (kontinuirana vlakna, isprekidana vlakna, nasumično razbacana vlakna, isprepletana vlakna, čestice vidljive okom, mikroskopske odnosno nano-čestice...), **5.** načinu izrade kompozitnih materijala (lijepljenjem, miješanjem smolama, povezivanje pritiskom pod povišenom temperaturom i ostali). Glavna prednost polimernih kompozita jest njihova specifična čvrstoća (čvrstoća materijala podijeljena s gustoćom kompozita) i specifični modul elastičnosti (Youngov modul elastičnosti podijeljen s gustoćom kompozita), koji su u odnosu na konvencionalne materijale kao što su čelik, aluminij, titan i nikal, izrazito većeg iznosa. Na slici 8 možemo vidjeti usporedbu sljedećih karakteristika kod čelika, aluminija i kompozitnih materijala: 1. težina/masa, 2. temperaturna ekspanzija, 3. krutost, 4. čvrstoća, 5. otpornost na umor materijala [8].



Slika 8 – Usporedbe određenih karakteristika čelika, aluminija i kompozita [9]



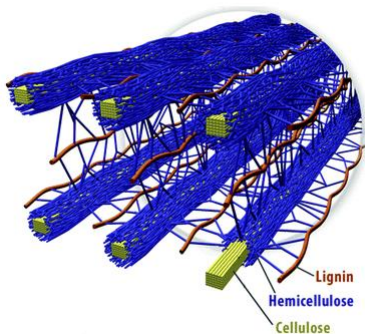
Ne samo da imaju odlična mehanička svojstva, kompozitni materijali imaju i mnogobrojne ostale pozitivne karakteristike: mala gustoća kompozitnih materijala povlači sa sobom konstrukcije i strojarske elemente manjih masa, pa automatski i manjom potrošnjom energije (npr. uporaba kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji rezultira manjom potrošnjom zrakoplovnog goriva, što je prikazano na slici 9, te tako smanjuje ugljični otisak, zagađenje i cijene letova za putnike), izrazita otpornost na atmosferu, koroziju, kiseline, lužine, vlagu, prašinu, čini ih pogodnim za strojne elemente koji praktički ne zahtijevaju održavanje, posebna dielektrična i magnetska svojstva koja se koriste unutar vojne industrije za proizvodnju konstrukcija koji su radarima praktički nevidljive na način da u potpunosti apsorbiraju mikrovalove radara i pretvore tu energiju u toplinu, ili pak destruktivnom interferencijom valova ponište apsorbirane mikrovalove. Na temelju ovoga možemo zaključiti kako kompozitni materijali imaju odlična prigušujuća svojstva, ali i njihova prirodna frekvencija je vrlo visoka u odnosu na ostale konvencionalne materijale, što otežava da dođe do rezonancije neke konstrukcije. [9]



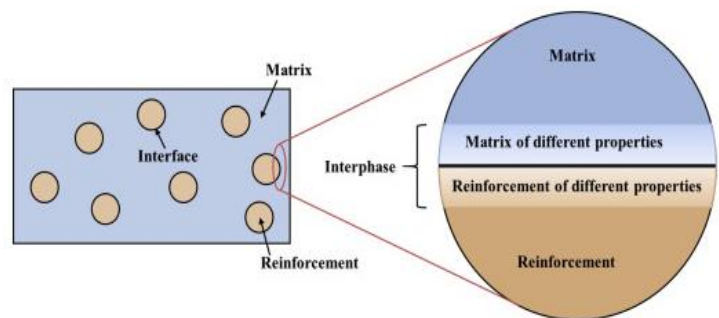
Slika 9 – Potrošnja zrakoplovnog goriva kroz godine [24]

## 2. Polimerni kompoziti

Najpoznatija i najšire korištena vrsta kompozitnih materijala, polimerni kompoziti, definirani su kao kompoziti čija je matrica isključivo polimerna, dok ojačala mogu, ali i ne moraju biti polimerna. Kombinacijom polimera s drugim materijalima, od kojih su najčešći staklo, ugljik ili pak neki drugi polimer, dobivamo polimerne kompozite sa širokim spektrom karakteristika. Tipični primjeri sintetskih polimernih kompozita su npr. kompoziti čije su duromerne ili plastomerne matrice ojačane ugljičnim, staklenim ili nekim drugim vlaknima. Neki od polimernih kompozita koje možemo susresti u prirodi jesu npr. drvo (celulozna vlakna služe kao ojačalo, dok lignin služi kao matrica, odnosno, povezuje celulozna vlakna skupa, a oboje su također polimeri – prikazano na slici 10) i kosti (kalcij-fosfatni minerali unutar kosti imaju uloga ojačala, dok kolagen ima ulogu polimerne matrice koja spaja kristale) [10]. Ako detaljnije promatramo kompozitne materijale, možemo uočiti i treću fazu, odnosno konstituent, a to je takozvana inter-faza ili međufaza. Zbog kompleksnih fizikalnih i kemijskih razloga prilikom procesa povezivanja, mikroskopski se može utvrditi kako se međufaza svojstveno razlikuje i od ojačala i od matrice – prikazano na slici 11. To inter-fazno područje u direktnoj je korelaciji s mehaničkim i strukturnim svojstvima kompozitnoga materijala u cjelini [9]. Cilj je izrade kompozitnih materijala proizvesti takav materijal koji će svojim svojstvima (čvrstoća, žilavost, krutost, dimenzijska stabilnost i ostala svojstva materijala) adekvatno odgovarati unaprijed postavljenim zahtjevima i kriterijima proizvoda. Drugi je cilj također postići pristupačnu cijenu, te unaprijediti i razviti proizvodne tehnologije, odnosno, procese koji će proizvoditi polimerne kompozite.



Slika 10 – Nanostruktura drva [25]



Slika 11 – Prikaz međufaze [26]

## 2.1. Vrste polimernih matrica

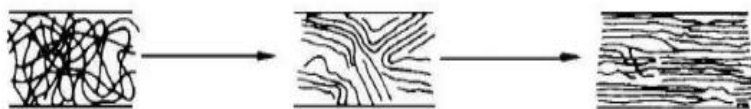
Kao što smo i prije naveli, polimerne matrice možemo svrstati u dvije glavne kategorije: termoaktivne (engl. *thermosetting*) matrice, odnosno duromerne matrice i termoplastične (engl. *thermoplastic*) matrice, odnosno, plastomerne matrice. Pod duromerne smole spadaju poliestereske smole, vinilester smole, epoksidne smole, bimaleimidne smole, poliamidne smole i ostale. Navedene su matrice, među polimernim matricama, najzastupljenije na tržištu. Duromerne su smole prvenstveno niskoviskozne, no kemijskim reakcijama povezivanja polimernih lanaca dobivamo trodimenzionalnu povezanu strukturu. Ovaj se proces naziva umrežavanje polimera. Polimerni kompoziti s duromernim matricama, baš zbog svoje trodimenzionalno umrežene strukture, pokazuju veću dimenzijsku postojanost i veći otpor na povećane temperature. Važno je napomenuti kako je ovaj proces umrežavanja kod duromernih smola nepovratan, tj. jednom kada se te smole umreže, ne mogu se ponovno unosom topline omekšati i preoblikovati za razliku od plastomera. U skupinu plastomernih smola pripadaju neki zasićeni poliesteri, polieterimidne smole, poliamid-imidne smole, polifenilne smole, polieter-eter-ketonske (PEEK) smole i ostale. Hlađenjem se dobivaju amorfnе, polu-kristalne (kristalaste) i kristalne čvrste strukture. Stupanj kristalnosti strukture u direktnoj je povezanosti sa svojstvima matrice unutar samog polimernog kompozita, pa tako i sa finalnim svojstvima samog proizvoda. Kao što je i prije spomenuto, ovaj je proces reverzibilan, odnosno, plastomeri se mogu ponovno unosom topline preoblikovati i na taj način reciklirati. Iako nisu toliko kemijski stabilne i otporne na povećane/snižene temperature u usporedbi s duromernim smolama, plastomerne su smole žilavije, te su tako otpornije na krhke lomove. Novije i naprednije termoplastične smole, npr. PEEK smole, imaju veći temperaturni raspon rada nego obični plastomeri. Ovakve smole imaju prednost za budući razvoj jer ih je jednostavnije oblikovati, ali i vrlo bitna činjenica jest da se mogu reciklirati, tj. preoblikovati i nakon povezivanja [11]. Na slici 12 možemo usporediti neka svojstva i preradbene karakteristike plastomernih i duromernih smola.

VRSTA SMOLE	Preradbena temperatura	Vrijeme preradbe	Radna temperatura	Otpornost na otapala	Žilavost
Duromerna	Niska	Visoka	Visoka	Visoka	Niska
Očvršćena duromerna	↑	↓	↑	↑	↓
Slabo umrežena plastomerna	↑	↓	↑	↑	↓
Plastomerna	Visoka	Niska	Niska	Niska	Visoka

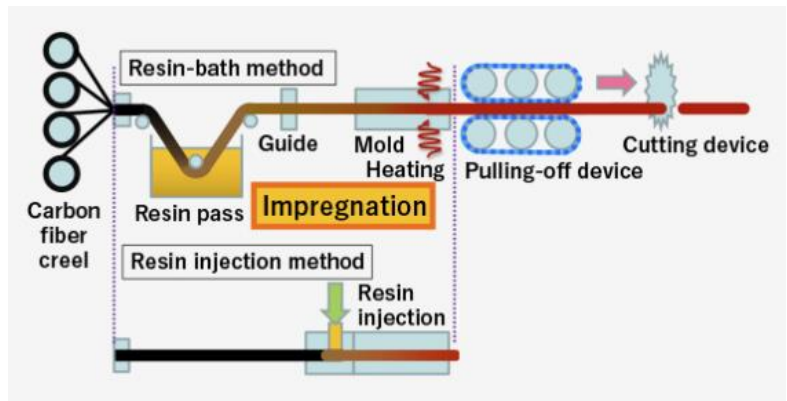
Slika 12 – Preradbene karakteristike i svojstva duromernih i plastomernih smola [11]

## 2.2. Procesi izrade i vrste vlakana

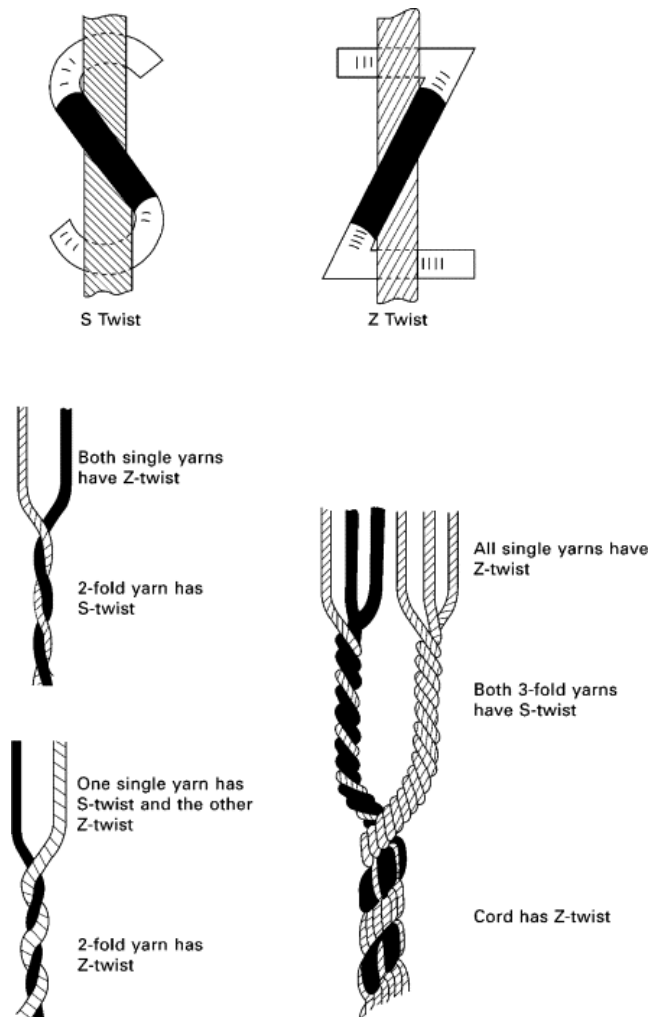
Obzirom da su vlakna najčešća i najzastupljenija vrsta ojačala koja se koriste za ojačanje kompozitnih materijala, najveći će fokus biti na njima. Proces izrade vlakana za kompozitne materijale vrlo je važan zbog toga što poboljšava sama svojstva vlakana, koja su glavni nosilac opterećenja unutar neke konstrukcije ili strojaruskog elementa. Proces izrade vlakana započinje od pređe, tj. dugog kontinuiranog spoja upredenih ili uvijenih vlakana, te pređu možemo zamisliti kao “sirovi“ materijal [10]. Pređe se ne koriste izravno kao ojačala, već se prethodno moraju obraditi kako bi se dobila vlakna boljih svojstava, a to se postiže različitim procesima ovisno o vrsti pređe, te željenim završnim svojstvima vlakana. Procesi kao što su uvijanje, pletenje i teksturiranje pređi znatno utječu na finalna vlakna. Pređa se sastoji od dugih i kraći vlakana koja su usmjerena u različitim smjerovima, te zauzimaju već volumen. Takva prolaze kroz sustav valjaka različitih promjera i različitih brzina okretanja iz razloga kako bi se početna vlakna, pod utjecajem sile i topline, “izravnala“, tj. usmjerila u jednome pravcu (slika 13), te bi to rezultiralo poboljšanjem mehaničkih svojstava kao npr. čvrstoće i žilavosti. Pritiskom valjaka mijenjaju se dimenzije vlakana, prije svega debljina, što kasnije omogućava veću količinu vlakana u matrici. Preoblikovanje teksture vlakana stvaranjem trajnih (plastičnih) deformacija postiže se pomoću valjaka koji imaju razne uzorke na svojoj površini, te kombinacijom zagrijavanja i hlađenja. Ovakav se proces naziva teksturiranje vlakana, te im se na taj način povećava volumen i elastičnost, a također se i poboljšavaju termo-izolacijska svojstva, pa bolje zadržavaju npr. zrak i toplinu. Na kraju procesa, vlakna mogu prolaziti kroz drugi sustav valjka, u kojem se površinski impregniraju, odnosno prekrivaju raznim kemijskim aditivima – prikazano na slici 14. Oni zaštićuju vlakna od površinskih oštećenja, ali ono najvažnije, osiguravaju dobro prijanjanje za matricu unutar kompozita [10]. Vlakna se završno mogu pletiti u raznim kombinacijama zbog postizanja željenih mehaničkih svojstava na način da se drugačije orijentiraju, npr. polovica vlakana će se kretati u okomitom smjeru, dok druga polovica će biti usmjerena u vodoravnom smjeru. Također, može postojati i kombinacija pletenja (slika 15) vlakana različitih mehaničkih svojstava, neka koja su čvršća, a druga koja su pak elastičnija i žilavija, te se na taj način mogu dobivati ojačavala izuzetnih svojstava.



