



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ



**Милица П. Ивановић**

**МОДЕЛОВАЊЕ ПРОЦЕСА КОМПОСТИРАЊА КОМИНЕ  
ГРОЖЂА ПРИМЕНОМ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ  
ОПТИМИЗАЦИЈЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2025



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN NIŠ



**Milica P. Ivanović**

**MODELING OF THE GRAPE POMACE COMPOSTING  
PROCESS USING THE MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION  
METHOD**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор:

др Гордана Стефановић, редовни професор  
Универзитет у Нишу, Машински факултет

Наслов:

Моделовање процеса компостирања комине грозђа применом  
вишекритеријумске оптимизације

Резиме:

Компостирање представља један од најчешће коришћених приступа за одрживо управљање органским отпадом из пољопривреде, омогућавајући његову ефикасну трансформацију у корисне производе, као што је компост. Ипак, поједине врсте органског отпада, као што је отпад из индустрије вина (ООИВ), због високог садржаја органске материје, лигноцелулозних компоненти и ниске рН вредности, није погодан за самостално компостирање. До сада су предложени различити начини његовог искоришћења, али компостирање остаје најперспективнији приступ за добијање компоста.

Бројна истраживања показала су да је компостирање ООИВ могуће уз додатак одговарајућег ко-супстрата који омогућава постизање услова за почетак и даљи ток процеса. Ипак, утицај појединих компоненти, као што је огроздина, зависи од њеног удела у мешавини и може бити позитиван или негативан. Због тога је у овој докторској дисертацији спроведено истраживање усмерено не само на моделовање, већ и на идентификацију параметара и дефинисање оптималних односа ООИВ и ко-супстрата, са циљем оптимизације процеса ко-компостирања. У првом кораку примењена је вишекритеријумска оптимизација а коришћена је метода глобалног критеријума ради одређивања оптималног састава мешавина. У другом кораку, експериментално је праћен процес ко-компостирања комине и огроздине уз примену три различита ко-супстрата: остаци хране, живински екскременти и пшенична слама. Током првог дела експерименталног истраживања праћене су упоредо мешавине у чији састав улазе комина и ко-супстрат као и комина, ко-супстрат и огроздина (25% масено). У другом делу експерименталног истраживања праћене су најбоље мешавине из првог дела, при чему је у мешавинама са огроздином вариран њихов удео (15 %, 25 % и 35 %, масено), како би се утврдио њихов максимални удео. Као резултат истраживања утврђен је оптимални ко-супстрат који је могуће додати комини, као и оптимални удео огроздине у мешавини комине и ко-супстрата. Такође, дефинисан је и квалитет добијеног компоста и могућност његове примене како органског ђубрива. На основу добијених резултата дате су смернице за унапређење процеса компостирања и квалитета добијеног компоста.



|  |   |
|--|---|
| Научна област:                         | Техничко – технолошке науке   |
| Научна дисциплина:                     | Управљање отпадом   |
| Кључне речи:                           | Ко-компостирање, комина грозђа, огроздина, ко-супстрат<br>вишекритеријумска оптимизација, компост |
| УДК:                                   | 628.473.4::663.26]631.894(043.3)  |
| CERIF класификација:                   | T 270 Технологија животне средине, контрола загађивања  |
| Тип лиценце<br>креативне<br>заједнице: | CC BY-NC-ND   |

Датум одбране докторске дисертације: \_\_\_\_\_

## Data on Doctoral Dissertation

|                      |  |
|----------------------|--|
| Doctoral Supervisor: | Ph.D. Gordana Stefanović, Full profesor<br>University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš   |
| Title:               | Modeling of the grape pomace composting process using the multi-criteria optimization method   |
| Abstract:            | <p>Composting represents one of the most commonly applied approaches for sustainable management of agricultural organic waste, enabling its efficient transformation into valuable products such as compost. However, certain types of organic waste, such as waste from the wine industry (WIW), are not suitable for direct composting due to their high content of organic matter, lignocellulosic components, and low pH value. Although various utilization methods have been proposed, composting remains the most promising approach for the production of compost.</p> <p>Numerous studies have shown that composting of WIW is feasible with the addition of an appropriate co-substrate, which ensures favorable conditions for the initiation and progress of the process. Nevertheless, the influence of specific components, such as grape stems, depends on their proportion in the mixture and can be either positive or negative. Therefore, this doctoral research was focused not only on modeling but also on identifying key parameters and defining optimal ratios between WIW and co-substrates, with the aim of optimizing the co-composting process.</p> <p>In the first stage, a multi-criteria optimization was used and the global criterion method was applied to determine the optimal composition of mixtures. In the second stage, the co-composting process of grape pomace and mixtures with the addition of grape stems was experimentally monitored using three different co-substrates: food waste, poultry manure, and wheat straw. During the first part of the experimental study, mixtures composed of grape pomace and co-substrate, as well as grape pomace, co-substrate, and grape stems (25% w/w), were simultaneously monitored. In the second part, the best-performing mixtures were further analyzed by varying the grape stem proportion (15%, 25%, and 35% w/w) to determine the optimal share.</p> <p>As a result, the optimal co-substrate to be combined with grape pomace and the optimal proportion of grape stems in the mixture were determined. The quality of the obtained compost and its potential use as an organic fertilizer were also defined. Based on the obtained results, recommendations were proposed for improving the composting process and the quality of the final product.</p> |



|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Scientific field:              | Engineering Sciences and Technology  |
| Scientific discipline:         | Waste management   |
| Key words:                     | Co-composting, grape pomace, grape stems, co-substrate, multi-criteria optimization, compost |
| UDC:                           | 628.473.4::663.26]631.894(043.3)   |
| CERIF classification:          | T270 Environmental technology, pollution control   |
| Creative Commons License type: | CC BY-NC-ND  |

**Doctoral dissertation defence date:**\_\_\_\_\_

## **Захвалност аутора**

*Израда докторске дисертације представља један од најважнијих и најизазовнијих периода мог професионалног живота, али уједно и време личног сазревања и стицања непроцењивих искустава. На том путу било је тренутака изазова и одрицања, али и подршке, охрабрења и вере оних који су ми помогли да овај рад буде довршен.*

*Посебну захвалност дугујем проф. др Гордани Стефановић, мом ментору – учитељу, саветнику и пријатељу, на издвојеном времену, стрпљењу, несебичном дељењу знања и вери у мене, без чега ова дисертација не би била могућа.*

*Велику захвалност дугујем и члановима комисије, проф. др Јелени Јаневски, проф. др Зорици Ранковић Васић и проф. др Драгиши Савићу, на указаној помоћи, корисним саветима и вредним сугестијама током израде дисертације. Посебну захвалност изражавам проф. др Предрагу Рајковићу на издвојеном времену, стрпљењу и подршци у решавању математичких проблема, који су били од великог значаја за успешну реализацију овог рада.*

*Захвалност за подршку у току експерименталних истраживања упућујем проф. др Илији Брческом, редовном професору Хемијског факултета Универзитета у Београду, чија је помоћ била пресудна за остваривање значајног дела резултата.*

*Посебно сам захвална др Александри Јанковић на неизмерној подршци, пажљивом читању рада и конструктивним сугестијама које су у великој мери допринеле квалитету ове дисертације.*

*На крају, највећу захвалност дугујем својим родитељима, мајци Јелици, оцу Предрагу и сестри Јовани, без чије безрезервне подршке и охрабрења у најтежим тренуцима рад на овој дисертацији не би био могућ.*



*Моделовање процеса компостирања комине грозђа применом  
вишекритеријумске оптимизације*

---



*Мојим родитељима*



## САДРЖАЈ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 УВОД.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.1 Предмет истраживања .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.2 Циљ истраживања.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>1.3 Структура рада.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2 ТЕОРИЈСКИ ДЕО.....</b>  | <b>21</b> |
| <b>2.1 Нутријенти.....</b>   | <b>21</b> |
| 2.1.1 Циклус азота .....   | 22        |
| 2.1.2 Циклус фосфора .....   | 24        |
| <b>2.2 Биолошке методе третмана органског отпада .....</b>                                 | <b>26</b> |
| 2.2.1 Опис процеса компостирања .....  | 27        |
| 2.2.2.1 Фазе процеса компостирања.....   | 29        |
| 2.2.2.2 Механизам разградње компоненти које чине структуру органског отпада по фазама..... | 31        |
| 2.2.2 Параметри који утичу на процес .....   | 32        |
| 2.2.2.1 Температура .....  | 33        |
| 2.2.2.2 pH вредност .....  | 35        |
| 2.2.2.3 Садржај воде .....   | 37        |
| 2.2.2.4 Однос угњеника према азоту .....   | 37        |
| 2.2.2.5 Садржај ваздуха .....  | 38        |
| 2.2.2.6 Садржај тешко разградивих компоненти .....   | 38        |
| <b>2.3 Параметри и законска регулатива о квалитету компоста.....</b>                       | <b>40</b> |
| 2.3.1 Законска регулатива о квалитету компоста.....  | 42        |
| 2.3.2 Законска регулатива о могућности примене добијеног продукта – компоста .....         | 44        |
| <b>3 ЛИТЕРАТУРНИ ПРЕГЛЕД У ОБЛАСТИ.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>3.1 Својства продуката комине грозђа .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>3.2 Компостирање комине грозђа .....</b>  | <b>49</b> |
| <b>3.3 Својства и примена добијеног компоста.....</b>                                      | <b>55</b> |
| <b>4 МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>4.1 Сировине за процес компостирања .....</b>   | <b>59</b> |
| 4.1.1 Потенцијали органског отпада на територији Републике Србије .....                    | 60        |
| 4.1.1.1 Пољопривредни отпад.....   | 61        |
| 4.1.1.2 Органска фракција комуналног отпада.....   | 64        |



|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 4.1.2      | Карактеристике потенцијалних ко - супстрата .....                    | 65         |
| 4.1.2.1    | Карактеристике комине грожђа.....                                    | 65         |
| 4.1.2.2    | Карактеристике отпадне биомасе из ратарства .....                    | 65         |
| 4.1.2.3    | Карактеристике отпадне биомасе из сточарства.....                    | 66         |
| 4.1.2.4    | Карактеристике органске фракције комуналног отпада .....             | 67         |
| <b>4.2</b> | <b>Математичка оптимизација састава мешавина.....</b>                | <b>67</b>  |
| 4.2.1      | Методe за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације .....     | 68         |
| 4.2.2      | Метод глобалног критеријума.....                                     | 70         |
| 4.2.3      | Формулација задатака .....   | 70         |
| 4.2.3.1    | Формирање критеријума.....   | 71         |
| 4.2.3.2    | Избор и примена вишекритеријумске методе.....                        | 72         |
| 4.2.3.3    | Формирање граничних услова.....                                      | 72         |
| <b>4.3</b> | <b>Примењене аналитичке методе.....</b>                              | <b>73</b>  |
| <b>5</b>   | <b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ .....</b>                             | <b>75</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Припремна фаза експерименталног дела.....</b>                     | <b>75</b>  |
| 5.1.1      | Припремна фаза I - Избор мешавина за почетак процеса .....           | 76         |
| 5.1.2      | Припремна фаза II - Избор најбољих мешавина .....                    | 77         |
| <b>5.2</b> | <b>Главна фаза - Испитивање целог процеса компостирања.....</b>      | <b>79</b>  |
| <b>5.3</b> | <b>Опис експерименталног истраживања.....</b>                        | <b>81</b>  |
| <b>6</b>   | <b>РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА .....</b>                                   | <b>84</b>  |
| <b>6.1</b> | <b>Резултати и дискусија припремне фазе.....</b>                     | <b>84</b>  |
| 6.1.1      | Резултати и дискусија припремне фазе I .....                         | 85         |
| 6.1.2      | Резултати припремне фазе II .....                                    | 87         |
| 6.1.2.1    | Промена температуре .....  | 89         |
| 6.1.2.2    | Промена рН вредности .....   | 92         |
| 6.1.2.3    | Промена садржаја воде.....   | 95         |
| 6.1.2.4    | Промена укупне масе и органске материје .....                        | 96         |
| 6.1.2.4.1  | Промена укупне масе .....  | 97         |
| 6.1.2.4.2  | Промена садржаја органске материје.....                              | 98         |
| 6.1.2.5    | Промена садржаја угљеника, азота и односа угљеника према азоту ..... | 99         |
| 6.1.2.5.1  | Промена садржаја угљеника .....                                      | 100        |
| 6.1.2.5.2  | Промена садржаја азота .....   | 101        |
| 6.1.2.5.3  | Промена односа угљеника према азоту.....                             | 102        |
| 6.1.2.6    | Крајња дискусија резултата припремне фазе II.....                    | 103        |
| <b>6.2</b> | <b>Резултати и дискусија целог тока процеса компостирања.....</b>    | <b>105</b> |
| 6.2.1      | Мешавине кљука и ко-супстрата.....                                   | 107        |
| 6.2.1.1    | Промена температуре.....   | 107        |
| 6.2.1.2    | Промена рН вредности .....   | 108        |
| 6.2.1.3    | Промена садржаја воде .....  | 109        |
| 6.2.1.4    | Промена садржаја укупне масе и органске материје .....               | 110        |
| 6.2.1.5    | Промена садржаја угљеника, азота и односа угљеника према азоту.....  | 111        |
| 6.2.1.6    | Промена садржаја лигноцелулозних материја .....                      | 112        |
| 6.2.1.7    | Промена садржаја нутријената .....                                   | 113        |



|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| 6.2.1.7.1   | Промена садржаја амонијум јона, нитратног јона и односа амонијум јона према нитратном јону | 114        |
| 6.2.1.7.1.2 | Промена садржаја минералног фосфора и калијума   | 115        |
| 6.2.2       | Мешавине кљука, ко-супстрата и петељки од грожђа   | 117        |
| 6.2.2.1     | Промена температуре  | 117        |
| 6.2.2.2     | Промена рН вредности   | 121        |
| 6.2.2.3     | Промена садржаја воде  | 123        |
| 6.2.2.4     | Промена укупне масе и органске материје  | 124        |
| 6.2.2.4.1   | Промена укупне масе  | 125        |
| 6.2.2.4.2   | Промена садржаја органске материје   | 125        |
| 6.2.2.5     | Промена садржаја угљеника, азота и односа угљеника према азоту                             | 127        |
| 6.2.2.5.1   | Промена садржаја угљеника  | 128        |
| 6.2.2.5.2   | Промена садржаја азота   | 130        |
| 6.2.2.5.3   | Промена односа угљеника према азоту  | 132        |
| 6.2.2.6     | Промена садржаја лигноцелулозних материја  | 133        |
| 6.2.2.6.1   | Промена садржаја лигнина   | 133        |
| 6.2.2.6.2   | Промена садржаја целулозе  | 134        |
| 6.2.2.7     | Промена садржаја нутријената   | 136        |
| 6.2.2.7.1   | Промена садржаја амонијум јона   | 136        |
| 6.2.2.7.2   | Промена садржаја нитратног јона  | 138        |
| 6.2.2.7.3   | Промена односа односа амонијум јона према нитратном јону                                   | 140        |
| 6.2.2.7.4   | Промена садржаја минералног фосфора  | 141        |
| 6.2.2.7.5   | Промена садржаја минералног калијума   | 143        |
| 6.2.3       | Оцена квалитета добијеног компоста   | 145        |
| 6.2.4.1     | Физички параметри квалитета компоста   | 146        |
| 6.2.4.1.1   | Температура, мирис (гасови) и боја   | 146        |
| 6.2.4.1.2   | Хемијски параметри квалитета компоста  | 148        |
| 6.2.4       | Генерална дискусија резултата целог тока процеса компостирања                              | 150        |
| <b>6.3</b>  | <b>Верификација математичког модела</b>  | <b>161</b> |
| <b>7</b>    | <b>ЗАКЉУЧАК</b>  | <b>166</b> |
| <b>8</b>    | <b>ЛИТРАТУРА</b>   | <b>171</b> |
| <b>9</b>    | <b>ПОПИС ТАБЕЛА</b>  | <b>186</b> |
| <b>10</b>   | <b>ПОПИС СЛИКА</b>   | <b>188</b> |
| <b>11</b>   | <b>БИОГРАФИЈА АУТОРА</b>   | <b>192</b> |



## СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

### Скраћенице

|                  |                                       |
|------------------|---------------------------------------|
| АФ               | Активна фаза                          |
| БПК <sub>5</sub> | Биолошка потрошња кисеоника           |
| ДО               | Доносилац одлуке                      |
| ЖЕ               | Живински екскременти                  |
| ЗО               | Зелени отпад                          |
| КЕ               | Крављи екскременти                    |
| КФ               | Кисела фаза                           |
| Ко               | Комина                                |
| КС               | Кукурузна силажа                      |
| Ог               | Огроздина                             |
| ОИВ              | Органски отпад из индустрије вина     |
| ОМ               | Органска материја                     |
| ОО               | Органски отпад                        |
| ООПП             | Органски отпад пољопривредног порекла |
| ОФКО             | Органска фракција комуналног отпада   |
| ОХ               | Остаци хране                          |
| ПС               | Пшенична слама                        |
| ПТФ              | Примарна термофилна фаза              |
| РС               | Република Србија                      |
| СЕ               | Свињски екскременти                   |
| СТФ              | Секундарна термофилна фаза            |
| СВ               | Садржај воде                          |
| ТФ               | Термофилна фаза                       |
| Тф               | Течна фракција                        |
| УГ               | Условно грло                          |
| УМ               | Укупна маса                           |



---

|       |   |
|-------|---|
| ФС    | Фаза сазревања                                    |
| ФХ    | Фаза хлађења                                      |
| ВКО   | Вишекритеријумска оптимизација                    |
| ХПК   | Хемијска потрошња кисеоника                       |
| ХООИВ | Хидролизованани органски отпад из индустрије вина |



# 1 УВОД

## 1.1 Предмет истраживања

Органски отпад пољопривредног порекла (ООПП) представља посебну фракцију органског отпада (ОО) која је широко заступљена. Он у свом саставу садржи макро и микро нутријенте, хемијски везану енергију и друге компоненте попут органске материје (ОМ). Ове особине упућују на то да га треба посматрати као сировину за добијање производа који ће имати употребну вредност, као што су компост или биогаз.

