

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Јоване Грбић

Одлуком бр. 2026-35/32 од 5. фебруара 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Јоване Грбић, под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“.

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. УВОД**

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2019/2020. године, кандидат Јована Грбић, мастер инжењер технологије, уписала је докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Биохемијско инжењерство и биотехнологија, под менторством др Александре Ђукић-Вуковић, доцента Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

25. маја 2022. – Кандидат Јована Грбић предложила је тему докторске дисертације под насловом: „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“.

2. јуна 2022. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/57 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата Јоване Грбић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом: „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“.

30. јуна 2022. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/167 о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме за израду докторске дисертације кандидата Јоване Грбић, под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“, уз именовање ментора др Александре Ђукић-Вуковић, доцента Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

4. јула 2022. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, одлуком број 61206-2824/2-22, дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Јоване Грбић, под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“.

27. маја 2025. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/121 о именовању др Саше Лазовића, научног саветника Института за физику Универзитета у Београду, за другог ментора кандидата Јоване Грбић.

4. јула 2025. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, одлуком број 06/3002/7-25, дата је сагласност на одлуку о додељивању ментора др Саше Лазовића, научног саветника Института за физику Универзитета у Београду, кандидату Јовани Грбић.

21. новембра 2025. – На захтев кандидата Јоване Грбић, а на основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 76. Статута Универзитета у Београду Технолошко-металуршког факултета, Деканка Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду је донела решење број 20/198, којим је одобрено продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

5. фебруара 2026. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је Одлука бр. 35/32 о именовану Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Јоване Грбић, под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“.

## 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 Александра Ђукић-Вуковић, научни саветник и доцент Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Саша Лазовић, научни саветник Института за физику Универзитета у Београду, који су на основу досадашњег научно-истраживачког рада, објављених публикација и искуства компетентни да руководе израдом ове докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Јована З. Грбић, мастер инжењер технологије, рођена је 7. марта 1994. године у Београду. Основну школу и Десету гимназију „Михајло Пупин“ завршила је у Београду. Школске 2013/2014. године уписала је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду, студијски програм Биохемијско инжењерство и биотехнологија. Основне академске студије завршила је у септембру 2018. године, одбраном завршног рада „Производња пробиотске биомасе *Bacillus licheniformis* на воденим екстрактима микроалге *Chlorella vulgaris*“ под менторством проф. др Љиљане Мојовић са оценом 10 и просечном оценом током студија 8,33. Мастер академске студије уписала је школске 2018/2019. године на истом факултету, на студијском програму Биохемијско инжењерство и биотехнологија. Завршни мастер рад са оценом 10 одбранила је у септембру 2019. године, под менторством проф. др Љиљане Мојовић, на тему „Испитивање поступака екстракције и пречишћавања егзополисахарида *Lactobacillus salivarius*“ и завршила мастер академске студије са просечном оценом 9,22. Докторске академске студије је уписала школске 2019/2020. године на матичном факултету, на катедри за Биохемијско инжењерство и биотехнологију, под менторством др Александре Ђукић-Вуковић, доцента Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду. Положила је све испите предвиђене планом и програмом докторских академских студија са просечном оценом 9,82. Завршни испит под насловом „Унапређење ензимске разградње лигноцелулозне биомасе применом третмана нетермалном плазмом“ одбранила је са оценом 10.

Од јануара 2020. године запослена је као истраживач у Иновационом центру Технолошко-металуршког факултета. Ангажована је у настави на извођењу експерименталних вежби из Биотехнолошког практикума 2 (основне академске студије) и Фармацеутске биотехнологије (основне и мастер академске студије), почевши од школске 2022/2023. године. Бави се радом са студентима основних и мастер академских студија током израде завршних и мастер радова. Од јануара 2023. године ангажована је на пројекту *SparkGREEN* (ANSO-CR-PP-08-2022), финансираном од стране Алијансе међународних научних организација. Од октобра до децембра 2024. године боравила је на Факултету за архитектуру, изградњу и грађевинарство Лофборо универзитета (Уједињено Краљевство), где је у сарадњи са др Тањом Раду, редовним професором поменутог факултета, стекла искуство у области анаеробне дигестије.

Током досадашњег истраживачког рада аутор је четири рада у међународним часописима (*M21a+*, *M21* и два *M22*), четири рада у врхунском националним часописима (*M51*), 26 саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (*M34*) и седам саопштења са скупова националног значаја штампаних у изводу (*M64*).

