

# Uticaj vode na polipropilen s dodatkom 12,5 % drvnog brašna

---

**Uzun, Nikola**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2008**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:223690>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:  
Đurđica Španiček

Nikola Uzun

Zagreb, 2008.

---

## SAŽETAK RADA

Cilj rada je određivanje utjecaja vode na drvno–polipropilenski kompozit praćenjem promjena nekih svojstava, i to; tališta, tvrdoće i temperature omekšavanja.

U tu svrhu provelo se ispitivanje osam ispitaka, tri čistog polipropilena i tri ispitka polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna (jelovina) izloženih djelovanju destilirane vode pri sobnoj temperaturi u trajanju od 28 dana. Dva ispitka (jedan čistog polipropilena i jedan polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna) služila su za usporedbu pri mjerenju onih ispitaka uronjenih u destiliranu vodu.

U prvom, teoretskom dijelu, obrađeni su konstituenti plastomernog kompozita i njihova svojstva. *Prvo* poglavlje govori općenito o kompozitima. *Drugo* poglavlje navodi svojstva i primjenu polipropilena (PP), obzirom da je on polimerna matrica u ispitivanom drvno–plastomernom kompozitu.

*Treće* poglavlje opisuje svojstva i primjenu prirodnih ojačala, i to vlakana, te drvnog brašna koje je dodano polipropilenu.

Kada su konstituenti odabrani, pažnja se usmjerava na kreiranje povoljnih međuslojeva vlakno–matrica. Ovo međuslojno područje gdje dolazi do interakcije vlakna i matrice mora biti dobro konstruirano radi prerade i svojstava. Kako bi se postigla optimalna svojstva i učin kompozitnih materijala važno je ostvariti dobru adheziju matrica–ojačalo, o čemu će biti više govora u *četvrtom* poglavlju.

U *petom* poglavlju navedeni su konstrukcijski kriteriji te pokazatelji predviđanja mehaničkih svojstva kompozita pomoću zakona miješanja.

*Šesto* poglavlje tj. drugi dio rada je eksperimentalni dio. Opisuje se način i princip određivanja upijanja vode u 28–dnevnom ciklusu uranjanja u vodu, tališta, tvrdoće te temperature omekšavanja po VICAT–u.

---

# SADRŽAJ

## ZADATAK

SAŽETAK RADA.....	2
POPIS SLIKA.....	5
POPIS TABLICA.....	6
POPIS OZNAKA.....	7
1. UVOD.....	9
2. POLIPROPILEN.....	10
3. PRIRODNA OJAČALA.....	14
3.1. Kompoziti s prirodnim vlaknima.....	15
3.1.1. SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S PRIRODNIM VLAKNIMA.....	19
3.1.2. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA S PRIRODNIM VLAKNIMA.....	20
3.2. Drvno–plastomerni kompoziti.....	22
3.2.1. SVOJSTVA I PRIMJENA DRVNO–PLASTOMERNIH KOMPOZITA [9].....	24
4. MEĐUPOVRŠINE I MEĐUSLOJEVI [12].....	28
4.1. Termodinamika međusloja.....	31
4.2. Modifikacija površina.....	34
5. KONSTRUKCIJSKI KRITERIJI [12].....	37
5.1. Uvod.....	37
5.2. Pregled konstrukcijskih kriterija za kompozite.....	37
5.3. Zakon miješanja.....	39
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	41
6.1. Uvod.....	41
6.2. Određivanje upijanja vode.....	44
6.3. Određivanje tališta (norma: EN ISO 3146 : 2000).....	50
6.4. Određivanje tvrdoće.....	53
6.5. Određivanje postojanosti oblika pri povišenoj temperaturi.....	58

---

<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>61</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>63</b>

---

## POPIS SLIKA

Slika 1. Vijčana (helikoidalna) konformacija izotaktnog polipropilena [1].....	10
Slika 2. Utjecaj strukture polipropilena na deformaciju naprezanje – istežanje: 1 – izotaktni, 2 – ataktni [1].....	11
Slika 3. Proizvodnja drvo/PP kompozita [10].....	22
Slika 4. Tržišni potencijal kompozita punjenih drvom, stanje 2000 godine [10].....	25
Slika 5. Profili izrađeni od DPK-a [10].....	26
Slika 6. Proizvodi u automobilskoj industriji izrađeni od DPK-a [10].....	26
Slika 7. Proizvodi izrađeni od DPK-a [10].....	27
Slika 8. Vrtni namještaj i ograda izrađeni od DPK-a [10].....	27
Slika 9. Shematski prikaz vlakno – matrica međusloja i neki od faktora koji doprinosu njegovu oblikovanja [12].....	29
Slika 10. Shematski prikaz kontaktnog kuta i komponenti površinske napetosti [12].....	32
Slika 11. Apsorpcijska krivulja za PP+12,5 % DB.....	45
Slika 12. Apsorpcijska krivulja za polipropilen.....	45
Slika 13. Apsorpcijska krivulja za srednje vrijednosti PP+12,5 % DB.....	46
Slika 14. Apsorpcijska krivulja za srednje vrijednosti PP.....	46
Slika 15. Ovisnost upijanja vode i vremena za PP+12,5% DB.....	47
Slika 16. Ovisnost upijanja vode i vremena za PP.....	48
Slika 17. Mikro stol za zagrijavanje BOETIUS.....	50
Slika 18. Metoda utiskivanja kuglice.....	53
Slika 19. Tvrdomjer.....	53
Slika 20. Određivanje temperature omekšavanja po VICAT-u.....	59

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva nekih polietilena i polipropilena [2].....	12
Tablica 2. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana [4].....	15
Tablica 3. Svojstva nekih prirodnih vlakana i E – stakla [5].....	16
Tablica 4. Dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana [4].....	17
Tablica 5. Vrijednosti rastezne čvrstoće [4].....	20
Tablica 6. Parametri injekcijskog prešanja [3].....	41
Tablica 7. Promjena mase tijekom 28–dnevnog uranjanja u vodi.....	43
Tablica 8. Vrijednosti promjena mase u postocima, %.....	44
Tablica 9. Osnovni statistički podaci za PP+12,5 % drvnog brašna.....	47
Tablica 10. Osnovni statistički podaci za čisti polipropilen.....	47
Tablica 11. Rezultati ispitivanja temperature tališta.....	52
Tablica 12. Dubina prodiranja $h$ za suhi PP.....	55
Tablica 13. Dubina prodiranja $h$ za mokri PP.....	55
Tablica 14. Dubina prodiranja $h$ za suhi PP+12,5 % DB.....	55
Tablica 15. Dubina prodiranja $h$ za mokri PP+12,5 % DB.....	55
Tablica 16. Tvrdća za suhi polipropilen.....	56
Tablica 17. Tvrdća za mokri polipropilen.....	56
Tablica 18. Tvrdća za suhi PP+12,5 % DB.....	56
Tablica 19. Tvrdća za mokri PP+12,5 % DB.....	56
Tablica 20. Temperature omekšavanja po VICAT–u.....	60

---

## POPIS OZNAKA

$A$ , % – istezljivost

$d$ , mm – debljina

$E$ , N/mm<sup>2</sup> – modul elastičnosti

$g$  – gravitacijska konstanta

$F$ , N – sila (opterećenje)

$H$  – tvrdoća

$h$  – visina dizanja u kapilarnom prostoru

$M_n$  – molekularna masa

$R_e$ , N/mm<sup>2</sup> – granica tečenja (granica razvlačenja)

$T$ , °C – talište materijala

$t$ , d – trajanje, vrijeme

$V$ , % - volumni udio

$W_a$  – adhezijski rad (termodinamički rad)

$\gamma_{LV}$  – sila površinske napetosti između okoline i kapljevine

$\gamma_{SL}$  – slobodna površinska energija međupovršine čvrsta – kapljevita

$\gamma_{SV}$  – sila površinske napetosti između okoline i čvrstog tijela

$\theta$  – kut formiran između površine kapljice i površine čvrstog tijela

$\lambda$ , W/mK – toplinska vodljivost

$\rho$ , kg/m<sup>3</sup> – gustoća

$\rho_c$ , kg/m<sup>3</sup> – gustoća kompozita

$\rho_i$ , kg/m<sup>3</sup> – gustoća konstituenta



---

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad radio samostalno uz konzultacije i korištenje navedene literature, te stečenim znanjem tijekom studija.

Zahvaljujem se na pomoći prof. dr. sc. Đurđici Španiček te tehničkim suradnicima Vesni Torjanac i Božidaru Bušetinčanu.

Nikola Uzun

---

## 1. UVOD

Kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale (disperzirane faze), koje su ojačala u kompozitu.

Tako su kompoziti razvrstani kao:

- kompoziti s česticama,
- vlaknima ojačani kompoziti,
- slojeviti kompoziti,
- sendvič konstrukcije.

Kako su metal, keramika ili polimer osnova (matrica), kojoj se dodaju gore spomenuti dodaci u svrhu modificiranja svojstava matrice, imamo temeljnu podjelu kompozita na:

- metalne kompozite,
- keramičke kompozite,
- polimerne kompozite.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

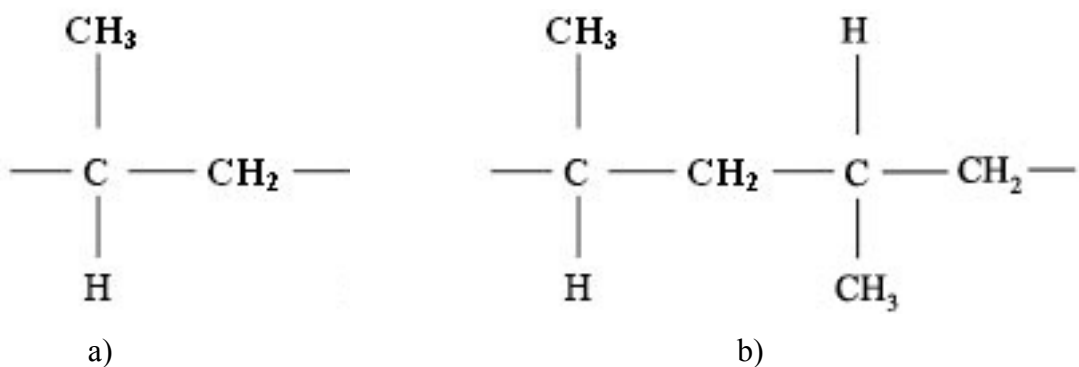
- svojstvima matrice i ojačala,
- veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenata,
- volumnom udjelu konstituenata,
- obliku konstituenata,
- prirodi i jakosti veze među konstituentima.

---

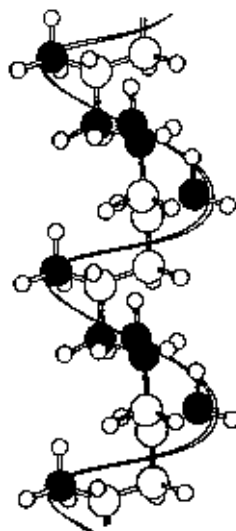
## 2. POLIPROPILEN

Polipropilen je kristalasti plastomer linearnih makromolekula s ponavljanim jedinicama  $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ . Strukture makromolekula polipropilena razlikuju se s obzirom na steričku orijentaciju metilnih skupina. Stereoopavljane jedinice mogu biti izotaktne ili sindiotaktne, dok se polipropilen bez stereoopavljanih jedinica naziva ataktni polipropilen [1].

Izotaktne (a) i sindiotaktne (b) polipropilenske ponavljane jedinice:



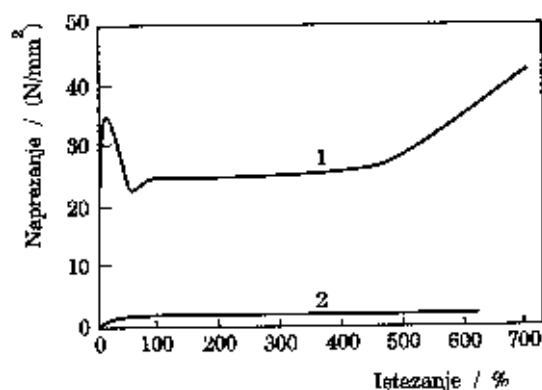
Poželjno je da polipropilen sadrži što veći udio izotaktne strukture jer tada lanci makromolekula tvore spiralnu, vijčanu konformaciju (slika 1.), koja pogoduje procesu kristalizacije, što je i preduvjet dobrim svojstvima polipropilena.



Slika 1. Vijčana (helikoidalna) konformacija izotaktnog polipropilena [1].

---

Komercijalni polipropilen sadrži do 90 % izotaktnih sekvencija sa stupnjem kristalnosti 60–70 %, što ovisi i o ranijoj toplinskoj obradi (proizvodna prošlost). Polipropilen je jedan od najlakših polimernih materijala (gustoća 0,90–0,91 gcm<sup>-3</sup>), a visoko talište (160–170 °C) omogućuje njegovu uporabu u relativno širokom temperaturnom području. S povećanjem udjela ataktne strukture smanjuje se tvrdoća, čvrstoća, gustoća, krutost, postojanost izmjera i tečljivost taljevine polipropilena (slika 2.).



Slika 2. Utjecaj strukture polipropilena na deformaciju naprezanje – istezanje: 1 – izotaktni, 2 – ataktni [1].

Važna je i veličina prosječne molekulne mase (obično iznosi  $M_n = 7,5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ , a  $M_w = 3 \cdot 10^5 - 7 \cdot 10^5$ ) i njezina raspodjela; pa se tako tečljivost taljevine povećava s većim udjelom nižih molekulnih masa, ali istovremeno opada udarna žilavost materijala.

Mnoga svojstva polipropilena slična su svojstvima polietilena visoke gustoće. U tablici 1. je usporedba nekih svojstava polietilena (niske i visoke gustoće) i polipropilena. Polipropilen ima višu tvrdoću i rasteznu čvrstoću, elastičniji je, prozirniji je i sjajniji uz podjednaku propusnost za plinove i pare. Nedostatak je polipropilena mala udarna čvrstoća, posebice pri nižim temperaturama (već neznatno ispod 0 °C). Taj se nedostatak može ukloniti kopolimerizacijom polipropilena s drugim  $\alpha$  – olefinima, najviše s etilenom, koji se dodaju u količini 5–20 %, kao i dodavanjem malih količina elastoplastomera na osnovi etilena i propilena i nekonjugiranih diena (EPDM) samom polimeru (EPDM je poznati elastoplastomer).

Tablica 1. Svojstva nekih polietilena i polipropilena [2].

SVOJSTVO		PE - LD	PE - HD	PP
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	150 – 300	600 – 1000	1100 – 1300
Granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	8 – 10	20 – 30	32 – 37
Istezanje na granici razvlačenja	%	20	12 – 15	12 – 16
Istezljivost (prekidno istezanje)	%	> 400	> 500	600
Temperatura omekšavanja po VICAT – u	°C	< 40	60 – 65	90 – 100
Područje taljenja kristalita	°C	105 – 110	130 – 135	155 – 165
Specifični otpor prolaza	Ωcm	10 <sup>16</sup>		
Dielektričnost	F/m	2,3		
Dielektrični faktor gubitka	-	0,0002 – 0,0007		
Čvrstoća proboja	KV/mm	110	150	100

Čisti polipropilen izvrstan je električni izolator zahvaljujući nepolarnom karakteru makromolekula. Kao i većina kristalastih poliolefina, polipropilen je vrlo postojan prema djelovanju vode, organskih otapala, maziva i anorganskih kemikalija. Međutim, nepostojan je prema jakim oksidansima, pa je podložan oksidacijskoj razgradnji, osobito pri povišenim temperaturama kojima je izložen tijekom preradbe. Ta slaba oksidacijska stabilnost potječe od reaktivnog vodikova atoma na tercijarnom ugljikovom atomu ponavljanih jedinica. Dodavanjem malih količina antioksidansa, kao što su supstituirani fenoli i amini, taj se nedostatak gotovo potpuno uklanja. Postojanost prema ultraljubičastom zračenju postiže se dodatkom UV – stabilizatora, derivata hidroksibenzotriazola ili posebne vrste čađe u količini do 2 % [1].