Компостирање, односно, биолошка разградња ОО у аеробним условима је најприхватљивији третман за ООПП, а при том не захтева велика економска улагања. Процес компостирања је сложен, вишефазни процес где многобројни фактори, попут хемијског састава ОО и физичких услова средине утичу на његов ток и фазне трансформације органске материје. Најутицајнији физичко-хемијски параметри су однос угљеника према азоту (C/N), рН вредност, температура, садржај воде и порозност чије вредности морају да се нађу у дефинисаном опсегу да би микроорганизми, који су главни носиоци процеса трансформација ОМ, могли да обављају своје метаболичке активности. Пожељни опсег односа C/N за почетак компостирања је од 25,0 до 35,0, мада се у неким случајевима могу толерисати ниже и више вредности. Промена ових услова може да успори процес, а некада и да га заустави. У почетку, због интензивног разлагања лакоразградивих материја температура расте. Ова фаза је праћена емисијом угљен диоксида чиме се смањује однос C/N, да би током даљег одвијања процеса разградње била успорена. Ово појава се види кроз пад температуре и даље смањење односа C/N до крајњих вредности од 10,0 – 15,0 и изједначавања температуре са температуром околине. Том приликом, рН вредност током процеса се мења од почетне вредности мешавине, преко ниске у киселој фази па до благо базне на крају процеса. Оваква промена представља и један од индикатора да је дошло до декомпозиције ОМ.

Структура ОО је још један од додатних фактора који утичу на разградњу ООПП у току процеса компостирања. Лигнини, целулоза и хемицелулоза су компоненте из групе лигноцелулозних материја које улазе у структуру ОО и њихов удео у ОМ зависи од врсте ООПП. Понашање ових компоненти у току процеса компостирања је комплексно, јер се



поједине разлажу, а неке се само трансформишу и зато је потребно пратити њихов удео у мешавинама. Међутим, присуство лигноцелулозних материја утиче на порозност мешавине, па је због тога њихово присуство у току процеса компостирања пожељно.

Као посебна врста ООПП истиче се ОО који се издваја приликом добијања вина - органски отпад из индустрије вина (ООИВ) а представља од 15,0 % до 25,0 % (масено) у односу на масу грозђа. ООИВ је сачињен од огроздине, покожица, семенки и пулпе, при чему се мешавина без огроздине назива комина. Карактеристике које одликују ООИВ као сировину за процес компостирања су висок садржај ОМ, угљеника (С) и нутријената, ниска рН вредност као и висок садржај лигноцелулозних материја, чији је састав висок посебно у огроздини. Због особина, ниске рН вредности и односа С/Н чија вредност може да буде испод оптималне, мања од 25,0, самостално компостирање ООИВ је отежано па је у том случају пожељно додавање ко-супстрата који мешањем омогућавају постизање оптималних услова за почетак и ток процеса компостирања.

Сазнање да је процес компостирања сложен, да као што је већ речено, зависи од бројних физичко-хемијских фактора, довело је до изналажења новог решења које ће омогућити почетак трансформације ОМ. Решење је нађено кроз примењивање процеса „ко-компостирања“ који предвиђа мешање две или више врста ОО одговарајућих карактеристика са циљем да се остваре повољни услови за почетак разградње. Кроз примену ко-компостирања, поред остваривања (постизања) оптималних услова за почетак процеса могуће је и утицати на садржај нутријената кроз избор, односно одабир фракција ОО које у свом саставу садрже високе количине азота (N), фосфора (P) и калијума (K). Због тога се приликом примене ко-компостирања мора познавати и процес трансформације нутријената у природи с обзиром да се њихов циклус преласка из једне у другу форму одвија по сличном механизму.

На основу напред наведених карактеристика ООИВ и услова које је потребно постићи уколико се жели применити третман ко-компостирање, може се закључити да је избор одговарајућег ко-супстрата велики проблем с обзиром да је неопходно узети такву врсту ОО која има одговарајуће особине које ће омогућити почетак и ток процеса ко-компостирања али и да је има у довољним количинама као и да је присутна на територији РС. Када се узму у обзир претходно наведени услови које је неопходно задовољити, сагледавање потенцијала ООПП (количине, врсте и карактеристике) са посебним акцентом на виноградарство представља још један предмет овог истраживања.



Пошто је код ко-компостирања неопходно мешати различите врсте ОО за одређивање њихових удела приликом моделовања процеса користи се вишекритеријумска оптимизација – метод глобалног критеријума који омогућава праћење више параметара који се дешавају истовремено. Сагласно физичко-хемијским параметрима које је неопходно остварити за почетак процеса, приликом развијања математичког модела постављени су гранични услови и критеријуми. Као гранични услови примењени у математичком моделу су одговарајући однос C/N, између 25,0 и 35,0 као и одговарајући садржај воде, од 40,0 % до 60,0 %. Посебну групу чине критеријуми, као што су максимални садржај угљеника и рН вредност, али и минимални садржај азота и лигнина. Треба истаћи да је избор одговарајућих граничних услова и критеријума, на основу којих се добија састав почетне мешавине, важан и комплексан корак од којег зависи коначни резултат – могућност експерименталног спровођења процеса.

Како је математички модел искоришћен за одређивање састава мешавине за почетак процеса компостирања, експериментално спровођење процеса ко-компостирања представља други део истраживања. На основу формиране базе о доступним врстама и карактеристика ООПШ на територији РС, изабрана су три ко-супстрата и то: остаци хране (ОХ), живински екскременти (ЖЕ) и пшенична слама (ПС). С обзиром да је један од циљева истраживања могућност употребе огроздине, као једног од делова комине грозђа, експериментално истраживање је подељено у два дела. У првом делу праћен је процес ко-компостирања комине и одабраних ко-супстрата. Други део експеримента обухватио је употребу огроздина у мешавинама, како би се и оне укључиле у процес третмана, јер би у супротном представљале нову врсту отпада. У том смислу, истим мешавинама комине и ко-супстрата додаван је различит удео огроздина (15,0 %, 25,0 % и 35,0 %, масено) да би се уочио њихов утицај на процес ко-компостирања. Како би се потврдио развијени математички модел, на крају је извршена верификација модела.

Због тога је ово истраживање усмерено на моделовање процеса ко-компостирања. Модел је развијен применом математичке оптимизације у циљу дефинисања оптималних услова за почетак и даљи ток процеса, а затим је верификован експерименталним спровођењем процеса компостирања. Циљ је да финални продукт – компост поседује карактеристике које задовољавају важеће стандарде за употребу као оплемењивач земљишта



## 1.2 Циљ истраживања

На основу претходно дефинисаног предмета истраживања, општи циљ ове докторске дисертације је сагледавање могућности примене процеса компостирања као третмана за решавање проблема одређених врста ООПП, са посебним освртом на продукте који настају у току процеса прераде грозђа, на комину и огроздину.

Главни циљ истраживања је развијање модела за избор мешавина ООИВ и ко-супстрата за почетак и даљи ток процеса компостирања, узимајући у обзир њихове физичко-хемијске карактеристике, које ће након процеса биолошке разградње постићи карактеристике компоста, што се прати експерименталним путем.

Посебни циљеви ове докторске дисертације су:

- избор ко-супстрата који ће се користити при компостирању ООИВ;
- избор састава мешавина за почетак и даљи ток компостирања на основу постављених критеријума и граничних услова у математичком моделу;
- испитивање утицаја присуства различитих врста ко-супстрата на почетак и даљи ток процеса компостирања;
- утврђивање утицаја присуства огроздине на физичко-хемијске параметре и на степен разградње мешавина;
- избор најбољих мешавина за цео ток процеса компостирања;
- анализа промена физичко-хемијских параметара (температуре, рН вредности, С, N, односа С/N, ОМ, лигноцелулозних материја и нутријената) дуж целог процеса компостирања у мешавина без огроздине;
- утврђивање оптималног удела огроздине у мешавини за компостирање;
- утврђивање утицаја различитог удела огроздине на степен разградње лигноцелулозних материја;
- испитивање утицаја присуства различитог удела огроздине на промену садржаја нутријената;
- одређивање физичко-хемијских особина и квалитета добијеног компоста са аспекта могућности категоризације као „оплемењивача земљишта“;
- верификација математичког модела.



### 1.3 Структура рада

Ова докторска дисертација се састоји из седам поглавља.

У **првом поглављу** су дата уводна разматрања која обухватају опис проблема и предмет истраживања, циљ и значај истраживања као и структуру докторске дисертације.

**Поглавље два**, теоријска разматрања у области, састоји се из више потцелина у којима је дат приказ феномена и сазнања у области кружења нутријената и процеса компостирања. У првој потцелина дата је дефиниција нутријената, форме у којима су доступни биљкама као и циклус кружења нутријената у природи. Друга потцелина посвећена је опису биолошких третмана са посебним акцентом на компостирање, факторима који утичу на процес, феноменима који су присутни и који су карактеристични за поједине врсте ОО као и механизмима разградње карактеристичних компоненти ОО. У трећој потцелини, приказани су параметри којима се дефинише квалитет компоста, с посебним акцентом на физичко-хемијске особине. Поред претходног, дат је и приказ законске регулативе која дефинише услове да би добијени финални производ, компост, могао да се користи као органско ђубриво (оплемењивач земљишта) у пољопривреди.

**Поглавље три**, подељено у три дела, посвећено је литературном прегледу компостирања ООИВ. У првом делу је дат приказ резултата истраживања која су испитивала особине које има ООИВ као сировина за процес компостирања. Други део обухвата анализу резултата истраживања која су пратила процес ко-компостирања ООИВ са посебним акцентом на утицај присуства огроздине на физичко-хемијске параметре процеса, присуства лигноцелулозних материја на степен разградње ОМ као и различитих ко-супстрата на физичко - хемијске параметре, док трећа група обухвата резултате истраживања која прате особине и употребу добијеног компоста.

**Четврто поглавље** састоји се од више потцелина, у којима су приказани примењени материјали и методе. У првој су приказане количине и карактеристике доступних врста ООПП на територији РС са посебним акцентом на ООИВ, његовим добијањем, саставом, особинама и количинама. Друга потцелина је посвећена вишекритеријумској оптимизацији, а обухвата опис методе глобалног критеријума и развој математичког модела за одређивање састава мешавина за процеса компостирања. У трећој потцелини дат је опис примењених аналитичких метода за одређивање физичко-хемијских параметара који су праћени током спровођења експеримента.



**Пето поглавље** представља опис експерименталног истраживања процеса ко-компостирања мешавина комине, ко-супстрата и огроздине, а састоји се из више делова. Први део представља припремну фазу, док други део представља главну фазу. Припремана фаза се састоји из два дела: припремне фазе I и припремне фазе II. У првом делу, припремној фази I, применом развијеног математичког модела, приказан је поступак избора мешавина за почетак процеса компостирања, односно избор ко-супстрата и њиховог удела у мешавинама са циљем одабира мешавина које ће бити посматране у активној и главној фази истраживања. Други део представља опис припремне фазе II – праћење активне фазе и фазе хлађења процеса компостирања. У овом делу приказан план спровођења експеримента за активну фазу и фазу хлађења процеса компостирања када у састав мешавине улази комина и ко-супстрат као састав мешавина када поред комине и ко-супстрата у мешавину улази и 25,0 % огроздине. Такође, наведени су и додатни услови за избор најбољих мешавина које ће бити узете у разматрање за праћење целог тока процеса. Главна фаза представља други део истраживања а приказан је план спровођења експеримента који прати цео ток процеса компостирања најбољих мешавина из припремне фазе II као и мешавина са различитим уделом огроздине 15,0 %, 25,0 % и 35,0 %. На крају овог поглавља дат је и опис спровођења експеримента.

**Шесто поглавље** обухвата резултате, анализу резултата и дискусију до којих се дошло током експерименталног спровођења процеса ко-компостирања, а састоји се из три дела:

- први део – *резултати и дискусија активног дела процеса,*
- други део – *резултати и дискусија целог тока процеса и*
- трећи део – *верификација математичког модела.*

У првом делу су приказани резултати припремне фаза I и припремне фаза II. Код припремне фазе I приказани су резултати математичког модела за одређивање састава мешавина за почетак процеса компостирања као и физичко-хемијски параметри тих мешавина. У случају припремне фазе II, која експериментално прати активну фазу и фазу хлађења процеса компостирања, упоредо су приказане промене физичко-хемијских параметара мешавина комине и ко-супстрата као и мешавина којима је додата огроздина. На основу добијених резултата изведени су закључци о утицају појединих врста ко-супстрата као и присуства огроздине на компостирање. На крају, извршен је избор најбољих мешавина за цео ток процеса.



У другом делу су дати резултати праћења физичко-хемијских параметра током целог процеса компостирања изабраних мешавина и оцена квалитета продукта. У првом делу овог поглавља приказани су резултати праћења целог тока процеса најбоље мешавине комине и ко-супстрата. У другом делу су дати резултати мешавине комине, ко-супстрата и различитог удела огроздина. Такође, добијени резултати су и у овом делу приказани упоредо, с обзиром да је мењан удео огроздина у мешавинама, од 15,0 %, преко 25,0 % до 35,0 %, масено. У оба случаја, на основу дужине трајања термофилне и киселе фазе, промене укупне масе, ОМ, садржаја С и N као и односа C/N је утврђен степен разградње ОО. Такође, праћена је промена садржаја лигноцелулозних материја од почетка до краја процеса компостирања да би се утврдио степен њихове разградње. Анализом садржаја нутријената посматрана је промена њихових концентрација од почетка до краја процеса. На основу добијених резултата у другом делу одређен је максимални удео огроздина у мешавинама. У трећем делу извршена је анализа резултата о испуњености стандарда прописаног законима РС о употреби компоста као оплемењивача земљишта. На основу добијених вредности параметара који се посматрају и садржаја нутријената изведени су закључци да ли добијени продукт задовољава постављене критеријуме, односно која од посматраних мешавина то задовољава.

У трећем делу резултата је дат приказ верификације математичког модела. Извршена је упоредна анализа експерименталних са резултатима математичког модела. У првом делу резултата је извршена анализа о поклапању добијених вредности за постављене граничне услове и критеријуме за оба посматрана сценарија. Затим је извршена верификација за постављене критеријуме у зависности од удела огроздине, а у последњем делу је приказана анализа о утицају ко-супстрата. На крају, на основу све укупне анализе изведени су закључци да ли се развијени математички модел може користити за одређивање састава мешавина за почетак процеса.

У **седмом поглављу** су приказана закључна разматрања и дати будући правци истраживања.



## 2 ТЕОРИЈСКИ ДЕО

Компостирање је биолошки процес у којем ОО пролази кроз сложену биохемијску трансформацију претварајући се у стабилан продукт - компост. Овај процес се одвија уз учешће бактерија, гљивица и других врста микроорганизама који разграђују ОМ на мање и једноставније супстанце. Компостирање као метода третмана ОО има за циљ и да се трансформацијом ОО добије користан производ који садржи макро и микро нутријенте и који може побољшати квалитет земљишта. Стога је од суштинског значаја разумевање механизма трансформације нутријената, који обухватају њихов прелазак из органског у неоргански облик.

У циљу примене процеса компостирања као третмана, у овом поглављу је дат преглед досадашњих теоријских сазнања у области, а се састоји се из два дела. Први део је посвећен нутријентима како би се сагледао њихов циклус у природи. У другом делу је дат опис процеса компостирања са посебним акцентом на физичко - хемијске параметре који утичу на процес као и опис карактеристичних појава које се јављају приликом одвијања процеса. Како је циљ процеса компостирања добијање компоста таквих особина да се може користити као органско ђубриво тј. „оплемењивач земљишта“, у трећем делу овог поглавља је дат опис параметара који дефинишу стабилност и зрелост компоста као и предвиђена законска регулатива.

### 2.1 Нутријенти

Нутријенти су основни хемијски елементи или једињења која биљке узимају из земљишта и користе за свој раст, развој и метаболичке процесе. По свом саставу, нутријенти представљају сложена хемијска једињења која би требало да буду у одговарајућој форми да би их биљке могле усвојити. Према Brown -у нутријенти се могу дефинисати као „елементи који су неопходни за раст и развој биљке као и делова посматране биљне врсте гајене у природном или култивисаном (контролисаном) окружењу“ [1].

У природи, нутријенти могу водити порекло из неорганских (минерална, комплексна и минерално-органска) и органских извора (компост, дигестат, животињски екскременти, жетвени остаци и др.). Нутријенти у неорганској форми су директно доступни биљкама (нпр.

комплексна, минерална и минерално-органа хубрива, компост и сл.), док су у органској форми иницијално недоступни, јер захтевају процес минерализације (нпр. компост, дигестат, животињски екскременти, жетвени остаци и др.). Сви ови извори нутријената имају различит хемијски састав и нутритивну вредност, због чега се користе појединачно или у комбинацији како би задовољили потребе земљишта за нутријентима [2].

Сви нутријенти према потреби биљака се могу поделити на:

- **Макронутријенте** – нутријенти који су неопходни биљкама и апсорбују се у великим количинама, а најзначајнији су N, P и K.
- **Микронутријенте** – нутријенти који су потребни биљкама у веома малим количинама, а обухватају елементе попут гвожђа (Fe), мангана (Mn), бора (B), цинка (Zn), бакара (Cu) и хлора (Cl).