Slika 13 – Usmjeravanje vlakana u pređi [27]



Slika 14 – Jedna od metoda impregniranja vlakana [28]



Slika 15 – Različite kombinacije pletenja vlakana [11]

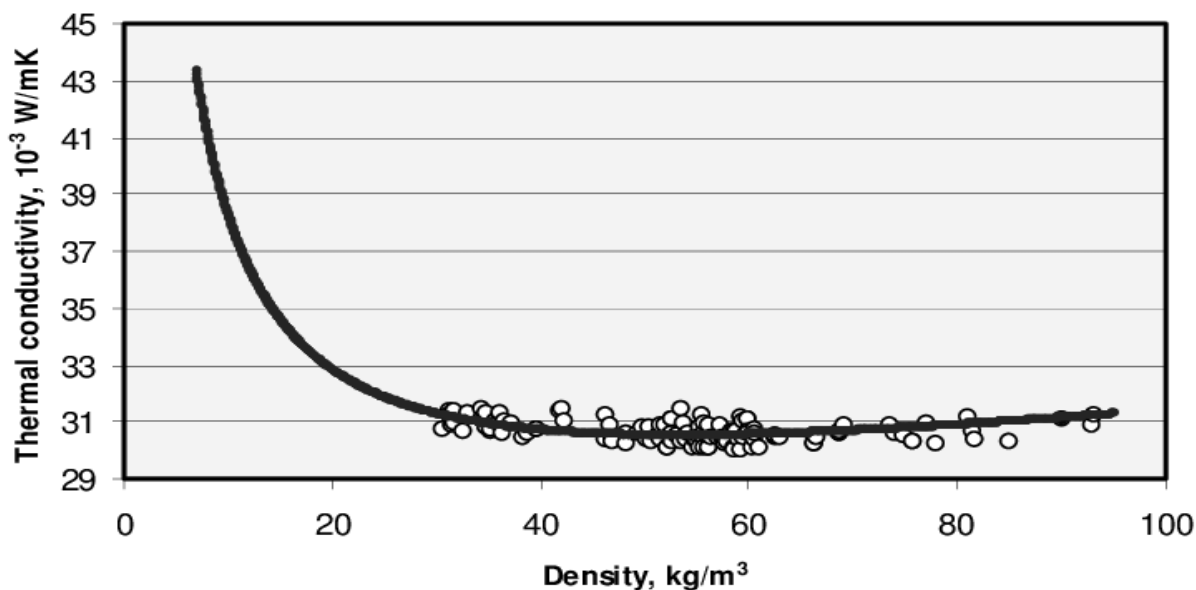
### 2.2.1. Staklena vlakna

Staklena su vlakna izrazito dobar anorganski materijal zbog svoje nezapaljivosti, dobre otpornosti na povišene temperature, ne provode električnu energiju, odnosno, vlakna su električni izolatori, te imaju visoki modul elastičnosti. Za razliku od stakla, staklena su vlakna zahvaljujući velikom omjeru duljine i malog promjera (u rasponu od 10  $\mu\text{m}$  do 27  $\mu\text{m}$ ) elastična i fleksibilna, te se zbog toga mogu savijati npr. oko valjka, te se od njih mogu plesti razne teksture.  $\text{SiO}_2$  u kombinaciji s raznim metalnim oksidima (npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  i  $\text{CaO}$ ) čini bazu/temelj staklenih vlakana. Dodavanjem metalnih oksida rezultira poboljšanjem preradbenih svojstava staklenih vlakana na način da snižavaju temperaturu taljenja, snižavaju tendenciju kristalizacije komponenata, te na taj način održavaju viskoznost taljenog stakla koje će se postupkom izvlačenja i hlađenja preoblikovati u staklena vlakna.  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $\text{K}_2\text{O}$ ) snižava temperaturu taljenja, poboljšava viskoznost što rezultira lakšim izlaženjem nepoželjnih mjehurića iz rastaljene smjese [8].  $\text{BeO}$  povećava modul elastičnosti i čvrstoću, no s njim je vrlo opasno rukovati jer su čestice tog oksida izrazito štetne za ljude, odnosno, karcinogene su.  $\text{B}_2\text{O}_3$  poboljšava otpornost na kiseline, snižava temperaturu taljenja i poboljšava viskoznost, no snižava modul elastičnosti i čvrstoću. Postoji mnogo različitih vrsta i podjela staklenih vlakana, npr. podjela prema veličini promjera staklenih vlakana, prema određenim mehaničkim svojstvima, prema drugim svojstvima kao što su otpornost na lužine, kiseline, na povećanu temperaturu, na koroziju [8]. Također i postoji podjela prema duljini vlakana, odnosno, jesu li vlakna kontinuirana ili isprekidana, odnosno rezana. Jedan vrlo dobro poznati primjer materijala gdje su korištena staklena vlakna jest staklena vuna. Staklena je vuna (slika 16) kombinacija staklenih vlakana i vrlo male količine nekog veziva, npr. bakelita. Između staklenih je vlakana zarobljena velika količina sitnih zračnih džepova što rezultira odličnim termo-izolacijskim svojstvima.



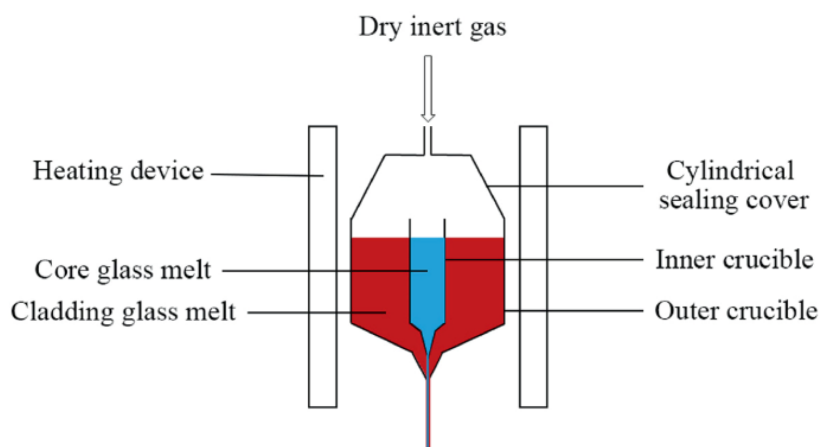
Slika 16 – Staklena vuna kao toplinski izolator [29]

Termo-izolacijska svojstva staklene vune ovisit će o njezinoj debljini, a i gustoći. Naravno, što su debljina i gustoća staklene vune veće, to će gubitak topline, tj. toplinska vodljivost, biti manja, i to eksponencijalno (prikazano na slici 17).



Slika 17- Prikaz ovisnosti toplinske vodljivosti staklene vune o njezinoj gustoći [30]

Najzastupljeniji proces izrade staklenih vlakana je izvlačenjem niti iz rastaljenog stakla velikom brzinom (engl. *crucible drawing*) [8]. Postoje i mogućnosti dvostrukog taljenja (slika 18), odnosno, dva lonca za taljenje smještenih jedan u drugome. Unutarnji služi za taljenje stakla, dok je u vanjskome rastaljeni materijal za oblaganje staklenih vlakana. Istovremenim izvlačenjem se u sredini formira stakleno vlakno koje je na površini obloženo/prekriveno dodatnom zaštitom.



Slika 18 – Shema proizvodnje obloženih staklenih vlakana [13]

## 2.2.2. Ugljična vlakna

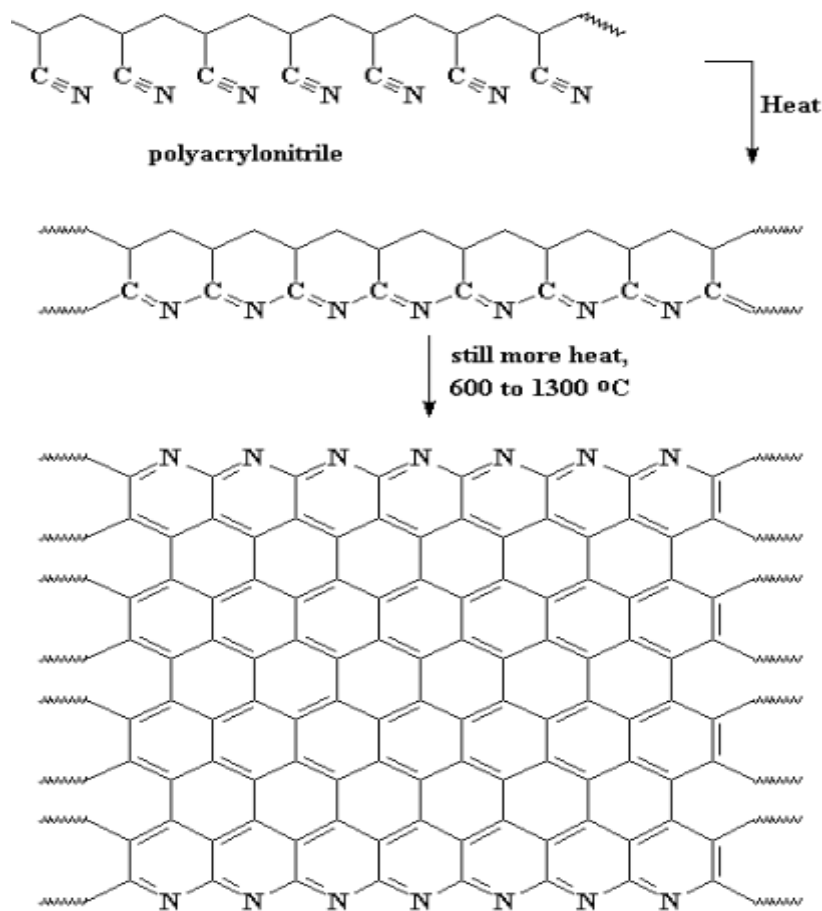
Ugljična ili karbonska vlakna imaju izuzetno visoku čvrstoću i modul elastičnosti, ali i nisku gustoću, što ih čini boljim izborom za upotrebu u zrakoplovnoj, svemirskoj i vojnoj industriji. Proizvode se od vlakana kao što su Rayon vlakna (iako se proizvode sintetskim putem, njihova je baza celuloza, što ih čini polu-sintetskim vlaknima), poliakrilonitrilna (PAN) vlakna i na bazi katranske smole u zaštitnoj atmosferi argona ili dušika. Prvi i najstariji proces izrade ugljičnih vlakana bio je od celuloznih vlakana, no zahtijevao je složenu i skupu opremu, te je sam proces bio skup. Karbonizacijski koeficijent, koji nam govori o dobivenom masenom udjelu ugljika za daljnju upotrebu u procesu, također nije bio visok, od 20% do 40%. Najveći karbonizacijski koeficijent je kod procesa izrade od katranske smole (95%-99%), ali najjednostavniji i danas najšire korišten je proces izrade od PAN vlakana – prikazan na slici 20, s karbonizacijskim koeficijentom od 90% do 95%. PAN proces sastoji se od sljedećih koraka: 1.oksidacija, 2.karbonizacija, 3.grafitizacija i 4.površinska obrada [8]. Oksidacija je proces kojim linearni polimerni lanci PAN vlakana, na temperaturi od 200°C do 300°C, djelomično oksidiraju u šesterokutni povezani prsten, prikazano na slici 19, koji može podnijeti veće temperature karbonizacije [8]. Takva prstenasta struktura se neće raspasti na povećanim temperaturama koje slijede u procesu izrade ugljičnih vlakana, a ujedno i zadržava morfologiju vlakana i visoka mehanička svojstva. Tokom oksidacije, vlakna su pod konstantnim jednosmjernim opterećenjem kako bi se zadržala, a i poboljšala orijentacija tek nastalih šesterokutnih prstena [8].



