

# Analiza polimernih materijala u štitnicima za bicikliste

---

**Kuduzović, Valentina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Textile Technology / Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:201:804169>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Textile Technology University of Zagreb - Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**ZAVRŠNI RAD**

**ANALIZA POLIMERNIH MATERIJALA U ŠTITNICIMA ZA BICIKLISTE**

**Valentina Kuduzović**

**Zagreb, rujan 2019.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**TEKSTILNO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**Zavod za primijenjenu kemiju**

**ZAVRŠNI RAD**

**ANALIZA POLIMERNIH MATERIJALA U ŠTITNICIMA ZA BICIKLISTE**

Pod mentorstvom:

**izv. prof. dr. dr. sc. Iva Rezić**

Autorica:

**Valentina Kuduzović**

**Mat.br. 10282/TTI**

**Zagreb, rujan 2019.**

**Zavod u kojem je rad izrađen:** Sveučilište u Zagrebu,

Tekstilno-tehnološki fakultet,

Zavod za primijenjenu kemiju

- **Broj stranica:** 31
- **Broj tablica:** 3
- **Broj slika:** 17
- **Broj literaturnih izvora:** 14

**Članovi povjerenstva:** 1. doc. dr. sc. Maja Somogyi Škoc, predsjednica

2. izv. prof. dr. dr. sc. Iva Rezić, članica

3. doc. dr. sc. Karlo Lelas, član

4. prof. dr. sc. Mario Cetina, zamjenik člana/ice

**Datum predaje i obrane rada:** 11.9.2019.

## **SAŽETAK**

Razvojem sporta razvija se i industrija sportske odjeće, obuće i zaštitne opreme. Tekstilna industrija uspješno odgovara na sve zahtjevnije potrebe profesionalnih sportaša i rekreativaca. Analiziranjem i otkrivanjem sintetskih polimera, te pronalaženjem načina poboljšanja njihovih svojstava omogućena je proizvodnja adekvatne sportske opreme. Zahvaljujući tome, danas na tržištu postoje štitnici visoke zaštite i visokih performansi koji zadovoljavaju različite potrebe sportaša.

**Ključne riječi:** tekstilna industrija, sintetski polimeri, poboljšana svojstva, sport, sportska oprema, štitnici

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Polimerni materijali.....	2
2.2. Podjela polimernih materijala .....	3
2.3. Struktura polimernih molekula (konformacija i konfiguracija) .....	6
2.3.1. Konformacija .....	7
2.3.2. Konfiguracija.....	7
2.4. Nadmolekulna struktura polimera.....	7
2.5. Orijentacija.....	8
2.6. Mehanička svojstva polimera .....	9
3. VRSTE POLIETILENA .....	9
3.1. Polietilen .....	9
3.2. Polietilen-uhmw (ultra high molecular weight polyethylene)- polietilen visoke gustoće i vrlo velikih molekulnih masa .....	14
4. ŠTITNICI .....	18
4.1. Štitnici za koljena .....	18
4.2. Štitnici za koljena od PE-UHMW .....	20
5. METODE ANALIZE POLIMERA .....	21
5.1. Infracrvena (IR) spektroskopija .....	21
5.2. Infracrveni (IR) spektar.....	23
6. ZAKLJUČAK .....	27
7. LITERATURA.....	28
8. POPIS SLIKA I TABLICA.....	30

## 1. UVOD

Od pamtivijeka ljudi se bave različitim oblicima sportskih aktivnosti. Modernom čovjeku, radi specifičnih uvjeta življenja, sportske aktivnosti postaju imperativ očuvanja fizičkog, ali i psihičkog zdravlja. Kroz sport i rekreaciju oslobađamo stres, te razvijamo kreativne, duhovne i moralne kvalitete. Bez obzira radi li se o laganoj šetnji kroz prirodu, timskom sportu ili nekoj od ekstremnih sportskih aktivnosti poput brdskog biciklizma, učinak je uvijek isti, sport oplemenjuje čovjeka. Uz sportske aktivnosti veže se i adekvatna sportska oprema. Na koji se god način bavili sportom potrebna je odjeća i oprema koja pruža zaštitu od ozljeda. Ovisno o sportu, određeni dijelovi tijela izloženiji su i skloniji zadobivanju ozljeda. Kod biciklista, kao i mnogih drugih sportaša, to su koljena. Funkcija koljena je omogućavanje pokreta, ali i prenošenje težine tijela prema stopalima tijekom hodanja, trčanja ili, u ovom slučaju, pedaliranja. Da bi zaštita od udara prilikom pada bila osigurana odjećom ili sportskom opremom poput štitnika za koljena, potrebno je koristiti tekstil i tekstilne materijale koji imaju visoku čvrstoću i izdržljivost, kao i visoku razinu apsorpcije energije.

Industrija sportske odjeće i sportske obuće jedan je od glavnih inovatora u sektoru tekstila i odjeće te je pokretač mnogih novih ideja i koncepata u dizajnu materijala i proizvoda u svrhu zaštite prilikom treninga i rekreacije. Snažan trend kombiniranja višestruke funkcionalnosti materijala i mode u mnogim predmetima sportske odjeće i opreme, te odjeće za slobodno vrijeme rezultiralo je pojavom mnogih različitih vrsta visokotehnoloških tkanina i dizajna odjeće s izvanrednim svojstvima performansi.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Polimerni materijali

Polimerima se nazivaju sve prirodne i sintetske tvari i materijali koji su izgrađeni od makromolekula (polimerne molekule). [1]

Polimer je osnovna skupina atoma koja je karakteristična i ponavlja se n-puta. Takva, ponavljajuća, skupina atoma u polimeru naziva se mer. [2]

Naziv polimer dolazi od grčke riječi poli = mnogo i meros = čestica. [1]

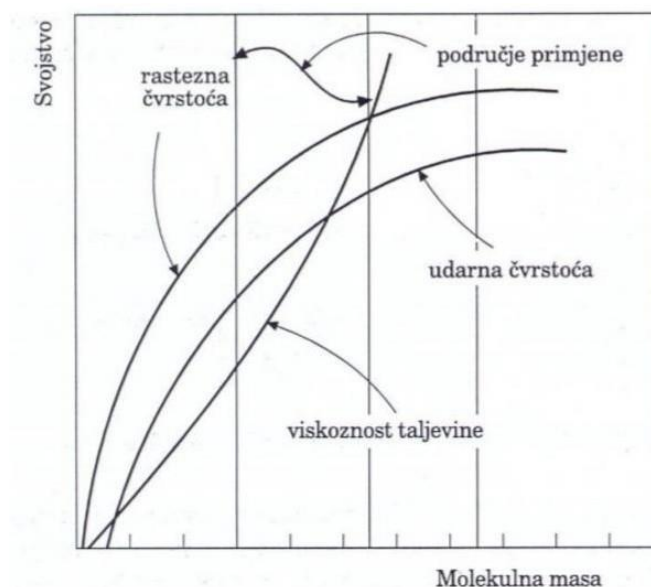
Makromolekule su kemijski spojevi vrlo velikih relativnih molekularnih masa u rasponu od nekoliko tisuća do nekoliko milijuna, od 10 do 1000 nm, pa ulaze u područje koloidnog razdjeljenja tvari. Velika većina makromolekula sastavljena je od istovrsnih ponavljanih jedinica pa se nazivaju polimeri. Riječ polimer prvi put upotrebljava švedski kemičar Jöns Jakob Berzelius 1833., nazvavši tako kemijske spojeve koji imaju jednaki sastav, a razlikuju se veličinom molekularne mase. [3]

Prema današnjoj predodžbi, polimeri se sastoje od dugih, savitljivih makromolekula koje stalno mijenjaju oblik i ne sadrže određen, za svaku polimernu vrstu jednak broj ponavljanih jedinica, mera, već taj broj mora biti dovoljno velik, da se po definiciji IUPAC-a (engl. International Union of Pure and Applied Chemistry), s povećanjem ili smanjenjem za jednu jedinicu, većina njegovih svojstava značajno ne mijenja. [3]

Broj ponavljanih jedinica polimerne molekule naziva se stupanj polimerizacije, DP, (engl. degree of polymerization), pa njegov produkt s molekularnom masom ponavljane jedinice ( $M_0$ ) tvori molekularnu masu polimera ( $M_n$ ). [3]

Polimeri s malim stupnjem polimerizacije obično su viskozne kapljevine ili lako taljive krutine, lako su topljivi i nazivaju se oligomerima. Polimeri s većim stupnjem polimerizacije i molekularnim masama većim od 10 000 otapaju se uz prethodno bubrenje i općenito stvaraju čvrste filmove ili vlakna, a neka temeljna svojstva im se mijenjaju kako je prikazano na slici 1.





SI.1. Utjecaj molekulne mase na neka mehanička svojstva plastomera [3]

## 2.2. Podjela polimernih materijala

Polimere je moguće podijeliti temeljem različitih kriterija. Prema podrijetlu polimeri mogu biti prirodni (biopolimeri) ili sintetski (umjetni), a po kemijskom sastavu organski, anorganski ili miješani. [1]

Polimeri su pretežito organskog podrijetla i sastoje se uglavnom od ugljika, vodika, kisika, dušika i sl. Rijetko sadrže i anorganske elemente kao B, Si, P, S, F i Cl pa ovisno o njihovom udjelu mogu biti miješani ili potpuno anorganski polimeri. Anorganski polimeri ne sadrže ugljikove atome već su građeni od makromolekula koje sadrže anorganske temeljne lance i bočne skupine. Polimeri se dobivaju sintetskim metodama procesima polimerizacije i u manjem opsegu, modifikacijama prirodnih makromolekulnih tvari. Polimerizacija je kemijska reakcija kojom niskomolekulni spojevi, monomeri, međusobnim povezivanjem kovalentnim vezama stvaraju polimere, tvari vrlo velikih molekulnih masa i dimenzija. [3]

Polimerne tvari razvrstavaju se:

1. Prema podrijetlu:
  - Prirodni polimeri :

celuloza, škrob, kaučuk, svila, vuna, pamuk i biopolimeri. Biopolimeri su prirodni polimeri od kojih su građena živa bića, na primjer bjelančevine, nukleinske kiseline, posebni polisaharidi, hormoni, fermenti i sl.

