

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Катарине Д. Катић, мастер инжењера технологије

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, одлука бр. 2026-35/366 од 27. августа 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Катарине Д. Катић, мастер инжењера технологије, под насловом „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“.

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- Школске 2018/2019. године, кандидаткиња Катарина Д. Катић, мастер инжењер технологије, уписала је докторске академске студије (број индекса 2018/4024) на студијском програму Биохемијско инжењерство и биотехнологија, Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, под менторством др Дејана Безбрадице, редовног професора.
- 3. јула 2024. године (одлука бр. 35/172), кандидаткиња Катарина Д. Катић, мастер инжењер технологије, предложила је тему докторске дисертације под називом: „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“ (пријава бр. 21/14 од 26. јуна 2024. године), а Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду усвојило је Комисију за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације.
- 28. августа 2024. године (одлука бр. 35/210), на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата, а за менторе су именовани др Дејан Безбрадица, редовни професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, и др Катарина Бањанац, виши научни сарадник Иновационог центра Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду.
- 23. септембра 2024. године (одлука бр. 61206-3209/2-24), на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидаткиње Катарине Д. Катић, под називом „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“.
- На захтев Катарине Д. Катић, студенткиње докторских студија, а уз сагласност ментора проф. др Дејана Безбрадице, деканка Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду је, на основу члана 101. Статута Универзитета у Београду и члана 76. Статута Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, 29. октобра 2024. године

донела решење о продужењу рока за завршетак докторских академских студија (решење бр. 20/221), којим је рок за завршетак студија продужен до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30. септембра 2027. године.

- 27. августа 2026. године (одлука бр. 2026-35/366), на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета донета је одлука о именовању чланова Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Катарине Д. Катић, мастер инжењера технологије, под називом „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Биохемијско инжењерство и биотехнологија, за коју је Технолошко-металуршки факултет, Универзитета у Београду матична установа. Ментори ове докторске дисертације су др Дејан Безбрадица, редовни професор Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, и др Катарина Бањанац, виши научни сарадник Иновационог центра Технолошко-металуршког факултета, који су, на основу досадашњих објављених научних радова и истраживачког искуства, компетентни да руководе израдом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидаткињи

Катарина Д. Катић, мастер инжењер технологије, рођена је 17. октобра 1994. године у Београду, где је завршила основну школу „Владислав Рибникар“. Након тога, школовање је наставила у Медицинској школи на Звездари, где је завршила смер за лабораторијског техничара са одличним успехом. Основне академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду уписала је 2013. године, на студијском програму Биохемијско инжењерство и биотехнологија. Дипломирала је у августу 2017. године са просечном оценом 8,65 и оценом 10 на завршном раду под називом „Анализа процеса ферментације сунцокретовете сачме у циљу добијања високопротеинске хране за животиње методама молекуларне микробиологије“. Мастер академске студије на Технолошко-металуршком факултету уписала је 2017. године на студијском програму Биохемијско инжењерство и положила све испите предвиђене планом и програмом мастер академских студија са просечном оценом 9,38. Завршни мастер рад под називом „Добијање ферментисаних производа од соје применом пробиотске бактерије *Lactobacillus amylovorus*“ одбранила је у августу 2018. године са оценом 10.

Докторске академске студије на студијском програму Биохемијско инжењерство и биотехнологија, под менторством проф. др Дејана Безбрадице, уписала је школске 2018/2019. године. Положила је све испите предвиђене планом и програмом докторских академских студија Технолошко-металуршког факултета у Београду са просечном оценом 9,82 и одбранила завршни испит, са оценом 10, под називом „Примена биотехнолошких поступака са циљем трансформисања сунцокретовете сачме у вредније производе“.

