UDK 621:628.14 • 543.3:628.14 • 621:543.3

Razvoj sustava za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže

Luka Tutek[a], Vedrana Špada[b], Ivan Pentek[c], Jelena Močibob[d]

a Bacc. ing. mech. – student stručnog diplomskog studija Mehatronike, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeva 9D, 52100 Pula, ltutek@iv

b Nasl. izv. prof. dr. sc., dipl. ing. kem. teh., profesorica stručnog studija, voditeljica Centra za istraživanje METRIS, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeva 9D, 52100 Pula, vspada@iv.hr

c Mag. ing. mech., predavač, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeva 9D, 52100 Pula, ipentek@iv.hr

d Mag. educ. phys. et inf., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeva 9D, 52100 Pula, jmocibob@iv.hr

Sažetak

U radu se analizira, razvija i konstrukcijski optimizira cjevovodni sustav za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže. Mikroplastika predstavlja značajan okolišni problem zbog svoje rasprostranjenosti i potencijalnog utjecaja na ekosustave i zdravlje ljudi, što zahtijeva razvoj pouzdanih sustava za njezino uzorkovanje i analizu. Cilj rada bio je razviti tehnički učinkovit sustav koji osigurava reprezentativnost uzorka uz minimalan rizik kontaminacije i gubitka čestica. Metodologija se temeljila na iterativnom razvoju više rješenja cijevne armature, pri čemu su analizirani konstrukcijski zahtjevi poput kemijske inertnosti materijala, stabilnosti protoka, nepropusnosti i mogućnosti jednostavnog održavanja. Poseban naglasak stavljen je na integraciju filtracijskog sustava i upravljanje protokom vode. Konačno rješenje uključuje optimizirano rješenje s ugrađenim sustavom za preusmjeravanje toka (engl. bypass) i sigurnosnim ventilima koji omogućuju kontinuirani rad bez prekida uzorkovanja, koji pokazuje poboljšanu funkcionalnost, veću operativnu prilagodljivost i smanjen rizik kontaminacije u odnosu na prethodne verzije. Predloženi sustav predstavlja pouzdanu osnovu za primjenu u laboratorijskim i terenskim uvjetima te za daljnji razvoj sustava za analizu mikroplastike u vodovodnoj mreži.

Ključne riječi: *mikroplastika, vodovod, uzorkovanje, filtracija, cijevna armatura*

1. Uvod

Mikroplastika je danas prepoznata kao jedan od najznačajnijih oblika onečišćenja okoliša, a njezina prisutnost potvrđena je u gotovo svim sastavnicama ekosustava, uključujući vodu, tlo i zrak (Geyer, Jambeck, & Law, 2017). Mikroplastikom se smatraju sve sitne plastične čestice promjera manjeg od 5 mm koje nastaju razgradnjom većih plastičnih proizvoda ili se proizvode kao primarne čestice za industrijsku uporabu (Andrady, 2011). Zbog svoje male veličine i dugog vremena razgradnje,

mikroplastika se lako transportira kroz okoliš te se akumulira, između ostalog, u vodenim sustavima, gdje predstavlja potencijalnu prijetnju za zdravlje ljudi. Posebnu zabrinutost izaziva činjenica da mikroplastika može adsorbirati različite kemijske spojeve, uključujući teške metale i organske zagađivače, čime dodatno povećava svoj negativni utjecaj na okoliš i zdravlje (Geyer i sur., 2017). Osim toga, čestice mikroplastike mogu ući u prehrambeni lanac, što otvara pitanja o njihovim dugoročnim učincima na organizme. Upravo zbog toga, znanstvena zajednica sve više usmjerava istraživanja na razvoj pouzdanih metoda detekcije, uzorkovanja i analize mikroplastike u različitim medijima.

Jedan od ključnih preduvjeta za točnu analizu mikroplastike jest pravilno uzorkovanje. Sustavi za uzorkovanje moraju osigurati reprezentativnost uzorka, spriječiti kontaminaciju iz vanjskog okoliša te omogućiti očuvanje fizikalnih i kemijskih svojstava čestica tijekom cijelog procesa (Masura, Baker, Foster i Arthur, 2015). Kontaminacija uzorka može nastati iz različitih izvora, uključujući opremu za uzorkovanje, okoliš ili neodgovarajuće materijale sustava za uzorkovanje, što može dovesti do značajnih pogrešaka i odstupanja u rezultatima. Zbog toga je konstrukcija sustava za uzorkovanje jedan od ključnih elemenata u istraživanjima mikroplastike. Cjevovodni sustavi imaju posebno važnu ulogu u procesu uzorkovanja, jer omogućuju kontrolirani transport vode kroz sustav filtracije i prikupljanja uzorka. Njihova konstrukcija mora biti prilagođena specifičnim zahtjevima uzorkovanja mikroplastike, uključujući osiguravanje stabilnog protoka bez turbulencija, kemijsku inertnost materijala i potpunu nepropusnost sustava (ISO/TR 21960:2020). Također, sustav mora omogućiti jednostavno održavanje i zamjenu filtracijskih elemenata bez narušavanja integriteta uzorka.