- Sintetski polimeri

a) prema reakcijskom mehanizmu nastajanja:

- stupnjevita polimerizacija (polikondenzacija, postupni rast lanca)

- lančana polimerizacija (poliadicija, prekid dvostruke veze, do reakcije dolazi uz inicijator ili katalizator; radikalske, ionske i koordinacijske reakcije)

-uretanska polimerizacija

b) prema vrsti ponavljanih jedinica

- homopolimeri (jedna vrsta ponavljanih jedinica)

- kopolimeri (dvije ili više vrsta ponavljanih jedinica)

c) prema oblicima makromolekula

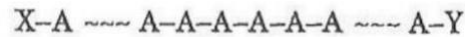
- linearne, granate, umrežene, trodimenzionalne

2. Prema primjenskim svojstvima:

- poliplasti (plastični materijali): plastomeri (termoplastične mase) i duromeri (termoreaktivne plastične mase)
- elastomeri
- vlakna
- premazi, ljepila, veziva, funkcionalni polimeri: katalizatori, ionski izmjenjivači, poboljšivači viskoznosti, membrane, elektrovodljivi, senzori, monitori itd.

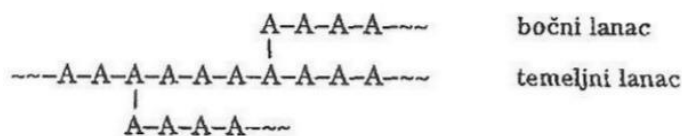
3. Prema oblicima makromolekula:

- Linearne makromolekule imaju visok stupanj simetrije. Ponavljane jedinice linearnih makromolekula vezane su u kontinuiranom nizu u lancu koji može biti izdužen ili klupčast. Svaka ponavljana jedinica vezana je sa samo dvije susjedne ponavljane jedinice, a molekula ima samo dvije krajnje skupine (X i Y):

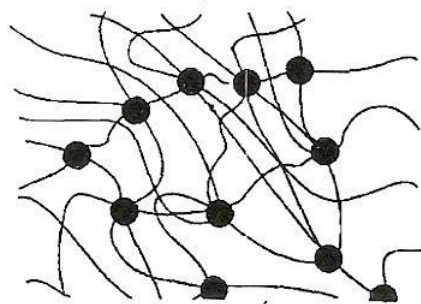


Zbog velikog broja ponavljanih jedinica (A), krajnje skupine nemaju znatnog utjecaja na konačna svojstva polimera

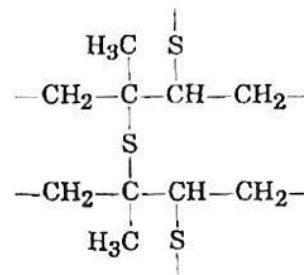
- Granate makromolekule sastoje se od temeljnog linearnog lanca poredanih ponavljanih jedinica i manjeg broja bočnih lanaca obično nižeg stupnja polimerizacije:



Raspored i veličina bočnih lanaca ovise o vrsti polimera, a do njihovog nastajanja lako dolazi ako je određen broj monomernih jedinica višefunkcionalan, tj. ima više reaktivnih skupina. Reaktivne skupine odgovorne su i za mehanička svojstva polimera, te za reakcije s vodom, kemikalijama i bojilima. Ako su bočni lanci relativno kratki u usporedbi s glavnim lancem, makromolekula zadržava većinu svojstava linearne makromolekule. Uz prisutnost većeg broja višefunkcionalnih skupina nastaju polimeri trodimenzionalne, umrežene strukture. Trodimenzionalne strukture nastaju i naknadnim međusobnim povezivanjem linearnih makromolekula kovalentnim vezama, obično u prisutnosti određenih niskomolekulnih tvari. Jedan od primjera je proces zvan vulkanizacija u kojem dolazi do povezivanja poliizoprenskih molekula prirodnog kaučuka u prisutnosti sumpora. Potpuno umreženi polimerni sustav zapravo je jedna divovska makromolekula.



umreženi polimer



struktura vulkaniziranog kaučuka

SI. 2. Umreženi polimer [3]

SI. 3. Struktura vulkaniziranog kaučuka [3]

Polimeri koji se sastoje od makromolekula kemijski istovrsnih ponavljanih jedinica nazivaju se homopolimerima, a kad sadrže dvije ili više vrsta ponavljanih jedinica nazivaju se kopolimerima. Polimeri koji sadrže iste vrste ponavljanih jedinica; ali nastale reakcijom dviju vrsta molekula monomera koji sadrže po dvije istovrsne funkcionalne skupine na istoj monomernoj molekuli također pripadaju među homopolimere, a nastaju reakcijama 6 stupnjeviti polimerizacija. Svojstva kopolimera ovise o kemijskoj prirodi i udjelu pojedinih monomera, ali i o njihovom rasporedu uzduž lanca makromolekula. [2],[3]

### 2.3. Struktura polimernih molekula (konformacija i konfiguracija)

Oblik molekule određen je prostornim razmještajem atoma, a makromolekulna priroda polimernih molekula omogućuje velik broj strukturnih prostornih oblika. Makromolekule su najčešće lančane strukture jer se sastoje od niza povezanih ponavljanih jedinica, a položaj atoma u molekulama određen je njihovim prostornim razmještajem ili stereoisomerima. Prostorni razmještaj polimernih molekula uključuje strukture koje se razlikuju prema konfiguraciji i konformaciji. [4]

Konfiguracija makromolekula ograničena je na prostorni razmještaj skupina atoma oko jednog ugljikovog atoma, a pojam konformacije na oblik cijele molekule. [4]

### 2.3.1. Konformacija

Pojam konformacije odnosi se na oblik cijele molekule. Konformacijama se nazivaju oblici molekule koji zbog toplinskih gibanja ili utjecaja sekundarnih veza prelaze jedan u drugi rotacijom molekulnih skupina oko pojedinih kemijskih veza u molekuli. Molekula prelazi iz jedne u drugu konformaciju bez kidanja kemijskih veza. Većina polimera je organske prirode, a najveći broj u temeljnom lancu sadrži isključivo ugljikove atome. Ugljikov atom je tetraedarskog oblika s četiri ekvivalentne  $sp^3$  orbitale koje su pod kutom od  $109^\circ 28'$ . Zbog takvog oblika, povezivanjem ugljikovih atoma u lančanu molekulu dobiva se u idealnom slučaju "cik-cak" planarna konformacija. Mogućnost rotacije oko jednostrukih C-C veza omogućuje polimernim molekulama gotovo neizmjeran broj konformacija. Međutim, te različite konformacije nisu energijski ravnopravne, pa je većina makromolekula pretežito u samo jednoj ili u malom broju konformacija. Stabilan oblik makromolekule je onaj u kojem je potencijalna energija minimalna. Ostale konformacije su nestabilne i predstavljaju samo prijelazni oblik iz jedne stabilne konformacije u drugu. [4]

### 2.3.2. Konfiguracija

Konfiguracija makromolekula definira prostorni razmještaj skupina atoma oko jednog ugljikovog atoma, tj. broj tipova ponavljanih jedinica, kemijsku strukturu ponavljanih jedinica te redoslijed i način vezanja ponavljanih jedinica. Kod makromolekula postoje četiri hijerarhijske razine strukturiranja: konfiguracija ponavljane jedinice, bliski konfiguracijski poredak, daleki konfiguracijski poredak i konfiguracija makromolekula kao cjeline. Različitost konfiguracija dovodi do razlika u fizičkim svojstvima polimera. [3]

## 2.4. Nadmolekulna struktura polimera

Izvršna fizička svojstva polimeri zahvaljuju dugolančanoj makromolekulnoj strukturi u kojoj su međumolekulne sile relativno velike jer se ostvaruju velikim brojem sekundarnih veza. U određenom polimeru te sile rastu s porastom duljine lanca makromolekula i za vrlo visoki stupanj polimerizacije mogu premašiti jakost primarnih valencijskih sila. Zato polimerne tvari i ne isparavaju, a teže se i otapaju u usporedbi s niskomolekulnim tvarima. Veličina međumolekulnih sila izražena kao KE ili GKE određuje i osnovna svojstva polimera kao 12

materijala. Tako polimeri kojima vrijednost za KE iznosi do 8 kJ/mol po 0,5 nm duljine makromolekule (tablica1) imaju elastomerna svojstva, a oni iznad 21 kJ/mol imaju svojstva vlaknastih materijala. Polimeri kojima vrijednosti za KE iznose 8 do 21 kJ/mol imaju svojstva plastomera. [4]

**Tab. 1.** Vrijednost kohezijske energije (KE) tipičnih polimera za duljinu segmenta makromolekule od 0,5 nm [3]

Polimer	KE/kJmol <sup>-1</sup>	Polimer	KE/kJmol <sup>-1</sup>
Polietilen	4,2	Polistiren	16,7
Polibutadien	4,6	Poli(vinil-alkohol)	17,6
Poliizobuten	5,0	Poliamidi	24,3
Poli(vinil-klorid)	10,9	Celuloza	26,0
Poli(vinil-acetat)	13,4		

Nadmolekulna struktura općenito je struktura sastavljena od strukturnih elemenata većeg reda u odnosu na atome u molekularnoj strukturi. Ona nastaje kao rezultat prostornog uređivanja molekula zbog međumolekulnih privlačnih sila. Morfologija makromolekula posljedica je različitih nadmolekulnih struktura polimera. S obzirom na nadmolekulnu strukturu polimeri mogu biti amorfni, kristalni, kristalasti i kapljeviti kristalni. [3]

## 2.5. Orijentacija

Djelovanjem rastezne sile, makromolekulni lanci se poravnavaju u smjeru djelovanja napreznja što se referira kao orijentacija. Molekulna orijentacija rezultira anizotropijom mehaničkih svojstava, te većom rasteznom čvrstoćom i krutošću molekula. To se koristi kao prednost u proizvodnji sintetskih vlakana i filmova, a nepoželjna je pojava kod postupaka prešanja. Orijentacija amorfni polimera događa se jednostavnim preuređivanjem statističkih klupčastih makromolekula. Kod kristalnih i kristalastih polimera mehanizam tog procesa je puno kompleksniji, kristaliti se mogu orijentirati ili čak potpuno strukturno preurediti. Taj proces se naziva napreznjem inducirana kristalizacija ili prekristalizacija. Može se provesti hladnim razvlačenjem pri sobnoj temperaturi (npr. PE-LD). Krhka plastika može biti orijentirana samo pri povišenim temperaturama.

