

## OKVIRNI PROGRAM USPOSABLJANJA MLADEGA RAZISKOVALCA (MR)<sup>1</sup>

### 1. OSNOVNI PODATKI

Ime in priimek mentorja:	<b>Klementina Pušnik Črešnar</b>	Evidenčna številka mentorja pri <a href="#">ARIS (SICRIS)</a> :	<b>344550</b>
E-naslov mentorja:	klementina.pusnik@um.si	Tel. štev. mentorja:	02220-7607
Ime in priimek vodje raziskovalnega programa:	Lidija Fras Zemljič	Evidenčna številka vodje RP pri <a href="#">ARIS (SICRIS)</a> :	19753
Naziv raziskovalnega programa:	Tekstilna kemija in napredni tekstilni materiali	Evidenčna številka RP pri <a href="#">ARIS (SICRIS)</a> :	P2-0118
Članica Univerze v Mariboru (RO UM), kjer bo potekalo usposabljanje:	FS UM	Evidenčna številka RO UM pri <a href="#">ARIS (SICRIS)</a> :	0795
Oznaka raziskovalnega področja po <a href="#">klasifikaciji ARIS</a> :	2.04 Materiali 2.04.03 Polimerni materiali	Oznaka raziskovalnega področja po klasifikaciji Ortelius:	180 Materiali 421 Tehnologija materialov

### 2. OPREDELITEV RAZISKOVALNEGA PROBLEMA IN CILJEV DOKTORSKE RAZISKAVE<sup>2</sup>

Izhodišče raziskovalne naloge mladega raziskovalca in njena umestitev v raziskovalni program v katerega je vključen mentor, delovna hipoteza, cilji raziskave in predvideni rezultati s poudarkom na izvirnem prispevku k znanosti:

#### Znanstveno ozadje

Plastika, kot ena najpomembnejših polimernih materialov, vključno s termoplasti in termoseti, igra ključno vlogo v gospodarstvu EU in vsakdanjem življenju zaradi svoje majhne mase, vzdržljivosti in stroškovne učinkovitosti. Prav tako se zaradi svoje visoke vsestranskosti široko uporablja v različnih komercialnih sektorjih, vključno z gradbeništvom, transportom, embalažo, shranjevanjem energije in biomedicino. Po zadnjih statističnih podatkih, ki jih je leta 2022 objavila organizacija Plastics Europe, je svetovna proizvodnja plastike dosegla 400,3 milijona ton (Mt), pri čemer je Evropa prispevala 58,7

<sup>1</sup> Izraz *mladi raziskovalec* je zapisan v moški slovnični obliki in je uporabljen kot nevtralen za ženske in moške.

<sup>2</sup> Raziskovalni in študijski program usposabljanja morata biti skladna z vsebino raziskovalnega programa, katerega član je mentor.

Mt. Industrija zajema približno 53.150 podjetij, zaposluje več kot 1,5 milijona ljudi in ima pomembno gospodarsko vrednost, saj ustvarja trgovinsko bilanco v višini 9,2 milijarde evrov ter letni prihodek, ki presega 400 milijard evrov. Vendar pa plastika zaradi svoje dolge življenjske dobe postane okolju škodljiv odpadek, če ni ustrezno upravljana ob koncu življenjskega cikla.

Reševanje tega izziva je ključnega pomena, in spodbuja tako akademske kot tudi industrijske sektorje k razvoju inovativnih metodologij in sintez novih kompozitnih materialov na osnovi plastike.

Ti materiali morajo biti zasnovani tako, da omogočajo učinkovito reciklažo ali predelavo, s čimer prispevajo k trajnostnemu upravljanju virov in se usklajujejo z načeli krožnega gospodarstva.

Polimerni materiali, zasnovani na **kovalentno prilagodljivih mrežah (ang. Covalent adaptable network; CANs)**, pogosto imenovanih vitrimeri, predstavljajo novo kategorijo inovativnih materialov, ki zapolnjujejo vrzel med termoseti in termoplasti ter omogočajo učinkovito predelavo in reciklažo polimerov ter predstavljajo obetajočo okoljsko rešitev.

Njihova funkcionalnost temelji predvsem na dinamični kovalentni kemiji (ang. Dynamic covalent chemistry; DCC), ki omogoča prerazporeditev vezi znotraj polimerne mreže, kar olajšuje sproščanje napetosti in strukturno preoblikovanje. Tukaj nanodelci (ang. nanoparticles ;NPs) v CAN-ih predstavljajo nov napredek na tem področju, saj lahko različni nanodelci delujejo kot specifični sprožilci dinamične tvorbe vezi, kar povečuje samo prilagodljivost materiala.

