

Utjecaj udjela vlakana brnistre na mehanička i morfološka svojstva kompozita na osnovi termoplastičnih polimera

Vrhovec, Klara

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:211737>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Klara Vrhovec

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, listopad 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Kandidatkinja **Klara Vrhovec**

Predala je izrađen diplomski rad dana: 28. listopada 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Prof. dr. sc. Mirela Leskovic, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
Izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, Sveučilište u
Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Prof. dr. sc. Igor Sutlović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo diplomski rad i odobrilo obranu diplomskog
rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Diplomski ispit održat će se dana: 31. listopada 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Klara Vrhovec

**UTJECAJ UDJELA VLAKANA BRNISTRE NA MEHANIČKA
I MORFOLOŠKA SVOJSTVA KOMPOZITA NA OSNOVI
TERMOPLASTIČNIH POLIMERA**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof.dr.sc. Emi Govorčin Bajsić, FKIT

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, FKIT

prof. dr. sc. Mirela Leskovic, FKIT

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratožil Krehula, FKIT

Zagreb, listopad 2024.

SAŽETAK

U posljednjih nekoliko godina primjećen je porast interesa za komercijalnom upotrebom kompozita na osnovi prirodnih vlakana, odnosno biokompozita. Interes za ovim materijalima javlja se uslijed zabrinutosti ljudi zbog potencijalne štetnosti i problema zbrinjavanja otpada koji nastaje upotrebom materijala na osnovi neobnovljivih izvora energije. Prirodna vlakna predstavljaju održive materijale, lako dostupne u prirodi, s nizom prednosti poput niske cijene, male težine, obnovljivosti, biorazgradivosti te visokih specifičnih svojstava.

Istraživanje je usmjereno na ispitivanje mehaničkih i morfoloških svojstava kompozita termoplastičnog polimera i vlakana brnistre. Kao termoplastični polimeri za pripravu kompozita korišteni su polikarbonat (PC), akrilonitril butadien stiren (ABS) i polipropilen (PP) te vlakna brnistre u udjelima od 0, 5, 10, 15 i 20 mas. %.

Ključne riječi: kompoziti, biokompoziti, prirodna vlakna, mehanička svojstva, morfološka svojstva, polikarbonat (PC), akrilonitril butadiden stiren (ABS), polipropilen (PP), brnistra (BRN)

ABSTRACT

In the last few years, there has been a growing interest in the commercial use of composites based on natural fibers, i.e. biocomposites. Interest in these materials stems from the growing concern of people about potential harm and the problem of waste disposal arising from the use of materials based on non-renewable sources of energy. Natural fibers represent sustainable materials, easily available in nature, with several advantages such as low cost, light weight, renewability, biodegradability and high specific properties.

The mechanical and morphological properties of the composite of thermoplastic polymer and *Spartium junceum L.* fibers were investigated. Polycarbonate (PC), acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polypropylene (PP) were used as thermoplastic polymers for composite preparation as well as *Spartium junceum L.* in the content of 0, 5, 10, 15 and 20 wt. %.

Keywords: composites, biocomposites, natural fibers, mechanical properties, morphological properties, polycarbonate (PC), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polypropylene (PP), *Spartium junceum L.* (BRN)

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na strpljenju, razumijevanju, ljubavi i potpori koju su mi pružili tijekom studija.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆI DIO	2
2.1. Polimeri.....	2
2.1.1. Termoplastični polimeri	3
2.2. Kompoziti.....	3
2.2.1. Biokompoziti	4
2.2.2. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima	5
2.3. Brnista.....	7
2.3.1. Svojstva brnistre	7
2.3.2. Vlakna brnistre.....	9
2.3.3. Primjena brnistre i vlakana brnistre	10
2.4. Polikarbonat (PC).....	11
2.4.1. Proizvodnja polikarbonata	11
2.4.2. Svojstva polikarbonata.....	12
2.4.3. Primjena polikarbonata.....	13
2.5. Akrilonitril butadien stiren (ABS).....	13
2.5.1. Dobivanje ABS-a	13
2.5.2. Svojstva ABS-a.....	14
2.5.3. Primjena ABS-a	15
2.6. Polipropilen (PP).....	16
2.6.1. Proizvodnja polipropilena.....	16
2.6.2. Svojstva polipropilena	17
2.6.3. Primjena polipropilena.....	18
2.7. Mehanička svojstva polimera	18
2.7.1. Naprezanje – deformacija	18
2.8. Morfološka svojstva	20
2.8.1. Pretražna elektronska mikroskopija (SEM)	20
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	22
3.1. Materijali	22
3.1.2. Priprava PC/BRN, ABS/BRN te PP/BRN kompozita.....	22
4. REZULTATI I RASPRAVA	28
4.1. Mehanička svojstva PC/BRN kompozita	28
4.2. Mehanička svojstva ABS/BRN kompozita.....	31
4.3. Mehanička svojstva PP/BRN kompozita.....	34
4.4. Morfološka svojstva PC/BRN kompozita	37
4.5. Morfološka svojstva ABS/BRN kompozita.....	39
4.6. Morfološka svojstva PP/BRN kompozita.....	41
5. ZAKLJUČAK.....	42
6. LITERATURA.....	43
7. ŽIVOTOPIS.....	47

1. UVOD

Polimerni kompoziti ojačani sintetskim vlaknima koriste se već više od 50 godina u zrakoplovnoj, vojnoj, pomorskoj, automobilskoj i mnogim drugim granama industrije, pružajući visoku čvrstoću i krutost, dimenzijsku stabilnost i dobra toplinska svojstva krajnjim proizvodima. U današnje vrijeme, zbog povećane ekološke svijesti, sve više se razvijaju biokompoziti. S kontinuiranim rastom, ukoliko ne budu poduzete nikakve mjere, globalna proizvodnja plastike će do 2060. godine iznositi gotovo 1.231 milijuna tona. Dugi životni vijek plastičnih proizvoda ima svoje prednosti, međutim problem predstavlja zbrinjavanje plastičnog otpada (ogromne količine odlagališta diljem svijeta, odlaganje plastičnog otpada u okoliš) što dovodi do velikih ekoloških problema. Djelomično rješenje ovog problema može biti proizvodnja bioplastike, bila ona na bioosnovi ili biorazgradiva. Posljednjih nekoliko godina počinje sve veći razvoj ekološke svijesti, a time i značajan interes za primjenu prirodnih vlakana za proizvodnju biokompozita. [1,2]

Cilj ovog rada je ispitati mehanička i morfološka svojstva kompozita termoplastičnih polimera (polikarbonat, akrilonitril butadien stiren te polipropilen) s prirodnim vlaknima, odnosno vlaknima brnistre u udjelu od 0, 5, 10, 15 i 20 mas. %.

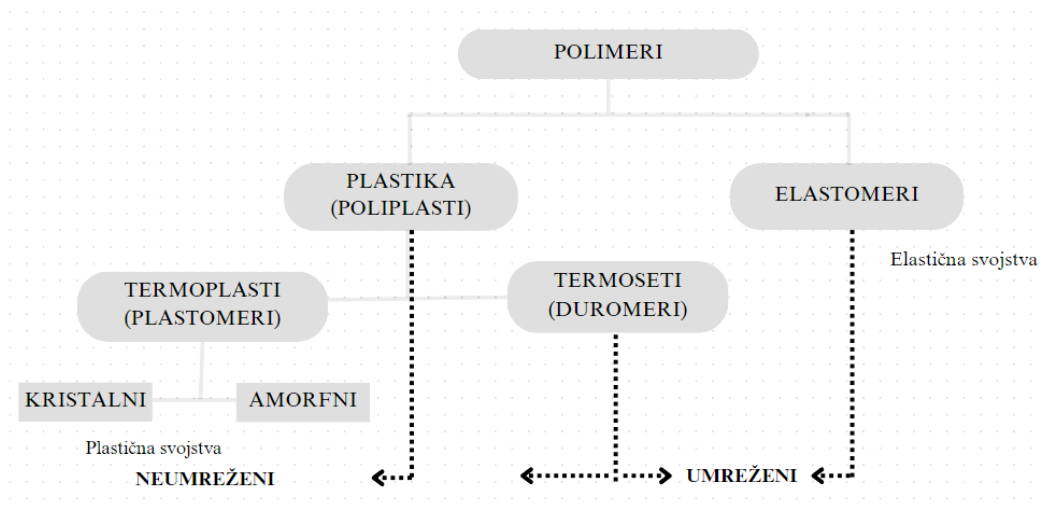
2. OPĆI DIO

2.1. Polimeri

Naziv polimer potječe od grčkih riječi poly što znači mnogo te meres što znači dijelovi. Jednostavno rečeno, polimeri su makromolekule sastavljene od velikog broja istovrsnih ponavljanih jedinica manjih molekula poznatih kao monomeri. Molekulska masa polimera u rasponu je od nekoliko tisuća do nekoliko milijuna. [3]

Polimere možemo podijeliti na različite načine, uzimajući u obzir različite kriterije. Neke od osnovnih podjela su:

1. Prema primjenskim svojstvima, odnosno prema toplinskim i mehaničkim svojstvima (slika 1):
 - plastika (poliplasti) – termoplasti (plastomeri) i termoseti (duromeri)
 - elastomeri (gume)
2. Prema strukturi: linearni, razgranati i umreženi
3. Prema broju monomera: homopolimeri i kopolimeri (statistički, alternirajući, blok i graft (cijepljeni))
4. Prema konfiguraciji: izotaktični, sindiotaktični, ataktični
5. Prema porijeklu: prirodni i sintetski (organskog ili anorganskog porijekla) [3,4]



Slika 1. Podjela polimera prema mehaničkim i toplinskim svojstvima [3]

Osnovna podjela polimera je upravo ona prema porijeklu, odnosno podjela polimera na sintetske i prirodne.

Prirodni polimeri, odnosno biopolimeri nastaju kao rezultat prirodnih ili bioloških procesa te se mogu naći bilo gdje u prirodi, uključujući životinje, biljke, a čak se mogu pronaći i u ljudskom tijelu u obliku proteina, masti, aminokiselina itd. U prirodne polimere također ubrajamo prirodnu gumu, celulozu, svilu, vunu, prirodne smole, hitin itd. Oni su povoljniji za okoliš s obzirom na to da su CO₂ neutralni i većinom biorazgradljivi. Za razliku od prirodnih polimera, sintetski polimeri se ne pojavljuju prirodno ili putem prirodnog procesa, već se dobivaju sintetski u laboratoriju iz petrokemijskih proizvoda kao što su nafta, zemni plin te kameni ugljen. Oni nisu ekološki povoljni zbog CO₂ emisije, a nisu niti biološki razgradljivi (postoji par iznimki kao što su PLA, PVA...). Neki od primjera sintetskih polimera su polietilen, polipropilen, polikarbonat, akrilonitril butadien stiren, polietilentereftalat itd. [4,5]

2.1.1. Termoplastični polimeri

Plastomeri, odnosno termoplasti predstavljaju skupinu polimera koji imaju sposobnost reverzibilnog taljenja i očvršćavanja (kristalizacije) promjenom temperature u procesu zagrijavanja/hlađenja. Na sobnoj temperaturi radi se o krutinama koje su topljive u organskim otapalima. Grijanjem termoplastični polimeri postaju sve mekši i teku zbog taljenja kristala ili prelaska temperature staklastog prijelaza te postaju taljevina. Prilikom obrade, termoplasti poprimaju oblik kalupa u koji se ulijevaju dok su u rastaljenom stanju, a potom hlađenjem otvrdnjavaju u željeni oblik. Važna karakteristika termoplasta je činjenica da se mogu taliti više puta, a da ne dođe do razgradnje, odnosno da ne dođe do značajnog gubitka svojstava materijala. U termoplastične polimere spadaju polipropilen, akrilonitril butadien stiren, polikarbonat, polimetilmetakrilat, politetrafluoretilen, polistiren itd. [4,6]

2.2. Kompoziti

Kompozitni materijali višefazni su sustavi, odnosno kombinacija dva ili više materijala s boljim postojećim ili nekim potpuno novim svojstvima u odnosu na pojedinačne materijale. Suprotno metalnim legurama, svaki materijal koji se koristi zadržava svoja kemijska, fizikalna i mehanička svojstva.

Kompoziti se sastoje od kontinuirane faze (matrica) koja može biti na osnovi polimera, metala ili keramike i diskontinuirane faze (punilo/ojačavalo) u obliku vlakana ili tkanine te čestica. Važno je naglasiti da neki materijal može biti kompozit samo ako ima jasno izraženu granicu faza koja može biti mikroskopski ili makroskopski vidljiva.

Izmjenom udjela punila moguće je sustavno mijenjati određena svojstva kompozitnog materijala kako bi se postigla vrijednost usporediva sa svojstvima drugih materijala. Nadalje, izmjenom dimenzija faza mogu se ostvariti potpuno nova svojstva, primjerice, smanjenjem veličine faznih područja moguće je dobiti žilave kompozite iz prvotno krutih materijala. Matrica, iako je kontinuirana faza koja okružuje odvojene čestice ili vlakna punila, ne mora nužno biti i osnovni materijal, odnosno ne mora imati većinski volumni udio niti pružati osnovna svojstva kompozitnom materijalu. U kompozitima ojačanim vlaknima, primjerice, vlakna zauzimaju veći dio volumena materijala i pridonose njegovim dobrim mehaničkim svojstvima, dok matrica uglavnom povezuje vlakna te prenosi i raspodjeljuje opterećenje među njima.