Slika 19 – Proces oksidacije kojim nastaju šesterokutni prsteni [14]

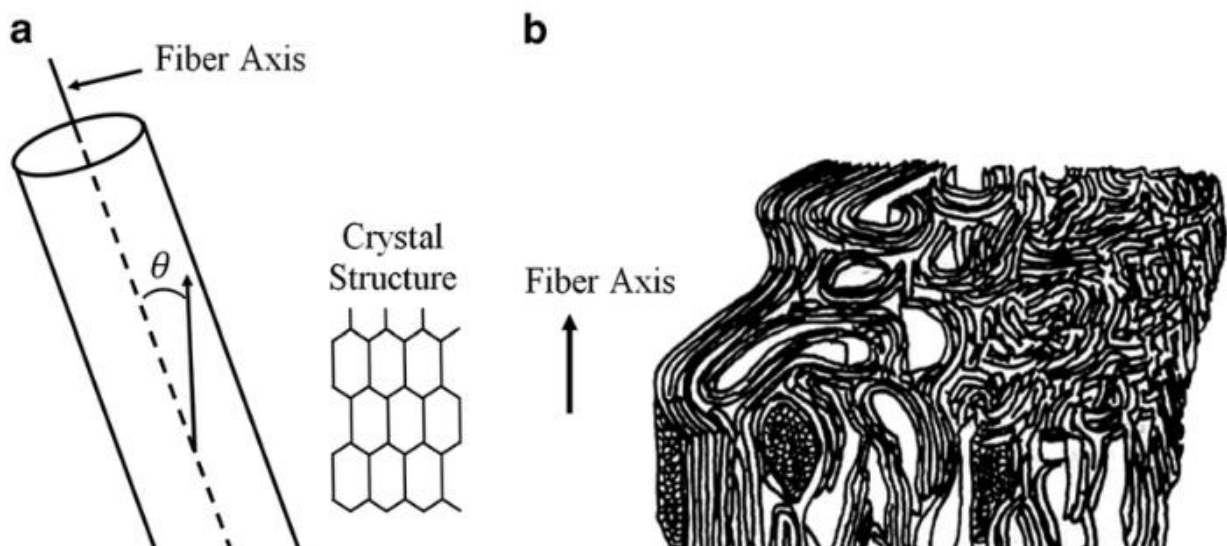
Tada slijedi karbonizacija na temperaturi do 1500°C uz zaštitnu atmosferu dušika u kojoj se putem pirolize nestabilne strukture i drugi elementi kao što su kisik, dušik i vodik izbacuju van. Istovremeno se događa dvodimenzionalno spajanje ugljičnih prstena u grafitnu kristalnu strukturu. Naziva se karbonizacijom zbog velikog udjela čistog ugljika u svojoj strukturi, većeg od 92% [8]. Također se zbog visoke temperature oslobađaju i drugi kemijski spojevi kao što su amonijak, ugljikov dioksid, metan i ostali, te se ti plinovi moraju maknuti iz procesa kako se kasnije ne bi kondenzirali na vlakna i tako naštetili njihovoj strukturi i mehaničkim svojstvima.





Slika 20 – Promjena kemijske strukture PAN vlakana pod utjecajem temperature [31]

Nakon što smo postigli prstenastu strukturu karbonizacijom, slijedi grafitizacija. Ona je potrebna kako bi se povećala orijentiranost grafitne strukture u aksijalnom smjeru, odnosno u smjeru kretanja vlakana, i kako bi se također povećao modul elastičnosti. Ovaj se proces odvija u atmosferi argona, a ne dušika zbog toga što se iznad 2000°C stvara cijanid (CN skupina). Procesom se grafitizacije na temperaturi između 2000°C i 3000°C povećava uređenost kristalne strukture, odnosno orijentiranost dvodimenzionalnih grafitnih mikrostrukture (sačinjenih od velikog broja šesterostranih prstena) u aksijalnom smjeru – smjeru kretanja vlakana. Naravno, uređenost nije 100 postotna i savršena, pa tako postoje kutovi otklona karbonskih vlakana u odnosu na pravac kretanja vlakana – prikazano na slici 21. Što su kutovi otklona manji, odnosno što je kristalna struktura savršenija i bolje orijentirana, to su i mehanička svojstva karbonskih vlakana bolja. Karbonska vlakna imaju listićavu strukturu, te se može jasno vidjeti mikroskopska razlika između površine i unutrašnjosti, odnosno jezgre vlakana. Površina je bolje orijentirana, te kut otklona postepeno raste kako se približavamo jezgri.



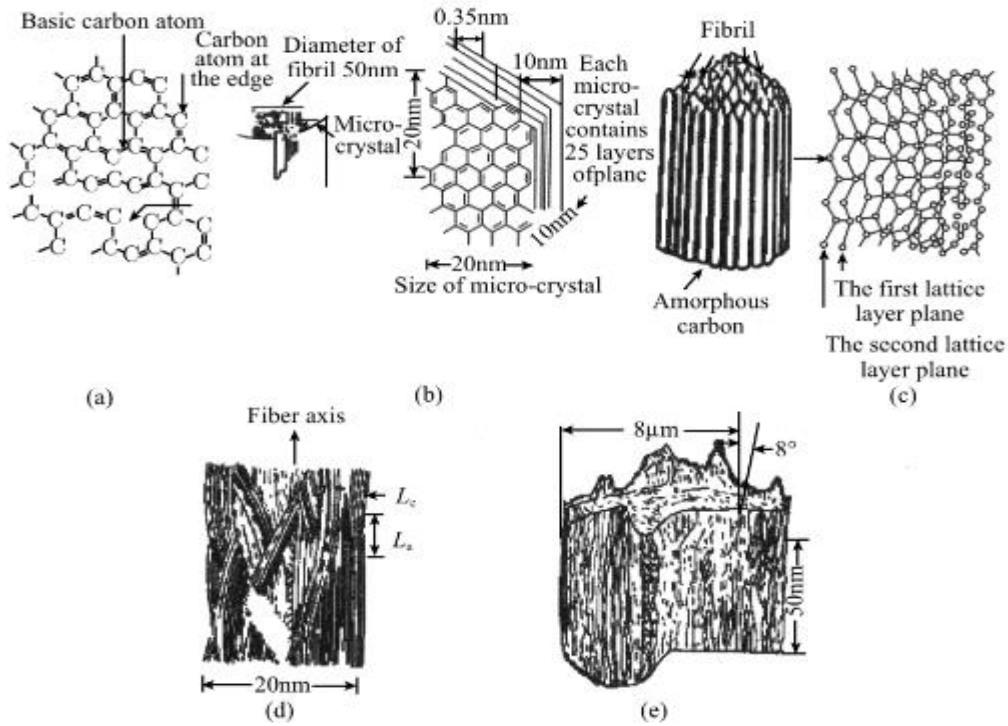
Slika 21 – Kut otklona vlakana [32]

Posljednji proces u proizvodnji karbonskih vlakana je dodatna obrada površine. Najbitnije je poboljšati svojstvo prijanjanja za matricu, te osigurati inertnost površine vlakana nakon njihove proizvodnje. U dvodimenzionalnoj strukturi ugljikovi su atomi međusobno povezani kovalentnim vezama, dok su u trećoj dimenziji povezani Van der Waalsovima, koje su izuzetno slabije, te je razmak između atoma veći [8]. Zbog toga su ugljikova vlakna anizotropni materijali i lošije podnose opterećenje u trećoj dimenziji. Usporedbu udaljenosti veze i modula elastičnosti možemo vidjeti na slici 22, te da dobijemo osjećaj razlike čvrstoće između kovalentne veze i Van der Waalsovih sila. Ugljično je vlakno, promjera od 6  $\mu\text{m}$  do 8  $\mu\text{m}$ , sačinjeno od više sitnijih niti (engl. *fibril*) razmjera oko 20 nm u širini i par stotina nm u duljini. Te niti nisu usporedne (paralelne) s osi vlakana, te između njih postoje nanometarski razmaci.

Location	Valence bond	Bond length (nm)	Bond strength (kcal/mol)	E(GPa)
In-plane	Covalent bond	0.142	150	1035
Interlayer	Secondary bond	0.335	1.30	36

Slika 22 – Usporedba svojstava kovalentnih veza i Van der Waalsovih sila [8]

Kut otklona, koji je ranije spomenut, između tih niti je oko  $8^\circ$ , no povećanjem temperature tokom proces izrade karbonskih vlakana, kut otklona postaje sve manje i automatski raste modul elastičnosti [8]. Detaljniji prikaz mikrostrukture ugljičnih vlakana i niti možemo vidjeti na slici 23.



Slika 23 – Mikrostruktura ugljičnih vlakana i niti [8]

Kod ove se teme spominju i ostali izrazi kao idealna grafitna struktura, mikrokristalna struktura grafita, udaljenosti između slojeva, promjer i debljina grafitnog kristala, stupanj grafitizacije, no detaljnijom obradom tih pojmova ušli bismo preduboko u temu. Na temperaturi grafitizacije 2500°C stvaraju se karbonska vlakna prve vrste (engl. *Type I*) sa visokim modulom elastičnosti (400 GPa do 600 GPa) i najvećom gustoćom, ali sa slabijom čvrstoćom od karbonskih vlakana druge vrste (engl. *Type II*). Maksimalna se čvrstoća postiže na temperaturi od 1700°C, te daljnjim porastom temperature, čvrstoća pada [8]. Usporedbu svojstava karbonski vlakana prve i druge vrste možemo vidjeti na slici 24.

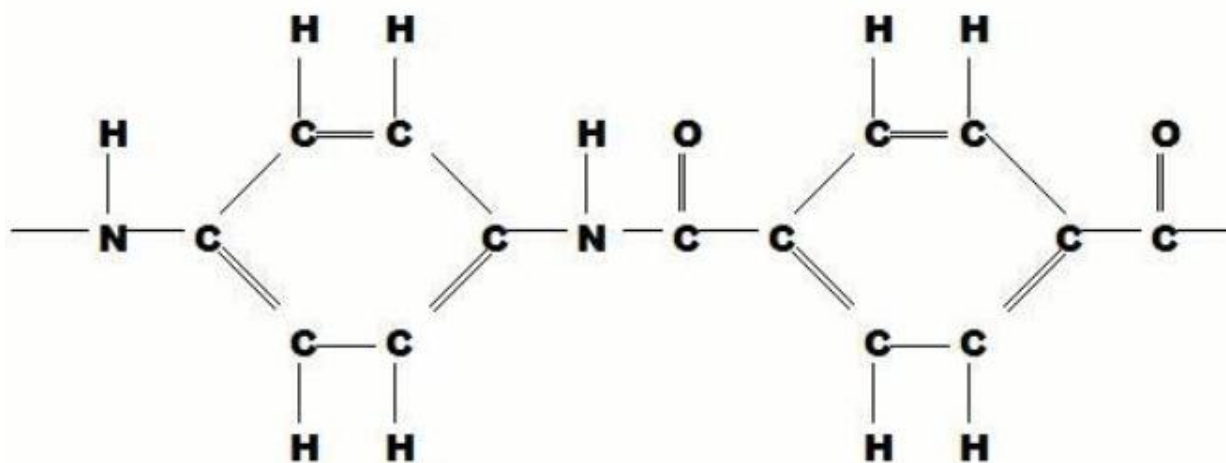
	Type A (Common, Medium strength)	Type II	Type I
HTT (°C)	1000	1500	2500
$\rho_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.73	1.75	1.9~2.0
$\sigma_{fu}$ (GPa)	2.1	2.5	1.4~2.1
$E_f$ (100GPa)	2	2.2~2.5	3.9~4.6
$\varepsilon_{fu}$ (%)	1.2~1.5	1.0	0.5

Slika 24 – Karakteristike ugljičnih vlakana prve i druge vrste [8]

Uzmemo li u obzir modul elastičnosti od karbonski vlakana Thorne1 120-S koji je jednak 830 GPa, možemo ga usporediti s pritiskom vode na dubini od otprilike 85 000 kilometara. Zahtjevi za ugljičnim vlaknima uglavnom se pojavljuju u razvijenim zemljama; SAD su zaslužne za 50% potražnje, EU za 20%, dok su ostale zemlje Japan, Korea i Taiwan. Karbonska se vlakna uglavnom koriste u zrakoplovnoj, svemirskoj i vojnoj industriji zbog male gustoće i visokog modula elastičnosti.