Djelovanjem rasteznog napreznja dolazi do pucanja lamela. Molekulni lanci ostaju neoštećeni i odvajaju se od puknute površine lamele jedan za drugim kao niz malih blokova

unutar kojih je zadržana struktura savijenog lanca. Napredovanjem procesa ti se blokovi poravnavaju te formiraju mikrofibrilne jedinice vlakna. Mikrofibriili su čvrsti i jako orijentirani na molekularnoj razini. Snopovi mikrofibrila nastali pucanjem susjednih lamela formiraju fibrile.

Veća orijentacija molekula znači veću gustoću i otpornost na sile, manju deformaciju i više poprečnih veza. [2], [3]

## 2.6. Mehanička svojstva polimera

Polimeri su viskoelastična tijela. Ovisno o vanjskim uvjetima, temperaturi i naprezanju, mogu se ponašati kao elastična tijela ili viskozne kapljevine. Uz viskoznost, u svakom je trenutku prisutna i viskoelastična komponenta deformacije. Viskoelastičnost je tipična za većinu polimernih materijala. Izuzetak su polimeri koji pokazuju samo viskoelastičnu deformaciju ili samo viskozno tečenje. Najvažniji čimbenici koji određuju mehanička svojstva polimera su: prosječna molekularna masa, raspodjela molekularnih masa, stupanj reda kod amorfni polimera i stupanj kristalnosti. Nadalje, mehanička svojstva polimera, koji sadrži različite dodatke, ovisit će uz ostalo i o vrsti dodatka, kompatibilnosti dodatka s polimerom, veličini čestica dodatka, raspodjeli tih čestica, i dr. Mehanička svojstva ovise o vrsti primijenjene sile. Tri osnovna, najvažnija tipa sila su: rastezna, pritisna i smična. Također važne, ali puno kompleksnije su: savojna i torzijska sila. Deformacija polimera ima u općem slučaju tri komponente:

$$\epsilon = \epsilon_I + \epsilon_{II} + \epsilon_{III}$$

gdje je  $\epsilon_I$  elastična deformacija,  $\epsilon_{II}$  viskoelastična (gumasta) deformacija i  $\epsilon_{III}$  viskofluidna deformacija (viskozno tečenje). Koliki je u nekom trenutku udio svake od komponenata u ukupnoj deformaciji ovisi o temperaturi, iznosu naprezanja i trajanju vanjske sile. [3]

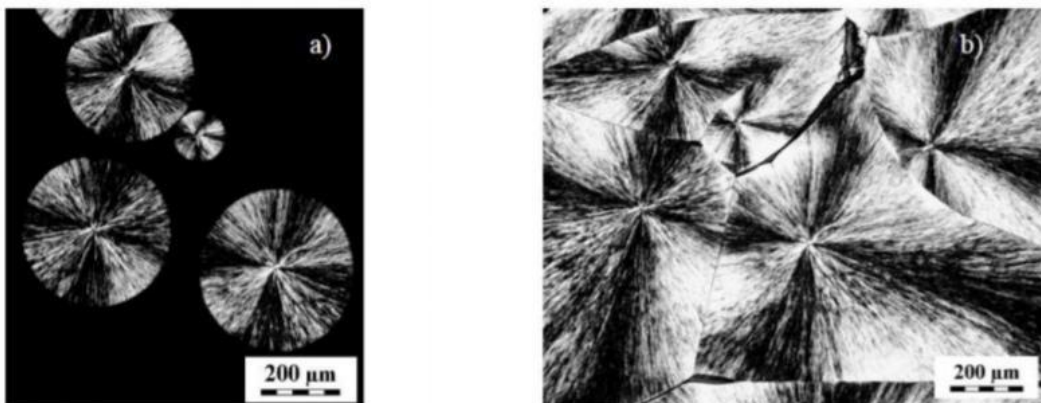
## 3. VRSTE POLIETILENA

### 3.1. Polietilen

Polietilen (PE) najjednostavniji je poliugljikovodik, ujedno i jedan od najpoznatijih polimera današnjice. Industrijski se proizvodi polimerizacijom etilena,  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$  (dvije  $\text{CH}_2$  skupine povezane dvostrukom vezom), a laboratorijski se može dobiti i od diazometana,  $\text{CH}_2\text{N}_2$ .

Jednostvna struktura makromolekula polietilena izgrađena od ponavljanih jedinica  $\text{---CH}_2\text{---CH}_2\text{---}$  omogućuje njegovu laganu kristalizaciju. Polietilen kristalizira iz otopine ili taljevine u uobčajenim uvjetima ortorombskom jediničnom ćelijom s planarom, izduženom cik-cak, *trans*-konformacijom presavijajućih makromolekula, a o stupnju kristalne odnosno amorfne faze ovise i temeljna svojstva materijala. Niski stupanj kristalnosti rezultira niskom gustoćom (PE-LD, 0,910 - 0,925 g/cm<sup>3</sup>), a visoki stupanj visokom gustoćom (PE-HD, 0,941 - 0,965 g/cm<sup>3</sup>). Osim toga, ovisno o gustoći razlikuju se polietilen srednje gustoće (PE-MD), polietilen vrlo visoke molekularne mase (PE-UHMW) i linearni polietilen niske gustoće (PE-LLD).

Talište monokristalnog polietilena, dobivenog iz otopine, iznosi 143 °C i gustoća 1,002 gcm<sup>-3</sup>, dok je staklište amorfne faze – 85°C i gustoće 0,847 gcm<sup>-3</sup>. U komercijalnom polietilenu izmjenjuju se kristalna i amorfna područja (slika 1.1.) izgrađujući, među ostalim, različite morfološke tvorevine, najčešće sferolite. [1], [4]



**Sl.4.** Pojedinačni sferoliti (a) i sferoliti snimljeni polarizacijskim mikroskopom (b) u kristaliziranom poli(etilen-dioksidu). [3]

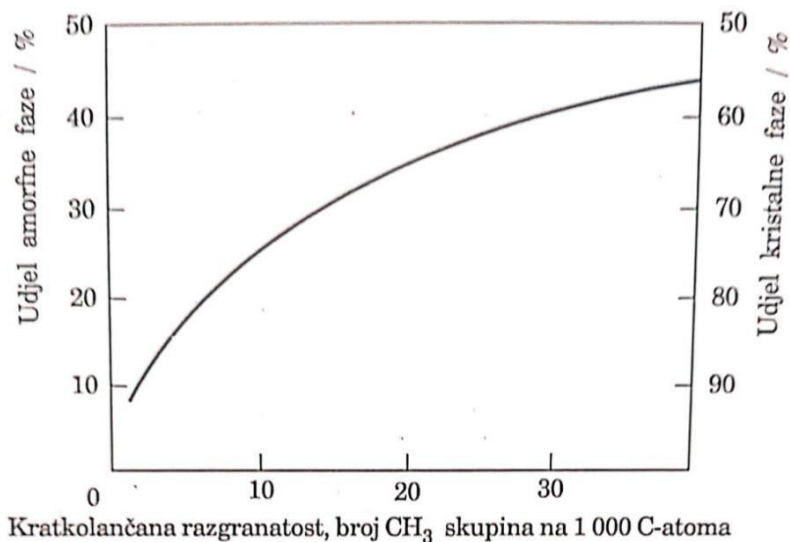
Zato je gustoća komercijalnih polietilena 0,910–0,980 gcm<sup>-3</sup> uz stupanj kristalnosti 40–90%. Stupanj kristalnosti kao posljedica sređene, pravilne strukture, ovisi prije svega o građi samih makromolekula. Naime, linearne polietilenska makromolekule sadrže i određen broj bočnih skupina koje mogu biti kratkolančane i dugolančane. Kratkolančana granatost molekula polietilena sastoji se najviše od butilnih, zatim metilnih, etilnih i vinilnih skupina. [4]





**SI.5.** Shematski prikaz rasporeda makromolekula u polietilenu [4]

Njihova zastupljenost, odnosno općenita mjera za granatost polietilenskih makromolekula, određena je brojem metilnih skupina na 1000 C-atoma (ili CH<sub>2</sub> skupina) temeljnog lanca i iznosi do 80. Dugolančana granatost iznosi samo do dvije skupine po makromolekuli temeljnog lanca, ali bitno utječe na raspodjelu molekulnih masa te na njegova reološka i druga svojstva. Bočne skupine onemogućuju gusto slaganje lančanih segmenata, pa se s povećanjem granatosti smanjuje stupanj kristalnosti (slika 6.) [4]