Од новембра 2018. до јула 2021. године била је запослена у Институту за хигијену и технологију меса, где је 05. новембра 2019. године изабрана у звање истраживач-приправник, ангажована на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Развој нових инкапсулационих и ензимских технологија за производњу биокатализатора и биолошки активних компонената хране у циљу повећања њене конкурентности, квалитета и безбедности“ (ИИИ 46010). Од јула 2021. до 2026. године била је запослена у Словенији, у развојно-иновационој фирми „Bio-ReCell“ (Љубљана, Словенија), као развојни истраживач. Од априла 2026. године запослена је на Институту за физику у Београду, као менаџер за интелектуалну својину, на пројекту програма Хоризонт Европа.

У току свог досадашњег истраживачког рада кандидаткиња је коаутор једног рада у врхунском међународном часопису (M21), два рада у истакнутим међународним часописима (M22), једног поглавља у међународној монографији (M14), једног рада у националном часопису

међународног значаја (M24), једног саопштења са међународног скупа штампаног у целини (M33) и једног саопштења са међународне конференције штампаног у сажетку (M34). Поред наведених радова, кандидаткиња је коаутор једног признатог међународног патента (WO2023209175A1, признат у САД под бројем US12624338B2) и једне међународне патентне пријаве (WO2025083206A1).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Катарине Д. Катић, мастер инжењера технологије, под називом „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“ написана је на 203 нумерисане стране, са укупно 6 поглавља. Укључује 98 слика, 15 табела и 370 литературних навода. Дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература. Теоријски део подељен је на осам поглавља, Експериментални део на два, а Резултати и дискусија на четири поглавља. На почетку дисертације налазе се Захвалница, Сажетак на српском и енглеском језику са кључним речима и Садржај, а на крају Биографија кандидаткиње и Изјаве о ауторству, истоветности електронске и штампане верзије докторске дисертације и о коришћењу. По својој форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу дисертације дефинисани су предмет и циљ истраживања, са посебним освртом на значај концепта циркуларне биоекономије и потребу за ефикаснијим искоришћењем нуспроизвода прехранбене индустрије, а на крају поглавља истакнути су појединачни циљеви истраживања.

Теоријски део дисертације подељен је на осам поглавља. У оквиру првог поглавља дат је преглед појма, сврхе и метода имобилизације ензима, као и врста носача (неорганских и органских) који се користе у ту сврху. У другом поглављу описане су целулоза и наноцелулоза као носачи за имобилизацију ензима, са посебним освртом на њихово добијање, физичко-хемијска својства и методе хемијске модификације (оксидација, силанизација и друге), уз преглед литературе о имобилисаним ензимима на целулозним и наноцелулозним носачима. У трећем поглављу описани су ензими за обраду нуспроизвода индустрије хране (хемицелулазе, пектиназе и протеазе), као и њихова примена у обради нуспроизвода. У четвртом поглављу приказани су нуспроизводи прехранбене индустрије, са посебним освртом на оне који се добијају у преради уљарица (сунцокрета и уљане репице) и бобичастог воћа (погача црне рибизле), као и њихове кључне компоненте (угљене хидрате и протеине). У петом поглављу описани су концепт биорафинерије и фракционисање као кључни корак у биорафинеријском приступу. У шестом поглављу дати су дефиниција, класификација и примена протеинских хидролизата. У седмом поглављу описани су пребиотици, њихова дефиниција и подела, са посебним освртом на ксилоолигосахариде и пектинске олигосахариде. У осмом поглављу конкретизовани су циљеви истраживања.

Експериментални део дисертације састоји се из два поглавља: у првом су описани материјали и опрема коришћени током израде дисертације, а у другом примењене методе. Описани су поступци добијања, хемијске модификације (перјодатна оксидација, силанизација и активација глутаралдехидом) и карактеризације наноцелулозе, методе имобилизације ензима адсорпцијом и формирањем ковалентних веза, методе за одређивање концентрације протеина и активности ксиланазе, пектиназе и протеаза, као и поступак десорпције ензима са носача. Описане су и методе фракционисања нуспроизвода (добијање ксилана из сунцокрете сачме, пектина из сачме уљане репице и погаче црне рибизле и протеинске фракције сунцокрете сачме), примена слободних и имобилисаних ензима у реакцијама хидролизе и циклуси поновне употребе, аналитичке методе (хроматографске, спектрофотометријске и електрофоретске) за хемијску

карактеризацију производа и оптимизацију имобилизације ензима и микробиолошка метода за одређивање пребиотске активности добијених производа.

