PRORAČUN I ISPITIVANJE KOMPOZITA SA SJECKANIM VLAKNIMA

Radman, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:228:173287

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of University Department of Professional Studies

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

ANTE RADMAN

Z A V R Š N I R A D

PRORAČUN I ISPITIVANJE KOMPOZITA SA SJECKANIM VLAKNIMA

Split, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Izbor materijala

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Ante Radman

Naslov rada: Proračun i ispitivanje kompozita sa sjeckanim vlaknima

Mentor: Igor Gabrić, v. pred.

Split, rujan 2019.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Izbor materijala
Nastavnik: Igor Gabrić, v. pred.

ZADATAK

Kandidat: Ante Radman

Zadatak: Proračun i ispitivanje kompozita sa sjeckanim vlaknima

U radu je potrebno:

- Uvodno se osvrnuti o kompozitima s naglaskom na kompozite sa sjeckanim vlaknima;
- Prikazati način procjene mehaničkih i fizikalnih svojstava kompozita s usmjerenima sjeckanim vlaknima pri projektiranju istih (obzirom na konstituente, udio, razmjer i konfiguraciju);
- Dijagramima prikazati ovisnost svojstava o utjecajnim faktorima;
- Weibull-ova razdioba - primjena za projektiranje kompozita;
- Projektirati, izraditi uzorke projektiranog kompozita sa sjeckanim vlaknima, te izvršiti mehaničko ispitivanje svojstava kompozita;
- Rezultate dobivene mehaničkim ispitivanjem usporediti s rezultatima analitičkog proračuna istih;
- Rezultate prikazati grafički u odgovarajućim dijagramima;
- Iznijeti zaključke;
- Navesti literaturu i izvore podataka.

Sažetak

Ovaj završni rad bavi se proračunom i ispitivanjem kompozita sa sjeckanim vlaknima. U prvom dijelu završnog rada općenito su opisani kompoziti s naglaskom na kompozite sa sjeckanim vlaknima. U drugom dijelu završnog rada prikazan je proračun za kompozite sa sjeckanim vlaknima, te konačno je prikazano ispitivanje i izrada kompozita sa sjeckanim vlaknima.

Ključne riječi: kompozit, staklena vlakna, sjeckana vlakna, poliesterska smola, proračun kompozita.

Summary (Calculation and testing of chopped fiber reinforced composite)

This final work is based on the calculation and testing of chopped fiber reinforced composite. The first part of the final work generally describes composites with emphasis on the chopped fiber composites. The second part of the final work shows the calculation of chopped fiber reinforced composite, and finally, the testing and fabrication of chopped fiber reinforced composite is shown.

Keywords: composite, glass fiber, chopped fiber, polyester resin, calculation of composite.

SADRŽAJ

Sažetak ii

Summary (Calculation and testing of chopped fiber reinforced plastic) ii

1. Uvod 1

1.1. Kompoziti 1

1.2. Matrica 1

1.3. Ojačavajuća faza 4

1.4. Oblici ojačanja 5

1.5. Diskontinuirana vlakna (sjeckana) 7

2. Proračun kompozita s usmjerenim sjeckanim vlaknima 10

2.1. Modul elastičnosti kompozita 10

2.2. Čvrstoća kompozita 13

2.3. Toplinska vodljivost kompozita 16

2.4. Koeficijent toplinskog širenja kompozita 19

2.5. Gustoća kompozita 20

2.6. Primjena Weibull-ove razdiobe za projektiranje kompozita 21

3. Izrada i ispitivanje uzoraka kompozita sa neusmjerenim sjeckanim vlaknima 23

3.1. Materijali za izradu uzoraka 23

3.2. Izrada uzoraka 24

3.3. Ispitivanje uzoraka 28

3.4. Rezultati ispitivanja 29

4. Zaključak 33

Literatura 34

Popis slika

Slika 1.1 - Oblici vlakana [2] 6
Slika 1.2 - Vrste tkanja vlakana [2] 6
Slika 1.3 - Vrste netkanih tkanina (matova) [2] 7
Slika 1.4 - Prijenos sile od matrice do vlakna [3] 8
Slika 2.1 - Kompozit s usmjerenim sjeckanim vlaknima 10
Slika 2.2 - Modul elastičnosti kompozita u ovisnosti o duljini vlakana 12
Slika 2.3 - Modul elastičnosti kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana 13
Slika 2.4 - Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana kompozita u ovisnosti o duljini vlakana 15
Slika 2.5 - Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana 16
Slika 2.6 - Toplinska vodljivost kompozita u ovisnosti o duljini vlakana 18
Slika 2.7 - Toplinska vodljivost kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana 19
Slika 2.8 - Koeficijent toplinskog širenja kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana 20
Slika 2.9 - Gustoća kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana 21
Slika 2.10 - Vlačna čvrstoća kompozita u obliku funkcije pouzdanosti 22
Slika 3.1 - Odabrana poliesterska smola i katalizator [10] 23
Slika 3.2 - Ispitivanje vlačne čvrstoće uzorka bez vlakana 23
Slika 3.3 - Staklena vlakna duljine 3 i 6 mm 24
Slika 3.4 - Stakleni kalup za izradu uzoraka 25
Slika 3.5 - Mazivo za kalupe 25
Slika 3.6 - Kalup ispunjen smolom i vlaknima 26
Slika 3.7 - Obrada uzoraka na CNC glodalici 26
Slika 3.8 - Uzorci spremni za ispitivanje 27
Slika 3.9 - Uzorak učvršćen u čeljustima 28
Slika 3.10 - Ispitivanje uzoraka 28
Slika 3.11 - Rezultati ispitivanja 29
Slika 3.12 - Presjek uzorka na mjestu loma 30
Slika 3.13 - Rezultati ispitivanja korištenjem efektivnog presjeka 31
Slika 3.14 - Vlačna čvrstoća kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana 32

Popis tablica

Tablica 1.1 Prednosti i nedostatci kompozita 1
Tablica 1.2 Svojstva raznih materijala matrica [11] 2
Tablica 1.3 Svojstva ojačavajućih vlakana za kompozite polimerne matrice [11] 4
Tablica 2.1 Ulazni podaci za proračun modula elastičnosti kompozita, ovisno o duljini vlakana 12
Tablica 2.2 Ulazni podaci za proračun modula elastičnosti kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana 13
Tablica 2.3 Ulazni podaci za proračun vlačne čvrstoće u smjeru vlakana kompozita, ovisno o duljini vlakana 14
Tablica 2.4 Ulazni podaci za proračun vlačne čvrstoće u smjeru vlakana kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana 15
Tablica 2.5 Ulazni podaci za proračun toplinske vodljivosti kompozita, ovisno o duljini vlakana 17
Tablica 2.6 Ulazni podaci za proračun toplinske vodljivosti kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana 18
Tablica 2.7 Ulazni podaci za proračun koeficijenta toplinskog širenja kompozita 20
Tablica 2.8 Ulazni podaci za proračun gustoće kompozita 21
Tablica 3.1 Podaci i rezultati ispitivanja uzorka bez vlakana 24
Tablica 3.2 Podaci o izrađenim uzorcima 27
Tablica 3.3 Rezultati ispitivanja 29
Tablica 3.4 Rezultati ispitivanja sa efektivnim presjekom 30

1. Uvod

1.1. Kompoziti

Kompozitni materijal je makroskopska kombinacija dvaju ili više različitih materijala, s prepoznatljivom interakcijom između njih. Moderni kompozitni materijali su obično optimizirani za postizanje određene ravnoteže svojstava za određeni raspon primjena. S obzirom na široki raspon materijala koji se mogu smatrati kompozitima i širokom rasponu primjena, teško se dogovoriti o jedinstvenoj definiciji. Međutim, kao uobičajena praktična definicija, kompozitni materijali mogu biti ograničeni kako bi se naglasili oni materijali koji kao sastavni dio sadrže stalnu matricu koja veže i pruža oblik raznim čvrstim, krutim ojačanjima. Dobiveni kompozitni materijal ima ravnotežu strukturnih svojstava koja su superiornija naspram homogenog materijala. Poboljšana svojstva općenito su rezultat mehanizma raspodjele opterećenja. Tablica 1.1 prikazuje prednosti i nedostatke kompozitnih materijala. Kompoziti se obično klasificiraju na dvije različite razine. Prva razina klasifikacije se odnosi na vrstu matrice. Druga razina klasifikacije se odnosi na vrstu ojačanja.

Tablica 1.1 Prednosti i nedostatci kompozita

Prednosti	Nedostaci
- Mala masa - Visoka specifična krutost - Visoka specifična čvrstoća - Prilagođena svojstva - Lako oblikovanje u složene oblike - Lako spajanje - Dobra otpornost na zamor - Dobro prigušenje vibracija	- Visoka cijena - Temperaturna ograničenja - Niska duktilnost - Kompliciranost proizvodnje - Spora proizvodnja

1.2. Matrica

Svrha matrice je povezivanje ojačavajućeg dodatka pomoću kohezije i adhezije, prijenos opterećenja na dodatak i zaštita dodatka od utjecaja okoliša. Matrica također kontrolira poprečna svojstva, interlaminarnu čvrstoću i čvrstoću pri povišenim temperaturama kompozita (svojstva puzavosti kompozita). Matrica omogućuje da se čvrstoća od ojačavajućeg dodatka iskoristi do punog potencijala osiguravanjem učinkovitog prijenosa opterećenja s vanjskih sila

na ojačanje. Ojačavajući dodatak je obično čvršća i kruća faza, a matrica je često „slaba karika“ u kompozitu gledano iz strukturne perspektive. Matrica daje čvrsti oblik kompozitu i drži ojačavajuća vlakna u pravilnoj poziciji i orijentaciji tako da mogu nositi predviđena opterećenja. Tako se naprezanja raspoređuju više ili manje ravnomjerno među ojačanjem. Nadalje, matrica osigurava da se koncentracije naprezanja drastično smanje, te da se unutarnja naprezanja preraspodjeljuju u slučaju loma dijela ojačavajućeg dodatka. Tablica 1.2 prikazuje razna svojstva najčešće korištenih materijala matrice. Glavne kompozitne klase uključuju:

a) kompozite organske matrice (OMCs)
b) kompozite metalne matrice (MMCs)
c) kompozite keramičke matrice (CMCs).

Tablica 1.2 Svojstva raznih materijala matrica [11]

Svojstvo	Poliesteri	Epoksidi	Poliamidi	Keramike	Metali
Maks. temp. korištenja, °C	128	138	315	2690	1093
Gustoća, g/cm^3	1.04 - 1.4	1.11 - 1.4	1.5 - 1.8	1.67 - 2.5	2.0 - 8.0
Vlačna čvrstoća, MPa	42 - 90	45 - 110	72 - 158	28 - 138	48 - 482
Modul elastičnosti, GPa	2.1 - 4.4	2.4 - 2.5	2.4 - 2.6	-	-

1.2.1. Organske matrice

Izraz „kompozit organske matrice“ općenito pretpostavlja da uključuje dvije klase kompozita: kompozite polimerne matrice (PMCs) i kompozite ugljične matrice (obično se nazivaju ugljik - ugljik kompoziti). Polimerna matrica je najčešće korištena vrsta matrice u kompozitima, a u nju spadaju termoplasti i duromeri. Duromeri neće omekšati nakon zagrijavanja u odnosu na termoplaste, koji se mogu ponovno oblikovati zagrijavanjem. Neke od najkorištenijih polimernih matrica su:

Poliesterske smole spadaju u klasu duromera. Najkorištenije su smole u kompozitima, primjenjuju se u industrijskim i potrošačkim aplikacijama. Kompoziti s poliesterskom smolom su jeftini. Zahtijevaju minimalnu pripremu, a fizikalna svojstva im se mogu prilagoditi specifičnim namjenama. Još jedna prednost je da se mogu očvrsnuti na različite načine bez mijenjanja fizikalnih svojstava. Mogu odolijevati UV zračenju više od 30 godina, iako će doći do promjene boje i gubitka čvrstoće.

Epoksidne smole spadaju u klasu duromera koje se u velikoj mjeri koriste u strukturnim i specijalnim kompozitima. Nude jedinstvenu kombinaciju svojstava koja su nedostižna s drugim

duromernim smolama. Dostupne su širokom rasponu fizikalnih oblika, od tekućine niske viskoznosti do visokotemperaturnih krutina. Nude visoku čvrstoću, nisko skupljanje pri promjeni temperature, izvrsnu adheziju na različite podloge i nisku toksičnost. Znatno su skuplje od poliesterskih. Lako se stvrdnjavaju bez razvijanja hlapljivih tvari ili nusprodukata sa širokim rasponom kemikalija zvanih učvršćivači.