Vlakna mogu biti različitih vrsta, uključujući staklena vlakna, karbonska vlakna, aramidna vlakna (Kevlar), polietilenska (Spectra), keramička, ugljična, metalna ili biljna vlakna. Danas prevladavaju staklena i ugljična vlakna, a sve više se istraživanja usredotočuju na upotrebu biljnih vlakana u kompozitnim materijalima. [7,8]

2.2.1. Biokompoziti

Biokompoziti predstavljaju skupinu materijala u nastajanju s potencijalom da značajno smanje utjecaj proizvoda na okoliš tijekom cijelog životnog vijeka u usporedbi s potpuno sintetskim kompozitima. [9]

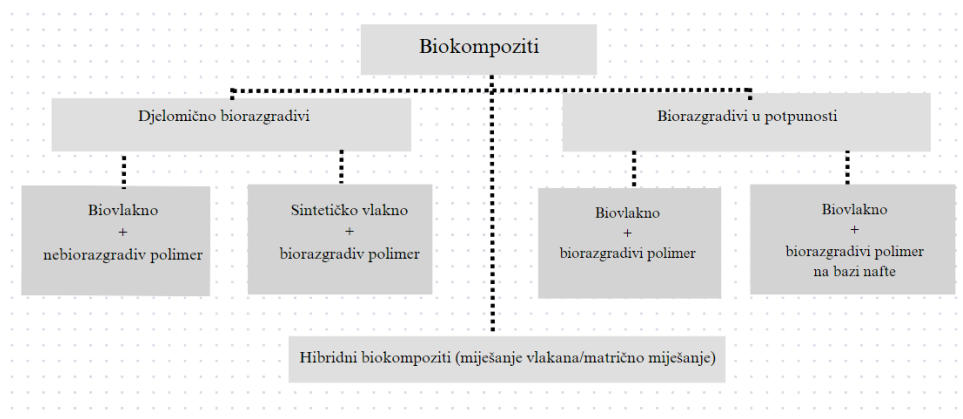
Biopolimernim kompozitima ili biokompozitima smatraju se kompoziti kod kojih je barem jedna komponenta na biološkoj osnovi ili biorazgradljiva. Biokompozitni sustavi se na osnovi matrice i vlakana mogu podijeliti na djelomično biorazgradljive i potpuno biorazgradljive biokompozite (slika 2). U potpuno biorazgradljivim biokompozitima koriste se biovlakna s matricom od biorazgradljivih polimera kao što su obnovljive biopolimerne matrice (npr. celulozna plastika, sojina plastika, škrobna plastika) ili biorazgradljive polimerne matrice na osnovi nafte (npr. alifatski kopoliesteri, poliesteramidi). Međutim, u djelomično biorazgradljivim biokompozitima, matrice na biološkoj osnovi ojačane su sintetskim vlaknima,

ili su matrice od nerazgradljivih polimera kao što su tradicionalni termoplastični polimeri (npr. polipropilen, polietilen) i termoreaktivni polimeri (npr. epoksi, poliester) ojačane biovlaknima.

Vrijeme ili djelovanje razgradnje ovisi o mnogim čimbenicima, uključujući okoliš, temperaturu i mikroorganizme te se određuje standardnim testovima razgradnje. Prethodno navedena podjela ne procjenjuje vrijeme ili djelovanje razgradnje, nego ako su i vlakna i matrica 100% biorazgradljivi materijali, kompozit će se na kraju svog životnog vijeka razgraditi i potpuno vratiti u prirodni okoliš. [10]

S obzirom na nove propise o zaštiti okoliša, kao i na društvenu zabrinutost, pobornici biokompozita ističu važnost korištenja tih materijala zbog unapređenja zdravlja i sigurnosti u proizvodnji, upravo zato što su ti materijali ujedno i lakši, a i ekološki su prihvatljiviji. Unatoč mnogim prednostima, biokompoziti također imaju određene nedostatke, kao što su hidrofilna priroda, slaba dimenzijska stabilnost te niska otpornost na toplinu i gorenje. [11]

Klasifikacija biokompozita prikazana je na slici 2.



Slika 2. Klasifikacija biokompozita [12]

2.2.2. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima

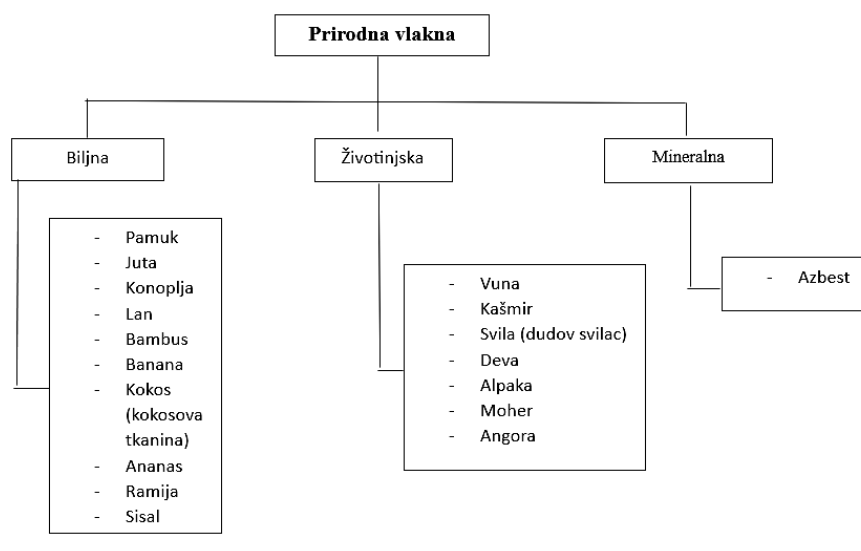
Vlaknima ojačani polimerni kompoziti na osnovi sintetskih vlakana kao što su staklena, kevlariska i karbonska vlakna značajno su se razvili u posljednjim desetljećima kako bi zadovoljili zahtjeve inženjerskih primjena. Međutim, dobro poznata ekološka svijest u smjeru postizanja održivosti proizvedenih dobara ukazala je na veliki potencijal u iscrpljujućim ekološki prihvatljivijim materijalima s fokusom na obnovljive sirovine u dizajnu proizvoda.

Jedan od načina koji najviše obećava smanjenje upotrebe sintetskih vlakana kao materijala za ojačanje i punila u pripravi polimernih kompozita je brzi rast u području polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima. Prirodna vlakna (kao što su konoplja, sisal, juta, kenaf, lan i dr.) koriste se kao ojačanje (punila) u matricama na osnovi polimera. S obzirom na vladin naglasak na novim ekološkim propisima i konceptima održivosti, kao i rastuću ekološku, društvenu i ekonomsku svijest te visoku cijenu naftnih resursa, poboljšana je optimalna uporaba prirodnih resursa. Kompoziti od prirodnih vlakana pokazali su se kao ekološki prihvatljiva alternativa polimernim kompozitima ojačanim staklom ili ugljikom. Konkretno, prirodna vlakna ne samo da smanjuju probleme s odlaganjem otpada, već također smanjuju onečišćenje okoliša. Prirodna vlakna imaju značajne prednosti u odnosu na tradicionalna staklena vlakna, što im omogućuje da se natječu u modernim industrijskim primjenama.

Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima imaju nekoliko prednosti u odnosu na kompozite ojačane sintetskim vlaknima, uključujući obnovljivost, manju abrazivnost opreme, biorazgradljivost, visoku specifičnu čvrstoću, nisku cijenu, nekorozivnu, bezopasnu prirodu i fleksibilnost proizvodnje. [13]

Nadalje, prirodna vlakna zahtijevaju minimalnu količinu energije tijekom proizvodnje, a zbog visoke kalorijske vrijednosti koju posjeduju, moguće ih je spaliti nakon završetka njihovog životnog ciklusa kako bi se obnovila energija. Sva vlakna biljnog podrijetla apsorbiraju CO₂ tijekom uzgoja, pa ih se može smatrati CO₂ neutralnima, budući da se na kraju njihovog vijeka mogu spaliti bez dodatnog ispuštanja CO₂ u atmosferu. [14] S druge strane, staklena vlakna nisu CO₂-neutralna te zahtijevaju izgaranje fosilnih goriva kako bi se dobila energija za proizvodnju. Sagorijevanje proizvoda na temelju fosilnih goriva rezultira ispuštanjem velikih količina CO₂ u atmosferu, što je glavni uzrok efekta staklenika i trenutnih klimatskih promjena. [15]

Prirodna vlakna mogu se podijeliti u dvije glavne skupine: biljna i životinjska vlakna, a njihova detaljnija klasifikacija prikazana je na slici 3.



Slika 3. Klasifikacija prirodnih vlakana [16]

2.3. Brnistra

Posljednjih desetak godina pronalaze se optimalna rješenja koja bi zamijenila uobičajena sintetska vlakna, pri čemu se posebna pažnja posvećuje ekološkim aspektima, ekonomičnosti, obnovljivim izvorima te, po mogućnosti, lokalno dostupnim prirodnim polimerima. Upravo zbog toga se radi na ponovnom uvođenju nekih tradicionalnih vlakana, koja su gotovo zaboravljena, a vlakna brnistre su jedna od njih. [17]

2.3.1. Svojstva brnistre

Brnistra ili žuka (lat. *Spartium junceum*), grmolika je biljka, koja pripada porodici mahunarki (*Fabaceae*) (slika 4) te je jedina vrsta u rodu *Spartium*. S obzirom na to da pripada porodici mahunarki, simbiozom veže atmosferski dušik u korijen te na taj način obogaćuje tlo.

Brnistra raste u svim zemljama koje su okružene Sredozemnim morem, no pojavljuje se samo u obalnim područjima uz more i na otocima. Njeno prirodno stanište obuhvaća mediteransko područje južne Europe, jugozapadne Azije i sjeverozapadne Afrike. U području Sredozemlja, brnistra se nalazi na nadmorskoj visini od 1700 metara. U Sjedinjenim Američkim Državama i Novom Zelandu smatra se invazivnom vrstom, pa se poduzimaju mjere kako bi se iskorijenila i spriječila opasnost za autohtone biljke. [18,19]



Slika 4. Brnistra [20]

Radi se o biljci koja ima žute cvjetove promjera 1-2 cm te može narasti između 2 i 4 metra u visinu i oko 1,8 metara u širinu. Cvate u različitim dijelovima godine ovisno o geografskom položaju, pa tako u Europi cvjeta od lipnja do rujna, dok se razvoj plodova odvija od kolovoza do listopada.

Optimalno vrijeme za sadnju je u proljeće ili ljeto, kada su temperature povoljne i nakon što prođe posljednji mraz, na sunčanom i dobro dreniranom tlu jer ne podnosi hlad, uz osiguranje dovoljno prostora za njezin rast. Iako se koristi protiv erozije, ona je u nekim područjima invazivna zbog svoje sposobnosti brze reprodukcije, koja često dovodi do gušenja drugih biljaka u njejoj prisutnosti te se onda preporučuje njena sadnja s minimalnom međusobnom udaljenosti od 50 cm kako bi se ograničila njena širenja. Iako podnosi temperature niže od 15 °C, ne tolerira ekstremno niske temperature ispod -10 °C. Tijekom vegetacijskog razdoblja, preporučuje se rezanje biljke do razine tla kako bi se osiguralo preživljavanje zimskih temperatura i hladnih oscilacija. Kako bi se spriječilo oštećenje korijenskog sustava, preporučuje se zaštita biljke slojem malča. [18,19]

2.3.2. Vlakna brnistre

Uspješna proizvodnja vlakana brnistre poznata je već dugi niz godina, međutim, unatoč svojstvima poput biorazgradljivosti i mehaničke čvrstoće, primjena im je bila ograničena zbog niske učinkovitosti postupka ekstrakcije. [21]

Optimalno vrijeme za rezanje izdanaka brnistre je kada se osušene mahune spiralno uvijaju i izgube sjeme. Njeni izbojci imaju oblik zelenih grana (slika 5). Količina vlakana u mladicama varira između 8 % i 12 % u odnosu na masu grana. Zelene izdanke treba rezati neposredno uz glavnu stabljiku, a zatim ih vezati u snopove čiji su vrhovi odrezani na istu duljinu. Kortikalna vlakna sastoje se od nekoliko elementarnih vlakana spojenih u snopove, a elementarna vlakna dobivaju se djelomičnim uklanjanjem veziva (lignina i pektina). [18]



Slika 5. Brnistra [18]

Postoje mehaničke, kemijske i biološke metode uklanjanja vezivnog materijala. Ručno odvajanje vlakana od grana je zahtjevno, što je ključni razlog zbog kojeg se brnistra više ne koristi kao sirovina u tekstilnoj industriji. [18]

Glavni kemijski sastav vlakna brnistre su celuloza, hemiceluloza, lignin, pektin, voskovi i druge komponente u manjim količinama te sastav uvelike ovisi o metodi uklanjanja vezivnog materijala. Sadržaj vlakna nakon fizikalno-kemijske ekstrakcije i mehaničke obrade prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Sastav ekstrahiranih vlakana brnistre fizikalno-kemijskim i mehaničkim postupkom [17]

Komponenta	Fizikalno – kemijski proces	Mehanički proces
Celuloza	$91,7 \pm 0,1$	$66,9 \pm 0,1$
Pentozan	$4,1 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,3$
Lignin	$3,2 \pm 0,4$	$11,7 \pm 0,2$
Pektin	0	$12 \pm 0,2$
Voskovi	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,1$
Pepeo	0	$1,2 \pm 0,1$

Visok sadržaj celuloze povećava čvrstoću vlakna te se ona mogu koristiti u razvoju proizvoda koji zahtijevaju veliku vlačnu čvrstoću, dok je visok sadržaj lignina potreban ukoliko se želi proizvesti proizvod kojeg treba zaštititi od napada bakterija ili gljivica. [21]

2.3.3. Primjena brnistre i vlakana brnistre

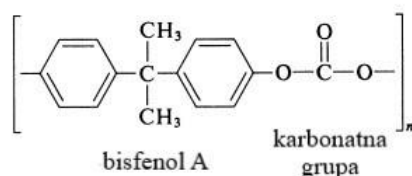
U prošlosti je brnistra imala veliku ulogu u tekstilnoj industriji, posebice za siromašnije stanovništvo gdje se koristila u izradi odjeće i obuće te za izradu grubog platna namijenjenog prekrivačima. Osim u tekstilnoj industriji, veliku primjenu imala je i u svakodnevnom životu, pa su se tako njezine mladice koristile za vezanje vinograda i voćnjaka, izrađivale su se ograde, plele razne košare i boce, a od vlakana brnistre također su se izrađivali konopci za vezanje stoke i užad za brodove te za izradu metli. S obzirom na to da suhe grančice brnistre lako planu, koristile su se i za potpaljivanje vatre.