Део Резултати и дискусија обухвата приказ, анализу и дискусију добијених резултата, уз поређење са релевантним истраживањима објављеним у научној периодици, и подељен је на четири поглавља. У првом поглављу приказани су резултати хемијске модификације наноцелулозних носача. Честице наноцелулозе добијене су киселинском хидролизом микрокристалне целулозе, а потом су примењене две стратегије модификације површине: перјодатна оксидација, којом су добијене честице наноцелулозе функционализоване алдехидним групама, и силанизација 3-аминопропилтриетоксисиланом, којом су добијене честице наноцелулозе функционализоване аминокиселинским групама, уз накнадну активацију глутаралдехидом, којом су добијене честице наноцелулозе функционализоване алдехидним групама на већем растојању од површине носача. Инфрацрвеном спектроскопијом са Фуријеовом трансформацијом (FTIR) је потврђена успешност хемијске модификације сва три функционализоване носача.

У другом поглављу приказани су резултати карактеризације добијених носача скенирајућом електронском микроскопијом (SEM), трансмисионом електронском микроскопијом (TEM) и методом динамичког расејања светлости (DLS). Утврђено је да честице имају облик наноштапића, чије се димензије и морфологија нису значајно промениле након примењених поступака хемијске модификације, чиме је очувана велика специфична површина носача.

У трећем поглављу приказани су резултати имобилизације четири комерцијална ензимска препарата, ксиланазе (Rohalase® SEP-Visco), пектиназе (Pectinex® Ultra SP-L) и протеаза (Alcalase® и Flavourzyme®), на нефункционализован наноцелулозни носач и три функционализоване. За сваки ензимски систем испитан је утицај кључних фактора (pH вредности, иницијалне концентрације протеина и времена трајања имобилизације) на принос имобилизације протеина и активности, концентрацију имобилисане активности и специфичну активност имобилисаног препарата. Удео иреверзибилно ковалентно везаног ензима одређен је након десорпционог третмана раствором CaCl₂ и раствором Triton X-100, чиме је раздвојен допринос адсорбованих и ковалентно везаних молекула укупној измереној активности. У оквиру сваког поглавља дате су и упоредне анализе адсорпције на нефункционализовану и аминокиселинску функционализовану наноцелулозу и ковалентне имобилизације на наноцелулозу функционализовану увођењем алдехидних група. На основу њих су за имобилизацију сваког од анализираних ензима одабрани оптимални услови имобилизације и најпогоднији носач. Тумачење уочених разлика поткрепљено је анализом тродимензионалне структуре ензима, односно расподеле електростатичког потенцијала на површини молекула и положаја аминокиселинских остатака кључних за имобилизацију у односу на активни центар.

У четвртм поглављу приказани су резултати примене одабраних имобилисаних препарата у валоризацији нуспроизвода прехранбене индустрије. Имобилисана ксиланаза примењена је у хидролизи ксиланске фракције изоловане из сунцокрете сачме ради добијања ксилоолигосахарида, имобилисана пектиназа у хидролизи три пектинска супстрата (пектина растворног у киселини и калцијум-везаног пектина из сачме уљане репице, као и пектина из погаче црне рибизле) ради добијања пектинских олигосахарида, а имобилисани препарати Alcalase® и Flavourzyme® секвенцијално у хидролизи протеинске фракције сунцокрете сачме ради добијања протеинских хидролизата. За сваки систем праћени су ток хидролизе и профил насталих производа применом течне хроматографије високих перформанси, спектрофотометријских метода за одређивање редукујућих шећера и протеина и електрофоретске анализе протеина. Анализиран је и оперативна стабилност имобилисаних препарата ради процене њихове погодности за поновну употребу или развој континуалних процеса. У завршном делу поглавља приказани су резултати процене пребиотског потенцијала добијених олигосахарида, изведене праћењем раста три пробиотска соја и једне патогене бактерије и израчунавањем пребиотског капацитета, при чему су упоређени производи добијени хидролизом помоћу слободних и имобилисаних ензима.