Poliamidne smole spadaju u klasu termoplasta. Koriste se kada je potrebna optimalna toplinska stabilnost na visokim temperaturama. Mogu se kategorizirati prema njihovim temperaturnim mogućnostima u one s gornjom granicom do 230 °C i one do 315 °C za dulja vremenska razdoblja. Postoje dvije opće vrste komercijalnih poliamida: termoplastični i umreženi. Prednosti termoplastičnih su žilavost i reverzibilnost, a nedostatak kompliciranа obrada. Prednost umreženih su laka obradivost, a nedostatak loša žilavost.

PEEK smole spadaju u klasu termoplasta. Imaju nisku zapaljivost, nisku električnu vodljivost, visoku otpornost na otapala, visoku čvrstoću i izvrsnu žilavost. Toplinska stabilnost PEEK-a je tek nešto manja od poliamida, ali je mnogo je lakša obradivost. PEEK su najkorištenije smole iz klase termoplasta, a najviše se koriste u avioindustriji. Imaju visoku cijenu i teško su dobavljive.

1.2.2. Metalne matrice

Za razliku od organskih matrica, metalna matrica osigurava važan doprinos čvrstoći kompozita. Pri višim temperaturama uloga matrice postaje važnija od ojačavajućeg dodatka, jer svojstva na visokim temperaturama se kontroliraju difuzijom u matrici. Izbor materijala matrice uglavnom ovisi o zahtjevima za čvrstoću, radnu temperaturu, gustoću i cijenu. Na primjer, legure titana su očigledni kandidat za primjenu u aplikacijama koje zahtijevaju veliku čvrstoću i umjerenu radnu temperaturu. Međutim, legure aluminija se mogu natjecati s legurama titana na temelju specifičnih svojstava zbog njihove male gustoće, iako su čvrstoća i svojstva na povišenim temperaturama lošija nego kod legura titana. Jedan od najvažnijih faktora matrice je kompatibilnost s ojačanjima. Legure koje imaju veću duktilnost i lomnu žilavost su bolji materijal za matricu. Najčešće korištene metalne matrice su na bazi legura aluminija, a koriste se još i legure titana, željeza, kobalta, bakra, srebra i berilija.

1.2.3. Keramičke matrice

Kompoziti s keramičkom matricom se primjenjuju u visokotemperaturnim aplikacijama gdje je potrebna visoka krutost. Na primjer, toplinski štitovi i motori svemirske letjelice. Mnogi materijali matrice su čvrsti prašci prije nego što su oblikovani u kompozitne materijale.

Keramičke čestice se učvršćuju jedna s drugom i ojačanjima u procesu zvanom sinteriranje. Izbor materijala matrice uglavnom ovisi o sposobnosti materijala da izdrži utjecaj okoliša i da zadovoljava specifične zahtjeve primjene. Većina keramičkih matrica su od: aluminijevog oksida, borsilikata, magnezijevog oksida, cirkonija, silicijevog karbida, silicijevog nitrida i titanovog borida.

1.3. Ojačavajuća faza

Glavna svrha ojačanja je osiguranje vrhunske razine čvrstoće i krutosti kompozita. Ojačanja za kompozite mogu biti u obliku vlakana i čestica. Daleko najraširenij oblik ojačanja su vlakna, koja mogu biti kontinuirana ili diskontinuirana (sjeckana). Vlakna se obično sastoje od velikog broja sitnih vlakana (filamenata) raspoređenih u jedan snop. Za kompozite polimerne matrice vlakna se dijele na: prirodna, staklena, aramidna i ugljična. Tablica 1.3 prikazuje svojstva vlakana za kompozite polimerne matrice. Za kompozite metalne i keramičke matrice vlakna mogu biti: metalna, oksidna keramička i neoksidna keramička.

Tablica 1.3 Svojstva ojačavajućih vlakana za kompozite polimerne matrice [11]

Vrsta vlakna	Naziv	Gustoća, g/cm^3	Vlačna čvrstoća, MPa	Modul elastičnosti, GPa	Elongacija do pucanja, %	Promjer vlakna, μm
Prirodno	Kenaf	1.2	930	53	2.9	-
Stakleno	E-staklo	2.6	2000	85	2.8	12
Ugljično	T1100G	1.8	7000	324	2.2	5
Aramidno	Kevlar® 49	1.45	3000	130	3	12

Staklena vlakna su daleko najkorišteniji materijal ojačanja. Ta dominacija je posljedica kombinacije niske cijene i dobrih svojstava. Proizvodi se nekoliko vrsta staklenih vlakana, ali samo četiri se koriste u kompozitima: E-staklo, S-staklo, C-staklo i kvarc. Zbog dobre čvrstoće i niske cijene, E-staklo je najčešće korištena vrsta staklenih vlakana u kompozitima. S-staklo ima veću čvrstoću od E-stakla i bolja svojstva na povišenim temperaturama. Staklena vlakna imaju veliku primjenu npr. izrada brodova, dijelovi automobila, sportska oprema itd.

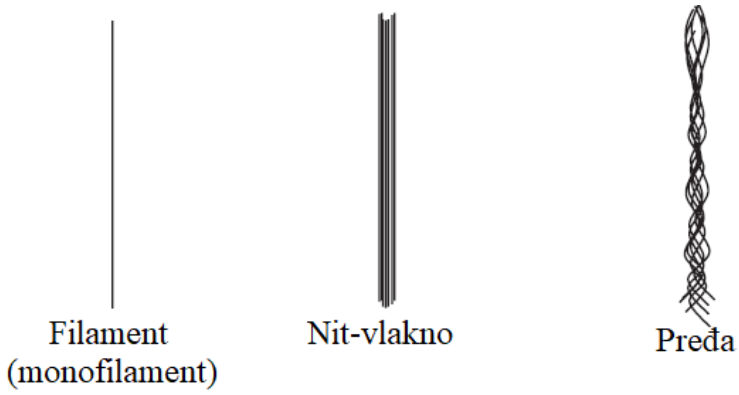
Ugljična vlakna imaju visoku specifičnu čvrstoću i specifičnu krutost. Kompoziti od ugljičnih vlakana imaju zamorna svojstva koja su bolja od svih poznatih metala. Kada su povezani s odgovarajućim smolama, kompoziti s ugljičnim vlakana su jedni od najotpornijih materijala na koroziju. Ne tope se i ne omekšavaju s povećanjem temperature, što im omogućuje uporabu u

visokotemperaturnim aplikacijama. Zapravo, njihova čvrstoća se povećava s porastom temperature u atmosferi koja ne oksidira. Ova jedinstvena svojstva su rezultat mikrostrukture vlakana u aksijalnom i poprečnom smjeru. Aksijalna orijentacija određuje modul elastičnosti, a čvrstoća vlakana se određuje brojem i veličinom pukotina, te poprečnom i aksijalnom orijentacijom. Nisu pod utjecajem vlage, atmosfere, otapala i slabih kiselina na sobnoj temperaturi. Klasificiranju se prema modulu elastičnosti i broju filamenata u vlaknu. Koriste se gdje su potrebna vrhunska mehanička svojstva uz malu masu.

Aramidna vlakna su najčešća organska vlakna koja se koriste za ojačanja. Trenutno najkorištenije vlakno je Kevlar®, proizvođača DuPont. Aramidna vlakna imaju manju gustoću od staklenih i ugljičnih vlakana, a čvrstoću i krutost između navedenih. Stoga je specifična čvrstoća aramida prilično visoka, otprilike usporediva s specifičnom čvrstoćom ugljičnih vlakana. Sposobnost produljenja aramidnih vlakana je mnogo veća od staklenih i ugljičnih vlakana. Ta sposobnost produljenja, uz izvrsnu čvrstoću, rezultira visokom žilavošću koja druga vlakna ne nude. Žilavost je jedno od najvažnijih svojstava i dovodi do većine primjena u kojima se aramidna vlakna koriste kao ojačanja. Aramidna vlakna imaju lošija svojstva tlačnog opterećenja od staklenih i ugljičnih vlakana. Primjenjuju se kao materijal za pancirke, zrakoplove itd.

1.4. Oblici ojačanja

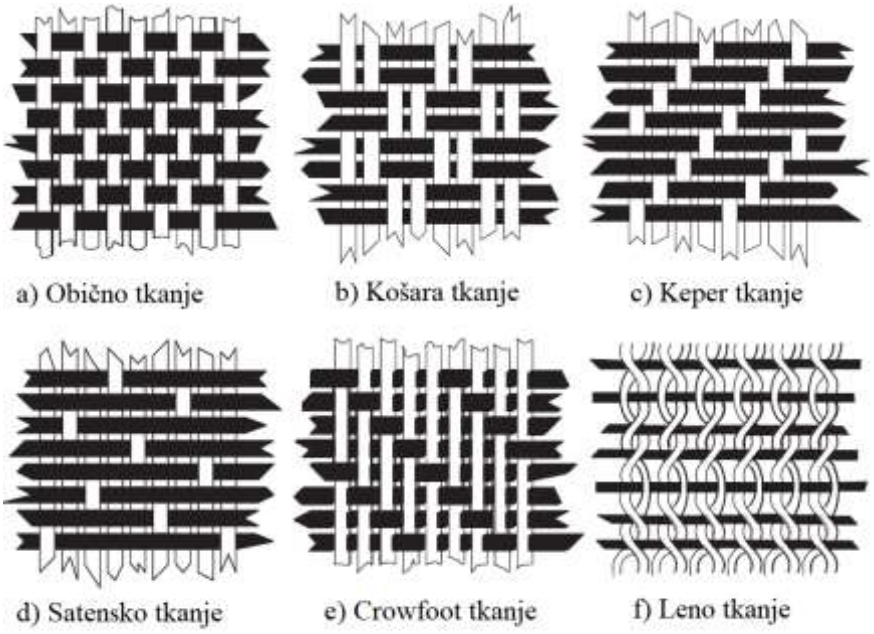
Ojačanja se prodaju i koriste u kompozitima u različitim oblicima. Zbog važnosti ojačanja u konačnim svojstvima kompozita, oblik ojačanja čini veliku razliku u karakteristikama kompozita. Oblik ojačanja je vrlo važan na proces izrade kompozita. Unatoč činjenici da je većina ojačavajućih vlakana formirana kao pojedinačni filamenti, gotovo se nikada ne koriste u tom obliku za izradu kompozita. Filamenti su jednostavno previše krhki i premali da bi se koristili pojedinačno. Skupine više filamenta zovu se niti, ili češće vlakna. Postoje različiti promjeri i količine filamenata u vlaknu. Ako su filamenti uvijeni, skupina se naziva pređa. Slika 1.1 prikazuje oblike vlakana. Praktično se smatra da vlakna imaju duljinu od najmanje 3 mm. Ispod te veličine, nazivaju se kao mljevena vlakna (čestice).



Slika 1.1 Oblici vlakana [2]

1.4.1. Tkana vlakna (tkanine)

Tkanine, koje se smatraju međuoblicima predstavljaju vlakna u jednostavnijem obliku za upotrebu. Svojstva tkanine mogu ovisiti o nizu parametara, uključujući sljedeće: vrsta tkanja, težini vlakana po jedinci površine, debljini tkanine, broju navoja, promjeru i ostalim svojstvima vlakana. Sve ovo rezultira velikom raznolikošću dostupnih tkanina (Sl. 1.2), pogotovo zato što svaki proizvođač ima zasebnu kombinaciju svojstava.