Propilen polimerizira jedino koordinativnim mehanizmom, prije svega uz Ziegler–Natta inicijatore (katalizatore). Zato monomer mora biti visoke čistoće i pogotovo ne smije sadržavati vodu, kisik i njegove spojeve, sumporove spojeve, diene, acetilen i srodne tvari, koje bi djelovale kao snažni katalitički otrovi.

Za proizvodnju polipropilena postoji nekoliko tehničkih postupaka, koji se razlikuju vrstom katalizatora, medijem polimerizacije, načinom kontrole molekularnih masa i načinom uklanjanja ataktnog polimera. Svaki se postupak sastoji od nekoliko faza: pripreve katalizatora, polimerizacije te uklanjanja ataktnog proizvoda, ostatka katalizatora i otapala.

---

Polimerizacija propilena može se provesti u suspenziji, kapljevini (masi), plinskoj fazi i otopini. Svi ti procesi mogu se primijeniti i za proizvodnju kopolimera propilena i drugih  $\alpha$  – olefina. Najviše se primjenjuje polimerizacija u suspenziji. U reakciju se uvode propilen, katalizator, vodik i sredstvo za suspendiranje. Kao tvari za suspendiranje i razrjeđivanje služe vrlo čisti zasićeni ugljikovodici sa 6 do 11 ugljikovih atoma. Proces se provodi u cijevnim ili kotlastim reaktorima, kojih je obično do šest spojenih kaskadno u seriju. Temperatura reakcije iznosi 45–85 °C uz tlak do 2 MPa. Tijekom procesa nastali polipropilen se izlučuje u obliku finih čestica, a na izlasku iz reaktora smjesa sadrži 20–30 % suspendiranog polimera. Snižanjem tlaka odvaja se zaostali monomer, a katalizator se zatim deaktivira i otapa dodavanjem otopine solne kiseline.

Raznolike mogućnosti primjene polipropilena proizlaze iz njegovih uravnoteženih svojstava, mogućnosti kopolimerizacije, modifikacije i lakoće preradbe. Za razliku od drugih poliolefina, polipropilen lagano tvori kompozitne materijale s anorganskim punilima. Stoga se polipropilenski materijali mogu općenito svrstati u tri osnovne skupine: homopolimeri, kopolimeri s malim udjelom drugih  $\alpha$  – olefina i modificirani polipropilen s punilima kao što su azbest, talk, kalcijev karbonat, staklena vlakna, grafitna vlakna i dr. međutim, u praksi se međusobno razlikuju molekulnom masom, vrstom i količinom komonomera, dodataka i punila, sposobnošću bojenja, metalizacije i sl. Najviše se upotrebljava kao vlaknasti materijal, a zatim kao plastomer [1].

Homopolimerni tipovi su postojani prema deformaciji, visoke su krutosti i vlačne čvrstoće, tvrdoće površine i dobre žilavosti pri sobnim temperaturama i slabe otpornosti prema starenju, nepravilno im je skupljanje u kalupnoj šupljini i teško se lijepe. Kopolimerni tipovi maju izvrsnu žilavost.

Polipropilen se primjenjuje za izradu tehničkih dijelova i to pri višim opterećenjima nego polietilen. Velike su mogućnosti variranja svojstava i primjene obzirom na mogućnosti miješanja i proizvodnju kompozita. Tako se od polipropilena izrađuju industrijski dijelovi elektro i elektronske industrije, kemijskih postrojenja, šuplja tijela, cijevi, spremnici, dijelovi armatura, dijelovi postojani prema vrućoj vodi, igračke, posude u kućanstvu, tehničke dijelove strojeva za pranje posuđa i rublja, u tekstilnoj i automobilskoj industriji (unutarnje uređenje automobila – razne obloge), u građevinarstvu, zrakoplovnoj industriji, za razna pakovanja (ambalaža) itd. [2].

---

### 3. PRIRODNA OJAČALA

Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan (gospodarski) i ekološki utjecaj. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivog i trajnog proizvoda, ali isto tako i korištenjem obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih ojačala u kompozitima u neprestanom rastu [3].

Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovinama. Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihova korištenja. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o korištenju poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava [4].

Najveći udio u proizvodnji plastomera s prirodnim vlaknima zauzima drvo. Za to postoje dva važna razloga odnosno prednosti. Prvi razlog je dostupnost drva, a drugi je što ga ima više od svih drugih prirodnih sirovina koje dolaze u obzir za upotrebu u kompozitima.

Drvo i drugi prirodni materijali kao ojačala kod plastomera privukli su pažnju svojom niskom cijenom i ekološkom prihvatljivošću. Daljnji razvoj tih materijala i širenje njihova tržišta ovisit će o istraživanjima i poboljšanju njihovih preradbenih i uporabnih svojstava.

### 3.1. Kompoziti s prirodnim vlaknima

Postoji velik broj biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana. Treba ih sve uzeti u obzir prilikom promišljanja o uzgoju jer svaka od njih ima određene prednosti pred drugom. Bitna je i potražnja za pojedinim vlaknima na tržištu. Tablica 2. pokazuje popis važnijih biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana i grubu procjenu njihovih količina [4].

Tablica 2. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana [4].

<b>IZVOR PRIRODNIH VLAKANA</b>	<b>SVIJET (TONA OSUŠENE TVARI)</b>
Drvo	1 750 000 000
Slama (pšenica, riža, ječam, zob, raž, lan, trava)	1 145 000 000
Stabljika (kukuruz, sorgum, pamuk)	970 000 000
Šećerna trska	75 000 000
Trska	30 000 000
Bambus	30 000 000
Sortirani pamuk	15 000 000
Srčika (juta, kenaf, konoplja)	8 000 000
Papirus	5 000 000
Liko (juta, kenaf, konoplja)	2 900 000
Pamuk pročišćen	1 000 000
Esparto trava	500 000
List (američka agava, manila, henequen)	480 000
Sabai trava	200 000
<b>UKUPNO</b>	<b>4 033 080 000</b>



---

Ovisno o njihovom porijeklu, prirodna vlakna svrstavamo u grupe kvalitete [5]:

1. sjeme,
2. liko,
3. lišće,
4. plod.

Najčešću uporabu imaju vlakna od lika i lišća. Primjeri liko vlakana su konoplja, juta, lan, rami i kenaf. Vlakna od lišća se dobivaju iz agave i banane. Usporedba nekih prirodnih vlakana i staklenih vlakana dana je u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva nekih prirodnih vlakana i E – stakla [5].

<b>Vlakno</b>	<b>Gustoća gcm<sup>-3</sup></b>	<b>Modul elastičnosti GPa</b>	<b>Rastezna čvrstoća MPa</b>
Lan	1,5	100	1100
Indijska konoplja	4,45	2,5 – 13	460 – 530
Američka agava	1,45	9,4 – 15,8	570 – 640
Konoplja	1,48	-	690
E – staklo	2,54	76	150

Iz tablice 3. se vidi da su najistaknutija vlakna od lana, koja imaju modul elastičnosti viši od staklenih vlakana. Usto, lan ima nižu gustoću od staklenih vlakana, proizvodeći na taj način lakše kompozite boljih mehaničkih svojstava.

Dok se drveno brašno i vlakana dobivena iz drva upotrebljavaju kao jeftina zamjena za mineralna punila i ojačala u polietilenu, poli(vinil–kloridu) i polipropilenu, ili za poboljšanje svojstava oporabljenih plastomera, vlakna dobivena iz biljaka kao što su lan, konoplja ili juta trenutno su konkurencija staklenim vlaknima u kompozitima zbog svoje ekološke prihvatljivosti i povoljne cijene [4].

---

Prirodna vlakna imaju niz prednosti [4]:

- dobivaju se iz obnovljivih izvora,
- niske su gustoće,
- nisu abrazivna,
- lako se oporabljuju,
- biorazgradiva su,
- lako su dostupna u velikim količinama,
- imaju dobra akustična i izolacijska svojstva,
- mali je utrošak energije potreban za preradu,
- niske su cijene.

Tablica 4. prikazuje dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana.

Tablica 4. Dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana [4].

<b>DIMENZIJE VLAKANA, mm</b>		
<b>TIP VLAKANA</b>	<b>PROSJEČNA DULJINA</b>	<b>DEBLJINA</b>
Pamuk	10 – 60	0,02
Lan	5 – 60	0,012 – 0,027
Konoplja	5 – 55	0,025 – 0,050
Manilska konoplja	2,5 – 12	0,025 – 0,040
Bambus	1,5 – 4	0,025 – 0,040
Esparta (Alfa)	0,5 – 2	0,013
Slama od žita	1 – 3,4	0,023
Indijska konoplja	1,5 – 5	0,02
Listopadno drvo	1 – 1,8	0,03
Četinjače	3,5 – 5	0,025

---

**Vlakna od lana.** Lan dobivamo iz peteljke biljke lana vrste *Linum usitatissimum*. Biljka daje ulje iz sjemena i vlakna iz peteljke, znana kao liko vlakna. Od vlakana se može izrađivati laneno platno, što je bilo i jedno od prvih tvorničkih vlakana u izradi tekstila. Ista vlakna se koriste i za ojačavanje kompozita. Kanada je najveći svjetski proizvođač i izvoznik lana; zasađenih 2,1 milijun jutara u 1997–oj godini. Međutim, samo se lan s 15 % jutara koristi u industriji celuloze i papira [5].

**Vlakna konoplje.** Vlakna konoplje se dobivaju iz liko vlakana biljke *Cannabis sativa*. Vlakana su dobila negativan publicitet zbog svoje povezanosti sa marihuanom. Obje biljke su identične po izgledu, ali različite po udjelu tetrahidrokanabinola (THC). THC je zaslužan za psihoaktivna svojstva marihuane. Vlakna industrijske konoplje sadrže manje od 0,5 % THC, dok marihuana ima od 3 do 15 % THC. Konoplja potječe iz Kine, ali je 1750. imala najveći poljoprivredni prinos u svijetu, kada se je koristila za izradu odjeće, platna, uža i ulja. 1958. godine, zbog teškog razlikovanja od marihuane, zabranjen je uzgoj konoplje u SAD – u, ali danas sve više raste interes za povratak industrije konoplje. Konoplja je višestruko upotrebljiva tkanina koja se može upotrebljavati za izradu raznih proizvoda. Upotrebljava se za izradu tekstila, kućanskog namještaja, papira, u građevinarstvu i automobilskoj industriji.

Kompozit izrađen s 20 masenih % vlakana konoplje ima vlačnu čvrstoću od 35 MPa i modul elastičnosti od 4,4 GPa. Mehanička svojstva ovakvih kompozita mogu se uspoređivati sa svojstvima drva. Na primjer, tipično tvrdo drvo ima modul elastičnosti od oko 10 GPa, s naprežanjem pri lomu od oko 30 MPa u smjeru vlakna i oko 3 MPa kada je naprežanje okomito na vlakna. Značajna prednost kompozita s vlaknima konoplje nad drvom je što se različitim orijentiranim vlaknima mogu postići dobra svojstva u svim smjerovima (kvaziizotropnost) što nije slučaj kod drva [5].

---

### 3.1.1. SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S PRIRODNIM VLAKNIMA

U odnosu na ostale kompozite, za primjenu kompozita s prirodnim vlaknima postoje neka ograničenja. Prvo se ograničenje odnosi na niže temperature prerade. Granična temperatura razgradnje prirodnih vlakana kreće se oko 200 °C, iako je moguće postići i više temperature, ali kroz kraće vrijeme. To je ujedno i ograničenje za moguće uporabive plastomere. Izbor je uglavnom sveden na polipropilen (PP), poli(vinil–klorid) (PVC), polietilen (PE) i polistiren (PS). No, treba naglasiti da ovi plastomeri čine približno 70 % ukupne proizvodnje polimera, pa troše i značajne količine punila i ojačala.

Drugo ograničenje je upijanje vode prirodnih vlakana, njihova higroskopsnost. Upijanje vode može uzrokovati bubrenje vlakana što pak uzrokuje slabu dimenzijsku stabilnost. Kada je vlakno omotano polimerom upijanje je vode (naj)manje. Nemoguće je potpuno ukloniti upijanje vode bez primjene skupe površinske zaštite kompozita, no moguće ga je smanjiti, primjerice, kemijskom promjenom hidroksilnih grupa prisutnih u vlaknu što, naravno, povisuje cijenu. Dobro prijanjanje vlakana s matricom također smanjuje upijanje vode. Ova ograničenja treba uzeti u obzir prilikom odabira i primjene ovih kompozita [4].

Celulozna vlakna / punila mogu biti razvrstana u tri razreda, ovisno o njihovom ponašanju u polimernoj matrici:

1. Drvni i ostali biljni otpad ubraja se u skupinu punila koja povećavaju rastezni i savojni modul elastičnosti ali malo utječu na čvrstoću kompozita.
2. Drvna vlakna i reciklirani papir imaju veći utjecaj na rast modula elastičnosti. Pritom povećavaju i čvrstoću kompozita, uz upotrebu veziva koja poboljšavaju prijenos naprežanja s matrice na vlakno.
3. Prirodna vlakna od biljaka (kenaf, juta, lan i sl.) vrlo su učinkoviti dodaci. Rastezni i savojni modul elastičnosti je kod tih kompozita značajno viši nego kod kompozita s drvnim vlaknima, osobito ako se uzme u obzir omjer povišenja modula elastičnosti i gustoće kompozita. Taj je omjer u razini s kompozitima ojačanima staklenim vlaknima.

U tablici 5. navedene su vrijednosti rastezne čvrstoće nekih prirodnih vlakana.

Tablica 5. Vrijednosti rastezne čvrstoće [4].

<b>VLAKNA</b>	<b>RASTEZNA ČVRSTOĆA*</b>
Kenaf	11,91
Konoplja	8,95
Drvo	7,48
Agava	6,14
Pamuk	3,54

\* sve su vrijednosti pojedinačna čvrstoća vlakana osim za agavu, za koju je iskazana čvrstoća snopa vlakana.

### 3.1.2. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA S PRIRODNIM VLAKNIMA

U plastičarskoj industriji kao dodatak polimerima pretežno se rabio talk, kalcijev karbonat, tinjac te staklena i ugljikova vlakna. Godišnje se trošilo oko 2,5 milijuna tona tih dodataka i ojačavala. Postojao je svojevrsni otpor prerađivača prema upotrebi drvnih i prirodnih vlakana, kao što su kenaf ili lan, ponajviše zbog njihove velike nasipne gustoće, niske toplinske postojanosti i sklonosti prema upijanju vode, te neprikladnosti opreme za preradu kompozita s prirodnim vlaknima [6].

Do značajnije je promjene došlo zadnjih desetak godina. Veće je poznavanje svojstava drva i ostalih izvora prirodnih vlakana u plastičarskoj industriji, razvijena je nova oprema za preradu polimera ojačanih prirodnim vlaknima, a postoje i bolja veziva i prijanjala. Sve je to povećalo interes plastičarske industrije za preradu tih kompozita [6].

I u drvnoj se industriji također promijenio pristup. Povećana trajnost proizvoda od drvno–plastomernih kompozita uz minimalno održavanje čini ih naročito zanimljivim u građevinarstvu kao zamjena za drvnu građu [6].

---

Prerada plastomernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima obično se provodi u dva koraka. Prvo se sastojci smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Smješavanje komponenata može se obaviti kontinuirano u ekstruderu, s time da se drvo može dodati zajedno s plastomerom ili u plastomernu taljevinu. Moguće je cikličko smješavanje komponenata u miješalicama, ali se mogu pojaviti odstupanja u kvaliteti od šarže do šarže [7].

Za proizvodnju plastomernih kompozita primjenjuje se ekstrudiranje, injekcijsko prešanje, kalandriranje, toplo oblikovanje i pultrudiranje [7].

Od navedenih najčešće je ekstrudiranje, i to za razne pune i šuplje profile. Postoje razni tipovi ekstrudera za preradu drvno–plastomernih kompozita. To može biti ekstruder s jednim pužnim vijkom ili ekstruder s dva pužna vijka. Osi ekstrudera s dva pužna vijka mogu biti paralelne ili pod kutom. U nekim postupcima primjenjuju se ekstruderi u tandemu: prvi za smješavanje, a drugi za protiskivanje taljevine. Voda iz vlakana odstranjuje se u ekstruderu tijekom prerade [8].