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Јоване Грбић под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених применом комбинованих третмана нетермалном плазмом“ садржи 172 нумерисане стране, у оквиру којих се налази 86 слика, 21 табела и 412 литературних навода. Докторска дисертација је организована кроз шест целина, које обухватају *Увод*, *Теоријски део* (6 поглавља), *Експериментални део* (10 поглавља), *Резултате и дискусију* (9 поглавља), *Закључак* и *Литературу*. На почетку докторске дисертације приказан је Сажетак на српском и енглеском језику, док се на крају докторске дисертације налазе биографија кандидата и изјаве о ауторству, коришћењу и о истоветности електронске и штампане верзије докторске дисертације. Према облику и садржају, приложена докторска дисертација задовољава критеријуме дефинисане Упутством о облику и садржају докторске дисертације Универзитета у Београду.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу је приказано стање органског отпада на свету и у Србији, са посебним нагласком на количине гасова са ефектом стаклене баште (*GHG*, енгл. *greenhouse gases*) које овај отпад емитује. Затим су представљене стратегије чији је циљ смањење емисија *GHG*, уз предлоге за реализацију наведених стратегија. Истакнут је значај примене биорафинеријских поступака, што је уједно и предмет ове докторске дисертације.

Теоријски део се састоји из шест поглавља. У првом поглављу описан је концепт биорафинерије и значај употребе сировина на бази лигноцелулозе у биорафинеријским поступцима. Друго и треће поглавље обухватају хемијски састав и структуру лигноцелулозне биомасе, уз кукурузну стабљику као модел сировину, а затим и третмане који се користе за нарушавање комплексне лигноцелулозне структуре. Четврто поглавље представља стање технике везано за нетермалну плазму и анализира њен значај као нове технике за третман лигноцелулозне биомасе која је у складу са принципима одрживог развоја. Такође, у овом поглављу дат је и преглед третмана различитих типова лигноцелулозне биомасе применом нетермалне плазме који су до сада развијени. Пето поглавље детаљније описује могућности искоришћења третиране лигноцелулозне биомасе као високо вредне сировине, са акцентом на производњу млечне киселине, биоетанола и биометана. У последњем поглављу теоријског дела обједињени су предмет и циљеви истраживања која су вршена у оквиру ове докторске дисертације.

Експериментални део садржи информације неопходне за извођење експеримената реализованих у оквиру ове докторске дисертације. Најпре је дат списак свих материјала и опреме коришћених у самом експерименталном раду, као и опис плазма игле и плазма реактора са диелектричним баријерним пражњењем, који су коришћени као извори нетермалне плазме. Затим су приказане методе које су коришћене за хемијску карактеризацију плазма активираних воде. Описане су и конвенционалне методе за одређивање састава кукурузне стабљике, попут *NREL* протокола, као и методе за одређивање садржаја укупних и испарљивих чврстих материја, влаге и пепела, елементарна органска микроанализа и одређивање бруто садржаја топлотне енергије. Детаљно су описани третмани засновани на примени нетермалне плазме, као и поступак издвајања фракција након третмана. Степен делигнификације, као главни критеријум ефикасности третмана, одређиван је методом са ацетил бромидом, која је детаљно објашњена у овој докторској дисертацији. Представљене су методе за карактеризацију добијене целулозне, хемицелулозне и лигнинске фракције, применом *FTIR* и Раман спектроскопије, *HPLC* анализе, порозиметрије са интрузијом живе, *SEM* микроскопије и рендгенске дифракционе анализе. Приказани су и поступци валоризације целулозне фракције кроз ензимску хидролизу, млечно-киселинску ферментацију, алкохолну ферментацију и анаеробну дигестију. За карактеризацију лигнинске фракције коришћене су стандардне методе, попут одређивања садржаја укупних полифенола и одређивања антиоксидативне активности и антимицробне активности на одабране

патогене сојеве. У последњем поглављу експерименталног дела је приказан и поступак процене одрживости примењених третмана.