У табели 2.1 су приказане потребе карактеристичних биљних врста на територији РС за макронутријентима, и то житарица, поврћа и воћа.

**Табела 2.1** Потребе појединих биљних врста за нутријентима [3] [4]

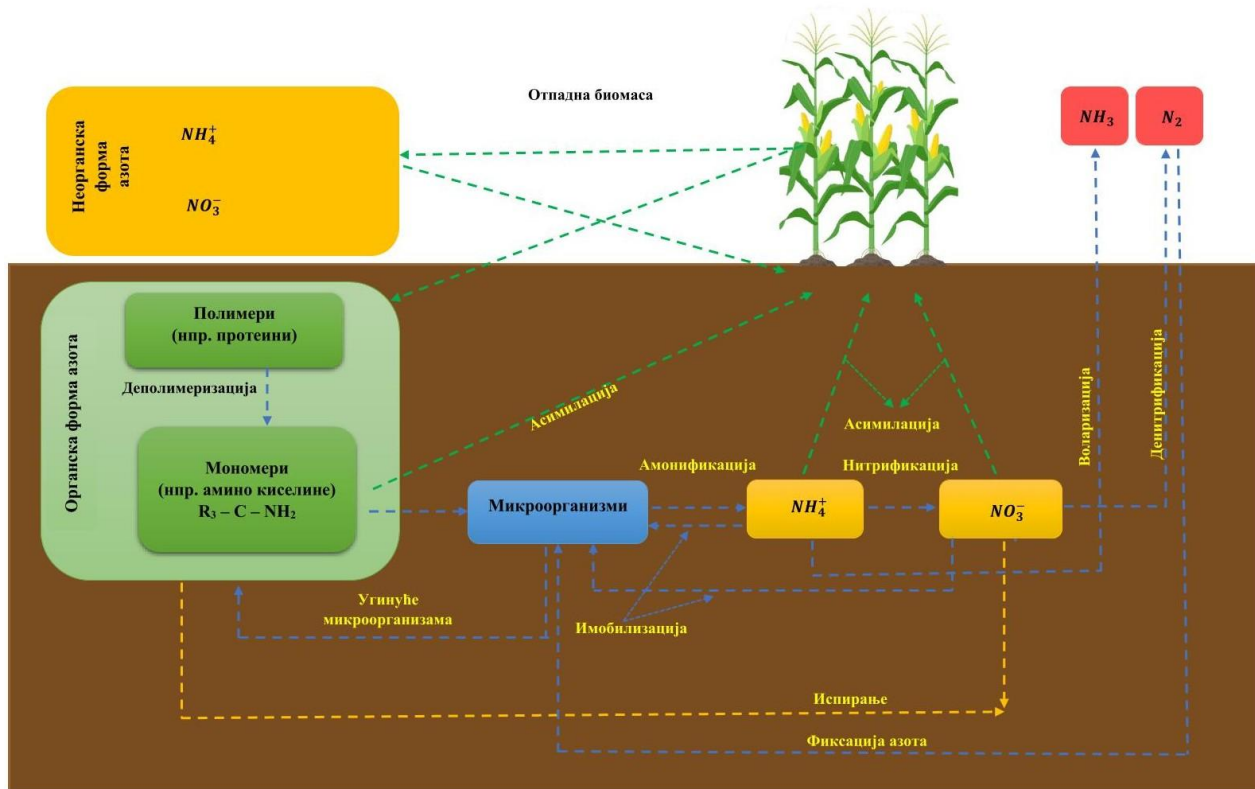
| Годишња потреба нутријената [kg/ha] |               |                               |                  |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------------|------------------|
| Нутријент / Биљна врста             | N             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
| <b>Житарице</b>                     |               |                               |                  |
| Пшеница                             | 140,0 – 200,0 | 70,0 – 130,0                  | 80,0 – 140,0     |
| Јечам                               | 80,0 – 110,0  | 80,0 – 90,0                   | 100,0 – 120,0    |
| Раж                                 | 80,0 – 120,0  | 60,0 – 80,0                   | 30,0 – 60,0      |
| Овас                                | 60,0 – 100,0  | 60,0 – 80,0                   | 70,0 – 110,0     |
| Кукуруз                             | 120,0 – 170,0 | 60,0 – 80,0                   | 60,0 – 80,0      |
| <b>Поврће</b>                       |               |                               |                  |
| Парадајз                            | 110,0         | 25,0                          | 150,0            |
| Паприка                             | 270,0         | 50,0                          | 282,0            |
| Цвекла                              | 130,0         | 45,0                          | 260,0            |
| Карфиол                             | 200,0         | 80,0                          | 250,0            |
| <b>Воће</b>                         |               |                               |                  |
| Грожђе                              | 81,2          | 60,0                          | 112,5            |

У даљем тесту је дат опис кружења N и P у природи, као најзначајнијих нутријената.

### 2.1.1 Кружење азота

Под термином кружење нутријената подразумева се низ биохемијских процеса трансформације азота из једног облика у други са циљем да се добије форма коју биљке могу да усвоје и користе за даљи развој. Најчешћи облик од кога почиње процес кружења N је органска форма која је у природи присутна око 90,0 %, а налази се у површинском слоју земље. Продукти који настају током трансформације органског N су неорганске форме које

биљке директно апсорбују, а најчешће су у облику амонијумових ( $NH_4^+$ ) или нитатних ( $NO_3^-$ ) јона, слика 2.1[5]. Неоргански N у земљишту заступљен је у релативно малим концентрацијама. Током процеса кружења један његов део биљке усвајају, док се други део губи у виду различитих гасовитих једињења, као што су, су азот-субоксид ( $N_2O$ ), амонијак ( $NH_3$ ) или дијаот ( $N_2$ ), услед процеса микробне разградње и биохемијских трансформација. На слици 2.1 је приказан процес трансформације N у природи када се прати циклус N при разградњи ООПП, односно биомасе.



Слика 2.1. Циклус азота: зелене испрекидане линије – циклус биљака; плаве испрекидане линије – процеси микроорганизама; жута испрекидана линија – хидролошки процеси [6]

Производња и разградња биомасе представљају кључни покретач циклуса N у природи, посебно уколико се посматра трансформација N из ООПП, слика 2.1. У биомаси N је присутан у обе форме, органској и неорганској па циклус кружења обухвата два механизма. Први механизам, **асимилација**, слика 2.1, представља директно усвајање неорганског N од стране биљака. Други механизам трансформације је сложенији јер обухвата процес трансформације органског у неоргански N, а састоји се из више биохемијских процеса. У првом кораку заступљен је процес **амонификације**, у коме микроорганизми разграђују органске полимере (односно мономере) како би се добио амонијум јон ( $NH_4^+$ ) који биљке усвајају. Други корак обухвата процес **нитрификације**, у коме се амонијум јон оксидише у нитратни јон ( $NO_3^-$ ) који биљке такође могу усвојити. Такође, заступљен је и процес



**имобилизације**, који обухвата везивање амонијумових и нитратних јона од стране микроорганизама који их уграђују у ћелијску биомасу. На овај начин N поново постаје недоступан биљкама јер се преводи у органску форму. До овог процеса најчешће долази због високог односа C/N, а траје док не дође до угинућа микроорганизама чиме се N поново ослобађа у минералном облику (амонијум или нитратне јоне).

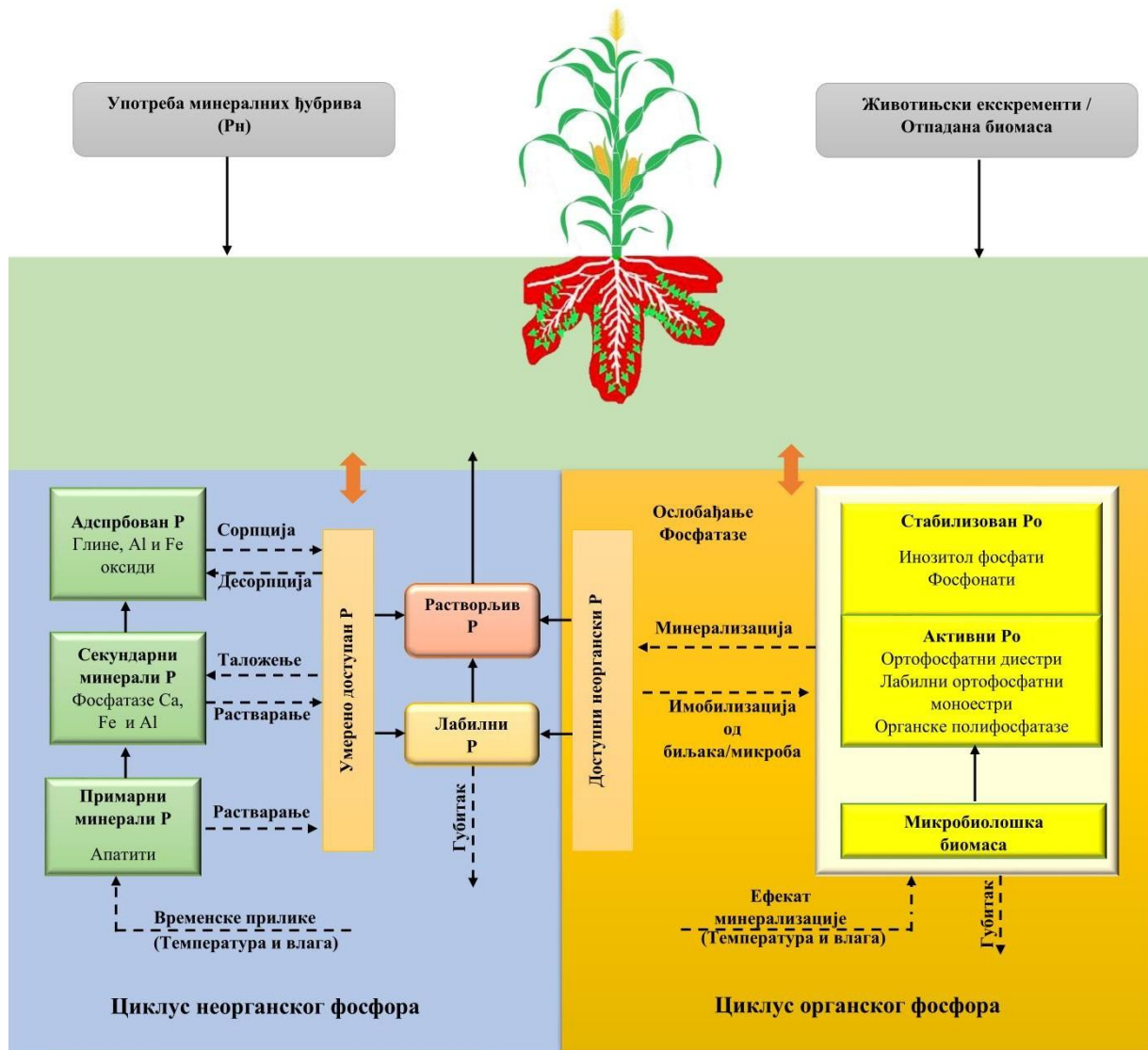
Процеси воларизације (губитака) и денитрификације су такође заступљени, а подразумевају ослобађање N у виду молекуларног азота ( $N_2$ ) и амонијака ( $NH_3$ ). Ови процеси зависе од услова средине као што су температура, рН вредности као и висок садржај воде.

На овај начин завршава се процес кружење N и стварају се услови за његово поновно покретање.

### 2.1.2 Циклус фосфора

Кружење P у земљишту обухвата превођење органских у неорганске облике, усвајање од стране биљака, формирање минералних једињења и њихово растварање, слика 2.2. Фосфор је у земљишту заступљен у органској и неорганској форми, при чему органска чини око 30 - 60 %, а неорганска 35 - 70 % укупног доступног P [7]. Удео органског и неорганског P у укупном P варира у зависности од типа земљишта и услова средине, као што су рН, влажност, садржај OM и минерални састав. С обзиром на различито порекло и специфичне хемијске реакције P на слици 2.2 приказана је упоредна шема кружења органског и неорганског P.

Неоргански P ( $P_n$ ), слика 2.2. се јавља у облику минералних фосфата који потичу из минералних ђубрива или растворених јона ортофосфата, чија је концентрација обично ниска (мања од 5  $\mu$ M) [8]. Циклус неорганског фосфора започиње са примарним минералима P, као што је апатит, који се постепено раствара ослобађајући растворљиви P тј, одвија се процес **растварања**. Овај P може бити везан и у секундарним минералима (фосфатима калцијума, алуминијума и гвожђа) или адсорбован на глинама и оксидима алуминијума и гвожђа [9] [10]. Ослобађање P из ових извора одвија се кроз реакције **растварања** и **сорпције**. Растворљиви P и лабилни фосфатни јони представљају **умерено доступан P**, који биљке могу усвајати директно, али део се губи **таложењем** или **десорпцијом**, у зависности од физичко-хемијских услова земљишта.



Слика 2.2. Циклус фосфора у земљишту [8]

Са друге стране органски фосфор (P<sub>o</sub>), слика 2.2, присутан је у биомаси (животињској, екскрементима или микробној) и може се класификовати као стабилизовани P (инозитол-фосфати и фосфонати) и активни P (ортофосфати, лабилни ортофосфати и органске полифосфатазе). Циклус органског фосфора почиње разградњом биомасе, током које органски фосфор постаје доступан биљкама кроз процес *минерализације*, у коме ензими фосфатазе ослобађају неоргански фосфор - ортофосфате. Део ослобођеног неорганског фосфора може бити поново имобилисан (процес *имобилизације*) у органској форми путем усвајања од биљака или микроорганизама. Процес минерализације P регулише се комбинацијом биолошких и биохемијских фактора, при чему рН вредност земљишта има најзначајнији утицај [8].



Део Р који остане у земљишту неусвојен од стране биљака се таложи и формира једињења са гвожђем и калцијумом, чиме се остварују услови за покретање циклуса неорганског фосфора, слика 2.2.

## 2.2 Биолошке методе третмана органског отпада

Под биолошким методама се подразумевају третмани помоћу којих је могуће трансформисати ОО у користан финални продукт, уз испуњавање одговарајућих услова процеса. За овај процес неопходно је и присуство различитих врста микроорганизама (гљивица, бактерија и актиномицета) који врше трансформацију ОМ. С обзиром да се биолошке методе третмана ОО одвијају на повишеним температурама, њиховом применом се може постићи стабилизација ОО, уништавање патогених организама који су штетни за околину и добијање продуката попут биогаза, дигестата и компоста.

Како је неопходно постићи одговарајуће услове за почетак процеса, код биолошких третмана ОО потребно је извршити одговарајућу припрему сировине. Она обухвата издвајање и избор одговарајуће врсте ОО која ће се третирати, уситњавање по потреби као и влажење уколико се ради о недовољно влажној полазној компоненти. Поред претходног, на могућност примене биолошких третмана утичу доступност и особине ОО, искоришћење добијеног продукта али и економска исплативост.

Биолошки третмани ОО се у зависности од услова у којима се одвијају (у зависности од присуства кисеоника) могу поделити на:

- **Анаеробни третман** – процес трансформације ОМ се одвија уз одсуство кисеоника, а одиграва се у контролисаним условима средине, реакторима;
- **Аеробни третман** – процес трансформације ОМ се одвија уз присуство кисеоника. Може се одигравати у контролисаним и делимично контролисаним (реакторима) као и у неконтролисаним условима (на отвореном).

Анаеробна дигестија је биолошки третман у коме се уз одсуство ваздуха уз помоћ анаеробних микроорганизама ОМ разлаже на простије компоненте, где као резултат декомпозиције настају биогаз, у чији састав улазе  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  и  $NH_3$  као и чврст остатак – дигестат који се одликује високим садржајем воде. Биогаз добијен процесом анаеробне дигестије се може користити за добијање електричне енергије у постројењима за когенерацију или као погонско гориво код мотора са унутрашњим сагоревањем након пречишћавања и добијања гаса са високим садржајем метана. Чврст остатак, дигестат који



је секундарни продукт анаеробне дигестије се може, након процеса стабилизације, користити као органско ђубриво [11]. Процес анаеробне дигестије се одвија у реакторима који омогућавају праћење параметара процеса [12].

Аеробни третман, односно, компостирање је друга најкоришћенија биолошка метода за збрињавање ОО у коме компост представља финални главни продукт, док су споредни продукти процедурна вода, различити гасови и топлота. Према примењеној технологији за спровођење процеса, системи за компостирање се могу класификовати као: компостирање у редовима тзв. „windrow“ и компостирање у реакторима. Код компостирања у редовима, материјал које се третира поставља се у гомиле троугластог облика, висине 1.5 до 2 m, а неопходна количина кисеоника се удубава кроз материјал помоћу цеви који су постављене испод гомиле. Други начин обезбеђивање кисеоника се постиже превртањем гомиле у одређеном временском интервалу чиме се постиже контрола температуре унутар мешавине, уједначавање степена разградње као и боља хомогенизација материјала. На овај начин се добија униформан финални продукт на крају процеса. Највећи недостаци ове методе компостирања су непостизање довољно високих температура за уништавање патогених организама и велика емисија гасова непријатних мириса. Код компостирања у реакторима, процес се одвија у затвореним судовима. Овај вид третмана садржи софистицирану опрему помоћу које је могуће утицати на параметре процеса, као што су температура, садржај воде и садржај кисеоника, контролом протока ваздуха и мешањем материјала унутар реактора. Предности ових система су уништавање патогених организама, што се постиже одржавањем температуре на одређеном нивоу, смањење непријатних мириса и дужине трајања компостирања, док су главни недостаци високи инвестициони трошкови [13] [14] [15] [16].

Како је ово истраживање посвећено моделирању процеса компостирања, у даљем тексту овог поглавља посебна пажња биће усмерена на сагледавање услова одвијања, механизме разградње и параметре који утичу на почетак и ток процеса компостирања.