U suvremenim istraživanjima sve se više naglašava potreba za razvojem modularnih i prilagodljivih sustava koji se mogu koristiti u različitim uvjetima, od laboratorijskih do terenskih (Masura i sur., 2015). Takvi sustavi omogućuju prilagodljivost u primjeni i povećavaju pouzdanost rezultata. U tom kontekstu, razvoj optimiziranog cjevovodnog sustava za uzorkovanje mikroplastike predstavlja važan doprinos unapređenju metodologije istraživanja u ovom području. Cilj ovog rada je analizirati konstrukcijske zahtjeve i razviti optimizirano rješenje cjevovodnog sustava koje će omogućiti pouzdano, precizno i ponovljivo uzorkovanje mikroplastike uz minimalan rizik kontaminacije i gubitka čestica. Poseban naglasak stavljen je na integraciju filtracijskih elemenata i kontrolu protoka, čime se osigurava visoka razina funkcionalnosti sustava u stvarnim uvjetima primjene.

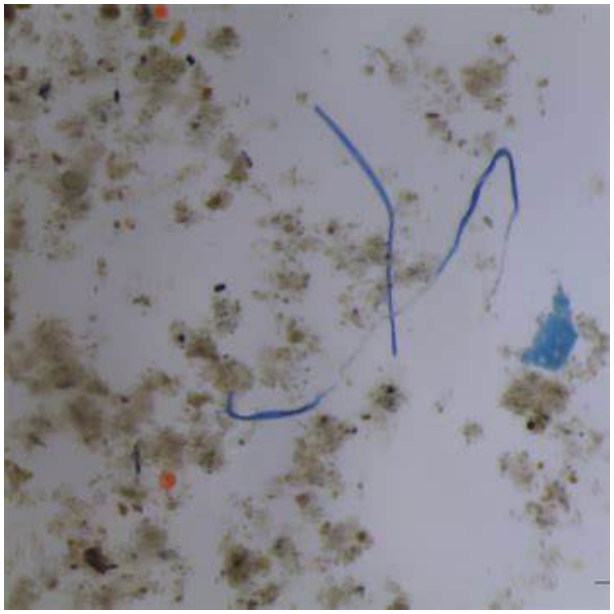
2. Izazovi uzorkovanja mikroplastike iz vodovodne mreže

Mikroplastika obuhvaća čestice plastike promjera manjeg od 5 mm koje mogu biti primarnog ili sekundarnog podrijetla (Andrady, 2011). Primarna mikroplastika proizvodi se namjerno za industrijsku ili komercijalnu uporabu, primjerice u kozmetičkim proizvodima, abrazivima ili tekstilnim vlaknima, dok sekundarna mikroplastika nastaje razgradnjom većih plastičnih predmeta pod utjecajem mehaničkih, kemijskih i bioloških procesa, a posebice radi UV zračenja koje degradira polimere (Geyer i sur., 2017). Zbog svoje male veličine i fizikalno-kemijskih svojstava, čestice mikroplastike pokazuju visoku mobilnost u okolišu te se lako transportiraju kroz, primjerice, vodene sustave.

U kontekstu vodenih medija, mikroplastika (slika 1.) se često pojavljuje u različitim oblicima, uključujući vlakna, fragmente i sferne čestice, što dodatno otežava njezino uzorkovanje i analizu (Masura i sur., 2015).

Heterogenost oblika, veličine i gustoće čestica zahtijeva primjenu preciznih i standardiziranih metoda uzorkovanja kako bi se osigurala reprezentativnost uzorka. Nepravilno uzorkovanje može dovesti do podcjenjivanja ili precjenjivanja koncentracije mikroplastike, što značajno utječe na pouzdanost rezultata istraživanja. U suvremenim istraživanjima sve se više naglašava potreba za standardizacijom metoda uzorkovanja i analize mikroplastike. Međunarodne smjernice, poput ISO/TR 21960:2020, pružaju okvir za procjenu prisutnosti plastike u okolišu i definiraju osnovne tehničke zahtjeve za uzorkovanje i analizu. Primjena takvih standarda omogućuje usporedivost rezultata između različitih istraživanja i povećava pouzdanost dobivenih podataka.

Slika 1. Mikroskopska slika vlakana i čestica mikro plastike u uzorku vode



Izvor: Fogašová, Manko i Oboňa (2022).

Jedan od ključnih tehnoloških izazova u uzorkovanju mikroplastike iz vodovoda odnosi se na kontrolu protoka kroz sustav. Sustav mora omogućiti stabilan i ujednačen protok fluida, bez naglih promjena brzine ili tlaka koje bi mogle uzrokovati turbulencije. Turbulentni režimi strujanja povećavaju mogućnost taloženja ili zadržavanja čestica mikroplastike na unutarnjim stjenkama cijevi, što može rezultirati gubitkom dijela uzorka ili njegovom neravnomjernom raspodjelom (Masura i sur., 2015). Stoga se u konstrukciji sustava nastoji osigurati laminarni protok, uz minimalne promjene smjera i presjeka cjevovoda. Osim hidrauličkih svojstava, važan čimbenik predstavlja i izbor materijala od kojih je sustav izrađen. Materijali moraju biti kemijski inertni kako ne bi reagirali s uzorkom niti otpuštali vlastite čestice koje bi mogle kontaminirati uzorak (ISO/TR 21960:2020). Nehrđajući čelik, staklo i određeni visokokvalitetni polimeri često se koriste u ovakvim sustavima zbog svoje otpornosti na koroziju i niske razine interakcije s česticama mikroplastike. Posebno je važno izbjegavati materijale koji mogu degradirati ili otpuštati mikroplastiku tijekom rada sustava, jer bi to direktno utjecalo na točnost analize.