У оквиру Резултата и дискусије приказани су резултати проистекли из ове докторске дисертације организовани у девет поглавља. На почетку овог дела приказана је детаљна карактеризација сирове кукурузне стабљике, која је коришћена као модел сировина у свим експериментима. Затим је окарактерисана плазма активирана вода добијена излагањем воде нетермалној плазми у различитим временским интервалима. Праћени су рН вредност и концентрација реактивних врста насталих током третмана плазмом, а затим је показана њихова стабилност током времена. Тиме је утврђено да је плазма игла коришћена у овој дисертацији погодан извор реактивних врста. Наредна поглавља су била посвећена оптимизацији третмана кукурузне стабљике заснованих на примени плазме. Приказан је поступак утврђивања одговарајућег односа биомасе и медијума коришћеног у третману тако да се обезбеди уједначен пренос масе по читавој запремини узорка који се третира, уз осврт на потенцијално смањење запремине током дужег излагања узорка нетермалној плазми. Утврђивање хидромодула вршено је током третмана у воденој средини, узевши у обзир да је овај третман најдуже трајао. Затим је приказан утицај дужине третмана плазмом у воденој средини на делигнификацију. Третман Фентоновим реагенсом је одабран као биомиметички третман у киселој средини. Након комбиновања овог третмана са плазмом, показан је утицај обогаћења реакционе смеше водоник пероксидом и другим реактивним врстама које учествују у Фентон реакцији, утицај редоследа додавања реагенаса, као и дужине трајања третмана за постизање највећег степена делигнификације. Осим тога, утврђена је и дужина инкубације третираног узорка током које се омогућава потпуно одигравање Фентон реакције. Третман алкалним раствором водоник пероксида одабран је као модел третман који је заступљен у индустрији. Комбиновањем овог третмана са плазмом показано је да се висок степен делигнификације може постићи при нижој температури и краћој дужини третмана од уобичајених. Додатно, алкални третман потпомогнут плазмом је био погодан за деполимеризацију лигнина до честица микро и нано величине, што је потврдила SEM микроскопија. За даљи развој комбинованих третмана, испитивањ су и природне дубоке еутектичке смеше у комбинацији са плазма третманом. Природне дубоке еутектичке смеше су одабране као нова генерација „зелених“ органских растварача. FTIR спектроскопија је показала да излагањем плазми не долази до нарушавања структуре ових смеша, већ се формирају нове водоничне везе које повећавају њихову стабилност. Стога је плазма додатно коришћена за смањење унапређење преноса масе, уместо уобичајено коришћеног конвенционалног загревања. Оптимизацијом третмана утврђени су погодан састав еутектичке смеше, садржај воде и дужина трајања плазма третмана неопходни за уклањање највеће количине лигнина. Третман манган пероксидазом, ензимом из групе лигнинолитичких ензима, одабран је као представник биолошких третмана. Употребом плазме као извора водоник пероксида неопходног за каталитички циклус овог ензима, утврђено је да се овако комбиновани третман не може применити за делигнификацију лигноцелулозне биомасе. Међутим, при одговарајућим процесним условима, манган пероксидаза може испољити и целулазну активност и показано је да се предложени третман може користити за селективну разградњу угљено-хидратне компоненте, уз очување лигнина. Допринос примењених третмана повећању приноса млечне киселине, биоетанола и биометана у односу на сирову биомасу образложен је у осмом поглављу. На самом крају приказани су претпостављени укупни трошкови развијених третмана, као и однос трошкова при скалирању третмана. Додатно, представљен је и енергетски биланс третмана еутектичком смешом у плазма реактору.

Закључак обухвата осврт на најважније резултате произишле из ове докторске дисертације.

У Литератури су наведене све референце коришћене током израде и писања ове докторске дисертације.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Како би се ограничиле емисије GHG, Европска комисија је постигла „Европски зелени договор“ (енгл. *European Green Deal*) и тиме обавезала земље чланице да до 2030. године смање ове емисије за 50%, уз циљ да Европа до 2050. постане први климатски неутралан континент. Затим су Уједињене нације развиле „Агенду одрживог развоја 2030“ и поставиле 17 циљева одрживог развоја које треба постићи до 2030., при чему се неколико циљева односи на климатске промене. Да би се задати циљеви постигли,

неопходно је прећи са линеарног на циркуларни модел економије. Овај модел подразумева смањење отпада кроз његову рециклажу и поновно искоришћење. Осим тога, значајан корак у преласку на циркуларну економију представља и имплементација биорафинеријских поступака. Ови поступци се заснивају на употреби биомасе као сировине за добијање енергије и високо вредних производа. У концепту биорафинерије значајно место заузима лигноцелуозна биомаса, пре свега због своје расположивости. Постојећи биорафинеријски поступци који се примењују у индустрији, попут производње биоетанола, подразумевају употребу јестивих делова биљака, нарочито скробних и шећерних усева. Њихова употреба у биорафинеријским поступцима је у директној конкуренцији са храном, чиме се додатно истиче значај употребе сировина на бази лигноцелулозе.