Nadalje, brnistra se koristila i kao ljekovita biljka (diuretička svojstva, probavne tegobe, topička primjena itd.) te se od njenih cvijetova izrađivala mirisna vodica. [22]

Zbog niske učinkovitosti postupka ekstrakcije i cijene postupka, a i same industrijalizacije koja se ubrzala nakon Drugog svjetskog rata, čovjek se sve više udaljavao od prirode, pa je tako i prestala široka primjena brnistre. Međutim, nakon duge pauze, brnistra ponovno postaje zanimljiva kao prirodno, održivo i obnovljivo vlakno za tekstilnu i primjenu u mnogim granama industrije te se posebice proučava njena primjena u automobilske industriji. [23, 24]

2.4. Polikarbonat (PC)

Polikarbonati predstavljaju skupinu termoplastičnih polimera koji u svojoj kemijskoj strukturi sadrže karbonatnu skupinu ($-\text{O}-(\text{C}=\text{O})-\text{O}-$) (slika 6). Odnosno, oni predstavljaju poliestere ugljične kiseline i dihidroksi spojeva. [25,26]



Slika 6. Struktura polikarbonata [27]

2.4.1. Proizvodnja polikarbonata

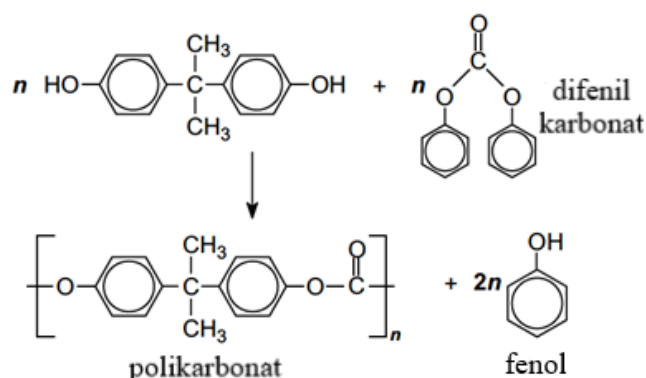
Najčešće se koriste polikarbonati dobiveni kondenzacijskom polimerizacijom između bisfenola A i karbonil klorida ili difenil karbonata.

Bisfenol A nastaje kondenzacijom fenola s propanonom, dok se karbonil klorid proizvodi iz ugljikovog monoksida i klora. Difenil karbonat se proizvodi iz dimetil karbonata, koji se često proizvodi od metanola, kisika i ugljikovog monoksida u tekućoj fazi u prisutnosti bakrene soli kao što je bakrov (II) klorid.

Polikarbonat obično nastaje reakcijom bisfenola A i karbonil klorida u bazičnoj otopini na način da se pripravi otopina bisfenola A u natrijevom hidroksidu (tj. otopina natrijeve soli fenola), koja se potom pomiješa s otopinom karbonil klorida u organskom otapalu (diklormetan). Sama polimerizacija odvija se na granici između vodenog i organskog sloja uz pomoć katalizatora (amina). Polikarbonat se drži u otopini u organskom sloju, a dobivena otopina se zatim izdvaja iz vodenog sloja ili ispari da se formiraju granule polimera ili se doda etanol kako bi se istaložio kruti polimer.

Međutim, kako je karbonil klorid izuzetno otrovan plin, sve veći udio polikarbonata proizvodi se iz difenil karbonata (slika 7) na način da se bisfenol A i ester zajedno zagrijevaju kako bi formirali rastaljenu masu polimera. Potom se fenol i višak reaktanata uklanjaju destilacijom

pod sniženim tlakom, a talina polikarbonata se zatim preša kroz fine mlaznice kako bi se oblikovale dugačke niti poput špageta, koje se hlade i granuliraju.



Slika 5. Dobivanje polikarbonata iz difenil karbonata [28]

2.4.2. Svojstva polikarbonata

Polikarbonat ima amorfnu strukturu, higroskopan je i kompatibilan s mnogim mineralnim kiselinama, alkoholima, blagim sapunima, naftnim uljima (ali ne i nekim uljnim aditivima), silikonskim uljima i mastima te lužinama u malim koncentracijama. Međutim, većina aromatskih i halogeniranih otapala poput toluena, benzena, benzina i acetone mogu uzrokovati izbjeljivanje površine i kristalizaciju materijala. Stoga treba izbjegavati kontakt PC-a s navedenim otapalima. Isto vrijedi i za otapala kao što su metil etil keton i klorovodična kiselina, čija uporaba može dovesti do pucanja materijala uslijed naprezanja. Općenito, kemijska otpornost PC-a uvelike ovisi o vremenu izloženosti, temperaturi, vrsti kemikalija, njihovoj koncentraciji i razini opterećenja na materijal. Polikarbonat se često kombinira s poliestrom kako bi se poboljšala otpornost na kemikalije i toplinu. Osim toga, miješa se s ABS-om za poboljšanje žilavosti. Nadalje, karakterizira ga prozirnost, toplinska otpornost do 120 °C, otpornost na UV zračenje (iako s vremenom žuti), električna otpornost i čvrstoća. PC se može bojati i sporo gori. [25, 26]

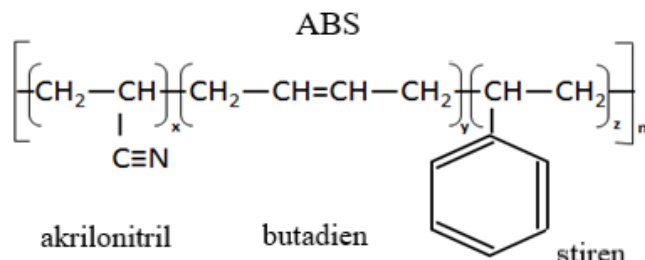
2.4.3. Primjena polikarbonata

Zbog prethodno navedenih svojstava, PC nalazi svoju primjenu u području medicine za proizvodnju medicinskih uređaja. Zbog svoje transparentnosti koristi se u proizvodima poput blendera i procesora hrane, posuđa za piće, bočica za dojenje, kućišta filtera za vodu, spremnika za vodu itd. Nadalje, koristi se u mnogim električnim i elektroničkim uređajima, uključujući kućišta, konektore, kutije za baterije, optičke medije, pametne telefone itd., a značajna upotreba PC-a je i u proizvodnji kompaktnih diskova, DVD-ova i Blu-ray diskova.

Osim u navedenim područjima, PC se koristi i u automobilske industriji za proizvodnju leća za prednja svjetla, za nadzorne ploče i unutarnje obloge, kao i za vanjske dijelove (branici, panele karoserije). [25, 29]

2.5. Akrilonitril butadien stiren (ABS)

Akrilonitril butadien stiren (ABS) također spada u skupinu amorfni termoplastičnih polimera, a sastoji se od monomera akrilonitrila, butadiena te stirena (slika 8). [3]

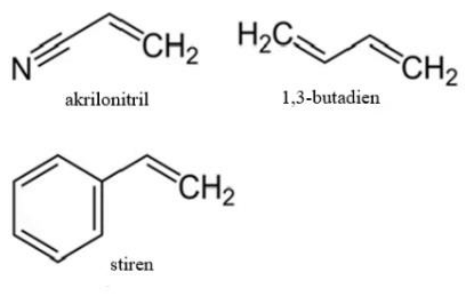


Slika 8. Struktura akrilonitril butadien stirena (ABS) [30]

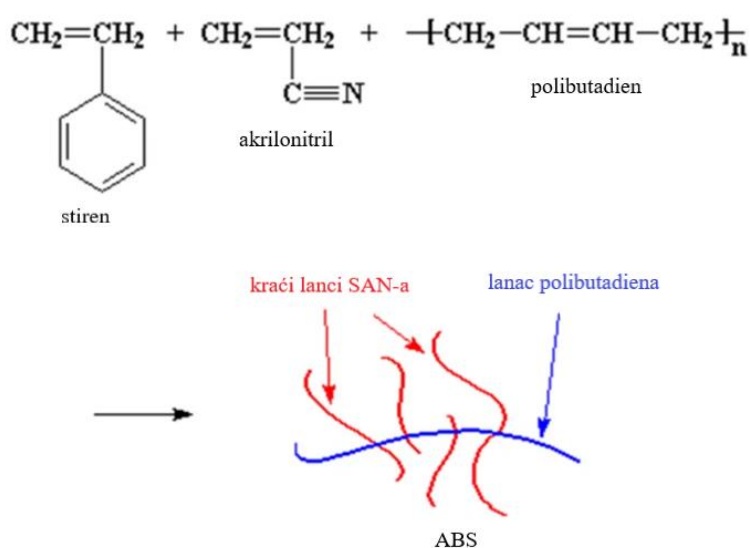
2.5.1. Dobivanje ABS-a

ABS predstavlja terpolimer koji se dobiva reakcijom polimerizacije stirena i akrilonitrila u prisutnosti polibutadiena. Udjeli spomenutih monomera (slika 9) mogu se kretati od 15 do 35 % akrilonitrila, 5 do 30 % butadiena te 40 do 60 % stirena. Reakcijom se dobiva dugačak lanac polibutadiena s kraćim lancima stiren – akrilonitrilnog kopolimera (slika 10). Ono što je još

važno naglasiti jest da stirenakrilonitril (SAN) predstavlja kontinuiranu matricu, dok se druga faza sastoji od dispergiranih čestica butadiena koje imaju sloj SAN-a na površini. Matrica SAN-a čini dvije navedene faze kompatibilnima. [31,32]



Slika 9. Monomeri od kojih se sastoji akrilonitril butadien stiren [31]



Slika 10. Dobivanje akrilonitril butadien stirena [31]

2.5.2. Svojstva ABS-a

Akrilonitril butadien stiren ima izvrsna mehanička svojstva te ga je pogodno koristiti na temperaturama od -20 do 80 °C. Prirodno je čvrst i krut, ali opet dovoljno fleksibilan da se može lako obraditi, a da pritom ostane mehanički čvrst i stabilan tijekom dužeg vremenskog perioda. Nudi dobru otpornost na udarce čak i pri niskim temperaturama, dobra izolacijska

svojstva i dobru otpornost na habanje i istezanje. Osim toga, dobro podnosi razrijeđene kiseline i lužine. Sa stajališta dizajna, dijelovi izrađeni od ABS-a lako se boje i lijepo te imaju izvrsnu završnu obradu površine. Unatoč mnogim izvrsnim svojstvima, ABS ima i svojih nedostataka. Iako ima visoku otpornost na habanje i udarce, ABS je slabo otporan na vremenske uvjete i otapala. Također, ABS je sklon pucanju uslijed naprezanja kada dođe u kontakt s određenim mastima te njegovo starenje uvelike ovisi o količini butadiena. Ono što je potrebno napomenuti jest da su udjeli akrilonitrila, butadiena i stirena zajedno s uvjetima prerade važni u određivanju krajnjih svojstava ABS-a. Shodno tome, razlikujemo dvije glavne vrste materijala, a to su ABS za ekstruziju te ABS za injekcijsko prešanje, odnosno ABS s visokom i srednjom otpornošću na udar. Stiren pruža sjajnu i nepropusnu površinu, dok polibutadien (kaučuk) omogućuje elastičnost čak i pri niskim temperaturama. Nadalje, oblikovanjem pri visokim temperaturama poboljšavaju se sjaj i toplinska postojanost, dok se lijevanjem pri niskim temperaturama postiže velika čvrstoća i otpornost na udar. Zaključno, određena svojstva moguće je modificirati ojačavanjem vlaknima i punilima. [3, 32]

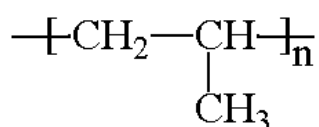
2.5.3. Primjena ABS-a

Zbog svojih svojstava, ABS se primjenjuje u vanjskoj upotrebi, jer može izdržati različite vremenske uvjete, pa tako ima i široku primjenu u građevinskoj industriji za proizvodnju cijevi. Također se koristi u proizvodnji komponenti računalnih tipkovnica, LEGO kocki i dječjih igrački, a koristi se i za izradu plastičnih štitnika za lice, kaciga, za zidne utičnice i za zaštitu kućišta električnih alata. Nadalje, koristi se za izradu pisača, usisavača, kuhinjskog pribora, faksova, glazbenih instrumenata (flaute i plastični klarineti). S obzirom na relativno niske troškove proizvodnje, ABS se često koristi za ekonomičnu proizvodnju prototipova i plastičnih modela. Široku primjenu ABS pronalazi i u automobilskoj industriji gdje se često koristi kao zamjena za metal u cilju smanjenja težine automobila. Obično se koristi za dijelove koji uključuju komponente nadzorne ploče, naslone sjedala, komponente sigurnosnih pojaseva, ručke, obloge vrata, obloge stupova i ploče s instrumentima. U novije vrijeme, ABS ima ključnu ulogu u 3D ispisima, gdje se lako oblikuje u željeni oblik. [33, 34]

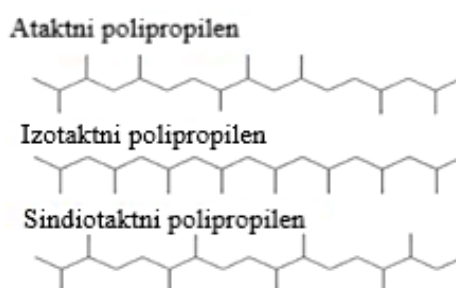
2.6. Polipropilen (PP)

Polipropilen je linearni termoplastični polimer koji se sastoji od ponavljajućih jedinica $\text{CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-}$, odnosno promatrajući strukturu, polipropilen je vinilni polimer sličan polietilenu, ali se razlikuje po tome što na svakom drugom atomu u osnovnom lancu ima vezanu metilnu skupinu (slika 11). [26]

Prema orijentaciji metilnih skupina razlikujemo izotaktnu, ataktnu te sindiotaktnu strukturu. U slučaju izotaktne strukture, sve metilne skupine nalaze se na istoj strani lanca, kod ataktne strukture su poredane slučajno, a kod sindiotaktne su metilne skupine pravilno naizmjenično poredane (slika 12).