Injekcijsko se prešanje primjenjuje rjeđe, i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika. Sastojci se prvo smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Osim smješavanja u miješalici, smješavanje se može provesti ekstrudiranjem, nakon čega se pravi granulati. Tako pripremljen granulati injekcijski se preša.

Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na vlažnost materijala i dobivanje gotovog proizvoda u jednom koraku jer se smješavanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu kojim se oblikuje profil. No to zahtjeva ekstruder s dva pužna vijka da bi se osiguralo smješavanje, a njegova cijena je viša od jednopužnog [9].

Također se primjenjuje kalandriranje s toplim oblikovanjem i pultrudiranje, ali u znatno manje opsegu. Kalandriranjem se najčešće proizvode ploče koje se rabe za oblaganje u građevinarstvu. Pultrudiranjem se proizvode razni puni profili provlačenjem kroz matricu. Šuplji profili ograničenih duljina mogu se proizvesti namatanjem na jezgru s posmikom [9].

---

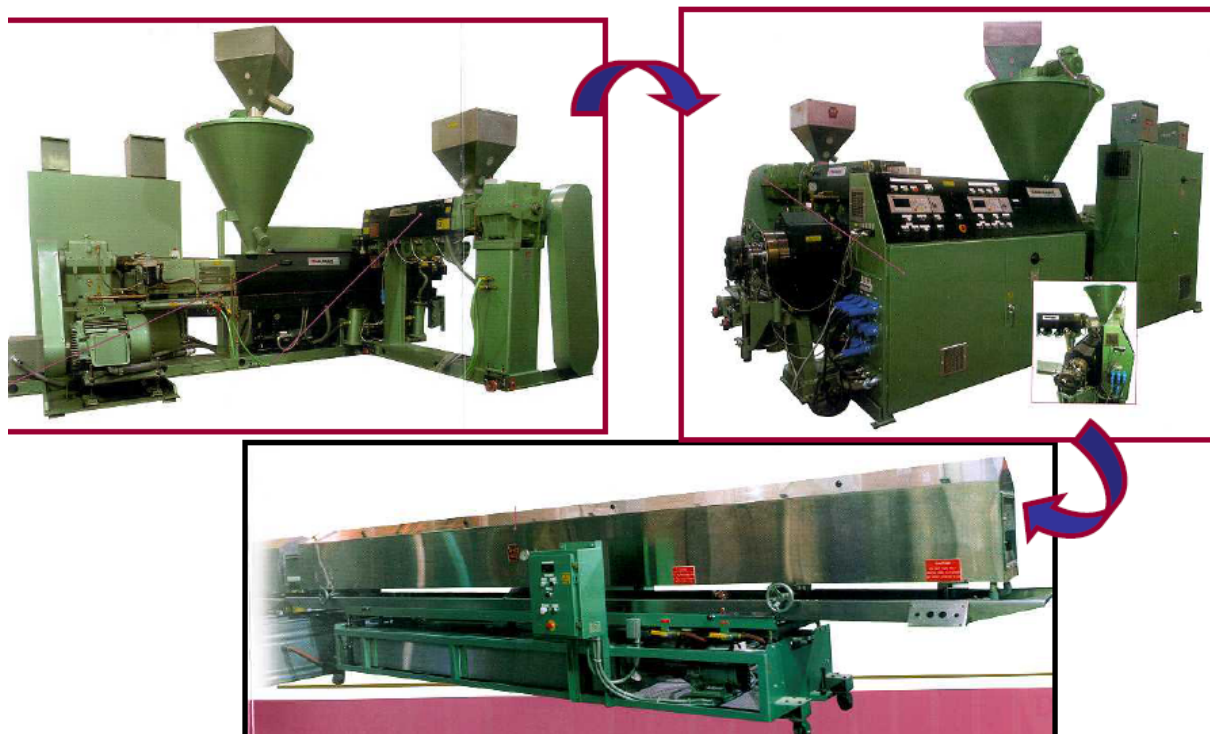
### 3.2. Drvno–plastomerni kompoziti

Drvno–plastomerni kompoziti (DPK) su relativno nova skupina materijala koja pokriva široko područje polimernih kompozita od polipropilena do poli(vinil–klorida), i punila od drvnog brašna ili drvnih vlakana. Ti novi materijali proširuju koncepciju drvenih kompozita od čiste iverice u nova područja i, što je najvažnije, u novu generaciju kvalitetnih proizvoda.

Prva generacija drvnih kompozita bila je kombinacija recikliranog drvnog brašna ili piljevine i veziva na osnovi duromera. Ti su materijali bili sasvim dobri za nezahtjevne primjene. Nova generacija drvno–plastomernih kompozita, omogućila je brzi razvoj kompozita s dobrim mehaničkim svojstvima, visokom dimenzijskom stabilnosti i koji se mogu oblikovati u složene oblike ekstrudiranjem ili injekcijskim prešanjem s uskim tolerancijama.

Najuobičajeniji kompoziti toga tipa proizvode se smješavanjem drvnog brašna i plastomera, a dobiveni materijal se može prerađivati postupcima koji su tipični za plastiku, iako materijal ima svojstva i drva i plastike [9].

Na slici 3. su pokazani strojevi na kojima se izrađuju drvno–polipropilenski kompoziti.



Slika 3. Proizvodnja drvo/PP kompozita [10].

---

Drvo može biti u obliku piljevine ili kao stari drveni otpad, što znači da nije potrebno trošiti dodatne drvene resurse za proizvodnju ovoga kompozita, već se može koristiti otpadno drvo koje bi se u najboljem slučaju spalilo, ako ne i bacilo. Tako ono postaje sirovina što je očit dokaz da recikliranje može biti unosno i ekološki pogodno.

Polimerni materijali također se mogu reciklirati, npr. PE vrećice, iako se za zahtjevnije namjene treba izbjegavati uporaba reciklata. U drvo–plastomernim kompozitima je uporaba dostigla svoj cilj: od otpada proizvoda kratkoga životnog vijeka radi se (dugovječni) proizvod. Drvo–plastomerni kompoziti su proizvodi koji ne zahtijevaju daljnju obradu. Postojani su na vremenske uvjete, vodu i plijesan te se primjenjuju i na otvorenom prostoru gdje bi samo drvo bilo neprikladno [9].

DPK imaju mnogo prednosti [9,11]:

- koriste jeftine i lako nabavljive sirovine,
- cijenom su konkurentni i drvu i plastomerima,
- lako se proizvode primjenom već postojećih tehnika proizvodnje,
- proizvodi mogu biti raznoliki i veličinom i oblikom,
- ne zahtijevaju površinsku zaštitu poput drva,
- smanjena je cijena održavanja u odnosu na drvo,
- mogu se spajati čavlima i obrađivati postupcima za obradu drva.

Nedostaci DPK–a [9,11]:

- imaju veću gustoću od plastomera i drva,
- skuplji su od drva,
- cijena montaže je veća,
- za proizvodnju je potrebna veća količina energije u odnosu na drvo,
- niže su čvrstoće u odnosu na drvo.

Jedan od razloga razvoja drvo–plastomernih kompozita je ekološko motrište. Pritisci na industriju u pogledu oporablivosti i održivoga razvoja svakodnevno rastu. Zbog toga postoji jasna potreba za produžetkom životnoga vijeka materijala kao što je drvo. Ovako iskorištavanje materijala, na koje se gleda kao da je otpad, daje potporu načelima održivoga razvoja.



---

Proizvođačima polimernih materijala jasno je da moraju što manje ovisiti o petrokemijskoj industriji zbog stalnog rasta cijena nafte. Drvna industrija ima također potrebu povećati iskoristivost resursa i oporabiti otpad koji se neminovno javlja. Dolaskom DPK–a povećala se iskoristivost drva za 40 % u odnosu na starije metode uporabe [9].

DPK pridonosi okolišu i na sljedeće načine [9]:

- ima mali postotak otpada (koji je lako oporabljiv),
- DPK ne sadrži formaldehide ili hlapljive organske sastojke,
- DPK je oporabljiv proizvod (može se samljjeti te ponovo upotrijebiti),
- kao otpad nije opasan i može se odlagati s ostalim otpadom.

### 3.2.1. SVOJSTVA I PRIMJENA DRVNO–PLASTOMERNIH KOMPOZITA [9]

Drvno–plastomerni kompoziti su materijali koji, slično kao polimerni materijali, imaju mnogo sastojaka. Osnovnoj mješavini drva i plastomera dodaju se dodaci za poboljšanje preradljivosti i promjenu svojstava proizvoda. Tipična sirovina je fino drvno brašno (veličina čestica 0,25–0,5 mm) koja se smješava s plastomerom i dodacima.

Drvno–plastomeri kompoziti imaju svojstva obaju materijala. Imaju krutost i čvrstoću između vrijednosti plastomera i drva, ali općenito veću gustoću i od drva i od plastomera. Svojstva DPK–a izravna su posljedica njegove strukture: prislan spoj čestica drva i plastomera pri čemu plastomer obavija drvo tankim omotačem.

Niska higroskopnost kod DPK–a (upijanje vode od približno 0,7 % u usporedbi sa 17 % ravnotežne vlage kod jelovine na otvorenom prostoru u ljetnim mjesecima), izravan je rezultat strukture. Ovlažit se može samo drvo u vanjskom dijelu koje je u dodiru s okolinom, ali se ne prenosi kroz plastomernu matricu ili se prenosi neznatno. Kao posljedica DPK–i su izrazito postojani na djelovanje vlage iz zraka, imaju malu promjenu obujma u dodiru s vodom i ne podliježu napadu kukaca i plijesni.

Pigmenti, UV stabilizatori i veziva mogu se dodati u DPK prije prerade da se poboljšaju određena svojstva.

---

Općenito govoreći, svojstva DPK–a su sljedeća:

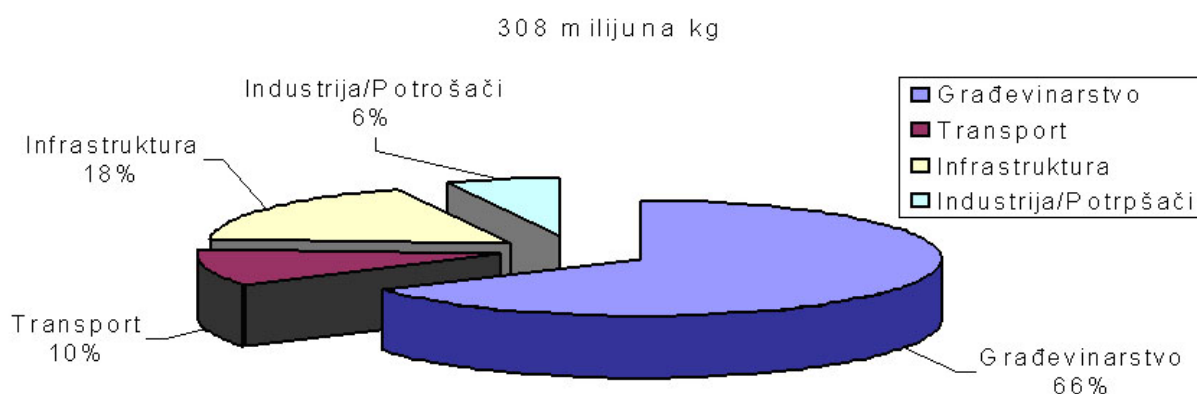
- dobra krutost i žilavost,
- dimenzijska stabilnost,
- otpornost na trulež i plijesan,
- dobra toplinska svojstva,
- niska higroskopnost.

Svojstva DPK–a mogu se prilagoditi zahtjevima uporabe proizvoda, bilo mijenjajući vrstu drva ili plastomera. DPK temeljeni na PE su jeftiniji i mogu se primijeniti pri višim temperaturama nego proizvodi na osnovi PVC–a, ali DPK s PVC matricom su pogodniji za završnu obradu ili bojanje.

Također se može promatrati veličina čestica drvnog brašna, omjer udjela drva i plastomera, postotak veziva i druge tvari koje se može lako promijeniti da bi se odredio njihov utjecaj na svojstva konačnog proizvoda.

Najčešće se ispituju čvrstoća, bilo savojna ili rastezna, rastezni i savojni moduli, temperatura omekšavanja ili pak dimenzijska stabilnost ovisno o navedenim utjecajima.

U SAD–a je tržište drvno–plastomernih kompozita krajem prošlog i početkom ovog stoljeća raslo 100 % godišnje, nešto zbog širenja primjene na nove proizvode, a nešto zbog povećanja potražnje za već postojećim proizvodima. Trenutna primjena DPK–a najveća je u građevinarstvu koje mnogostrano iskorištava svojstva DPK–a (slika 4.).



Slika 4. Tržišni potencijal kompozita punjenih drvom, stanje 2000 godine [10].

---

DPK se može koristiti za proizvode u kojima su do sada dominirali drvo ili PVC, a tipične primjene su okviri vrata i prozora te njihove sastavnice, vanjsko dekorativno oblaganje, palube brodica, daske za glačanje, rukohvati ograda, radne površine, police, ograde, vrtni i uredski namještaj, kuhinjski ormarići te zvučna izolacija. Na slikama 5, 6, 7 i 8. neki od proizvoda izrađeni od DPK-a.



Slika 5. Profili izrađeni od DPK-a [10].



Slika 6. Proizvodi u automobilskoj industriji izrađeni od DPK-a [10].



Slika 7. Proizvodi izrađeni od DPK-a [10].



Slika 8. Vrtni namještaj i ograda izrađeni od DPK-a [10].

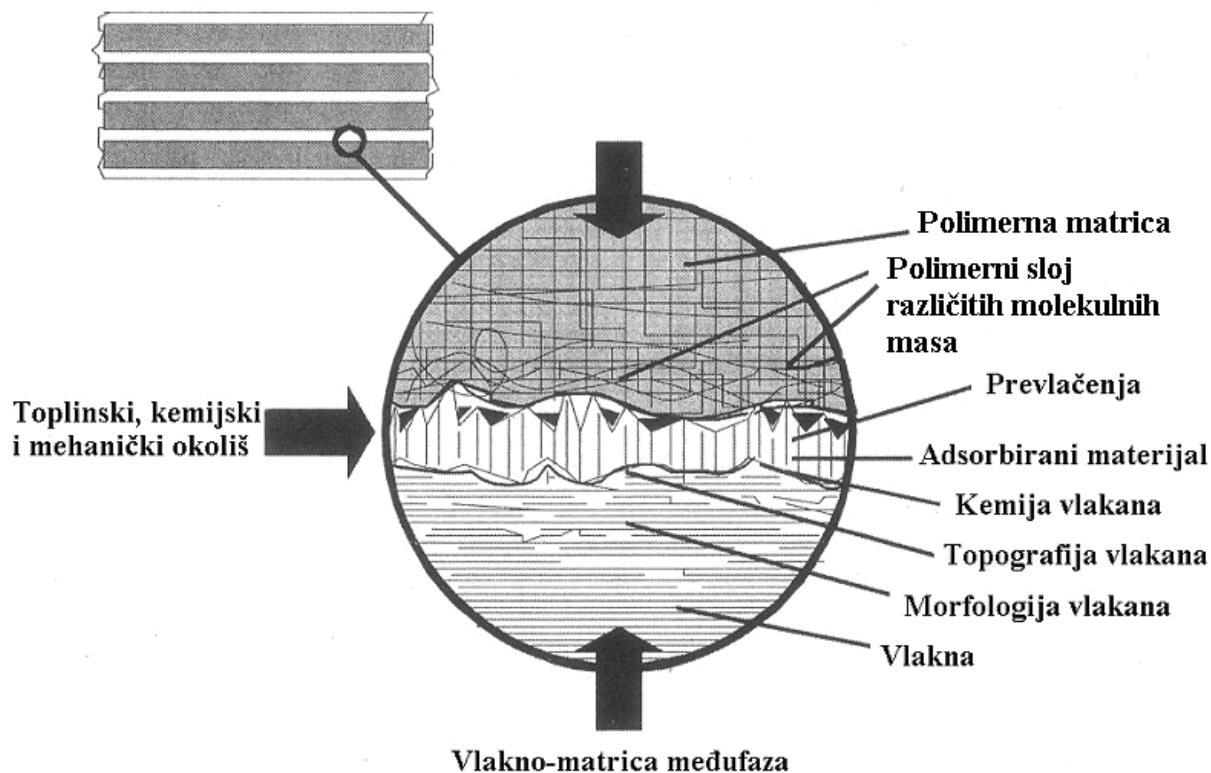
---

#### 4. MEĐUPOVRŠINE I MEĐUSLOJEVI [12]

Kako bi se postigla optimalna svojstva i učin kompozitnih materijala važno je ostvariti dobru adheziju matrica-ojačalo. Suvremeni pristup teoriji adhezije je *međuslojni* model u kojem se, osim kemijskih i fizikalnih veza između vlakna i matrice, promatra i struktura i svojstva vlakna i matrice u području povezivanja. Ovdje se pojam «sloja» koristi za opisivanje područja ograničenih dimenzija gdje lokalna svojstva variraju i razlikuju se od onih čistih slojeva. Iako još nema potpunog razumijevanja ovih međuslojeva, dosadašnje studije su donekle dale uvid u odabir površinskih obrada za određene klase vlakana i matrica. Metodologija optimalnog konstruiranja počinje uzimanjem u obzir strukturnih specifikacija vlakna i matrice. Kada su konstituenti odabrani, pažnja se usmjerava na kreiranje povoljnih međuslojeva vlakno–matrica. Ovo međuslojno područje gdje dolazi do interakcije vlakna i matrice mora biti dobro konstruirano radi prerade i svojstava. Iako nema kvantitativnih modela za optimiziranje ovih međuslojeva, termodinamički i materijalni principi uz analizu eksperimenata omogućuju razumijevanje međuslojeva i njihovo kvalitativno konstruiranje. Dostupan alat za analizu i konstruiranje uključuje odabir obrada za površinsku i kemijsku modifikaciju površina; uporaba površinskih završnih obrada i/ili veličina da se osigura potpuno kvašenje i zaštita vlakana; konstrukcija međuslojeva željene krutosti, žilavosti; i kvantitativna i kvalitativna karakterizacija za mjerenje vrijednosti adhezije vlakno–matrica kompatibilne sa strukturnom okolinom i konstituentima materijala.