У састав лигноцелулозе улазе целулоза, хемицелулоза и лигнин. Захваљујући високом садржају угљених хидрата, лигноцелуозна биомаса се може користити као извор угљеника у ферментационим процесима, за производњу секундарних метаболита, ензима, витамина, органских киселина или олигосахарида, који због потврђеног пребиотског дејства имају све већи значај. Лигнин представља алтернативу петрохемијским сировинама за добијање ароматичних једињења која се даље преводе у био-уља, биочађ и различите типове биополимера. Такође, у зависности од карактеристика, лигнин може бити и природан извор антиоксиданаса, који се углавном екстрахују из воћа и поврћа, зачинског биља и чајева. У овој докторској дисертацији је као модел сировина коришћена кукурузна стабљика. Кукуруз је једна од најчешће гајених житарица широм света. Након убирања зрна као јединог јестивог дела, чак 80% остатака чини кукурузна стабљика. Процењује се да на сваких килограм произведених зрна кукуруза заостаје око један килограм кукурузне стабљике, што ову сировину чини погодном за употребу у биорафинеријским поступцима. Међутим, како би се постигло максимално искоришћење свих компоненти стабљике, неопходно је најпре фракционисати стабљику применом неког од поступака за третман биомасе.

Примарни циљ третмана лигноцелуложне биомасе је уклањање лигнина, уз делимично уклањање хемицелулозе, како би у третираној биомаси заостала целулоза. Конвенционални третмани показују високу ефикасност у погледу делигнификације, али често нису у складу са принципима одрживог развоја. Наиме, ови третмани захтевају улагање велике количине енергије, често уз употребу агресивних реагенаса, што их чини еколошки неприхватљивим. Стога се у последњој деценији активно ради на унапређењу постојећих третмана ка већем степену одрживости, или развијању нових, тзв. „зелених“ поступака за третман лигноцелуложне биомасе. Најзаступљенија стратегија за унапређење постојећих третмана је употреба алтернативних извора енергије, попут микроталаса или ултразвука. Њиховом применом се постиже већа ефикасност у краћем временском периоду. Предмет ове докторске дисертације је унапређење и развој нових третмана са применом нетермалне плазме. Осим што представља алтернативни извор енергије, плазма је и извор реактивних кисеоничних и реактивних азотних врста, које имају способност разградње комплексних органских једињења. Ове врсте настају и када се вода изложи плазми, те за њихово генерисање није неопходна употреба реагенаса. Такође, у зависности од примењене конфигурације, третман плазмом може бити и енергетски ефикасан. Конкретно, плазма игла која је коришћена у експериментима обухваћеним овом докторском дисертацијом је номиналне снаге од свега 2 W.

У оквиру ове докторске дисертације извршена је оптимизација третмана потпомогнутих плазмом. Најпре је испитана могућност примене плазме за третман кукурузне стабљике у воденом медијуму, што је најједноставнија и најчешће испитивана експериментална поставка. Након тога, прегледом литературе су утврђени третмани који имају потенцијал у разградњи лигноцелулозе. У ову сврху одабрани су третмани применом Фентоновог реагенса, алкалног раствора водоник пероксида и природних дубоких еутектичких смеша, како би се испитала могућност њиховог унапређења применом плазме. Варирањем процесних параметара су утврђени услови за постизање највишег степена делигнификације. Додатно, плазма је коришћена и као алтернативни извор водоник пероксида којим се покреће каталитички циклус лигнинолитичког ензима манган пероксидазе.

Након утврђивања процесних услова за постизање највећег степена делигнификације применом развијених третмана и изоловања фракција лигноцелулозе, извршена је детаљна карактеризација добијених фракција са аспекта структурних и морфолошких промена. Добијена целулозна фракција је валоризована применом ензимске хидролизе, млечно-киселинске ферментације, алкохолне

ферментације и анаеробне дигестије. Биолошка активност лигнинске фракције утврђена је испитивањем антиоксидативне и антимицробне активности екстраката лигнина.