Slika 11. Struktura polipropilena [35]

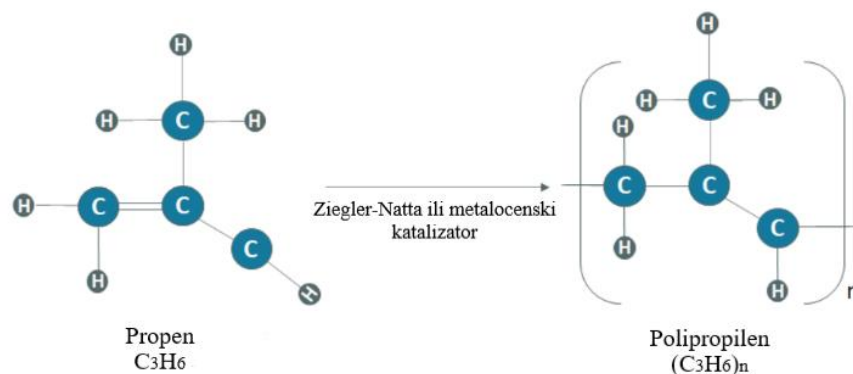


Slika 12. Podjela polipropilena prema orijentaciji metilnih skupina [36]

2.6.1. Proizvodnja polipropilena

Polipropilen se dobiva koordinativnom polimerizacijom iz monomera propilena, odnosno propena obično uz Ziegler – Natta ili metalocenski katalizator (slika 13). Parametri polimerizacije, uključujući temperaturu, tlak i koncentracije reaktanata, određuju se prema željenoj vrsti polimera. Propilen namijenjen polimerizaciji mora biti iznimno čist, a posebno je važno da ne sadržava vodu, kisik, spojeve sumpora, diene, acetilen i slične tvari. Naime,

prisutnost navedenih supstanci može djelovati kao snažni katalitički otrov i negativno utjecati na proces polimerizacije. Proces poput radikalske i anionske polimerizacije ne daju rezultate, dok se kationskom polimerizacijom dobivaju niskomolekulska ulja. [36,37]



Slika 13. Dobivanje polipropilena [38]

2.6.2. Svojstva polipropilena

Struktura polipropilena može biti kristalinična ili amorfna, ovisno o uvjetima hlađenja i polimerizacije tijekom proizvodnje. Ako se polipropilen hladi polako, molekule imaju vremena organizirati se u redovite kristalne strukture, rezultirajući kristaliničnim polipropilenom. S druge strane, brzo hlađenje može rezultirati amorfnom strukturom, gdje molekule nemaju dovoljno vremena za formiranje kristala.

Polipropilen je jedan od najlakših materijala ($\rho=0,90-0,91 \text{ g cm}^{-3}$), koji ima izvrsnu otpornost na razrijeđene i koncentrirane kiseline, alkohole i lužine, dobru otpornost na aldehide, estere, alifatske ugljikovodike, ketone te ograničenu otpornost na aromatske i halogene ugljikovodike i oksidirajuća sredstva. PP zadržava mehanička i električna svojstva na povišenim temperaturama, a to se događa u vlažnim uvjetima i kada je uronjen u vodu, radi se o plastici koja je otporna na vodu. Nadalje, PP je vrlo zapaljiv te osjetljiv na napade mikroba, poput bakterija i plijesni. [26,38]

2.6.3. Primjena polipropilena

S obzirom na to da PP karakterizira visoka otpornost na kemijsku koroziju, to ga čini odličnim izborom za pakiranje sredstva za čišćenje, izbjeljivača te proizvoda prve pomoći. Također se koristi za proizvodnju ambalaže, uključujući vrećice, folije, kutije i boce zbog svoje lakoće, fleksibilnosti i otpornosti na vlagu. Vlakna od polipropilena koriste se u tekstilnoj industriji za proizvodnju raznih proizvoda kao što su vreće, podnice, tepisi i odjeća. S obzirom na to da je netoksičan i sterilan koristi se u proizvodnji medicinske opreme, uključujući epruvete, posude za skladištenje i jednokratne instrumente. Koristi se i u elektroničkoj industriji za proizvodnju dijelova poput kondenzatora zbog svoje električne izolacije i otpornosti na visoke temperature.

U automobilskoj industriji, polipropilen se koristi za proizvodnju dijelova unutrašnjosti vozila, poput panela, obloga vrata i sjedala. Osim toga, koristi se i za proizvodnju dijelova poput branika zbog svoje lakoće i otpornosti na udarce. [39]

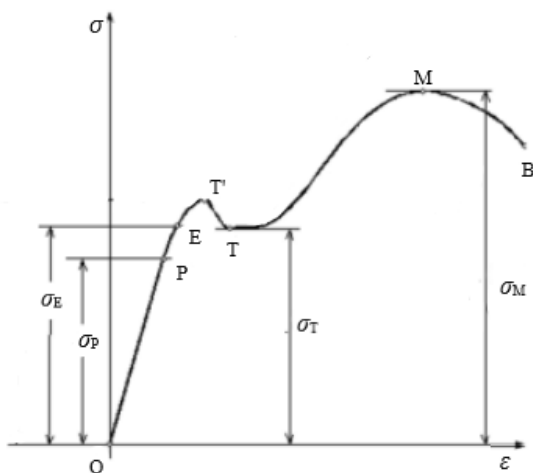
2.7. Mehanička svojstva polimera

Polimeri su viskoelastični materijali, a viskoelastičnost predstavlja kombinaciju dvaju osnovnih svojstava materijala: elastičnosti i viskoznosti. Polimeri su elastični jer mogu zadržati svoj oblik nakon što se primijeni određena sila ili naprezanje. Kada se sila ukloni, polimeri imaju tendenciju vratiti se u svoj izvorni oblik. To je zbog njihove molekularne strukture koja im omogućuje fleksibilnost i deformaciju pod utjecajem sile. S druge strane, polimeri također posjeduju viskoznost. To znači da imaju tendenciju protjecanja ili deformiranja tijekom vremena pod utjecajem sile, slično kao viskozne tekućine. Ova viskoznost rezultat je unutarnjeg trenja između molekula u polimeru. [40]

2.7.1. Naprezanje – deformacija

Mehanička svojstava određuju se pomoću univerzalne mehaničke kladalice. Ispitni uzorci, bilo da su cilindrične ili plosnate epruvete, izlažu se stalnom vlačnom opterećenju sve do trenutka kada dođe do loma. Kroz proces rastezanja uzorka dobiva se dijagram loma vlačne sile (F) prema produženju (Δl), na temelju kojeg se konstruira dijagram naprezanje-istezanje, odnosno σ - ϵ dijagram (slika 14). Može se primjetiti kako su u navedenom dijagramu prisutna različita

područja. Područje krivulje od ishodišta (O) do točke P predstavlja područje proporcionalnosti naprežanja i deformacije. Ovo područje slijedi Hookeov zakon, gdje je naprežanje (σ) proporcionalno deformaciji (ε), te je ta proporcionalnost opisana izrazom $\sigma = E\varepsilon$, gdje je E konstanta proporcionalnosti poznata kao Youngov modul ili modul elastičnosti. Točka P označava granicu proporcionalnosti, dok točka E predstavlja granicu elastičnosti. Do točke E deformacija je elastična, odnosno nakon prestanka djelovanja sile epruveta ima sposobnost vratiti se u prvobitan oblik, odnosno stanje. Nakon točke E dolazi do trajne ili plastične deformacije i epruveta se više ne može vratiti u prvobitan oblik već poprima novi. S porastom produljenja, Δl , do točke T', povećava se i sila, F , te se u toj točki pojavljuje "vrat" na epruveti. Od točke T' nadalje, deformacija se odvija bez dodatnog povećanja opterećenja sve do točke T. U točki T, sila raste s porastom produljenja sve do točke M. Nakon točke M, nastavlja se povećavati produljenje, ali sila opada. Konačno, u točki B dolazi do loma epruvete, što istovremeno predstavlja i prekidno istezanje.



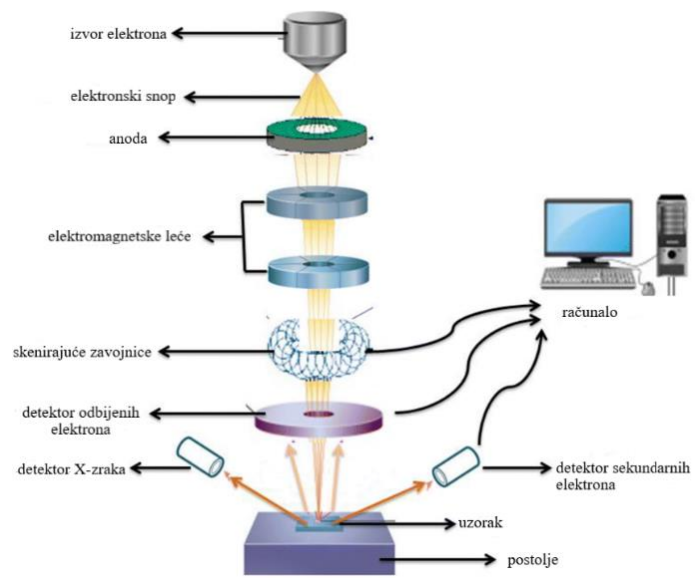
Slika 14. Grafički prikaz ovisnosti naprežanja (σ) o istezanju (ε) [41]

2.8. Morfološka svojstva

2.8.1. Pretražna elektronska mikroskopija (SEM)

Pretražna elektronska mikroskopija (SEM) je tehnika koja omogućuje dobivanje vrlo detaljnih slika površine uzoraka korištenjem snopa elektrona, umjesto svjetlosnih zraka kao kod optičkih mikroskopa. SEM je posebno koristan za proučavanje površinske topografije, morfologije i kemijskog sastava uzoraka na mikrometarskoj i nanometarskoj skali.

Ova tehnika temelji se na korištenju uskog snopa visokoenergetskih elektrona koji se emitiraju iz elektronskog pištolja (obično se koristi volframova ili LaB6 katoda). Taj snop elektrona ubrzava se na visoki napon (obično između 1 kV i 30 kV) te prolazi kroz niz elektromagnetskih leća koje ga fokusiraju na površinu uzorka (slika 15). Kada elektroni iz snopa udare u uzorak, dolazi do interakcije s atomima unutar materijala, pri čemu nastaju različiti signali. Sekundarni elektroni, koji se proizvode kada primarni elektroni iz snopa izbijaju niskoenergetske elektrone iz atoma na površini uzorka, koriste se za formiranje slike površinske topografije jer precizno prikazuju sitne detalje. Odbijeni (reflektirani) elektroni, s druge strane, daju informacije o sastavu materijala jer materijali s višim atomskim brojem reflektiraju više elektrona i na slici se prikazuju svjetlijima. Također, kada primarni elektroni iz snopa izbijaju unutarnje elektrone iz atoma, elektron iz više energetske ljuske može zauzeti njegovo mjesto, emitirajući X-zraku karakterističnu za taj element. Ovaj signal koristi se za energetski disperzivnu spektroskopiju (EDS), koja omogućuje kemijsku analizu uzorka. Ovisno o vrsti uzorka, SEM može proizvesti i druge vrste signala, uključujući fotone, toplinsku energiju, i akustične valove. Dobiveni signali detektiraju se i pretvaraju u sliku koja prikazuje morfologiju površine uzorka s velikom razinom detalja, čime SEM postaje ključan alat za proučavanje mikroskopske topografije i sastava materijala. [42]



Slika 15. Princip rada SEM-a [43]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Materijali

Polimeri korišteni u radu su polikarbonat (PC), akrilonitril butadien stiren (ABS), polipropilen (PP) te kao ojačavalo vlakna brnistre s masenim udjelima 0, 5, 10, 15 i 20 mas. % (tablica 2).

Tablica 2. Korišteni materijali

Materijal	Kratica	Proizvođač
polikarbonat	PC	Bayer PC Makrolon PMC 00039611 N/323892 318K
akrilonitril butadien stiren	ABS	LG Chem XR401-9001 D2122347-03
polipropilen	PP	Borealis Daplen EG107HP-9590
vlakna brnistre	BRN	Dobivena od TTF-a

Za pripravu termoplastični polimer/vlakna brnistre kompozita upotrijebljena je Brabender gnjetilica (slika 16) i hidraulična preša Fortune Holland (slika 17).

3.1.2. Priprava PC/BRN, ABS/BRN te PP/BRN kompozita

Prvi korak u pripremi termoplastični polimer/vlakna brnistre kompozita jest priprema samih vlakana koja započinje čišćenjem, odnosno odvajanjem pojedinačnih vlakana od drvenastih dijelova biljke. Nakon toga škarama su vlakna izrezana na kraća vlakna.

PC, ABS, PP i vlakna brnistre potom su vagana na način da je ukupna masa iznosila 40 g. Sastav pripremljenih kompozita prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Sastav PC/BRN, ABS/BRN te PP/BRN kompozita pripremljenih u Brabender gnjetilici

UZORAK	m (PC ABS PP) (g)	m (BRN) (g)	w (PC ABS PP) (mas %)	w (BRN) (mas %)
PC ABS PP	40	0	100	0
PC ABS PP + BRN 5%	38	2	95	5
PC ABS PP + BRN 10%	36	4	90	10
PC ABS PP + BRN 15%	34	6	85	15
PC ABS PP + BRN 20%	32	8	80	20

Nakon vaganja u Brabender gnjetilici (slika 16) čija je radna temperatura postavljena na 190 °C za PP te na 200 °C za PC i ABS, prvo je dodan čisti polimer te se on miješao 2 minute na 30 o/min, a onda su dodana vlakna brnistre, nakon čega slijedi umiješavanje 5 minuta na 60 o/min. Nakon umješavanja, kompozit se pažljivo vadi pincetom i brzo prenosi na teflonsku podlogu na kojoj se razvlači što tanje. Ohlađeni kompozit potom se reže na manje komadiće koji dalje idu na proces prešanja da bi se dobio oblik pogodan za mehaničko i morfološko ispitivanje.



Slika 16. Brabender gnjetilica

Za prešanje je korištena hidraulična preša Fontune Holland (slika 17).