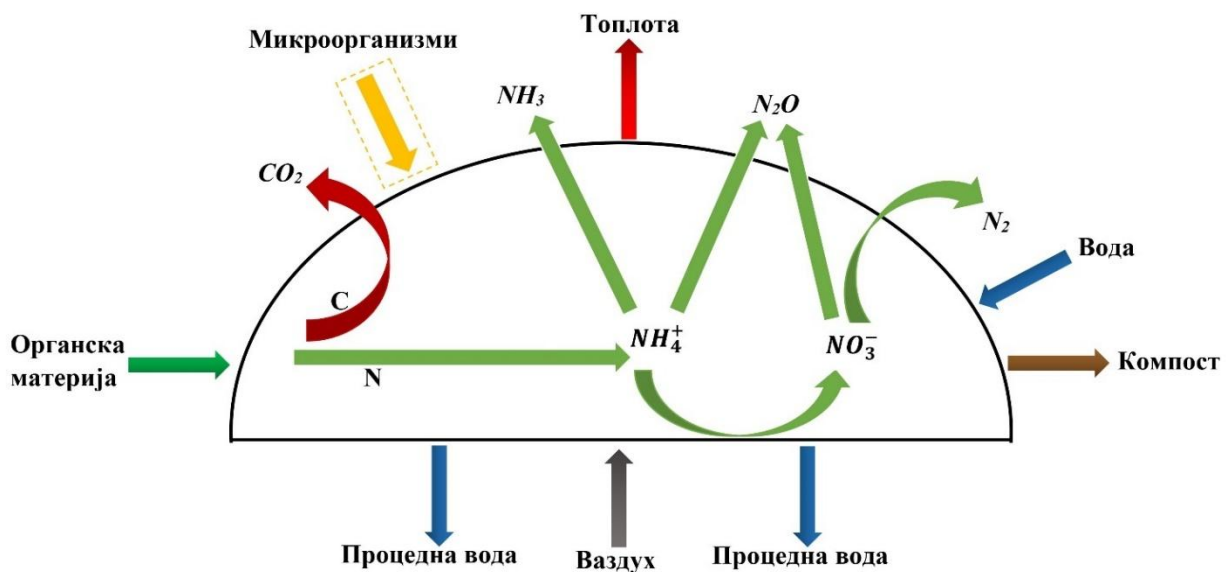
### 2.2.1 Опис процеса компостирања

Компостирање се може дефинисати као аеробни процес биолошке разградње и трансформације ОМ под тачно дефинисаним условима. Главни финални продукт третмана је компост, који се одликује стабилношћу, одређеним физичко-хемијским својствима, утврђеним садржајем нутријената и одсуством патогених организама, што омогућава његову примену као органско ђубриво. [17].

Процес компостирања представља и процес стабилизације хетерогене ОМ у чврстом стању, током којег се део ослобођене енергије усмерава на раст и метаболичке активности микроорганизама, док се остатак ослобађа у виду топлоте у околину [18]. С аспекта промена у процесу и присутних микроорганизама, компостирање представља комбинацију мезофилних и термофилних фаза током којих се врши разградња тачно дефинисаних компоненти ОМ која се третира. Том приликом долази до издвајања различитих продуката, који могу бити примарни и секундарни. Примарни продукт чини чврста фаза – компост, чија је укупна маса смањена од 50,0 до 80,0 %, а запремина од 20,0 до 60,0 % од укупне полазне мешавине која се третира.

Секундарни производи током компостирања се ослобађају у току трајања процеса, а обухватају гасове попут  $CO_2$  и  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $N_2O$  као и процедурне воде [19] [20].

На слици 2.3 је дат шематски приказ процеса компостирања са улазним и финалним компонентама.



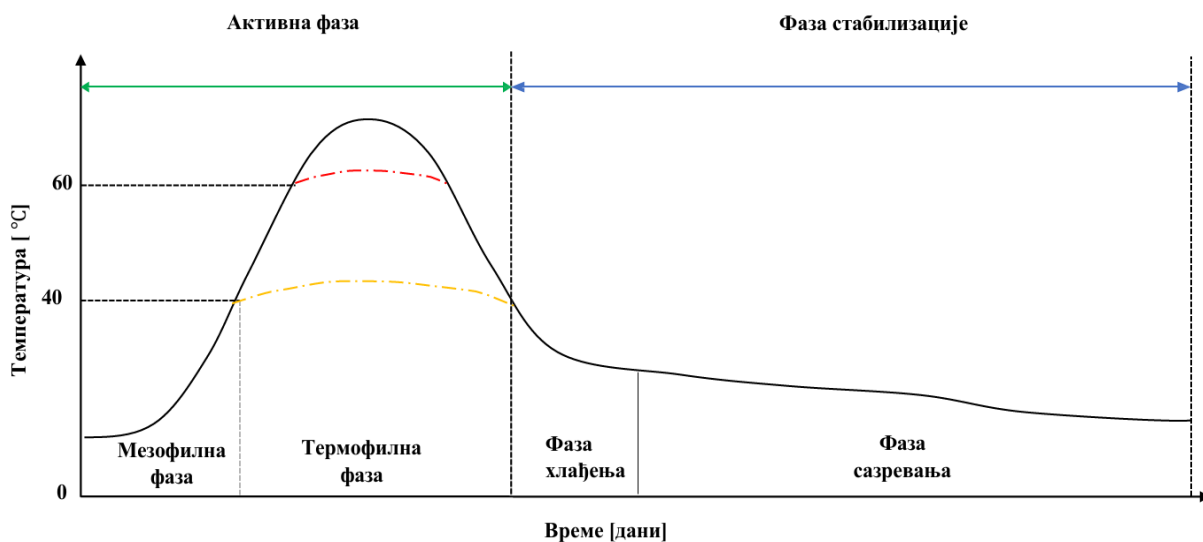
Слика 2.3 Шема процеса компостирања, према [19] [20]

Процес компостирања је условљен и испуњењем одређених услова који омогућују микроорганизама да изврше трансформацију органске материје, а то се пре свега односи на одговарајући однос C/N, рН вредност као и порозност. С обзиром да у већини случајева појединачне врсте ОО не задовољавају дефинисане услове за почетак процеса компостирања, тада се примењује процес ко-компостирања. Сам процес ко-компостирања подразумева мешање две или више врста ОО различитих карактеристика са циљем да се добије оптимална мешавина са одговарајућим физичко-хемијским параметрима за почетак трансформације.

Одређене врсте ОО се могу мешати, попут биомасе, која се одликује високом порозношћу, односом C/N и рН вредношћу, са животињским екскрементима (ЖЕ) или остацима хране (ОХ) који имају недовољно висок однос C/N, али висок садржај воде. На овај начин, постижу се оптимални услови за почетак и даљи ток трансформације.

### 2.2.2.1 Фазе процеса компостирања

Фаза процеса компостирања представља (означава) период са тачно одређеним условима, као што су: присуство одговарајућих врста микроорганизама, вредности температуре и рН вредности као и других параметара. Током компостирања, промене се одвијају по дефинисаном редоследу, при чему се на основу вредности и промена физичко-хемијских параметара могу разликовати две фазе - активна и фаза стабилизације, слика 2.4.



Слика 2.4 Примарне фазе процеса компостирања [19]

**Активна фаза (АФ)** се јавља на почетку процеса и у њој се дешава најинтензивнија трансформација ОМ. Да би дошло до почетка АФ морају бити задовољени одређени услови, као што су одговарајући однос C/N (између 25,0 и 35,0), рН вредност (од 5,5 до 8,0), као и садржај воде (од 50,0 % до 60,0 %) и кисеоника. Активни део карактерише смена мезофилне и термофилне фазе које прати промена микроорганизама, као и температуре и рН вредности. Код мезофилне фазе ОМ која се третира се налази на температури околине, док рН вредност зависи од особина ОО. У даљем току процеса, услед разградње лако разградиве ОМ, попут аминокиселина, масти и простих шећера, уз ослобађање велике количине енергије, стварају се услови за почетак следеће, термофилне фазе [21]. Код термофилне фазе, услед високих температура, чије вредности могу да достигну и до 70 °C, микробиолошки процеси су интензивнији. Овако високе температуре доводе и до уништавања патогених организама,



што повољно утиче на квалитет добијеног продукта. Међутим, услед превисоких температура долази до уништавања термофилних микроорганизама, што доводи до успоравања и завршетка ове фазе процеса. Ову фазу прати и интензивна разградња ОМ, која, уколико траје довољно дуго и ако се налази у оптималном опсегу температура, од 40 °C до 60 °C, може довести до делимичне разградње теже разградивих материја, попут лингноцелулозе. Током ове фазе мора се обезбеђивати довољна количина кисеоника, што се постиже пасивним или принудним превртањем или удувавањем ваздуха у масу. Ова фаза може да траје неколико дана или недеља, а зависи од врсте ОО која се третира, услова средине и система у коме се процес одвија [22].

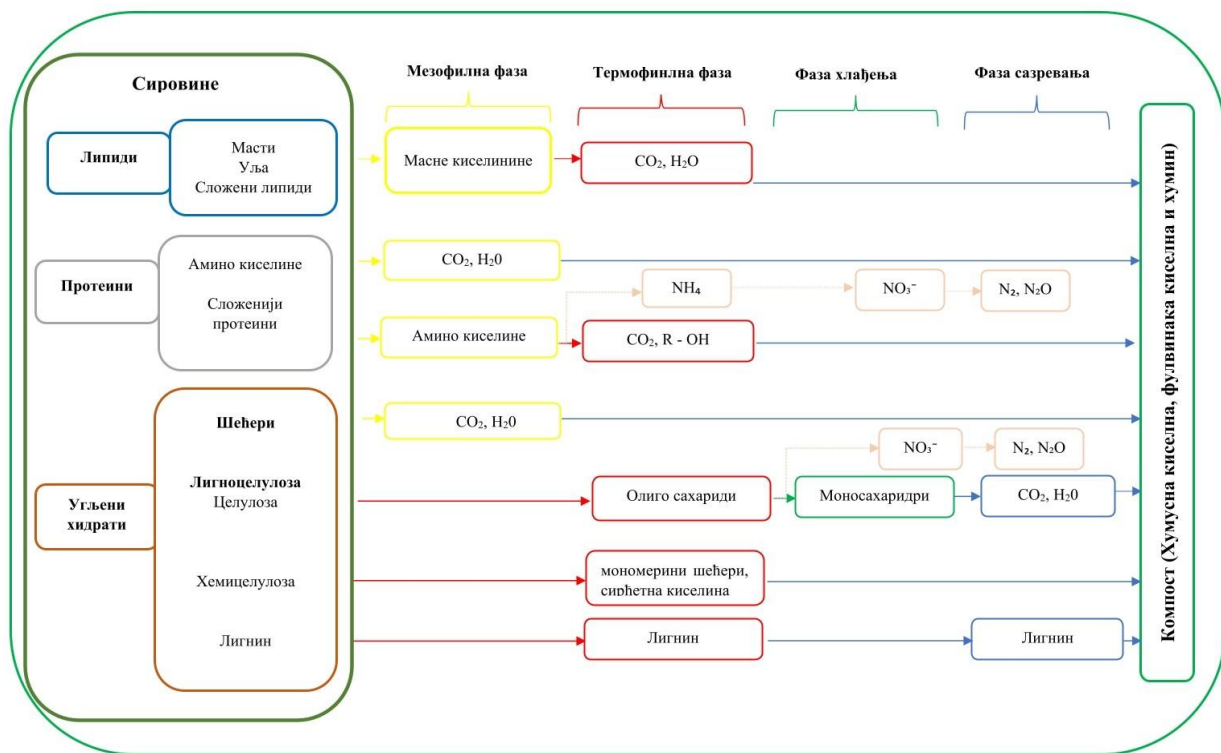
**Фаза стабилизације** почиње након завршетка термофилне фазе, а обухвата фазу хлађења (ФХ) и сазревања (ФС), слика 2.5. Карактеристично је да је код ФХ, температура и даље висока, али постепено опада и изједначава се са температуром околине. Мезофилни микроорганизми се поново обнављају, а заостале неразграђене компоненте бивају разграђене. Изједначавањем температуре са околном и њеним устаљењем, завршава се активна фаза и прелази се у ФС, која је присутна до краја одвијања процеса компостирања. Фазу сазревања одликује дуго трајање, које може бити и неколико месеци, у зависности од услова околине и врсте ОО која се третира. Предуго трајање ФС доводи до великог губитка ОМ што касније утиче на квалитет крајњег продукта. Код ФС број присутних бактерија се смањује, док се број гљивица повећава, а потреба за кисеоником опада до тачке до које се мешавина може држати без окретања. У даљем току, ОМ наставља да се разграђује и постепено трансформише у стабилно једињење у чији састав улазе хумусне компоненте (лигнин, целулоза), што чини зрео и готов компост. Уколико нису задовољени одређени услови, оптимални садржај воде (висок или низак) и услед недовољне количине кисеоника, процес трансформације ОМ неће бити завршен. Ова појава се огледа кроз висок однос C/N, високу рН вредност, присуство N у облику амонијум јона, као и висок садржај органских киселина, што су својства недовољно зрелог компоста [21]. Када је процес разградње завршен, добија се зрели и стабилни компост који има зрнасту структуру и пријатан мирис, однос угљеника према азоту и рН вредност су у оптималном опсегу (C/N је између 10,0 и 15,0 а рН је око 8,0), а минерализовани N је присутан у облику нитратног јона. Садржај ОМ се смањило, док је садржај нутријената висок, што омогућава примену на пољопривредном земљишту [23].

### 2.2.2.2 Механизам разградње компоненти које чине структуру ОО по фазама

Током процеса компостирања заступљено је више фаза у којима се врши декомпозиција тачно одређене компоненте која улази у састав ОО која се третира. Зависно од степена разградивости (лако или тешко), све компоненте које чине структуру ОО се разлажу у мезофилној, термофилној или у ФХ док се у ФС одиграва процес хумификације и добијање компоста.

Органски отпад се састоји од угљених хидрата, протеина и липида. Угљени хидрати обухватају шећере који су лако разградиви и лигноцелулозне материје које су теже разградиве. Протеини и липиди такође спадају у лако разградиве компоненте.

На слици 2.5 приказани су производи и међупродукти разградње различитих компоненти ОО по фазама током процеса компостирања.



Слика 2.5 Разградања појединих компоненти ОО током процеса компостирања

Липиди обухватају компоненте попут масти, уља и масноћа а њихова улога током процеса компостирања је обезбеђивање енергије за метаболичке активности микроорганизама, што се огледа у постизању виших температура и дужем трајању термофилне фазе [24]. Током процеса компостирања разлажу се у почетним фазама, а обухватају реакције хидролизе и оксидације. У првом кораку се разлажу до масних киселина а касније на CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O [25] [26].



Другу групу компоненти које улазе у структуру ОО представљају протеини, а обухватају аминокиселине и сложеније протеине чија је улога обезбеђивање неопходне енергије микроорганизмима. Разградња протеина се дешава у мезофилној и термофилној фази. При мезофилним условима, простији протеини који су сачињени од аминокиселина се разлажу на  $CO_2$  и  $H_2O$ , док се сложенији протеини разлажу на аминокиселине. У условима који одговарају термофилном опсегу, аминокиселине настале у мезофилним условима се разграђују на  $CO_2$  и алкоhole (R-OH), слика 2.5. Током разградње сложенијих протеина, издвајају се и споредни продукти попут  $NH_3$ ,  $N$  и  $N_2O$  [27] [28] [29].

Угљени хидрати су компоненте које су највише заступљене у природи, а обухватају шећере и лигноцелулозне компоненте. Понашање угљених хидрата у току процеса је различито. Шећери су лако разградиви и они као и протеини служе као извор енергије, док је лигноцелулоза (целулоза, хемицелулоза и лигнин) теже разградива, а користи се за обезбеђивање оптималних услова – пре свега порозности да би се омогућила циркулација кисеоника. Током процеса трансформације, шећери се при мезофилним условима разлажу на  $CO_2$  и  $H_2O$ , док лигноцелулоза остаје непромењена или се делимично разложи, слика 2.5. Почетак разградње појединих лигноцелулозних компоненти одиграва се у термофилној фази. У идеалним условима целулоза и хемицелулоза се разлажу на простије шећере, олигосахариде, мономерне шећере и сирћетну киселину. Заостале, неразграђене компоненте целулозе се у фази хлађења разлажу на моносахариде, а у фази сазревања на  $CO_2$  и  $H_2O$ . Код разградње целулозе, такође се издваја  $N$  у облику нитратног јона ( $NO_3^-$ ) који се у фази сазревања трансформише у  $N_2$  и  $N_2O$  и на тај начин се ослобађа у атмосферу [30] [31]. Лигнини се веома мало разграђују и то у тачно дефинисаном температурном опсегу, а неразграђени део се хумификује. Како се један део истраживања бави праћењем разградње лигноцелулозних компоненти током процеса компостирања, у даљем тексту биће детаљније објашњена структура, механизам трансформације и услови разградње ових компоненти.

Процент разградње се у великој мери разликује од састава мешавине која се третира процесом компостирања, примењеног система, услова средине, присуства одговарајућих врста микроорганизма, итд.

### 2.2.2 Параметри који утичу на процес

Основни предуслов за примену процеса компостирања је задовољење одређених услова као што су постизање одговарајуће температуре, рН вредности, односа C/N, обезбеђивање оптималног садржаја воде и величине честице односно крупноће ОО, као и



довољну количину кисеоника. Неки од параметара зависе од карактеристика ОО и то: однос C/N, рН вредност и величине честице, а неки од услова средине и начина вођења процеса, као што су параметри: температура, садржај воде и кисеоника. У овом потпоглављу биће описани најзначајнији параметри процеса, њихов утицај на трансформацију ОМ. Приликом анализе биће занемарена анализа појединачних система за компостирања с обзиром да се они доста разликују по примењеној технологији и могућности утицаја на појединачне параметре. Посебна пажња ће бити посвећена параметрима који имају карактеристичну промену при компостирању ООИВ.