У овој докторској дисертацији су развијени нови неконвенционални третмани лигноцелулозне биомасе засновани на примени плазме. Укључивањем плазме у постојеће третмане значајно је скраћена дужина ових третмана, уз снижење температуре третмана и коришћење минималних количина реагенса, пратећи принципе одрживог развоја. Осим нових третмана, природне еутектичке смеше заостале након третмана су испитане и као медијум за раст бактерија млечне киселине, чиме се развијени плазма/природне дубоке еутектичке смеше третман приближава тзв. „zero waste“ и „zero pollution“ концептима.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

За израду ове докторске дисертације коришћена је изузетно обимна литература која укључује 412 референтних навода, међу којима су доминантни научни радови објављени у последњих десет година у врхунским међународним часописима, али и међународним часописима изузетне вредности. Осим тога, на списку референци налазе се и књиге објављене пре неколико деценија, које се тичу теоријских основа о најважнијим сегментима ове дисертације – кукурузу и кукурузној стабљивици и нетермалној плазми. Старији научни радови су коришћени за проналажење одговарајућих метода релевантних за истраживања на ову тему, док су новији радови коришћени приликом планирања експеримената, као колекција постојећих третмана лигноцелулозне биомасе и показатељ у ком смеру треба развијати нове третмане, односно унапредити постојеће. Додатно, наведена литература је била веома стручно коришћена приликом тумачења резултата остварених у оквиру експерименталних истраживања.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Експериментална истраживања у оквиру ове докторске дисертације су планирана на основу литературно доступних аналитичких и инструменталних метода, коришћених у изворном облику или незнатно измењених, у складу са потребама експеримената. Хемијска карактеризација плазма активираних воде вршена је применом комбинованих метода – спектрофотометријске методе са титанијум-оксисулфатом за одређивање концентрације водоник пероксида, спектрофлуорометријске методе са терефталном киселином за одређивање концентрације краткоживећих хидроксил радикала и семиквантитативних трака за одређивање концентрације нитрата и нитрита. Садржај лигнина и структурних угљених хидрата у сировој кукурузној стабљивици вршен је применом конвенционалног NREL протокола и методе за одређивање влакана коју су развили Van Soest и сарадници (Behrotest® CF 2+2, Behr, Немачка). За одређивање садржаја основних елемената у стабљивици коришћена је елементарна органска микроанализа (Elementar Vario EL III, CNS, GmbH, Немачка), садржај енергије је одређиван калориметријом (IKA C 200, IKA Works, САД), а садржај укупних и испарљивих чврстих материја, пепела и воде одређиван је гравиметријски. За третмане кукурузне стабљике коришћена је нетермална плазма игла, направљена по мери за потребе лабораторијских истраживања. Сви третмани су вршени при истом протоку аргона као доводног гаса (Ar 5,0, 99,999%, Messer Tehnogas AD, Србија) и уз мешање. Као главни критеријум ефикасности примењених третмана одређиван је степен делигнификације третиране биомасе, методом која се заснива на растворљивости лигнина у ацетил бромиду (ABSL), прилагођеном за рад у малим запреминама. Третирана биомаса, која представља целулозну фракцију, и лигнинска и хемицелуозна фракција, изоловане из течне фазе након третмана, анализирани су применом различитих инструменталних метода. Промене у структури изазване третманом испитане су FTIR спектроскопијом (Nicolet™ iSTM 10 FT-IR Thermo Fisher Scientific, САД) и Раман спектроскопијом (MIRA XTR DS system, Metrohm Raman, САД). Утицај примењених третмана на структуру целулозе праћен је помоћу порозиметрије са интрузијом живе (Carlo Erba 2000, Италија) и рендгенске дифракционе анализе (PW 1050, Philips, САД), док је морфологија изолованих фракција приказана SEM микроскопијом (Tescan FE-SEM Mira 3 XMU, Tescan, Чешка). Валоризација целулозне фракције вршена је најпре ензимском хидролизом са комерцијалном смешом целулаза, хемицелулаза и β-глукозидаза (Cellic Tec 2, Novozymes, Данска), уз употребу HPLC система за одређивање концентрације шећера у хидролизату (Dionex Ultimate 3000, ThermoScientific, САД). Након тога, третирана биомаса је подвргнута млечно-киселинској ферментацији, алкохолној ферментацији и анаеробној дигестији у аутоматизованом систему за тестирање потенцијала за производњу биометана (AMPTS II, BPC Instruments, Шведска). Концентрација произведене млечне киселине одређивана је