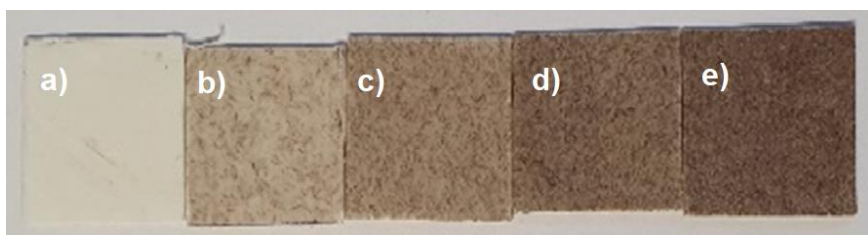
Slika 17. Hidraulična preša

Prije postavljanja uzoraka u prešu, potrebno je u metalni kalup, koji se nalazi na metalnoj ploči prekrivenoj teflonskom folijom, dimenzija 10 cm x 10 cm x 0,1 cm posložiti prethodno usitnjene komadiće kompozita i pritom pripaziti da je kalup u potpunosti popunjen (slika 18).

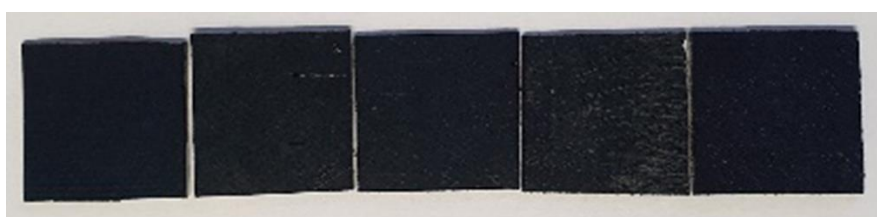


Slika 18. Postavljanje uzoraka u metalni kalup

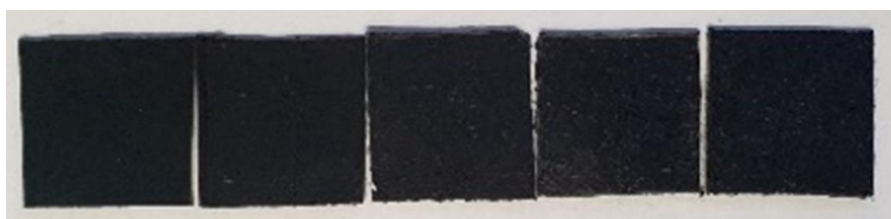
Potom se preko posloženih komadića kompozita stavlja teflonska folija zbog mogućnosti sljepljivanja s pločama preše i ponovno metalna ploča. Tako pripremljeni uzorci stavljaju se u prešu na 200 °C, gdje se prvo prešaju 5 minuta bez primjene sile, a zatim se 5 minuta izlažu pritisku. Nakon toga, grijanje se isključuje i pušta protok vode kako bi se postigla temperature 30 °C kontroliranim hlađenjem. Hlađenje na temperaturi 30 °C traje oko 45 minuta, a nakon hlađenja preša se otvara i uzorci se vade iz kalupa. Slike pripremljenih uzoraka prikazane su na slikama 19-21.



Slika 19. Pripremljeni uzorci a) čistog PC-a, b) PC/BRN5, c) PC/BRN10, d) PC/BRN15 i e) PC/BRN20



Slika 20. Uzorak čistog ABS-a te ABS/BRN kompozita (vizualno isti)



Slika 21. Uzorak čistog PP-a te PP/BRN kompozita (vizualno isti)

Mehanička svojstva dobivenih kompozita termoplastični polimer/vlakna brnistre ispitana su na mehaničkoj kitalici Zwick Roel Z020 (slika 22). Mjerilo se po pet uzoraka, a uzimali su se rezultati samo od onih koji nisu puknuli u čeljustima. Dimenzije uzoraka iznosile su 100 x 10 x 1 mm. Gornji i donji prihvat iznosi 2,5 cm tako da je mjerna duljina 5 cm. Brzina istezanja iznosila je 50 mm/min.



Slika 22. Mehanička kidalica Zwick Roel Z020

Morfološka svojstva dobivenih kompozita termoplastični polimer/vlakna brnistre ispitana su pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) (slika 23) u kojem je postolje bilo postavljeno pod kut od 55° , a napon je iznosio 1 kV.



Slika 23. Pretražni elektronski mikroskop (SEM)

4. REZULTATI I RASPRAVA

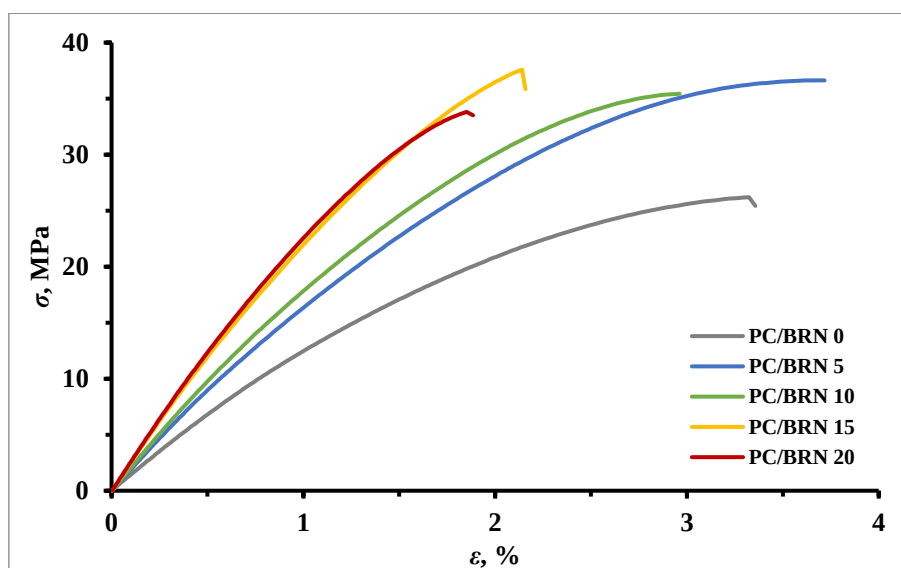
4.1. Mehanička svojstva

Na mehaničkoj kidalici određene su vrijednosti prekidne čvrstoće (σ_B) i prekidnog istezanja (ε_B), te Youngov modul (E), odnosno modul elastičnosti koji je izračunat u području od 0,5 do 0,25 % izduženja. Mjerenja su provedena pri uvjetima opisanima u poglavljima 3.1. te 3.1.2.

4.1.1. Mehanička svojstva PC/BRN kompozita

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čistog PC-a i PC/BRN kompozita s različitim udjelima vlakana brnistre prikazani su u tablici 4 te na slikama 24 i 25.

Na slici 24 prikazane su krivulje naprežanje - istezanje za čisti PC i PC/BRN kompozite. Iz dobivenih rezultata možemo uočiti da dodatkom vlakana brnistre do 15 mas. % PC postaje sve manje fleksibilan, a više krut i tvrd, dok dodatkom 20 mas. % vlakana brnistre naprežanje počinje opadati (tablica 4). Za niže udjele vlakana (5 mas. %), kompoziti imaju više elastično-plastično ponašanje, povećanjem udjela vlakana brnistre kompoziti postaju krhki, s manjim istezanjem prije loma.



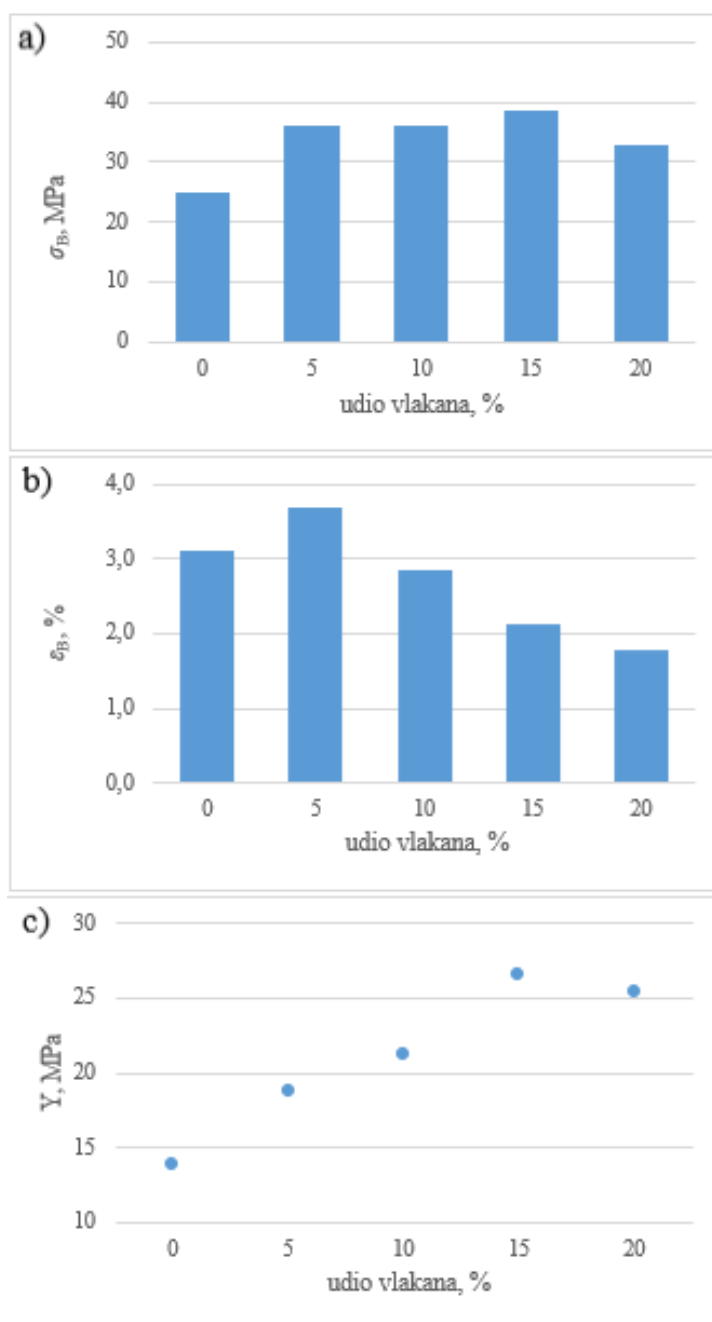
Slika 24. Grafički prikaz ovisnosti naprežanje - istezanje za čisti PC i PC/BRN kompozite s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %

Tablica 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čistog PC i PC/BRN kompozita s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %

Uzorak	Broj mjerenja	σ_B MPa	ε_B %	E MPa
PC	1	27,5280	3,8235	14,2591
	2	23,0723	2,4616	13,8416
	3	23,1217	2,7661	13,4794
	4	25,4163	3,3569	13,9830
	sr.vr.	24,8	3,1	13,9
PC/BRN 5	1	36,6103	3,7177	18,6519
	2	35,9532	3,5813	18,5032
	3	36,1163	3,7391	19,1219
	sr. vr.	36,2	3,7	18,8
PC/BRN 10	1	35,2057	2,7511	20,5726
	2	35,4316	2,9617	20,3611
	3	37,9978	2,8607	22,7971
	sr. vr.	36,2	2,9	21,2
PC/BRN 15	1	41,2376	2,3881	26,2833
	2	41,2683	2,1854	28,2300
	3	36,3791	1,7880	27,0488
	4	35,8369	2,1579	25,0089
	sr. vr.	38,7	2,1	26,6
PC/BRN 20	1	36,4599	2,0187	25,9820
	2	28,8776	1,4449	24,5469
	3	33,5191	1,8850	25,8160
	sr. vr.	33,0	1,8	25,5

S obzirom na rezultate prikazane u tablici 4 i slici 25 možemo primjetiti kako čisti PC ima najmanju vrijednost prekidne čvrstoće (24,8 MPa), povećanjem udjela vlakana prekidna čvrstoća raste, kod svih kompozita osim kod kompozita s udjelom 20 mas. % vlakana brnistre kod kojeg dolazi do smanjenja σ_B . Smanjenje prekidne čvrstoće pri visokom udjelu vlakana brnistre može se javiti uslijed aglomeracije vlakana. Ovaj rezultat može biti posljedica hidrofobnosti polimerne matrice i hidrofilnosti punila. S druge strane, poboljšanje prekidne čvrstoće kod manjeg udjela vlakana može biti posljedica bolje međufazne interakcije između vlakana brnistre i PC matrice što potvrđuju i morfološka mjerenja provedena SEM-om. Općenito, međufazne interakcije između vlakana i matrice imaju važnu ulogu za mehanička svojstva kompozita ojačanih vlaknima. Prekidno istezanje najveće je kod kompozita s udjelom vlakana brnistre od 5 mas. % (PC/BRN5 kompozit) u odnosu na čisti PC, a smanjuje se daljnjim porastom udjela vlakana što je i za očekivati zbog porasta čvrstoće kompozita.

Modul elastičnosti znatno raste porastom udjela vlakana brnistre u odnosu na čisti PC do udjela 20 mas. % vlakana. S obzirom na to da dodatkom vlakana dolazi i do povećanja modula elastičnosti, to također ukazuje na poboljšanje krutosti materijala.