Adhezija vlakno–matrica je potreban kriterij za postizanje prihvatljivih svojstava kompozita. U literaturi se može naći veliki broj kemijskih formula, obrada i procedura namijenjenih povećanju vrijednosti adhezije vlakno–matrica u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava. Ipak naše kvantitativno razumijevanje vlakno–matrica međupovršina i mehanizama adhezije nije do kraja istraženo, te je moguće izvoditi unaprjeđenja kao što se izvode kod razvoja metodologija konstruiranja kompozita.

Istraživanja od 1990. proširila su koncept međuslojeva vlakno–matrica, koji je postojao kao dvodimenzionalana granica, u *međusloj* vlakno–matrica koji postoji u tri dimenzije. Kompleksnost ovih međuslojeva najbolje se može ilustrirati shematskim modelom, koji omogućuje da se na jednom području nabroji mnogo različitih karakteristika (slika 9.).



Slika 9. Shematski prikaz međusloja vlakno–matrica i neki od faktora koji doprinose njegovu oblikovanja [12].

Po definiciji, međusloj postoji od neke točke u vlaknu gdje se lokalna svojstva mijenjaju od osnovnih svojstava vlakna, preko stvarnog međusloja vlakno–matrica, do točke u matrici gdje se lokalna svojstva izjednačuju sa osnovnim svojstvima matrice. U ovom području se mogu identificirati razne komponente koje djeluju poznatim i nepoznatim efektima na međusloj. Na primjer, vlakno može imati morfološke varijacije blizu površine vlakna, a koje nisu prisutne u osnovnom materijalu. Površinsko područje vlakna može biti puno veće od njegove geometrijske vrijednosti, zbog pora, jamica, pukotina prisutnih na površini. Atomi i molekularni sastav površine vlakana može biti veoma različit od sastava osnovnog materijala vlakna.

Površinske obrade mogu dodati površini kemijske grupe ili ukloniti originalnu površinu, stvarajući tako područja drukčijeg kemijskog sastava ili drukčije strukture. Izlaganje zraku prije prerade kompozita može dovesti do adsorpcije kemikalija, koje mogu promijeniti ili ukloniti određenu korisnu površinsku reaktivnost.

---

Ovi adsorbirani materijali mogu stvarati probleme ako hlape pri povišenim temperaturama jer se stvaraju mjehurići, pa se u međusloju dobiju praznine koje ga narušavaju. Termodinamička površinska energija vlakna je rezultat ovih faktora. Prihvatljiva međupovršinska interakcija između ojačala i matrice određena je s njihovom površinskom slobodnom energijom. Površinska energija ojačala mora biti veća od površinske energije matrice.

Kada površina vlakna i matrice dođu u kontakt, kemijske i fizikalne veze se mogu oblikovati na međupovršini. Površinske kemijske grupe mogu djelovati sa kemijskim grupama u matrici, stvarajući kemijske veze. Van der Waalsove privlačne sile, vodikove veze, i elektrostatske veze također se mogu oformiti, što ovisi o sistemu. Broj i tip svake od njih snažno utječe na interakciju između vlakna i matrice. Na strukturu i svojstva matrice u međusloju može utjecati i blizina površine vlakna. Prisutnost ojačala i njegova kemijska i fizikalna priroda mogu promijeniti lokalnu morfologiju matrice u međuslojnom području. Nereaktivne komponente matrice i nečistoće mogu difundirati u međuslojno područje, te promijeniti lokalnu strukturu i poremetiti prisan kontakt između vlakna i matrice ili proizvesti materijal s neupotrebljivim mehaničkim svojstvima.

Svaki od ovih fenomena može varirati u veličini i može se pojaviti istovremeno u međuslojnom području. Ovisno o materijalima, međuslojevi mogu biti sastavljeni od bilo pojedinačnih ili od svih komponenti i mogu dosezati debljinu od par pa do nekoliko tisuća nanometara.

Nadalje, svaki međusloj je formiran tijekom prerade kompozita, pa uslijed ograničenja tih procesa ne mora biti u ravnotežnom stanju. Struktura ovoga područja može imati veliki utjecaj na svojstva kompozita, posebno na čvrstoću te kemijsku i toplinsku postojanost. Mora se poznavati točan sastav i svojstva ovoga područja ako se žele razviti točni modeli predviđanja ponašanja međusloja.

---

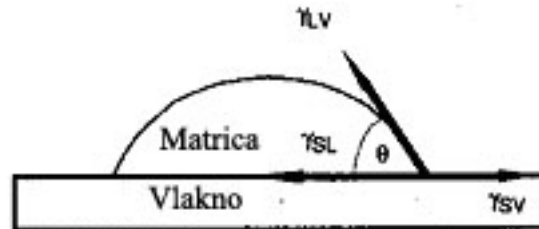
#### 4.1. Termodinamika međusloja

Jedan od načina dobivanja kompozita dobrih svojstava je povezanost vlakna i matrice, što je ograničeno termodinamikom međusloja. Sposobnost kvašenja vlakna matricom je potreban preduvjet za formiranje kompozitnog materijala. Često, mikroskopski pregled prelomnih površina kompozitnog materijala pokazuju loše ojačane površine, i/ili prisutnost praznina što je pokazatelj lošeg kvašenja. Loša mehanička svojstva pripisuju se slaboj adheziji vlakno–matrica što je povezano sa slabim kvašenjem. Postoji veza između površinske kemije vlakna, slobodne površinske energije matrice, termodinamičkog kvašenja vlakna matricom, i adhezije između vlakna i matrice. Stvaranje adhezije tijekom prerade kompozita je dinamički događaj na koji mogu utjecati uvjeti prerade i to se u konačnici može odraziti na svojstva kompozita. Termodinamika daje odličan okvir na temelju kojeg se može proučavati površina vlakna i matrice i mogu se kvantificirati interakcije koje se mogu dogoditi kada se spoje zajedno. Za niskomolekulne kapljevine za koje je vremenska konstanta za pregrupiranja molekula kratka, dostupni su *ravnotežni termodinamički odnosi* koji opisuju interakciju između površine čvrste i kapljevite faze i mogu se uporabiti za razumijevanje i predviđanje interakcije polimerne matrice s vlaknima za ojačavanje.

**Površinska energija.** Atom ili molekula na površini kapljevite ili čvrste faze ima mrežnu silu koja djeluje na njega, i vuče ga u unutrašnjost faze. Ta pojava se obično naziva površinska napetost (ili "površinska energija"). U kapljevini gdje se pregrupiranje molekula događa na mikroskopskom nivou, površinska napetost se može promatrati kao stvaranje "kore" na površini. Kapljevine sa slabom izraženom polarnošću imaju niske vrijednosti površinske napetosti, dok one jake polarnosti imaju visoke vrijednosti površinske napetosti (npr. voda). I čvrsta tijela imaju slobodnu površinsku energiju, ali pošto se atomi ne mogu pregrupirati spontano kao u kapljevini, njihova površina izgleda nepromijenjena.



**Kontaktni kut.** Kada se kapljevina površinske napetosti  $\gamma_{LV}$  stavi na čvrstu površinu površinske napetosti  $\gamma_{SV}$ , kapljevina će spontano oformiti kapljicu ili će se proširiti ("razliti") u film (slika 10).



Slika 10. Shematski prikaz kontaktnog kuta i komponenti površinske napetosti [12].

Ako se formira kapljica, može se izvesti odnos između površinskih napetosti kapljevine i čvrstog tijela, ako se površinske napetosti smatraju kao vektori koji djeluju na kraju kapljice. Slobodna površinska energija međupovršine čvrsto–kapljevito označena je s  $\gamma_{SL}$  i ravnoteža se izražava izrazom:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta$$

gdje je:  $\theta$  – kut između površine kapljice i površine čvrstog tijela,

$\gamma_{SV}$  – sila površinske napetosti između okoline i čvrstog tijela,

$\gamma_{LV}$  – sila površinske napetosti između okoline i kapljevine.

Za mjerenja površinske napetosti postoje različite kemijsko–fizičke metode, optičke i gravitacijske.

Kod kapljevina kod kojih je kontaktni kut veći od  $90^\circ$  nema kvašenja. Kvašenje se događa kod kapljevina s kontaktnim kutem manjim od  $90^\circ$ . Ako je kontaktni kut  $0^\circ$  dolazi do razlijevanja kapljevine.

Ravnoteža se izražava nejednadžbom:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} \geq \gamma_{LV}$$

Nejednadžba pokazuje da za sve slučajeve kvašenja i razlijevanja površinska napetost kapljevine koja kvasi mora biti veća od površinske napetosti čvrstog tijela.

---

**Adhezijski rad.** Pojam koji se često upotrebljava za opisivanje stanja međupovršina/međuslojeva je adhezijski rad ( $W_a$ ), koji predstavlja termodinamički rad potreban za stvaranje površine čvrsto–para i kapljevito–para razdvajajući međupovršinu čvrsto–kapljevito.

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$$

Ako se u jednadžbu uvrsti izraz za kontaktni kut, adhezijski rad je dan sljedećim izrazom:

$$W_a = \gamma_{LV} \cdot (1 + \cos \theta)$$

Ovaj izraz je termodinamički rad i predstavlja povratnu ravnotežnu vrijednost. Prema navedenom izrazu maksimalna vrijednost rada adhezije javlja se kada je kontaktni kut jednak nuli, a adhezijski rad jednak je dvostrukoj vrijednosti površinske napetosti kapljevine.

**Kvašenje.** Ključ stvaranja dobrih svojstava kompozita je dobro kvašenje vlakana matricom tijekom njegovog nastajanja. Male praznine duž vlakana mogu stvoriti vrlo velike kapilarne sile koje pripomažu procesu kvašenja. Kapilarna sila je dana izrazom:

$$\Delta P = \Delta \rho g h = \frac{\gamma_{LV} - \cos \theta}{2r}$$

gdje je:  $h$  – visina dizanja u kapilarnom prostoru,

$\rho$  – gustoća tekućine,

$\gamma_{LV}$  – površinska napetost kapljevine,

$\theta$  – kontaktni kut,

$r$  – polumjer kapilara,

$g$  – gravitacijska konstanta.

Kontaktni kut kontrolira kapilarne sile, jer pri kutu  $\theta = 90^\circ$  kapilarne sile nestaju, a za kuteve  $\theta > 90^\circ$ , spriječena je infiltracija.

---

## 4.2. Modifikacija površina

Termodinamika međuslojeva/međupovršina objašnjava važnost kvašenja za postizanje optimuma svojstava pri površinskoj slobodnoj energiji matrice manjoj od površinske energije čvrstog tijela. Većina polimera ima niske vrijednosti slobodne površinske energije, 20 do 45 mJ/m<sup>2</sup>, koje se blago smanjuju povećanjem temperature. Čvrsta tijela, s druge strane, mogu imati površinske energije koje variraju preko nekoliko redova veličina. Površine čvrstog tijela koje su bile izložene okolišnim uvjetima žele minimalizirati svoju slobodnu površinsku energiju i, stoga, apsorbirati tvari ili stvoriti okside da snize svoju slobodnu površinsku energiju. U nekim slučajevima ovakva površina može imati nižu slobodnu površinsku energiju nego neke polimerne matrice. U svrhu povećanja slobodne površinske energije čvrstog tijela razvijeni su postupci površinske i završne obrade kako bi se poboljšalo kvašenje.

**Površinske obrade.** Pojam "površinske obrade" se obično odnosi na kemijsku obradu površine kojom se mijenja njen kemijski sastav, te se tako povećava površinska energija, i/ili stvaraju pogodne mikrotopografske značajke bez namjernog prevlačenja površine zaštitnim slojem. Ovi postupci se provode iz plinskih ili kapljevitih kiselih ili baznih faza, ili bombardiranjem površine radijacijom raznih tipova. Površinska obrada pri formiranju kompozita je poželjna da potpomogne kvašenje i poboljša kontakt između vlakna i matrice.

**Završne obrade.** Pojam "završne obrade površine" se odnosi na nanošenje zaštitnog sloja na površinu ojačala nakon ili zajedno s površinskom obradom. Debljine nanesenog sloja kreću se oko 100 nm. Svrha je da se zaštiti površina ojačala tijekom njihovog manipuliranja tijekom oblikovanja kompozita. Većina ojačala je osjetljiva na napukline i čak slabi kontakt sa drugom tvrdom površinom može dovesti do stvaranja kritične količine napuklina koje će smanjiti čvrstoću. Završni sloj debljine 100 nm onemogućava direktan kontakt između pojedinih vlakana. Ovakva obrada može se primijeniti na bilo kojoj vrsti ojačala a razvijena je u tekstilnoj industriji da bi se olakšalo slaganje vlakana u svežanj a da pri tome ne dođe do oštećenja pojedinih vlakana .

---

Druga svrha završne obrade je da se zaštiti površinu vlakna od okolišnih uvjeta i kontaminacije kako ne bi došlo do smanjenja slobodne površinske energije. Tijekom oblikovanja kompozita ovaj zaštitni sloj se rastvara i nestaje s površine vlakna, ali je vrlo koristan u osiguravanju kvašenja. Kako su sredstva za završnu zaštitu obično u obliku otopine potencijalni problem predstavlja zadržavanje otapala i njegovo hlapljenje tijekom početnih faza ciklusa oblikovanja kompozita. Velika površina vlakna, male dimenzije i veliki volumen predstavljaju dodatni potencijalni problem zbog generiranja šupljina u kompozitu.