### **2.2.2.1 Температура**

Температура представља кључни фактор приликом трансформације ОМ, с обзиром да од постигнуте вредности зависи да ли ће доћи до разградње компоненти које чине структуру ОО и колико ће процес трајати. Температура је резултат разградње ОО која се третира, а њена вредност је условљена укупном масом, односно запремином мешавине, порозношћу, садржајем воде и кисеоника као и садржајем разградивих компоненти. Вредност температуре није уједначена унутар мешавине, мења се од највиших вредности у централним деловима до нижих на површини мешавине. Уједначавање температуре се постиже сталним мешањем ОО која се третира, чиме долази до хомогенизације мешавине и равномерне разградње.

С обзиром да се вредности температуре током процеса мењају, могу се разликовати четири температурна опсега: мезофилни, термофилни, ФХ која је уједно и друга мезофилна фаза и ФС, слика 2.4. На почетку процеса присутна је мезофилна фаза, коју одликују температура и рН вредност мешавине. Мезофилну фазу карактерише почетак разградње ОО бактеријама и гљивицама услед чега долази до пораста температуре у мешавини. Практично, услед интензификације процеса разградње ОО, пре свега разградње простих једињења попут шећера, аминокиселина и протеина, количина топлоте која се ослободи је већа од количине топлоте која се ослободи у виду губитака у околину. Као последица ове појаве долази до пораста температуре у мешавини и стварања услова за прелаз у другу, термофилну фазу.

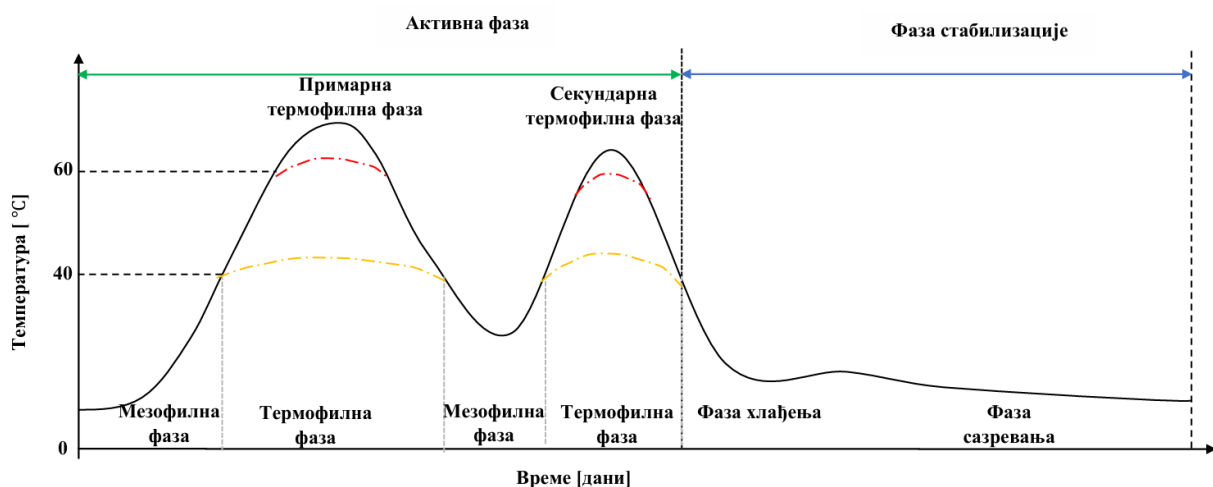
Термофилну фазу карактеришу високе температуре које се могу кретати у опсегу од 40 – 70 °С, највиши степен разградње ОО и уништење патогених организама. Током термофилне фазе, долази до смене микроорганизама у зависности од вредности температуре. На нижим температурама, од око 50 °С, присутне су гљивице, актиномицете и бактерије. У овом температурном опсегу се врши разградња лигноцелулозних и других присутних компоненти попут масти. На вишим температурама (од 60 до 70 °С), долази до изумирања гљивица, па се

разградња врши помоћу бактерија и актиномицета. При овом температурном опсегу се врши разградња заосталих теже разградивих компоненти ОО [32]. Даљи пораст температуре, веће од 70 °С, доводи до изумирања присутних микроорганизама и успоравања процеса. Дужина термофилне фазе условљена је низом фактора као што су присуство разградиве материје, одговарајућих микроорганизама који се додају како би се постигле више температуре што би продужило трајање фазе и разградиле одређене компоненте, врсте система, као и условима средине [33] [34].

Након смањења доступних хранљивих материја, активност микроорганизама се смањује, температура опада и стварају се услови за прелаз у ФХ. Мезофилни микроорганизми, гљивице и актиномицете су поново заступљене и врше декомпозицију заосталих компоненти. Даљим хлађењем масе, процес улази у финалну фазу, ФС коју карактерише ниска микробиолошка активност. Током ФС долази до стабилизације и хумификације финалног продукта [35].

### Појава секундарне термофилне фазе

Као што је већ речено, дијаграм промене температуре током процеса мења се по уобичајеној путањи, где на почетку долази до пораста затим опадања и изједначавања са температуром околине. Та путања (промена) заступљена је у случајевима када су задовољени оптимални услови за почетак процеса и када се третира већина врста ОМ. У појединим случајевима долази до одступања од уобичајене путање и појаве више мезофилних и термофилних фаза. На слици 2.6 приказана је промена температуре при појави више мезофилних и термофилних фаза.



Слика 2.6 Температурни профил при појави секундарне термофилне фазе [36]

На појаву секундарне термофилне фазе могу утицати:



- ниска почетна рН вредност и њена промена током процеса;
- присуство лигноцелулозних компоненти у мешавини;
- присуство полифенолних једињења.

Код компостирања мешавина са ниском почетном рН вредношћу, мањом од 6,0, услед разградње долази до ослобађања органских киселина које додатно утичу на пад рН вредности и преласка у киселу фазу које инхибира развој микроорганизама што доводи до пада температуре. Услед разградње органских киселина микробиолошка популација се обнавља што доводи до поновног раста температуре и појаве тзв. секундарне термофилне фазе [37]. На основу промене рН вредности током процеса, могуће је одредити да ли ће доћи до појаве секундарне термофилне фазе или неће. Као граница за појаву секундарне термофилне фазе је рН вредност у опсегу између 4,5 до 5,5 у мезофилним фазама које су присутне између пикова [38].

Приликом компостирања мешавина у чијем саставу се налазе лигноцелулозне компоненте, појава секундарне термофилне фазе се јавља услед разградње заосталих целулозних компоненти чија трансформација није завршена у првој термофилној фази [39] [40].

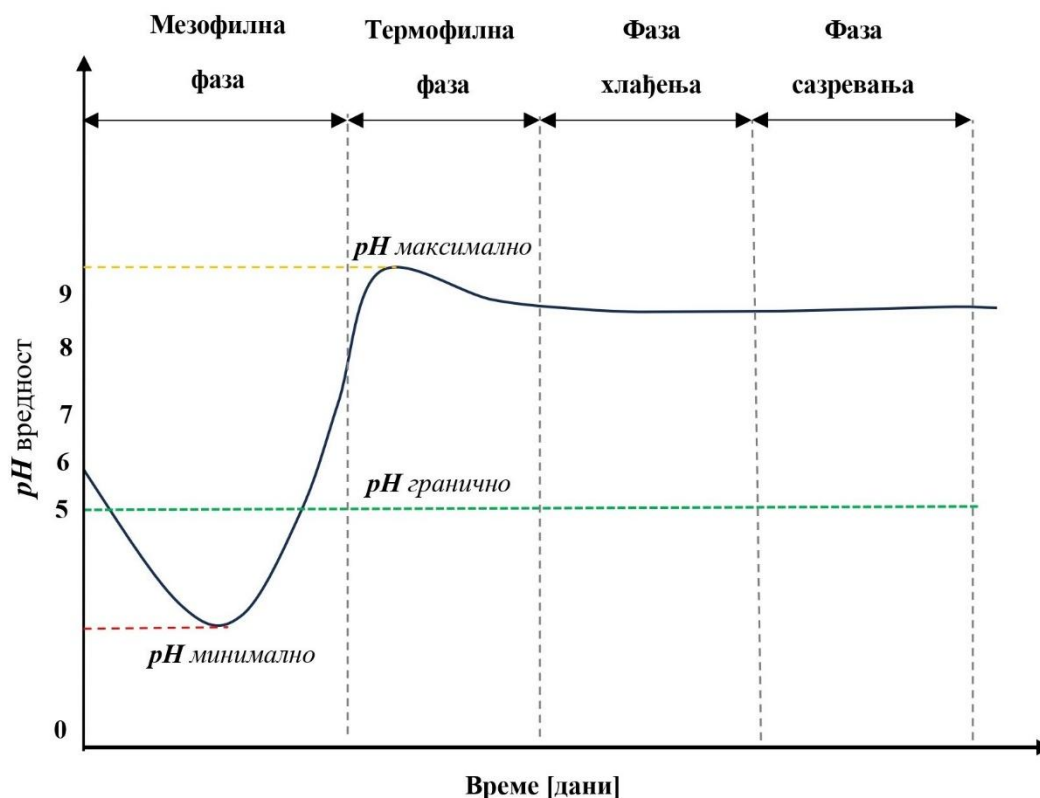
Присуство полифенолних једињења, посебно код ООИВ, доводе до појаве секундарне термофилне фазе с обзиром да присуство полифенола (танина) има инхибирајући ефекат на развој микроорганизама што условљава пад температуре и појаву мезофилних услова. У даљем току постепеним обнављањем микробиолошке популације долази до поновног раста температуре и појави секундарног пика [36].

Карактеристично је да термофилни пикови могу бити постигнути два или више пута, у зависности од услова процеса и врсте ОО која се третира. Међутим, након завршетка интензивног процеса разградње, односно завршетка друге или треће термофилне фазе, наступа ФХ и стабилизације, што означава крај процеса, слика 2.6.

#### **2.2.2.2 рН вредност**

рН вредност има значајан утицај на процес као други најважнији параметар. Оптимални опсег рН вредности за почетак и даљу трансформацију ОМ креће се од 5,5 до 8,0 [41]. Ова рН вредност је оптимална јер микроорганизми, пре свега бактерије и гљивице који су присутни у мезофилној фази, преферирају киселу до благо базну средину. Процес је могуће извести и у условима када је рН вредност веома ниска, са вредношћу од 3,0, или када је веома висока, са вредношћу од 11,0 [41] [42].

Промена рН вредности током процеса омогућава разликовање четири фазе: мезофилну, термофилну, фазу хлађења и фазу сазревања, као што је приказано на слици 2.7. Ове фазе у промени рН вредности су и фазе које се јављају током промене температуре.



Слика 2.7 Дијаграм промене рН вредности током процеса компостирања [43]

У почетној фази процеса, мезофилној фази, рН вредност мешавине је одређена рН вредношћу присутне ОО која се подвргава третману. Почетком разградње ОМ, аминокиселина и протеина, долази до ослобађања органских киселина, што узрокује пад рН вредности и појаву киселе фазе, а вредност рН достиже свој минимум - *рН минимално*, слика 2.7 [44]. Дужина трајања киселе фазе има велики утицај на одвијање процеса. Дуго трајање може довести до успоравања или чак заустављања процеса, а гранична вредност за крај киселе фазе је 5,0 [45]. Наставком разградње, количина органских киселина се смањује, што доводи до пораста рН вредности и стварањем услова за прелазак у другу фазу - термофилну фазу, слика 2.7. У овој фази долази до наглог пораста рН вредности, због ослобађања  $NH_3$  који се издваја приликом декомпозиције протеина. У овој фази, рН вредност достиже свој максимум - *рН максимално* и формира се појава тзв. седла на дијаграму промене. У даљем току процеса, долази до успоравања разградње због смањења количине лако разградиве ОМ. Однос C/N опада, а и рН вредност опада и постаје стабилна, што означава почетак ФХ. Ову фазу карактерише стабилна рН вредност која се не мења значајно све до преласка у ФС. У



последњој фази, ФС, рН вредност је у распону од 7,0 до 8,5, што представља оптимални опсег за крај процеса [46].

Током одигравања процеса на рН вредност се може утицати применом различитих метода. Једна од метода је мешање различитих врста ОО кроз примену процеса ко-компостирања, што омогућава постизање оптималне рН вредности на почетку процеса. Обезбеђивање адекватне количине кисеоника, која се може остварити кроз постојање порозности у мешавини и кроз аерацију, може утицати на скраћење киселе фазе и постизање оптималне рН вредности током процеса компостирања [47].

### 2.2.2.3 Садржај воде

Садржај воде је трећи битан параметар чије вредности морају бити у оптималном опсегу за одигравање процеса, пошто свака њена промена изван дефинисане границе може променити ток процеса и створити анаеробне услове, што уједно и значи другу врсту биолошког третмана. Садржај воде је фактор на који је могуће утицати механички, тј. додавањем одређене количине воде током одвијања процеса или мешањем како би се вишак влаге издвојио. У мешавини, током процеса, садржај воде се мења, од највишег при дну и угловима до нижег на површини масе. Један део воде током процеса се издваја у виду водене паре при високим температурама, други део се губи у виду процедурних вода док се трећи део задржава у маси, а зависи од врсте ОО. Вода, током процеса има улогу транспортног медијума и растварача хранљивих материја унутар мешавине која се третира, а оптимална вредност је од 50,0 % до 60,0 %, али горња граница може да буде и од 65,0 % до 70,0 % [48] [40]. Када је садржај воде низак, око 30,0 %, микробне активности се знатно успоравају, док преласком више од 70,0 % долази до појаве анаеробних услова унутар масе [49]. Садржај воде, има велики утицај на промену температуре унутар мешавине, где при ниском уделу воде у мешавини долази до бржег загревања и хлађења, у односу на мешавине са вишим уделима воде, уз услов да се остали услови процеса одржавају оптималним. На крају процеса оптимални садржај воде је од 30,0 % до 40,0 % [50].

### 2.2.2.4 Однос угљеника према азоту

Однос C/N, представља зависност између ова два елемента, који се од услова одвијања процеса и врсте ОО мењају током третмана. Угљеник је одговоран за обезбеђивање довољне количине енергије за микроорганизме који га оксидишу, услед чега долази до ослобађања CO<sub>2</sub>, док је N одговоран за синтезу протеина и размножавање заступљене микробне популације. Вредност односа C/N директно зависи од врсте ОО која се третира, а постизање



оптималне вредности за почетак процеса се обезбеђује мешањем одређених фракција ОО. Оптимални опсег за почетак процеса је од 25:1 до 35:1, где је однос од 30:1 идеалан [45]. При вишим вредностима долази до мањег ослобађања топлоте услед чега долази до успоравања процеса, због ограничене количине N који је неопходан микроорганизмима. У другом случају, при ниском односу C/N, долази до великог губитка N у виду  $NH_4$  који може бити токсичан за микроорганизме. Као резултат микробиолошке активности, однос C/N током процеса опада, C се губи у виду  $CO_2$ , док се садржај N у већини случајева повећава. На крају процеса, однос C/N је у опсегу 10:1 до 15:1, што одговара стабилном и зром компосту који је могуће применити на земљиште без негативних ефеката [51] [52].

#### 2.2.2.5 Садржај ваздуха

Аерација је директно повезана са садржајем кисеоника, а представља кључни параметар за одвијање процеса, с обзиром да се разградња органске материје врши у аеробним условима. С обзиром да се током процеса ослобађа угљен диоксид, долази до смањења количине доступног кисеоника, а одржавање оптималне вредности кисеоника од 5,0 % до 10,0 % унутар мешавине је кључ за успешно спровођење процеса [53]. Током мезофилне и термофилне фазе, када је процес најинтензивнији потрошња кисеоника је највећа, па удубавањем или сталним мешањем ова потреба се надомешта. Уколико потреба за кисеоником није задовољена, анаеробни услови унутар мешавине постају доминантни. Као резултат ове појаве долази до успоравања процеса и ослобађања гасова који су карактеристични за новонастале услове средине, а то су амонијак, метан, азотоскид.

#### 2.2.2.6 Садржај тешко разградивих компоненти

Посебну групу угљених хидрата чине тешко разградиве компоненте у чији састав улазе лигноцелулозне компоненте, целулоза, хемицелулоза и лигнин. Ове компоненте су широко заступљене а најчешће се налазе у ООПП попут пшеничне сламе (ПС), кукурузовине и ООИВ. Удео лигноцелулозних компоненти код појединих врста ОО је висок, а просечан садржај је 40,0 % целулозе, 20,0 % – 30,0 % хемицелулозе и 20,0 % – 30,0 % лигнина [54]. Лигнини, целулоза и хемицелулоза се у природи не налазе у слободном облику, већ су међусобно повезане а најчешће су присутне у зидовима биомасе.

**Целулоза**, хемицелулоза и лигнини по структури представљају биополимере. Целулоза такође представља један од најзаступљених полисахарида који улази у састав зидова биомасе. Структура целулозе је сачињена од аморфне и кристалне целулозе, које се у току процеса разградње другачије понашају. Кристална целулоза одликује се тежом разградњом,



док је аморфна целулоза подложна разградњи [55]. Целулоза у току процеса служи као извор енергије за трансформације које се дешавају. Оптимални услови разградње целулозе у току процеса према Pèrez -у су температура у опсегу од 55 до 80 °C, при рН вредности од 5,0 – 5,5 [31]. Такође, поред високих температура, дужина трајања термофилне фазе значајно доприноси степену разградње целулозе.