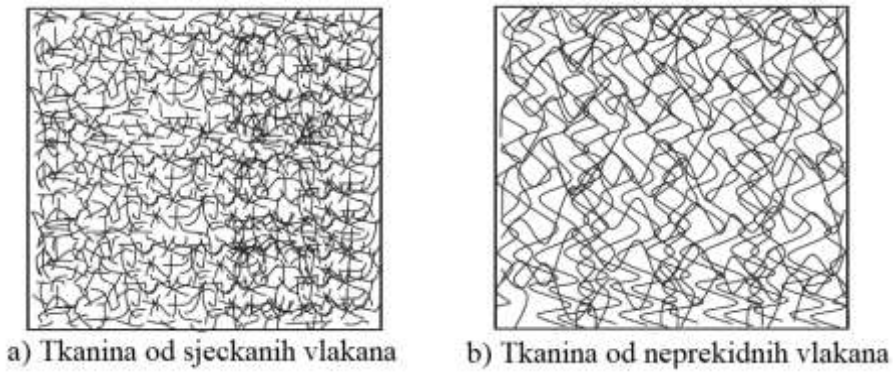


Slika 1.2 Vrste tkanja vlakana [2]

1.4.2. Netkana vlakna (mat)

Neke primjene kompozita ne zahtijevaju tkanje ojačanja. Na primjer, proizvođači brodova možda koriste postupak nanošenja kompozita sprejanjem putem pištolja koji ima ugrađen sjekač vlakana, ali taj postupak nema jednostavnost primjene kao polaganje ojačanja u obliku

tkanine. Iako bi promjena na tkano ojačanje vjerojatno rezultirala boljim mehaničkim svojstvima, metoda sprejanja sjeckanih vlakana ima nižu cijenu. Ekonomski kompromis bi bio korištenje tkanine od sjeckanih vlakana. Slika 1.3 prikazuje vrste netkanih tkanina (matova). Tkanine od sjeckanih vlakana su napravljene usitnjavanjem staklenih vlakana u slične duljine kao za proces spejanjem (25-75 mm) i usmjeravanjem tih vlakana na pojas. Laki sloj veziva se nanosi kako bi dobio materijal kojim se može rukovati kao s tkaninom. Tkanina od sjeckanih vlakna nije robusna kao tkana tkanina. Vlakna nisu čvrsto vezana s matricom i prilikom rukovanja, neka vlakna mogu otpasti. Postoje još tkanine od neprekinutih vlakana. Njihova prednost je da se mogu koristiti bez ispadanja vlakana s tkanine. Tkanine od neprekinutih vlakana imaju samo 33-50% čvrstoće tkanih tkanina od neprekinutih vlakana usporedive debljine. Ovaj pad svojstava je zbog nižeg sadržaja vlakana u tkanini, kraćih i više slučajno orijentiranih vlakana u smjerovima koji nisu potrebni za prijenos opterećenja. Međutim, niski troškovi i općenito prihvatljiva svojstva za mnoge dijelove doveli su do raširene upotrebe tkanina sa sjeckanim vlaknima na tržištu plastika ojačanih staklenim vlaknima.



Slika 1.3 Vrste netkanih tkanina (matova) [2]

1.5. Diskontinuirana vlakna (sjeckana)

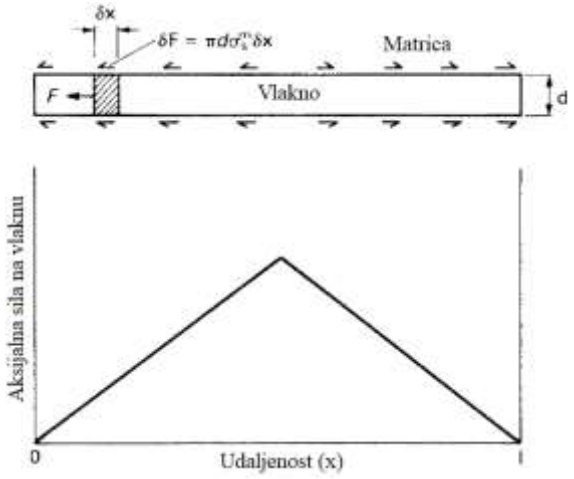
Izraz „kompozit sa diskontinuiranim vlaknima“ koristi se za opisivanje vlakna koja su relativno kratka u usporedbi s veličinom kompozitnog materijala. Diskontinuirana vlakna su karakterizirana cilindričnim poprečnim presjekom i duljinom od 3 do 100 mm. Diskontinuirana vlakna mogu poboljšati mehanička svojstva kompozita, jer pojedinačna vlakna, budući da su jača faza, djeluju tako da zaustave bilo kakve pukotine koje nastaju unutar matrice. Na taj način može se spriječiti širenje pukotina preko kompozita. Diskontinuirana vlakna mogu biti postavljena paralelno ili slučajno orijentirana unutar matrice. Ako su sva vlakna poravnata, drugim riječima jednosmjerna, tada je materijal izrazito anizotropan (znatno veća čvrstoća u

smjeru vlakana). Kompoziti ojačani diskontinuiranim vlaknima imaju slabija mehanička svojstva od onih s kontinuiranim vlaknima. Uloga matrice je važnija kod diskontinuiranih u usporedbi s kontinuiranim vlaknima, zbog razlike mehanizma očvršćivanja. Diskontinuirana vlakna imaju široku primjenu kao ojačanja u industriji injekcijskog brizganja. Izvanredna značajka kompozita ojačanih diskontinuiranim vlaknima je da su gotovo čvrsta kao ona s kontinuiranim vlaknima, pod uvjetom da duljina vlakana prelazi kritičnu vrijednost. Uzeto u obzir da maksimalno smično naprezanje koje se može prenijeti kompozitima s diskontinuiranim vlaknima kod kojih matrica ima smičnu čvrstoću σ_s^m ($\sigma_s^m \approx 0.5 \cdot \sigma_y^m$). Gdje je σ_y^m - granica plastičnosti matrice. Slika 1.4 prikazuje da aksijalna sila prenesena do vlakna promjera *d* preko malog segmenta *δx* njegove duljine iznosi:

$$\delta F = \pi \cdot d \cdot \sigma_s^m \cdot \delta x \tag{1.1}$$

Sila na vlaknu se tako povećava od nule na kraju do vrijednosti koju ima na duljini *x* od kraja:

$$F = \int_0^x \pi \cdot d \cdot \sigma_s^m \, dx = \pi \cdot d \cdot \sigma_s^m \cdot x \tag{1.2}$$



Slika 1.4 Prijenos sile od matrice do vlakna [3]

Također na slici 1.4 se uočava da prijenos sile od matrice do vlakna uzrokuje vlačno naprezanje u vlaknu koje je maksimalno u sredini duljine vlakna. Ako nastavi rasti i preraste vlačnu čvrstoću vlakna, doći će do pucanja vlakna. Sila pri kojoj će doći do pucanja vlakna je:

$$F_C = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_f^f \tag{1.3}$$

Gdje je σ_f^f - vlačna čvrstoća vlakna, *d* - promjer vlakna.

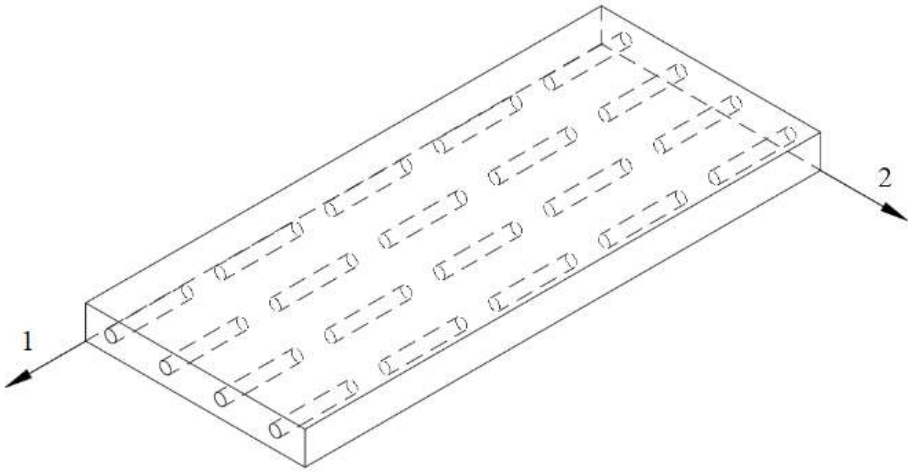
Izjednačujući ove dvije sile, može se odrediti kritična udaljenost od kraja vlakna:

$$x_C = \frac{d}{4} \cdot \frac{\sigma_f^f}{\sigma_s^m} \tag{1.4}$$

Ako je duljina vlakna manja od $2x_C$, vlakno neće puknuti, već će u slučaju preopterećenja doći do izvlačenja vlakna iz matrice (neće biti u potpunosti iskorišten potencijal vlakna). Povećanje duljine vlakna do $2x_C$ raste čvrstoća kompozita. Povećanjem duljine vlakna iznad vrijednosti $2x_C$, ne dobiva se na čvrstoći kompozita. Optimalna čvrstoća i iskoristivost će se postići sjeckanjem vlakna na duljinu $2x_C$.

2. Proračun kompozita s usmjerenim sjeckanim vlaknima

Proračun se radi za kompozit s usmjerenim sjeckanim vlaknima (Sl. 2.1). Smatra se da su vlakna i matrica linearno elastični, homogeni i da je veza između njih savršena. Također se smatra da su vlakna savršeno raspoređena i cilindrična. Ojačanje su sjeckana staklena vlakna (E-staklo), a matrica je poliesterska smola. Svojstva vlakana i smole su preuzeta iz računalnog programa za izbor materijala [11]. Kritična duljina vlakana je određena prema izrazu (1.4), te iznosi 11.4 mm. Proračun se radi pomoću računalnog programa Microsoft Excel.



Slika 2.1 Kompozit s usmjerenim sjeckanim vlaknima

2.1. Modul elastičnosti kompozita

Prema Halpin-Tsaiu, modul elastičnosti kompozita s kratkim usmjerenim vlaknima jednak je [4]:

$$\frac{E_{11}}{E_m} = \frac{1 + \zeta \cdot \eta \cdot V_f}{1 - \eta \cdot V_f} \tag{2.1}$$

Gdje je E_{11} - modul elastičnosti u smjeru vlakana kompozita, E_m - modul elastičnosti matrice, ζ - parametar koji ovisi o geometriji vlakana i vrsti opterećenja (za uzdužni modul je $\zeta = 2 \cdot (l/d)$, a za poprečni modul je $\zeta = 2$), V_f - volumenski udio vlakana. Faktor η u slučaju proračuna modula elastičnosti u smjeru vlakana kompozita jednak je:

$$(l < x_c) \qquad \eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + E_m \cdot \left(1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{l}{2 \cdot d}\right)\right)} \tag{2.2}$$

$$(l \geq x_c) \qquad \eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + V_f \cdot E_f \cdot \left(1 - \frac{x_c}{2 \cdot l}\right) + \left(1 - V_f\right) \cdot E_m} \tag{2.3}$$

Faktor η u slučaju proračuna modula elastičnosti poprečnog na smjer vlakana kompozita jednak je:

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2 + 40 \cdot V_f^{10}} \tag{2.4}$$

Gdje je E_f - modul elastičnosti vlakana, E_m - modul elastičnosti matrice, V_f - volumenski udio vlakana, l - duljina vlakana, d promjer vlakana i x_c - kritična duljina vlakana.

Uvrštavanjem jednadžbi (2.2), (2.3) i (2.4) u jednadžbu (2.1) dobiva se jednadžba za proračun modula elastičnosti kompozita.