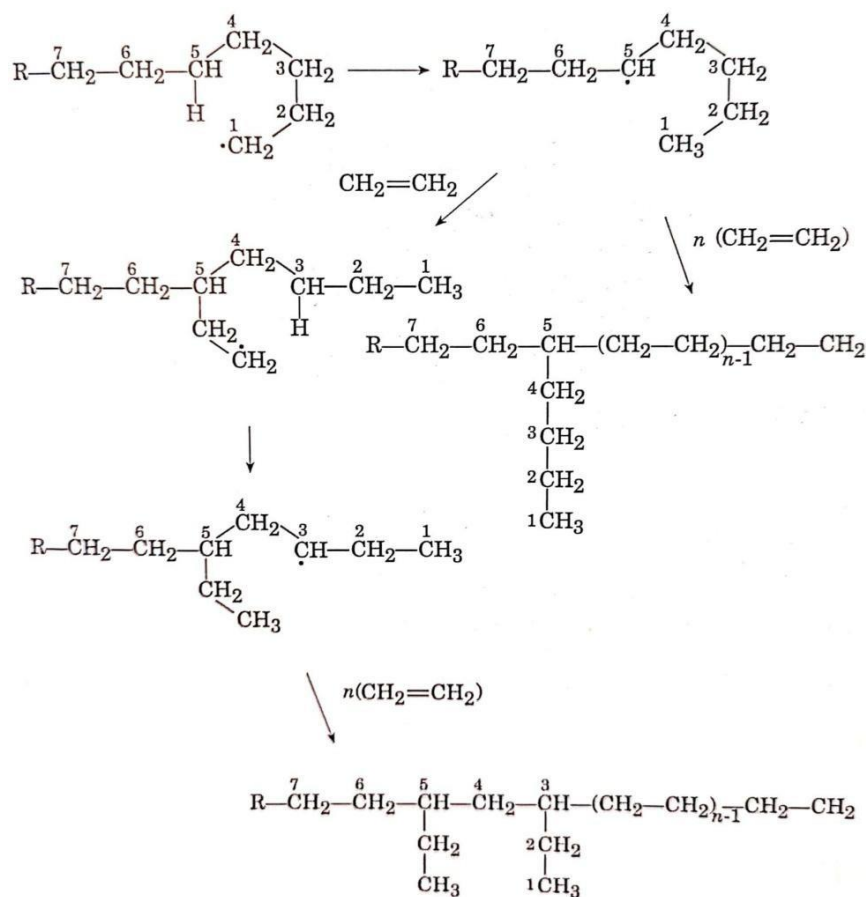


**SI.6.** Ovisnost stupnja kristalnosti o kratkolančanoj granatosti makromolekula polietilena [4]

Do granate strukture molekula polietilena najviše dolazi procesom polimerizacije. Ovakva vrsta polimera nastaje iz monomera sintezom, tj procesom lančane polimerizacije koja se još naziva i poliadicija. Lančana polimerizacija je adicijska reakcija u kojoj međusobno reagiraju monomeri s dvostrukom vezom. Takvi monomeri još se nazivaju uvjetno bifunkcionalni monomeri. Oni, u povoljnim uvjetima mogu polimerizirati u linearne makromolekule. Nemaju

funkcionalne skupine nego do njihovog povezivanja dolazi pucanjem dvostruke veze i stvaranjem vrlo reaktivnih molekulnih vrsta – radikala. Zato se za polimerizaciju polietilena kaže da nastaje radikalnim mehanizmom. [2]

Nastajanje kratkolančane granatosti zbiva se prijenosom vodikova atoma tijekom rasta polimernog lanca, a oduzimanjem vodikova atoma nastaje dugolančana granatost. Stvaranje kratkolančane granatosti butilnih skupina tumači se prostornom i energijskom pogodnošću nastajanja šesteročlane cikličke strukture na kraju rastućeg polimernog radikala. Vodik lagano prelazi na krajnji ugljikov radikal, a rast lanca se zatim nastavlja na novom radikalnom mjestu:



SI.7. Shematski prikaz nastajanja granatosti strukture molekula polietilena [4]

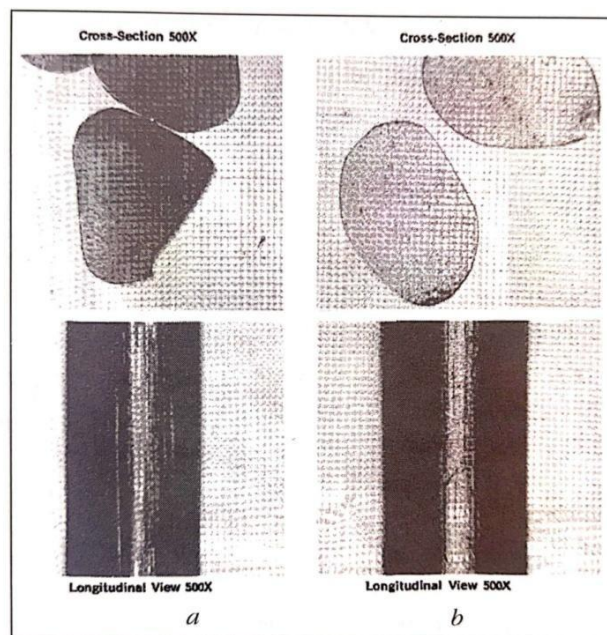
Sličnim mehanizmom nastaju i druge skupine kratkolančane granatosti molekula polietilena.

S porastom gustoće povećava se talište i većina mehaničkih svojstava, među njima tvrdoća, rastezna čvrstoća, prekidno istezanje, otpor prema puzanju, krutost, a također i kemijska postojanost. Osim toga, smanjuje se propusnost kapljevina i plinova. S druge strane, s

porastom gustoće smanjuje se savitljivost, prozirnost, žilavost i postojanost prema nastajanju napuklina uslijed naprezanja. Prosječna molekularna masa polietilena vrlo je važna njegova značajka, posebno što o njoj ovisi sposobnost preradbe. Polietileni niske molekularne mase odlikuju se visokom tecivošću i takvi su tipovi pogodni za preradu injekcijskim prešanjem. Tipovi polietilena visoke molekularne mase odlikuju se niskom tecivošću te su pogodni za preradu ekstrudiranjem i toplim oblikovanjem. Da bi se od polietilena proizvela vlakna prihvatljivih odn. zadovoljavajućih uporabnih svojstava, potrebna je velika molekularna masa polimera (oko 400 000), zbog čega postoje teškoće u ispredanju. Iz polimera se vlakna ispredaju postupkom iz taline, koja je zbog velike savitljivosti dugih alifatskih makromolekula veoma gusta i viskozna, pa se teško protiskuje kroz mlaznicu. Zbog toga se mora zagrijavati na temperaturu blizu termičkog raspada (uz nužan dodatak antioksidanta) kako bi se viskoznost smanjila i omogućila ispredivost kroz mlaznicu. Iz tog se razloga ispredaju relativno gruba vlakna ili se proizvodi film (folija) što je znatno manje tehničko-tehnološki zahtjevno od proizvodnje vlakana. Folija se potom reže ili trga u vrpčasta vlakna. [1], [5]

Da bi se dobila zadovoljavajuća mehanička svojstva, svježe ispredena vlakna se moraju u liniji vlakana istegnuti i na deseterostruku duljinu (omjer tehnološkog istežanja OTI = 10:1) pa je postignuta čvrstoća manja (18-21 cN/tex). Područje toplinskog omekšavanja im je pri nižim temperaturama-iznad 85°C, a tale se pri 130°C do 132°C. Kemijska otpornost im je vrlo dobra, te izvrsno podnose ultraljubičasto zračenje. [5]

Proizvode se tipovi vlakana male, srednje i velike gustoće, što se donekle odražava i na izgled mikroskopske slike. [5]



**SI.8.** Mikroskopska slika PE vlakana; a- vlakno srednje gustoće, b- vlakno male gustoće [5]

Sve vrste polietilena karakterizira niska cijena, dobra postojanost na kemikalije, dobra električna svojstva, jednostavnost preradbe i odlična mehanička svojstva u području nižih temperatura. [1]

### **3.2. Polietilen-uhmw (ultra high molecular weight polyethylene)- polietilen visoke gustoće i vrlo velikih molekulnih masa**

Polietilensko vlakno ultra visoke molekularne mase vlakno je visokih mehaničkih performansi. Modul mu je veći od  $70 \text{ GNm}^{-2}$ , a čvrstoća po specifičnoj težini 15 puta veća od čelika i dvostruko jača od aromatičnih poliamida. Polietilen vrlo velikih molekulnih masa ima visoku otpornost na abraziju, te je istovremeno vrlo žilav. Kemijska otpornost i otpornost pucanju optimizirani su u odnosu na standarde polietilena visoke gustoće (PE-HD). Temperatura pri kojoj PE-UHMW ne mijenja svoja svojstva kreće se između  $-150^{\circ}\text{C}$  i  $90^{\circ}\text{C}$ . Ova se vlakna danas koriste u jačanju kompozitnih materijala za zaštitu od mehaničkih udara. [6], [7]

#### Svojstva PE-UHMW

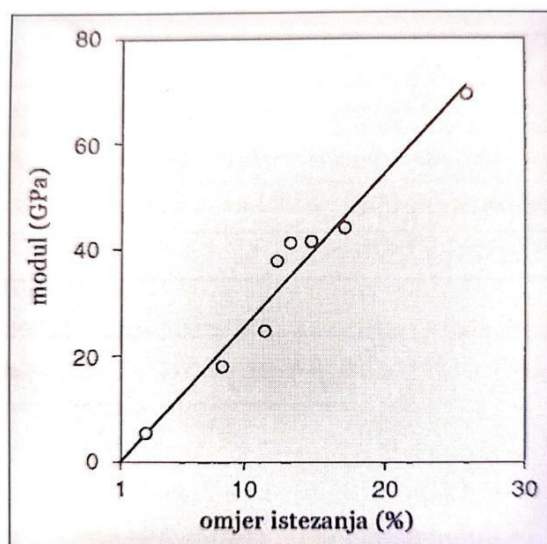
- niska gustoća
- velika žilavost
- veliko produljenje, elongacija
- savitljiva
- vrlo dobra električna i dielektrična svojstva
- jako niska sposobnost absorpcije vode
- niska propusnost vodene pare
- visoka kemijska otpornost
- dobra zaštita od pucanja, dobra postojanost na habanje
- glatka površina
- ne preporuča se zavarivanje [5], [6]

Navedena svojstva propisana su sljedećim ISO normama:

- ✓ Specific Gravity, ISO 1183

- ✓ Moisture Absorption at Equilibrium, ISO 62
- ✓ Water Absorption at Saturation, ISO 62
- ✓ Hardness, Shore D, ISO 868
- ✓ Ball Indentation Hardness, ISO 2039
- ✓ Tensile Strength at Break, ISO 527
- ✓ Tensile Strength, Yield, ISO 527
- ✓ Elongation at Break, ISO 527
- ✓ Elongation at Yield, ISO 527
- ✓ Modulus of Elasticity, ISO 527
- ✓ Flexural Strength, ISO 178
- ✓ Charpy Impact Unnotched, ISO 179
- ✓ Charpy Impact, Notched, ISO 179
- ✓ Volume Resistivity, IEC 60093
- ✓ Surface Resistance, IEC 60093
- ✓ Dielectric Constant, IEC 60250
- ✓ Dielectric Strength, IEC 60243-1
- ✓ Dielectric Loss Index, IEC 60250
- ✓ Comparative Tracking Index, IEC 60112
- ✓ CTE, linear, ISO 11359
- ✓ Thermal Conductivity, ISO 22007-4
- ✓ Melting Point, DIN EN ISO 3146
- ✓ Maximum Service Temperature, Air, UL 746B
- ✓ Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi), ISO 75
- ✓ Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi), ISO 75
- ✓ Vicat Softening Point, ISO 306, VST/B/50
- ✓ Minimum Service Temperature, Air, UL 746B
- ✓ Flammability, UL94, UL 94, test results without UL registration
- ✓ Oxygen Index, ASTM D2863 [6]

Osnovni im je nedostatak relativno mala toplinska stabilnost (u odnosu na aramidna vlakna), ali uz specijalnu obradu vlakana otpornost na toplinu može se povećati, tako da se UHMPE vlakna u upotrebi mogu izložiti temperaturama do 200°C. Već prema molekularnoj masi polimera i primjenjenom stupnju istezanja dobivaju se vlakna vlačne čvrstoće 300 do 350 cN/tex, uz produljenje pri prekidu od samo 3 do 4%. Ovisno o stupnju istezanja modul elastičnosti je u području 100 do 180 N/tex (~100 do 170 GPa), a utvrđeno je da se modul linearno povećava s omjerom istezanja. [5]



**SI.9.** Ovisnost modula elastičnosti o omjeru istezanja [5]

Vrijednost mehaničkih svojstava ovih vlakana gotovo su dvostruko veća od odgovarajućih karakteristika aramidnih vlakana, pa i mnogih drugih vlakana visokih svojstava.

**Tab.2.** Usporedba ultračvrstih polietilenskih vlakana i Kevlara [5]

Svojstvo	UHMPE polietilenska vlakna		Kevlar
	Spectra	Dyneema	
Vlačna čvrstoća, cN/tex	340 - 360	280 - 330	150 - 250
Prekidno istezanje, %	3 - 6	3 - 4	1 - 4
Modul elastičnosti, N/tex	150 - 200	160 - 170	41 - 100
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	0,97	0,97	1,44
Rel. čvrstoća u čvoru, %	50	50	30 - 50

Uz vrhunska mehanička svojstva, UHMPE vlakna imaju i vrlo veliku sposobnost apsorpcije kinetičke energije pri naglim udarcima, što ih čini vrlo pogodnim za izradu zaštitne odjeće, kako za balističku zaštitu, tako i za zaštitu u mnogim drugim rizičnim poslovima i sportu. Prednost ovih vlakana je što se lakše prerađuju u tekstilne predmete, a odjeća je laganija i udobnija od one izrađene od drugih ultračvrstih vlakana poput p-aramida. [5]

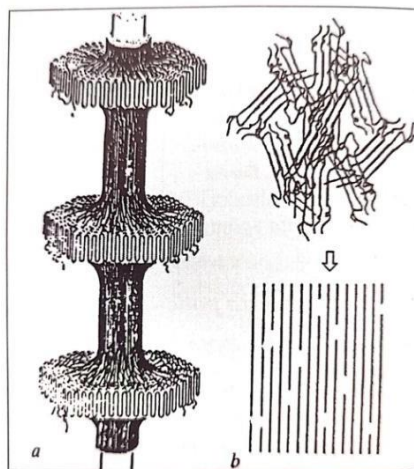
Na primjeru polietilenskog vlakna najočitije se može spoznati ovisnost svojstava umjetnih vlakana o njihovoj molekularnoj strukturi i značenje koje pritom ima tehnologija ispredanja i procesni parametri tj. visoka tehnologija. Niti jedno drugo vlakno nema tako jednostavnu kemijsku građu kao polietilensko: [-CH<sub>2</sub>-]. [5]

Uobičajenim postupkom ispredanja dobiva se jedva upotrebljivo vlakno, a gel-postupkom u kojem su procesni parametri u funkciji postizanja određene nadmolekulne strukture, mogu se dobiti vlakna najveće čvrstoće u skupini organskih vlakana, a čvršća i od ugljičnih, staklenih i čeličnih. [5]

Ultračvrsta vlakna moguće je dobiti specijalnim postupkom gel-ispredanja iz otopine linearnog polimera izuzetno dugačkih makromolekula. Naziv je postupak dobio zbog toga što filament nakon ekstruzije i hlađenja izgledaju poput gela i u takvom se stanju mogu oblikovati u vlakno izuzetnih svojstava. Takva vlakna vrlo su velike vlačne čvrstoće i vrlo velikog modula elastičnosti. [5]

Za dobivanje visokih svojstava vlakana ključni su sljedeći elementi:

- Velika relativna molekularna masa polaznog linearnog polimera (2 do 5 milijuna)
- Izrazita linearnost molekula
- Specijalni gel-postupak ispredanja niti tijekom kojeg se polimernu tekućinu najprije dovodi u stanje gela koje omogućuje da se u ekstrudiranom polimernom mlazu, pri njegovom hlađenju i skrućivanju, postigne specijalna kristalna šiš-kebab struktura. To je struktura u kojoj se izmjenjuju kristalni elementi od naboranih makromolekula- lamela i fibrili, tj. kristalni elementi koji tvore ispružene makromolekule
- Završno intenzivno istezanje u tri stupnja do postizanja stostruke duljine (ukupni omjer istezanja do 100:1), pri čemu lamelasti kristali od naboranih makromolekula prelaze u fibrilni oblik s gotovo potpuno ispravljenim makromolekulnim lancima. [5]



**Sl.10.** Shematski prikaz tvorbe strukture UHMPE vlakna ; a- šiš-kebab struktura, b- ispravljanje naboranih molekula i prijelaz lamela u fibril [5]

## 4.ŠTITNICI

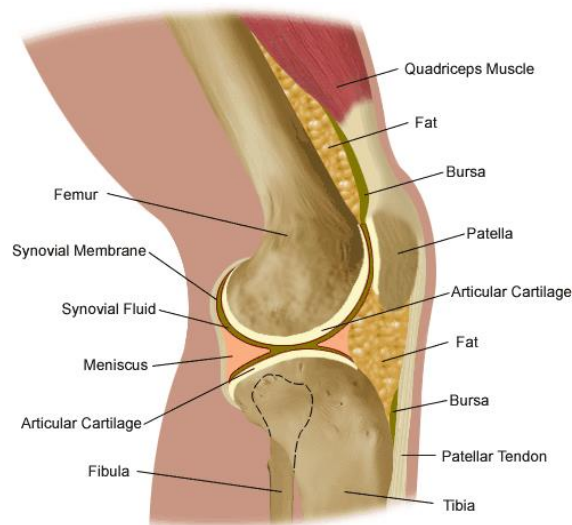
Prevenција ozljeda jedna je od glavnih briga sudionika u mnogim vrstama sporta i igara, a u posljednje vrijeme privlači sve veću pažnju istraživanja. Da bi zaštita od udara bila osigurana odjećom ili sportskom opremom poput zaštitnih kaciga, potrebno je koristiti tekstil i tekstilne materijale koji imaju visoku čvrstoću i izdržljivost, kao i visoku razinu apsorpcije energije. Ti se materijali pričvršćuju na odjeću na odgovarajućim mjestima, ovisno o sportskim aktivnostima i dostupnim informacijama iz analiza rizika od ozljeda različitih sportova i igara. Raznovrsni tekstil i tekstilne kompozitne strukture komercijalno su dostupne s potrebnim mehaničkim svojstvima čvrstoće, otpornosti na udarce, otpornosti na abraziju i kidanje za robusne sportove i igre na otvorenom. Industrija sportske odjeće i sportske obuće jedan je od glavnih inovatora u sektoru tekstila i odjeće te je bila pokretač mnogih novih ideja i koncepata u dizajnu materijala i proizvoda. Industriju čine velika i srednja poduzeća s nekim od najpoznatijih brandova, gdje je svaki naziv marke povezan s posebnim funkcionalnim dizajnom, kvalitetom performansi i vrstom ciljanog sporta ili igre. Ugledne tvrtke za sportsku odjeću i sportsku obuću s globalnim tržištem uključuju Nike, Adidas, Puma, Reebok, Russell Corporation, Umbro, Berghaus, Scanda, Arena, Paramo, Salomon, Rukla, Sprayway, Helly Hansen, Oscar Jacobsson i O'neal. Snažan trend kombiniranja višestruke funkcionalnosti materijala i mode u mnogim predmetima sportske odjeće i opreme, te odjeće za slobodno vrijeme rezultiralo je pojavom mnogih različitih vrsta visokotehnoških tkanina i dizajna odjeće s izvanrednim svojstvima performansi. Posao sportske odjeće i opreme postao je vrlo tehnički orijentiran, koristeći visoko funkcionalni tekstil za specijalizirane performanse u različitim sportovima, npr. dobra termička svojstva za sportske discipline koje se odvijaju prilikom lošeg vremena, aerodinamička svojstva za skijanje i plivanje, hidroizolacija koja propušta zrak za rekreaciju na otvorenom; čvrstoća i trajnost jedra. Sa pojavom inteligentnog tekstila, funkcionalnog dizajna i nosive tehnologije, inovativna rješenja postaju glavna značajka sportske odjeće i opreme. Današnja sportska odjeća i oprema postali su proizvodi dizajnirani tako da udovolje potrošačevim zahtjevima lagane težine, mekoće te prevencije protiv ozljeda, termoregulacijske, elastičnosti, antimikrobnih svojstva, izdržljivosti, estetike itd. [8]

### 4.1. Štitnici za koljena

Funkcija koljena je omogućavanje pokreta, ali i prenošenje težine tijela prema stopalima tijekom hoda. Zglobna tijela u području koljena kombinacija su konveksne zglobne površine bedrene kosti i gotovo ravne zglobne površine goljenične kosti. Na taj način povećana je



pokretljivost koljena, ali i značajno smanjena njegova stabilnost. Kako bi se povećala stabilnost koljena velika je važnost ispravne funkcije stabilizatora koljena . Mnogi ljudi različitih zanimanja doživjeli su bolove u koljenu i ozljede koljena. Koljena su dio našeg tijela koji podržavaju većinu naše tjelesne težine te nam omogućavaju svakodnevne aktivnosti kao što su hodanje, penjanje stepenicama, sjedenje, trčanje te razne sportske aktivnosti. S obzirom da je svake godine više od 8 posto svih ozljeda povezano s koljenom, što obično rezultira najmanje dva tjedna odmora da ozdravimo ovu vrstu ozljeda, moramo čuvati koljena i podržati ih raznim pomagalicama.