Dodatni izazov pri razvoju rješenja odnosi se na filtraciju kao ključni proces u uzorkovanju mikroplastike. Filtracijski sustavi koriste mrežaste ili membranske filtre različitih veličina pora kako bi se omogućilo selektivno zadržavanje čestica određenih dimenzija (Masura i sur., 2015). Odabir veličine pora ovisi o cilju istraživanja, pri čemu se često primjenjuju višestupanjski sustavi filtracije kako bi se obuhvatio širi raspon veličina čestica mikroplastike. Međutim, filtracija također uvodi dodatne hidrauličke otpore u sustav, što zahtijeva pažljivo dimenzioniranje cjevovoda i kontrolu tlaka.

Razvoj metoda uzorkovanja mikroplastike temelji se na razumijevanju fizikalnih svojstava čestica, hidrauličkih uvjeta strujanja te interakcije materijala sustava s uzorkom. Integracija ovih elemenata ključna je za razvoj učinkovitog i pouzdanog sustava za uzorkovanje mikroplastike u vodenim medijima.

3. Konstrukcijski zahtjevi sustava za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže

Konstrukcijski zahtjevi sustava za uzorkovanje mikroplastike obuhvaćaju kombinaciju hidrauličkih, mehaničkih i kemijskih kriterija. Njihova pravilna implementacija ključna je za razvoj učinkovitog sustava koji može zadovoljiti zahtjeve suvremenih istraživanja mikroplastike. Konstrukcija sustava za uzorkovanje mikroplastike mora zadovoljiti niz specifičnih tehničkih zahtjeva kako bi se osigurala točnost, pouzdanost i ponovljivost rezultata. Jedan od osnovnih zahtjeva jest potpuna nepropusnost sustava. S obzirom na to da su čestice mikroplastike prisutne i u zraku te u okolini, svaki prodor vanjskih čestica može dovesti do kontaminacije uzorka i narušavanja njegove reprezentativnosti (Masura i sur., 2015). Zbog toga svi spojevi, brtve i spojni elementi moraju biti izvedeni tako da osiguravaju hermetičko zatvaranje sustava tijekom cijelog procesa uzorkovanja. Osim nepropusnosti, iznimno je važna kontrola hidrauličkih uvjeta unutar cjevovoda, stoga je potrebno dimenzionirati cjevovod kako bi se osigurao laminarni protok, uz glatke prijelaze između pojedinih elemenata sustava i minimalan broj oštrih promjena smjera strujanja. U kontekstu odabira materijala, nehrđajući čelik, osobito legure poput AISI 316L, pokazuje vrlo povoljna svojstva, uključujući visoku otpornost na koroziju, mehaničku čvrstoću i dugotrajnost. Prema relevantnim standardima, kao što su ASTM

A312/A312M, nehrđajući čelik osigurava pouzdan rad u uvjetima povišenih tlakova i različitih kemijskih sastava medija, što ga čini pogodnim za primjenu u sustavima za uzorkovanje mikroplastike.

Konstrukcija sustava mora omogućiti jednostavno održavanje i manipulaciju. Sustavi za uzorkovanje često se koriste u terenskim uvjetima, gdje je potrebno brzo i sigurno izvršiti zamjenu filtra ili čišćenje sustava. Zbog toga je poželjno koristiti modularni dizajn koji omogućuje lako rastavljanje i ponovno sastavljanje bez potrebe za složenim alatima. Posebnu pažnju treba posvetiti pristupačnosti ključnih komponenti, poput kućišta filtra i ventila, kako bi se smanjilo vrijeme zastoja sustava i rizik od kontaminacije tijekom održavanja. Dodatni zahtjev odnosi se na mehaničku stabilnost i otpornost sustava na vanjske utjecaje. Cjevovod mora biti dovoljno robustan da izdrži mehanička opterećenja, vibracije i eventualne udarce tijekom transporta i rada u terenskim uvjetima (Dixon i Mays, 2010).

U suvremenim konstrukcijskim rješenjima sve se češće primjenjuju dodatne funkcionalnosti poput integriranih ventila za regulaciju protoka i sustava za preusmjeravanje toka (engl. bypass). Takva rješenja omogućuju kontinuirani rad sustava čak i tijekom zamjene filtra, čime se povećava operativna učinkovitost i smanjuje rizik od prekida uzorkovanja. Integracija ovih elemenata zahtijeva pažljivo projektiranje kako bi se očuvala hidraulička stabilnost sustava i spriječili gubici tlaka.

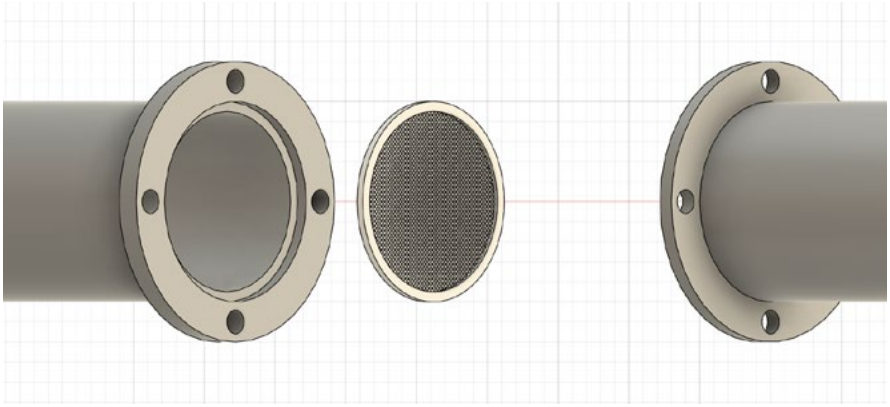
4. Konstruiranje rješenja za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže

Razvoj cijevne armature za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže provedeno je kroz iterativni pristup koji je uključivao izradu i analizu ukupno pet rješenja te konstruiranje primjenom računala (softverski paket Solidworks) u izradi završnog rada na Stručnom prijediplomskom studiju Mehatronike (Tutek, 2025). Svako rješenje predstavljalo je određeni stupanj unapređenja u odnosu na prethodnu verziju, s ciljem postupnog rješavanja uočenih nedostataka i optimizacije funkcionalnosti sustava. Takav pristup omogućio je sustavno unapređenje konstrukcije, uz kontinuirano vrednovanje tehničkih rješenja u kontekstu zahtjeva uzorkovanja mikroplastike.

Prvo rješenje (slika 2.) temeljilo se na jednostavnoj konstrukciji s integriranim filtrom postavljenim unutar prirubničkog spoja. Iako je ovakvo rješenje omogućavalo osnovnu funkciju filtracije, pokazalo bi se nepraktičnim u pogledu održavanja, jer je zamjena filtra zahtijevala potpuno rastavljanje cjevovoda. Osim toga, sustav nije sadržavao mehanizam za kontrolu protoka, što bi dodatno otežavalo rad u stvarnim uvjetima.

Predloženo rješenje moglo bi se unaprijediti korištenjem kompenzacijskih elemenata u mreži cijevne armature, što bi omogućilo jednostavniju zamjenu filtera, bez rastavljanja cijelog cjevovoda. Druga mogućnost bi bilo korištenje fleksibilnih elemenata cijevi, koji se lako mogu pomaknuti radi zamjene filtera.

Slika 2. Prvo rješenje s filtrom u prirubničkom spoju

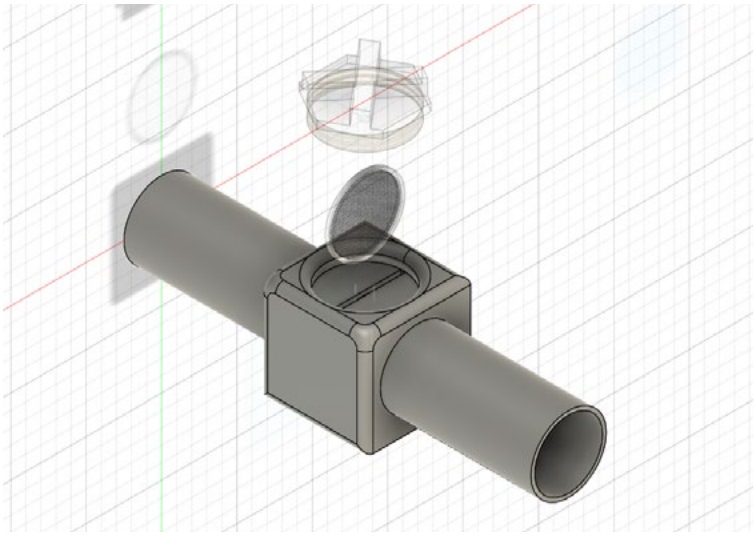


Izvor: izrađeno prema Tutek (2025).

Drugo rješenje (slika 3.) predstavljalo je značajan napredak u ergonomiji sustava. Uvedeno je centralno kućište s navojnim poklopcem koje omogućuje bržu i jednostavniju zamjenu filtra bez potrebe za rastavljanjem cijelog sustava. Time je smanjeno vrijeme održavanja i smanjen rizik kontaminacije uzorka. Međutim, sustav još uvijek nije imao integrirani ventil za zatvaranje protoka, što bi značilo da bi za izmjenu filtra za uzorkovanje ili uslijed začepljenja bilo potrebno zaustaviti dovod vode izvan sustava.

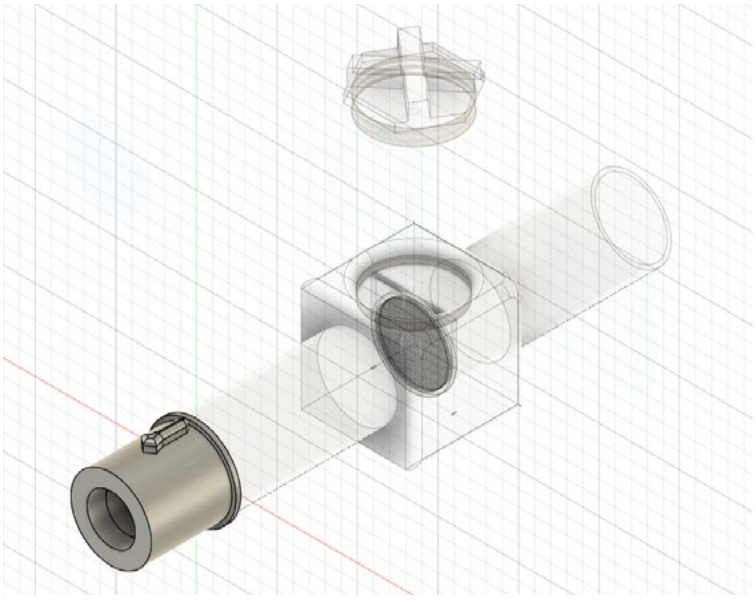
Treće rješenje (slika 4.) uklanja ovaj nedostatak uvođenjem ventila za zatvaranje protoka unutar samog cjevovoda. Integracijom ventila omogućeno je lokalno upravljanje protokom, čime se značajno povećava sigurnost i praktičnost tijekom rada. Ova verzija sustava omogućila bi zamjenu filtra bez potrebe za intervencijom na drugim dijelovima instalacije, čime bi se smanjila mogućnost pogreške i gubitka uzorka.