#### **CAN-i omogočajo več ključnih aplikacij:**

- **samoobnavljanje materialov:** zmožnost prerazporeditve kovalentnih vezi omogoča obnovo CAN-a po mehanskih poškodbah.,
- **reciklabilni polimeri:** CAN-i omogočajo večkratno obdelavo brez izgube strukturne celovitosti, kar povečuje okoljsko trajnost.,
- **pametni materiali:** i materiali se odzivajo na okoljske dražljaje, kar jih naredi idealne za uporabo v senzorjih in aktuatorjih.

**CAN-i** so prepletene polimerne mreže, v katerih se lahko križne vezi preurejajo skozi reverzibilne reakcije. CAN-i tako delujejo kot vmesni material med termoplasti in termoseti, saj imajo strukturo termosetov, a se lahko predelajo kot termoplasti. Na ta način združujejo vse mehanske prednosti klasičnih termosetov, obenem pa njihova edinstvena kemijska struktura omogoča selektiven odziv na zunanje dražljaje, kar vodi do sprememb v strukturi, lastnostih in obliki. Tradicionalno so križne vezi CAN-ov disociativne, kar pomeni, da se prekinejo, preden se ponovno tvorijo. Leta 2011 pa je bila predstavljena nova vrsta CAN-ov, imenovana vitrimeri. Ti materiali kažejo viskozno-temperaturno odvisnost, podobno steklenemu siliciju, ki sledi Arrheniusovi odvisnosti. Ta lastnost izhaja iz njihove asociativne dinamične povezave, kjer se kovalentne vezi pretrgajo le takrat, ko se istočasno oblikujejo nove. Posledično gostota križnih vezi v asociativnih CAN-ov ostaja skoraj konstantna, ne glede na zunanje dražljaje.

To ima dve ključni posledici:

1. razširjena gumijasta faza ob segrevanju: za razliko od disociativnih CAN-ov, ki nenadoma prehajajo iz trdnega v tekoče stanje, se vitrimeri transformirajo postopoma.,
2. boljša odpornost proti lezenju in toplom: asociativni CANs (vitrimeri) imajo večjo odpornost na deformacijo in kemijsko degradacijo v primerjavi z disociativnimi CAN-ov.

Proces dinamične izmenjave vezi v CAN-ov lahko sprožijo različni dražljaji, kar vodi do sproščanja napetosti in strukturne reorganizacije. Na primer, ob izpostavitvi svetlobe ali toplote se kovalentne vezi lahko pretrgajo in ponovno tvorijo, kar omogoča prilagodljivost oblike materiala ali sprostitvev notranjih napetosti brez trajne poškodbe in tako vodijo k samoobnavljanju materiala.

**Dodatno se lahko vgrajevanje nanodelcev (npr. železov oksid, titan, silicij) poveča prilagodljivost CAN-ov, saj nanodelci vplivajo na reverzibilnost polimerne mreže v odzivu na zunanje dražljaje. Raziskave kažejo, da vključitev nanodelcev znatno izboljša mehansko stabilnost, reciklabilnost in odzivnost CANs. Tako kompoziti CAN-NPs predstavljajo velik potencial za uporabo v samoobnovljivih materialih, trajnostnih kompozitih in pametnih tehnologijah kar predstavlja izvirni prispevek znanosti.**

#### **Glavni cilj raziskave**

Cilj raziskave (**Z nanodelci vzpodbujeni procesi samoobnavljanja kovalentno prilagodljivih mrež polimerov**) je osredotočen na razvoj kovalentnih prilagodljivih mrež (CAN-ov) na osnovi polipropilena in polietilena z vključitvijo nanodelcev (železov oksid, cinkov oksid, titan, nanoceluloza) za izboljšanje procesa samoceljenja ali reciklabilnosti. Nanodelci bodo delovali kot

regulatorji dinamičnih kovalentnih vezi in vplivali na strukturne, termične ter mehanske lastnosti materiala. Poleg tega bo raziskava preučevala, kako različni nanodelci glede na velikost, obliko in funkcionalne skupine vplivajo na končne lastnosti CAN-ov, pri čemer bo izbor ključnih parametrov uravnavanje površinske kemije tako nanodelcev kot CAN-ov, morfologija in odzivnost na zunanje dražljaje. Z nanodelci-vodeni CAN-i tako lahko dodatno izboljšajo prilagodljivost, saj nanodelci delujejo kot dražljaji za sprožitev dinamične tvorbe vezi. To omogoča ključne funkcionalnosti, kot so **samoceljenje** na zunanje dražljaje, kar jih naredi idealne za uporabo v **prilagodljivih tekstilih, senzorjih in aktuatorjih**.