Jednadžba za proračun modula elastičnosti u smjeru vlakana kompozita u slučaju da su vlakna kraća od kritične duljine, prema Halpin-Tsaiu je:

$$E_{11} = E_m \cdot \frac{1 + \left(2 \cdot \frac{l}{d}\right) \cdot \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + E_m \cdot \left(1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{l}{2 \cdot d}\right)\right)} \cdot V_f}{1 - \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + E_m \cdot \left(1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{l}{2 \cdot d}\right)\right)} \cdot V_f} \tag{2.5}$$

Jednadžba za proračun modula elastičnosti u smjeru vlakana kompozita u slučaju da su vlakna dulja od kritične duljine, prema Halpin-Tsaiu je:

$$E_{11} = E_m \cdot \frac{1 + \left(2 \cdot \frac{l}{d}\right) \cdot \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + V_f \cdot E_f \cdot \left(1 - \frac{x_c}{2 \cdot l}\right) + \left(1 - V_f\right) \cdot E_m} \cdot V_f}{1 - \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + V_f \cdot E_f \cdot \left(1 - \frac{x_c}{2 \cdot l}\right) + \left(1 - V_f\right) \cdot E_m} \cdot V_f} \tag{2.6}$$

Jednadžba za proračun modula elastičnosti poprečnog na smjer vlakana kompozita prema Halpin-Tsaiu je:

$$E_{22} = E_m \cdot \frac{1 + 2 \cdot \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2 + 40 \cdot V_f^{10}} \cdot V_f}{1 - \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2 + 40 \cdot V_f^{10}} \cdot V_f} \tag{2.7}$$

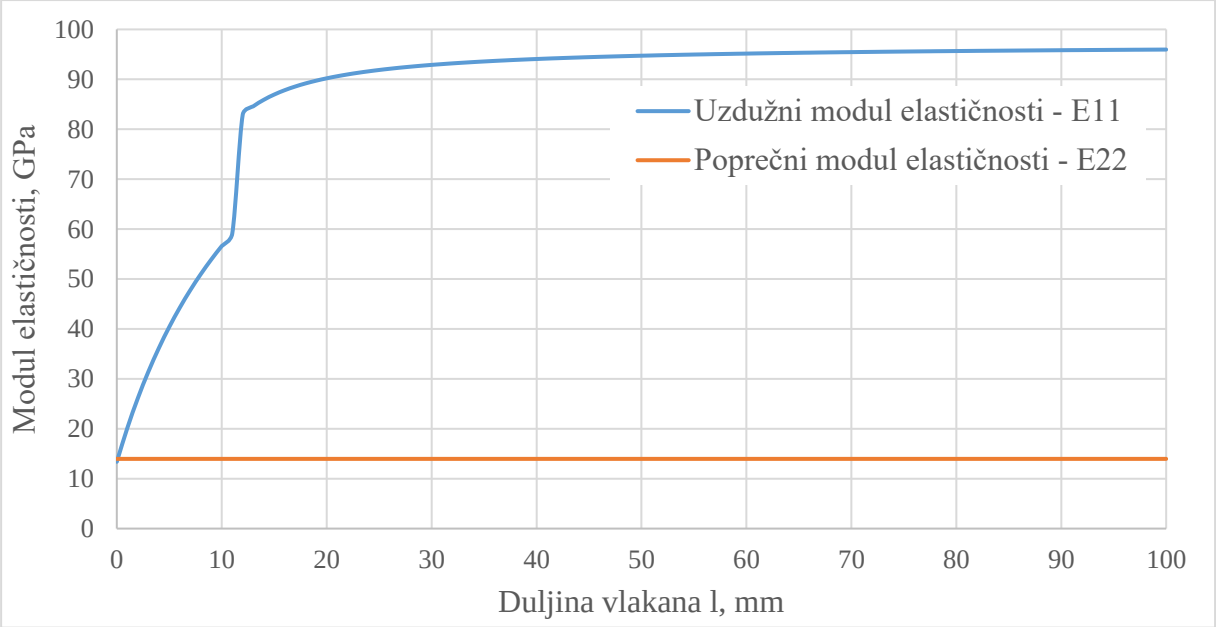
2.1.1. Proračun modula elastičnosti kompozita, ovisno o duljini vlakana

Za proračun korištene su jednadžbe (2.5), (2.6) i (2.7), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Ulazni podaci za proračun modula elastičnosti kompozita, ovisno o duljini vlakana

Modul elastičnosti smole E_m, GPa	Modul elastičnosti vlakana E_f, GPa	Volumenski udio vlakana V_f, %	Promjer vlakana d, mm	Kritična duljina vlakana x_c, mm
3.7	239	50	0.4	11.4

Slika 2.2 prikazuje modul elastičnosti kompozita u ovisnosti o duljini vlakana. Iz slike 2.2 uočava se nagli porast uzdužnog modula elastičnosti E_{11}, to je zbog porasta duljine vlakana l iznad kritične duljine x_c. Također se uočava da modul elastičnosti poprečan na smjer vlakana kompozita E_{22} ne ovisi o duljini vlakana l, već samo o volumenskom udjelu vlakana V_f.



Slika 2.2 Modul elastičnosti kompozita u ovisnosti o duljini vlakana

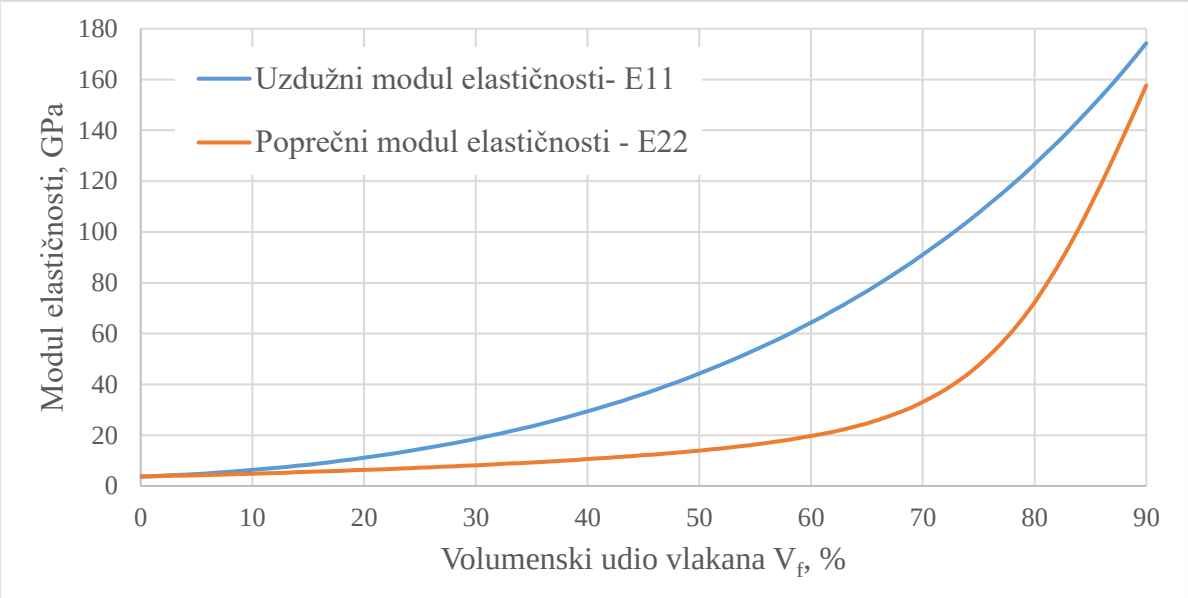
2.1.2. Proračun modula elastičnosti kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana

Za proračun korištene su jednadžbe (2.5) i (2.7)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.2.

Tablica 2.2 Ulazni podaci za proračun modula elastičnosti kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana

Modul elastičnosti smole E_m, GPa	Modul elastičnosti vlakana E_f, GPa	Duljina vlakana l ,mm	Promjer vlakana d, mm	Kritična duljina vlakana x_c, mm
3.7	239	6	0.4	11.4

Slika 2.3 prikazuje modul elastičnosti kompozita u ovisnosti od volumenskom udjelu vlakana V_f.



Slika 2.3 Modul elastičnosti kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana

2.2. Čvrstoća kompozita

Prema modificiranom pravilu smjese vlačna čvrstoća kompozita s kratkim usmjerenim vlaknima u smjeru vlakana je jednaka [5]:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f \cdot F + \sigma'_m \cdot (1 - V_f) \tag{2.8}$$

Gdje je σ_{cu} - vlačna čvrstoća u smjeru vlakana kompozita, σ_{fu} - vlačna čvrstoća vlakana, V_f - volumenski udio vlakana, σ'_m - naprezanje matrice pri lomu kompozita i faktor F koji je:

$$F\begin{cases} = 1 - \dfrac{x_c}{2 \cdot l} & (l > x_c) \\ = \dfrac{l}{2 \cdot x_c} & (l < x_c) \end{cases} \tag{2.9}$$

Gdje je l - duljina vlakana, x_c - kritična duljina vlakna.

Vlačna čvrstoća poprečna na smjer vlakana kompozita jednaka je vlačnoj čvrstoći matrice.

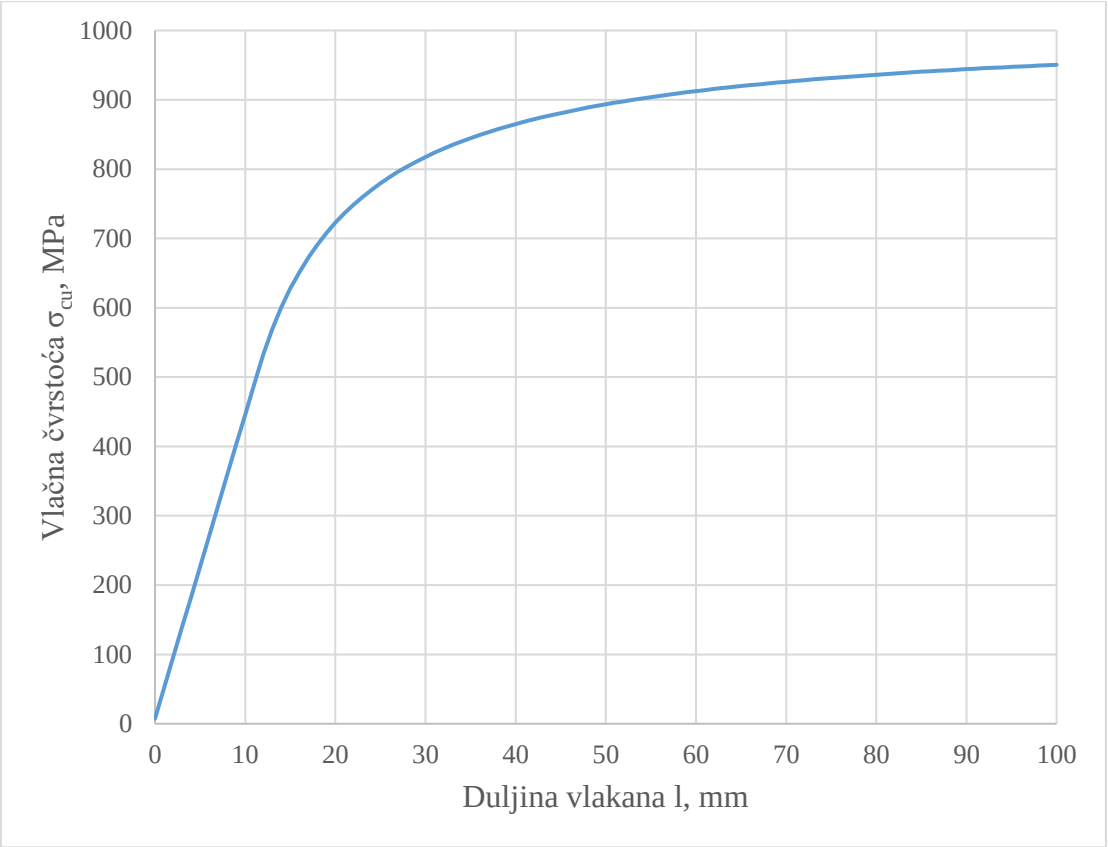
2.2.1. Proračun vlačne čvrstoće u smjeru vlakana kompozita, ovisno o duljini vlakana

Za proračun vlačne čvrstoće korištene su jednadžbe (2.8) i (2.9)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.3.

Tablica 2.3 Ulazni podaci za proračun vlačne čvrstoće u smjeru vlakana kompozita, ovisno o duljini vlakana

Vlačna čvrstoća vlakana σ_{fu}, MPa	Volumenski udio vlakana V_f, %	Kritična duljina vlakana x_c, mm	Naprezanje matrice pri lomu kompozita σ'_m, MPa
2000	50	11.4	15

Slika 2.4 prikazuje vlačnu čvrstoću u smjeru vlakana kompozita σ_{cu} u ovisnosti o duljini vlakana l.