**Prevlačenja (*sizing*).** Za područje kompozita ovaj pojam se odnosi na bilo koju površinsku obradu ojačala u cilju zaštite od oštećenja tijekom prerade, poboljšanja prionljivosti s matricom ili poboljšanja njegovih mehaničkih svojstva. Prevlačenje je fizikalno slično završnoj obradi, upotrebljava se za vlakna debljine oko 0,1  $\mu\text{m}$ , ali se razlikuje u kemijskom sastavu. Gotovo se uvijek primjenjuje za staklena vlakna a ponekad i kod drugih ojačala. Razlika između prevlačenja i uobičajene površinske obrade najbolje je uočljiva na primjeru ugljičnih vlakna, a najmanje na bornim vlaknima; ono predstavlja proces namjernog prevlačenja ojačala pri kojem u nekim slučajevima dolazi do kemijske reakcije s površinom, dok pri površinskoj obradi dolazi do namjerne kemijske modifikacije ojačala pri čemu u nekim slučajevima može doći do stvaranja prevlaka. Ostali sinonim su *završna obrada*, koja dolazi iz područja tekstilne industrije i odnosi se na prevlake koje daju vlaknima fleksibilnost i slična svojstva važna pri tkanju, ili na području kompozita izraz „*coupling agent*” kojim se označuje poboljšanje mehaničkih svojstava i trajnosti nastalog kompozita uslijed bolje povezanosti ojačala s matricom.

Tipične otopine za prevlačenje staklenih vlaknaa sadrže silane ili kombinaciju s ostalim sastojcima kao što su dodaci za stvaranje filmova, antistatici i podmazivala. Prevlačenje se provodi već pri proizvodnji staklenih ojačala, kako bi se vlakna zaštitila od korozivnog djelovanja vode iz okoliša. Silani hidroliziraju i reagiraju s hidroksilnim skupinama na površini stakla stvarajući vrlo stabilne siloksanske veze. Ostali sastojci sredstva za prevlačenje zaštićuju staklena vlakna od mehaničkih oštećenja i potpomažu infiltraciju matrice. Silani se često nadopunjuju titanatima i cirkonatima. Kako bi se osiguralo jednoliko prevlačenje prevlake su najčešće na polimernoj osnovi kao što su škrob i njegovi derivati i neki vinilni polimeri. Izbor je određen kompatibilnošću s matricom, nivoom potrebne zaštite, uvjetima tkanja i troškovima.

---

Prevlake predstavljaju tek oko 1 maseni % ili manje ukupnog kompozita, sastoje se najvećim dijelom od otapala, a ekološki razlozi nalažu da otapalo po mogućnosti bude voda pa su prevlake u najvećem broju slučajeva vodene otopine ili vodene emulzije.

Idealne prevlake bi trebale biti kemijski kompatibilne s matricom i ne bi smjele negativno utjecati na mehanička svojstva kompozita. U protivnom slučaju prevlake treba ukloniti pri formiranju kompozita ispiranjem ili grijanjem. Takvi postupci ili oštećuju vlakna ili ostaci mogu sprječavati dobru povezanost matrica/ojačalo. Ipak prevlake su danas često u uporabi, naročito kod tkanih ojačala.

Postoji čitav niz prevlaka u obliku filma koje su kompatibilne s matricom i koje imaju raširenu uporabu za poliesterske i epoksidne matrice. Međutim, postoji vrlo malo prevlaka koje su pogodne za nove temperaturno poboljšane polimerne matrice kao što su bismaleini i poliimidi ili žilave plastomerne matrice kao poli(fenilen-sulfid) ili poli(eter-eter-keton). Za takve matrice najbolje su prevlake od istog polimera kao matrica, ali one nemaju tako dobra svojstva kvašenja i jednoličnosti.

Međupovršine odnosno međuslojevi kod kompozitnih materijala jako utječu na njihova mehanička svojstva. Postoji vrlo veliki broj istraživanja odnosa međupovršina/međuslojeva, adhezije matrica–ojačalo i mehaničkih svojstava kompozita za različite kombinacije matrice i ojačala. Međupovršine odnosno međuslojevi postoje i jako utječu na konačna svojstva kompozita. Razumijevanje kemijskih, fizikalnih svojstava i morfologije međuslojeva preduvjet je boljeg predviđanja mehaničkih svojstava kompozita.

---

## 5. KONSTRUKCIJSKI KRITERIJI [12]

### 5.1. Uvod

Proizvod mora postići određeni stupanj sigurnosti, cijene i funkcionalnosti. Da bi se zadovoljili ovi konstrukcijski kriteriji moraju se detaljno razmotriti određeni uvjeti. Ovi uvjeti se odnose na to koji će se materijali koristiti, koji proizvodni proces, i koje postavke će biti odabrane.

### 5.2. Pregled konstrukcijskih kriterija za kompozite

Konstrukcijski kriteriji se utvrđuju u početnim fazama konstrukcijskog programa, ali mogu biti promijenjeni tijekom razvoja i proizvodnje. Proizvodi se izrađuju i kupuju da zadovolje određene realne i imaginarne potrebe. Zrakoplov može biti izrađen za velike brzine, veliki nosivi kapacitet, ili letnu izdržljivost. Automobil se izrađuje za cestovni transport, ali može biti funkcionalno klasificiran kao sportski auto, limuzina, trkaći auto, ili karavan. Slično, rakete, brodovi, vlakovi, sportska oprema, medicinska pomagala, spremnici, mostovi, svi su namijenjeni određenoj svrsi. U svim ovim industrijama se upotrebljavaju kompozitni materijali, te se kao i drugi materijali primjenjuju sa uspjehom i nedostacima. Da se zadovolje potrebne funkcije proizvoda, konstruktor mora jasno znati očekivanja korisnika, očekivani životni vijek proizvoda, i okolinu u kojoj će se proizvod koristiti.

Možda više nego drugi materijali, kompoziti, po svojoj prirodi, posjeduju fleksibilnost pri konstruiranju kako bi zadovoljili određene konstrukcijske zahtjeve. Ipak, na početku konstruiranja može biti određenih ciljeva koji:

- su važniji nego neki drugi,
- koje je lakše postići,
- koji se mogu postići samo na račun drugih.

Konstruiranje je katkada umjetnost kompromisa.

---

Konstruktivska fleksibilnost kompozita potječe od mogućnosti odabira velikog broja materijala, njihova rasporeda i oblika; širok izbor proizvodnih postupaka i mnogo različitih varijacija kod odabira strukture.

Da se osigura pravilan konstrukcijski izbor kriterija, najbolje je izvesti planski pristup.

Za početak, za određenu primjenu, odrede se konstrukcijski kriteriji, koji se onda navode po redu svoje važnosti za određenu konstrukciju:

- troškovi,
- čvrstoća,
- krutost,
- masa,
- veličina,
- točnost dijelova,
- ekološka ograničenja u proizvodnji, upotrebi i odlaganju,
- estetika,
- produktivnost,
- montažna ograničenja,
- vijek trajanja,
- održavanje i popravci,
- zapaljivost i mehanička svojstva.

Prema prioritetu konstrukcijskih kriterija razmatraju se sve inženjerske, materijalne, proizvodne i strukturne opcije u cilju zadovoljenja konstrukcijskih uvjeta. Jednim izborom ne moraju biti zadovoljeni svi preduvjeti. Ipak, na osnovi prioriteta konstrukcijskih kriterija, konstrukcijski tim može efikasnije procijeniti sve opcije i lakše eliminirati neprihvatljive varijante.

Uobičajeni izbor opcija kompozitnih materijala:

- tipovi vlakana: stakleno, ugljično, aramidno, boron, polietilen, keramika, volfram;
- oblici vlakana: jednosmjerni, tkanina, nasumični mat, nasjeckana vlakna, pletivo;
- polimerne matrice: poliester, vinil ester, epoksidne smole, BMI, poliimid, fenolne smole. Mogu biti i duromeri i plastomeri.;
- druge matrice: metalne, keramičke, ugljične, staklene;
- strukturna konfiguracija: puni laminati, sendvič konstrukcije, krute ploče;
- materijali jezgre: pčelinje saće, pjena, drvo, sintaktički.

---

Preradbene opcije:

- proizvodne metode: mokro slaganje, slaganje preprega, polaganje vlakana, slaganje traka, pultrudiranje, RTM (*resin transfer molding*), RTM potpomognut vakuumom, namatanje, tlačno kalupljenje, injekcijsko prešanje, centrifugalno lijevanje;
- preradbeni oprema: kalupi, krušne peći, autoklave, preše.

Primjena kompozitnih materijala u bilo kojoj industriji ima standardne konstrukcijske kriterije koji će konstruktora dovesti do odabira određenog dizajna. Neki kriteriji su unaprijed određeni na osnovi kolektivnog iskustva unutar industrije. Doduše, držeći se "standardnih industrijskih smjernica" može se doći do skoro pa identičnih proizvoda konkurencije. Ovo možda je siguran i vjerojatno jedini način, ali će rijetko rezultirati prednosti tvrtke nad konkurencijom. Negativan aspekt je da uvođenjem originalne konstrukcije dolazi i rizik da će konstrukcijski program doživjeti neplanirane prepreke ili potencijalno, totalni neuspjeh konstrukcije. Zato je potrebno tijekom razvoja proizvoda da konstrukcijski tim u potpunosti istraži posljedice svake konstrukcijske odluke.

### 5.3. Zakon miješanja

Od njihova početka, ponašanje kompozitnih materijala se predviđalo na osnovi proračuna strukture između vlakna i matrice. Faktori kao sastav konstituenta, fizikalna morfologija, i geometrijski raspored su uključeni u model za predviđanje mehaničkih svojstava [2].

Zakonom miješanja se kod kompozita s velikim česticama npr. predviđa gustoća, i to sljedeći izrazom:

$$\rho_c = \sum V_i \cdot \rho_i$$

gdje su:  $\rho_c$  – gustoća kompozita,

$\rho_i$  – gustoća konstituenta,

$V_i$  – volumni udio konstituenta.

Neka svojstva, kao npr. tvrdoća i čvrstoća ne mogu se predvidjeti primjenom zakona miješanja.



---

Zakonom miješanja uvijek se može predvidjeti gustoća vlaknima ojačanih kompozita:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f$$

gdje se indeks "m" odnosi na matricu, a "f" na vlakno.

Osim toga, s pomoću zakona miješanja može se točno predvidjeti električna i toplinska vodljivost vlaknima ojačanog materijala u smjeru vlakana ako su vlakna kontinuirana i jednosmjerna.

Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f$$

gdje je:  $E_c$  – modul elastičnosti kompozita,

$E_m$  – modul elastičnosti matrice,

$E_f$  – modul elastičnosti vlakna.

U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj. Modul elastičnosti može se predvidjeti izrazom:

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f$$

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga svojstva, kao npr. duktilnost (plastičnost), ponašanje pri udaru (žilavost), ponašanje pri dinamičkom (umor materijala) i dugotrajnom statičkom opterećenju (puzanje materijala) predviđaju se teže nego vlačna čvrstoća.

---

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Uvod

Kompozit za opisana ispitivanja je drvno–plastomerni kompozit (polipropilen s dodatkom 12,5 % drvnog brašna, jelovina) proizveden u tvrtki *Isokon* (Slovenske Konjice, Slovenija) smješavanjem sastojaka u dvopužnom ekstruderu te naknadnim usitnjavanjem ekstrudata. Prije prve preradbe materijal je bio sušen 4 sata pri temperaturi 106 °C prema preporuci proizvođača materijala, da ne bi došlo do bubrenja izratka nakon preradbe. Ispitci su izrađeni u kalupu koji je namijenjen za izradbu ispitaka za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, te nije bila potrebna naknadna obrada istih. Kompozit je prerađen na stroju za injekcijsko prešanje *Engel VC 330/60*.

Nakon preradbe izratci su usitnjeni i tako dobiveni materijal je ponovno injekcijski prešan s istim parametrima. Postupak usitnjavanja i ponovnog injekcijskog prešanja ponavljan je 4 puta, tako da je materijal ukupno prerađen 5 puta.

Parametri preradbe su navedeni u tablici 6.

Tablica 6. Parametri injekcijskog prešanja [3].

Parametar preradbe	Vrijednost
Temperatura mlaznice	195 °C
Temperatura 1. grijala	195 °C
Temperatura 2. grijala	190 °C
Temperatura 3. grijala	190 °C
Brzina ubrizgavanja	110 mm/s
Tlak ubrizgavanja	160 bar
Temperatura vode za temperiranje kalupa	20 °C
Naknadni tlak	90 bar
Vrijeme naknadnog tlaka	8 s
Vrijeme hlađenja	13 s
Ukupno vrijeme ciklusa	24,2 s

---

Odabrano je osam ispitaka, od kojih su tri ispitka polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna i tri ispitka čistog polipropilena uronjena u destiliranu vodu pri sobnoj temperaturi u trajanju od 28 dana. Dva su ispitka (jedan čistog polipropilena i jedan polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna) odvojena za usporedbu onima ispitcima izloženim djelovanju vode. Usto, zaštićeni su od atmosferskih uvjeta tj. vlage iz zraka, tako da dodatna masa ne bi imala negativan utjecaja na konačne rezultate.

Tijekom 28–dnevnog djelovanja vode na ispitna tijela, odredila se promjena mase,  $\Delta G$  (tablica 7.). Osim toga na netreriranim ispitcima i onima izlaganim djelovanju vode određeno je talište, tvrdoća i temperatura omekšavanja po VICAT–u, kako bi se ustanovila razlika između čistog polipropilena i DPK–a te razlika između ispitaka nastala uslijed djelovanju vode.

X	12.05.2008	12.05.2008	14.05.2008	15.05.2008	17.05.2008	19.05.2008	21.05.2008	26.05.2008	02.06.2008	09.06.2008	
	8 početno stanje, g	1. dan ΔG, g	2. dan ΔG, g	3. dan ΔG, g	5. dan ΔG, g	7. dan ΔG, g	9. dan ΔG, g	14. dan ΔG, g	21. dan ΔG, g	28. dan ΔG, g	
<b>1</b>	2,9476	2,9472	2,9465	2,9478	2,9471	2,9477	2,9464	2,9476	2,9477	2,9471	
<b>2</b>	2,7075	2,7065	2,7058	2,7074	2,7067	2,7072	2,7067	2,7072	2,7073	2,7066	
<b>3</b>	3,0186	3,0182	3,0177	3,0191	3,0177	3,0187	3,0174	3,0186	3,0187	3,0186	
<b>1</b>	4,3583	4,3621	4,3626	4,3646	4,3657	4,3682	4,3692	4,3723	4,3747	4,3786	
<b>2</b>	4,3222	4,3251	4,3261	4,3283	4,3287	4,3318	4,3324	4,3358	4,3385	4,3421	
<b>3</b>	4,3361	4,3384	4,3391	4,3426	4,3436	4,3456	4,3455	4,3493	4,3522	4,3552	
	<b>ČISTI POLIPROPILEN</b>				<b>PP + 12,5 % DRVNOG BRAŠNA</b>						

Tablica 7. Promjena mase tijekom 28–dnevnog uranjanja u vodi.

