OSVRTI, Kem. Ind. **75** (11-12) (2026) 617–632

D. Kučić Grgić*
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Trg Marka Marulića 19, 10 000 Zagreb

Projekt EnA-SARS – istraživanje okolišnih aspekata i razgradnje SARS-CoV-2 antivirotika

Znanstvena istraživanja usmjerena na razumijevanje sudbine antivirotika u okolišu, razvoj učinkovitih postupaka njihove razgradnje te procjenu mogućih ekotoksikoloških učinaka

Farmaceutici predstavljaju jednu od važnih skupina novih onečišćujućih tvari u okolišu, a njihova sve šira primjena otvara brojna pitanja povezana s njihovom prisutnošću, postojanošću, transformacijom i mogućim negativnim učincima na vodene ekosustave. Posebnu pozornost posljednjih godina privlače antivirotici koji se primjenjuju u liječenju virusnih infekcija, uključujući bolest COVID-19. Njihova potencijalna prisutnost u otpadnim i površinskim vodama upućuje na potrebu za sustavnim istraživanjem njihove okolišne sudbine, učinkovitosti postojećih postupaka obrade otpadnih voda te mogućnosti primjene naprednih tehnologija za njihovo uklanjanje.

Upravo su navedeni izazovi u središtu znanstveno-istraživačkog projekta "Okolišni aspekti SARS-CoV-2 antivirotika" (EnA-SARS, IP-2022-10-2822), koji u potpunosti financira Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ) (slika 1). Projekt je započeo 14. prosinca 2023. godine, a njegova provedba predviđena je do 14. prosinca 2027. godine.

Projekt se provodi na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, a okuplja istraživače usmjerene na proučavanje okolišnog ponašanja antivirotika, njihove razgradnje primjenom kemijskih i bioloških postupaka te procjenu mogućih učinaka polaznih spojeva i produkata njihove transformacije na organizme u okolišu.

Kontinuitet znanstvenog rada i razvoj istraživačkog tima

Inicijalni voditelj projekta bio je prerano preminuli prof. dr. sc. Šime Ukić, koji je osmislio i pokrenuo istraživanja usmjerena na razumijevanje okolišnih aspekata antivirotika. Njegov znanstveni doprinos, istraživačka vizija i predanost razvoju novih znanja predstavljaju važan temelj projekta EnA-SARS.

Nakon njegove prerane smrti vođenje projekta preuzela je izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić, nastavljajući započeta istraživanja i osiguravajući kontinuitet provedbe planiranih projektnih aktivnosti. Posebna pozornost pritom je usmjerena na povezivanje kemijskih i bioloških postupaka razgradnje, identifikaciju transformacijskih produkata te procjenu njihove potencijalne ekotoksičnosti.

Važan doprinos projektu daju i mladi istraživači. U okviru projekta svoja doktorska istraživanja provode Dora Lastovčić, mag. appl. chem., i Luka Večenaj, mag. ing. cheming., asistenti zaposleni putem poziva DOK Hrvatske zaklade za znanost.

Njihova su doktorska istraživanja povezana s proučavanjem razgradnje antivirotika u okolišu, primjenom naprednih oksidacijskih i bioloških procesa te razvojem i optimizacijom postupaka za njihovo uklanjanje iz vodenih sustava. Posebna se pozornost posvećuje razumijevanju mehanizama razgradnje, utjecaju procesnih uvjeta na učinkovitost uklanjanja te mogućnostima kombiniranja različitih tehnologija obrade.

Uključivanje mladih istraživača u provedbu projekta pridonosi razvoju njihovih znanstvenih kompetencija, stjecanju iskustva u primjeni suvremenih analitičkih i eksperimentalnih metoda te jačanju istraživačkih kapaciteta u području okolišnog inženjerstva i zaštite voda.

Istraživanja razgradnje antivirotika i njihovih učinaka na okoliš

Jedan od temeljnih ciljeva projekta EnA-SARS jest istražiti ponašanje odabranih antivirotika u okolišu te mogućnosti njihove učinkovite razgradnje primjenom različitih fizikalno-kemijskih i bioloških postupaka.