У делу Закључак сумирани су најважнији научни доприноси изведени на основу експерименталних резултата, у складу са постављеним циљевима рада. У делу Литература наведене су све референце цитиране у докторској дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Нуспроизводи прехранбене индустрије настају у великим количинама, па је њихово збрињавање значајан технолошки и еколошки проблем, а уједно и прилика за развој нових биотехнолошких поступака пошто ови нуспроизводи садрже вредне биолошке молекуле који се могу трансформисати у производе са додатом вредношћу. Овакви нуспроизводи су, на пример, сачме уљарица, које заостају након екстракције уља из семена, и погаче бобичастог воћа, добијене његовим пресовањем. Сачме уљарица представљају сировину значајну и за пољопривредну производњу у Републици Србији, која се према количини произведеног сунцокрета налази на 15. месту у свету (податак за 2022. годину), док производња уљане репице последњих година расте, а врло је важна уљарица у ЕУ због примене у производњи биодизела. Иако садрже високе уделе протеина (око 32% у сунцокретој сачми и око 35% у сачми уљане репице), сложене угљене хидрате попут хемицелулозе и пектинских полисахарида, али и фенолна једињења и антиоксидансе, ови нуспроизводи и даље се претежно користе као компоненте хране за животиње ниже вредности или се одлажу као отпад. Фракционисање ових сировина, укључујући погачу бобичастог воћа, и циљана ензимска модификација појединачних фракција представљају основу биорафинеријског приступа, којим се недовољно искоришћени нуспроизводи превode у производе са додатом вредношћу. У поређењу са хемијским поступцима хидролизе, примена ензима одликује се високом специфичношћу, благим реакционим условима, одсуством нежељених споредних производа и минималним генерисањем хемијског отпада, што је од посебног значаја у прехранбеној индустрији, где је безбедност финалног производа пресудан критеријум. На тај начин се из протеинске фракције добијају протеински хидролизати побољшане нутритивне и биоактивне вредности, а из хемицелулозне и пектинске фракције ксилоолигосахариди и пектински олигосахариди, једињења за која се последњих година бележи изразит пораст интересовања због њиховог пребиотског потенцијала и примене у функционалној храни и додацима исхрани.

Велику препреку развоју индустријских поступака ензимског фракционисања нуспроизвода индустрије хране представља висока цена ензима, а развој адекватних носача и техника за имобилисање ензима је важан корак ка решавању овог проблема јер омогућава вишеструку примену ензима у шаржним процесима или развој континуалних ензимских процеса. За индустријску примену ковалентна имобилизација је нарочито пожељна пошто, за разлику од адсорпције, спречава испирање ензима и последичну контаминацију финалног производа, а истовремено омогућава већу оперативну стабилност ензима. Ипак, приликом ковалентне имобилизације може доћи и до драстичног пада активности ензима, због чега избор носача и оптимизација услова имобилизације представљају кључне кораке у развоју ових поступака. Посебну пажњу данас привлаче носачи добијени из обновљивих извора јер се њиховом применом омогућава да развијени процеси буду у потпуности у складу са принципима циркуларне економије. Наноцелулоза је врло атрактиван носач за примену у имобилизацији ензима јер ју карактеришу велика специфична површина, која омогућава везивање значајних количина ензима, веома добра механичка својства, биоразградивост, нижа цена у поређењу са синтетичким полимерима и велики број хидроксилних група погодних за хемијску модификацију. Досадашња истраживања у овој области углавном су била усмерена на појединачне ензиме и претежно на имобилизацију адсорпцијом, док систематска упоредна испитивања више различито функционализованих наноцелулозних носача и више ензима у истом експерименталном оквиру нису доступна у литератури.