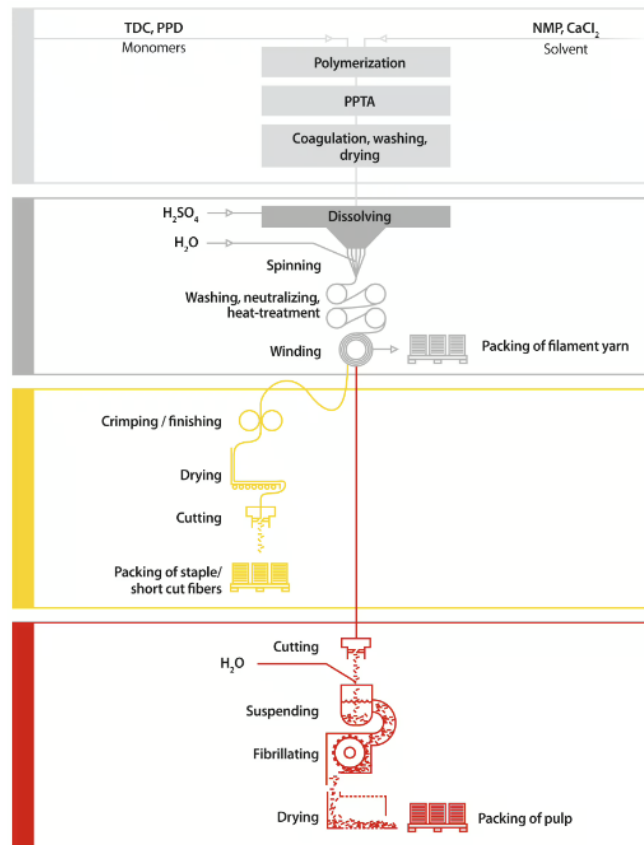
### 2.2.3. Aramidna vlakna

Poliamidna organska vlakna, bolje znana uz trgovački naziv Kevlar (Arawin, Twaron), javljaju se početkom 20. stoljeća u SAD-u, u kompaniji zvanom DuPont. Dok staklena vlakna nemaju dovoljno veliki modul elastičnosti, a kod karbonskih vlakana nije moguće postići plastičnu deformaciju, tj. krhka su, aramidna vlakna imaju dobru kombinaciju visoke čvrstoće, modula elastičnosti, žilavosti, te nisku gustoću [8]. Izvanredna mehanička svojstva vlakana rezultat su sljedećih obilježja: **1.** visok stupanj kristalne uređenosti, **2.** orijentiranost u jednome smjeru i **3.** malen broj nesavršenosti u smjeru vlakana. Aramidna vlakna možemo podijeliti u dvije glavne skupine: meta-aromatska aramidna vlakna (engl. *meta-aromatic*) i para-aromatska aramidna vlakna (engl. *para-aromatic*). Glavna je razlika da meta-aromatska aramidna vlakna imaju polukristalastu strukturu (npr. Nomex vlakna), dok para-aromatska vlakna imaju pravilnu kristalnu strukturu (npr. Kevlar vlakna). Aramidna su vlakna zapravo dugi lanci poliamida (prsteni benzena naizmjenično spojeni amidnim skupinama koje sadrže ugljik – prikazano na slici 25).



Slika 25 – Prsteni benzena koji čine aramidna vlakna [33]

Postupak pripreme aramidnih vlakana sastoji se od 2 koraka: 1. polikondenzacije p-fenilendiamina i tereftaloil klorida u PPTA i 2. pređenja vlakana [8]. Nakon toga slijedi izrada otopine pomoću skoro 100 postotne sumporne kiseline. Dobivena kapljevina ima kristalastu strukturu iz koje se van vuku vlakna. Izvučena se vlakna moraju oprati vodom, kako bi se neutralizirala kiseline, i osušiti. Ovim postupkom se dobiva vrsta Kevlar-29, a ako se dodatno toplinski obradi u atmosferi dušika na temperaturi od 550°C, dobiva se Kevlar-49 koji ima povećanu čvrstoću [8]. Proces izrade aramidnih vlakana japanske Teijin kompanije prikazan je na slici 26.

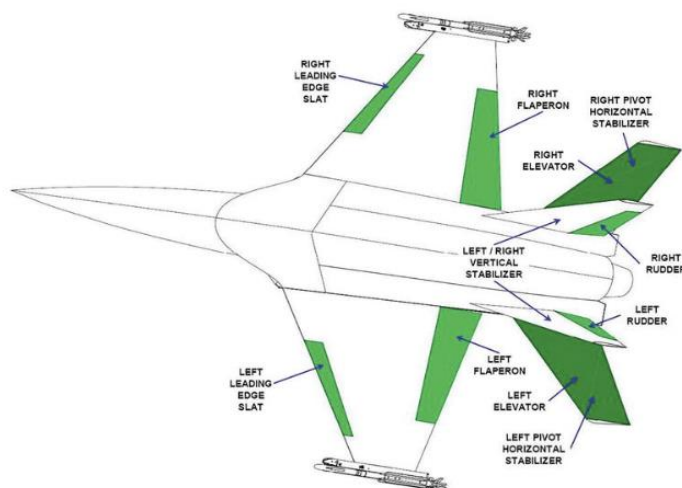


Slika 26 – Proces izrade aramidnih vlakana tvrtke Teijin [34]

Aramidna vlakna, kao i svaka druga, imaju anizotropna svojstva zbog toga što u linearnom lancu u smjeru kretanja vlakana, molekule su povezane jakim kovalentnim vezama, dok su poprečno molekule povezane slabim vodikovim vezama. Veliki broj polimernih lanaca po jedinici površine, a i poprečne slabije vodikove veze, razlog su veće žilavosti aramidnih vlakana u usporedbi s npr. ugljičnim vlaknima. Svojstva koja čine aramidna vlakna posebna su izvrsna otpornost na povećane temperature (do 500°C), negativan temperaturni koeficijent ekspanzije, inertna su i kemijski otporna, vatrootporna su i samo-gasiva, zbog čega se i koriste u izradi npr. vatrogasne odjeće. Najveći nedostatak aramidnih vlakana jest loše povezivanje s matricom, pa slaba tlačna čvrstoća u odnosu na vlačnu čvrstoću i mogućnost apsorpcije vlage do 8%, što rezultira povećanjem mase, pa se iz tog razloga impregniraju hidrofobnim premazima. Zbog male gustoće, aramidna se vlakna koriste u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, te za primjer možemo navesti zrakoplov L-1011 kompanije Lockheed, koji sadrži nešto više od jedne tone aramidnih kompozita, no čime je smanjena ukupna masa zrakoplova za oko 360 kg [8]. Također su, u kombinaciji s kompozitima ojačanim ugljičnim vlaknima, korišteni u proizvodnji zrakoplova Boeing 767 i 777. U vojnoj se industriji pak koriste pri izradi neprobojne odjeće i ostalih vrsta neprobojnih zaštita protiv balističkih projektila, a funkcioniraju tako da se koncentrirana energija udarca metka/projektila rasprši površinski na više slojeva aramidnih vlakana (Kevlar).

## 2.2.4. Ostale vrste vlakana

Borna su vlakna prvi puta bila proizvedena u SAD-u na polovici 20. stoljeća, te su se prvenstveno koristila u kompozitnim materijalima s polimernim i metalnim matricama. Koristila su se u zrakoplovnoj (F-14 Tomcat, F-15 Eagle, B-1 Lancer) i svemirskoj industriji (Rockwell International Space Shuttle, World View Satellite) sve do pojave ugljičnih vlakana, zbog toga što je proces izrade bornih vlakana složeniji i skuplji u usporedbi s procesom izrade karbonskih vlakana. Zbog visoke temperature tališta od 2050°C, te zbog svoje krhkosti i izrazito visoke tvrdoće koja je usporediva s tvrdoćom dijamanta (na Mohsovoj ljestvici tvrdoće, dijamantu kao referentnoj točki, odnosno najtvrdem mineralu, pridružena je vrijednost 10, a Boru 9.5), borna se vlakna ne mogu proizvoditi procesom taljenja i vučenja (engl. *drawing*) [8]. Izrađuju se kemijskim taloženjem iz parne faze na npr. wolframove ili aluminijske žice, što ih prema definiciji teoretski čini kompozitnim vlaknima, no ona se i dalje koriste kao “obična“ vlakna, tj. ojačanja u matricama. Najveća prednost bornih vlakana je longitudinalna (u smjeru kretanja vlakana) tlačna čvrstoća i njihovo svojstvo dobrog prijanjanja za matricu, no zbog visokih troškova proizvodnje, uglavnom su zamijenjena ugljičnim vlaknima. Na slici 27 prikazani su neki dijelovi F-15 borbenog zrakoplova, pri čijoj su se izradi koristila i borna vlakna, a to su vertikalni/horizontalni stabilizatori i kormilo (engl. *rudder*).



Slika 27 – Prikaz vertikalnih i horizontalnih stabilizatora koji sadrže borna vlakna [35]

Silicijev karbid (SiC) iako vrlo rijedak materijal na Zemlji, a česta pojava u svemiru, prvi je puta bio iskorišten na početku 20. stoljeća za proizvodnju svjetlećih dioda. Strojarski važnije svojstvo jest mogućnost izrade vlakana za ojačavanje metalnih i keramičkih matrica, a nešto rjeđe polimernih. Postoje dvije metode proizvodnje vlakana od silicijeva karbida: 1. taloženje iz parne faze (engl. *vapor deposition*) na jezgru u obliku žice malog promjera (slično kao i borna vlakna),

te 2. izvlačenjem iz organskih spojeva [8]. Dodavanjem katalizatora, tj. tvari koje ubrzavaju kemijsku reakciju, i zagrijavanjem polikondenzacije stvara se polimer čiji je glavni lanac na bazi silicija i ugljika. Tada se polimeri otopi, te se iz otopine van vuku vlakna (sličnost s procesom dobivanja aramidnih vlakana). Slijedi oksidacija i karbonizacija kako bi se dobila poboljšana svojstva. Vlakna silicijeva karbida ne samo da imaju odlična mehanička svojstva (prikazana na slici 28, te su uspoređena svojstva vlakana na jezgri od ugljikove i wolframove žice), već su dobro kemijski postojana, te imaju izvrsnu otpornost na koroziju. Stavljanjem vlakana u različite otopine kao što su klorovodična kiselina, sumporna kiselina, dušična kiselina i natrijev hidroksid (lužina) na temperaturi od 80°C i vremenskom periodu od 24 sata, gubitak je mase bio manji od 1% [8]. Slično kao i kod karbonskih vlakana, vlakna silicijeva karbida imaju visoku čvrstoću i modul elastičnosti, te odlično podnose povećane temperature i do 1300°C, no razlika je u tome da imaju 2 puta veću tlačnu čvrstoću u odnosu na ugljična vlakna. Koriste se najčešće u energetske i svemirskoj industriji za izradu komponenata koje moraju podnositi visoke temperature i naprezanja dulji vremenski period (plinske turbine, izmjenjivači topline, zaštitne barijere između nuklearnog goriva i hlađenja, te zaštitne barijere za apsorpciju zračenja unutar nuklearnih reaktora; Izvor: <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-25>).

Properties	SiC(W core)		SiC(C core)	
	1	2	1	2
$d_f$ (μm)	102	142	102	142
$\sigma_{fu}$ (MPa)	3350	3300~4460	2410	3400
$E_f$ (GPa)	434~448	422~448	351~365	400
$\sigma_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	3.46	3.46	3.10	3.0
Surface coating	Rich carbon	C+TiB <sub>x</sub>	—	Si/C

Slika 28 – Mehanička svojstva silicijeva karbida s wolframovom i ugljičnom jezgrom [8]

Polietilen, jedan od najzastupljenijih polimera na tržištu, 1975. je godine od strane Nizozemske tvrtke DSM (engl. *Dutch States Mines*) bio prvi puta korišten za izradu visokomolekulnih polietilenskih vlakana (u daljnjem tekstu kao UHMWPE, engl. Ultra High Molecular Weight Polyethylene). Kada pričamo o vlaknima, moramo spomenuti neke druge mjerne jedinice koje su se, a i još se danas, koristile u industriji vlakana. Iako ih je mnogo, spomenut ćemo cN/dtex i Rkm. cN je centinjutn, dok je dtex mjerna jedinica koja predstavlja linearnu gustoću vlakana, tj. količinu grama na 10 000 metara vlakna. Rkm je “Reisskilometer“ ili “Breaking-Kilometer što predstavlja onu duljinu vlakna u kilometrima koja bi pod svojom masom, kada bi se objesila, puknula. 1 cN/tex bilo bi jednako 1,02 Rkm, te jednako 10 cN/dtex. Krajem 20. stoljeća masovno su se proizvodila poznata UHMWPE vlakna, pod bolje znanim nazivom Dyneema, koja su imala samo 6,4 cN/dtex [8]. Toyobo, japanska kompanija koja se “udružila“ s nizozemskom kompanijom DSM, promovirala je svojstva Dyneema SK76 ( $\sigma_{fu} = 3,6$  GPa,  $E_f = 116$  GPa,  $\epsilon_{fu} = 3,8$  %,  $\rho_f = 0,97$

g/cm<sup>3</sup>), gdje treba obratiti pozornost na izuzetno nisku gustoću vlakana u usporedbi s drugim vlaknima. Tada je američka tvrtka Allied Signal Company kupila DSM-ov patent, te je počela proizvoditi također vlakna pod nazivom "Spectra". Mehanička svojstva vrste vlakana Spectra 1000 su:  $\sigma_{fu} = 3,09$  GPa,  $E_f = 172$  GPa,  $\epsilon_{fu} = 3,0$  %,  $\rho_f = 0,97$  g/cm<sup>3</sup>[8]. Kako bi polimerna vlakna imala dobra svojstva, moraju imati čim savršeniju kristalnu strukturu, orijentiranost u jednome smjeru i vrlo mali broj nesavršenosti u smjeru kretanja vlakana. Relativna molekulska masa UHMWPE je 10 do 60 puta veća u usporedbi s običnim PE. Postoje razne metode izrade takvim vlakana, a jedna od njih je ekstrudiranje krutine pod visokim pritiskom kroz kapilare, te se pod utjecajem napreznja postiže orijentiranost vlakana . Ovakvim se putem mogu postići vlakna s modulom elastičnosti od 720 cN/dtex [8]. Drugim, puno složenijim metodama u kontroliranim laboratorijima, mogu se postići vlakna s modulom elastičnosti i do 2700 cN/dtex [8]. Dodatnim se površinskim obradama (najčešće obrade vezane uz plazmu) vlakana poboljšavaju njihova adhezijska svojstva, što je veoma važno za dobro prijanjanje za smolastu matricu kompozitnim materijala. Najveće prednosti UHMWPE vlakana su izrazito visoka specifična čvrstoća, mala apsorpcija vlage, otpornost na UV zrake, kemijska stabilnost i otpornost na trošenje, no najveći nedostatak jest izrazito malo temperaturno radno područje od 100°C do 130°C [8]. Praktički da nema područja/industrija gdje se ova vlakna ne koriste: zaštite od balističkih projektila, zaštite na vojnim vozilima, visoko-čvrsta užad (slika 29), oprema u ronjenju, ribolovu, planinarenju, jedrenju, zaštitna tkanina otporna na zarezna djelovanja...