Istraživanja obuhvaćaju ispitivanje učinkovitosti naprednih oksidacijskih procesa koji su važan istraživački smjer u razvoju tehnologija za uklanjanje farmaceutika koji se konvencionalnim postupcima obrade otpadnih voda ne uklanjaju uvijek u zadovoljavajućoj mjeri. Usporedno s kemijskim postupcima istražuje se i mogućnost primjene mikroorganizama u razgradnji antivirotika. Biološki postupci imaju važnu ulogu u obradi otpadnih voda, a njihova učinkovitost ovisi o svojstvima pojedinih spojeva, aktivnosti mikrobnih zajednica te uvjetima u kojima se proces odvija.

Poseban znanstveni interes usmjeren je na kombiniranje naprednih oksidacijskih procesa i biološke obrade, s ciljem razvoja učinkovitijih i potencijalno održivijih postupaka uklanjanja antivirotika. Takav pristup omogućuje istraživanje mogućnosti da se kemijskom predobradom teško razgradivi spojevi transformiraju u produkte koji su pogodniji za daljnju biološku razgradnju. Međutim, smanjenje koncentracije polaznog spoja ne mora nužno značiti i potpuno uklanjanje njegova štetnog učinka na okoliš. Tijekom razgradnje mogu nastati različiti transformacijski produkti čija fizikalno-kemijska svojstva, postojanost i biološka aktivnost mogu biti različiti od svojstava početnih spojeva. Zbog toga je za cjelovitu procjenu učinkovitosti postupaka obrade potrebno pratiti ne samo uklanjanje polaznih antivirotika nego i nastajanje njihovih razgradnih produkata te moguće promjene ekotoksičnosti obrađene vode.

U trećoj godini provedbe projekta istraživanja su posebno usmjerena na identifikaciju i karakterizaciju nusprodukata razgradnje antivirotika, što predstavlja važan korak prema boljem razumijevanju njihovih transformacijskih putova i potencijalnih okolišnih rizika. Navedena istraživanja nastavit će se i tijekom posljednje godine projekta, s naglaskom na povezivanje kemijske karakte-

* Izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić
e-pošta: dkucic@fkit.unizg.hr



Slika 1 – Istraživački tim projekta EnA-SARS tijekom provedbe laboratorijskih istraživanja razgradnje antivirotika primjenom kemijskih i bioloških postupaka te ispitivanja njihovih okolišnih učinaka

rizacije razgradnih produkata s rezultatima ispitivanja njihove ekotoksičnosti.

Međunarodna znanstvena suradnja i usavršavanje mladih istraživača

Međunarodna suradnja važan je dio projekta EnA-SARS jer omogućuje razmjenu znanja, pristup specijaliziranim istraživačkim metodama te razvoj kompetencija mladih znanstvenika.

U okviru svojega doktorskog istraživanja asistentica Dora Lastovčić, mag. appl. chem., tijekom 2026. godine boravila je tri mjeseca na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo (Faculty of Chemistry and Chemical Technology, FKKT), Sveučilišta u Ljubljani, u istraživačkoj skupini izv. prof. dr. sc. Gabrijele Kalčikove.

Tijekom istraživačkog boravka provodila je ekotoksikološka ispitivanja na vodenom organizmu *Daphnia magna*, koji se široko primjenjuje kao modelni organizam u procjeni toksičnosti kemijskih tvari i onečišćujućih tvari prisutnih u vodenom okolišu.

Navedena istraživanja važna su za razumijevanje mogućih učinaka antivirotika i njihovih transformacijskih produkata na vodene organizme. Ekotoksikološki pristup omogućuje nadopunu kemijskih analiza biološki relevantnim pokazateljima, čime se dobiva potpunija slika o potencijalnim rizicima povezanima s prisutnošću ovih spojeva u okolišu.

Tromjesečni istraživački boravak u Ljubljani pridonio je stručnom i znanstvenom usavršavanju asistentice, razmjeni eksperimentalnih iskustava te daljnjem jačanju suradnje između istraživačkih skupina Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilišta u Ljubljani.