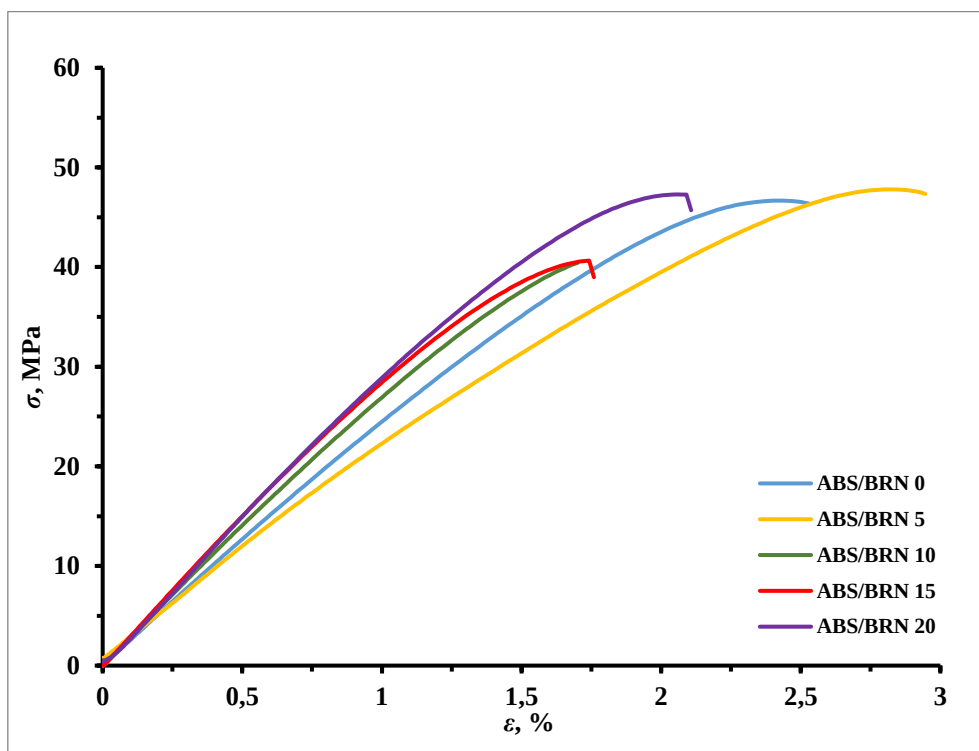


Slika 25. Grafički prikaz ovisnosti a) prekidne čvrstoće, b) prekidnog istezanja i c) modula elastičnosti o udjelu vlakana za čisti PC te PC/BRN kompozite

4.1.2. Mehanička svojstva ABS/BRN kompozita

U tablici 5 te na slikama 26 i 27 prikazani su rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čistog ABS-a i ABS/BRN kompozita s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %.

Na slici 26 prikazan je grafički prikaz ovisnosti naprezanje - istezanje za čisti ABS i ABS/BRN kompozite. Čisti ABS ima izraženu granicu popuštanja, nakon koje dolazi do hladnog razvlačenja, koja postaje sve manje izražena kako udio vlakana brnistre raste.



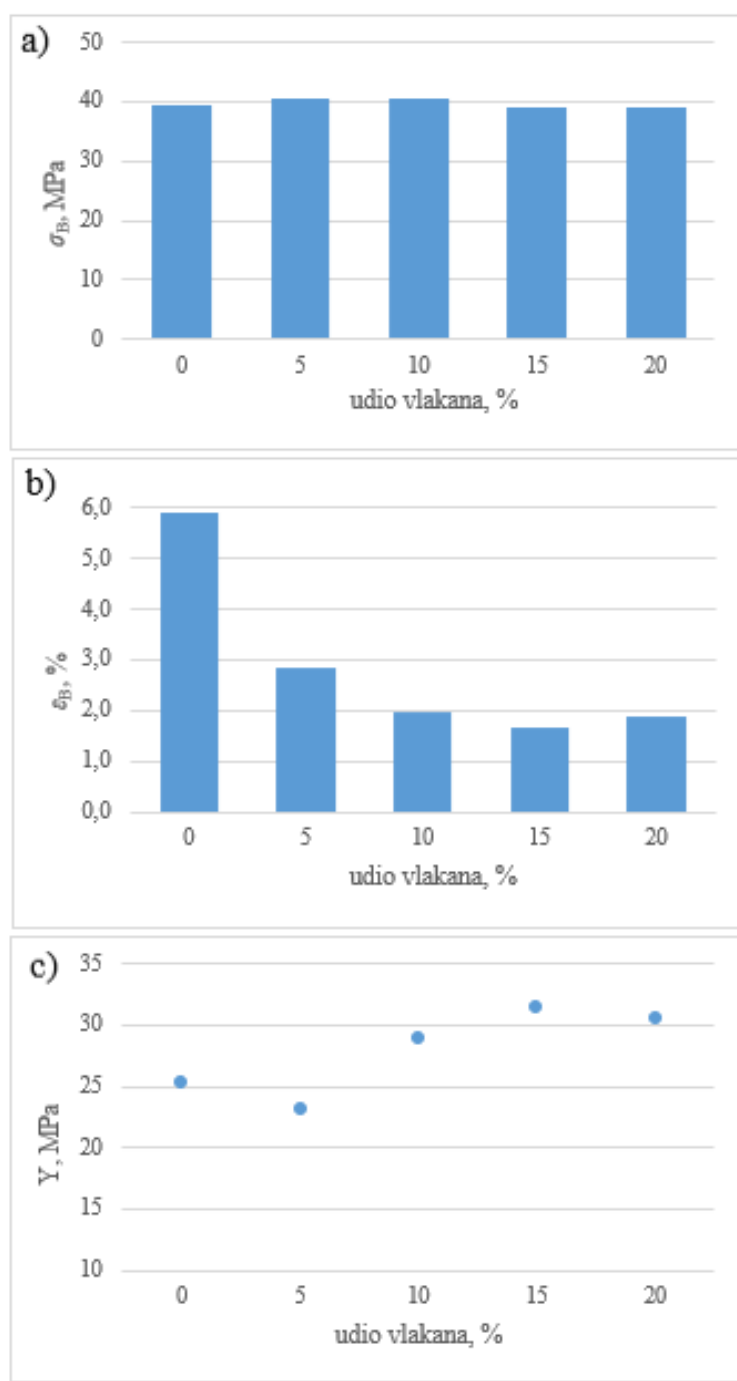
Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti naprezanje - istezanje za čisti ABS te ABS/BRN kompozite s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %

Tablica 5. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čistog ABS-a i ABS/BRN kompozita s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %

Uzorak	Broj mjerjenja	σ_B MPa	ϵ_B %	E MPa
ABS	1	40,7786	3,3272	25,7497
	2	38,4784	11,5825	25,8071
	3	31,7802	6,1036	24,1906
	4	46,3469	2,5331	25,7829
	sr. vr.	39,4	5,9	25,4
ABS/BRN 5	1	39,3597	1,8721	25,7122
	2	39,6782	3,7044	21,1005
	3	42,2596	2,9460	22,5221
	sr. vr.	40,4	2,8	23,1
ABS/BRN 10	1	40,7693	2,2679	29,3629
	2	40,1857	1,8986	28,1373
	3	40,4264	1,7012	29,0354
	sr. vr.	40,5	2,0	28,9
ABS/BRN 15	1	38,5280	1,4986	32,3740
	2	38,9984	1,7593	30,7388
	3	39,9567	1,7581	31,1169
	sr. vr.	39,2	1,7	31,4
ABS/BRN 20	1	39,7904	1,5802	33,1154
	2	38,4368	1,9383	28,4421
	3	39,0164	2,1076	30,0345
	sr. vr.	39,1	1,9	30,5

Iz tablice 5 i slike 27 vidljivo je da gotovo nema razlike u vrijednostima prekidne čvrstoće s porastom udjela vlakana brnistre u odnosu na čisti ABS. Ovo ponašanje može ukazivati na postojanje odgovarajućih interakcija između polimerne matrice i vlakana. Nadalje, vrijednosti prekidnog istezanja znatno opadaju povećanjem udjela vlakana u odnosu na čisti PC. U svojim istraživanjima Asim i suradnici dobili su iste rezultate i zaključili da se smanjenje prekidnog istezanja može pripisati gubitku elastičnosti kompozita dodatkom vlakana s obzirom da prirodna vlakna sadrže u svojoj strukturi celulozu i hemicelulozu koje imaju kristalnu strukturu. [44] Također smanjenje prekidnog istezanja može biti posljedica povećanja nehomogenosti polimerne matrice s povećanjem dispergirane faze (BRN). Općenito su prirodna vlakna i njihovi kompoziti ekološki prihvatljivi i obnovljivi. Međutim, mogu pokazivati nekompatibilnost s nekim polimernim matricama i imaju visoku apsorpciju vlage. Zbog visoke apsorpcije vlage, u kompozitima mogu nastati šupljine koje mogu smanjiti mehanička svojstva kompozita.

Slabe interakcije između polimerne matrice i vlakana mogu također utjecati na loša mehanička svojstva kompozita. [45] Modul elastičnosti raste kod svih kompozita osim kod kompozita s 5 mas. % vlakana. Porast vrijednosti modula elastičnosti ukazuje na porast krutosti materijala.

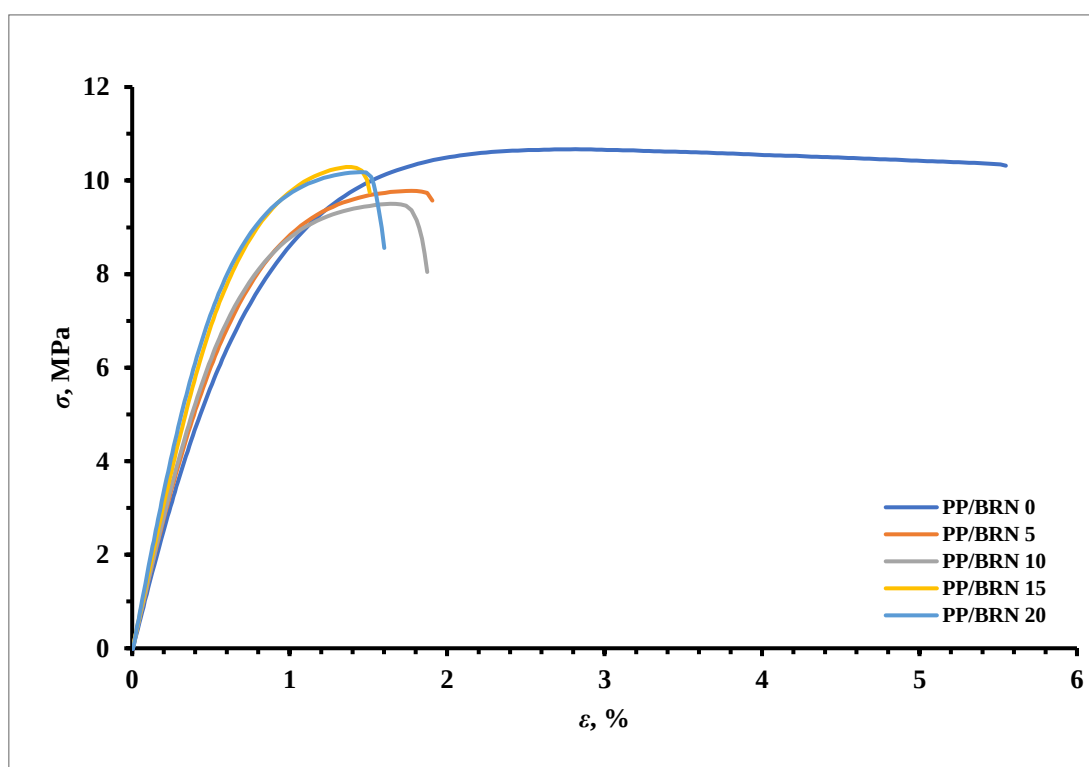


Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti a) prekidne čvrstoće, b) prekidnog istezanja te c) modula elastičnosti o udjelu vlakana za čisti ABS-a i ABS/BRN kompozite

4.1.3. Mehanička svojstva PP/BRN kompozita

U tablici 6 te na slikama 28 i 29 prikazani su rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čistog PP-a i PP/BRN kompozita s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %.

Na slici 28 dan je grafički prikaz ovisnosti naprezanje - istezanje za čisti PP i PP/BRN kompozite s različitim udjelom vlakana brnistre.



Slika 28. Grafički prikaz ovisnosti naprezanje - istezanje za čisti PP te PP/BRN kompozite s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %

Tablica 6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čistog PP i PP/BRN kompozita s udjelom vlakana brnistre 5, 10, 15 i 20 mas. %.

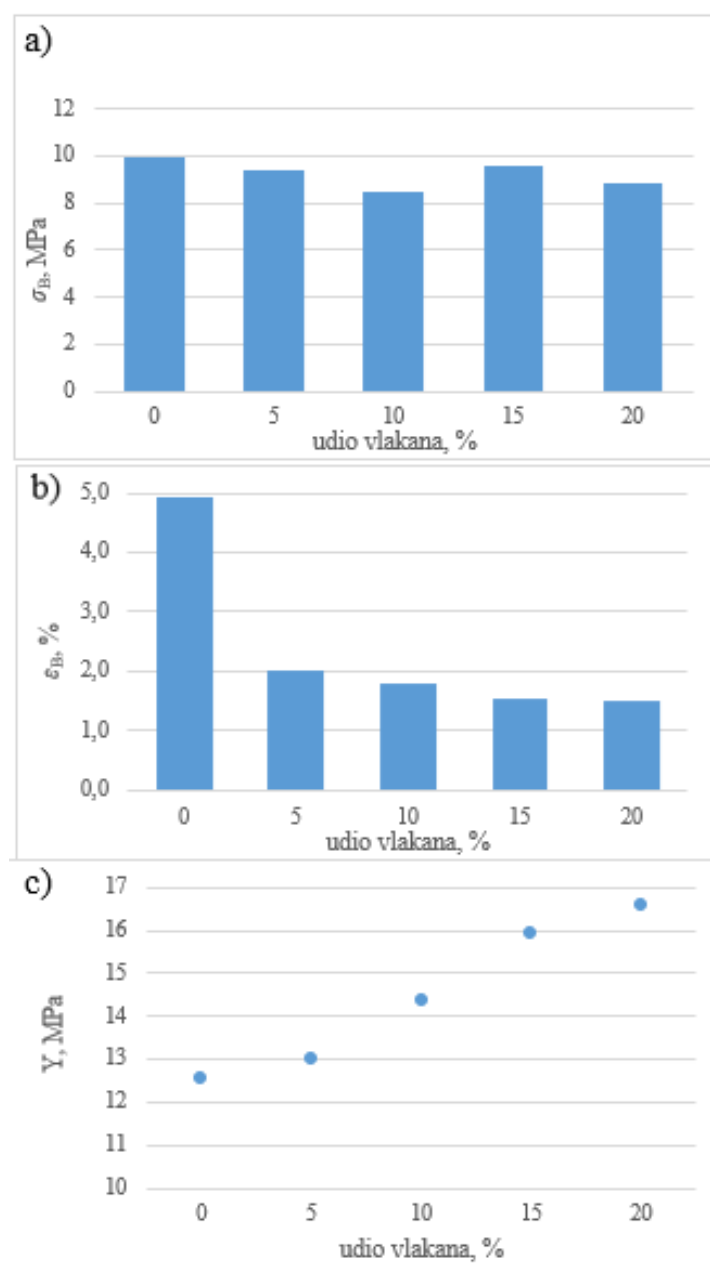
Uzorak	Broj mjerjenja	σ_B MPa	ε_B %	E MPa
PP	1	9,9294	4,8878	12,5076
	2	10,3497	4,2931	12,6639
	3	9,5152	5,5983	12,5061
	sr. vr.	9,9	4,9	12,6
PP/BRN 5	1	8,9014	1,9504	12,0972
	2	9,3673	2,0272	12,7531
	3	9,5740	1,9063	13,5040
	4	9,7315	2,2209	13,6534
	sr. vr.	9,4	2,0	13,0
PP/BRN 10	1	8,2927	2,0063	13,9801
	2	8,0467	1,8736	13,9321
	3	9,0901	1,4875	15,1746
	sr. vr.	8,5	1,8	14,4
PP/BRN 15	1	9,0715	1,3989	16,0195
	2	9,7463	1,5084	15,3627
	3	9,2688	1,2436	15,8338
	4	10,2904	2,0410	16,4155
	sr. vr.	9,6	1,6	15,9
PP/BRN 20	1	9,2442	1,5900	17,3559
	2	9,1501	1,4578	16,1958
	3	8,3191	1,3266	16,1793
	4	8,5558	1,6008	16,5969
	sr. vr.	8,8	1,5	16,6

Iz tablice 6 i slike 29 vidljivo je kako čisti PP ima najveću vrijednost prekidne čvrstoće dodatkom 10 i 20 mas. % vlakana brnistre prekidna čvrstoća se smanjuje, dok dodatkom 5 i 15 mas. % vlakana prekidna čvrstoća ima gotovo istu vrijednost kao čisti PP.