Оригиналност ове докторске дисертације огледа се у систематском приступу овом проблему. Развијене су три стратегије модификације наноцелулозе (увођење аминокиселинских група силанизацијом, увођење алдехидних група перјодатном оксидацијом и активација глутаралдехидом), а добијена четири носача упоредно су испитана у имобилизацији четири комерцијална хидролитичка ензимска препарата, и адсорпцијом и ковалентним везивањем. Утврђен је двостепени механизам ковалентног везивања на носачима са алдехидним групама, који обухвата брзу почетну адсорпцију праћену спорим формирањем Шифових база са аминокиселинским остацима ензима. Анализа тродимензионалне структуре ензима искоришћена је као оквир за тумачење разлика у ефикасности имобилизације и за предвиђање најпогоднијег носача. Широко опсежно испитивање услова, носача, типова имобилизације и ензима омогућио је значајан научни допринос рационалном дизајну нанобиокатализатора пошто универзалног носача нема па се површинска функционализација наноцелулозе мора бирати према структурним особинама ензима који се везује и према сложености циљног супстрата. Иновативност дисертације огледа се и у примени развијених нанобиокатализатора на конкретне нуспроизводе прехранбене индустрије (сунцокретову сачму, сачму уљане репице и погачу црне рибизле), и то на три различите класе фракција - хемицелулозну, пектинску и протеинску. Овим приступом добијени су производи са додатом вредношћу, чија су функционална својства потврђена, укључујући и процену пребиотског потенцијала добијених олигосахарида, чиме је доказан концепт примене нанобиокатализатора у валоризацији нуспроизвода прехранбене индустрије. Истовремено је постигнут и значајан допринос преносу развијених поступака у индустријско окружење анализом ефикасности виšekратне употребе нанобиокатализатора. На основу опсежног прегледа литературе може се закључити да се истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације уклапају у савремене светске трендове у области биокатализе, одрживих материјала и циркуларне биоекономије и потврђују значај и актуелност проучавање проблематике.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру ове докторске дисертације цитирано је 370 литературних навода, од којих већина потиче из радова објављених у врхунским међународним часописима у последњој деценији. Истраживања приказана у наведеној литератури коришћена су за планирање експерименталног рада, анализу и тумачење добијених резултата. Међу литературним наводима налазе се и уџбеници и прегледни радови, који чине полазну основу за тумачење експерименталних резултата. Преглед коришћене литературе и објављени радови кандидаткиње указују на адекватно познавање области истраживања и актуелног стања у овој научној области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Сви резултати приказани у овој докторској дисертацији добијени су применом одговарајућих експерименталних техника и савремених аналитичких инструменталних метода, према оригиналним или модификованим методама из литературе, уз адекватну анализу и обраду података.

Честице наноцелулозе добијене су киселинском хидролизом микрокристалне целулозе, а потом модификоване ради увођења функционалних група за ковалентну имобилизацију: перјодатном оксидацијом ради формирања алдехидних група и силанизацијом аминокиселинским уз накнадну активацију глутаралдехидом. Концентрација уведених алдехидних група на оксидованој наноцелулози одређена је хидроксиламин-титрационом методом, при чему је утврђен степен оксидације од 32%. Носачи су пре и после модификације и имобилизације окарактерисани SEM, TEM и DLS методом, ради одређивања хидродинамичке величине честица у дисперзији, и FTIR спектроскопијом у опсегу 4000–400 cm^{-1} . Активност ксиланазе и пектиназе одређивана је праћењем почетне кинетике ослобађања редукујућих шећера стандардном спектрофотометријском методом, при чему је као супстрат за ксиланазу коришћен комерцијални ксилан, а за пектиназу пектин из јабуке. Хидролитичка активност протеаза праћена је методом хидролизе азоказеина (мерењем апсорбанце ослобођене азо-боје), као мером укупне протеолитичке активности, а код препарата Flavourzyme® и методом хидролизе L-леуцин-р-

нитроанилида ради праћења егзопептидазне активности. Концентрација протеина одређивана је стандардном методом по Бредфорду. Удео ковалентно везаног ензима процењен је десорпционим третманом носача раствором CaCl_2 и раствором Triton X-100.