*Хемицелулоза* такође спада у природне полимере, а одликује се разгранатом структуром чијом се разградњом могу добити различити производи [56]. У току процеса, хемицелулоза је мање отпорна на разградњу, па се у односу на целулозу разграђује у већој мери [57]. Разградња хемицелулозе током процеса се одвија у термофилној фази, а производи који настају као резултат су мономерни шећери и сирћетна киселина [31]. Према Pèrez -у и Wei – у оптимални услов за разградњу хемицелулозе је температура у опсегу од 50 °C до 80 °C [31] [58].

*Лигнини* су најраспрострањенији биљни полимери у природи, а састављени су од угљеничних атома који су повезани у сложене функционалне групе унутар молекула који се називају монолигноли. [59]. У природи лигнини улазе у састав биомасе а у спрези су са целулозом и хемицелулозом. Због ове особине процес њихове разградње успорен. Лигнини, по свом пореклу и подложности разградњи се могу сврстати у три групе: меке лигнине, који се налазе у меким дрвима (softwood), тврде лигнине (hardwoods) који се налазе у тврђим дрвима и лигнине који се налазе у трави (grasses). Највиши удео лигнина у природи потиче од меких лигнина, затим од чврстих (тврдих) а најмање од траве [60].

Процес разградње лигнина у току процеса компостирања је доста сложен. У току процеса компостирања лигнини се могу делимично разградити под одређеним условима, а неразграђени остатак се хумификује [61]. Лигнини се у току процеса компостирања разлажу у термофилној, а делимично у фази хлађења. Оптимална температура разградње лигнина према Waksma – у је температура од 50 °C, док са повећањем температуре долази до смањења разградање [62]. Према Tuomela, оптимални опсег температуре за разградњу лигнина је од 40 °C до 50 °C, уз присуство термофилних гљивица [63]. Поред оптималне температуре која омогућава разградњу лигнина, дужина термофилне фазе такође има битан утицај. Према Tomati – у оптимални услови обухватају трајања термофилне фазе од 35 дана и температуру од 50 °C . При овим условима је могуће разградити лигнине до 70,0 % [64]. Такође, Nusbaumer је указао да при кратком трајању термофилне фазе, од 7 до 14 дана не долази до разградње лигнина [65].



У новије време, у литератури може се наћи велики број истраживања која се баве утицајем присуства различитих врста микроорганизама и различитих врста третмана који се примењују ради повећања разградње лигноцелулозних компоненти.

Како би се повећала разградивост целулозе у току процеса, примењује се термални предtretман при чему долази до значајне редукације садржаја целулозе, за око 78,0 % у односу на традиционално компостирање без третмана [44]. Такође, додавањем одређених врста микроорганизама попут *Gloeophyllum trabeum* се постиже већи степен разградње целулозе при компостирању, за 181,8 % [66]. Међутим, како се целулоза у природи налази у спрегу са лигнинима, њена разградња у току процеса је у уско повезана и са количином лигнина који се разграде и са њеном структуром [67] [68]. Према Stutzenberger – у, присуство лигнина који се нису разградили инхибирали су разградњу целулозе [69].

Повећање степена разградње хемицелулозе током процеса постиже се применом термалног предtretмана. При овом поступку је степен декомпозиције виши за 10,0%, док додавањем одређених врста микроорганизама разградња се повећава за 49,4 % [44] [66].

### 2.3 Стандарди квалитета компоста

Могућност примене добијеног финалног продукта, компоста, у већини случајева представља главни разлог за испитивање и спровођење процеса компостирања са различитим врстама ОО јер на тај начин би се обезбедио повратак нутријената и органске материје у земљиште. Међутим, због карактеристика које поседују поједине врсте ОО попут садржаја тешких метала, патогена и др. које су присутне и у компосту након третмана, уведена је особина „квалитет компоста“ коју је неопходно задовољити уколико се разматра његова даља примена. Према Stehouwer -у особина квалитета компоста одређује способност и капацитет производа да обавља своју функцију. Са друге стране према Vernal -у особина квалитета компоста обухвата „стабилан и дезинфикован производ компостирања, који је прошао почетну, брзу фазу разградње, користан је за раст биљке и има одређене хумусне карактеристике“ [70] [71].

Утврђивање стабилности и зрелости компоста је доста сложено, а обухвата праћење низа параметара којима је дефинисана стабилност и зрелост компоста. Параметри који дефинишу стабилност и зрелост компоста могу се класификовати у три категорије:

- Параметри којима се прате физичке карактеристике добијеног компоста;
- Параметри којима се прате биолошке карактеристике добијеног компоста;

- Параметри којима се прате хемијске особине добијеног компоста;

Праћењем ових параметара добијају се особине које поседује добијени компост, а упоређују се са унапред дефинисаним стандардима. На слици 2.8 приказани су сви физички, биолошки и хемијски параметри који се прате приликом одређивања стабилности и зрелости компоста ради утврђивања квалитета [72].



Слика 2.8 Подела параметара који дефинишу квалитет компоста

**Физички параметри**, карактеристике попут температуре, боје и гасова који се издвајају описују тренутни постигнути степен разградње. Праћењем ових параметара, изузев температуре је могуће утврдити да ли је компост стабилан и зрео [63].

**Биолошки параметри**, као што су фитотоксичност, активност ензима и индекс респирације су параметри који се везују за степен декомпозиције и тренутно стање ОМ. Овим параметрима је могуће прецизно оценити да ли је добијени компост довољно стабилан и зрео [73].

**Хемијски параметри**, такође представљају карактеристике помоћу којих је могуће проценити да ли је добијени компост стабилан и зрео. Ови параметри обухватају низ анализа

којима се подвргава добијени компост са циљем да се одреде неопходни параметри а касније упореде са референтним вредностима [73].

С обзиром да за претходно приказане карактеристике постоје референтне вредности, у табели 2.2 је дат њихов приказ на основу литературних података. Приказани су они параметри који су праћени у овој докторској дисертацији.

**Табела 2.2** Параметри зрелости и стабилности компоста

[74] [75] [76] [77] [78] [79] [80]

| Параметар   | Вредност  |
|-------------|---|
| Боја        | Тамно браон или црна боја                             |
| Температура | Мања или виша, константна после окретања масе         |
| Гасови      | Без ослобађања амонијака                              |
| Мирис       | Пријатан мирис земље                                  |
| pH вредност | Неутрална до благо базна, у случају ООИВ од 7,4 – 8,1 |
| C/N         | < 20  |
| $NH_4$      | < 0,04 %  |
| $NH_4/NO_3$ | < 0,16 (1,0)  |

С обзиром да поред литературних вредности које дефинишу параметре зрелости и стабилност компоста постоје и правилници на нивоу државе којима је ближе описана дефиниција компоста и које особине треба да поседује, у наредном поглављу дат је приказ услова и параметара које добијени компост мора да задовољи у РС.

### 2.3.1 Законска регулатива о квалитету компоста

Управљање отпадом представља сложен систем и због тога је неопходно дефинисана правна регулатива како би се правилно управљало отпадом. У РС постоји дефинисан закон о управљању отпадом, ("Сл . гласник РС", бр. 36/2009, 88/2010, 14/2016, 95/2018 - закон и. 35/2023) у коме су дате све врсте одредби којима се дефинише управљање свих врста отпада [81].

Законом о управљању отпадом уређују се: „врсте и класификација отпада; планирање управљања отпадом; субјекти управљања отпадом; одговорности и обавезе у управљању отпадом; организовање управљања отпадом; управљање посебним токовима отпада; услови и поступак издавања дозвола; преко гранично кретање отпада; извештавање о отпаду и база података; финансирање управљања отпадом; надзор, као и друга питања од значаја за управљање отпадом“ [81].

Постојећа законска регулатива у РС у првом кораку дефинисана је на нивоу државе а у другом на нивоу локалних заједница. Како би се боље схватио донети закон о управљању



отпадом, прво је извршена дефиниција отпада која гласи „Отпад се дефинише као било која материја или предмет који његов власник одбацује, намерава да одбаци или је у обавези да уклони у складу са важећим регулативима и принципима управљања отпадом“ [81].

Закон о управљању отпадом препознаје ОО као посебну врсту отпада а дефинисан је као „биоотпад“. Тако, са аспеката законске регулативе „биоотпад“ се дефинише као „Биоотпад се односи на биоразградиве материјале који потичу из башти и паркова, као и на органске остатке хране, укључујући кухињски отпад из домаћинства, угоститељских и малопродајних објеката. Ова категорија отпада обухвата и органске остатке који настају у процесу производње прехранбених производа, хране за животиње и производа намењених њиховој исхрани“ [81]. На основу претходне дефиниције може се закључити да је термином „биоотпад“ обухваћен сав ОО који се генерише како у градским и руралним срединама тако и у индустрији односно обухваћени су сви извори настајања ове врсте отпада.

Као неопходни корак у управљању отпадом јесте и избор одговарајућег третмана, који се према постојећем Закону дефинише као: „Третман отпада обухвата све поступке који се односе на поновну употребу или одлагање отпадних материјала, укључујући и припремне процесе који претходе њиховој поновној употреби или коначном збрињавању, у складу са релевантним законским и еколошким стандардима“ [81]. Може се видети према претходној дефиницији за третман да она препознаје отпад ,ОО, као сировину чиме се постиже принцип „циркуларности“ и спречавање губљења материје.

У оквиру третмана који су дефинисани Законом посебно се издваја биолошки третман, који се дефинише као „Биолошки третман отпада представља технолошки процес разградње биоразградивих органских материјала, укључујући папир, картон, баштенски и кухињски отпад, с циљем добијања корисних секундарних производа. Овај процес омогућава производњу материјала за побољшање структуре и плодности земљишта, као што је компост, као и енергената, попут метана. Основне методе биолошког третмана укључују компостирање и анаеробну дигестију, а примењују се и друге технике у складу са најбоље доступним технологијама (БАТ), како би се осигурала ефикасност процеса и минималан утицај на животну средину [81].

Према Закону предвиђено је да „Биолошки третман отпада се примењује ради смањења одлагања биоразградивог отпада на депоније и смањења емисије гасова са ефектом стаклене баште. Овај процес доприноси продужетку века трајања депонија и одрживом управљању отпадом кроз добијање корисних секундарних производа.“ [81].



Компостирање представља један од третмана „биоотпада“, ОО а према Закону се дефинише као: „Компостирање представља контролисани биолошки процес разградње биоразградивог отпада под утицајем микроорганизама у присуству кисеоника, при чему се добија компост као финални производ погодан за примену у побољшању квалитета земљишта.“ [81].

### 2.3.2 Законска регулатива о могућности примене добијеног продукта – компоста

Могућност искоришћења добијеног продукта након биолошког третмана представља један од главних циљева и постизања циркуларности нутријената. Примена компоста као органског ђубрива има вишеструку корист, што се огледа у враћању нутријената у земљиште, ОМ и решавање проблема ОО. У РС могућност примена компоста као органског ђубрива дефинисана је „Законом о средствима за исхрану биља и оплемењивачима земљишта“ („Сл. гласник РС“, бр. 41/2009 и 17/2019) и „Правилником о условима за разврставање и утврђивање квалитета средстава за исхрану биљака, одступања од хранљивог садржаја и минималним и максималним вредностима дозвољеног одступања садржаја хранљивих материја и о садржини декларације и начину обележавања средстава за исхрану биља“ („Сл. гласник РС“, бр. 30/2017 и 31/2018) [82] [83].

Компост, као продукт биолошке разградње, према Закону се може сврстати у две групе и то: „Оплемењивач земљишта“ и „Органско ђубриво“ док према Правилнику је сврстано у групу органских ђубрива која се називају „Органски оплемењивачи земљишта“. На основу претходних приказаних група за компост може се закључити да је Правилником ближе описана категорија добијеног продукта биолошке разградње.

Према дефиницији из Закона „Оплемењивач земљишта је средство које се користи за унапређење физичких, хемијских и биолошких својстава земљишта, а које садржи ниске концентрације или не садржи примарне и микрохранљиве елементе, због чега се не сврстава у категорију ђубрива“, док се органско ђубриво дефинише као „Органско ђубриво представља производ биљног и животињског порекла, у којем се декларише садржај органске материје и хранљивих елемената, а у појединим случајевима и присуство микроорганизама. Оно се примењује у земљишту ради побољшања његове плодности и исхране биљака, а добија се путем процеса ферментације биљних и животињских остатака“ [82]. На основу претходних дефиниције може се видети да се компост може сврстати у обе групе на основу својих карактеристика али термином „Органско ђубриво“ боље је дефинисан продукт биолошке разградње.



Добијени компост као продукт биолошке разградње сврстан је у групу органских ђубрива која се према Правилнику називају „Органски оплемењивачи земљишта“ па на основу тога су дефинисани и критеријуми да би се добијени компост могао сврстати у дату групу. У табели 2.3 дат је приказ особина за оба типа „Оплемењивача“ .

Постављени критеријуми за обе врсте оплемењивача су слични уколико се посматрају физичко-хемијски параметри попут садржаја органске материје, рН вредности, односа угљеника према азоту, садржаја воде и нутријената. Група „Органски оплемењивачи“ подразумева строже критеријуме у погледу садржаја нечистоћа – њихово присуство није дозвољено. То указује да постизање ове категорије значи и виши ниво квалитета добијеног оплемењивача земљишта.



Табела 2.3 Критеријуми за органске оплемењиваче земљишта [83]

| Назив оплемењивача у оквиру типа | Подаци о начину производње и основним састојцима   | Минимални садржај хранљивих елемената (у масеним %)<br>Подаци о изражавању хранљивих елемената   | Остали подаци о обележавању типа  | Садржај хранљивих елемената које треба декларисати<br>Облици и растворљивост хранљивих елемената  |
|----------------------------------|--|--|---|---|
| Органски оплемењивач компост     | Производ санитарно исправан и стабилизован, добијен биолошком аеробном разградњом (укључујући термофилну фазу), биоразградивих ОМ, под контролисаним условима. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Укупна ОМ: 35,0 %</li> <li>- Влажност: од 30,0 до 40,0 %</li> <li>- Однос C/N &lt; 20,0</li> <li>- Нечистоће: каменчићи или шљунак величине 5 mm максимум 5,0 %.</li> <li>- Нечистоће (метали, стакло и пластика) пречника више од 2 mm максимум 3,0 %.</li> <li>- 90,0 % честица мора пролазити кроз сито 25 mm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- рН вредност</li> <li>- Електрична проводљивост</li> <li>- однос C/N</li> <li>- Минималана и максимална влажност</li> <li>- Поступак или процес производње</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Укупна ОМ</li> <li>- Угљеник органски</li> <li>- Хуминска киселина</li> <li>- Укупни N (&gt; 1,0 %)</li> <li>- Органски N (&gt; 1,0 %)</li> <li>- <math>NH_4^+</math> (&gt; 1,0 %)</li> <li>- <math>P_2O_5</math> укупни (&gt; 1,0 %)</li> <li>- <math>K_2O</math> укупни (&gt; 1,0 %)</li> <li>- Гранулометријски састав</li> </ul>       |
| Органски оплемењивач             | Производ санитарно исправан и стабилизован, добијен биолошком аеробном разградњом (укључујући термофилну фазу), само нађубрен, под контролисаним условима      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Укупна ОМ: 35,0 %</li> <li>- Влажност: од 30,0 до 40,0 %</li> <li>- Однос угљеника према C/N</li> <li>- Не садржи нечистоће или инертне облике као што су камен, шљунак, метал, стакло или пластика.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- рН вредност</li> <li>- Електрична проводљивост</li> <li>- однос C/N</li> <li>- Минималан и максимална влажност</li> <li>- Поступак или процес производње</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Укупна ОМ</li> <li>- Угљеник органски</li> <li>- Хуминска киселина</li> <li>- Укупни азот (&gt; 1,0 %)</li> <li>- Органски азот (&gt; 1,0 %)</li> <li>- <math>NH_4^+</math> (&gt; 1,0 %)</li> <li>- <math>P_2O_5</math> укупни (&gt; 1,0 %)</li> <li>- <math>K_2O</math> укупни (&gt; 1,0 %)</li> <li>- Гранулометријски састав</li> </ul> |



### 3 ЛИТЕРАТУРНИ ПРЕГЛЕД У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

У последњих неколико деценија о могућностима искоришћења ООИВ као сировине за добијање нових продуката и решавање проблема ООИВ као отпада бавио се велики број истраживача. Они су усмерили своја испитивања на начине искоришћења појединих компоненти које улазе у састав ООИВ, са циљем добијања производа који је могуће користити у комерцијалне сврхе. И поред великог искоришћења ООИВ за добијање нових производа, мали број укључује све компоненте које је сачињавају. Истражује се примена покожица за добијање различитих антиоксиданаса попут полифенолних једињења која су широко заступљена [84] [85]. Такође се испитује могућности примене појединих компоненти за исхрану животиња [86]. Исто тако, истраживана је могућност примене огрозда као природног адсорбента код пречишћавања воде [87].

Међутим, уколико се ООИВ посматра као фракција ООПП, велики број истраживања је усмерен ка примени доступних и постојећих третмана, термичких и биолошких, као и на утврђивању који од њих је најпогоднији уколико жели да се реши проблем ООИВ.

У последњих 30 година велики број истраживача посветио је пажњу проналажењу начина за решавање проблема ООИВ. ООИВ КГ је могуће третирати термичким и биолошким третманом па су и досадашња истраживања ишла у том правцу. Истраживања која су се бавила термичким третманом ООИВ указала су да додатни пред третман сировине и високи инвестициони трошкови представљају проблеме без обзира што се на крају процеса добија енергија и што се решава целокупни проблем ове врсте отпада [88] [89] [90]. Биолошки третмани су прихватљивији са аспекта инвестиционих трошкова, али сезонска присутност ООИВ може да буде ограничавајући фактор за анаеробну дигестију.