Vrijednost prekidne čvrstoće osim što ovisi o vrsti vlakana također ovisi i o drugim čimbenicima, kao što su duljina vlakana, hidrofilnost, razlika u kemijskoj prirodi vlakana i dr.

Vrijednosti prekidnog istezanja smanjuju se za više od 50% povećanjem udjela vlakana u odnosu na čisti PP. Ukoliko se vrijednost prekidnog istezanja smanjuje, to može ukazivati na manju podložnost kompozita plastičnim deformacijama pri povećanju opterećenja. Dobiveni rezultati upućuju na to da dodatkom određenog udjela vlakana nedostaje adhezija između matrice i vlakna, odnosno da dodatkom određenog postotka vlakana dolazi do optimalne

orijentacije/raspodjele vlakana. [46] Modul elastičnosti raste kako se povećava udio vlakana te shodno tome najveću vrijednost ima PP/BRN 20 kompozit. Povećanje modula elastičnosti ukazuje na veću krutost kompozita dodatkom i povećanjem udjela vlakana.



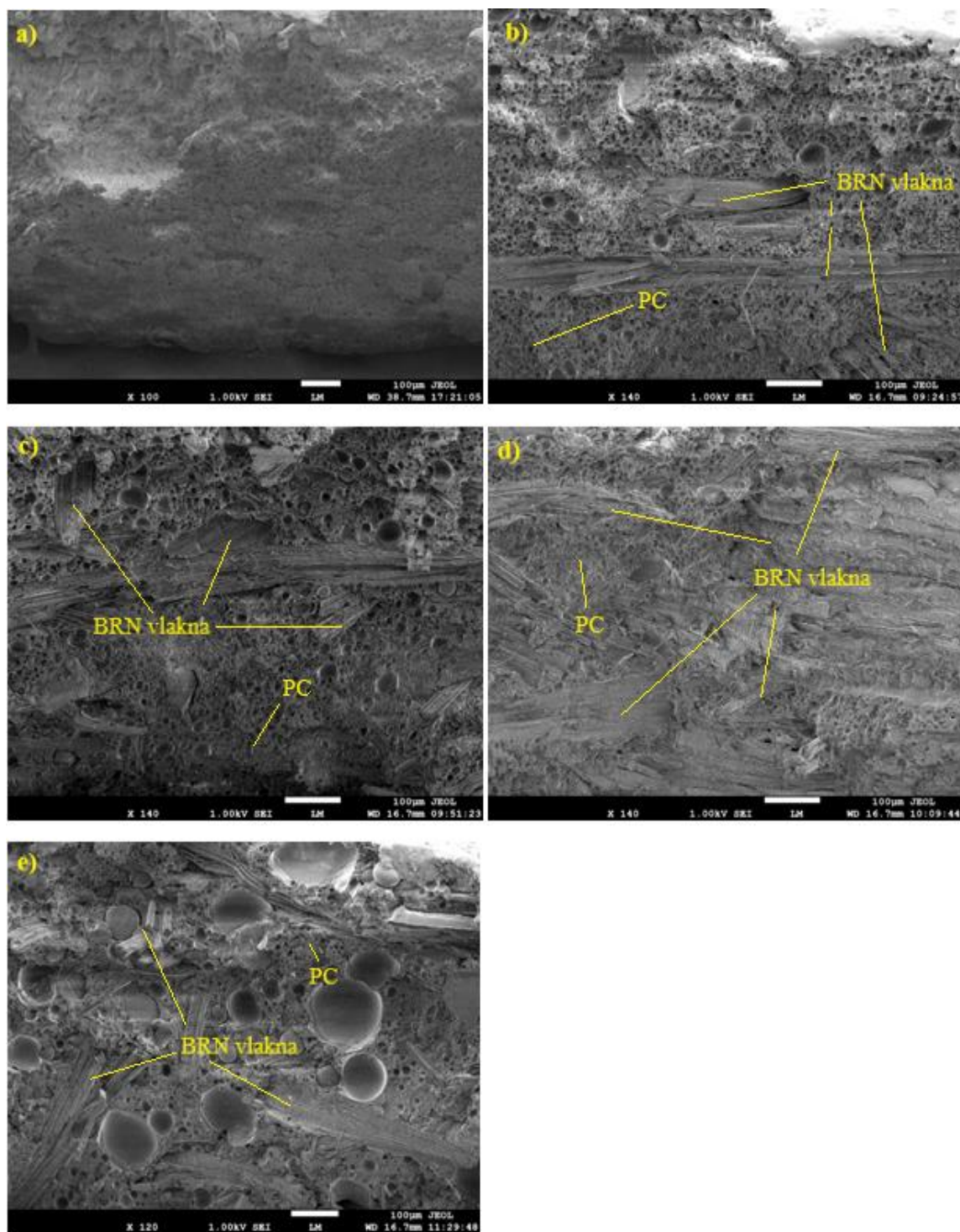
Slika 29. Grafički prikaz ovisnosti a) prekidne čvrstoće, b) prekidnog istezanja i c) modula elastičnosti o udjelu vlakana brnistre za čisti PP te PP/BRN kompozit

4.2. Morfološka svojstva PC/BRN kompozita

Raspodjela vlakana brnistre u polimernoj matrici kao i interakcije između matrice i vlakana praćene su pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM). Za SEM analizu upotrebljeni su uzorci kompozita nakon mehaničkih ispitivanja pri čemu se snimala površina (presjek) na kojoj je došlo pucanja kompozita.

4.2.1. Morfološka svojstva PC/BRN kompozita

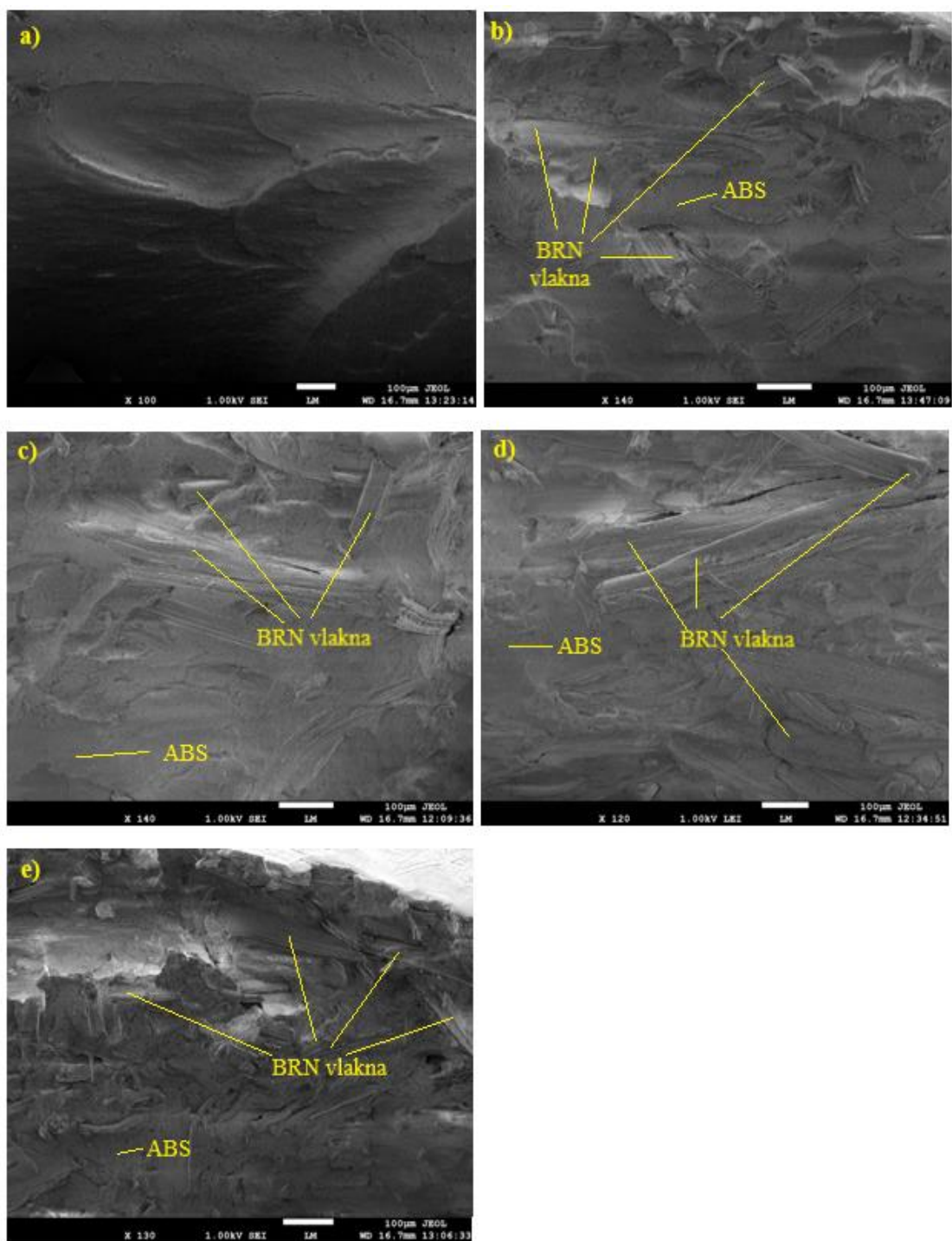
Slika 30 (a-e) prikazuje SEM mikrografije čistog PC-a te PC-a s različitim udjelima vlakana brnistre. Čisti PC pokazuje hrapavu površinu s vidljivim nepravilnostima uz vidljive sitne šupljine. Postupnim povećanjem udjela vlakana do 20 mas. % možemo primjetiti homogenu raspodjelu vlakana brnistre u PC matrici. Vidljiva su vlakna brnistre veće ili manje dužine koja su isprepletena kroz matricu PC-a što ukazuje na dobre interakcije između PC-a i vlakana brnistre kao ojačanja. Dodatkom 15 mas. % vlakana, na površini ima manje malih šupljina nego kod kompozita s manjim udjelom vlakana, ali su prisutni slojevi koji ukazuju na slojevitost strukturu kompozita te bolji prijenos opterećenja između vlakana i PC matrice. Također, u slučaju 15 mas. % vlakana uočava se bolja povezanost vlakana i PC matrice u usporedbi s kompozitima s manjim udjelom vlakana (5 i 10 mas. %). Na mikrografiji je manja praznina između vlakana i PC matrice što ukazuje na poboljšanu adheziju vlakana i PC matrice što rezultira većom čvrstoćom materijala. Kompozit s 20 mas. % vlakana brnistre pokazuje značajnu prisutnost šupljina i nepravilnosti u strukturi što negativno utječe na mehanička svojstva kompozita. Ovaj kompozit pokazuje lošiju homogenost i loše interakcije vlakana s matricom.