применом комерцијалног ензимског кита (Megazyme®, Ирска), концентрација биоетанола одређена је HPLC анализом, док је запремина произведеног биометана очитавана директно из AMPTS II софтверског пакета. Лигнинска фракција је екстрахована у диметил-сулфоксиду, а затим је испитана концентрација укупних полифенола у добијеним екстрактима са Folin-Ciocalteu реагенсом. Антиоксидативна активност лигнинских екстраката је процењена мерењем способности ових екстраката да редукују 2,2-дифенил-1-пикрилхидразил (DPPH) радикал и 2,2'-азинобис-(3-етилбензотиазолин-6-сулфонат) (ABTS) радикал. Такође, тестирана је и антимикробна активност ових екстраката на одабране патогене сојење – *Candida albicans*, ATCC 10259, *Bacillus cereus*, ATCC 11778, *Escherichia coli*, ATCC 25922 и *Staphylococcus aureus*, ATCC 25923. На основу остварених резултата, третман кукурузне стабљике природним дубоким еутектичким смешама, потпомогнут плазмом, одабран је за скалирање у плазма реактору са диелектричним баријерним пражњењем. Третирана биомаса добијена након овог третмана је потпуно окарактерисана, применом претходно наведених метода, након чега је подвргнута анаеробној дигестији. Затим је извршена упоредна анализа поменутог третмана када је као извор плазме коришћена плазма игла, односно плазма реактор, са енергетског и економског аспекта, у циљу процене одрживости.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати остварени у оквиру ове докторске дисертације указују на могућност примене нетермалне плазме у третману лигноцелулозне биомасе. Применом плазме могуће је додатно унапредити постојеће третмане за делигнификацију, тако да се ефикасност повећа или да се исти степен ефикасности оствари у знатно краћем периоду. Додатно, применом плазме спречава се настанак инхибиторних производа током третмана. Развијени третмани су били подједнако ефикасни на кукурузним стабљикама различитог хемијског састава, што истиче могућност примене истог третмана на различитом типу сировина. Тиме би се превазишао један од главних проблема биорафинерије на бази лигноцелулозне биомасе – несталан хемијски састав сировине, уз неуједначене количине доступне током године. Осим тога, показано је да се анаеробном дигестијом једне шарже третиране биомасе може произвести довољно енергије за третман чак осам нових шаржи, што отвара могућност развијања постројења за обраду лигноцелулозе које ће бити енергетски самоодрживо, уз потенцијално добијање високо вредних производа.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Јована Грбић, мастер инжењер технологије, је током израде ове докторске дисертације показала висок степен самосталности и аналитичности током планирања и извођења експеримената. На основу досадашњих залагања, одговорности и темељности у научноистраживачком раду у оквиру ове докторске дисертације, али и ван ње, Комисија сматра да кандидат Јована Грбић испуњава све критеријуме и поседује изузетне квалитете неопходне за самосталан научноистраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

На основу резултата остварених у експерименталном раду обухваћеном овом докторском дисертацијом, изводе се најзначајнији научни доприноси у области Технолошког инжењерства:

- Развијени су поступци за третман лигноцелулозне биомасе у медијумима различитих хемијских карактеристика, применом нетермалне плазме као извора реактивних врста и као алтернативног извора енергије. Током развијања третмана варирани су процесни параметри, попут дужине трајања третмана и температуре на којој се третман изводи, чиме је процењен њихов утицај на ефикасност третмана. Показано је да се значајне количине лигнина могу уклонити и применом третмана који се одвијају при амбијенталним условима и трају од 30 минута до два сата. Ови резултати представљају искорак у односу на претходно развијене третмане.
- Излагањем суспензије биомасе и Фентоновог реагенса плазми уклоњено је двоструко више лигнина него када је за третман коришћен само Фентонов реагенс, што је довело и до двоструког повећања приноса шећера након ензимске хидролизе третиране биомасе. Додатно,

третманом биомасе плазмом у присуству Фентоновог реагенса, исти степен делигнификације је постигнут у двоструко краћем временском периоду у односу на третман у воденом медијуму. Тиме је потврђен значај примене плазме у комбинацији са различитим медијумима за третман лигноцелулозне биомасе.