Slika 2.4 Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana kompozita u ovisnosti o duljini vlakana

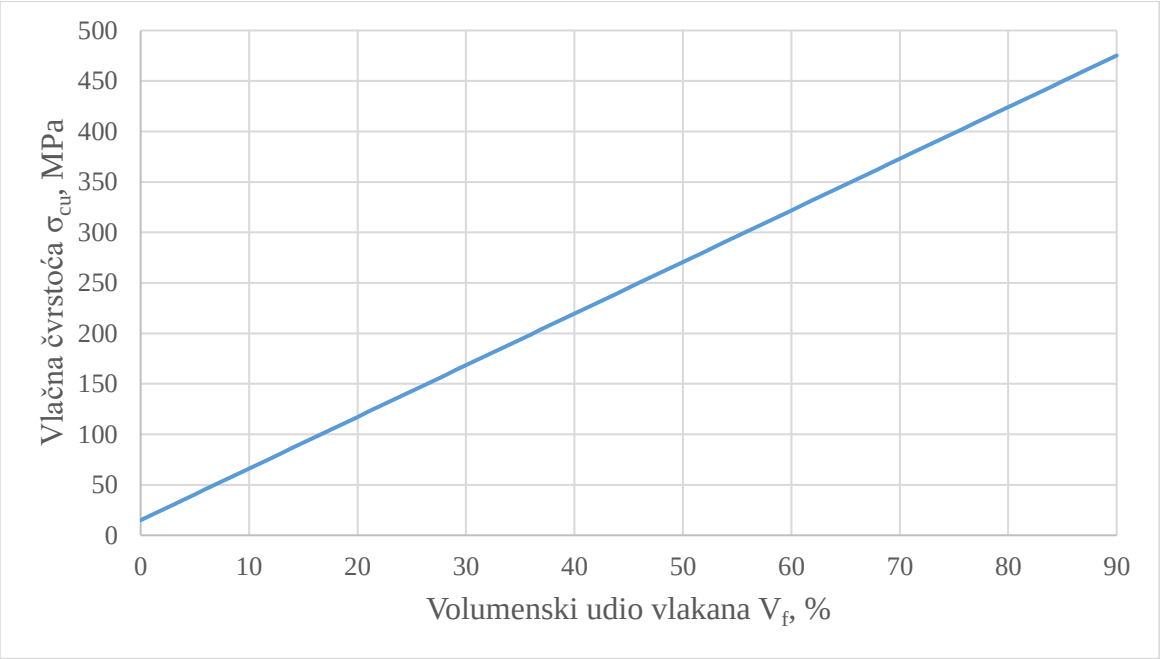
2.2.2. Proračun vlačne čvrstoće u smjeru vlakana kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana

Za proračun vlačne čvrstoće korištene su jednadžbe (2.8) i (2.9)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.4.

Tablica 2.4 Ulazni podaci za proračun vlačne čvrstoće u smjeru vlakana kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana

Vlačna čvrstoća vlakana σ_{fu}, MPa	Duljina vlakana l, mm	Kritična duljina vlakana x_c, mm	Naprezanje matrice pri lomu kompozita σ'_m, MPa
2000	6	11.4	15

Slika 2.5 prikazuje vlačnu čvrstoću u smjeru vlakana kompozita σ_{cu} u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana V_f. Iz slike 2.5 uočava se da vlačna čvrstoća u smjeru vlakana kompozita σ_{cu} linearno raste s porastom volumenskog udjela vlakana V_f.



Slika 2.5 Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana

2.3. Toplinska vodljivost kompozita

Prema Halpin-Tsaiu, toplinska vodljivost kompozita s kratkim usmjerenim vlaknima jednaka je [6]:

$$K_1 = K_m \cdot \frac{1 + \left(2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) - 1}{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) + \left(2 \cdot \frac{l}{d}\right)} \cdot V_f \right)}{1 - \left(\frac{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) - 1}{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) + \left(2 \cdot \frac{l}{d}\right)} \cdot V_f \right)} \tag{2.10}$$

Gdje je K_1 - toplinska vodljivost u smjeru vlakana kompozita, K_m - toplinska vodljivost matrice, K_f - toplinska vodljivost vlakana, l - duljina vlakana, d - promjer vlakana, V_f - volumenski udio vlakana.

$$K_2 = K_m \cdot \frac{1 + \left(2 \cdot \frac{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) - 1}{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) + 2} \cdot V_f \right)}{1 - \left(\frac{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) - 1}{\left(\frac{K_f}{K_m}\right) + 2} \cdot V_f \right)} \tag{2.11}$$

Gdje je K_2 - toplinska vodljivost poprečna na smjer vlakana kompozita, K_m - toplinska vodljivost matrice, K_f - toplinska vodljivost vlakana, l - duljina vlakana, d - promjer vlakana, V_f - volumenski udio vlakana.

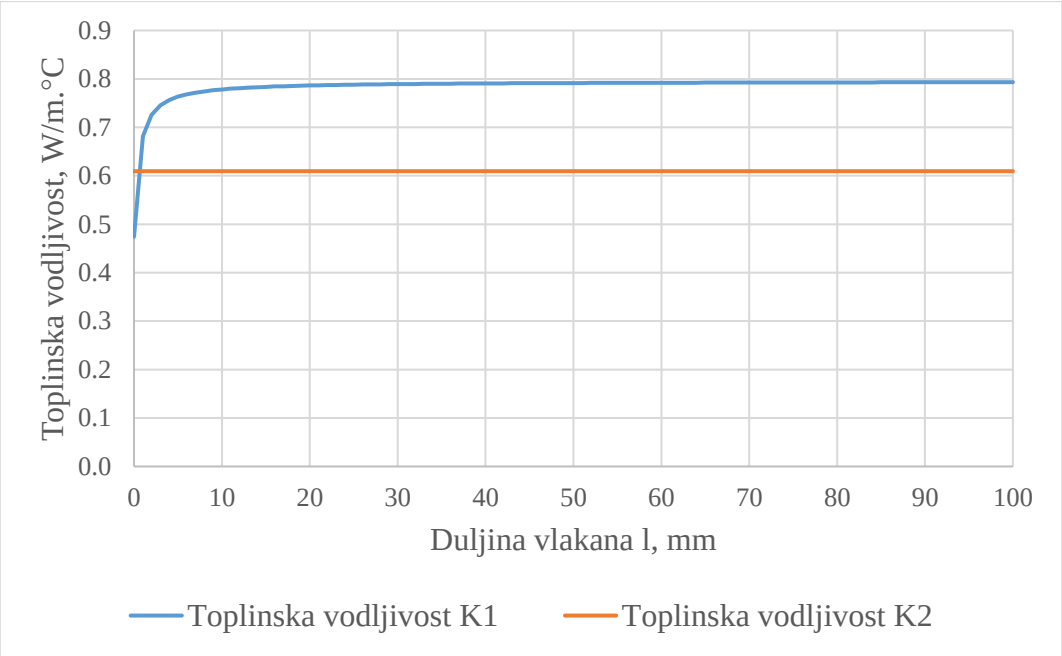
2.3.1. Proračun toplinske vodljivosti kompozita, ovisno o duljini vlakana

Za proračun toplinske vodljivosti korištene su jednadžbe (2.10) i (2.11)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.5.

Tablica 2.5 Ulazni podaci za proračun toplinske vodljivosti kompozita, ovisno o duljini vlakana

Toplinska vodljivost smole K_m, W/m.°C	Toplinska vodljivost vlakana K_f, W/m.°C	Promjer vlakana d, mm	Volumenski udio vlakana V_f, %
0.29	1.3	0.4	0.5

Slika 2.6 prikazuje toplinsku vodljivost kompozita uz ovisnosti o duljini vlakana l. Iz slike 2.6 uočava se da toplinska vodljivost poprečna na smjer vlakana kompozita K_2 ne ovisi o duljini vlakana l, već samo o volumenskom udjelu vlakana V_f.



Slika 2.6 Toplinska vodljivost kompozita u ovisnosti o duljini vlakana

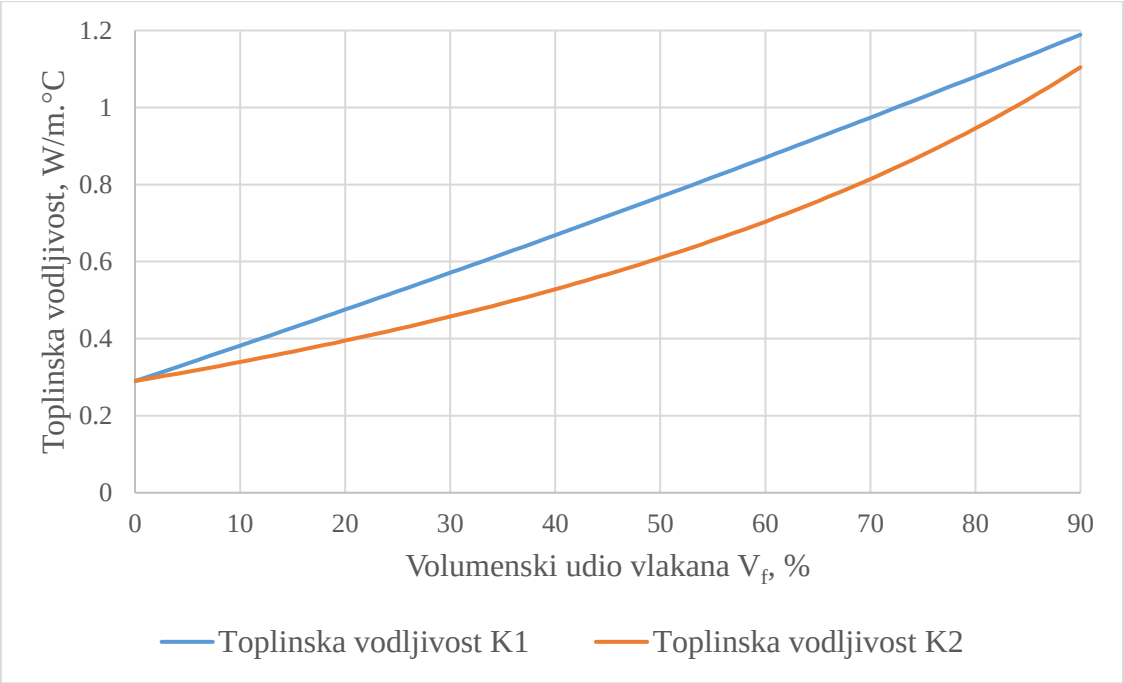
2.3.2. Proračun toplinske vodljivosti kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana

Za proračun toplinske vodljivosti korištene su jednadžbe (2.10) i (2.11)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.6.

Tablica 2.6 Ulazni podaci za proračun toplinske vodljivosti kompozita, ovisno o volumenskom udjelu vlakana

Toplinska vodljivost smole K_m, W/m.°C	Toplinska vodljivost vlakana K_f, W/m.°C	Promjer vlakana d, mm	Duljina vlakana l, mm
0.29	1.3	0.4	6

Slika 2.7 prikazuje toplinsku vodljivost kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana V_f. Iz slike 2.7 uočava se da toplinska vodljivost u smjeru vlakana kompozita K_1 raste linearno s porastom volumenskog udjela vlakana V_f.



Slika 2.7 Toplinska vodljivost kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana

2.4. Koeficijent toplinskog širenja kompozita

Prema pravilu smjese koeficijent toplinskog širenja kompozita s kratkim usmjerenim vlaknima jednak je [7]:

$$a_{c1} = \frac{(a_m \cdot E_m \cdot V_m + a_f \cdot E_f \cdot V_f)}{(E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f)} \tag{2.12}$$

Gdje je a_{c1} - koeficijent toplinskog širenja u smjeru vlakana kompozita, a_m - koeficijent toplinskog širenja matrice, a_f - koeficijent toplinskog širenja vlakana, E_m - modul elastičnosti matrice, E_f - modul elastičnosti vlakna, V_m - volumenski udio matrice, V_f - volumenski udio vlakana.

Prema Chamisovom modelu, koeficijent toplinskog širenja poprečnog na smjer vlakana kompozita s kratkim usmjerenim vlaknima jednak je [8]:

$$a_{c2} = a_f \cdot \sqrt{V_f} + (1 - \sqrt{V_f}) \cdot \left(1 + V_f \cdot \nu_m \cdot \frac{E_f}{E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m}\right) \cdot a_m \tag{2.13}$$

Gdje je a_{c2} - koeficijent toplinskog širenja poprečan na smjer vlakana kompozita, ν_m - Poissonov koeficijent matrice, a_m - koeficijent toplinskog širenja matrice, a_f - koeficijent toplinskog širenja vlakana, E_m - modul elastičnosti matrice, E_f - modul elastičnosti vlakna, V_m - volumenski udio matrice, V_f - volumenski udio vlakana.