Znanstvena produktivnost i diseminacija rezultata

Dosadašnja provedba projekta EnA-SARS rezultirala je značajnom znanstvenom produktivnošću, koja se očituje u objavljenim znanstvenim radovima, sudjelovanju na međunarodnim konferencijama i uključivanju studenata u istraživačke aktivnosti.

Do listopada 2026. godine u okviru projekta objavljeno je ukupno 10 znanstvenih radova, dok se jedan znanstveni rad nalazi u postupku recenzije, a jedan je u završnoj fazi pripreme za slanje u znanstveni časopis.

Objavljeni radovi pridonose razumijevanju okolišnih aspekata antivirotika, mogućnosti njihove razgradnje i procjene potencijalnih učinaka na okoliš. Ostvareni rezultati ujedno predstavljaju znanstvenu osnovu za nastavak istraživanja i razvoj novih pristupa obradi voda opterećenih farmaceutskim onečišćujućim tvarima.

Tijekom dosadašnje provedbe projekta članovi istraživačkog tima sudjelovali su na ukupno 18 međunarodnih znanstvenih konferencija, na kojima su rezultate svojih istraživanja predstavili usmenim i posterskim priopćenjima.

Sudjelovanje na međunarodnim konferencijama omogućilo je predstavljanje projektnih rezultata široj znanstvenoj zajednici, razmjenu iskustava s istraživačima iz srodnih područja te raspravu o aktualnim izazovima povezanima s pojavom farmaceutika u okolišu i razvojem učinkovitih tehnologija njihove razgradnje.

Osim znanstvene diseminacije, članovi projektnog tima sudjelovali su i u aktivnostima popularizacije znanosti, približavajući široj javnosti problematiku prisutnosti farmaceutika u okolišu, važnost zaštite vodnih resursa te ulogu znanstvenih istraživanja u razvoju održivih rješenja za obradu otpadnih voda.

Obrazovanje studenata i razvoj novih znanstvenih kompetencija

Uz ostvarivanje znanstvenih ciljeva, projekt EnA-SARS ima važnu obrazovnu ulogu. Projektna istraživanja omogućuju studentima uključivanje u suvremene eksperimentalne aktivnosti te stjecanje praktičnih znanja iz područja analitičke kemije, kemijskog i biokemijskog inženjerstva, ekotoksikologije i zaštite okoliša.

Do sada su u okviru projekta uspješno obranjena 23 završna i diplomska rada, čime je ostvaren značajan doprinos obrazovanju novih generacija stručnjaka i njihovom upoznavanju s aktualnim znanstvenim izazovima.

Kroz izradu završnih i diplomskih radova studenti su imali priliku sudjelovati u laboratorijskim istraživanjima, primjenjivati suvremene analitičke metode, obrađivati eksperimentalne podatke i interpretirati rezultate u kontekstu mogućih okolišnih učinaka farmaceutskih spojeva.

Na taj način projekt povezuje znanstveno-istraživački rad s nastavnom djelatnošću te pridonosi jačanju kompetencija budućih

stručnjaka koji će se baviti zaštitom okoliša, razvojem tehnologija obrade voda i procjenom rizika od kemijskih onečišćujućih tvari.

Završna godina projekta – identifikacija razgradnih produkata i istraživanja na realnim otpadnim vodama

U posljednjoj godini provedbe projekta, koja završava 14. prosinca 2027. godine, planiran je nastavak intenzivnih eksperimentalnih istraživanja, s posebnim naglaskom na identifikaciju razgradnih produkata, razumijevanje mehanizama transformacije antivirotika te ispitivanje učinkovitosti kombiniranih postupaka obrade.

Jedan od ključnih istraživačkih smjerova bit će identifikacija i razjašnjavanje putova razgradnje antivirotika, pri čemu će se nastojati povezati struktura polaznih spojeva, primijenjeni uvjeti obrade i nastali transformacijski produkti.