Међутим, највећи број истраживања у последње време посвећен је испитивању могућности примене процеса компостирања и ко-компостирања као третмана за решавање проблема ове врсте ОО. Анализом садржаја нутријената, ОМ као и садржаја С и N утврђено је да је ООИВ добра сировина за процес компостирања и ко-компостирања. Међутим, због превелике киселости њено самостално компостирање је отежано па је неопходно додати и



другу врсту ОО и применити процес ко-компостирања. На овај начин могу се постићи оптимални услови за почетак и даљи ток процеса ко-компостирања. Како је циљ ове докторске дисертације праћење процеса компостирања ООИВ, у даљем тексту приказан је литературни преглед досадашњих истраживања могућности компостирања ООИВ. Литературни преглед је подељен у три дела, први део обухвата преглед особина ООИВ. Други део обухвата преглед литературе примени процеса компостирања ООИВ, утицају присуства огроздине, лигноцелулозе као и различитих врста ко-супстрата на процес компостирања. Трећи део је посвећен литературном приказу параметара стабилности добијеног компоста и његовој примени.

### 3.1 Својства компоненти ООИВ

Први покушаји карактеризације појединих компоненти ООИВ, талоба и отпадних вода из винарске индустрије спроведени су од стране Bustamante и сарадника 2005. године, који су извршили анализу великог броја узорака при чему су пратили параметре битне за ООИВ, и то: електричну проводљивост, рН вредност, густину, органско оптерећење, садржај нутријената и тешких метала са циљем да утврде њихов састав и однос посматраних параметара који би се касније користили при процени састава [91]. Мерењима су утврдили да се ООИВ карактерише ниском рН вредношћу: 5,5 за отпадну воду, а за талог 4,3, високим органским оптерећењем: БПК<sub>5</sub> и ХПК за отпадну воду износи 22,4  $mgO_2/l$  и 49,1  $mgO_2/l$  док за талог 14,5  $mgO_2/l$  и 50,2  $mgO_2/l$ . Такође, утврдили су и значајно присуство полифенолних једињења: 140,0  $mg/l$  за отпадну воду и 318,0  $mg/l$ , за талог, као микро и макро нутријената: садржај Р износи 35,4  $mg/l$ , а садржај К 270,0  $mg/l$  за отпадну воду. За талог вредности су више и износе: Р 118,4  $mg/l$  а калијум 354,0  $mg/l$ . Истакли су да због појединих особина, ниске рН вредности и садржаја полифенола не задовољавају захтеве пољопривреде те да је неопходно извршити третман како би се добио стабилан и безбедан крајњи производ.

Убрзо затим Bustamante је са сарадницима спровео истраживање о агрохемијским карактеристикама огроздине, комине, талоба, ООИВ која се издваја након процеса дестилације и муља са циљем да се утврди њихов састав (анализирао је 87 узорака ових компоненти) [92]. Том приликом су пратили најзначајније параметре попут електричне проводљивости, рН вредности, садржаја ОМ, органског С, полифенола као и садржаја нутријената и тешких метала. Уочили су да се ова врста отпада одликује ниском рН вредношћу ( 3,8 – 6,8), високим садржајем ОМ (669,0 – 920,0  $g/kg$ ), садржајем К (11,9 – 72,8  $g/kg$ ) и Р ( 0,5 – 23,6  $g/kg$ ) као и ниским садржајем микро елемената и тешких метала. Указали су да, и поред низа позитивних



својстава, због присуства полифенола, који имају фитотоксично и антимикробно дејство, неопходан је третман – компостирање пре даље употребе у пољопривреди.

С обзиром се ООИВ генерише у великим количинама и да се одбацује у већини случајева без третмана, група истраживача предвођена Bustamanete -ом је спровела испитивање о утицају различитих продуката, попут огроздине, комине, талога и ООИВ који се издваја након процеса дестилације на различите типове земљишта [93]. Утврдили су да додавање посматраног отпада није имало велики утицај на промену рН вредности земљишта због присуства кречњака, али да је дошло до повећање салинитета. Праћењем минерализације органског С уочили су да код земљишта са ниским садржајем глине долази до веће минерализације у случају када је присуство растворљивих једињења из отпада високо. Са аспекта минерализације N, показали су да на његову минерализацију имају утицај особине отпада, и то садржај полифенола, однос C/N као и почетни садржај N. Закључили су да додавањем ове врсте отпада у земљишту доприноси минерализацији С и имобилизације N (посебно у случају када се примењује огроздина), што је непожељно.

Nóvoa-Muñoz и сарадници истраживали су могућност употребе отпада из винске индустрије и отпадног перлита на киселим земљиштима, као и њихов утицај на раст биљне врсте - *Lolium multiflorum* [94]. Утврђено је да се отпадни перлит одликује високим садржајем С (214,0 g/kg), N (25,0 g/kg), P (534,0 mg/kg) и K (106,0 g/kg), као и да повећава рН вредност земљишта за две јединице. Са аспекта раста биљне врсте *Lolium multiflorum*, показано је да додавање отпадног перлита у количини од 2,5 g/kg земљишта позитивно утиче на раст биљке.

Moldes је анализирао вински талог који се издваја након филтрирања вина, при чему је испитивала параметре као што су однос C/N, рН вредност и садржај нутријената, како би оценила утицај директног одлагања овог отпада на земљиште [95]. Поред хемијске анализе, спровела је и биолошки тест клијавости ради процене утицаја талога на развој корена биљака. Резултати су показали да се талог одликује високим односом C/N (23,0), као и високим садржајем нутријената – нарочито P (2520,0 mg/kg), K (36.738,0 mg/kg) и Mg (462,0 mg/kg) – док има ниску рН вредност (3,9). На основу теста клијавости утврдила је да директно одлагање винског талога на земљиште има штетан ефекат, јер није дошло до клијања семена.

### 3.2 Компостирање ООИВ

Како је огроздина компонента која се издваја на почетку процеса справљања вина, а уједно се и прва одлаже, Vertran је са сарадницима испитивао утицај присуства огроздине у



мешавини са муљем из отпадних вода. Циљ истраживања је био да се утврди њихов оптимални однос мешања и утицај величине честице огроздине на физичко-хемијске параметре процеса [96]. Пратили су два односа мешања, 1:1 и 1:2 (муљ : огроздина) у случају када су огроздине уситњене и када нису. Утврдили су да је њихов оптимални однос мешања 1:2 (муљ: огроздина) у случају када је огроздина уситњена и када није. Показали су и да присуство огроздине доприноси постизању виших температура због постојања порозности у мешавини. Такође су утврдили да уситњавањем огроздине долази до боље хомогенизације мешавине што као резултат има мање губитке N и постизања оптималног односа C/N на крају процеса.

Убрзо затим је Bustamante са сарадницима проучавао утицај високог удела огроздине (од 63,0 %) при ко-компостирању са ко-супстратима: коmine, талога, ООИВ која се издваја након дестилације, канализационог муља и отпада из шећеране [36]. Анализом добијених резултата утврдили су да због високог удела огроздине у мешавини у чијем саставу улазе полифенолана једињења, измерене вредности температуре нису прелазиле 45 °C. Закључили су да је појава више температурних пикова је резултат инхибиције микроорганизама. Такође су показали да присуство киселих компоненти попут коmine и других врста ООИВ чије је рН < 6,0 огроздине (због полифенола) утиче на развој термофилних микроорганизама.

Слично истраживање је спровео Marhuenda-Egea са сарадницима а пртили су утицај присуства огроздине при уделу од 63,0 %. Посматрали су процес ко-компостирања мешавина у чији састав улази огроздина и ко-супстрати и мешавине без огроздине [97]. Ко-супстрати који су коришћени у истраживању су комина, ООИВ која се издваја након дестилације, крављи (КЕ) и живински екскременти (ЖЕ), а пртили су промене физичко-хемијских параметара. Закључили су да присуство огроздине од 63,0 % у мешавини има позитиван утицај на пораст температуре на почетку процеса. Температура је постигла 40 °C, али да у даљем току процеса има негативан ефекат што се огледа кроз кратко трајање термофилне фазе и појаву пикова температуре. Такође су утврдили да мешавине без огроздина постижу више температуре и дуже трајање термофилне фазе.

Како су већ раније утврдили да огроздина има негативан утицај на процес ко-компостирања, да би постигли више температуре и да продуже време трајања термофилне фазе Bustamante са сарадницима је у даљем кораку спровео слично истраживање у коме су пртили утицај додавања отпада из шећеране у мешавину са огроздинима. Пратили су две мешавине, прву у чијем саставу је улазила комина, огроздина и ко-супстрати и другу при истом саставу



само уз додатак отпада из шећеране [98]. Утврдили су да високи удео огроздина у мешавинама, од 63,0 % је имао позитиван утицај на почетку процеса јер су постигнуте температуре биле веће од 40 °С. Такође су утврдили да у даљем току процеса је дошло до пада температуре и појаве више пикова због антимицоробног дејства огроздине. У случају мешавине када је додат отпад из шећеране, утврђено је да је постигнуто више температурних пикова који одговарају термофилној фази али да температуре нису постигле вредности које одговарају горњој граници термофилне фазе.

Fernandez са сарадницима је испитивао утицај присуства огроздине на разградњу угљеника током процеса ко-компостирања са ООИВ која се издваја након дестилације [99]. Утврдили су је да присуство огроздине у мешавини, у уделу од 75,0 %, доприноси постизању виших температура и дужем трајању термофилне фазе, као и већем степену разградње угљеника. Ови ефекти се приписују већој порозности масе и остваривању повољних почетних услова, пре свега оптималном односу угљеника према азоту који је на почетку процеса био 30,0 и рН вредности од 7,1.

Убрзо након претходног истраживања Fernandez је 2010. године пратио утицај присуства огроздине на физичко-хемијске параметре при ко-компостирању са ООИВ која се издваја након дестилације и муља који се издваја из постројења за пречишћавање воде из винарије [100]. Утврдио је да присуство огроздине са уделом од 60,0 % доприноси порозности мешавине и постизању високих вредности температуре на почетку процеса. Такође је утврдио да је дужина трајања условљена почетним односом C/N (термофилна фаза је дуже трајала у случају када је вредност односа C/N била у оптималном опсегу на почетку процеса). Утврдио је и да одсуство порозности мешавине доводи до појаве анаеробних услова, што условљава дуго трајање киселе фазе.

Semitela је са сарадницима испитивала утицај огроздине при ко-компостирању са муљем који потиче из постројења за прераду грозђа [101]. Процес је праћен осам недеља, а извођен је у лабораторијским условима при чему је температура у реактору одржавана на 34 °С. Утврдили су при односу мешања 1:1 (тежински), да се микробна маса присутна у отпадном муљу аклиматизовала на присуство фенола у огроздини што је као резултат имало да се цео процес одвија у мезофилним условима. Такође, као и код осталих истраживања која прате утицај огроздине на процес ко-компостирања, су показали да фенолна једињења која су присутна инхибирају промену температуре, пре свега појаву термофилне фазе.



С обзиром да се ООИВ одликује лигноцелулозном структуром, прво забележено истраживање о степена разградње лигнина, целулозе и хемицелулозе при компостирању пулпе из ООИВ спроведено је 1990. године од стране Faure -а [102]. На основу резултата праћења процеса компостирања у периоду од 12 дана, закључио је да је дошло до разградње лигноцелулозних компоненти које се налазе у пулпи, целулозе за 13,5 % и хемицелулозе 25,0 %, док до разградње лигнина није дошло. Такође је закључио да присуство лигнина у пулпи ограничава разградњу целулозе и хемицелулозе.

Убрзо након првог истраживања Faure са сарадницима је испитивао степен разградње лигноцелулозних компоненти из пулпе при компостирању пулпе од комине уз инокулацију микроорганизмима како би поспешио разградњу [103]. Утврдили су да није дошло до додатне разградње лигноцелулозних компоненти због присуства довољне количине већ постојећих микроорганизама који су присутни у пулпи помоћу којих је постигнут оптимални степен разградње, а што се огледа кроз вредност односа C/N који је на крају процеса био мањи од 20,0, и рН већа од 9,0.

Како је ООИВ састављен од огроздине, покожица, семенки и малог дела пулпе експеримент спроведен од стране Moldes са сарадницима је пратио степен разградње лигноцелулозних компоненти и промену физичко - хемијских параметара у току процеса компостирања различитих мешавина у чији састав улазе поједине компоненте ООИВ [42]. Процес је праћен 60 дана, а одвијао се у мезофилним условима. Посматране су три мешавине у чији састав улазе (1) покожице, семенке и огроздина; (2) покожица и семенке; и (3) самлевене семенке (пире од семенки). Утврдили су да је дошло до разградње целулозе за 45,0 %, хемицелулозе за 65,0 % док је садржај лигнина порастао за 16,0 % што су повезали са повећањем концентрације других једињења. Са аспекта физичко-хемијских параметра, показали су да је могуће спровести процес компостирања при ниској почетној рН вредности од 3,8, што је у теоријском опсегу за почетак (од 3,0 до 11,0), а да при том на крају процеса буде у оптималном опсегу од 7,5 до 8,5. Такође су утврдили да нема већих разлика у разградњи лигноцелулозних компоненти и физичко-хемијских параметра, када у састав улазе огроздина или не јер је у оба случаја односа C/N био 14,0.

Pardelo је са сарадницима пратио степен разградње лигноцелулозних компоненти хидролизованог ООИВ (ХООИВ) и талога уз додатак  $CaCO_3$  ради регулисања рН вредности у току процеса компостирања [104]. Пратио је две различите мешавине, прву у чији састав улази само ХООИВ, док у другој поред ХООИВ је присутан и талог при односу мешања 1:1. Утврдио



је да долази до разградње целулозе и хемицелулозе током првих неколико месеци процеса док до разградње лигнина при самосталном компостирању ХООИВ није дошло, што се огледа кроз висок односа C/N на крају процеса који је износио 28,0.

Како процес компостирања ООИВ трају дуго, Zhang је испитивао степен разградње лигноцелулозних компоненти применом двостепеног ко-компостирања 3О уз додатак (влакана) од шећерне трске и ООИВ која се издваја након дестилације [105]. Приликом формирања мешавина, како би постигао оптимални односа C/N, коришћена је уреа, а како би се интензивирао процес вршена је инокулација микроорганизмима при чему је у прелазним фазама ко-компостирања додавано сирће од бамбуса. Са аспекта карактеристика степена разградње лигноцелулозних компоненти, утврђено је да применом овог начина ко-компостирања долази до њихове декомпозиције. Удео лигноцелулозних компоненти на крају процеса се кретао у опсегу: лигнин од 42,4 % до 71,1 %, од целулоза 2,2 % до 35,9 % и хемицелулоза од 1,5 % до 28,8 %, док је праћењем односа целулозе према лигнину, који је још један параметар квалитета компоста, показано да се у појединим мешавинама налази у оптималном опсегу за крај процеса, мање од 0,5. Такође, показао је да се применом двостепеног ко-компостирања може скратити период трајања процеса са 90 на 21 дан, а при том да се добије стабилан продукт.

Како је указано да ООИВ има негативне ефекте на земљиште уколико се одложи без третмана Diaz је испитивао могућност примене процеса ко-компостирања комине и течне фракције (Тф) која се добија након прераде шећерне трске уз додатак креча ради регулисања рН вредности [106]. Мешавина коју је посматрао је садржала 17,0 % ТФ, 82,0 % комине и 1,0 % креча. На основу спроведених анализа утврдио је да је одабрани однос мешања полазних компоненти представља оптималан састав, што је потврдио кроз особине добијеног финалног продукта. Добијени компост имао је садржај органске материје од 50,0 %, однос C/N од 11,9, рН вредност од 8,3, као и садржај основних нутријената: N (2,1 %), K (1,3 %) и P (0,7 %)

Ferreг је пратио ко-компостирање више мешавина у чији састав улази ООИВ и 10,0 % ЖЕ при различитим режимима аерације са циљем да утврди утицај аерације на ток процеса као и да се испитају карактеристике добијеног компоста кроз параметре попут односа C/N и рН вредности [107]. Утврђено је да је одсуство аерације у мешавини имало утицај на процес, што се огледа у недовољној промени рН вредности која је на крају била ниска, рН < 5,0, док у осталим мешавинама где је постојала аерација, рН вредност је достигла вредност, рН > 8,0, што је карактеристика доброг крајњег продукта. Такође је утврђено да и поред недовољног



смањења садржаја С од 19,0 % до 27,0 % је могуће постићи оптимални односа С/Н због великог повећања садржаја N од 24,0 % до 40,0 %.

Díaz је са сарадницима такође испитивао могућност ко-компостирања комине и Тф која се добија након прераде шећерне трске у контролисаним условима при температури од 55 °C [108]. У мешавину је додавао различите уделе отпада из шећеране од 0,0 % до 40,0 % како би утврдио њихов оптимални однос. Утврдио је да са повећањем удела Тф у мешавини долази до већег губитка ОМ и N, али да је већа разгрдања при нижим уделима, од 10,0 % до 20,0 %.

Díaz је у следећем кораку испитивања применио математички модел како би одредио оптимални однос мешања комине и отпада из шећеране због високог удела N, са циљем да утврди најбољи однос мешања и услове за одвијање процеса [109]. Утврђено је да је најбољи однос мешања 80:20 (комина : отпад из шећеране) а да се након 20 до 35 дана процеса добија компост који задовољава услове зрелости компоста при чему су задовољени физичко-хемијски параметри, односа С/Н је износио 21,7 а рН вредност је била 8,5 што је карактеристично за крај процеса.