Производи ензимске хидролизе анализирани су течном хроматографијом високих перформанси (HPLC, систем Dionex Ultimate 3000). Ксилоолигосахариди су, након дериватизације реагенсом, раздвајани на реверзно-фазној колони (ZORBAX Eclipse Plus C18, 4,6×150 mm, 5 μm) уз UV детекцију на 245 nm и квантификовани на основу калибрационих кривих стандарда XOS2-XOS6. Ток хидролизе пектина праћен је методом за одређивање редукујућих шећера, а степен хидролизе протеинске фракције нинхидринском методом. Профил протеинских хидролизата анализиран је реверзно-фазном HPLC методом (колона BioBasic-8, 150×4,6 mm, 5 μm ;) и натријум-додецил-сулфат електрофорезом у полиакриламидном гелу (SDS-PAGE). Пребиотски потенцијал добијених олигосахарида процењен је микробиолошким тестом раста одабраних представника цревне микробиоте у микротитарским плочама. Испитан је утицај олигосахарида на раст пробиотских сојева *Lactiplantibacillus plantarum* 299v, *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (ATCC 53103) и *Saccharomyces boulardii* CBS 5926, уз *Escherichia coli* ATCC 25922 као референтни сој. Раст је праћен мерењем оптичке густине на 600 nm и прерачунавањем у број виталних ћелија, на основу чега је одређен пребиотски капацитет, дефинисан као разлика релативног раста пробиотског соја и *E. coli*.

3.4. Применљивост остварених резултата

На основу прегледа литературних података и експерименталних резултата приказаних у дисертацији, остварен је значајан допринос у развоју ефикасних, економичних и еколошки одрживих поступака за добијање имобилисаних биокатализатора на бази наноцелулозе и њихову примену у валоризацији нуспроизвода прехранбене индустрије. Развијени биообновљиви наноцелулозни носачи и оптимизовани поступци ковалентне имобилизације омогућавају добијање стабилних и активних имобилисаних препарата хидролитичких ензима погодних за вишеструку употребу. Тиме се смањују трошкови процеса и доприноси одрживости производње. Примена развијених имобилисаних препарата у обради протеинске, хемицелулозне и пектинске фракције нуспроизвода (сунцокретовете сачме, уљане репице и погаче црне рибизле) омогућава добијање производа са додатом вредношћу: протеинских хидролизата повећане нутритивне и биоактивне вредности и ксило- и пектинских олигосахарида са пребиотским потенцијалом. Овакви производи имају потенцијал примене као функционални састојци хране и додаци исхрани. Тиме се стварају услови за пренос развијених поступака на индустријски ниво и за економичнији и еколошки одрживији модел производње.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У свом досадашњем истраживачком раду кандидаткиња Катарина Д. Катић, мастер инжењер технологије, показала је самосталност, систематичност и стручност у претраживању литературе, припреми и реализацији експеримената коришћењем различитих техника и метода, као и у анализи и обради резултата. На основу досадашњих залагања и постигнутих резултата, Комисија је мишљења да кандидаткиња поседује све квалитете неопходне за самостални научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације у области биохемијског инжењерства имају вишеструко значајан научни и практични допринос, при чему се може издвојити следеће:

- Развијени су поступци за добијање честица наноцелулозе из микрокристалне целулозе и њихову хемијску модификацију ради увођења функционалних група погодних за ковалентну имобилизацију ензима: аминокиселино-наноцелулоза, оксидована наноцелулоза (са алдехидним групама) и аминокиселино-наноцелулоза активирана глутаралдехидом (са алдехидним групама). Добијени носачи окарактерисани су методама SEM, TEM, DLS и FTIR.
- Оптимизовани су поступци ковалентне имобилизације комерцијалних препарата ксиланазе (Rohalase® SEP-Visco), пектиназе (Pectinex® Ultra SP-L) и протеаза (Alcalase® и Flavourzyme®) на модификоване наноцелулозне носаче, и одређени су оптимални услови имобилизације за сваки ензим. Потврђен је двостепени механизам имобилизације на носаче функционализоване алдехидним групама (брза почетна адсорпција праћена формирањем Шифових база између алдехидних група носача и аминокиселина лизинских остатака ензима), а анализа тродимензионалне структуре ензима искоришћена је као оквир за тумачење разлика у ефикасности имобилизације које се могу користити за предикцију оптималног носача.
- Показано је да избор оптималног носача није универзалан, већ зависи од структурних особина ензима и од димензија и сложености конформације супстрата. За ензимски препарат ксиланазе најбољи резултати постигнути су на оксидованој наноцелулози, уз једноставнији једностепени поступак активације носача. За ензимски препарат пектиназе најпогоднији носаче је била аминокиселино-наноцелулоза активирана глутаралдехидом. При имобилизацији протеаза, примена аминокиселино-наноцелулозе активиране глутаралдехидом обезбедила је виши капацитет везивања и већу отпорност на десорпцију код препарата Alcalase®, док се при имобилизацији вишекомпонентног протеолитичког препарата Flavourzyme® на два носача испојила различита селективност: на оксидованој наноцелулози је израженије везивање егзопептидазних, а на аминокиселино-наноцелулози активираној глутаралдехидом ендопептидазних компоненти, па се протеолитичко дејство имобилисаног препарата може циљано подешавати избором носача.
- Установљено је да су имобилисани препарати ефикасни у ензимској трансформацији нуспроизвода индустрије хране у производе са додатом вредношћу. Ксиланаза имобилисана на оксидованој наноцелулози успешно је примењена у биотрансформацији ксилана изолованог из сунцокретовете сачме у ксилоолигосахариде доминантног степена полимеризације 3-6, а имобилисани ензим је задржао 95% активности након шест циклуса поновне употребе. За добијене ксилоолигосахариде утврђене су позитивне вредности пребиотског капацитета за сва три испитивана пробиотска соја, највише управо за хидролизат добијен имобилисаним препаратом. Развијени су поступци добијања пектинских олигосахарида хидролизом пектина изолованог из сачме уљане репице и погаче добијене после пресовања црне рибизле применом имобилисане пектиназе. Показано је да оптималан носач зависи од структурне сложености супстрата: код структурно најсложенијег пектина из погаче црне рибизле највишу финалну концентрацију редукујућих шећера обезбедио је имобилисани препарат добијен применом аминокиселино-наноцелулозе активиране глутаралдехидом, а са овим препаратом је постигнута и највећа оперативна стабилност и доказан је пребиотски потенцијал добијених пектинских олигосахарида пошто је доказана селективна стимулација раста испитиваних пробиотских сојева у микробиолошким тестовима.
- Развијени су поступци добијања протеинских хидролизата секвенцијалном применом имобилисаних препарата Alcalase® и Flavourzyme® на аминокиселино-наноцелулози активираној глутаралдехидом у хидролизи протеинске фракције сунцокретовете сачме, при чему је постигнут степен хидролизе виши него са слободним ензимима и са ензимима имобилисаним на оксидованој наноцелулози. Анализама SDS-PAGE и HPLC потврђена је потпуна разградња α - и β -субјединица IIS хелиантинина, уз акумулацију кратких пептида и смањење удела хидрофобних пептида средње дужине одговорних за горчину хидролизата, а имобилисани ензим је задржао 50% активности након четири циклуса.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Прегледом доступне научне литературе и разматрањем резултата проистеклих из истраживања у оквиру ове докторске дисертације, може се закључити да је остварено значајно унапређење постојећих научних сазнања у области имобилизације ензима на биообновљиве носаче и валоризације нуспроизвода прехрамбене индустрије. Развој наноцелулозних носача и различитих стратегија њихове модификације омогућио је добијање активних и стабилних имобилисаних препарата хидролитичких ензима, што доприноси економичности и одрживости ензимских процеса. Истраживање је спроведено на носачима добијеним из обновљивих извора, што га уклапа у концепт циркуларне биономије.