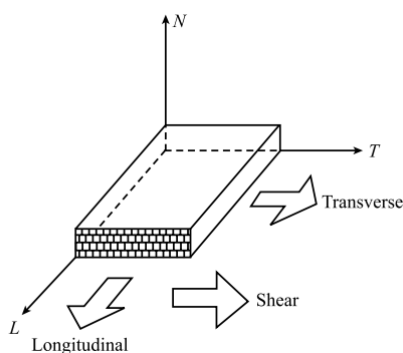


Slika 29 – Užad od UHMWPE [36]



### 3. Utjecaj parametara vlakana na čvrstoću kompozita

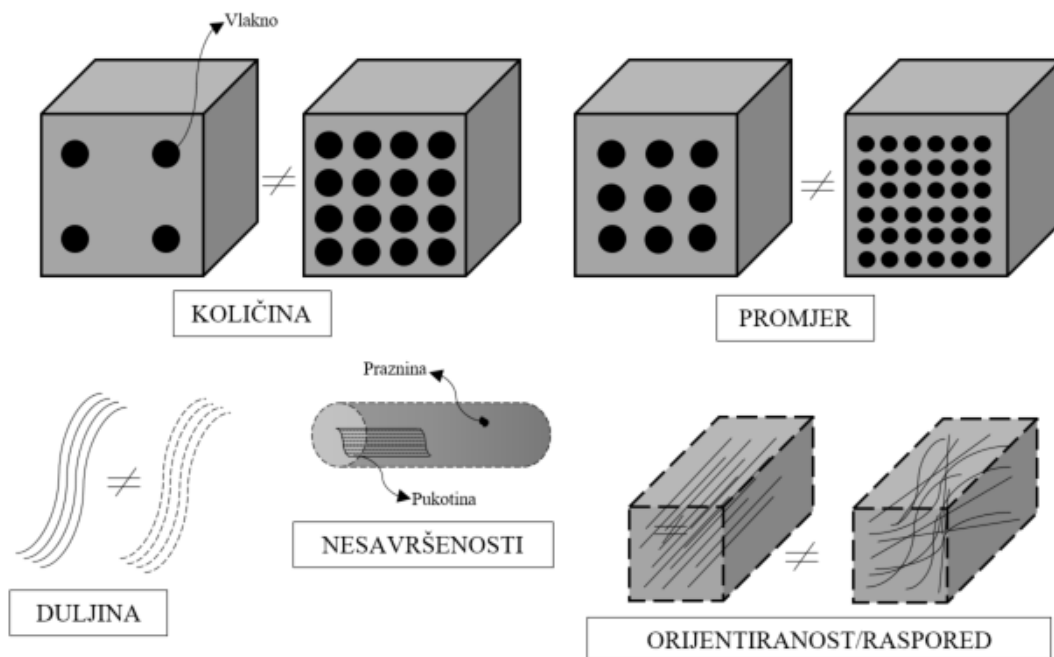
Proizvodi masovne potrošnje koja se koriste u svakodnevnoj upotrebi moraju posjedovati unaprijed određene karakteristike primjerene području upotrebe. Najznačajnija su mehanička svojstva materijala, jer ćemo na temelju njih odrediti za koju će se svrhu i u kakvim uvjetima određeni materijal koristiti (nije isto konstruiramo li stalak za bicikle, klupicu u parku, ogradu, ili pak dizajniramo noseću konstrukciju, brod ili zrakoplov). Na mehanička svojstva, kao što su npr. vlačna i tlačna čvrstoća, žilavost i Young-ov modul elastičnosti, unutar kompozitnih materijala utječu mnogobrojni parametri. Logično je kako će izravan utjecaj na gore navedena svojstva imati mehanička svojstva samih konstituenata, odnosno elemenata od kojih je sam kompozitni materijal izrađen, te njihova povezanost. Materijali od kojih se izrađuju matrice nemaju zadovoljavajuće vrijednosti mehaničkih svojstava kako bi se same koristile u konstrukcijske svrhe, pa se zato kombiniraju s ojačalima, najčešće vlaknima, kako bi im se poboljšala svojstva. Za početak, možemo kompozitni materijali, koji je ojačan jednosmjernim vlaknima, staviti u trodimenzionalni koordinatni sustav kako bismo bolje predočili njegov sastav u svim smjerovima – slika 30. Na slici je longitudinalni smjer nazvan L, tj. smjer orijentiranosti vlakana, a ujedno i najbitniji smjer, zatim je transverzalni (označen s T) ili poprečni smjer koji je za  $90^\circ$  zarotiran od smjera kretanja vlakana, te smjer kretanja slojeva, tj. smjer okomit na longitudinalno-transverzalnu površinu ili jednostavno, smjer normale N.



Slika 30 – Smjerovi naprezanja u kompozitnome materijalu [8]

Ovdje možemo razmatrati neka temeljna mehanička svojstva, a to su: **1.** longitudinalni modul elastičnosti  $E_L$ , GPa, **2.** longitudinalna vlačna čvrstoća  $\sigma_{Lu}$ , GPa, **3.** longitudinalni modul stlačivosti  $E_{-L}$ , GPa, **4.** longitudinalna tlačna čvrstoća  $\sigma_{-Lu}$ , GPa, **5.** poprečna tlačna čvrstoća  $\sigma_{-Tu}$ , GPa, **6.** longitudinalno-transverzalni modul smicanja  $G_{LT}$ , GPa, **7.** longitudinalno-transverzalna čvrstoća  $\tau_{LTu}$ , GPa i **8.** Poissonov omjer,  $\nu_{LT}$ , koji opisuje poprečnu deformaciju uzrokovanu longitudinalnim naprezanjem [8]. Postoje kompozitni materijali ojačani vlaknima u longitudinalno-transverzalnom smjeru, odnosno, neka su vlakna orijentirana longitudinalno, a

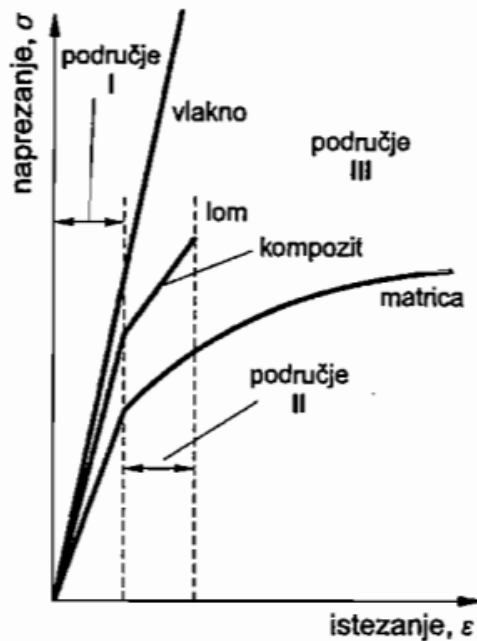
druga su pak poprečno usmjerena. Nazivaju se križnim vlaknima te se pleću zajedno u tkaninu koja se ubacuje u matricu. Također, postoje kompoziti ojačani višesmjernim vlaknima, no mi ćemo ovdje promatrati kompozite ojačane jednosmjernim vlaknima. Kao što smo i prije naveli, uloga je matrice da zaštiti ojačala od vanjskih uvjeta, te da prenese opterećenje na ojačala, dok je uloga ojačala da uspije podnijeti opterećenje, tj. možemo reći da su ojačala glavni nositelj mehaničkih svojstava kompozita. Mehanička su svojstva kompozita u direktnoj povezanosti sa: **1.** količinom (volumnim udjelom) i orijentiranosti, tj. rasporedom vlakana, te s njihovim početnim mehaničkim svojstvima (na koja utječu promjer, duljina vlakana i količina nesavršenosti unutar vlakana) – prikazano na slici 31. , **2.** količinom (volumnim udjelom) matrice i njezinim mehaničkim svojstvima, te **3.** svojstvima i kvalitetom inter-faze, tj. među-faze.



Slika 31 – Parametri vlakana koja utječu na mehanička svojstva kompozita

Uzimajući pretpostavke: **1.** matrica i vlakna su ujednačena, bez poroznosti i nesavršenosti, sva vlakna su paralelna jedna s drugima i istog su promjera, te je početno naprezanje unutar vlakana i matrice 0, **2.** matrica i vlakna su čvrsto povezana među-fazom, vlakna tijekom opterećenja ne proklizuju kroz matricu, te su deformacije jednolike, odnosno, i matrica i vlakna imaju istu elongaciju prilikom naprezanja, **3.** unutar elastičnog područja, matrica i vlakna, pa tako i cijeli kompozitni materijal, prate Hooke-ov zakon, **4.** ne uzimamo Poissonov koeficijent u obzir [8]. Tada u proces promatranja mehaničkog modela uzimamo dovoljno malu površinu koja sadrži kompoziciju mikrostrukture materijala, ali dovoljno veliku da sadrži svojstva kompozitnog materijala, pa se zbog toga uzima površinski presjek vlakna unutar matrice.

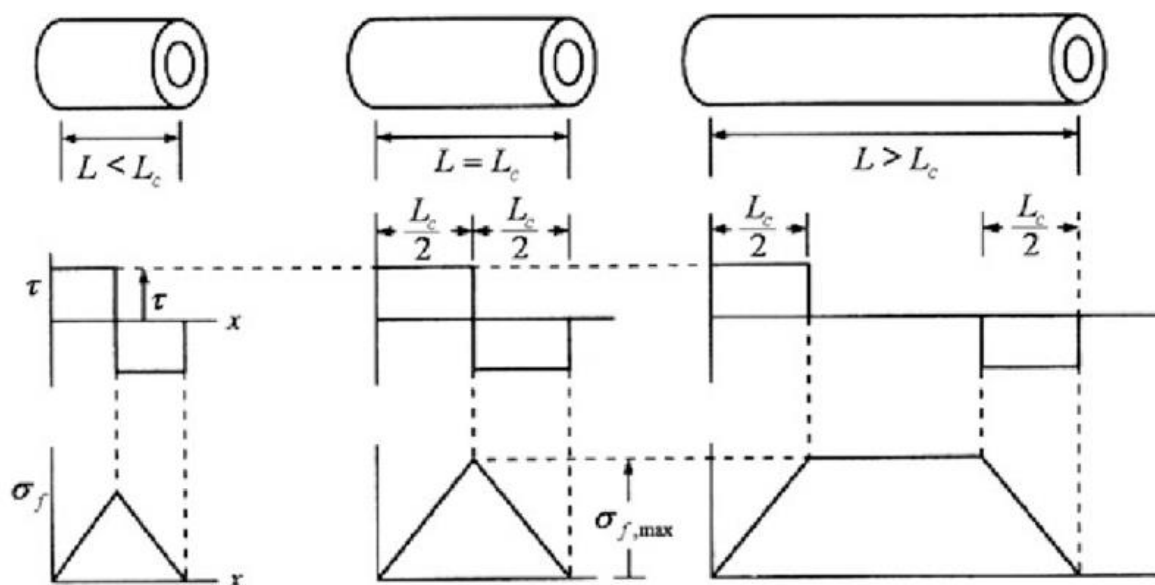
Na temelju ovih pretpostavka i zakona miješanja, dolazimo do izraza u kojemu se vidi da je modul elastičnosti kompozitnog materijala proporcionalan modulu elastičnosti i volumnim udjelima njegovih konstituenata. Drugim riječima, modul elastičnosti  $E_k$  kompozitnog materijala uvijek će se nalaziti između modula elastičnosti vlakana i modula elastičnosti matrice – prikazano na slici 32, no biti će bliže onome elementu koji ima veći volumni udio, tj. koji je dominantniji po količini u kompozitnome materijalu i onome koji ima veći modul elastičnosti (vlakna) [46]. Vlakna sadrže



Slika 32 – Prikaz dijagrama “naprezanje-istezanje” kompozita [46]

pravac unutar naprezanje-istezanje dijagrama, no matrice, zbog toga što su polimerne, najčešće nemaju linearno kretanje unutar istog dijagrama. Kako god, unutar istoga dijagrama, kompozitni materijal neće prikazivati svoju nelinearnost (koja je uzrokovana matricom) zbog dominantnih svojstava vlakana (modula elastičnosti i volumnog udjela). Također, što je veći modul elastičnosti vlakana, to će i vlakna “preuzeti” više opterećenja na sebe. Kada u razmatranje dolazi duljina vlakana, možemo ih podijeliti u više grupa kao što su npr. kontinuirana jednosmjerno orijentirana vlakna, kratka, tj. isprekidana jednosmjerno orijentirana vlakna i isprekidana višesmjerno orijentirana vlakna. Proces izrade kontinuiranih vlakana je skuplji od izrade isprekidanih, pa se zbog toga češće koriste kratka isprekidana vlakna, no ona se svejedno mogu jednosmjerno orijentirati prilikom izrade kompozita. Već smo prije napomenuli kako je dobra adhezija između vlakana i matrice vrlo važna zbog prijenosa naprezanja, a kod kratkih isprekidanih je još bitnija zbog toga što vlakna nisu kontinuirana. Omjer ukupne površine i ukupnog volumena vlakana trebao bi biti što veći, odnosno, korisna površina koja će stupati u kontakt s matricom trebala bi biti čim veća kako bi se osigurala dobra adhezija, a i povećalo trenje između samih vlakana i matrice. Pretpostavimo cilindrični oblik vlakna duljine  $l$  i promjera  $d$ , odnosno  $2r$ , te uzimajući u obzir naprezanje unutar vlakna i posmično naprezanje vlakna, uvrštavanjem i kombinacijom