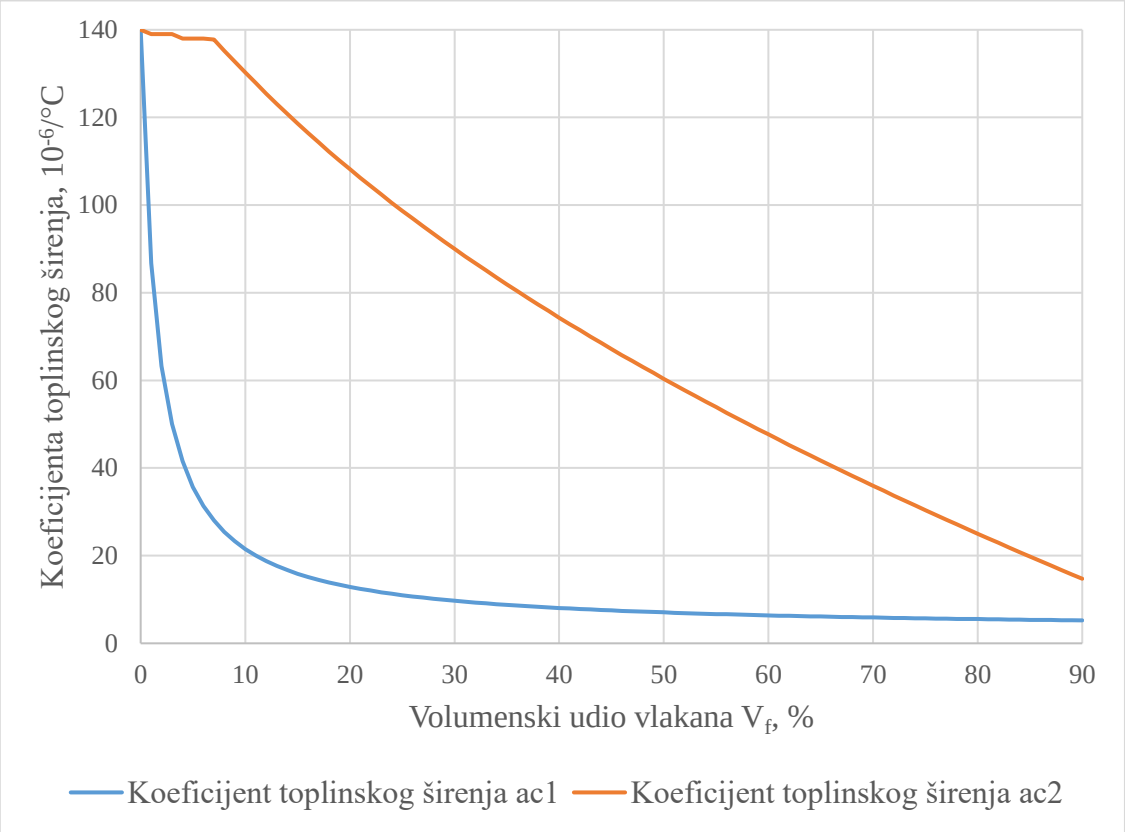
2.4.1. Proračun koeficijenta toplinskog širenja kompozita

Za proračun toplinske vodljivosti korištene su jednadžbe (2.12) i (2.13)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.7.

Tablica 2.7 Ulazni podaci za proračun koeficijenta toplinskog širenja kompozita

Koeficijent toplinskog širenja smole a_m, 10^{-6}/°C	Koeficijent toplinskog širenja vlakana a_f, 10^{-6}/°C	Modul elastičnosti smole E_m, GPa	Modul elastičnosti vlakana E_f, GPa	Poissonov koeficijent smole ν_m
140	5	3.7	239	0.392

Slika 2.8 prikazuje koeficijent toplinskog širenja kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana V_f.



Slika 2.8 Koeficijent toplinskog širenja kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana

2.5. Gustoća kompozita

Prema pravilu smjese gustoća kompozita jednaka je [7]:

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \tag{2.14}$$

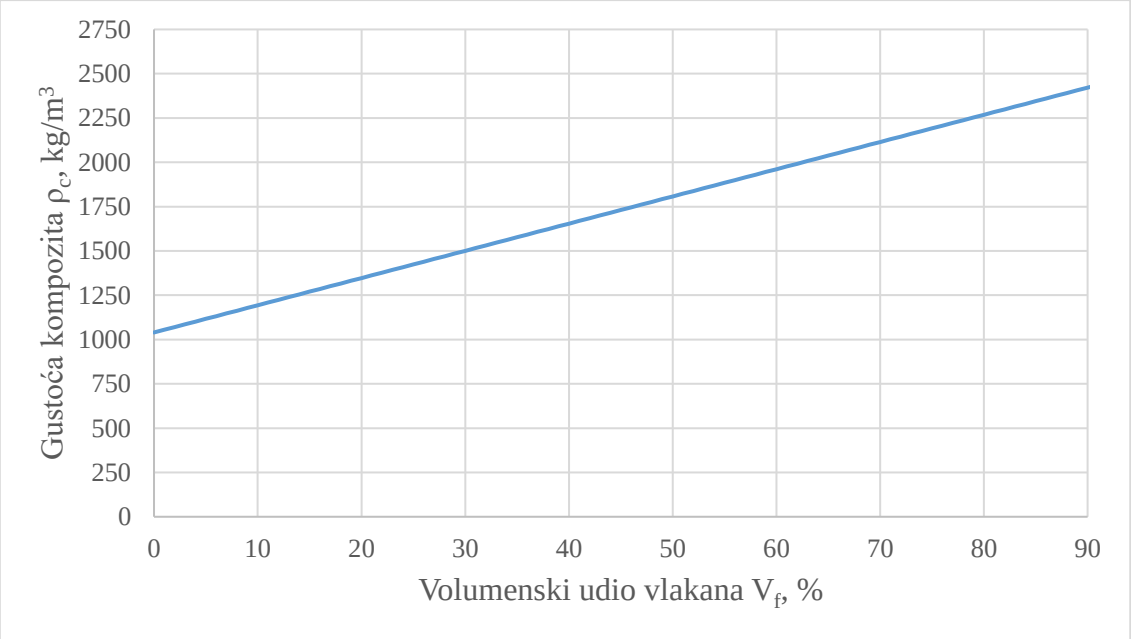
Gdje je ρ_c - gustoća kompozita, ρ_m - gustoća matrice, ρ_f - gustoća vlakana, V_m - volumenski udio matrice, V_f - volumenski udio vlakana.

Za proračun korištena je jednadžba (2.14)), a ulazni podaci su prikazani u tablici 2.8.

Tablica 2.8 Ulazni podaci za proračun gustoće kompozita

Gustoća smole ρ_m, kg/m^3	Gustoća vlakana ρ_f, kg/m^3
1040	2575

Slika 2.9 prikazuje gustoću kompozita ρ_c u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana V_f. Također iz slike 2.9 uočava se da gustoća kompozita ρ_c linearno raste sa porastom volumenskog udjela vlakana V_f.



Slika 2.9 Gustoća kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana

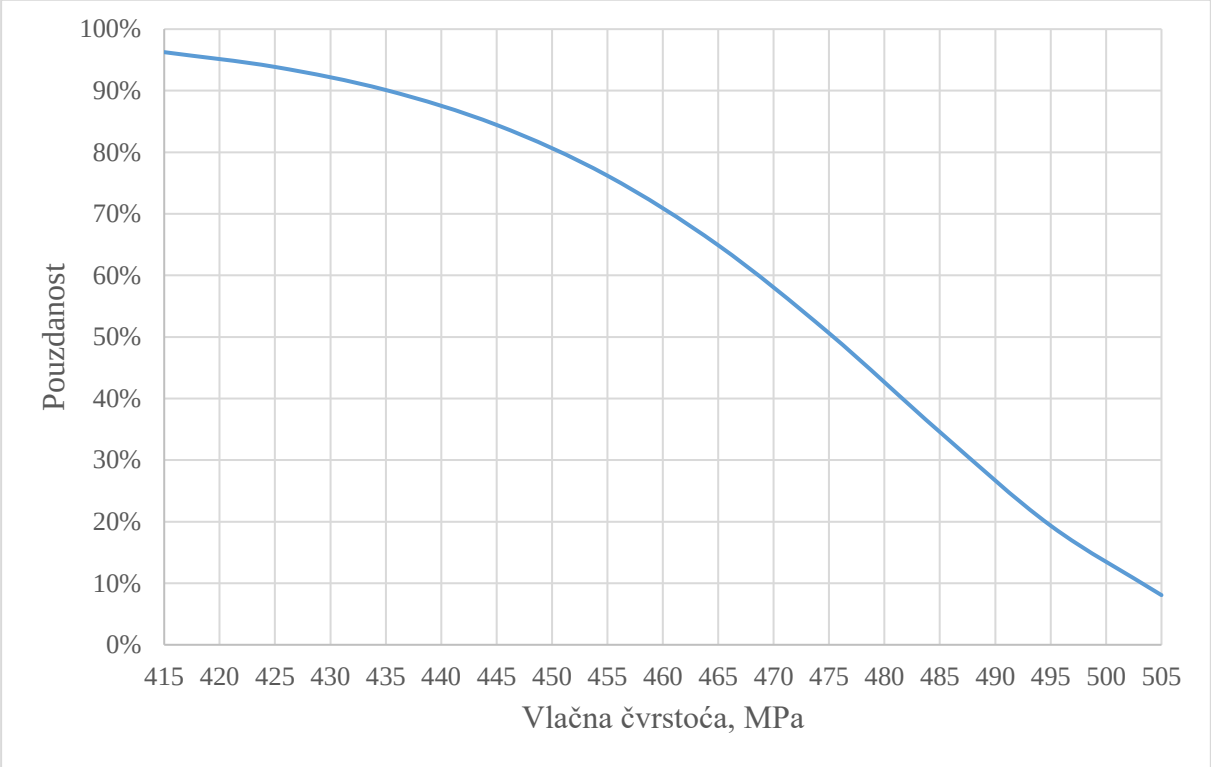
2.6. Primjena Weibull-ove razdiobe za projektiranje kompozita

Kompozitni materijali nisu izotropni i stoga imaju različita mehanička svojstava u različitim smjerovima. To dovodi do potrebe za korištenjem statističkih analiza za njihovo korištenje u projektiranju i proizvodnji. Jedna od tih analiza je Weibull-ova razdioba. Weibull-ova razdioba ima sposobnost modeliranja eksperimentalnih podataka za različite karakteristike. Weibull-ova razdioba omogućuje određivanje svojstava kompozita u obliku funkcije pouzdanosti [9].

$$R(x;b,c) = \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right), \qquad b \geq 0, c \geq 0 \tag{2.15}$$

Gdje je *R(x; b, c)* - funkcija pouzdanosti, *b* - parametar razmjera, *c* - parametar oblika i - najmanja vrijednost svojstava.

U praksi Weibull-ova razdioba za projektiranje kompozita se primjenjuje tako da se prvo ispita minimalno 10 uzoraka. Onda se podaci ispitivanja unesu u računalni program Microsoft Excel koji već ima ugrađenu funkciju pouzdanosti (2.15) i koji tada generira dijagram kao na slici 2.10.



Slika 2.10 Vlačna čvrstoća kompozita u obliku funkcije pouzdanosti

3. Izrada i ispitivanje uzoraka kompozita sa neusmjerenim sjeckanim vlaknima

3.1. Materijali za izradu uzoraka

Za izradu uzoraka korištena je poliesterska smola i katalizator proizvođača KGK (Sl. 3.1).



Slika 3.1 Odabrana poliesterska smola i katalizator [10]

Zbog nedostatka podatka o vlačnoj čvrstoći odabrane smole ispitan je uzorak. Uzorak je izrađen tako da se smjesa smole i katalizatora ulila u kalup izrađen od stakla. Dobiveni uzorak je krhak, te ispitivanje na kidalici nije bilo moguće. Na slici 3.2 prikazano je ispitivanje uzorka. Uzorak je ispitan tako da se je postavio između dva kruta oslonca i opteretio po sredini, a pomoću digitalne vage mjerilo se maksimalno opterećenje pri ispitivanju do loma. U tablici 3.1 prikazani su podaci i rezultati ispitivanja.



Slika 3.2 Ispitivanje vlačne čvrstoće uzorka bez vlakana

Tablica 3.1 Podaci i rezultati ispitivanja uzorka bez vlakana

Sila F, N	170.694
Razmak između oslonaca L, mm	80
Konstanta C	4
Maksimalni moment savijanja M = (F*L)/C, Nmm	3413.88
Širina presjeka uzorka b, mm	20.1
Visina presjeka uzorka h, mm	4.3
Moment otpora presjeka Z = $(b*h^2)/6$, mm^3	61.9415
Savojna čvrstoća ili modul loma σ_f = M/Z, MPa	55.12
Približna vlačna čvrstoća $\sigma = \sigma_f/1.3$, MPa	42.4

Za izradu uzoraka korištena su staklena vlakna (E-staklo) duljine 3 i 6 mm (Sl. 3.3). Vlačna čvrstoća ovih vlakana je 2000 MPa.