Slika 3. Drugo rješenje s kućištem za filtar i navojnim poklopcem za jednostavniju zamjenu filtra



Izvor: izrađeno prema Tutek (2025).

Slika 4. Treće rješenje s prikazanim ventilom za zatvaranje protoka vode

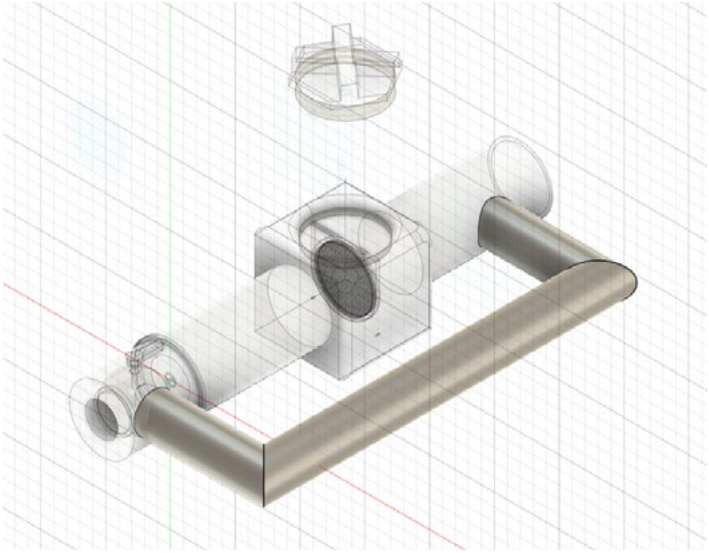


Izvor: izrađeno prema Tutek (2025).

Daljnji razvoj rezultirao je četvrtim rješenjem (slika 5.), u kojem je uveden sustav za preusmjeravanje toka. Ovaj sustav omogućuje da voda nastavi teći kroz cjevovod čak i kada je filtar uklonjen ili kada se provodi njegovo održavanje. Time se postiže kontinuitet rada sustava, što je posebno važno u situacijama kada nije dopušten prekid opskrbe vodom ili kada se uzorkovanje provodi u kontinuiranom režimu. Uvođenje cijevi za preusmjeravanje toka predstavlja ključnu funkcionalnu nadogradnju koja bi značajno povećala prilagodljivost sustava.

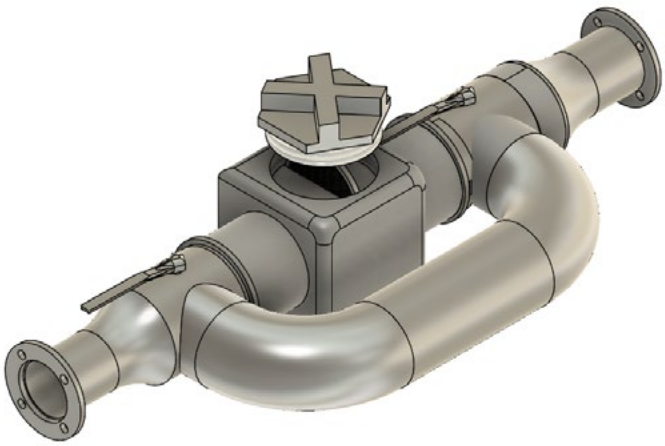
Peto, odnosno završno rješenje (slika 6.), temelji se na prethodnoj verziji, ali uključuje dodatna konstrukcijska poboljšanja usmjerena na optimizaciju hidrauličkih i operativnih karakteristika sustava. Geometrija cijevi za usmjeravanje toka prilagođena je kako bi se smanjio otpor strujanju i spriječilo stvaranje turbulencija. Također su uvedeni dodatni sigurnosni ventili koji omogućuju potpunu kontrolu protoka u svim dijelovima sustava, čime se dodatno povećava sigurnost tijekom održavanja i izmjene filtra. Ergonomija upravljanja poboljšana je uvođenjem prilagođenih ručica ventila, što olakšava rad u terenskim uvjetima. Kompenzacijski elementi bili bi praktični i kod sustava s preusmjeravanjem toka (slika 5. i 6.).

Slika 5. Četvrto rješenje s dodatnom cijevi i preusmjerivačkim ventilom



Izvor: izrađeno prema Tutek (2025).

Slika 6. Peto (završno) rješenje



Izvor: izrađeno prema Tutek (2025).