- Комбиновањем алкалног третмана лигноцелулозне биомасе са плазмом постигнут је висок степен делигнификације на нижим температурама од уобичајених за алкални третман, као и у краћем временском периоду. Истовремено, лигнин је деполимеризован до честица микро и нано величине, без примене додатних техника за производњу наночестица лигнина. Анализа садржаја третиране биомасе је потврдила да је она доминантно сачињена од целулозе, док је анализом структурних и морфолошких промена потврђено да је реч о микрокристалној целулози. Такође, ензимском хидролизом третиране биомасе добијене након овог третмана готово сва целулоза је преведена у глукозу. Добијене честице лигнина су показале антиоксидативну активност, односно способност редукције DPPH и ABTS радикала. Развијени третман је погодан за истовремено добијање целулозне и лигнинске фракције високог квалитета, које се могу даље валоризовати без додатних модификација.
- Применом третмана лигноцелулозне биомасе природним дубоким еутектичким смешама потпомогнутог плазмом постигнут је висок степен делигнификације, као и висок степен конверзије третиране биомасе до глукозе након ензимске хидролизе. Осим тога, показано је да је могуће користити природне дубоке еутектичке смеше заостале након третмана, а богате шећерима као супстрат у ферментацијама помоћу бактерија млечне киселине. Овакав приступ ствара могућност за потпуно искоришћење свих фракција које заостају након третмана, при чему као отпадни токови заостају само вода и етанол коришћени у сепарацији фракција, који се након рекулперације могу поново користити. Тиме се развијени третман уклапа у тзв. „zero-waste“ и „zero pollution“ концепте, који су једни од главних циљева циркуларне економије. Такође, по први пут је испитан утицај третмана плазмом на структуру саме еутектичке смеше. FTIR спектроскопијом је потврђено да је излагање смеше плазми довело до стварања нових водоничних веза, што је допринело њиховој стабилности.
- Употреба нетермалне плазме као извора водоник пероксида којим се започиње каталитички циклус манган пероксидазе погодовала је хемицелулазној и целулазној активности овог ензима. Остварени резултати сугеришу даље комбиновање манган пероксидазе са одговарајућим целулолитичким ензимима, тако да се приликом третмана биомасе разгради угљено-хидратна компонента, а третирана биомаса остане богата лигнином - тзв. „lignin first“ биорафинерија. Даљим испитивањем синергизма плазма третмана и ензима могу се отворити нови правци истраживања у области биорафинеријских поступака.
- Развијени третмани су омогућили искоришћење биомасе у процесима млечно-киселинске и алкохолне ферментације, као и значајно унапређење ефикасности анаеробне дигестије. Остварени приноси млечне киселине, биоетанола и биометана су били већи у случају третиране биомасе у односу на сирову биомасу. Осим тога, након примењених третмана издвојене су и хемицелулозна и лигнинска фракција у случају комбинованог алкалног третмана, односно лигнинска фракција у случају комбинованог третмана еутектичком смешом. На овај начин омогућено је добијање виших приноса производа на бази целулозе, уз истовремену могућност валоризације лигнина и/или хемицелулозе.
- Развијени третмани су били подједнако ефикасни на оба типа кукурузне стабљике коришћена у истраживањима, која карактерише различити хемијски састав. Ово сазнање је од изузетног значаја за укључивање поменутих третмана у биорафинеријске поступке, уз могућност превазилажења проблема употребе лигноцелулозне биомасе, попут несталног садржаја и сезонских промена у доступним количинама сировина на бази лигноцелулозе.
- Скалирањем третмана еутектичком смешом у плазма реактору утврђено је да се променом конфигурације нетермалне плазме може утицати на смањење оперативних трошкова третмана. Осим тога, енергија која се производи анаеробном дигестијом третиране биомасе може се користити и за следећи циклус третмана у плазма реактору и на тај начин додатно смањити трошкови искоришћења биомасе.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Научни доприноси истакнути у одељку 4.1 потврђују могућност примене нетермалне плазме као нове технике у третману лигноцелулозне биомасе. Предност употребе плазме у односу на технике попут