Slika 3.3 Staklena vlakna duljine 3 i 6 mm

3.2. Izrada uzoraka

Napravljen je kalup od staklenih pločica debljine 6 mm (Sl. 3.4). Staklo je odabrano zbog dobre tvrdoće, lake obradivosti, male površinske hrapavosti i male cijene. Točno izrezane pločice su spojene dvostranom samoljepljivom trakom na donju ploču, tako da se dobije utor u koji će se polagati smola i vlakna. Kasnije su pločice spajane pomoću ručnih stega zbog jednostavnijeg odvajanja uzoraka od kalupa.



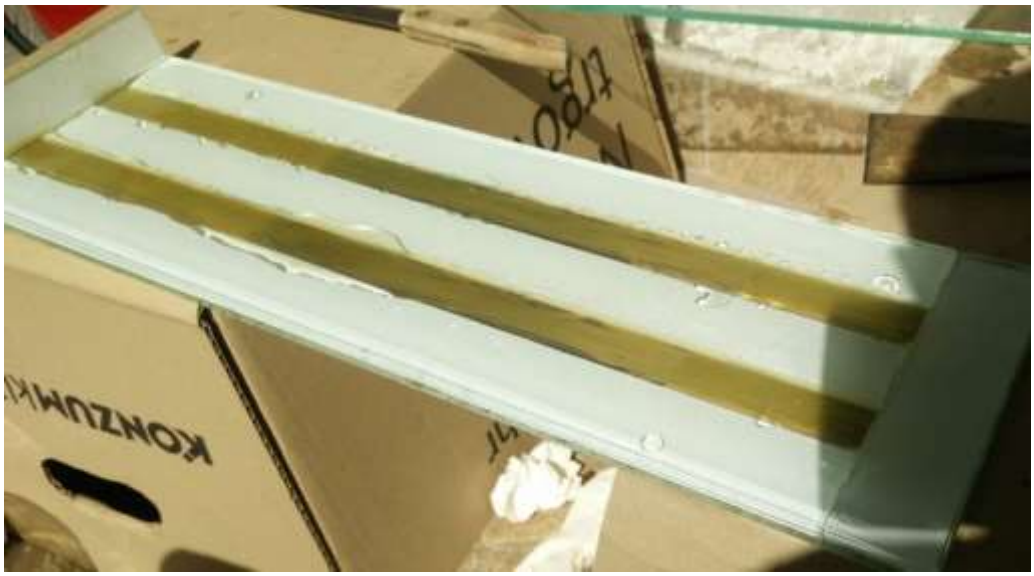
Slika 3.4 Stakleni kalup za izradu uzoraka

Prije procesa polaganja vlakana i smole, stakleni kalup se premazivao tankim slojem maziva za kalupe (Sl. 3.5). Razlog premazivanja je da se stvrdnuti uzorak može lagano odvojiti od kalupa.



Slika 3.5 Mazivo za kalupe

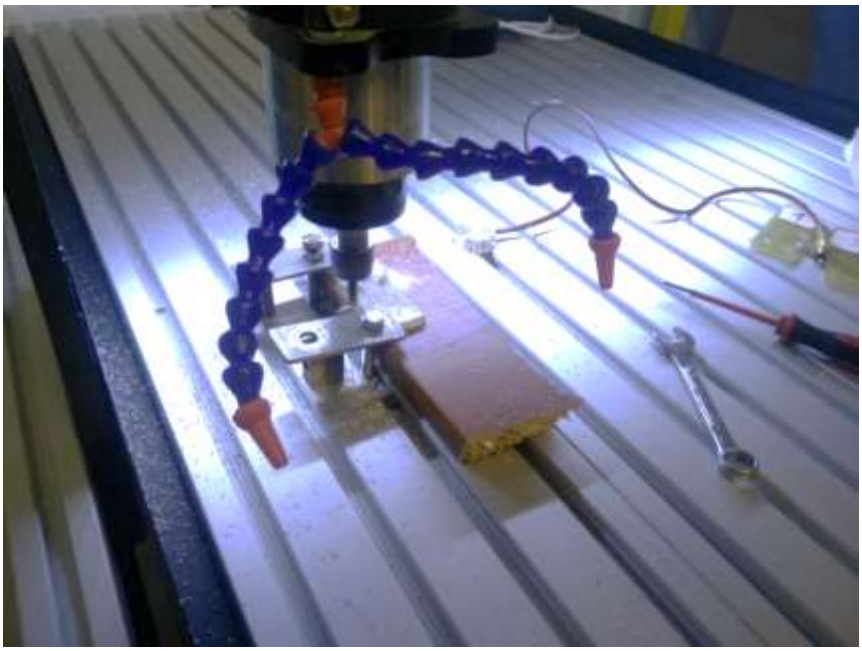
Nakon što se kalup premazao mazivom za kalupe potrebno je pričekati dvije minute da se mazivo stvrdne. Tada je slijedio proces polaganja vlakna i smole unutar kalupa. Prvo se postavljao tanki sloj smole i onda sloj vlakana. Proces se ponavljao sve dok se nije potrošila precizno izvagana masa vlakana i smole. Na slici 3.6 prikazan je završetak procesa polaganja nakon što je cijeli kalup ispunjen smolom i vlaknima. Vlakna prilikom polaganja je bilo potrebno pritisnuti, da upiju smolu u sebe. Ako vlakna ne upiju u sebe smolu, ostati će mjehurići zraka oko vlakana.



Slika 3.6 Kalup ispunjen smolom i vlaknima

Daljnjom izradom uzorci su se radili pojedinačno, a ne kao na slici 3.6 gdje se više uzoraka izrađivalo odjednom. Kalup je ostao isti, samo se dodala pregrada na točnoj udaljenosti da se dobije uzorak koji ne zahtjeva dodatnu obradu rezanjem.

Nakon završetka procesa polaganja, uzorak je ostavljen 24 sata da se izvrši umrežavanje strukture. Nakon stvrdnjavanja, uzorak je izvađen iz kalupa, te je obrađen metodom odvajanja čestica glodanjem na 3-osnoj CNC glodalici kako bi se dobilo suženje (Sl. 3.7). Razlog izrade suženja je sprječavanje izvlačenja uzorka iz čeljusti kidalice.



Slika 3.7 Obrada uzoraka na CNC glodalici

Nakon obrade glodanjem, uzorak je označen (Sl. 3.8), te je spreman za ispitivanje. U tablici 3.2 prikazani su podaci o svim uzorcima spremnim za ispitivanje.



Slika 3.8 Uzorci spremni za ispitivanje

Tablica 3.2 Podaci o izrađenim uzorcima

Uzorak	Maseni udio vlakna, %	Duljina vlakana, mm
1	10	3
2	10	3
3	10	6
4	32.5	6
5	25	3
6	40	6
7	40	3
8	17.5	3
9	40	6
10	40	3
11	10	6
12	25	6
13	17.5	6
14	32.5	3

3.3. Ispitivanje uzoraka

Ispitivanje vlačne čvrstoće izvedeno je pomoću ručne kidalice. Kidalica radi na principu poluge, s omjerom krakova 10:1. Ispitivanje je izvođeno tako da se je prvo uzorak učvrstio pritezanjem vijaka u čeljusti kao što je prikazano na slici 3.9.



Slika 3.9 Uzorak učvršćen u čeljustima

Nakon učvršćenja uzorka u čeljusti, korištenjem poluge opterećen je donji prihvat mjerača sile, sve dok uzorak ne bi pukao (Sl. 3.10). Mjerač sile je očitavao svakih 1/100 sekunde silu i pomoću Arduino kontrolera spremao na računalo. Nakon pucanja uzorka, na računalu se očitala maksimalna zabilježena sila. Pomoću te sile računala se vlačna čvrstoća uzorka.



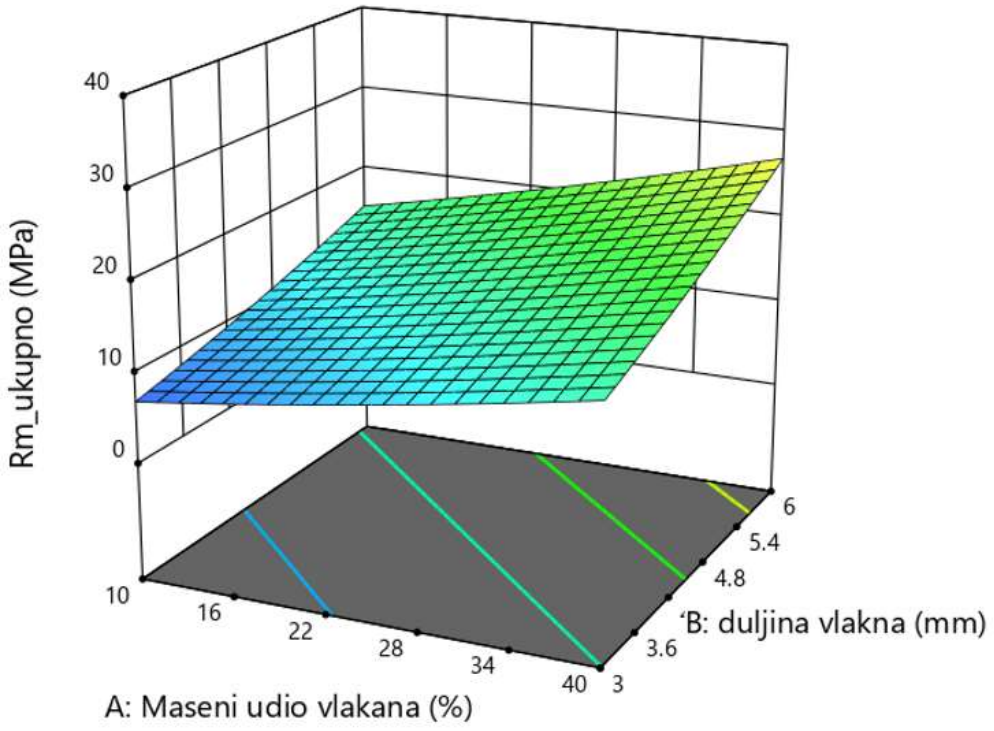
Slika 3.10 Ispitivanje uzoraka

3.4. Rezultati ispitivanja

U tablici 3.3 i na slici 3.11 prikazani su rezultati ispitivanja.

Tablica 3.3 Rezultati ispitivanja

Uzorak	Maseni udio vlakna, %	Duljina vlakana, mm	Poprečni presjek, mm^2	Sila, N	Čvrstoća, MPa
1	10	3	52.205	258.5	5.0
2	10	3	56.916	495.5	8.7
3	10	6	54.27	454	8.4
4	32.5	6	48.783	1147.1	23.5
5	25	3	54.843	267.3	4.9
6	40	6	52.428	1627.2	31.0
7	40	3	57.57	367	6.4
8	17.5	3	32.4	207.4	6.4
9	40	6	53.19	978.1	18.4
10	40	3	53.19	541.7	10.2
11	10	6	56.8512	611.9	10.8
12	25	6	52.965	1458.3	27.5
13	17.5	6	54.4939	1307.3	24.0
14	32.5	3	49.98	1712.4	34.3



Slika 3.11 Rezultati ispitivanja

Pregledom presjeka na mjestu loma (Sl. 3.12) uočeno je da vlakna nisu prekrila cijeli presjek. Vlakna su se pritiskala da upiju u sebe smolu i samim time su zbijena na dno kalupa.