Tablica 1. Usporedba razvijenih rješenja za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže

Rješenje	Ključne značajke	Prednosti	Nedostaci
1.	Filtar u prirubničkom spoju	Jednostavna konstrukcija	Teška zamjena filtra, nema kontrole protoka
2.	Kućište s navojnim poklopcem	Lakša zamjena filtra	Nema ventila za zatvaranje protoka
3.	Integrirani ventil	Kontrola protoka, sigurnija izmjena filtra	Nema kontinuiranog rada tijekom održavanja
4.	Sustav za preusmjeravanje toka	Kontinuirani rad sustava	Veća konstrukcijska složenost
5.	Optimiziran sustav za preusmjeravanje toka + dodatni ventili	Visoka prilagodljivost, sigurnost, stabilan protok	Složenija izvedba

Izvor: sinteza autora.

U tablici 1. prikazana je usporedba ključnih značajki predloženih rješenja te njihovih prednosti i nedostataka.

Konačna verzija sustava predstavlja integrirano rješenje koje objedinjuje sve ključne funkcionalne zahtjeve: nepropusnost, stabilan protok, jednostavno održavanje i kontinuirani rad bez prekida uzorkovanja. Iterativni razvoj prototipa omogućio je identifikaciju optimalnih konstrukcijskih rješenja te minimiziranje nedostataka koji su bili prisutni u ranijim verzijama. Takav pristup rezultirao je sustavom koji je tehnički pouzdan, operativno fleksibilan i prilagodljiv različitim uvjetima primjene.

5. Konstrukcijske značajke razvijenog rješenja za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže

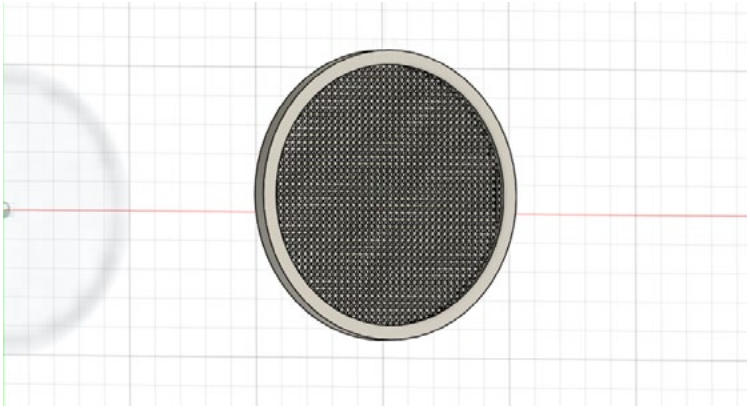
U procesu konstruiranja sustava za uzorkovanje mikroplastike bilo je ključno definirati osnovne konstrukcijske elemente cjevovoda koji osiguravaju funkcionalnost, pouzdanost i prilagodljivost različitim uvjetima rada. Svi elementi sustava projektirani su s ciljem omogućavanja učinkovitog uzorkovanja bez narušavanja rada vodovodne mreže.

Razvijeno rješenje ima ukupnu duljinu 38,5 cm, širinu približno 15 cm i visinu oko 10 cm, što omogućuje stabilnu integraciju u postojeće sustave. Dimenzije se po potrebi mogu prilagoditi specifičnim uvjetima primjene. U prikazanoj fazi razvoja brtve nisu uključene u tehničke modele, no u stvarnoj izvedbi predviđena je njihova primjena radi osiguravanja potpune nepropusnosti sustava.

5.1. Filtar

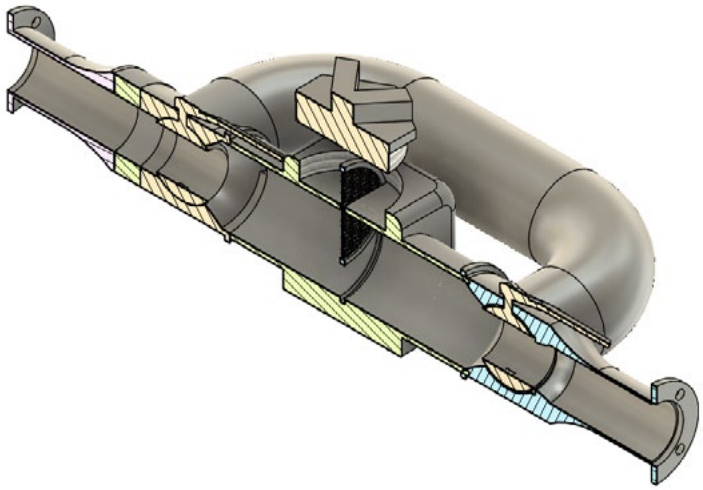
Filtar (slika 7.) predstavlja ključni element sustava za izdvajanje čestica mikroplastike. Predviđen je mrežasti filtar izrađen od nehrđajućeg čelika (AISI 316), promjera 47 mm i propusnosti 20 μm. Takva struktura omogućuje učinkovito zadržavanje čestica uz minimalan pad tlaka. Filtar je smješten u centralno kućište i dostupan putem navojnog poklopca, čime je omogućena brza i jednostavna izmjena. Ovakvo rješenje osigurava pouzdan rad i smanjuje rizik kontaminacije uzorka.

Slika 7. Filtar za zadržavanje čestica mikroplastike



Izvor: autori.

Slika 8. Presjek sustava s prikazom unutarnjih komponenti



Izvor: autori.

5.2. Glavna cijev i sustav za preusmjeravanje toka

Glavni dio sustava čini cijevni element od nehrđajućeg čelika s integriranim kućištem filtra u središnjem dijelu. Na krajevima su izvedene prirubnice prilagođene standardnom priključku promjera 32 mm. Sustav uključuje i cijev koja omogućuje preusmjeravanje toka vode. Time se osigurava kontinuirani rad sustava čak i tijekom izmjene filtra. Geometrija cijevi za preusmjeravanje toka optimizirana je kako bi se smanjile turbulencije i omogućio stabilan protok. Na slici 8. prikazan je presjek razvijenog sustava za uzorkovanje.