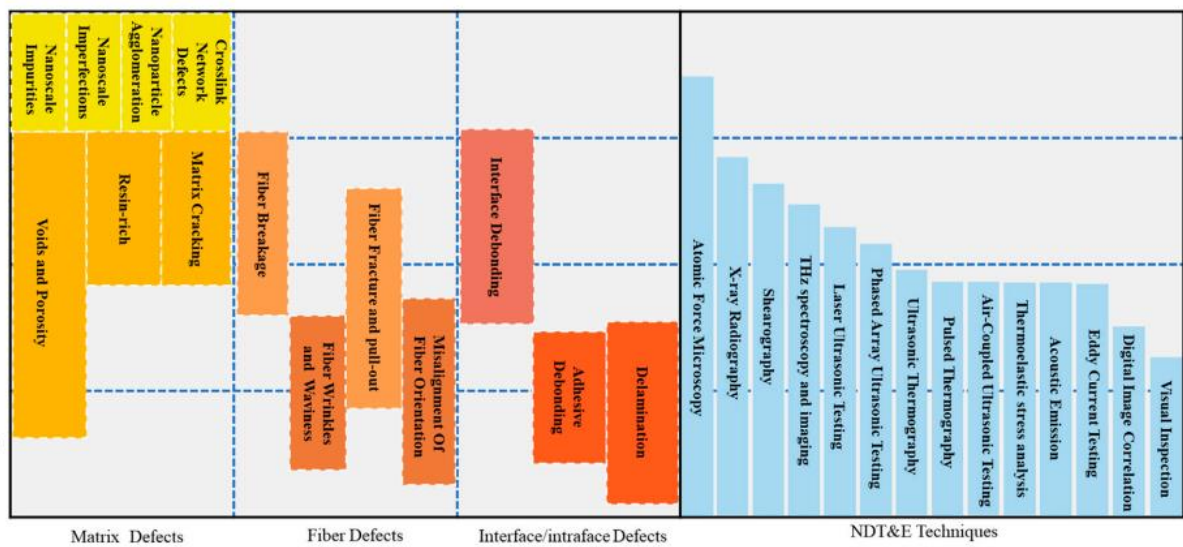
formula možemo doći do izraza kritične duljine vlakna  $L_c$  – prikazano na slici 33. Sa slike 33 vidimo način kretanja posmičnog i vlačnog naprezanja koje se prenosi s matrice na vlakno putem među-faze, tj. međufaza mora podnijeti prenesena naprezanja.



Slika 33 – Kritična duljina vlakana [37]

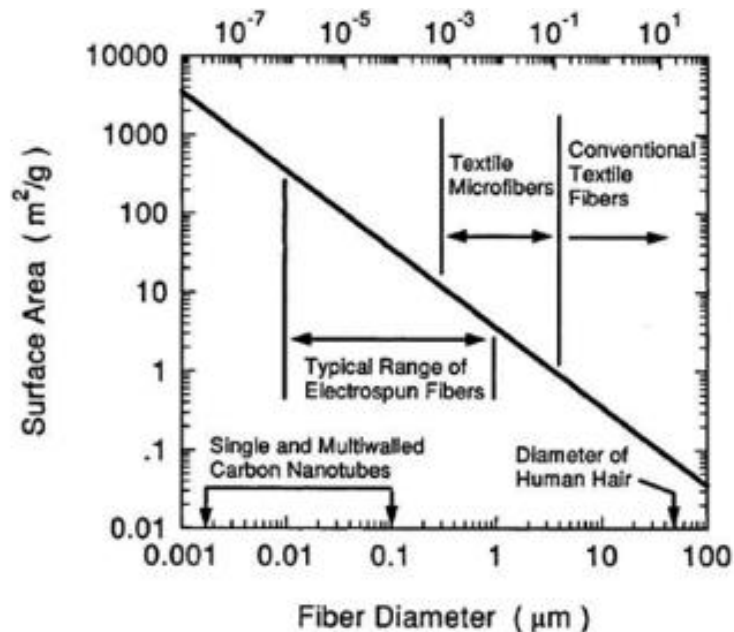
Kritična duljina vlakna vrlo je važno svojstvo prilikom razmatranja utjecaja duljine kratkih isprekidanih vlakana na vlačnu čvrstoću promatranog kompozita. Prilikom naprezanja kompozita u longitudinalnom smjeru (vlačno naprezanje), elastična deformacija matrice će vršiti opterećenje na vlakna, tj. događat će se prijenos naprezanja s matrice na vlakna. Posmično će opterećenje na krajevima vlakana biti najizraženije, te će do pola kritične duljine linearno padati prema nuli (sa svake strane vlakna pola kritične duljine čini jednu, cijelu, kritičnu duljinu). Vlačno naprezanje vlakana moguće je zbog posmičnog prijenosa opterećenja s matrice na vlakna. Kako bismo si ovaj koncept lakše predočili, možemo napraviti usporedbu s misaonim eksperimentom: kako bismo staklenu čašu (koncentrični oblik) podigli sa stola, ne možemo silom samo djelovati prema gore, već moramo i smičnom silom (sila trenja između naših prsti i čaše) djelovati na čašu kako bismo ju uspjeli podići. Vlačno pak naprezanje linearno raste od krajeva vlakna prema njegovoj sredini, a najveću vrijednost postiže nakon prolaska pola kritične duljine od svakog kraja. Postoje 3 moguća slučaja razmatranja duljine vlakana: **1.** kada je duljina vlakana manja od kritične duljine, **2.** kada je duljina vlakana jednaka kritičnoj duljini i **3.** kada je duljina vlakana veća od kritične duljine. Ako je duljina vlakana kojim je ispunjen kompozit manja od kritične duljine tih specifičnih vlakana (kritična se duljina vlakana razlikuje od jedne vrste vlakna do druge zbog različitih mehaničkih svojstava), tada prijenos naprezanja s matrice na vlakna nije najefikasniji, tj. optimalan. Možemo reći da u tom slučaju vlakna mogu podnijeti više naprezanja, no zbog njihove

male duljine (duljine manje od kritične duljine), prijenos naprezanja s matrice na vlakna nije potpun, pa ostatak naprezanja ostaje na matrici. U ovom slučaju vlačna čvrstoća kompozita (koja u optimalnom slučaju je gotovo jednaka vlačnoj čvrstoći vlakana) je manja od one potencijalne u slučaju dovoljne duljine vlakana. U drugom slučaju kada je duljina vlakna jednaka kritičnoj duljini, tada se na polovici vlakna ostvaruje najveći prijenos vlačnog naprezanja, te je također iznos posmičnog naprezanja jednak nuli. U trećem i najboljem slučaju kada je duljina vlakana veća od kritične duljine, tada ne samo da je prijenos naprezanja s matrice na vlakna kroz inter-fazu najveći i najefikasniji, već se vlačna čvrstoća samoga kompozita više približava vlačnoj čvrstoći samih vlakana. S druge pak strane, ako povećamo duljinu vlakana, možemo reći kako postoje i veće statističke šanse da se pojave nesavršenosti unutar vlakana. Ovu izjavu možemo usporediti s karikama lanca; ako se lanac sastoji od sve većeg i većeg broja karika, tada su i šanse da lanac sadrži neispravnu/slabu kariku sve veće i veće. Nesavršenosti vlakana su pojava valovitosti i bora na površini vlakana, raslojavanje i nastajanje pukotina unutar vlakana, te smanjena ravnost, tj. linearnost vlakana. Općenito greške unutar kompozita možemo svrstati u greške unutar vlakana, greške unutar matrice i greške unutar među-faze. Na slici 34 možemo vidjeti podjelu grešaka prema skupini i prema fizikalnom rasponu, odnosno dimenzijskim skupinama, te postupke opažanja istih.



Slika 34 – Greške unutar kompozitnih materijala i postupci uočavanja istih [15]

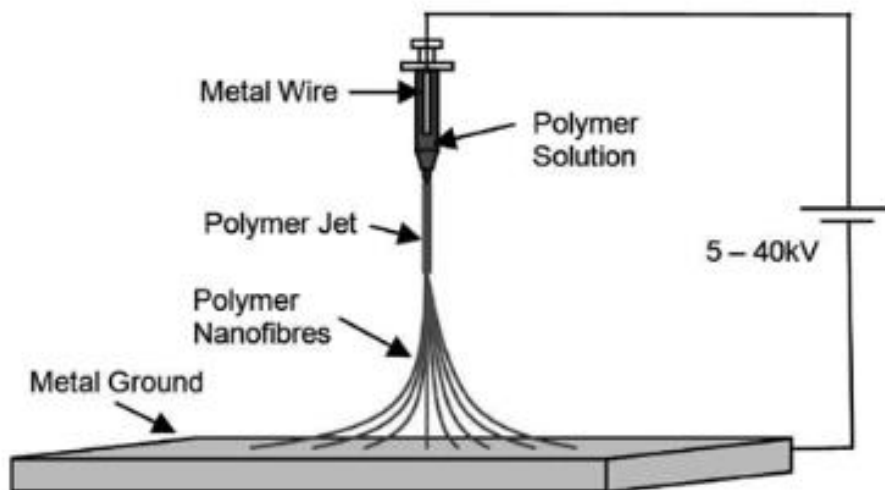
Sljedeći parametar kojega možemo razmatrati a da ima utjecaj na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti vlakana, pa tako i na vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti samoga kompozita, jest njihov promjer. Za početak možemo spomenuti omjer duljine i promjera vlakana (engl. *aspect ratio*) koji nam govori koliko je puta duljina vlakana veća od promjera. Omjer je direktno povezan sa specifičnom površinom vlakana (površina vlakana podijeljena s masom vlakana), te zbog vrlo malog promjera nano-vlakana (nekoliko stotina nanometara), omjer je izrazito veliki, reda veličine 1000:1, pa je i tako sama specifična površina ogromna [16]. Prema Nacionalnoj zakladi za znanost (engl. NSF, *National Science Foundation*), nano-materijal je definiran kao materijal koji ima barem jednu dimenziju manju od ili jednaku 100 nanometara (uzmimo u obzir da je ova definicija uzeta samo kao smjernica za definiranje nano-materijala, te se pod njih i smatraju materijali od nekoliko stotina nanometara – što je svejedno izrazito sitno) [16]. Nano-vlakna čiji je promjer od 5 nm do 500 nm imaju površinu po jedinici mase između  $10^4 \text{ m}^2$  i  $10^6 \text{ m}^2$  po kilogramu vlakana – što je prikazano na slici 35.



Slika 35 – Specifična površina vlakana u odnosu na njihov promjer [16]

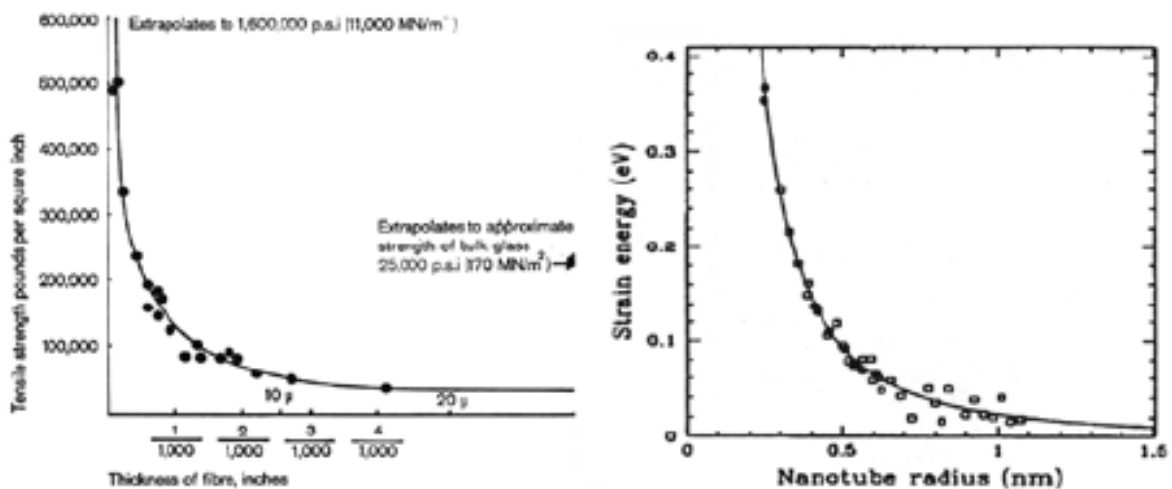
Uzmimo za primjer nano-vlakna čiji je promjer 3 nanometra i koja se sastoje od oko 40 molekula. Polovica se tih molekula nalazi samo na površini vlakana koja zbog toga mogu na sebe vezati veće količine drugih molekula. Ovo svojstvo vlakana najviše se koristi u medicini. Velika specifična površina vlakana znači velika dodirna površina između vlakana i matrice kompozitnog materijala, pa se tako osigurava izrazito dobra adhezija i trenje između vlakana i matrice, rezultirajući boljim prijenosom opterećenja na vlakna, te se smanjuje mogućnost proklizavanja vlakana uslijed opterećenja. Proces kojim se predu nano-vlakna naziva se elektropredenje (engl. *electrospinning*).