Slika 30. SEM mikrofotografije a) čistog PC-a, b) PC/BRN 5, c) PC/BRN 10, d) PC/BRN 15 te e) PC/BRN 20 kompozita

4.2.2. Morfološka svojstva ABS/BRN kompozita

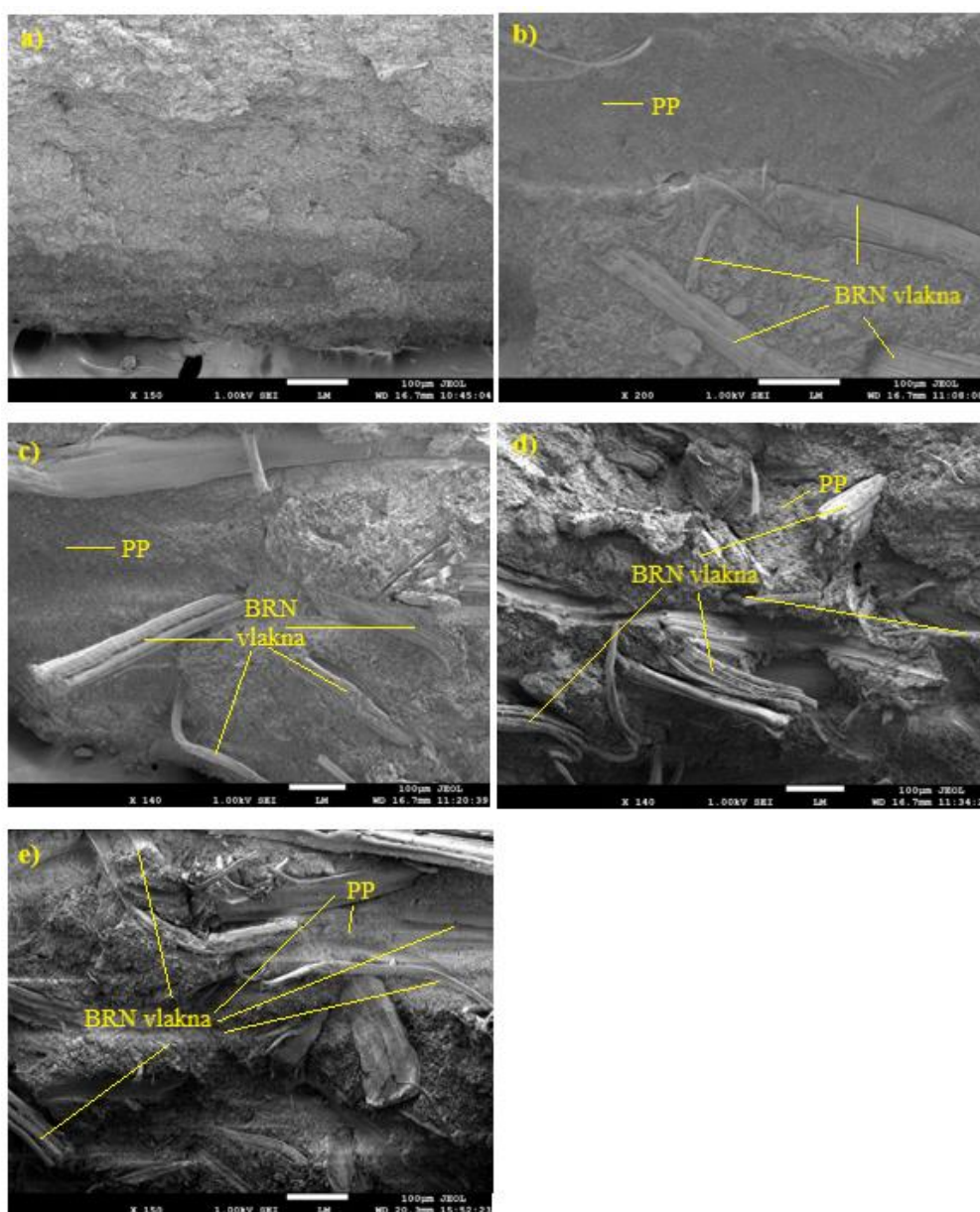
Na slici 31 (a-e) prikazane su SEM mikrografije čistog ABS-a te ABS-a s različitim udjelima vlakana brnistre. Na slici 31 a) prikazana je homogena i glatka morfologija površine čistog ABS-a. Dodatkom 5 mas. % vlakana (slika 31 b)) u kompozitu je vidljivo izvlačenje vlakana i lošija adhezija. Kod kompozita s 10 mas. % vlakana (slika 31 c)) uočava se najbolja dispergiranost vlakana brnistre unutar ABS matrice što pridonosi i najvećoj vrijednosti prekidne čvrstoće (tablica 5). Međutim pri najvećem udjelu vlakana (20 mas. %) vidljiva je lošija dispergiranost kao i adhezija između vlakana i ABS matrice (slika 32 d) i e)). Također je vidljivo da dolazi do pojave pukotina i praznina između stjenki vlakana i ABS matrice kao i izvlačenja vlakana iz ABS matrice (slika 31 e)). [47] Ovakva morfologija dovodi do pogoršanja (smanjenja) mehaničkih svojstava unatoč porastu Young-ovog modula odnosno povećanoj krutosti. Dakle, iako veći udio vlakana može poboljšati krutost, on istovremeno negativno utječe na homogenost i dugotrajnu izdržljivost kompozita.



Slika 31. SEM mikrografije a) čistog ABS-a, b) ABS/BRN 5, c) ABS/BRN 10, d) ABS/BRN 15 te e) ABS/BRN 20 kompozita

4.2.3. Morfološka svojstva PP/BRN kompozita

Slika 32 (a-e) prikazuje SEM mikrografije čistog PP-a te PP-a s različitim udjelima vlakana brnistre. Čisti PP pokazuje relativno grubu površinu s izraženim nepravilnostima. Povećanjem udjela vlakana brnistre u PP matrici dolazi do slabije adhezije između vlakana i PP matrice iznad 5 mas. % vlakana. Adhezija između vlakana i PP matrice značajno opada s povećanjem udjela vlakana, što rezultira prazninama i izvlačenjem vlakana brnistre iz PP matrice. Također, aglomeracija vlakana postaje sve izraženija pri višim udjelima vlakana posebno kod 15 i 20 mas. % vlakana što uzrokuje nehomogenost strukture.



Slika 32. SEM mikrografije a) čistog PP-a, b) PP/BRN 5, c) PP/BRN 10, d) PP/BRN 15 te e) PP/BRN 20 kompozita

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivana su mehanička i morfološka svojstva PC/BRN, ABS/BRN te PP/BRN kompozita s vlaknima brnistre u udjelu od 0, 5, 10, 15 i 20 mas. %. Na temelju svih provedenih istraživanja, može se zaključiti da čisti PC/BRN kompoziti pokazuju najbolja mehanička svojstva porastom udjela brnistre. Nadalje ABS i PP imaju ograničenu kompatibilnost s vlaknima brnistre. Odnosno, povećanjem udjela vlakana brnistre poboljšava se krutost materijala, no istovremeno dolazi i do lošije adhezije između vlakana i matrice što je potvrđeno pretražnom elektronskom mikroskopijom (SEM-om). Dodatno, aglomeracija vlakana također postaje sve izraženija pri višim udjelima vlakana što uzrokuje nehomogenost i slabija mehanička svojstva. Shodno tome, u slučaju ABS-a uzorak s 10 mas. % vlakana ističe se kao najbolji, dok je u slučaju PP-a to uzorak s 5 mas. % vlakana.

Uspoređujući rezultate za sve analizirane polimere (PP, ABS, i PC) s dodatkom BRN-a, kod PC/BRN kompozita uočene su jake interakcije na međupovršini između vlakana i PC matrice kao i dobra adhezija posebno kod kompozita s udjelom BRN od 15 mas. % koji pokazuje najbolja mehanička i morfološka svojstva.

6. LITERATURA

- [1] Kovačević, Z., Bischof, S., Vujašinović, E., Fan, M., The influence of pre-treatment of *Spartium junceum* L. fibres on the structure and mechanical properties of PLA biocomposites, *Arab. J. Chem.*, **12**(4) (2019) 449-463.
- [2] <https://balkans.aljazeera.net/news/world/2023/6/5/godisnje-se-u-svijetu-proizvede-460-miliona-tona-plastike> (pristup 16.12.2023.)
- [3] Kratofil Krehula, Lj., predavanja iz kolegija 'Polimeri i polimerizacijski procesi', Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2017.
- [4] Govorčin Bajsić E, predavanja iz kolegija 'Struktura i svojstva polimernih materijala', Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2023.
- [5] <https://www.vedantu.com/jee-main/chemistry-difference-between-natural-polymers-and-synthetic-polymers> (pristup 16.12.2023.)
- [6] Govorčin Bajsić, E., Interna skripta za predavanje iz kolegija 'Prerada polimera', Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2017.
- [7] Macan, J., Interna skripta za studente kolegija 'Kompozitni materijali', Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2020.
- [8] Campbell, F.C., Structural Composite Materials, ASM International, Ohio, 2010., 1-4.
- [9] Fitzgerald, A. et al., A Life Cycle Engineering Perspective on Biocomposites as a Solution for a Sustainable Recovery, *Sustainability*, **13**(3) (2021) 1160.
- [10] Bahrami, M., Abenojar, J., Martinez, M. A., Recent Progress in Hybrid Biocomposites: Mechanical Properties, Water Absorption, and Flame Retardancy, *Materials*, **13**(22) (2020) 5145.
- [11] Sengupta, A., Pattnaik, S., Kumar Sutar, M., Biocomposites: an Overview, *International J. Engin. Techn. Sci.Res.*, (2017).
- [12] Drzal Lawrence T., Mohanty A., Misra M. Bio-composite materials as alternatives to petroleum-based composites for automotive applications, *Magnesium*, **40** (2001) 1-3.
- [13] Hasnah Kamarudin, S. et al., A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications, *Polymers*, **14**(17) (2022) 3698.

- [14] Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T., Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World, *J. Polym. Envir.*, **10** (2002) 19-26.
- [15] Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I., Natural Fibers: can they replace glass in fibre reinforced plastics?, *Comp. Sci. Techn.*, **63**(9) (2003) 1259-1264.
- [16] <https://textileengineering.net/natural-fibres-types-classification-properties-and-uses/> (pristup 16.12.2023.)
- [17] Santulli, C., Giampaoli, G., Spanish Broom Fibres Properties and Extraction for Application in Composites: A Review, *Appl. Sci. Eng. Prog.*, **14**(4) (2021) 624-631.
- [18] Katović, D., Katović, A. i Krnčević, M., Spanish Broom (*Spartium junceum L.*) – History and Perspective, *J. Nat.l Fib.*, **8**(2) (2011) 81-98.
- [19] <https://www.vrtlarica.hr/brnistra-sadnja-uzgoj/> (pristup 16.12.2023.)
- [20] <https://www.ludens.media/brnistra/> (pristup 16.12.2023.)
- [21] Ratti, A., Del Curto, B. et Da Costa, C.R., Product Development using vegetable fibers, *Int. J. Des. & Nat. Ecodyn.*, **9**(3) (2014) 237-244.
- [22] Radeljak, M., Pamuković, A., Dorbić, B., Istraživanje mogućnosti primjene brnistre i njenih proizvoda na području srednje Dalmacije, *Sociologija i prostor*, **54**(3) (2016) 315-334.
- [23] Zimniewska, M., Bischof Vukušić, S. and Kovačević, Z., Comparison of Spanish Broom (*Spartium junceum L.*) and flax (*Linum usitatissimum*) fibre, *Text. Res. J.*, **82**(17) (2012) 1786-1798.
- [24] Zorana Kovačević, Razvoj naprednih nanobiokompozita izrađenih od polilaktidnog polimera ojačanog vlaknima brnistre, Doktorska disertacija, Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2019.
- [25] <https://www.xometry.com/resources/materials/polycarbonate/> (pristup 20.12.2023.)
- [26] Govorčin Bajsić, E., Polimerne mješavine, skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2012.
- [27] https://m.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB6236571_EN.htm (pristup 20.12.2023.)

- [28] <https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polycarbonates.html> (pristup 20.12.2023.)
- [29] <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polycarbonate.aspx> (pristup 20.12.2023.)
- [30] Turku, I., Sushil, K., Kärki, T., Characterization of Feedstock Filament Extruded from Secondary Sources of PS, ABS and PVC, *Recycling*, **3** (2018) 57.
- [31] <https://www.textiletrendz.com/synthesis-of-acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-polymers> (pristup 20.12.2023.)
- [32] <https://sybridge.com/know-your-materials-acrylonitrile-butadiene-styrene-abs/> (pristup 20.12.2023.)
- [33] <https://adrecoplastics.co.uk/abs-plastic-properties/> (pristup 20.12.2023.)
- [34] <https://www.xometry.com/resources/materials/abs-plastic-uses/> (pristup 20.12.2023.)
- [35] <https://pslc.ws/macrog/kidsmac/polyprop.htm> (pristup 20.12.2023.)
- [36] Janović, Z., Polimerizacije i polimeri, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 1997., 352-357.
- [37] Jukić, A., predavanja iz kolegija 'Kemija prirodnih i sintetskih polimera', Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2023.
- [38] <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic> (pristup 20.12.2023.)
- [39] Hossain Md. Tanvir et al., Research and application of polypropylene: a review, *Disc. Nano*, **19**(2) (2024).
- [40] Govorčin Bajsić, E., predavanja iz kolegija 'Karakterizacija materijala', Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2018.
- [41] Vrsaljko, D., Nastavni materijali iz kolegija Mehanika materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2018.
- [42] <https://www.thermofisher.com/blog/materials/what-is-sem-scanning-electron-microscopy-explained/> (pristup 1.10.2024.)
- [43] Munir et al., The role of halophytic nanoparticles towards the remediation of degraded and saline agricultural lands, *Env. Sci. Pollut. Res.*, **28**(43) (2021) 60383-60405.

- [44] Asim, M. Jawaid, M., Abdan, K., & Ishak, M. R., Effect of alkali and silane treatments on mechanical and fiber matrix bond strength of kenaf and pineapple leaf fibres, *J.I of Bion. Engin.*, **13**(3) (2016) 426-435.
- [45] Owen, M. M., Achukwu, E. O., & Romli, A. Z., Effects of gauge length and chemical modification on the tensile properties of kenaf fibers, *Proceed. Text. Res. Assoc. Nigeria*, (2018) 15-18.
- [46] Avinash R Pai, R.N. Jagtap, Surface morphology & mechanical properties of some unique natural fiber reinforced polymer composites-A Review, *J. Mater. Envir. Sci.*, **6**(4) (2014) 902-917.
- [47] Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Characteristics of kenaf fiber/epoxy composites subjected to thermal degradation, *Polym. Degrad. Stab.*, **98**(12) (2013) 2752-2759.

7. ŽIVOTOPIS

Klara Vrhovec, [REDACTED] Svoje obrazovanje započinje u Osnovnoj školi „Vladimir Nazor” u Križevcima te ga nastavlja upisom u prirodoslovno-matematički smjer Gimnazije Ivana Zakmardija Dijankovečkoga Križevci. S položenom državnom maturom, 2018. godine upisuje se na preddiplomski studij Kemija i inženjerstvo materijala na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu te ga završava u rujnu 2022. godini obranivši završni rad na temu „Biokompoziti na osnovi polilaktida” pod mentorstvom prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić na Zavodu za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju. Iste godine upisuje diplomski studij na istom smjeru i fakultetu. Tijekom ljetnog semestra druge godine diplomskog studija, stekla je međunarodno iskustvo kroz Erasmus+ program na Tehničkom sveučilištu u Grazu. Praktično iskustvo stekla je kroz stručnu praksu na Veterinarskom zavodu u Križevcima. Osim toga, ima iskustvo u promociji i marketingu proizvoda kroz rad u tvrtki Masterplan.