микроталаса или ултразвука је у стварању реактивних кисеоничних и/или азотних врста. Ове врсте настају током третмана плазмом и имају способност разградње структуре лигноцелулозе, те је комбиновање плазме са другим реагенсима за третман лигноцелулозе значајно допринело њеној разградњи. Претходно је литературно потврђен овај начин употребе плазме, али су третмани вршени у води. Међутим, у третманима развијеним у оквиру ове докторске дисертације су осим воде коришћени и Фентонов реагенс, алкални раствор водоник пероксида и природне дубоке еутектичке смеше. Комбиновањем плазме са овим реагенсима постигнута је значајно већа ефикасност него када су поменути реагенси коришћени самостално, често уз конвенционално загревање. На овај начин дужина третмана је смањена, уз коришћење нижих температура него што је то претходно рапортирано, те је уз ефикаснију делигнификацију повећана и енергетска ефикасност третмана. Ово је посебно важно када је реч о третману еутектичком смешом комбинованог са плазмом, који је извођен на собној температури, у трајању од само 30 минута. Течна фаза која заостаје након третмана је рекуперисана и, након изоловања лигнинске фракције, подвргнута ферментацији применом *Lactocaseibacillus rhamnosus* ATCC 7469, која из групе бактерија млечне киселине. Уобичајено се рекуперисана смеша поново користи за третман нове шарже биомасе. Међутим, како се током третмана мешама на бази карбоксилних киселина разграђује и одређени део угљено-хидратне компоненте биомасе, шећери заостали у смеси се током новог третмана даље разграђују, чиме настају инхибиторна једињења. Уколико се рекуперисана смеша користи као ферментациони медијум, могуће је добити нове високо вредне производе, без стварања отпада који захтева посебан третман и одлагање. Додатно, резултати остварени након скалирања овог третмана указују на његовој потенцијал за примену у биорафинеријским поступцима.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Јована Грбић је резултате остварене током истраживања извођених у оквиру ове докторске дисертације потврдила објављивањем радова у часописима међународног и националног значаја, као и презентовањем резултата на међународним и националним скуповима. Из ове докторске дисертације проистекао је један рад у међународном часопису изузетних вредности (M21a+) и један рад у врхунском међународном часопису (M21).

##### Категорија M21a+:

1. **Grbić J.Z.**, Mladenović D.D., Veljković M.B., Lazarević S.S., Lević S.M., Lazović S.S., Djukić-Vuković A.P. (2024). *Cold plasma/alkaline pretreatment facilitates corn stalk fractionation and valorization towards zero-waste approach*. Industrial Crops and Products, 222, pp 119498. (IF=6.2) (ISSN: 1872-633X) (<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119498>)

##### Категорија M21:

1. **Grbić J.**, Mladenović D., Pavlović S., Lazović S., Mojović L., Djukić-Vuković A. (2023). *Advanced oxidation processes in the treatment of corn stalks*. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 32 (2), 100962. (IF=5.9) (ISSN: 2352-5541) (<https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100962>)

### **5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСKE 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 (11. фебруара 2026. године) извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата Јоване Грбић под називом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“. Утврђен је проценат подударности текста од 16%. Овај степен подударности потиче од детаљног описа примењених аналитичких метода и употребе одговарајућих скраћеница за поменуте методе, употребе личних имена, назива инструмената, и библиографских података из других аутора и претходно публикованих радова кандидаткиње проистеклих из дисертације и коришћених у изради ове докторске дисертације.

На основу свега изложеног Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Јоване Грбић 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 разматрања претходно представљених резултата докторске дисертације кандидата Јоване Грбић, мастер инжењера технологије, под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“, Комисија сматра да су остварени сви циљеви предвиђени овом дисертацијом, те да она испуњава све неопходне критеријуме. Својим садржајем и квалитетом предметна дисертација значајно доприноси научној области Технолошко инжењерство, а кандидат је показао изразиту самосталност и способност у свим фазама израде ове докторске дисертације. Стога, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација кандидата Јоване Грбић под насловом „Биотехнолошка валоризација фракција лигноцелулозне биомасе добијених комбинованим третманима нетермалном плазмом“ прихвати и, заједно са сачињеним извештајем, изнесе на увид јавности, а затим и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. Такође, предлог Комисије је да се по завршетку ове процедуре кандидат Јована Грбић позове на усмену одбрану докторске дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду,  
2. март 2026. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
Др Зорица Кнежевић-Југовић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Љиљана Мојовић, професор емеритус  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Маја Вукашиновић-Секулић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Драгана Младеновић, виши научни сарадник  
Универзитет у Београду, Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета

.....  
Др Тања Раду, редовни професор  
Лофборо Универзитет (Уједињено Краљевство), Факултет за архитектуру, изградњу и  
грађевинарство