## 6.2. Određivanje upijanja vode

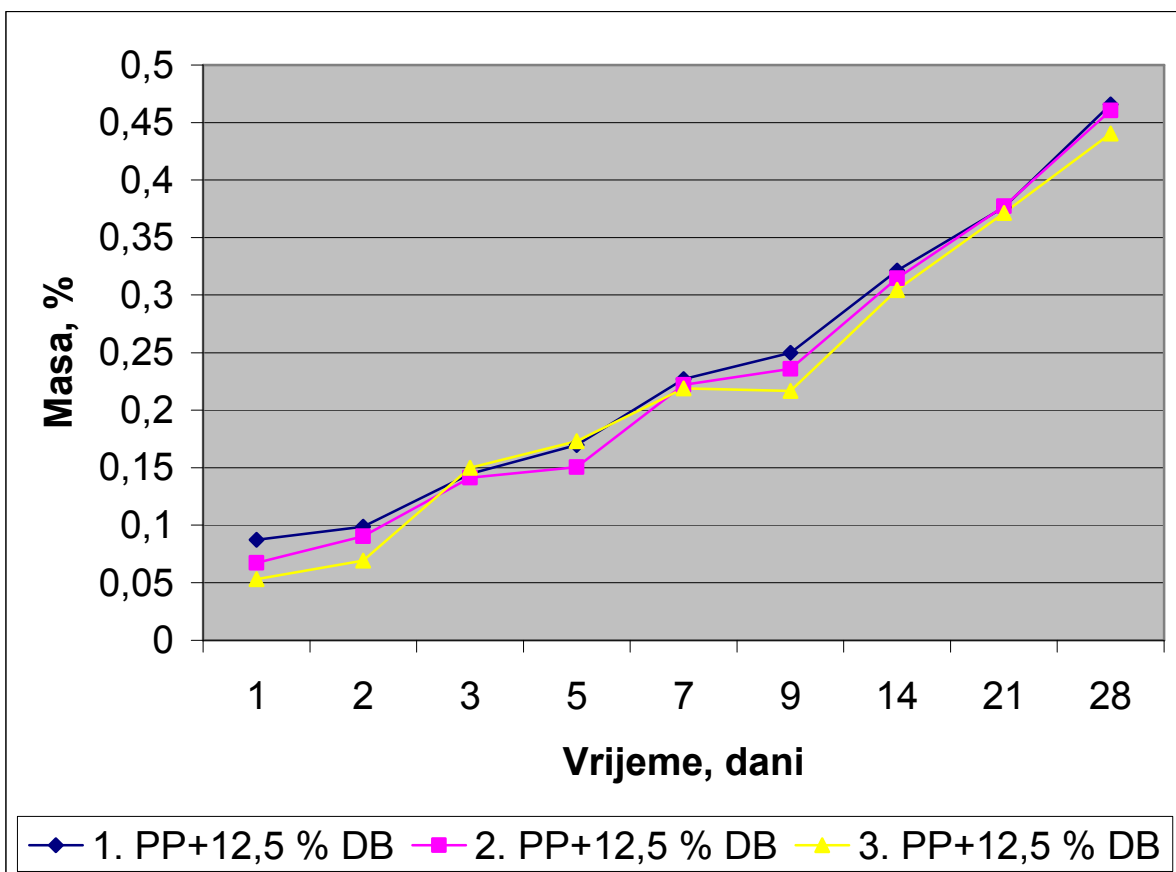
Tri ispitka od čistog polipropilena i tri ispitka drvno-polipropilenskog kompozita uronjeni su u destiliranu vodu gdje su provela 28 dana pri sobnoj temperaturi. Prije uranjanja određena je masa svih ispitaka koji će biti podvrgnuti 28–dnevnom djelovanju vode. Prema normi, promjena mase provodi se vaganjem na analitičkoj vagi i to u ciklusima 1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 21 i 28. dan. Svaki se ispitak prije vaganja treba dobro obrisati da zaostala voda na površini ne bi negativno utjecala na mjerenje upijanja. Mjerenje se nakon vađenja iz vode i brisanja mora izvesti što prije da ne bi došlo do isparavanja vode iz ispitka. Rezultati praćenja promjene mase ( $\Delta G$ ) prikazani su u tablici 7.

U tablici 8. su vrijednosti promjene mase u postocima te srednje vrijednosti (sv) pomoću kojih je nacrtana zajednička krivulja za pojedine ispitke.

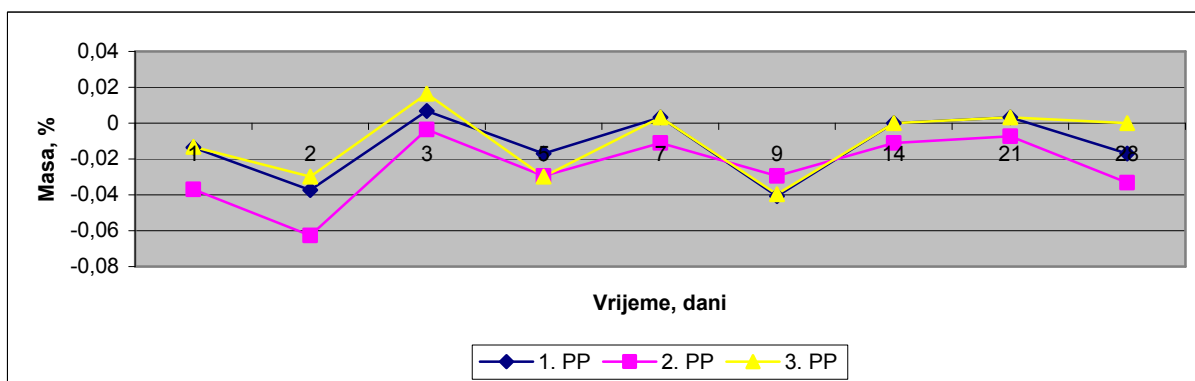
Tablica 8. Vrijednosti promjena mase u postocima, %.

	1. PP+12,5% DB	2. PP+12,5% DB	3. PP+12,5% DB	1. PP	2. PP	3. PP	PP+12,5 % DB (sv)	PP (sv)	Vrijeme (d)
1	0,0871	0,067	0,053	-0,0135	-0,0369	-0,0132	0,069	-0,0212	1
2	0,0986	0,0902	0,0691	-0,0373	-0,0627	-0,0298	0,0859	-0,0432	2
3	0,1445	0,1411	0,1499	0,0067	-0,0036	0,0165	0,1451	0,0065	3
4	0,1697	0,1503	0,1729	-0,0169	-0,0295	-0,0298	0,1643	-0,0254	5
5	0,2271	0,2221	0,219	0,0033	-0,011	0,0033	0,2227	-0,0014	7
6	0,25	0,2359	0,2167	-0,0407	-0,0295	-0,0397	0,2342	-0,0366	9
7	0,3212	0,3146	0,3044	0	-0,011	0	0,3134	-0,0036	14
8	0,3762	0,3771	0,3713	0,0033	-0,0073	0,0033	0,3748	-0,0002	21
9	0,4657	0,4604	0,4404	-0,0169	-0,0332	0	0,4555	-0,0167	28

Temeljem dobivenih vrijedosti promjene mase (u postocima) mogu se nacrtati apsorpcijske krivulje (slike 11. i 12.).

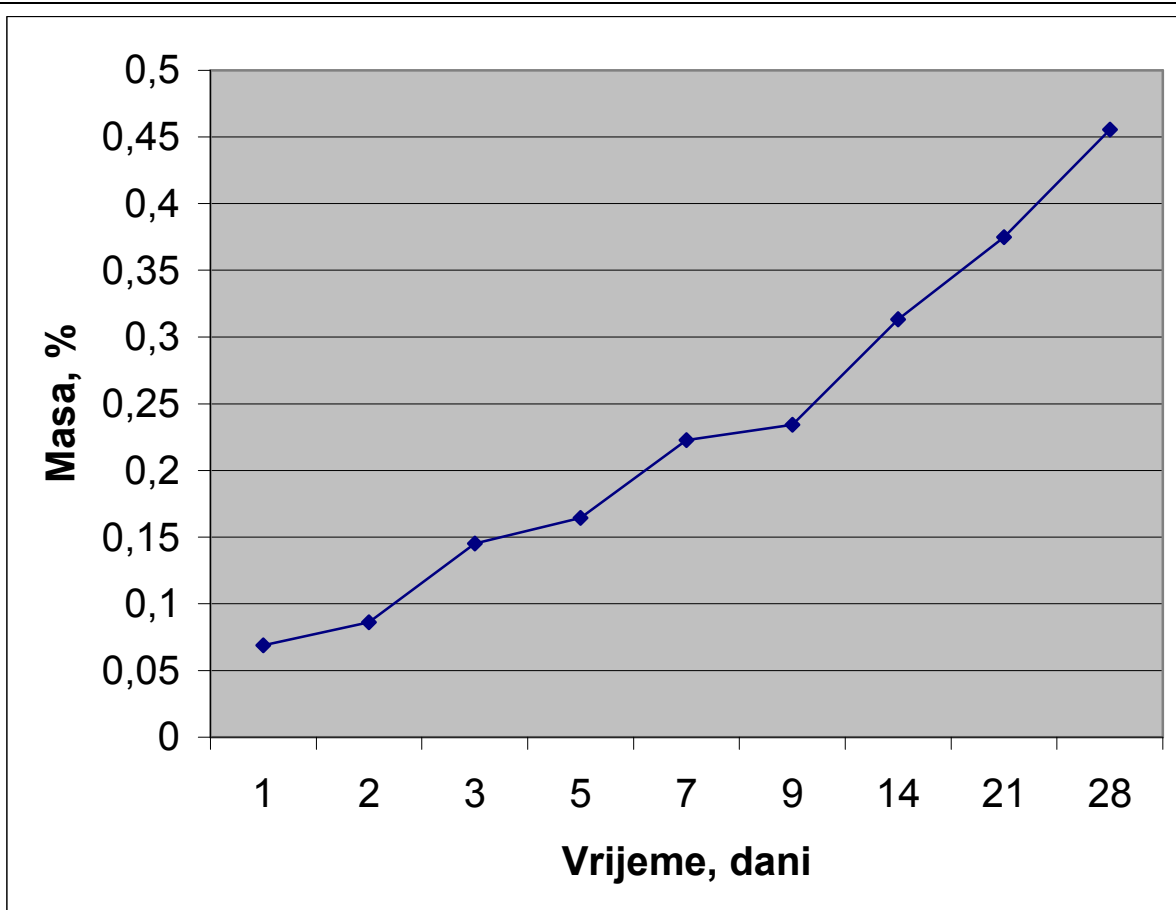


Slika 11. Apsorpcijska krivulja za PP+12,5 % DB.

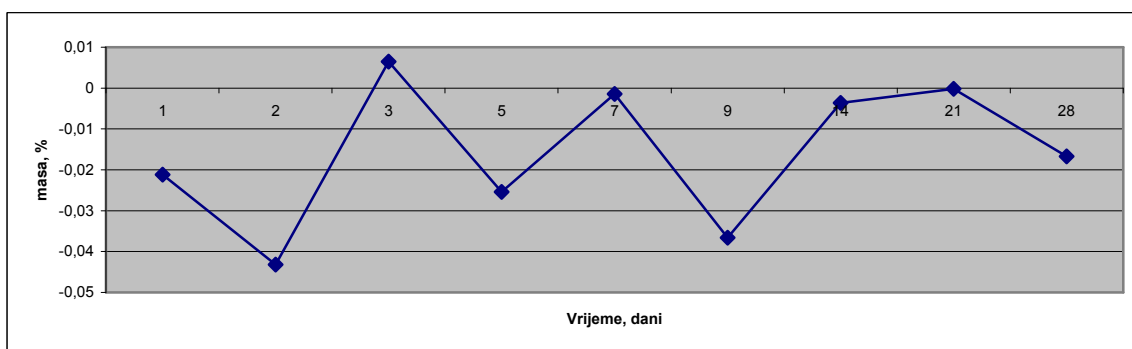


Slika 12. Apsorpcijska krivulja za polipropilen.

Sa rezultatima srednjih vrijednosti za ispitke polipropilena i PP+12,5 % DB apsorpcijske krivulje izgledaju kao na slikama 13. i 14.



Slika 13. Adsorpcijska krivulja za srednje vrijednosti PP+12,5 % DB.



Slika 14. Adsorpcijska krivulja za srednje vrijednosti PP.

Ako podatke iz tablice 8. uvrstimo u računalni alat *Statistica* dobiju se osnovni statistički podaci (tablica 9. i 10.) te se može izraditi regresijska ovisnost upijanja vode o vremenu provedenom u vodi, pri čemu se može predvidjeti ponašanje sustava.

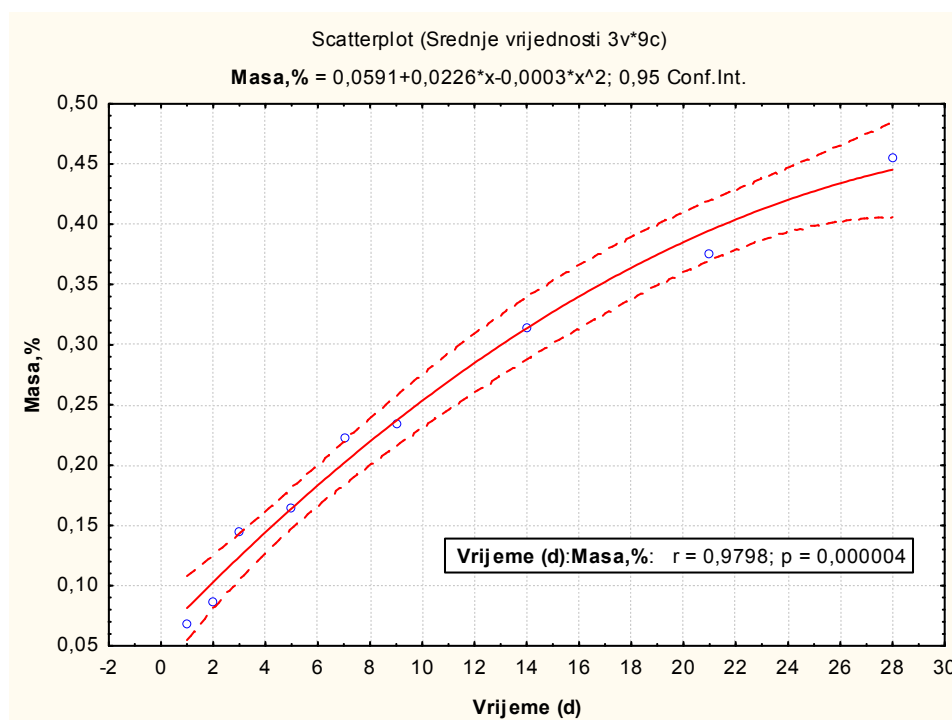
Tablica 9. Osnovni statistički podaci za PP+12,5 % drvnog brašna.

Descriptive Statistics (Osnovni podaci)						
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
1. PP+12,5% DB	9	0,237789	0,087100	0,465700	0,016718	0,129297
2. PP+12,5% DB	9	0,228744	0,067000	0,460400	0,017791	0,133384
3. PP+12,5% DB	9	0,221856	0,053000	0,440400	0,017046	0,130559

Tablica 10. Osnovni statistički podaci za čisti polipropilen.

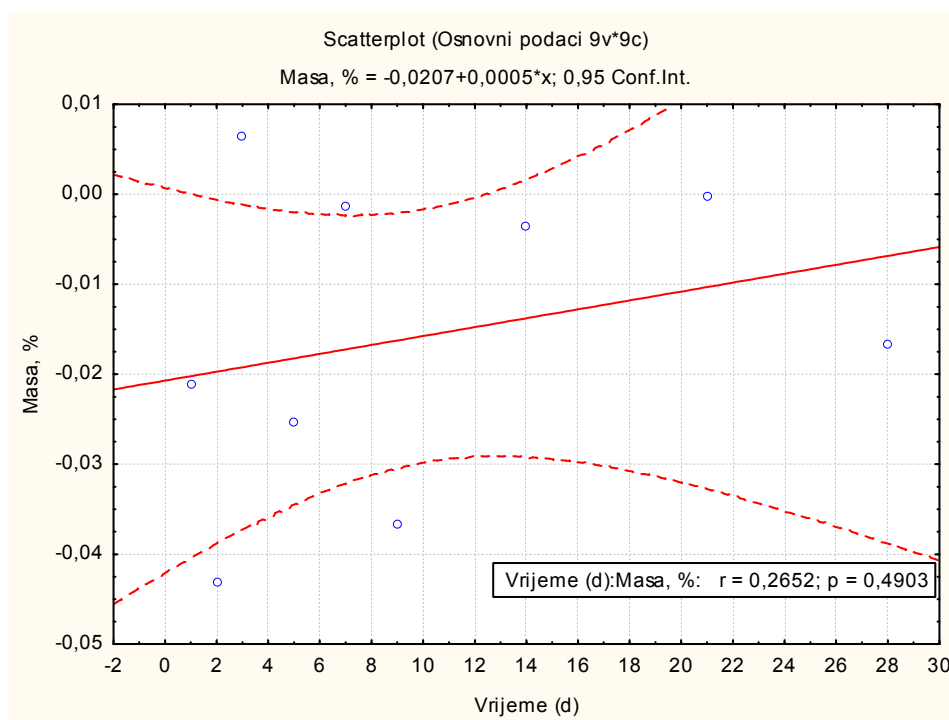
Descriptive Statistics (Osnovni podaci)						
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.
1. PP	9	-0,012444	-0,040700	0,006700	0,000309	0,017586
2. PP	9	-0,024967	-0,062700	-0,003600	0,000354	0,018821
3. PP	9	-0,009933	-0,039700	0,016500	0,000367	0,019145

Na slikama 15 i 16. prikazana je regresijska ovisnost upijanja vode o vremenu provedenom u vodi (analiza je izvedena s srednjim vrijednostima, %).