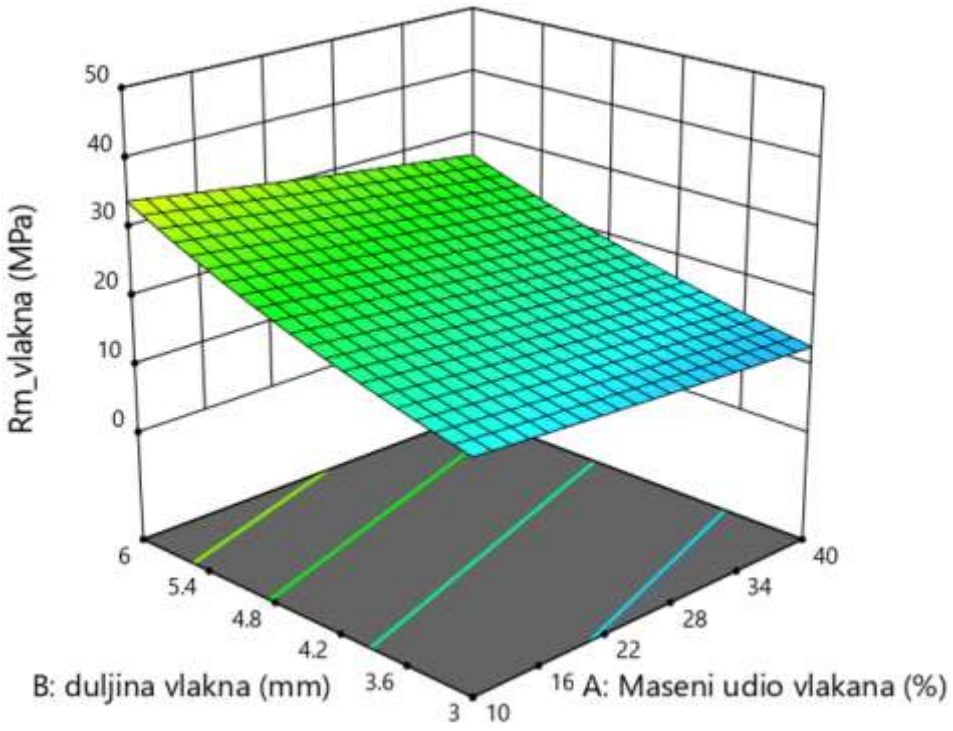


Slika 3.12 Presjek uzorka na mjestu loma

Kod uzoraka s većim udjelom vlakana ovaj problem je manje izražen. Presjek sa vlaknima je precizno izmjeren i ponovno se izračunala čvrstoća uzoraka (tablica 3.4).

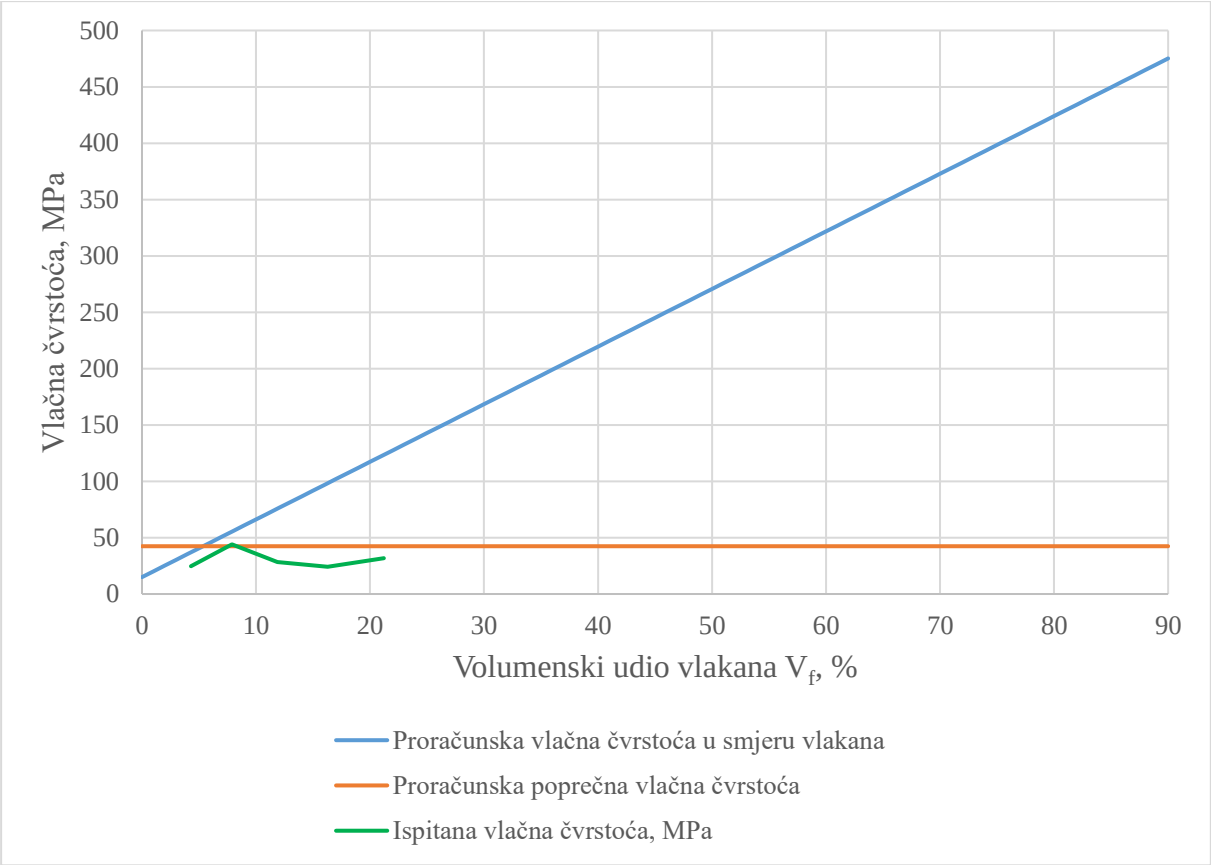
Tablica 3.4 Rezultati ispitivanja sa efektivnim presjekom

Uzorak	Maseni udio vlakna, %	Duljina vlakana, mm	Poprečni presjek sa vlaknima, mm^2	Sila, N	Čvrstoća, MPa
1	10	3	24.625	258.5	10.5
2	10	3	20.4	495.5	24.3
3	10	6	20.1	454	22.6
4	32.5	6	47.47	1147.1	24.2
5	25	3	39.39	267.3	6.8
6	40	6	51	1627.2	31.9
7	40	3	56.56	367	6.5
8	17.5	3	15	207.4	13.8
9	40	6	51.22	978.1	19.1
10	40	3	51.22	541.7	10.6
11	10	6	24.675	611.9	24.8
12	25	6	51.48	1458.3	28.3
13	17.5	6	29.67	1307.3	44.1
14	32.5	3	49	1712.4	34.9



Slika 3.13 Rezultati ispitivanja korištenjem efektivnog presjeka

Analizom rezultata (Sl. 3.13) može se zaključiti da povećanjem duljine vlakna raste vlačna čvrstoća kompozita. Dijagram (Sl. 3.13) ukazuje da se povećanjem masenog udjela vlakana vlačna čvrstoća kompozita smanjuje što praksa u potpunosti negira. Može se zaključiti da je proces izrade uzoraka s većim udjelom vlakana bio loš. Prema literaturi i drugim radovima, čvrstoća kompozita raste skoro linearno s povećanjem udjela vlakana. U uzorcima s većim udjelom vlakana, tijekom izrade, ostali su zarobljeni mjehurići zraka oko vlakana. Do ove pojave dolazi jer se vlakna nisu uspjela u potpunosti natopiti smolom. Iz tog razloga vlakna nisu bila dobro povezana s matricom pa je njihova sposobnost nosivosti bila znatno umanjena. Također odstupanje rezultata može se objasniti činjenicom da su se uzorci radili pojedinačno na otvorenom prostoru pri različitim temperaturama i postotcima vlage. Pojava vlage u strukturi se negativno odražava na svojstva kompozita, te je mogla dovesti do odstupanja mehaničkih svojstava smole. Pravilna izrada uzoraka bi bila da se kalup nakon ulijevanja smole i polaganja vlakana vakumira, tako da se zarobljeni mjehurići zraka odstrane. Uzorci bi se mogli izraditi i pomoću metode vakuum infuzije, no zbog nedostatka opreme te metode nisu korištene. Izrada u laboratorijskim uvjetima bi osigurala konstantu temperaturu, vlažnost, a samim time i ujednačena svojstva smole. Uzorci nisu izrađivani u laboratoriju zbog mogućnosti zapaljenja i toksičnih plinova smole.



Slika 3.14 Vlačna čvrstoća kompozita u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana

Na slici 3.14 prikazan je dijagram proračunske i ispitane vlačne čvrstoće u ovisnosti o volumenskom udjelu vlakana. Duljina vlakana u oba slučaja je 6 mm. Proračunska vlačna čvrstoća odnosi se na kompozite s usmjerenim vlaknima, a ispitani kompozit je s neusmjerenim vlaknima. Izraz za proračun čvrstoće za kompozit s neusmjerenim kratkim vlaknima nije bio dostupan u vrijeme pisanja ovog rada. Za očekivati je da bi čvrstoća za neusmjerena vlakna trebala biti jednaka približno 1/3 vrijednosti iste za usmjerena vlakna. Očekivana vlačna čvrstoća kompozita s neusmjerenim kratkim vlaknima bi linearno rasla s volumenskim udjelom vlakana do vrijednosti od nekih 140 MPa. Iz slike 3.14 uočava se da ispitani kompozit ima manju vlačnu čvrstoću nego sama smola (prema podacima iz literature), koja je po iznosu ista kao proračunska poprečna vlačna čvrstoća. Također se može uočiti da je maksimalni udio vlakana u uzorcima 21%, što je bio ujedno i maksimalni udio koji se mogao postići prethodno opisanom tehnologijom izrade.

4. Zaključak

Najveća zabilježena vlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem je 44,1 MPa, i to sa uzorkom s masenim udjelom vlakana od 17.5 % i duljinom vlakana od 6 mm. To je tek malo iznad vlačne čvrstoće same matrice. Prema podacima iz literature i računalnog programa za izbor materijala [11] vlačna čvrstoća kompozita s kratkim neusmjerenim vlaknima, s masenim udjelom vlakana od 50% i duljinom vlakana 6 mm je oko 70 MPa. Ovo znači da postoji greška u tehnologiji izrade uzoraka. Prilikom izrade u strukturi uzoraka je ostali zarobljeni mjehurići zraka. Pravilni uvjeti izrade zahtijevaju kontrolirane laboratorijske uvjete. Ovo se postiže lijevanjem uz kontroliranu temperaturu i vlažnost uz vakumiranje uzoraka u kalupu. Usmjerena kratka vlakana za razliku od neusmjerenih daju znatno bolja mehanička svojstva (ukoliko su opterećena u smjeru vlakana). Vlačna čvrstoća kompozita (poliesterska smola i E-staklo) s kratkim usmjerenim vlaknima, s masenim udjelom vlakana od 50% i duljinom vlakana od 6 mm može dosegnuti 220 MPa. Iako su kompoziti s kratkim usmjerenim vlaknima superiorniji od onih s neusmjerenim njihova primjena je vrlo malena. Razlog su tehnološke poteškoće dobivanja strukture s usmjerenim vlaknima. Kratka vlakna imaju vrlo veliku primjenu u postupcima izrade injekcijskim lijevanjem (najčešće ABS s E-staklom) i nanošenjem kompozita sprejanjem (najčešće poliesterska smola s E-staklom). Kratka vlakna izrazito poboljšavanju mehanička svojstva proizvoda.

Literatura

1. Donaldson S. L., Miracle D. B.: *ASM Handbook Volume 21: Composites*, ASM International, SAD, 2001.
2. Brent Strong A.: Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, Second Edition, Society of Manufacturing Engineers, SAD, 2007.
3. Jones D., Ashby M.: Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures and Processing (International Series on Materials Science and Technology), Butterworth-Heinemann, SAD, 2012.
4. http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/ht/ht.html
5. Fukuda H., Chou TW.: A probabilistic theory of the strength of short-fiber composites with variable fiber length and orientation, Journal of Materials Science, Volume 17, Issue 4, str. od 1003 do 1011, SAD 1982.
6. Fu SY, Mai YW,: Thermal conductivity of misaligned short-fiber-reinforced polymer composites, Journal of Applied Polymer Science, Volume 88, Issue 6, str. od 1497 do 1505, Svibanj 2003.
7. Kopeliovich D,: Estimations of composite materials properties, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=estimations_of_composite_materials_properties
8. Guo F., Yan Y., Hong Y., Li X., Ye J.: Theoretical Prediction for Thermal Expansion Coefficients of Unidirectional Fiber-Reinforced Composites with Variable Elliptical Cross-Sections, Kina, 2019.
9. Dirikolu M., Aktas A., Birgoren B.: Statistical analysis of fracture strength of composite materials using Weibull distribution, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Volume 26, Issue 1, str. od 45 do 48, Siječanj, 2002.
10. https://www.iskra.hr/proizvod/poliesterska-smola-pps/ https://www.iskra.hr/proizvod/katalizator/
11. GRANTA DESIGN: CES EduPack, software, 2019.