**Sl.11.** Prikaz unutarnjih dijelova koljena [9]

Ozljeda koljena česta je pojava prilikom bavljenja svim sportskim disciplinama, pa tako i biciklizmom. Mogućnost pada direktno na koljeno uistinu je velika. Kako bi izbjegli ozljedu prilikom uživanja u omiljenim sportskim aktivnostima bitno je imati odgovarajuću opremu. U ovom slučaju, kvalitetne štitnike za koljena. Štitnici za koljena samo su jedan od načina prevencije i zaštite tijela od ozljeda.

Štitnici za koljena u osnovi su zaštitna mjera za očuvanje koljena zdravim i sprečavanje ozljeda. Obično ih se opisuje kao zaštitnu opremu jer su najbolji način na koji možete zaštititi koljena. Čak i ako padnete ili primite udarac na koljeno, štitnici za koljena povećavaju površinu koja je u kontaktu s podom za čak 10 do 20 puta te mogu apsorbirati silu udarca. Time značajno smanjuju učinak koji udarac ima na koljena sprječavajući ozbiljne ozljede i smanjujući vrijeme ozdravljenja uslijed eventualne ozljede. Istraživanje provedeno za Američki časopis za epidemiologiju (Journal of Epidemiology) sugerira da nošenje štitnika za koljena smanjuje rizik od ozljeda za više od 50 posto, što samo dokazuje da je točka štitnika za koljena zaista krajnja zaštitna mjera.

Još jedna uobičajena upotreba štitnika za koljena jest pojačavanje performansi. Štitnici za koljena mogu povećati performanse među sportašima ili vojnim osobama, jer takvi štitnici omogućuju sigurno i pouzdano izvođenje akcija poput visokih skokova i savijanja koje bi u suprotnom dovele do velikog stresa na koljenima. Mnogi, također, koriste štitnike za koljena kao način da pomognu koljenima da traju duže i očuvaju raspon pokreta koljena. Štitnici za koljena omogućavaju koljenima da ostanu elastična i bez boli, tako da možete uživati u svim vrstama aktivnosti duže vrijeme.

Štitnici za koljena izrađuju se od različitih vrste materijala, prirodnih i sintetskih, ovisno o tipu i namjeni štitnika za koljena. Obično su opremljeni nekom vrstom obloga ili zaštite koljena koja će im dopustiti da zapravo rade svoj posao i zaštite naša koljena. [10], [11], [12]

#### 4.2.Štitnici za koljena od PE-UHMW



SI.12. Štitnik za koljeno [13]

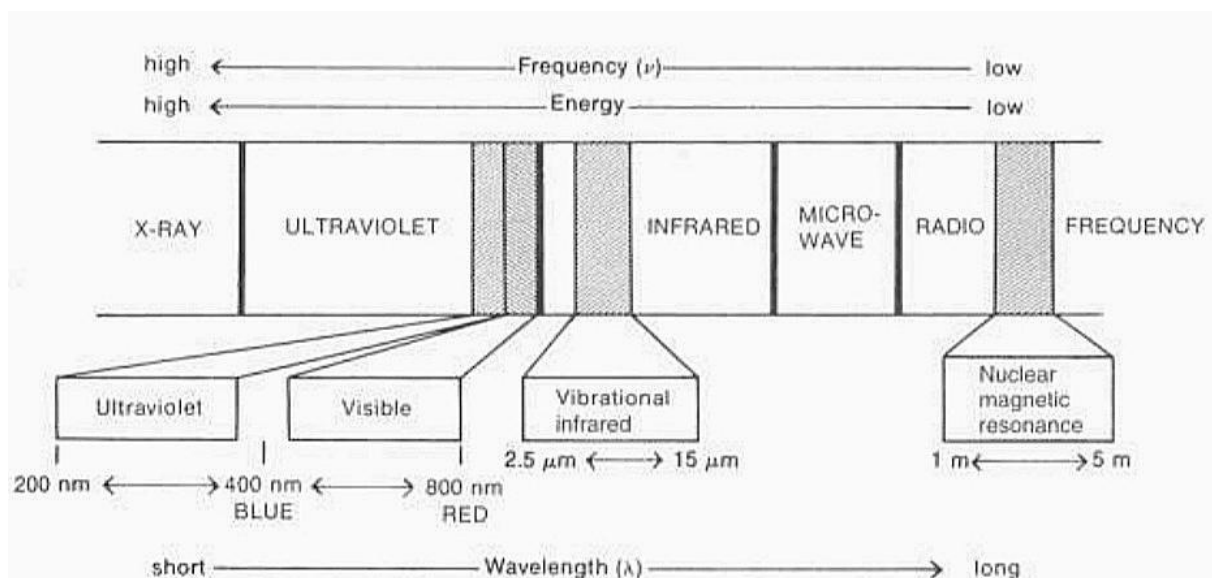
Štitnici izrađeni od PE-UHMW visoko su mehanički prilagodljivi. Uslijed djelovanja i apsorpcije udarne sile prilikom pada dolazi do mijenjanja strukture štitnika, točnije pregrupacije područja unutar strukture vlakna. Tako naizgled pjenasti štitnik, pod utjecajem udarne sile, postaje tvrdi zaštitni oklop za koljeno. Tvrdća štitnika proporcionalno raste s jačinom sile koja na njega djeluje. U normalnom stanju, molekule se kreću jedna pored druge pri malim brzinama kretanja, ali kada su podvrgnute udarcima koji bi zahtijevali da se kreću vrlo brzo, oni se trenutačno zaključavaju i stvaraju krutu zaštitnu barijeru. Čim učinak prođe,

otključavaju se kako bi pružili normalnu fleksibilnost. Tako odjeća ne ograničava pokrete tijela kao konvencionalni proizvodi za oklop tijela, već pruža zaštitu kada je to potrebno. [8]

## 5. METODE ANALIZE POLIMERA

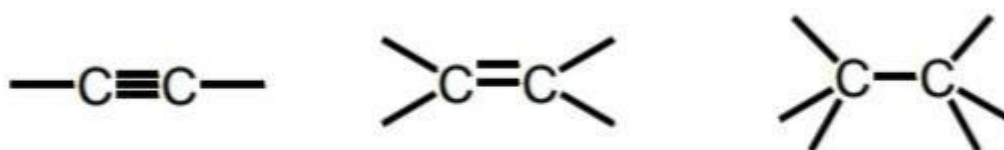
### 5.1. Infracrvena (IR) spektroskopija

Infracrvena (IR) spektroskopija instrumentalna je metoda za detekciju, odnosno identifikaciju funkcionalnih skupina prisutnih u molekuli. Kada govorimo o IR spektroskopiji, podrazumijevamo područje spektra elektromagnetskog zračenja u rasponu od 2,5-15,0  $\mu\text{m}$ .



SI.13. Spektar elektromagnetskog zračenja [14]

IR spektar je snimka apsorbiranog svjetla kao funkcija valne duljine. Apsorbira se samo svjetlo čija se frekvencija podudara s frekvencijom vibracija veze u molekuli, odnosno frekvencije radijacije i vibracije moraju biti iste da bi došlo do apsorpcije. Faktori koji određuju apsorpcijski položaj su jačina veze, masa atoma u vezi (uz istu jakost veze) i vrsta vibracije, a jačinu veze određujemo iz energija disocijacije molekule promatrane molekule. [14]

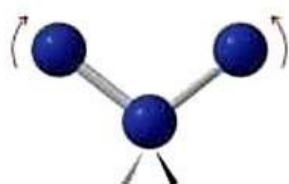


Postoje sljedeće vrste vibracija:

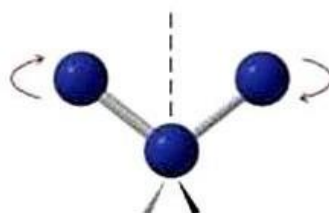
- RASTEZANJE (STRETCHING), kojima odgovaraju veće vrijednosti valnog broja  $\nu$
- SVIJANJE (BENDING ili deformacijske vibracije), kojima odgovaraju niži valni brojevi, a koje mogu biti simetrične i asimetrične. [14]



*rastezne vibracije*



Vibracije svijanja  
u ravnini ("scissoring"  
ili ravninska **strižna** vibr.)  
Postoji i r. **njihajna** vibr.!