Slika 15. Ovisnost upijanja vode i vremena za PP+12,5% DB.





Slika 16. Ovisnost upijanja vode i vremena za PP.

Nelinearnom regresijskom analizom (polinomna) za srednje vrijednosti ispitaka polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna, uz pouzdanost 0,95; utvrđena je regresijska ovisnost upijanja vode i vremena:

$$U = 0,0591 + 0,0226 \cdot x - 0,0003 \cdot x^2$$

gdje je: U – upijanje vode u postocima, %;

x – vremenska izloženost djelovanju vode, u danima.

Polipropilen s dodatkom 12,5 % drvnog brašna nastavio bi vjerojatno upijati vodu po ovoj regresijskoj ovisnosti sve do zasićenja, koje bi nastupilo negdje oko 38. dana u iznosu 0,48 %. Promjena mase (upijanje vode) koja se uočava na apsorpcijskoj krivulji (slika 13.) od 0,45 % 28. dan dovodi do zaključka da je ovaj drvo–polipropilenski kompozit izrazito postojan na djelovanje vlage (upijanje vode). Pretpostavlja se da su ovlažene drvene čestice u vanjskom dijelu kompozita koje su u dodiru s okolinom; voda se ne prenosi kroz polipropilensku matricu ili se prenosi neznatno. Razlog je prislan spoj čestica drva i polipropilena pri čemu polipropilen obavija drvo tankim omotačem.

---

Kod linearne regresijske analize za ispitke čistog polipropilena (slika 16.), uz pouzdanost 0,95; uočava se nepredvidivo veće rasipanje podataka, kao i na apsorpcijskim krivuljama (slika 12. i 14.), a čak se ističe i negativna promjena mase. To bi značilo da je polipropilen tijekom 28–dnevnog ispitivanja u destiliranoj vodi pri sobnoj temperaturi izgubio masu, što naravno nije slučaj.

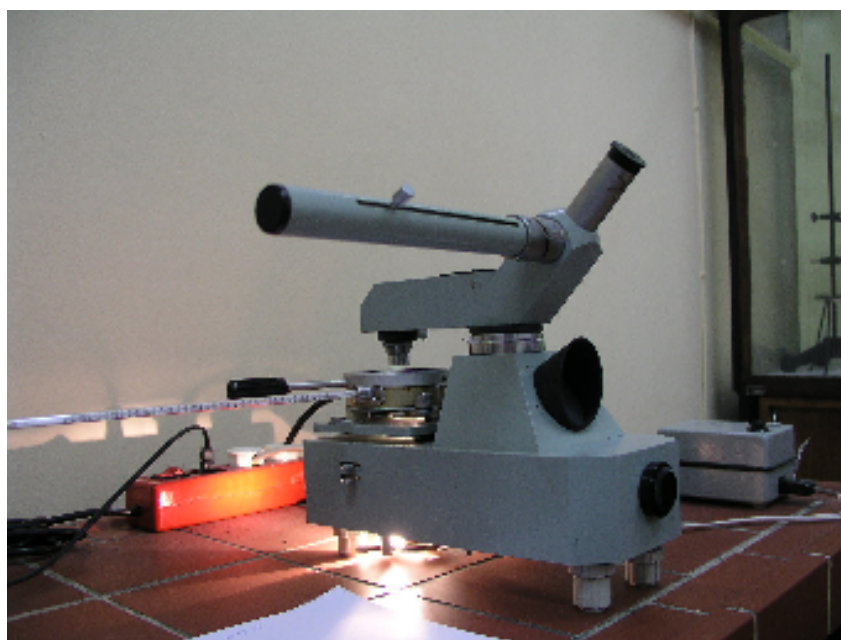
Zaključak je, temeljen na činjenici da čisti polipropilen ne upija vodu pri sobnoj temperaturi, da se takvi rezultati trebaju pripisati *slučajnoj pogrešci* analitičke vage koji se ne mogu predvidjeti. Rasipanje mjernih vrijednosti je opće poznata činjenica pa se, za postizanje potpune točnosti rezultata, treba provesti dodatni niz mjerenja i uzeti aritmetička sredina kako bi se isključile slučajne pogreške.

---

### 6.3. Određivanje tališta (norma: EN ISO 3146 : 2000)

Aparat (mikro stol za zagrijavanje BOETIUS, slika 17.) se sastoji od okruglog metalnog bloka grijanog električnom energijom. Pomoću podešavajućeg uređaja za učvršćenje može se uređaj pričvrstiti na stolić objektiva mikroskopa. Stol za zagrijavanje ima centralnu bušotinu koja se prema dolje konusno proširuje. Tamo postavljen kondenzator, otporan na temperature, daje dovoljno i jednoliko osvjetljenje vidnog polja. Kondenzator ima specijalno izbrušeni dio koji omogućava potrebnu jaku aperturu osvjetljenja i praktično paralelni snop svjetlosti za određivanje loma svjetlosti i molekulne mase.

Za namještanje preparata tijekom određivanja tališta i laku izmjenu preparata kod određivanja u seriji aparat je opskrbljen s vodicom objektiva.



Slika 17. Mikro stol za zagrijavanje BOETIUS.

Propisani porast temperature od 4 °C u minuti u blizini točke taljenja podešava se pomoću otpornika s vretenastom vodicom. Otpor omogućuje pomoću svog peterostrukog stupnjevanja skoro linearno podešavanje temperature. Blok za hlađenje s priključkom na vodovod omogućava najbrže odvođenje topline pri serijskim mjerenjima.

Za mjerenje temperature kod normalnog određivanja tališta uređaj je opskrbljen s dva posebno baždarena priključna termometra s Richtеровom skalom s područjima od 20–260 °C i 70–360 °C, s podjelom 1/1 °C, koji pokazuju korigiranu točku taljenja.

---

Za određivanje molekulne mase predviđena su 3 baždarena termometra s područjima 0–110 °C, 90–210 °C i 190–310 °C, podjele 5/1 °C s mogućnošću očitavanja 0,1 °C. Ti termometri se mogu upotrebljavati i za određivanje točke taljenja i znače samo još bolju preciznost.

Da bi se postigla željena reproducibilnost mjerenja od  $\pm 0,2$  °C grijana ploča kod ovoga aparata nema uobičajen oblik. Jednoliko toplinsko polje postignuto je pomoću punog bloka od legure lakih metala i prstenastim oblikom plosnatog grijača koji posjeduje dobru toplinsku vodljivost. Dvije toplinski zaštićene komore s prozorima sprječavaju utjecaj štetnih strujanja zraka na objektiv.

Uređaj za promatranje PHMK 05 uz mikro stol za zagrijavanje omogućava, uz istovremeno promatranje objekta i termometra u okularu, projekciju preparata na zamućenoj ploči. Precizna kamera za male slike s unutarnjim mjerenjem svjetlosti upotpunjuje uređaj za promatranje u kompletnu kameru – mikroskop.

Ugrađena halogena svjetiljka (6 V, 20 W) daje svjetlu sliku zamućenoj ploči i najkraće vrijeme osvjetljenja kod mikroskopskog snimanja. Ugrađeni uređaj za polariziranje predviđen je za promatranje i za mikrografsko snimanje u polariziranom svjetlu. To omogućava udobno promatranje konačne točke taljenja, prijelazne promjene itd.

Pod mikroskopom se točke taljenja mogu odrediti na dva načina, "prolazni" način i "ravnotežni" po KOFLER-u. Kod "prolaznog" određivanja točke taljenja promatra se proces taljenja pri porastu temperature od 4 °C u minuti, dok se kod "ravnotežnog" postupka grijanje tako podesi da se kod točke taljenja uspostavi ravnoteža između čvrste (ostatak kristala) i kapljevite faze (taljevina).

Točniji oblik određivanja je ravnotežni, jer nema pogrešaka zbog zakašnjenja pokazivanja termometra. Zakašnjenje u reagiranju termometra uzrokovano je sljedećim: mijenja li se temperatura mjernog polja stalno, termometar ne slijedi neposredno promjenu temperature, jer je on strano tijelo u temperaturnom polju. Zbog toga svaki termometar posjeduje određeno zakašnjenje u pokazivanju. Veličina pokazane pogreške je svakako ovisna o svojstvima materijala, konstrukciji termometra i o brzini stalne promjene temperature. Termometri na ovom uređaju su takve izvedbe da posjeduju neznatno zakašnjenje pokazivanja. Najtočniji su za određivanje u ravnotežnom stanju.

---

U tablici 11. prikazani su rezultati mjerenja temperature taljenja za polipropilen i polipropilen s dodatkom 12,5 % drvnog brašna („suhih“ i „mokrih“ ispitaka)

Tablica 11. Rezultati ispitivanja temperature tališta.

	<b>Temperatura tališta, °C</b>
<b>PP, suhi</b>	145 – 151
<b>PP + 12,5 % DB, suhi</b>	144 – 150
<b>PP, u vodi</b>	145 – 151
<b>PP + 12,5 % DB, u vodi</b>	144 – 151

Uočava se da kod čistog polipropilena koji je bio izložen 28–dnevnom djelovanju destilirane vode pri sobnoj temperaturi te onog polipropilena koji je bio suh nije došlo do promjene temperature taljenja (145–151 °C). Između ispitaka polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna razlika je zanemariva. DPK koji je bio u vodi ima temperaturu potpunog taljenja 1 °C višu nego DPK koji nije bio u destiliranoj vodi.

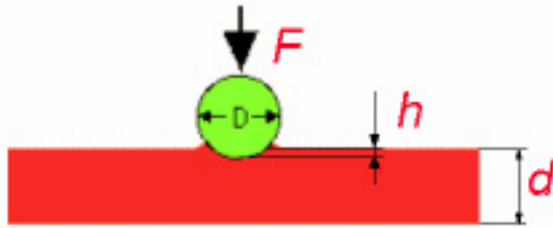
Temperatura taljenja drvno–plastomernog kompozita u usporedbi s temperaturom taljenja čistog polipropilena samo je 1 °C niža, bez obzira koje ispitke uspoređivali (suhi PP–mokri PP+12,5 % DB, suhi PP–suhi PP+12,5 % DB, mokri PP–mokri PP+12,5 % DB).

Može se zaključiti da udio od 12,5 % drvnog brašna nema utjecaj na temperaturu taljenja te da udio destilirane vode koji je apsorbiran u 28–dnevnom periodu u drvno–plastomerni kompozit također nije utjecao na temperaturu taljenja. Procjena tališta je subjektivna (određuje je promatrač) te se slobodno može reći da nema nikakve razlike u temperaturi taljenja između bilo kojih ispitaka. Količina upijene vode je mala (oko 0,45 % nakon 28 dana i to u površinski sloj) te nije moglo doći do značajnijeg bubrenja materijala, pri čemu bi se poremetila struktura polipropilena u kojem slučaju bi razlika u temperaturi taljenja mogla biti značajna. Ovo je ujedno i potvrda pretpostavke da je upijena voda apsorbirana vjerojatno samo u površinski sloj drvno–polipropilenskog kompozita.

---

#### 6.4. Određivanje tvrdoće

Tvrdoća je određivana metodom utiskivanja kuglice (DIN 53 346). Ispitivanje se provodi mjerenjem dubine prodiranja kuglice u materijal pod opterećenjem (slika 18 i 19).



$d$  – debljina ispitnog tijela ( minimalno 4 mm),

$D$  – promjer kuglice (5 mm),

$h$  – dubina prodiranja (0,15 do 0,35 mm),

$F$  – opterećenje (bira se u ovisnosti prema  $h$ ).

Slika 18. Princip određivanja tvrdoće metodom utiskivanja kuglice.



Slika 19. Tvrdomjer.

---

Dubina prodiranja kuglice očitava se za vrijeme djelovanja opterećenja i to nakon 10, 30 i 60 sekundi. Marka tvrdomjera je *Zwick*.

Dobivene vrijednosti dubina prodiranja za ispitke polipropilena dane su u tablici 12. i 13. Opterećenje kod suhog polipropilena i polipropilena koji je bio izložen 28–dnevnom djelovanju vode je  $F= 358$  N. Vrijednosti tvrdoće za to opterećenje postoje u tablicama proizvođača. U proračun se mora uvrstiti i korekcijski faktor koji za silu  $F= 358$  N iznosi 0,0020 (prema tablicama proizvođača uređaja)

U tablici 14. i 15. dane su dubine prodiranja za suhi PP+12,5 % DB te onaj koji je bio izložen 28–dnevnom djelovanju vode. Pošto vrijednosti tvrdoće za opterećenje od  $F= 196$  N (definira se dubinom prodiranja  $h$ ) nisu navedene u tablicama proizvođača računati će se pomoću formule, a korekcijski faktor će se također odrediti prema tablicama proizvođača uređaja. Korekcijski faktor za  $F= 196$  N iznosi 0,0015.

Tvrdoća se izračunava prema:

$$H_{pol} = \frac{1}{D\pi} \frac{F}{h}, N / mm^2$$

Tablica 12. Dubina prodiranja  $h$  za suhi PP.

Redni broj očitavanja	OČITANJE		
	PP F= 358 N		
	10'	30'	60'
1	0,355	0,375	0,390
2	0,345	0,370	0,385
3	0,365	0,385	0,405
4	0,370	0,395	0,415
5	0,360	0,385	0,400
6	0,355	0,380	0,395
7	0,365	0,390	0,405
8	0,360	0,385	0,400
9	0,380	0,400	0,420
10	0,365	0,390	0,405

Tablica 13. Dubina prodiranja  $h$  za mokri PP.

Redni broj očitavanja	OČITANJE		
	PP F= 358 N		
	10'	30'	60'
1	0,340	0,370	0,380
2	0,365	0,385	0,400
3	0,345	0,365	0,380
4	0,345	0,365	0,380
5	0,355	0,375	0,395
6	0,360	0,380	0,400
7	0,350	0,375	0,390
8	0,365	0,390	0,405
9	0,345	0,365	0,385
10	0,345	0,365	0,380

Tablica 14. i 15. Dubina prodiranja  $h$  za suhi i mokri PP+12,5 % DB.

Redni broj očitavanja	OČITANJE			Redni broj očitavanja	OČITANJE		
	PP + 12,5% DB F=196 N				PP + 12,5% DB F= 196 N		
	10'	30'	60'		10'	30'	60'
1	0,180	0,190	0,195	1	0,185	0,195	0,205
2	0,180	0,195	0,200	2	0,185	0,200	0,205
3	0,180	0,190	0,200	3	0,185	0,195	0,205
4	0,180	0,195	0,200	4	0,190	0,200	0,210
5	0,185	0,200	0,205	5	0,190	0,200	0,210
6	0,185	0,195	0,205	6	0,180	0,195	0,200
7	0,185	0,200	0,205	7	0,180	0,195	0,200
8	0,205	0,215	0,225	8	0,185	0,195	0,205
9	0,240	0,255	0,265	9	0,185	0,195	0,205
10	0,230	0,240	0,250	10	0,195	0,205	0,215

U tablicama 16, 17, 18 i 19. prikazane su vrijednosti tvrdoća te njihova srednja vrijednost.



Tablica 16. Tvrdća za suhi polipropilen.

Redni broj očitavanja	TVRDOĆA, N/mm <sup>2</sup>		
	PP		F= 358 N
	10'	30'	60'
1	68,4	64,5	62,0
2	70,5	65,4	62,7
3	66,4	62,7	59,5
4	65,4	61,0	58,0
5	67,3	62,7	60,2
6	68,4	63,6	61,0
7	66,4	62,0	59,5
8	67,3	62,7	60,2
9	63,6	60,2	57,2
10	66,4	62,0	59,5
Σ	67,0	62,7	60,0

Tablica 17. Tvrdća za mokri polipropilen.

Redni broj očitavanja	TVRDOĆA, N/mm <sup>2</sup>		
	PP		F= 358 N
	10'	30'	60'
1	71,6	65,4	63,6
2	66,4	62,7	60,2
3	70,5	66,4	63,6
4	70,5	66,4	63,6
5	68,4	64,5	61,0
6	67,3	63,6	60,2
7	69,4	64,5	62,0
8	66,4	62,0	59,5
9	70,5	66,4	62,7
10	70,5	66,4	63,6
Σ	69,2	64,8	62,0

Tablica 18. i 19. Tvrdća za suhi i mokri PP+12,5 % DB.