#### Raziskovalna metodologija

##### 1. Sinteza in ovrednotenje nanodelcev (NPs):

- o sinteza, funkcionalizacija in ovrednotenje nanodelcev pri uravnavanju in preučevanju interakcij s CAN-I,

##### 2. Sinteza CAN-NPs:

- o razvoj asociativnih in disociativnih CAN-ov s pomočjo večfunkcionalnih križnih zamreževal,
- o tvorba vezi (ester, eter, disulfid, imin, amid, epoksi) med reakcijo ekstruzije,
- o modifikacija polimerov z **anhidridom** za izboljšano interakcijo med CAN-I in NPs.

##### 3. Ovrednotenje CAN-ov in interakcij s NPs:

- o **Strukturne in mehanske analize:** ATR-FTIR, TGA, DSC, DMA, reologija.
- o **Površinska kemija:** XPS, TOF-SIMS, AFM.
- o **Medfazne interakcije:** QCM-SPR, površinski zeta potencial.

**Hipoteza:** Vključitev specifičnih nanodelcev (NPs) bo sprožila izmenjavo dinamičnih kovalentnih vezi v nadzorovanih pogojih, kar bo izboljšalo sposobnost samoceljenja in reciklabilnost CAN-NPs. Interakcija med nanodelci (železov oksid, cinkov oksid, titan in nanoceluloza) ter polimerno matrico CAN-ov bo vplivala na ključne strukturne, termične in mehanske lastnosti, s čimer bo izboljšana prilagodljivost in možnost ponovne predelave materiala.

### 3. ŠTUDIJSKI PROGRAM

Predvideni študijski program podiplomskega študija v katerega se bo mladi raziskovalec vpisal v študijskem letu 2025/2026:

Doktorska šola UM FS

### 4. OPIS DEL IN NALOG

Izvaja projekte znanstvenega in raziskovalnega dela.  
Sodeluje pri oblikovanju raziskovalnih programov.  
Strokovno sodeluje z naročniki raziskovalnih nalog.  
Pripravlja poročila in elaborate o raziskavah.  
Spremlja in usklajuje raziskovalno delo skladno s pogodbami o financiranju.  
Skrbi za varno in zdravo delo.  
Organizira in poučuje zaposlene in študente o uporabi osebne varovalne opreme in drugih varnostnih ukrepov.  
Opravlja druge sorodne naloge po navodilu predpostavljenega delavca.

Sodeluje v delovnih in stalnih komisijah organov UM in članice oz. druge članice.  
Nadomešča sodelavce in nadrejenega v njegovi odsotnosti (po pooblastilu).  
Sodeluje pri letni in drugih inventurah.  
Opravlja druga sorodna dela po nalogu nadrejenih.

#### 5. ZAHTEVANA STOPNJA IZOBRAZBE

VII/2. tarifna skupina

#### 6. ZAHTEVANA SMER IZOBRAZBE

tehniška, naravoslovna

#### 7. KLASIUS SRV

sedma raven: visokošolsko izobraževanje druge stopnje in podobno izobraževanje/ visokošolska izobrazba druge stopnje in podobna izobrazba

#### 8. KLASIUS P

145 - Izobraževanje učiteljev posameznih predmetov  
4 – Naravoslovje, matematika in računalništvo  
5 – Tehnika, proizvodne tehnologije in gradbeništvo

#### 9. ZAHTEVANA ZNANJA

računalniška znanja: MS Windows, Word, Excel, Internet, e-pošta, el. poslovanje

#### 10. ZAHTEVANI POSEBNI POGOJI

/

#### 11. ZAHTEVANI JEZIKI

Aktivno znanje angleškega jezika

## 12. ZAHTEVANE DELOVNE IZKUŠNJE

/

## 13. PREDVIDENO PODOKTORSKO USPOSABLJANJE

Kliknite ali tapnite tukaj, če želite vnesti besedilo.

Podpis mentorja:

---

Podpis vodje raziskovalnega programa:

---

Ime in priimek dekana oz.  
pooblaščenec oseb<sup>3</sup>:

Red. prof. dr. Matej Vesenjak

Podpis dekana oz. pooblaščenec oseb:

---

Kraj in datum:

Maribor, 5.2.2025

Kliknite ali  
tapnite  
tukaj, če  
želite vnesti  
datum.

Žig:

---

<sup>3</sup> Program usposabljanja podpiše dekan članice, na kateri bo potekalo usposabljanje MR.