Применом развијених имобилисаних биокатализатора у обради протеинске, хемицелулозне и пектинске фракције нуспроизвода (сунцокретовете сачме, сачме уљане репице и погаче црне рибизле) показано је да се ове недовољно искоришћене сировине могу трансформисати у производе са додатом вредношћу: протеинске хидролизате и пребиотски активне олигосахариде. Овим је остварен значајан корак ка развоју ефикаснијих и еколошки одрживијих поступака за добијање функционалних компоненти хране, са потенцијалом за индустријску примену.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидаткиња Катарина Д. Катић је резултате истраживања добијене у оквиру израде своје докторске дисертације потврдила објављивањем радова у часописима међународног значаја. Из ове докторске дисертације кандидаткиња је први аутор једног рада у врхунском међународном часопису (M21) и једног рада у истакнутом међународном часопису (M22):

Категорија M21:

1. Katić, K., Banjanac, K., Simović, M., Veljković, M., Ćorović, M., Denić, L., Zakić, T., Kralj, S., Bezbradica, D. (2024) Nanobiocatalyst based on covalent immobilization of proteases onto functionalized nanocellulose for efficient production of sunflower meal protein hydrolysates. *Food Bioscience*, 61, 104590. (IF=5,9) (ISSN 2212-4292) (<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104590>)

Категорија M22:

1. Katić, K., Banjanac, K., Veljković, M., Simović, M., Milošević, M., Nemec, S., Marinković, A., Bezbradica, D. (2025) Biotransformation of xylan isolated from sunflower meal into xylo-oligosaccharides using endo-xylanase immobilized on oxidized nanocellulose. *Molecular Catalysis*, 585, 115340. (IF=4,9) (ISSN 2468-8231) (<https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.115340>)

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204 од 22. јуна 2018. године), коришћењем програма iThenticate (31. августа 2026. године) извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидаткиње Катарине Д. Катић, мастер инжењера технологије, под називом „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“ и утврђено је да подудараност текста износи 11%. Овај степен подударности претежно је последица употребљених личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, општих података, детаљног описа методологије, као и претходно публикованих резултата докторанткињиних истраживања, који су проистекли из њене дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изложеног, Комисија сматра да је докторска дисертација кандидаткиње Катарине Д. Катић оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходно изнетих разматрања докторске дисертације Катарине Д. Катић, сматрамо да су предмет и циљеви истраживања, који су дефинисани у извештају о оцени научне заснованости теме, у потпуности остварени. Примењена методологија је адекватна и усклађена са савременим истраживањима са циљем развоја и карактеризације нанобиокатализатора, а постигнут је значајан научни и практични допринос њиховом применом у валоризацији индустријских нуспроизвода у складу са принципима циркуларне економије. Ова докторска дисертација својим садржајем и квалитетом доприноси области Технолошко инжењерство, ужа научна област Биохемијско инжењерство и биотехнологија, што је и потврђено објављивањем радова у међународним часописима. Рад на дисертацији показује да кандидат поседује знање и способност за самосталан научноистраживачки рад.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да се докторска дисертација под називом „Развој имобилисаних биокатализатора са наноцелулозним носачима за примену у валоризацији нуспроизвода индустрије хране“ кандидаткиње Катарине Д. Катић прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка ове процедуре кандидаткиња позове на усмену одбрану докторске дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 22. септембра 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Соња Јаковетић Танасковић, доцент
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет
председник Комисије

.....
Др Александар Маринковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Сања Савић, доцент
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Милица Симовић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Весна Лазић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“