Redni broj očitavanja	TVRDOĆA, N/mm <sup>2</sup>		
	PP + 12,5% DB		F= 196 N
	10'	30'	60'
1	76,0	71,7	69,7
2	76,0	69,7	67,8
3	76,0	71,7	67,8
4	76,0	69,7	67,8
5	73,8	67,8	66,0
6	73,8	69,7	66,0
7	73,8	67,8	66,0
8	66,0	62,7	59,7
9	55,7	52,3	50,2
10	58,3	55,7	53,4
Σ	70,5	65,9	63,4

Redni broj očitavanja	TVRDOĆA, N/mm <sup>2</sup>		
	PP + 12,5% DB		F= 196 N
	10'	30'	60'
1	73,8	69,7	66,0
2	73,8	67,8	66,0
3	73,8	69,7	66,0
4	71,7	67,8	64,3
5	71,7	67,8	64,3
6	76,0	69,7	67,8
7	76,0	69,7	67,8
8	73,8	69,7	66,0
9	73,8	69,7	66,0
10	69,7	66,0	62,7
Σ	73,4	68,7	65,7

---

Izmjerena tvrdoća (srednja vrijednost) za suhi polipropilen nakon 10 sekundi je 67,0 N/mm<sup>2</sup>, nakon 30 sekundi 62,7 N/mm<sup>2</sup> te nakon 60 sekundi 60,0 N/mm<sup>2</sup>; a za polipropilen koji je bio uronjen u destiliranu vodu pri sobnoj temperaturi u periodu od 28 dana: nakon 10 sekundi 69,2 N/mm<sup>2</sup>, nakon 30 sekundi 64,8 N/mm<sup>2</sup> te nakon 60 sekundi 62,0 N/mm<sup>2</sup>. Razlika je 2 N/mm<sup>2</sup> što nije značajno te se može smatrati da voda nema utjecaja na polipropilen, što se i očekivalo.

Tvrdoća suhog polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna nakon 10 sekundi iznosi 70,5 N/mm<sup>2</sup>, nakon 30 sekundi 65,9 N/mm<sup>2</sup> te nakon 60 sekundi 63,4 N/mm<sup>2</sup>; dok je tvrdoća za PP+12,5 % DB koji je bio 28 dana uronjen u vodu: nakon 10 sekundi 73,4 N/mm<sup>2</sup>, nakon 30 sekundi 68,7 N/mm<sup>2</sup> te nakon 60 sekundi 65,7 N/mm<sup>2</sup>. Uočava se porast tvrdoće od oko 3 N/mm<sup>2</sup> za polipropilen s dodatkom 12,5 % drvnog brašna koji je bio uronjen u destiliranu vodu pri sobnoj temperaturi u periodu od 28 dana.

Ako bi usporedili suhe i mokre ispitke (suhi polipropilen naspram suhog PP+12,5 % DB te mokri polipropilen naspram mokrog PP+12,5 % DB), u oba se slučaja uočava viša tvrdoća u iznosu od oko 3–4 N/mm<sup>2</sup> kod polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna.

Najmanja razlika u tvrdoći se uočava između suhog polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna i mokrog čistog polipropilena, i to u iznosu oko 1 N/mm<sup>2</sup>; dok se najveća razlika tvrdoće, u iznosu od oko 6 N/mm<sup>2</sup>, uočava između suhog polipropilena i PP+12,5 % DB koji je bio uronjen 28 dana u vodu.

---

## 6.5. Određivanje postojanosti oblika pri povišenoj temperaturi

Određivanje postojanosti oblika pri povišenoj temperaturi odnosno temperature omekšavanja plastomera provedeno je prema normi EN ISO 306, metoda po VICAT-u. Ispitivanje se provodi zagrijavanjem uz istovremeno djelovanje mehaničkog opterećenja. Epruvete su pločice debljine veće od 3 mm ili više tanjih pločica koje se polože jedna na drugu. Površina obuhvaća 2x2 cm. Epruveta može biti izrezana iz ploče ili nekog drugog poluproizvoda, odnosno proizvoda ili proizvedena uobičajenim postupkom prerade.

Ispitivanje se provodi u uređaju koji se sastoji od:

- termostata s podlogom za epruvete,
- naprave za opterećenje,
- naprave za pokazivanje.

Termostat je uobičajene izvedbe opremljen posebnim termoregulatorom, koji osigurava jednoliko povećanje temperature brzinom od 50 °C na sat, te s dva termometra pomoću kojih se određuju temperature.

Termoregulator se sastoji od elemenata koji svojom dilatacijom (pri promjeni temperature) aktivira određene kontakte satnog mehanizma i sklopke. Funkcioniranje se odvija na sljedeći način: uslijed promjene temperature mijenja se duljina bakrene cijevi koja je smještena u termostatu. U toj cijevi nalazi se kvarcni štapić s metalnim produžetkom. Na kraju metalnog štapića koji ulazi u kućište termoregulatora nalazi se poluga kontakta, koja se pomiče u lijevo ukoliko dođe do produljivanja bakrene cijevi uslijed povišenja temperature. Polugu s protukontaktom stalno podešava satni mehanizam (preko krivulje) tako da se postiže mogućnost stvaranja kontakta u svrhu zagrijavanja određenom brzinom (50 °C/na sat).

Dugme za zakretanje sa strelicom, koje se nalazi na prednjoj strani regulatora, treba se kretati u smjeru kazaljke na satu. Pomak iznosi 30 ° na sat. Neposredno po završetku svakog ispitivanja potrebno je isključiti struju te dugme oprezno povući k sebi i zakrenuti u lijevo. Tom prilikom se regulator stavlja u polazni položaj i u tom položaju ostaje zakočen do ponovnog aktiviranja prilikom novog ispitivanja.

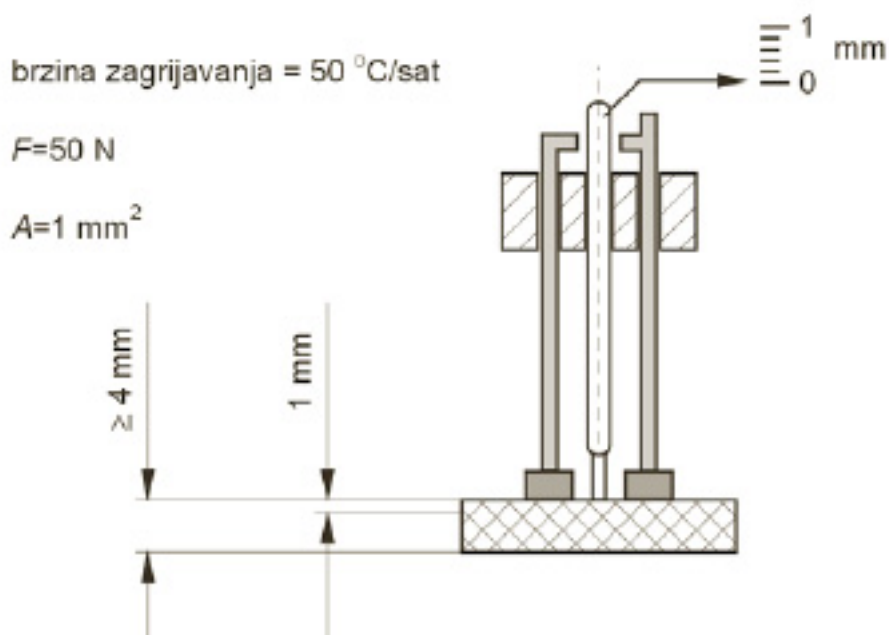
Podloge za epruvete mogu se visinski podešavati prema debljini epruvete. Prilikom stavljanja novih epruveta visinu podesiti tako da uređaj za opterećivanja donjim krajem dodiruje površinu epruvete.

---

Zakretanjem narovašenih matica uređaja za opterećenje u lijevo, igla opterećena utegom od 49 N uprijeti će o površinu epruvete. Zakretanjem spomenute matice u desno epruveta se rasterećuje.

Kazaljka naprave za pokazivanje na skali s podjelom od po 0,1 mm pokazati će u opterećenom stanju vrijednost 0,0. Tijekom procesa povišenja temperature, uslijed mekšanja plastomerne epruvete igla će pod opterećenjem prodirati sve dublje. Kada dubina prodiranja dosegne 1,0 mm preko električnih kontakata aktivirat će se zvučni signal i upozoriti na potrebu očitavanja temperature.

Na slici 20. elementi koji aktivno sudjeluju u ispitivanju; epruveta se opterećuje silom od 50 N (sila djeluje na šipku poprečnog presjeka  $1 \text{ mm}^2$ ), te istodobno zagrijava uz porast temperature od  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  na sat.



Slika 20. Određivanje temperature omekšavanja po VICAT-u.

Određivanje temperature omekšavanja provedena su na obje vrste drvno-polipropilenskog kompozita („suhi“ i „mokri“) ali samo na čistom polipropilenu nakon izlaganja vodi, jer se zbog neznatne upojnosti ne očekuju razlike u temperaturama omekšavanja (tablica 20.).

Tablica 20. Temperature omekšavanja po VICAT–u.

<b>Materijal</b>	<b>Uzorak br.</b>	<b>T<sub>1</sub>, °C</b>	<b>T<sub>2</sub>, °C</b>	<b>ΔT, °C</b>	<b>Srednja vrijednost</b>
<b>PP, u vodi</b>	1	74	70	72	<b>70 °C</b>
	2	76	72	74	
	3	60	66	63	
<b>PP + drvno brašno, suhi</b>	1	62	67	65	<b>73 °C</b>
	2	79	86	83	
	3	69	75	72	
<b>PP + drvno brašno, u vodi</b>	1	74	76	75	<b>75 °C</b>
	2	79	86	83	
	3	66	67	67	

Temperature T<sub>1</sub> i T<sub>2</sub> označavaju rezultate mjerenja s dva termometra, na taj način dobivamo veću preciznost mjerenja (uzimamo njihovu srednju vrijednost ΔT). Kao mjerodavna temperaturu omekšavanja odredi se srednja vrijednost sva tri ispitka pojedinog materijala.

Temperatura omekšavanja suhog polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna je 73 °C i viša je za 3 °C od temperature omekšavanja čistog polipropilena. Drvno–plastomerni kompozit koji je bio u destiliranoj vodi pri sobnoj temperaturi u periodu od 28 dana ima još veću razliku temperature omekšavanja naspram čistog polipropilena, čak 5 °C.

Moglo bi se zaključiti da udio od 12,5 % drvnog brašna u polipropilenu povećava njegovu radnu temperaturu za oko 3 °C, a ako je u okolini visok udio vlage to se čak može pozitivno odraziti na povišenje radnih temperatura i do 5 °C.

Temperature omekšavanja omogućuju određivanje radnih temperatura koje dijelovi izrađeni od određenog plastomera mogu podnijeti u praksi.

Proizvod izrađen od polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna podnosi iste i čak više radne temperature, i uz povišenu vlagu u zraku, naspram čistog polipropilena s tim da imamo prednosti koje sa sobom nosi drvno brašno kao dodatak..

---

## ZAKLJUČAK

Nakon izlaganja polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna (jelovina) djelovanju destilirane vode pri sobnoj temperaturi u trajanju od 28 dana, temeljem apsorpcijske krivulje ustanovljeno je upijanje vode u iznosu od 0,45 %. Ovo upijanje se odvijalo uglavnom u drvo u vanjskom dijelu kompozita koje je u dodiru s okolinom; voda se ne prenosi kroz polipropilensku matricu ili se prenosi neznatno (razlog je prislan spoj čestica drva i polipropilena pri čemu polipropilen obavija drvo tankim omotačem). Može se zaključiti da je ovaj drvno–plastomerni kompozit izrazito postojan na djelovanje vlage (upijanje vode). Čisti polipropilen koji je služio kao usporedba, očekivano, nije upio vodu.

Određivanjem tališta nije uočena razlika između polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna i čistog polipropilena koji je služio kao usporedba. Temperature taljenja su se kretale oko 144–151 °C. Može se zaključiti da udio od 12,5 % drvnog brašna nema utjecaj na temperaturu taljenja te da udio apsorbirane destilirane vode tijekom 28–dnevnog razdoblja u drvno–plastomerni kompozit također nije utjecao na talište

Mjerenjem tvrdoće primijećene su nešto veće vrijednosti kod polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna. Kod usporedbe suhih i mokrih ispitaka (suhi polipropilen naspram suhog PP+12,5 % DB te mokri polipropilen naspram mokrog PP+12,5 % DB), u oba se slučaja uočava viša tvrdoća u iznosu od oko 3–4 N/mm<sup>2</sup> kod polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna. Najmanja razlika u tvrdoći se uočava između suhog polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna i mokrog čistog polipropilena, i to u iznosu oko 1 N/mm<sup>2</sup>; dok se najveća razlika tvrdoće, u iznosu od oko 6 N/mm<sup>2</sup>, uočava između suhog polipropilena i PP+12,5 % DB koji je bio uronjen 28 dana u vodu.

Određivanje postojanosti oblika pri povišenoj temperaturi se izvelo postupkom po VICAT–u. Temperatura omekšavanja suhog polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna iznosila je 73 °C i viša je za 3 °C od temperature omekšavanja čistog polipropilena. Drvno–plastomerni kompozit koji je bio u destiliranoj vodi pri sobnoj temperaturi u periodu od 28 dana ima još veću razliku temperature omekšavanja naspram čistog polipropilena, čak 5 °C.

---

Dakle, dodatak drvnog brašna utječe na povišenje temperature omekšavanja kompozita, naročito uz djelovanje apsorbirane vode, pa se može zaključiti da proizvodi izrađeni od polipropilena s dodatkom 12,5 % drvnog brašna u najmanju ruku mogu podnijeti radne temperature kao i proizvodi izrađeni od čistog polipropilena.

---

## LITERATURA

- [1] Zvonimir Janović: *Polimerizacije i polimeri*, Kemija u industriji , Zagreb 1997.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2002.
- [3] M. Rujnić – Sokele, M. Šercer, B. Bujanić: *Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvo – plastomernog kompozita*, Polimeri 25(2004),1-2,12-19
- [4] Rowell R. M., Sanadi A. R. i dr.: *Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities*,  
<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/PDF1997/rowel197d.pdf>.
- [5] Richard P. Wool, Shrikant N. Khot: *Bio – Based Resins and Natural Fibers*, ASM VOLUME 21: Composite, ASM Internationale, University of Delaware, 2001.
- [6] N. N.: *Interfacing Wood – plastic composites industries in the U.S.*, Forest Products Society, [www.jobwerx.com/news/Archives/iwpc.html](http://www.jobwerx.com/news/Archives/iwpc.html).
- [7] N. N.: *Wood Plastic Composites Study – Technologies and UK market Opportunities*,  
[www.warp.org.uk/publications/WoodPlasticCompositesStudy\\_TechnologiesAndUKMarketOpportunities.pdf](http://www.warp.org.uk/publications/WoodPlasticCompositesStudy_TechnologiesAndUKMarketOpportunities.pdf).
- [8] Climenhage D.: *Recycled Plastic Lumber. A Strategic Assessment of Its Production, Use and Future Prospects*, Environment & Plastic Industry Council,  
[www.plasticsrecycling.ab.ca/Plastic Lumber Report.pdf](http://www.plasticsrecycling.ab.ca/PlasticLumberReport.pdf).
- [9] N. N.: *Wood – Plastic Composites*, TimbaPlus,  
<http://www.timbaplus.co.uk/TechnicalReview.pdf>.
- [10] T. Filetin: *Predavanje, Postupci Proizvodnje Kompozita*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2003.
- [11] N. N.: *An Investigation of the Potential of Expand the Manufacture of Recycled Wood, Plastic Composite Products in Massachusetts*, Chelsea Centar for Recycling and Economic Development, 2000., <http://www.chelseacentar.org/pdfs/TechReport19.pdf>.
- [12] D.B. Dolson, S. L. Miracle: *ASM VOLUME 21: Composite*, ASM Internationale, Ohio, 2001.



---