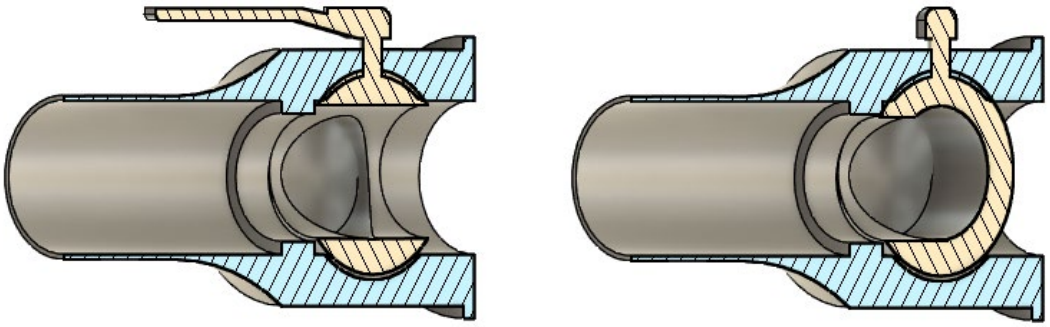
5.3. Poklopac kućišta

Poklopac kućišta izveden je kao navojni element s ergonomskim oblikom, što omogućuje jednostavno rukovanje bez dodatnih alata. Njegova funkcija je sigurno zatvaranje kućišta i osiguravanje pravilnog položaja filtra tijekom rada.

5.4. Ventil za regulaciju i preusmjeravanje toka

Ventil omogućuje kontrolu protoka vode te njegovo preusmjeravanje između glavne cijevi i cijevi za preusmjeravanje toka. U otvorenom položaju voda prolazi kroz filtar, dok se u zatvorenom položaju

Slika 9. a) Presjek ventila u otvorenom položaju - voda teče prema filtru; b) Presjek ventila u zatvorenom položaju - voda se preusmjerava u zaobilaznu cijev



Izvor: autori.

preusmjerava u zaobilaznu cijev. Ova funkcionalnost omogućuje zamjenu filtra bez prekida rada sustava i značajno povećava njegovu operativnu prilagodljivost. U položaju kada je ventil otvoren (slika 9.a), voda slobodno teče prema filtru i kroz njega, što odgovara uvjetima normalnog rada. Kada se ventil zakrene u zatvoreni položaj (slika 9.b), tok vode automatski se preusmjerava u bočnu (zaobilaznu) cijev. Presjeci ventila jasno prikazuju obje funkcije u radu.

5.5. Spojevi i brtve

Spojevi su izvedeni pomoću navojnih priključaka i prirubnica, čime se osigurava čvrsto i stabilno povezivanje elemenata. U stvarnoj izvedbi predviđena je primjena gumenih ili silikonskih brtvi na svim ključnim spojevima, uključujući kućište filtra i prirubničke spojeve, kako bi se osigurala potpuna nepropusnost i pouzdan rad sustava.

6. Diskusija

Uvođenje cijevi za preusmjeravanje toka predstavlja ključni konstruktivni iskorak u razvoju cjevovodnog sustava za uzorkovanje mikroplastike, jer značajno povećava njegovu funkcionalnost i operativnu prilagodljivost. Za razliku od prvih prijedloga rješenja, kod kojih je za zamjenu filtra bilo potrebno potpuno zaustaviti protok vode, integracija cijevi za preusmjeravanje toka omogućuje kontinuirani rad sustava čak i tijekom održavanja. Time se eliminira potreba za prekidom procesa uzorkovanja, što je posebno važno u situacijama gdje je potrebno osigurati neprekidno praćenje koncentracije mikroplastike u realnom vremenu. Osim povećanja prilagodljivosti, cijev za preusmjeravanje toka doprinosi i većoj sigurnosti rada. U kombinaciji s dodatnim ventilima, omogućuje potpunu kontrolu nad protokom fluida unutar sustava, čime se smanjuje rizik od istjecanja vode i potencijalne kontaminacije uzorka. Ovakav pristup usklađen je s preporukama za uzorkovanje mikroplastike, koje naglašavaju važnost zatvorenih sustava i minimiziranja vanjskih utjecaja na uzorak (NOAA, 2015). Time se osigurava veća pouzdanost dobivenih rezultata i smanjuje mogućnost pogrešaka u analizi.

Optimizacija geometrije cijevi za preusmjeravanje toka u završnom rješenju smanjila bi pojavu turbulencija i omogućila ravnomjerniji protok fluida. Time je smanjena mogućnost zadržavanja mikroplastičnih čestica na stjenkama cjevovoda, što je jedan od ključnih problema u sustavima za uzorkovanje (Masura i sur., 2015). Stabilan protok izravno utječe na reprezentativnost uzorka i točnost analize. Dodatno, primjena nehrđajućeg čelika kao osnovnog konstrukcijskog materijala pokazala se opravdanom zbog njegove kemijske inertnosti i mehaničke otpornosti. Time je minimiziran rizik interakcije materijala s uzorkom, što je u skladu s preporukama međunarodnih standarda za analizu plastike u okolišu (ISO/TR 21960:2020). Ovakav izbor materijala posebno je važan u kontekstu dugotrajne primjene sustava i rada u različitim uvjetima.