Posebna pozornost bit će posvećena primjeni kombiniranih naprednih oksidacijskih i bioloških postupaka na realnim uzorcima otpadne vode. Za razliku od istraživanja provedenih u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, realne otpadne vode predstavljaju složene sustave koji sadržavaju brojne organske i anorganske onečišćujuće tvari. Njihova prisutnost može značajno utjecati na učinkovitost oksidacijskih procesa, aktivnost mikroorganizama i ukupnu uspješnost uklanjanja ciljnih onečišćujućih tvari.

Ispitivanja na realnim otpadnim vodama stoga su važan korak prema procjeni primjenjivosti razvijenih postupaka u uvjetima bližima stvarnim sustavima obrade otpadnih voda.

U završnoj godini projekta planirana je priprema i objava dodatnih pet znanstvenih radova, koji će obuhvatiti okolišne aspekte i putove razgradnje antivirotika, identifikaciju nastalih transformacijskih produkata te učinkovitost kombiniranih postupaka napredne oksidacije i biološke obrade.

Značaj projekta za zaštitu okoliša i daljnji razvoj istraživanja

Projekt EnA-SARS povezuje nekoliko važnih istraživačkih područja: kemiju okoliša, kemijsko i biokemijsko inženjerstvo, analitičku kemiju, mikrobiologiju i ekotoksikologiju. Takav interdisciplinarni pristup omogućuje sveobuhvatnije razumijevanje složenih procesa kojima su farmaceutske tvari izložene nakon dospijevanja u okoliš.

Posebna vrijednost projekta proizlazi iz povezivanja istraživanja učinkovitosti razgradnje s identifikacijom transformacijskih produkata i procjenom mogućih ekotoksikoloških učinaka. Time se istraživanja ne ograničavaju isključivo na smanjenje koncentracije pojedinog farmaceutika, nego obuhvaćaju i pitanja sigurnosti primijenjenih postupaka obrade.

Dosadašnji rezultati, objavljeni znanstveni radovi, međunarodna suradnja i obrazovanje mladih istraživača potvrđuju važnost kontinuiranog ulaganja u znanstvena istraživanja novih onečišćujućih tvari. Istodobno, projekt doprinosi razvoju znanja koja mogu biti korisna pri oblikovanju budućih strategija praćenja i uklanjanja farmaceutika iz vodenog okoliša.

Nastavkom istraživanja tijekom posljednje godine projekta očekuje se daljnje produbljivanje znanstvenih spoznaja o okolišnoj sudbini antivirotika, njihovim putovima razgradnje te mogućnostima primjene kombiniranih kemijskih i bioloških tehnologija.

Projekt EnA-SARS ujedno predstavlja primjer povezivanja znanstvene izvrsnosti, međunarodne suradnje i obrazovanja novih generacija istraživača, uz zajednički cilj razvoja znanstveno utemeljenih rješenja za očuvanje kvalitete voda i zaštitu okoliša.

Zahvala

Istraživanja predstavljena u ovom članku provode se u okviru znanstveno-istraživačkog projekta „Okolišni aspekti SARS-CoV-2 antivirotika" (EnA-SARS, IP-2022-10-2822), koji u cijelosti financira Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ). Zahvaljujemo Hrvatskoj zakladi za znanost na financijskoj potpori koja omogućuje provedbu istraživanja, međunarodnu znanstvenu suradnju te obrazovanje i usavršavanje mladih istraživača.

Posebnu zahvalnost upućujemo dr. sc. Marinu Ganjti iz Zagrebačkih otpadnih voda d. o. o. na kontinuiranoj suradnji i osiguravanju aktivnog mulja potrebnog za provedbu eksperimentalnih istraživanja. Njegova susretljivost i stručna podrška omogućuju nesmetanu provedbu istraživanja biološke razgradnje antivirotika te ispitivanje učinkovitosti kombiniranih kemijskih i bioloških postupaka obrade otpadnih voda.

S posebnim poštovanjem prisjećamo se i prerano preminulog prof. dr. sc. Šime Ukića, inicijalnog voditelja projekta, čija su znanstvena vizija, predanost istraživanju i doprinos oblikovanju projekta EnA-SARS postavili temelje za njegovu uspješnu provedbu i daljnji razvoj istraživanja.

HRZZ
Hrvatska zaklada za znanost