Elektropredenje je elektrostatička tehnika u kojoj se unutar otopine, u kojoj je otopljen polimer, generira jako električno polje. Polimerna se otopina nalazi unutar staklene injekcije s kapilarnim vrhom, koja se nalazi iznad metalnog zaslona koja će sakupljati vlakna. Kada voltaža elektrostatičkog polja dosegne kritičnu vrijednost, odnosno vrijednost zbog kojeg će naboj kapljice, koja se formirala na vrhu kapilare, prevladati silu napetosti njezine površine, tada će se formirati nano-vlakna koja će biti povučena prema metalnom zaslonu. Promjer vlakana može biti kontroliran mijenjanjem snage električnog polja i koncentracije polimerne otopine [16]. Shema procesa elektropredenja nano-vlakana prikazana je na slici 36.



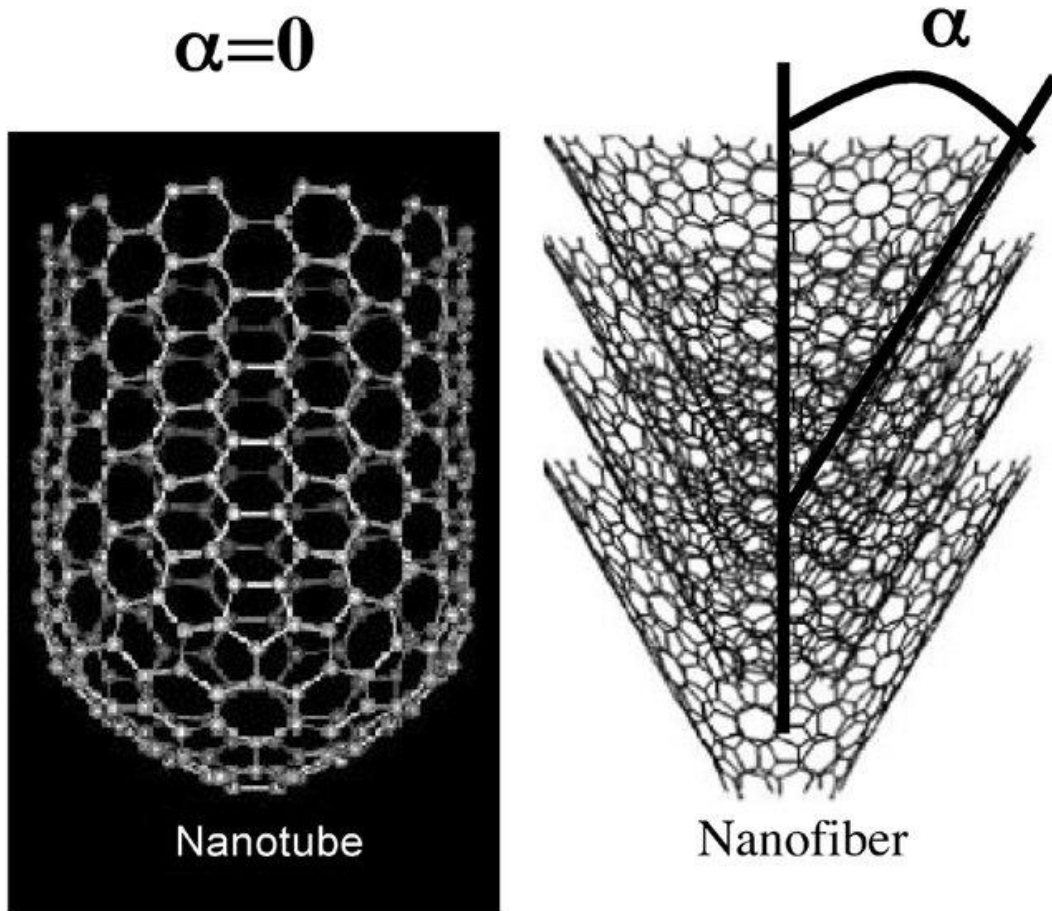
Slika 36 – Shema elektropredenja [16]

Također je dokazano da smanjenjem promjera vlakana istovremeno eksponencijalno raste i vlačna čvrstoća vlakana, te eksponencijalno raste elastična potencijalna energija pohranjena u elastičnoj deformaciji vlakana na razini atoma. Ovaj eksponencijalni rast vlačne čvrstoće vlakana možemo objasniti na način da smanjenjem promjera vlakana smanjujemo i vjerojatnost pojave nesavršenosti [16]. Na slici 37, s lijeve strane možemo vidjeti ovisnost vlačne čvrstoće o promjeru vlakana, a s desne je strane prikazana ovisnost pohranjene elastične potencijalne energije o



Slika 37 – Vlačna čvrstoća vlakana i pohranjena elastična potencijalna energija u nano-cijevima [16]

radijusu nano-cijevi. Glavna je razlika između ugljičnih nano-cijevi i ugljičnih nano-vlakana njihova struktura. Ugljične nano-cijevi građene su u obliku šupljih cilindričnih cijevi, ali postoji mogućnost da sadrže više unutarnjih slojeva, dok se ugljična nano-vlakna sastoje od grafitnih konusa naslaganih jedan na drugog [17]. Ugljične nano-cijevi i ugljična nano-vlakna razlikuju se mjerenjem kuta između grafitnog sloja i osi smjera kretanja – slika 38.



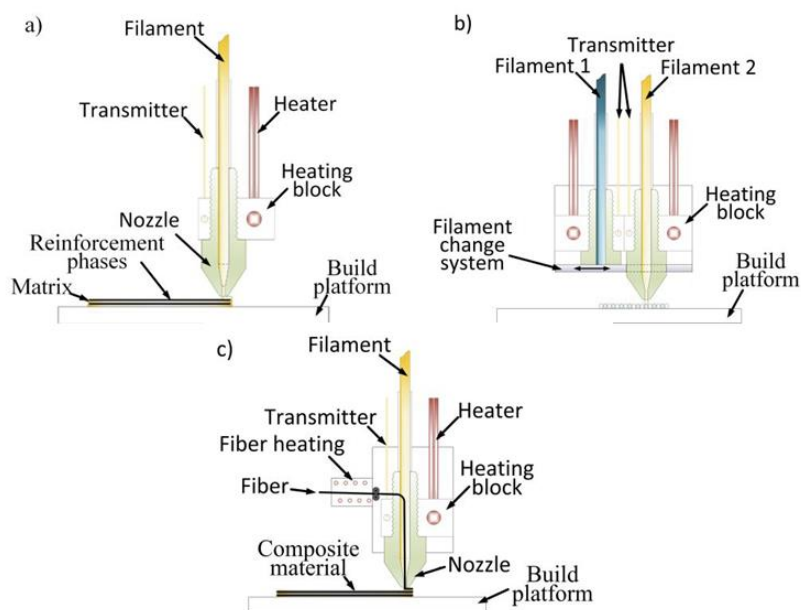
Slika 38 – Struktura ugljičnih nano-cijevi i nano-vlakana [38]

Izrazito visoka vlačna čvrstoća karbonskih nano-cijevi rezultat je snažnih kovalentnih veza između ugljikovih atoma unutar cilindričnog sloja, dok su ugljične nano-cijevi međusobno povezane van der Waalsovima silama. U smjeru kretanja ugljičnih nano-cijevi, Young-ov modul elastičnosti kreće se u rasponu od 270 GPa do 970 GPa, a vlačna je čvrstoća između 11 GPa i 63 GPa [18]. Zbog svojih nevjerojatnih svojstava, karbonske nano-cijevi i karbonska nano-vlakna idealna su ojačavala za buduće ne samo polimerne kompozite, već i kompozite ostalih vrsta.



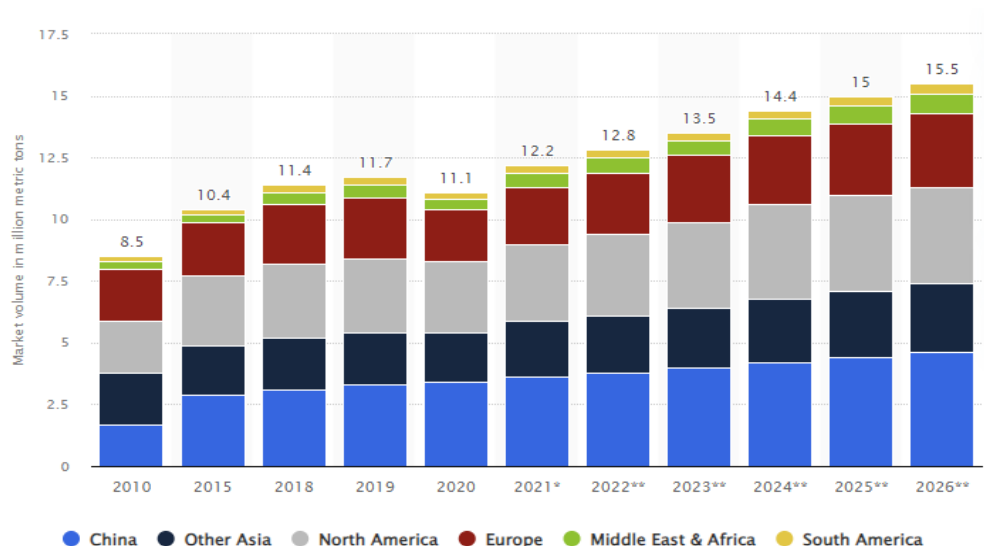
## 4. Polimerni kompoziti danas

Problemi današnjice kao što su zagađenje prirode i okoliša, iskorištavanje neodrživih izvora energije što će rezultirati okretanjem tržišta ka “zelenoj“ energiji i izgradnjom infrastrukture za istu, prenapučenost stanovništva i nedostatak sirovina i materijala otvaraju mnoge prilike i izazove za kompozitne materijale. Njihov pravi potencijal još nije u potpunosti istražen ni iskorišten kako bi unaprijedio kvalitetu čovjekova života u svim njegovim područjima. Aditivna tehnologija 3D printanja, relativno novijeg postupka koji se sve više industrijalizira, postavlja novi put za proizvodnju proizvoda od polimernih kompozita. Nakon izmodeliranog 3D CAD modela proizvoda, parametri 3D printera (brzina kretanja mlaznice, brzina dovođenja materijala, debljina jednog sloja, temperatura mlaznice i podloge na kojoj se printa itd...) se podese za određeni materijal (filament), te tada mlaznica postepeno “gradi“ proizvod. Postoje razne mogućnosti izbora materijala matrice i vlakana, printera s jednom ili više mlaznica koje naizmjenično printaju konstituente ili pak jedna mlaznica unutar koje se istovremeno vrši impregnacija ojačala matricom [40]. Neke od raznih vrsta glava i mlaznica 3D printera prikazane su na slici 39. Ova tehnologija omogućava proizvodnju strojarskih elemenata kompleksnih geometrija koje se uobičajenim postupcima ne bi mogle ostvariti.



Slika 39 – Različite mlaznice 3D printera [40]

Kretanje globalne proizvodnje polimernih kompozita koji se sve više koriste u raznim industrijama možemo vidjeti na slici 40. Vodeći su proizvođači Kina, ostale Azijske države (posebice Japan), Sjeverna Amerika i Europa. Najveći “skok“ imala je Kina od 2010. godine pa do 2021. godine kada je praktički udvostručila proizvodnju polimernih kompozita [41].



Slika 40 – Količina proizvodnje polimernih kompozita u tonama [41]

James Webb teleskop (slika 41) i VSS Unity samo su neki od nedavnih primjera gdje su korišteni polimerni kompoziti. James Webb teleskop lansiran je 25. prosinca 2021. godine, te je za 30 dana stigao na svoj cilj koji je udaljen 1,5 milijuna kilometara od Zemlje. Zbog posebnih zahtjeva za cijelu konstrukcija koja je morala imati relativno malu masu, dovoljno visoku čvrstoću da uspije podnijeti masu od oko 3300 kg ogledala i ostalih optičkih instrumenata, te da bude dimenzijski stabilna zbog temperaturnih razlika prednje i zadnje (okrenute prema Suncu) strane, James Webb tim razvio je posebna ugljična vlakna M601 i M55J koja su ispunila navedene uvjete [42]. Cilj ovog teleskopa biti će prikupljati slike udaljene milijardu svjetlosnih godina.



Slika 41 – Testiranje James Webb teleskopa u niskotemperaturnoj komori [42]

VSS (Virgin Space Ship) Unity suborbitalni je svemirski brod američke kompanije Virgin Galactic prikazan na slici 42. Njime se po prvi puta u povijesti odvio komercijalni let u Zemljinj pod-orbiti na visini od oko 88 kilometara gdje su putnici doživjeli bestežinsko stanje. Gotov svi primarni okviri napravljeni su u obliku sendvič konstrukcija od polimernih kompozita. Samo neki od njih su MTM45-1 očvršćena duromerna matrica tvrtke Solvay Composite Materials i ugljična vlakna Tenax HTS40 vlačne čvrstoće od oko 4400 MPa proizvedena u japanskoj tvrtki Teijin. Sama jezgra sendvič konstrukcija napravljena je od aramida oblika pčelinjih saća (šesterokutnih stanica) vrste AHN4120 zbog visoke čvrstoće i žilavosti, te koja su posebno namijenjena za svemirsku uporabu [43].