Iako završni prijedlog rješenja donosi značajna poboljšanja, određeni kompromisi su neizbježni. Povećanje funkcionalnosti sustava, osobito kroz uvođenje dodatnih ventila i cijevi za preusmjeravanje toka, rezultira većom konstrukcijskom složenošću i potencijalno višim troškovima izrade. Međutim, s obzirom na povećanu pouzdanost i operativnu učinkovitost, ovakvo rješenje predstavlja optimalan balans između tehničkih zahtjeva i praktične primjene. Razvijeni sustav pokazuje visoku razinu usklađenosti s postojećim smjernicama za uzorkovanje mikroplastike te predstavlja značajan doprinos unapređenju tehničkih rješenja u ovom području.

Unatoč postignutim rezultatima, postoji prostor za daljnja unapređenja sustava. Buduća istraživanja mogu biti usmjerena na integraciju automatiziranih sustava upravljanja protokom i uzorkovanjem, kao i na razvoj naprednijih filtracijskih rješenja koja omogućuju preciznije izdvajanje čestica različitih veličina. Također, potencijalna primjena sustava u industrijskim i komunalnim sustavima vodoopskrbe otvara mogućnosti za kontinuirani monitoring mikroplastike u stvarnim uvjetima te prilagodbu rješenja potrebama pojedinih vodovoda, pozicijama uzorkovanja, frekvenciji uzorkovanja i usklađenju s direktivama Europske unije.

7. Zaključak

U ovom radu razvijen je i konstrukcijski optimiziran cijevni element za uzorkovanje mikroplastike iz vodovodne mreže, s naglaskom na osiguravanje pouzdanosti, točnosti i operativne prilagodljivosti. Kroz iterativni razvoj pet prijedloga konstrukcijskog rješenja identificirani su ključni izazovi, uključujući nepropusnost sustava, stabilnost protoka, kemijska inertnost materijala te jednostavnost održavanja. Postupnim unapređenjem konstrukcije razvijeno je rješenje koje učinkovito odgovara na sve navedene zahtjeve.

Konačna verzija sustava, koja uključuje integrirani sustav za preusmjeravanje toka i sigurnosne ventile, omogućuje kontinuirani rad bez prekida uzorkovanja, čime se značajno povećava njegova primjenjivost u realnim uvjetima. Ovakav pristup smanjuje rizik kontaminacije uzorka i omogućuje sigurnu i brzu zamjenu filtracijskih elemenata.

Optimizacija geometrije cijevnog elementa dodatno bi doprinijela stabilnosti protoka i smanjenju turbulencija, što je ključno za očuvanje reprezentativnosti uzorka mikroplastike. Razvijena rješenja potvrđuju da pravilno projektiran cjevovodni sustav ima presudnu ulogu u procesu uzorkovanja mikroplastike te da konstrukcijska rješenja značajno utječu na kvalitetu i pouzdanost analize. Razvijeni sustav predstavlja funkcionalno i tehnički utemeljeno rješenje koje se može primijeniti u laboratorijskim i terenskim uvjetima, uz mogućnost daljnje prilagodbe specifičnim zahtjevima istraživanja. Razvijeni sustav predstavlja značajan doprinos razvoju tehničkih rješenja za uzorkovanje mikroplastike te pruža čvrstu osnovu za daljnja istraživanja i praktičnu primjenu u području zaštite okoliša i upravljanja vodnim resursima.

Citirani izvori

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62(8), 1596–1605.

Dixon, A. M., & Mays, L. W. (2010). Water Transmission and Distribution. AWWA.

Fogašová, K., Manko, P., &Oboňa, J. (2022). The first evidence of microplastics in plant-

formed fresh-water micro-ecosystems: Dipsacus teasel phytotelmata in Slovakia

contaminated with MPs. BioRisk (18, 133–143). https://doi.org/10.3897/biorisk.18.87433

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782.

ISO/TR 21960:2020. Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies.

Masura, J., Baker, J., Foster, G., & Arthur, C. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.

NOAA. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. Technical Memorandum NOS-OR&R-48.

Tutek, L. (2025). Konstrukcija elemenata cjevovoda za uzorkovanje mikroplastike. Završni rad, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate.

Development of a system for sampling microplastics from the water supply network

Summary

This paper presents the analysis and design optimization of a pipeline system for microplastic sampling in drinking water supply system. Microplastics represent a significant environmental concern due to their widespread presence and potential impact on ecosystems and human health, which necessitates the development of reliable sampling systems. The aim of this study was to develop a technically efficient system that ensures sample representativeness while minimizing contamination and particle loss. The methodology was based on an iterative development of multiple pipe fitting prototypes, considering key design requirements such as material chemical inertness, stable flow conditions, system tightness, and ease of maintenance. Special emphasis was placed on filtration integration and flow control. The final design includes an optimized pipeline system with an integrated bypass configuration and safety valves, enabling continuous operation without interrupting the sampling process. The results demonstrate improved functionality, increased operational flexibility, and reduced contamination risk compared to earlier prototypes. The proposed system provides a reliable foundation for both laboratory and field applications, as well as for further development of microplastic sampling technologies.

Keywords: *microplastics, water pipeline, sampling, filtration, pipe fittings*