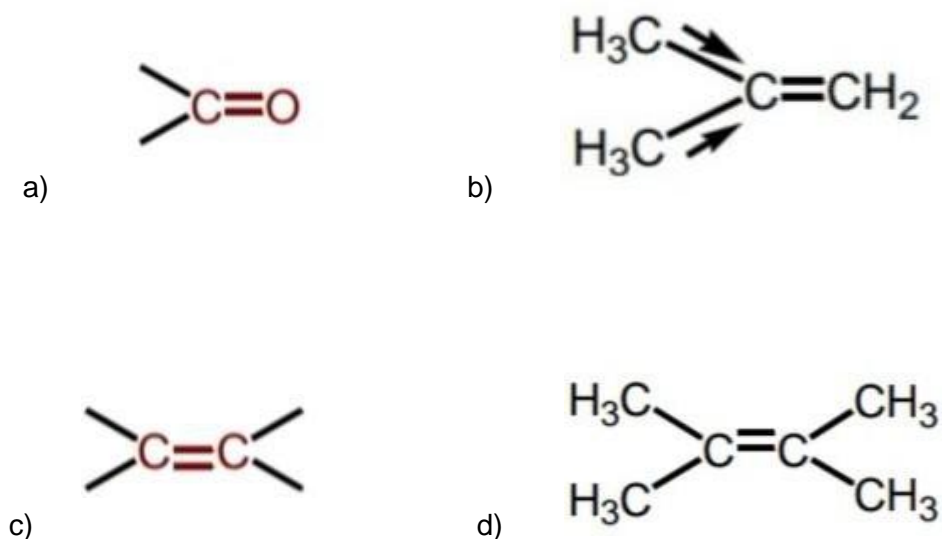


Vibracije svijanja  
izvan ravnine; izvijanje ("twisting"  
ili neravninska **uvojna** vibr.)  
Postoji i n. **njihajna** vibracija!

*vibracije svijanja*

#### SI.14. Vrste vibracija [14]

Na slici 15 opisane su karakteristike nekih specifičnih vrpca koje se pojavljuju pri snimanju IR spektara, te su dati njihovi karakteristični odzivi:



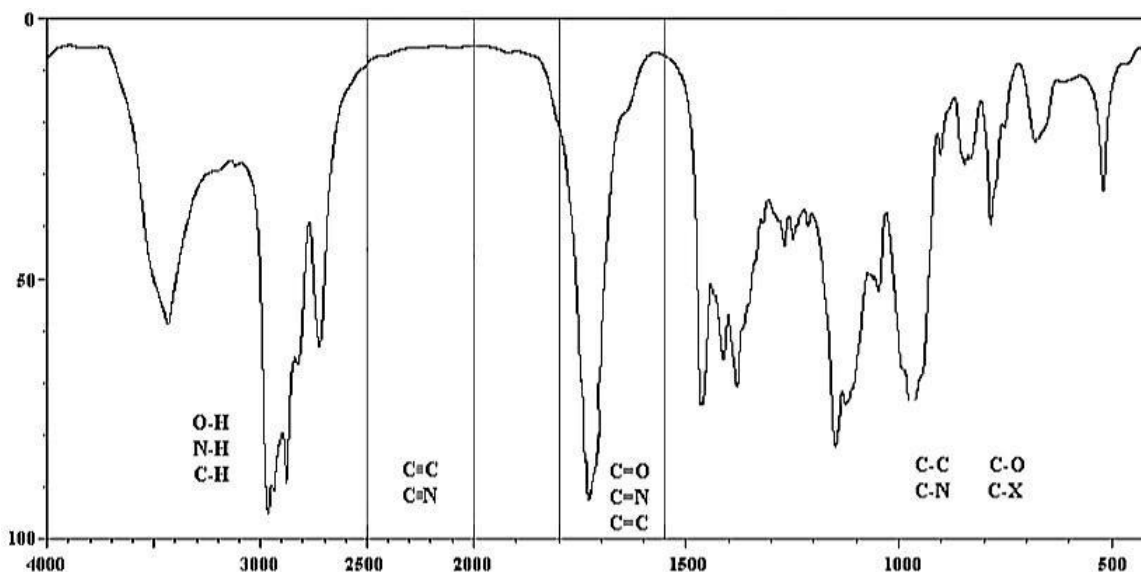
**Sl.15. (a,b,c,d)** Prikaz karakterističnih vrpca u IR spektrima [14]

- a) Izrazito jak signal u IR spektru posljedica je promjene dipolnog momenta molekule
- b) Induktivni efekt  $\text{CH}_3$  skupina dovodi do polarizacije veze. Rastezanjem dolazi do promjene dipolnog momenta kao funkcije udaljenosti
- c) U IR spektru veza je aktivna na  $1640 \text{ cm}^{-1}$
- d) Nema dipolnog momenta niti njegove promjene; IR vrpca je inaktivna; iako vibracije postoje one se ne vide.

Kako smo vidjeli, postoje različite vrste vibracija rastezanja i svijanja uzrokovanih apsorpcijom energije infracrvenog spektra. Stvarne relativne frekvencije vibracija mogu se predvidjeti. Veze s "lakšim" atomima vibriraju uvijek brže od onih s "težim" atomima. Trostruke veze (koje su jače) vibriraju pri višim frekvencijama od dvostrukih veza, dok dvostruke veze vibriraju pri višim frekvencijama od jednostrukih veza. [14]

## 5.2. Infracrveni (IR) spektar

Infracrveni spektar (Slika 4.) prikazuje karakteristične vrpce funkcionalnih skupina u točno unaprijed definiranim područjima valnih brojeva, prilikom čega je na apscisi uvijek valni broj ( $\text{cm}^{-1}$ ), a na ordinati apsorbancija (%). [14]



SI.16. Infracrveni (IR) spektar [14]

Područje od 500-1500  $\text{cm}^{-1}$ , naziva se područje “otiska prsta” (fingerprint region), prema kojem se sa potpunom sigurnošću može tvrditi radi li se o identičnoj molekuli ili ne uspoređujući dva infracrvena spektra. IR spektar molekule obično sadrži veliki broj pikova, dodatni pikovi rezultat su preklopljenih (overtone, harmonic) pikova koji su slabiji i niže frekvencije, a kaže se da je jedan infracrveni spektar zapravo otisak prsta cijele molekule, jer je jedinstven za pojedinu molekulu. [14]

Kada govorimo o interpretaciji IR spektara, treba naglasiti da se općenito samo određeni signali interpretiraju u IR spektrima, te se nikada ne pripisuju sve vrpce nekoj funkcionalnoj skupini. Zapravo se iz podataka o valnom broju na kojima se pojavljuju određene vrpce pri definiranim područjima IR spektra, definira tip molekule, vrsta veze koja u promatranoj molekuli postoji. Na taj način, nepoznata molekula, može se svrstati u određenu skupinu molekula prema posjedovanju karakterističnih veza/skupina, ali se nikako ne može donijeti interpretacijom IR spektra zaključak o kompletnoj strukturi ispitivane molekule. Za tako nešto, potrebno je kombinirati informacije prikupljene analizom rezultata drugih spektroskopskih/spektrometrijskih tehnika. [14]

Kada govorimo o ugljikovodicima, treba istaknuti da se karakteristične vibracije C-H rastezanja nalaze uvijek u području od 2800-3300  $\text{cm}^{-1}$ . C-H veze u kojima je veći udio s karaktera veze su kraće, jače i pokazuju vibracije pri višim frekvencijama, pa se tako C-H veze na  $\text{sp}$  centrima javljaju kod 3000-3100  $\text{cm}^{-1}$ , C-H veze na  $\text{sp}^2$  centrima javljaju se kod 3080  $\text{cm}^{-1}$ , dok se C-H veze na  $\text{sp}^3$  centrima nalaze kod ~ 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ . Kada se govori o višestrukim vezama, frekvencije vibracija rastezanja C-C veze su jedine korisne. Tako C-C

dvostruke veze pokazuju signale pri 1620-1680  $\text{cm}^{-1}$ , dok C-C trostruke veze pokazuju signale pri 2100-2260  $\text{cm}^{-1}$ . Svi ovi signali odsutni su u simetričnim dvostrukim i trostrukim vezama. U tablici 3. prikazan je pregled svih karakterističnih područja vrpca za pojedine tipove veza, pojedine funkcionalne skupine molekule, prema kojima se dobiva uvid u podatak kojoj skupini spojeva određena/ispitivana molekula pripada. Naglašeni su uz frekvencije i intenziteti vrpca, koji su u pojedinim sličajevima također vrlo karakteristični za pojedinu funkcionalnu skupinu. Prilikom pregleda podataka, posebnu pažnju treba posvetiti podacima koji se odnose na alkene i arome, kod kojih se na osnovi karakterističnih vrpca u području „otiska prsta“ može definirati i tip supstitucije na dvostrukoj vezi ili na aromatskom prstenu. [14]

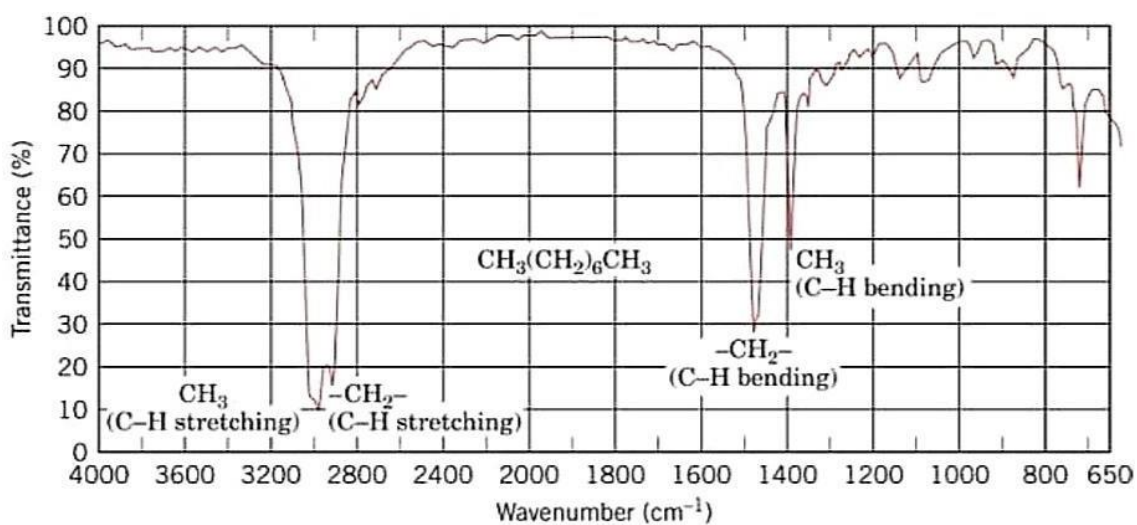
**Tab.3.** Područja valnih brojeva vibracijskih vrpca i pripadajući intenziteti za skupine organskih molekula [14]