*Slika 42 – Virgin Space Ship Unity svemirska letjelica [44]*

Podizanjem svijesti o ekološki prihvatljivim proizvodima povlači sa sobom razvoj i istraživanje biokompatibilnih polimernih kompozita. Cilj je sintetička vlakna koja znaju imati negativne posljedice u dodiru s ljudskom kožom (osip, alergije..) zamijeniti s prirodnim vlaknima kao što su vlakna industrijske konoplje, vlakna drva banane, jutena vlakna, lanena vlakna, vlakna kopriva i ostala. Energija potrebna za preradbu prirodnih vlakna upola je manja od energije potrebne za proizvodnju sintetskih vlakana zbog potrebnog unosa topline i pritiska. Novi je trend unutar automobilske industrije koristiti gore navedena prirodna vlakna umjesto ugljičnih ili staklenih vlakana zbog EU direktiva o recikliranju. Koriste se za dijelove interijera kao što su sjedala, vrata, prtljažnik, te krov. Izazovi koji prethode su velika potražnja u automobilskoj industriji, koja je još uvijek pretežito temeljena na metalima, te dostupnost biokompatibilnih vlakana [45].

Dvije hrvatske norme koje možemo spomenuti uz ovu tematiku su HRN EN 15534-1:2017 i HRN EN ISO 527-1:2019. Norma 15534-1 opisuje metode ispitivanja kompozitnih materijala proizvedenih na osnovi celuloze i plastomera, dok norma 527-1 opisuje opća načela prilikom određivanja rasteznih svojstva polimera i polimernih kompozita [47].

## 5. Zaključak

Cilj ovog završnog rada bio je naznačiti i opisati parametre vlakana koji utječu na čvrstoću polimernog kompozita u cjelini. Polimerni kompoziti koriste se u svim tehničkim industrijama zbog mogućnosti “krojenja“ mehaničkih obilježja koja će zadovoljiti unaprijed postavljene kriterije na optimalan i ekonomski način. Uloga je polimerne matrice zaštititi ojačala od atmosferskih uvjeta i okoline, a funkcija je vlakana osigurati zadovoljavajuća mehanička svojstva. Inter-faza bitan je faktor koji utječe na kvalitetu prijenosa vanjskog opterećenja s matrice na ojačalo, odnosno vlakna. Najznačajniji utjecajni parametri vlakana su njihov promjer i duljina. Smanjivanjem promjera vlakana smanjuje se vjerojatnost pojave nesavršenosti u njihovoj strukturi, te se na taj način istovremeno povećava vlačna čvrstoća i količina vlakana koja se mogu smjestiti u matrici. Kritična duljina znatno utječe na učinkovitost prijenosa opterećenja s matrice na vlakna. Ako je vlakno dulje ili jednako kritičnoj duljini, tada je ispunjen uvjet koji omogućuje cjelokupni prijenos opterećenja na vlakna, te se vlačna čvrstoća polimernog kompozita u cijelosti približava vlačnoj čvrstoći vlakana. Staklena, ugljična i aramidna su vlakna najkorištenija na tržištu polimernih kompozita. Njihova sve češća uporaba u automobilskoj, zrakoplovnoj, svemirskoj i ostalim industrijama očiti je znak njihove važnosti kao tehničkih materijala budućnosti. Naravno, još uvijek ima mjesta za razvoj i unapređenje polimernih kompozita i njihovih proizvodnih procesa, što će rezultirati poboljšanjem kvalitete ljudskog života, te će otvoriti nova vrata znanja civilizacije.

## 6. Popis slika

Slika 1 – Kretanje cijena 1 kilograma ugljičnih vlakana [2] .....	1
Slika 2 – Primjeri prirodnih i sintetskih polimera .....	2
Slika 3 – Podjela polimera prema vrsti ponavljanih jedinica .....	3
Slika 4 – Podjela polimera prema oblicima makromolekula [5] .....	3
Slika 5 – Prikaz strukture amornog i kristalastog polimera .....	4
Slika 6 – Jednostavan prikaz sastava kompozita .....	5
Slika 7 – Vrste ojačala unutar kompozita .....	5
Slika 8 – Usporedbe određenih karakteristika čelika, aluminija i kompozita [9].....	6
Slika 9 – Potrošnja zrakoplovnog goriva kroz godine.....	7
Slika 10 – Nanostruktura drva .....	8
Slika 11 .....	8
Slika 12 – Preradbene karakteristike i svojstva duromernih i plastomernih smola [11] .....	9
Slika 13 – Usmjeravanje vlakana u pređi .....	10
Slika 14 – Jedna od metoda impregniranja vlakana .....	11
Slika 15 [11] – Različite kombinacije pletenja vlakana .....	11
Slika 16 – Staklena vuna kao toplinski izolator .....	12
Slika 17- Prikaz ovisnosti toplinske vodljivosti staklene vune o njezinoj gustoći .....	13
Slika 18 – Shema proizvodnje obloženih staklenih vlakana [13].....	13
Slika 19 – Proces oksidacije kojim nastaju šesterokutni prsteni [14].....	14
Slika 20 – Promjena kemijske strukture PAN vlakana pod utjecajem temperature .....	15
Slika 21 – Kut otklona vlakana.....	16
Slika 22 – Usporedba svojstava kovalentnih veza i Van der Waalsovih sila [8] .....	16
Slika 23 – Mikrostruktura ugljičnih vlakana i niti [8] .....	17
Slika 24 – Karakteristike ugljičnih vlakana prve i druge vrste [7] .....	17
Slika 25 – Prsteni benzena koji čine aramidna vlakna .....	18
Slika 26 – Proces izrade aramidnih vlakana tvrtke Teijin .....	19
Slika 27 – Prikaz vertikalnih i horizontalnih stabilizatora koji sadrže borna vlakna .....	20
Slika 28 [7] – Mehanička svojstva silicijeva karbida s wolframovom i ugljičnom jezgrom .....	21
Slika 29 – Užad od UHMWPE .....	22
Slika 30 – Smjerovi naprezanja u kompozitnome materijalu [7] .....	23
Slika 31 – Parametari vlakana koja utječu na mehanička svojstva kompozita .....	24
Slika 32 – Površinski presjeci vlakana i matrice [8] .....	25
Slika 33 – Kritična duljina vlakana .....	26

Slika 34 – Greške unutar kompozitnih materijala i postupci uočavanja istih [15].....	27
Slika 35 – Specifična površina vlakana u odnosu na njihov promjer [16] .....	28
Slika 36 – Shema elektrospredanja [15].....	29
Slika 37 – Vlačna čvrstoća vlakana i pohranjena elastična potencijalna energija u nano-cijevima [15].....	29
Slika 38 – Struktura ugljičnih nano-cijevi i nano-vlakana .....	30

## 7. Literatura

- [1] Lee, Stuart M : Reference Book for Composites Technology, Volume I, Florida, USA, 1989.
- [2] Hubert Jaeger , Wilhelm Frohs : Industrial Carbon and Graphite Materials: Raw Materials, Production and Applications, Wiley, 2021.
- [3] A. Rogić, I. Čatić, D. Godec : Polimeri i polimerne tvorevine, Biblioteka polimerstvo – serija zelena, Zagreb, 2008.
- [4] S. Šolić : Tehnologija II, Prezentacije predavanja i vježbi, Sveučilište Sjever
- [5] M. Horvat : Materijali I, Prezentacije predavanja i vježbi, Sveučilište Sjever
- [6] Sabu Thomas, Kuruvilla Joseph, S. K. Malhotra, Koichi Goda, M. S. Sreekala : Polymer Composites, Volume 1, Macro- and Microcomposites, Wiley, 2012
- [7] M. Horvat : Materijali I, Prezentacije predavanja i vježbi, Sveučilište Sjever
- [8] Shui-Rong Zheng, Ru-Min Wang, Yujun George Zheng : Polymer Matrix Composites and Technology, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2011
- [9] Krishan K. Chawla : Composite Materials: Science and Engineering, University of Alabama, 1987.
- [10] Martin Alberto Masuelli : Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes, 2013.
- [11] Joseph H. Koo : Chapter 3 - Polymer Matrix Composites, University of Texas, Austin
- [12] C. A. Lawrence : Advances in Yarn Spinning Technology, 2010
- [13] Haitao Guo, Gerald Farrell, Shunbin Wang, Peiqing Zhang, Xunsi Wang, Shijie Jia, Shixun Dai, Pengfei Wang : Mid-Infrared Fluoride and Chalcogenide Glasses and Fibers, 2022.
- [14] Soo-Jin Park : Carbon Fibers, Springer Edition, 2018
- [15] Chen J, Yu Z and Jin H (2022), Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber reinforced polymer composites
- [16] Frank K. Ko, Heejae Yang : Functional Nanofibre: Enabling Material for The Next Generations Smart Textiles, Research Gate, 2008.
- [17] Desmaris, V. ; Saleem, A. ; Shafiee, S. (2015) "Examining Carbon Nanofibers: Properties, growth, and applications.". IEEE Nanotechnology Magazine, vol. 9(2), pp. 33-38.
- [18] Mohamed Berber , Inas Hazzaa Hafez : Carbon Nanotubes: Current Progress of their Polymer Composites, 2016.
- [19] <https://sciencenotes.org/examples-of-natural-polymers-and-their-monomers/> - preuzeto 3.7.2023.
- [20] [https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-the-homopolymer-and-varieties-of-copolymers\\_fig3\\_282670206](https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-the-homopolymer-and-varieties-of-copolymers_fig3_282670206) - preuzeto 3.7.2023.

- [21] <https://blog.impactplastics.co/blog/the-difference-between-amorphous-semi-crystalline-polymers> - preuzeto 3.7.2023.
- [22] <https://romeorim.com/what-are-composites/> - preuzeto 3.7.2023.
- [23] <https://www.bartleby.com/subject/engineering/mechanical-engineering/concepts/mechanical-behavior-of-composite> - preuzeto 4.7.2023.
- [24] <https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-commercial-aircraft-engines-2014-2023> - preuzeto 4.7.2023.
- [25] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/gc/c2gc36364j> - preuzeto 4.7.2023.
- [26] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421005160> - preuzeto 4.7.2023.
- [27] <https://www.slideshare.net/sheshir/textile-fibres-copy> – preuzeto 6.7.2023.
- [28] <https://www.m-chemical.co.jp/carbon-fiber/en/about/molding/> - preuzeto 6.7.2023.
- [29] [https://www.bhagwatiroyalroof.com/Product\\_Details/Glass-Wool/](https://www.bhagwatiroyalroof.com/Product_Details/Glass-Wool/) - preuzeto 6.7.2023.
- [30] [https://www.researchgate.net/figure/Thermal-conductivity-versus-density-of-glass-wool-micronaire-50-6g-model-I\\_fig1\\_237549254](https://www.researchgate.net/figure/Thermal-conductivity-versus-density-of-glass-wool-micronaire-50-6g-model-I_fig1_237549254) - preuzeto 8.7.2023.
- [31] [http://mainland.cctt.org/istf2006/Carbon\\_Fiber.asp](http://mainland.cctt.org/istf2006/Carbon_Fiber.asp) - preuzeto 10.7.2023.
- [32] [https://www.researchgate.net/figure/a-Carbon-fiber-basal-plane-angle-b-cross-sectional-drawing-from-Lee-1993\\_fig2\\_303888000](https://www.researchgate.net/figure/a-Carbon-fiber-basal-plane-angle-b-cross-sectional-drawing-from-Lee-1993_fig2_303888000) - preuzeto 10.7.2023.
- [33] [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-Kevlar\\_fig1\\_318901918](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-Kevlar_fig1_318901918) - preuzeto 12.7.2023.
- [34] <https://www.tejinaramid.com/en/technology/what-is-aramid/index.html> - preuzeto 12.7.2023.
- [35] <https://ssbcrackexams.com/how-to-identify-the-different-components-of-fighter-aircraft/> - preuzeto 12.7.2023.
- [36] <https://www.tehoropes.nl/product/mooring-tails-and-connections/> - preuzeto 16.7.2023.
- [37] [https://www.researchgate.net/publication/226175380\\_Application\\_of\\_micromechanical\\_models\\_to\\_tensile\\_properties\\_of\\_wood-plastic\\_composites](https://www.researchgate.net/publication/226175380_Application_of_micromechanical_models_to_tensile_properties_of_wood-plastic_composites) – preuzeto 16.7.2023.
- [38] [https://www.researchgate.net/publication/3435712\\_Structural\\_and\\_Electrical\\_Characterization\\_of\\_Carbon\\_Nanofibers\\_for\\_Interconnect\\_Via\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/3435712_Structural_and_Electrical_Characterization_of_Carbon_Nanofibers_for_Interconnect_Via_Applications) – preuzeto 17.7.2023.
- [39] [https://www.youtube.com/watch?v=6LcGrLnzYuU&ab\\_channel=RealEngineering](https://www.youtube.com/watch?v=6LcGrLnzYuU&ab_channel=RealEngineering) – preuzeto 20.7.2023.
- [40] K Bryll, E Piesowicz, P Szymański, W Ślącza, M Pijanowski : Polymer composite manufacturing by FDM 3D printing technology, 2018.
- [41] <https://www.statista.com/statistics/1344083/global-market-volume-of-polymer-composite-materials-by-region/> - preuzeto 23.7.2023.
- [42] <https://www.jeccomposites.com/news/composites-play-starring-role-in-humankinds-largest-space-telescope/> - preuzeto 23.7.2023.
- [43] <https://www.compositesworld.com/articles/leveraging-composites-for-space-tourism> - preuzeto 23.7.2023.
- [44] <https://www.spaceflightinsider.com/organizations/virgin-galactic/virgin-galactic-vss-unity-passes-feather-test/> - preuzeto 23.7.2023.



[45] <https://www.fiberjournal.com/natural-fibers-the-new-fashion-in-automotive-composites/> - preuzeto 24.7. 2023.

[46] Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009

[47] <https://repozitorij.hzn.hr/search/norms> - preuzeto 24.7.2023.