Group	Frequency Range ( $\text{cm}^{-1}$ )	Intensity <sup>a</sup>	
<b>A. Alkyl</b>			
C—H (stretching)	2853–2962	(m–s)	
Isopropyl, —CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1380–1385	(s)	
	and 1365–1370	(s)	
<i>tert</i> -Butyl, —C(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	1385–1395	(m)	
	and ~ 1365	(s)	
<b>B. Alkenyl</b>			
C—H (stretching)	3010–3095	(m)	
C=C (stretching)	1620–1680	(v)	
R—CH=CH <sub>2</sub>	985–1000	(s)	
R <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub>	and (out-of-plane C—H bendings)	905–920	(s)
		880–900	(s)
<i>cis</i> -RCH=CHR	675–730	(s)	
<i>trans</i> -RCH=CHR	960–975	(s)	
<b>C. Alkynyl</b>			
≡C—H (stretching)	~ 3300	(s)	
C≡C (stretching)	2100–2260	(v)	

<b>D. Aromatic</b>		
Ar—H (stretching)	~ 3030	(v)
Aromatic substitution type		
(C—H out-of-plane bendings)		
Monosubstituted	690–710	(very s)
<i>o</i> -Disubstituted	and 730–770	(very s)
<i>m</i> -Disubstituted	735–770	(s)
	680–725	(s)
	and 750–810	(very s)
<i>p</i> -Disubstituted	800–860	(very s)
<b>E. Alcohols, Phenols, and Carboxylic Acids</b>		
O—H (stretching)		
Alcohols, phenols (dilute solutions)	3590–3650	(sharp, v)
Alcohols, phenols (hydrogen bonded)	3200–3550	(broad, s)
Carboxylic acids (hydrogen bonded)	2500–3000	(broad, v)
<b>F. Aldehydes, Ketones, Esters, and Carboxylic Acids</b>		
C=O (stretching)		
Aldehydes	1630–1780	(s)
Ketones	1690–1740	(s)
Esters	1680–1750	(s)
Carboxylic acids	1735–1750	(s)
Amides	1710–1780	(s)
Amides	1630–1690	(s)
<b>G. Amines</b>		
N—H		
	3300–3500	(m)
<b>H. Nitriles</b>		
C≡N		
	2220–2260	(m)

<sup>a</sup>Abbreviations: s = strong, m = medium, w = weak, v = variable, ~ = approximately.

U nastavku su prikazani primjeri IR spektara pojedinih skupina organskih molekula. Kao prvi primjer uzet je primjer predstavnika alkana, pa je na slici 17 prikazan infracrveni spektar oktana. Za alkane su jedino karakteristične vrpce za vibracije rastezanja i svijanja CH veza u metilnim ili metilenskim skupinama, za koje su karakteristična područja data u tablici 3.



SI.17. Infracrveni spektar molekule alkana/oktana [14]



## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad prikazuje pregled razvoja polimera koji se koriste kao štitnici u biciklističkoj opremi, te prikazuje materijale koji su se proširili na ogroman spektar različitih umjetnih materijala. Prevencija ozljeda uporabom polimernih štitnika u posljednje vrijeme privlači sve veću pažnju istraživanja. Da bi zaštita od udara bila osigurana odjećom ili sportskom opremom poput štitnika za koljena, potrebno je koristiti tekstil i tekstilne materijale koji imaju visoku čvrstoću i izdržljivost, kao i visoku razinu apsorpcije energije. Ti se materijali pričvršćuju na odjeću na odgovarajućim mjestima, ovisno o sportskim aktivnostima i dostupnim informacijama iz analiza rizika od ozljeda različitih sportova i igara. Raznovrsni tekstil i tekstilne kompozitne strukture komercijalno su dostupne s potrebnim mehaničkim svojstvima čvrstoće, otpornosti na udarce, otpornosti na abraziju i kidanje za robusne sportove i igre na otvorenom. Industrija sportske odjeće i sportske obuće stoga je jedan od glavnih inovatora u sektoru tekstila i odjeće te je pokretač novih ideja i koncepata dizajna materijala i proizvoda.

## 7. LITERATURA

- [1] Ivanišević M.: Trendovi razvoja industrije polimera u RH, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [2] Privatna bilježnica iz kolegija Vlakna II na temelju prezentacija doc. dr. sc. R. Brunšek, prof. dr. sc. E. Vujasinović, 2018./2019.
- [3] Dolčić I.: Mehanička svojstva polimera, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2015.
- [4] Janović Z.: Polimerizacije i polimeri, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 1997.
- [5] Čunko R., Andrassy M.: Vlakna, Zrinski d.d., Zagreb, 2005.
- [6] GEHR Plastics PE-UHMW Polyethylene, Ultra High Molecular Weight;  
<http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=22492cab9c3487493a3dd214fc4a3dd> , pristup 27.5.2019.
- [7] Scott R. A.: Textiles for protection, The Textile Institute, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, 2005.
- [8] Shishoo R.: Textiles in sport, , The Textile Institute, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, 2005.
- [9] Prikaz unutarnjih dijelova koljena;  
[https://recoilkneepads.com/blogs/blog/7-professionals-who-must-need-knee-pads-for-work-surely?fbclid=IwAR2SVdkTN66r\\_sE\\_OVUCUyCZHq0m0KzoygTgVTnrHLp8lNFm2Th9g1W8fk8](https://recoilkneepads.com/blogs/blog/7-professionals-who-must-need-knee-pads-for-work-surely?fbclid=IwAR2SVdkTN66r_sE_OVUCUyCZHq0m0KzoygTgVTnrHLp8lNFm2Th9g1W8fk8) , pristup 15.8.2019.
- [10] Ozljede prednjeg ukriženog ligamenta koljena, Bolnica Sv. Katarina, centar za ortopediju;  
<https://www.svkatarina.hr/hr/centar-za-ortopediju/ozljede-prednjeg-ukriženog-ligamenta-koljen> , pristup 13.8.2019.
- [11] Zašto su štitnici za koljena važni?, Mandura, zaštitna oprema;  
[https://mandura.hr/zasto-su-stitnici-za-koljena-vazni/?fbclid=IwAR3GNHI6Bd\\_seegLiqBwk-Qzv4wbwydH\\_NOQHK\\_PkTqRmpQYp1SEh47qHKQ](https://mandura.hr/zasto-su-stitnici-za-koljena-vazni/?fbclid=IwAR3GNHI6Bd_seegLiqBwk-Qzv4wbwydH_NOQHK_PkTqRmpQYp1SEh47qHKQ) , pristup 13.8.2019.

**[12]** What are knee pads and where are they used?, Knee protection guide, Protect your knees;

[http://kneesafe.com/what-are-knee-pads-and-where-are-they-used/?fbclid=IwAR0cLEI\\_YOD\\_wqIkbACUnSRCRmcVLhzYb5jHEam2SHN6a66KeZPma0hz\\_WE](http://kneesafe.com/what-are-knee-pads-and-where-are-they-used/?fbclid=IwAR0cLEI_YOD_wqIkbACUnSRCRmcVLhzYb5jHEam2SHN6a66KeZPma0hz_WE) , pristup 13.8. 2019.

**[13]** Slika štitnika za koljeno, Štitnik koljena O'Neal AMX Zipper III Black, Marko Projekt Bikeshop;

[https://markoprojekt.com/stitnik-koljena-oneal-amx-zipper-iii-black-proizvod-7868/#variationdetail7868\\_7868](https://markoprojekt.com/stitnik-koljena-oneal-amx-zipper-iii-black-proizvod-7868/#variationdetail7868_7868) , pristup 16.8.2019.

**[14]** Škorić I.: Molekulska spektroskopija, nastavni tekst, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2018./2019.

## 8. POPIS SLIKA I TABLICA

**SI.1.** Utjecaj molekulne mase na neka mehanička svojstva plastomera [3]

**SI. 2.** Umreženi polimer [3]

**SI. 3.** Struktura vulkaniziranog kaučuka [3]

**SI.4.** Pojedinačni sferoliti (a) i sferoliti snimljeni polarizacijskim mikroskopom (b) u kristaliziranom poli(etilen-dioksidu) [3]

**SI.5.** Shematski prikaz rasporeda makromolekula u polietilenu [4]

**SI.6.** Ovisnost stupnja kristalnosti o kratkolančanoj granatosti makromolekula polietilena [4]

**SI.7.** Shematski prikaz nastajanja granatosti strukture molekula polietilena [4]

**SI.8.** Mikroskopska slika PE vlakana; a- vlakno srednje gustoće, b- vlakno male gustoće [5]

**SI.9.** Ovisnost modula elastičnosti o omjeru istezanja [5]

**SI.10.** Shematski prikaz tvorbe strukture UHMPE vlakna ; a- šiš-kebab struktura, b- ispravljanje naboranih molekula i prijelaz lamela u fibril [5]

**SI.11.** Prikaz unutarnjih dijelova koljena [9]

**SI.12.** Štitnik za koljeno [13]

**SI.13.** Spektar elektromagnetskog zračenja [14]

**SI.14.** Vrste vibracija [14]

**SI.15. (a,b,c,d)** Prikaz karakterističnih vrpci u IR spektrima [14]

**SI.16.** Infracrveni (IR) spektar [14]

**SI.17.** Infracrveni spektar molekule alkana/oktana [14]

**Tab. 1.** Vrijednost kohezijske energije (KE) tipičnih polimera za duljinu segmenta makromolekule od 0,5 nm [3]

**Tab.2.** Usporedba ultračvrstih polietilenskih vlakana i Kevlara [5]

**Tab.3.** Područja valnih brojeva vibracijskih vrpca i pripadajući intenziteti za skupine organskih molekula [14]