Истраживање спроведено 2008. године од стране Marhuenda - Egea је пратило процес ко-компостирања винског отпада из дестилерија и отпада који настаје након справљања сока од наранџе са циљем да утврди утицај корекције рН вредности. Праћене су две мешавине при чему је у једној додат СаО ради корекције рН вредности [110]. Утврдио је да су постигнуте више температуре и да је термофилна фаза дуже трајала у случају мешавине где је извршена корекција почетне рН вредности на 5,0.

Pardelo је са сарадницима испитивао утицај почетних параметара добијених применом математичке методе за оптимизацију процеса - методе одзиваних површина на процес ко-компостирања хидролизованог ООИВ (ХООИВ) и талога уз додаток СаСО<sub>3</sub> ради регулисања рН вредности [111]. Утврдио је да додавањем калцијум карбоната је могуће регулисати рН вредности на почетку процеса чиме се постиже оптимална вредност уз додавање 5 g СаСО<sub>3</sub> на 100 g ХООИВ при мешању ХООИВ са талогом у односу 1:1 . Такође, указао је да применом ове методе не може добити тачна веза између параметара на почетку и на крају процеса. Са аспекта параметара које су посматрали, мешавине које су имале оптимални односа С/Н на почетку процеса су на крају третмана такође имале однос С/Н који одговара финалним вредностима, < 20,0, рН вредност која је на почетку подешена је на крају била између 7,1 и 8,1 што одговара финалном продукту. Запазили су и да долази до смањења садржаја Р због везивања за карбонате.



Како је ООИВ широко заступљен, Вург са сарадницима је испитивао могућност компостирања мешавине у чији састав улазе различити удели ООИВ, биљног отпада, дрвне сечке и животињских екскремената [112]. Утврђено је да на динамику процеса утичу удели посматраних отпада и то да при високим уделима дрвне сечке и ООИВ се обезбеђује довољно количина кисеоника за несметано одвијање процеса. Такође, показано је да се при нижим уделима ООИВ у мешавинама постиже виша температура 64,1 °C и 55,3 °C, што задовољава стандарде за даљу употребу добијеног компоста.

Torres - Climent са сарадницима [113] је спровела истраживање са циљем да испита утицај различитих ко-супстрата на физичко-хемијске параметре приликом ко-компостирања комине и ООИВ која настаје након дестилације. Током истраживања пратили су три различите мешавине, прва у чији састав улази ООИВ који настаје након дестилације и КЕ, друга у чији састав улази комина и ООИВ и трећа која се састоји од комине и ЖЕ. Однос мешања је био 70:30 у свим посматраним мешавинама. Утврђено је да је при посматраном односу мешања у свим мешавинама дошло до побољшања почетне рН вредности, већа од 7,0. Такође је утврђено да при ко-компостирању комине и КЕ долази до постизања највиших температура због присуства лакоразградивих компоненти у комини. Утврђено је и да присуство ЖЕ у мешавини има за последицу постизање никог односа C/N на крају процеса, 13,5, што чини овај параметар недовољно добрим за оцену зрелости компоста.

Hungria са сарадницима је испитивао могућност ко-компостирања ООИВ и органске фракције комуналног отпада (ОФКО) [114]. Истраживао је које су предности и недостаци при ко-компостирању, а пратио је два различита односа мешања 50:50 и 60:40 при трајању процеса од 21 дан. Утврдили су је да са повећањем удела ОФКО долази до смањења биодегарабилности мешавине, па је оптимални однос мешања 50:50. Такође утврдили су да присуство ОФКО доприноси побољшању физичко-хемијских параметара ООИВ, као и да ко-компостирањем се постиже смањење емисија штетних гасова. Показали су и да иако је процес праћен 21 дан, могуће је постићи одговарајући односа C/N, 11,6, оптималну рН вредност, 8,3 што одговара вредностима за крај процеса као и смањењу масе за 26,1 %.

### 3.3 Својства и примена добијеног компоста

С обзиром да је један од циљева процеса компостирања примена добијеног продукта – компоста, велики број истраживања је испитивао особине добијеног компоста. Параметри који су праћени су садржај ОМ, садржај C, N, однос C/N као и рН вредност.



Параметре стабилности ООИВ које је настала након дестилације је пратио Bustamante са сарадницима [115]. Пратили су својства добијеног компоста након процеса ко-компостирања две различите мешавине, прву када у састав мешавине улази ООИВ која се издваја након дестилације и КЕ и друга мешавина која се састоји од ООИВ која се издваја након дестилације и ЖЕ. Утврдили су да је до веће минерализације ОМ дошло када је ко-супстрат КЕ и то са 88,5 % на почетку и 82,3 % на крају. Такође је показано да су највећи губици органске материје забележени код ЖЕ – са 82,0 % на почетку и 73,9 % на крају процеса – што су аутори повезали са присуством лако доступног С и већим садржајем азота. Утврдили су и да су рН вредности добијена на крају процеса код обе мешавине у оптималном опсегу за крај процеса ко-компостирања и износиле су 7,4 и 8,1. Такође су показали да је могуће добити оптимални однос С/Н на крају, који је износио 15,5 и 10,5. Поред претходног утврдили су да је дошло до већег издвајања  $NH_3$  на почетку процеса када је ко-супстрат ЖЕ што су повезали са високим садржајем N у ЖЕ који се лако минерализује. Показали су и да је дошло до разградње полифенолних једињења чиме се елиминише фитотоксичан ефекат компоста.

С обзиром да стабилност компоста дефинишу се различите групе параметара, Martinez Salgado са сарадницима је пратила хемијске, биохемијске, микробиолошке и фитотоксичне параметре [116]. Пратили су процес ко-компостирања 10 различитих мешавина и особине добијеног компоста. Поред ООИВ користили су локално доступне ко-супстрате попут коњских и козијих екскремената, остатака резидбе и овсена слама. Утврдили су да се на крају процеса рН вредност кретала од 7,1 до 10,2, однос С/Н од 7,4 до 17,5, садржај амонијум јона од 23,8 до 395,1  $mg/kg$  док је садржај нитратних јона био од 19,4 до 437,4  $mg/kg$  а њихов однос од 0,3 до 20,3. Такође, на основу добијених вредности су показали да у већини случајева су задовољени стандарди по питању граничних параметра, једино је садржај нитратних јона био виши, с обзиром да је највиша концентрација за зрео компост 50,0  $mg/kg$ .

Истраживање спроведено од стране Bustamante-а са сарадницима је пратило утицај примењеног компоста на принос и производњу биомасе две врсте компоста добијених компостирањем: ООИВ и КЕ и ООИВ и ЖЕ [117]. Количине компоста које су додавали у земљиште износиле су 45  $t/ha$  у првом случају и 90  $t/ha$  у другом случају, при том је додаван и азот, и то 78 и 111  $kg$  азота/ $ha$  за случај када су ко-супстрати КЕ и 157 и 222  $kg$  N/ $ha$  за случај када је ко-супстрат ЖЕ. Утврдили су да је пораст биљке при највишим количинама примене компоста износио 41,3 % и 21,8 % у случају када је ко-супстрат КЕ. Такође, утврдили да су применом највиших количина компоста је могуће задовољити нутритивне потребе биљака чиме би дошло до значајно мање употребе минералних ђубрива.



Могућност употребе компоста као супстрата за биљке уместо тресета испитивао је Bustamante са сарадницима [118]. У истраживању је праћено девет различитих мешавина: прву је чинио само тресет, другу и трећу искључиво компост, док је у преосталих шест мешавина компост био заступљен у запреминским уделима од 25,0 %, 50,0 % и 75,0 %, а остатак је чинио тресет. Утврдили су да присуство компоста са 25,0 % и 50,0 % запремински у мешавини са тресетом доприноси развоју посматраних биљних врста, што омогућава рециклажу ове врсте отпада.

Могућност примене добијеног компоста у виноградима истраживао је Bustamante са сарадницима [119]. Приликом истраживања користили су четири врсте компоста добијеног из продуката индустрије вина као и компост добијен од овчијих екскремената, а утицај присуства компоста на земљиште посматрали су три сезоне. Утврдили су да примена компоста доприноси активацији микроорганизама у земљиште што представља последицу повраћања садржаја ОМ. Такође, утврдили су да је дошло до стварања услова који омогућавају већу дугорочну доступност N, посебно од компоста који је добијен компостирањем огроздина, комине, истрошене ООИВ, муља и талоба. Указали су да применом ове врсте компоста долази до ослобађања неорганског азота чије су количине у равнотежи са потребама винове лозе чиме се смањује уношење вишка неорганског N.

Како би се испитала могућа употреба компоста од комине и огроздина Carmona са сарадницима је спровела истраживање где је пратила понашање различитих биљних врста и то: зелене салате, парадајза, бибера и диње, уколико би се компост користио као компонента која се користи за узгој расада [120]. Праћене су четири различите мешавине компоста и тресета. Прва мешавина била је сачињена само од компоста који је добијен од комине и огроздине, друга само од тресета, а трећа и четврта од мешавина компоста и тресета при односу мешања 1:1 и 1:2. Утврдили су да компост добијен од комине и огроздине не поседује фитотоскичност, а такође не долази до имобилизације N. Међутим, указали су да физичке особине које поседује компост у виду отежаног задржавања воде представља ограничавајући параметар за његову самосталну примену па је неопходно мешање са тресетом.

Са циљем да утврде утицај на животну средину који настаје применом компоста добијеног од ООИВ, Requero са сарадницима је спровео истраживање где је пратио испирање азота које се јавља при наводњавању земљишта у које је додаван компост од ООИВ [121]. Приликом испитивања пратио је два режима наводњавања, а праћени су и различити параметри који се односе на квалитет подземних вода. Утврдили су да додавањем компоста не утиче на испирање азота при прилагођеним режимима наводњавања, док при вишим



режимима долази до појаве испирања. Такође, утврдили су да се додавањем  $13 \text{ t/ha}$  компоста уз одговарајући режим наводњавања постиже максимални принос а при чему су концентрације амонијака у подземниом водама у дозвољеним границама.

Bolechowski је пратио примену компоста који је добијен од ООИВ и различитих ко-супстрата. У првом случају ко-супстрат је биоотпад од цитруса, у другом отпад од парадајза и у трећем од животињских екскрементата. Компост је коришћен за испитивања могућности његове примене као медијума за узгој тимијана ради добијања етеричних уља. Приликом испитивања, компост је мешан са тресетно-перлитном мешавином при чему је мењан удео компоста у мешавини од  $0,0 \%$ ,  $25,0 \%$  и  $50,0 \%$  запремински а праћене су физичко-хемијска својства супстрата. Утврдили су да најбољу мешавину компоста и ко-супстрата дају ко-супстрати цитрус и животињски екскременти. Показали су да када је ко-супстрат цитрус долази до повећања садржаја испарљивих компоненти на  $34,6 \text{ g/kg}$  при уделу компоста у мешавини од  $50,0 \%$ , а у случају када су ко-супстрат животињски екскременти садржај испарљивих компоненти је био виши и износио је  $37,6 \text{ g/kg}$  при уделу компоста у мешавини од  $25,0 \%$ . Овај пораст садржаја испарљивих компоненти пратили су у односу на контролну мешавину која је сачињена само од тресета-перлита где је садржај испарљивих компоненти био  $29,6 \text{ g/kg}$  [122].



## 4 МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

У овом поглављу су приказани примењени материјали и методе који су коришћени приликом спровођења истраживања у оквиру докторске дисертације. Како је у овом поглављу разматрано и теоријско и експериментално истраживање, онда је исто подељено у више делова.

У првом делу поглавља је дат приказ сировина које се могу користити за биолошки третман отпада компостирањем. Посматране су доступне количине и њихове карактеристике, са посебним акцентом на ООИВ. На овај начин формирана је база доступних врста ОО на територији РС.

Имајући у виду да наведене сировине имају различит састав и да је познато да се неке врсте не могу самостално компостирати, неопходно је извршити мешање компоненти (ко-компостирање) како би се постигли услови за почетак процеса. За те потребе развијен је математички модел који има за циљ одређивање састава мешавина за почетак процеса. Приликом развијања математичког модела примењена је вишекритеријумска оптимизација уз постављање одређених критеријума и граничних услова, а поступак је описан у другом делу овог поглавља.

Трећи део овог поглавља представља опис примењених аналитичких метода које су коришћене у експерименталном делу истраживања. Аналитичке методе су спроведене у акредитованим лабораторијама према прописаним стандардима.

### 4.1 Сировине за процес компостирања

Органски отпад представља посебну фракцију укупно генерисаног отпада који настаје након употребе биљних и животињских производа у току људских активности.

Ова врста отпада се може класификовати на више начина, а једна од подела је према месту настанка: ОО из индустрије, ОО пољопривредног порекла и ОФКО.

Како је тема ове докторске дисертације испитивање могућности компостирања ООИВ, у истраживање су укључене и друге врсте ОО које се на територији РС јављају у значајним количинама и за које се до сада нису нашли адекватни третмани за прераду. Ту се пре свега

мисли на отпад из пољопривреде, односно, отпадну биомасу из ратарства и сточарства (животињски екскременти) као и ОФКО. Код отпадне биомасе, у разматрање су узети остаци након жетве: пшенична слама (ПС) и кукурузна силажа (КС), а од животињских екскремената живински (ЖЕ), крављи (КС) и свињски екскременте (СЕ). Код ОФКО изабрани су остаци хране (ОХ) и зелени отпад (ЗО), слика 4.1.



Слика 4.1 Структура ОО која је узета у разматрање

Доступне количине, распрострањеност и карактеристике које су од великог значаја за процес, за сваку врсту појединачно, са посебним освртом на ООИВ као главне компоненте, описане су у даљем тексту.

#### 4.1.1 Потенцијали ОО на територији РС

Као неопходни корак за примену процеса компостирања, неопходно је сагледати потенцијале ОО који су доступни на територији РС. У даљем тексту су приказани потенцијали, процес настајања и карактеристике ОО који је узет у разматрање ове докторске дисертације, према месту настајања.



#### 4.1.1.1 Пољопривредни отпад

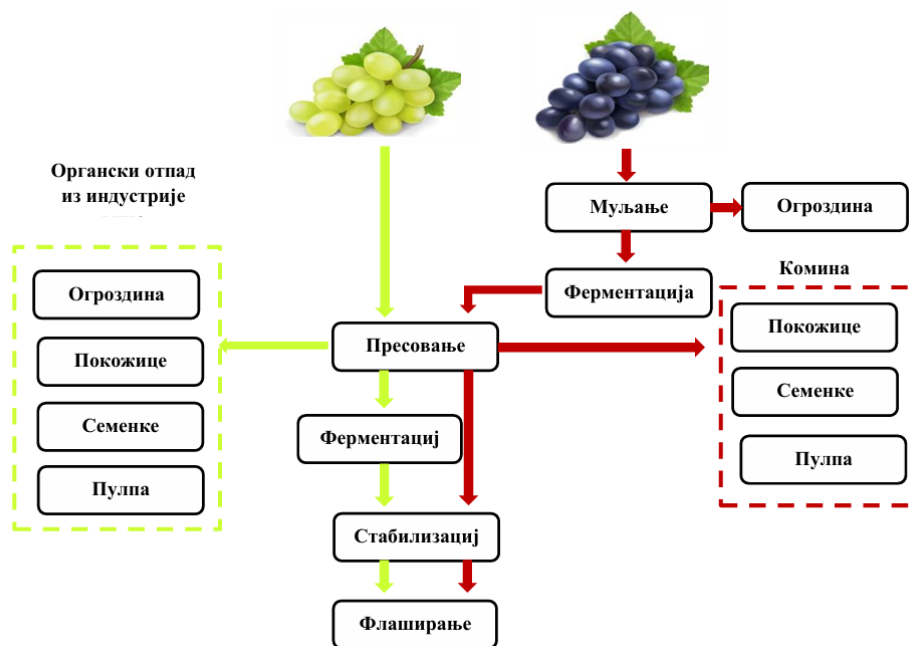
##### Комина грозђа

Виноградарство представља веома важну пољопривредну грану која је у порасту. У РС ова пољопривредна грана је у значајној мери заступљена, а обухвата газдинства у оквиру којих се налазе површине под виноградима, које у свом саставу могу да имају и винарије. На територији РС се налазе три велика виноградска региона: регион Централна Србија, регион Војводина као и регион Косово и Метохија. У оквиру ова три региона налазе се 22 рејона са 77 виногорја и више виноградарских оаза [123].

Према подацима пописа пољопривреде из 2023. године, укупна површина која се налази под виноградима је око 18201,17 ha [124]. Највеће површине под виноградима се налазе на територији Централне Србије, око 14127,2 ha, док је на територији Војводине, око 4073,97 ha. Просечан принос грозђа је око 7,2 t/ha [125].

Највећи проценат (око 70 %) чине винске сорте винове лозе чије грозђе је намењено производњи вина. Ток одвијања процеса прераде грозђа је доста сложен, а зависи од врсте грозђа и квалитета вина које се жели добити на крају процеса (слика 4.2). Огроздина се уклања на почетку процеса, али се може оставити у одређеној количини у зависности о жељеног квалитета вина. Процес добијања црвеног вина је сложенији, јер се екстраховани грозђани сок (шира), који се издвоји, ферментише заједно са покожицама, семенкама и пулпом због постизања одређених особина вина, а време трајања ферментације је променљиво и може бити од неколико сати па до неколико недеља. Поступак добијања белог вина, је једноставнији, јер се све компоненте грозђа одвајају на почетку процеса, а добијени грозђани сок се сам ферментише [126] [127].

Током процеса прераде грозђа у бело или црвено вино долази до стварања нуспродуката, који се једним именом назива ООИВ. Удео ООИВ у укупној количини грозђа је од 15,0 % до 25,0 % [116]. Огроздина, у већини случајева се посматра као засебна компонента, а у ООИВ се налазе са око 25,0 % учешћа [128].



Слика 4.2 Шематски приказ процеса прераде грозђа [126] [129]

На основу површина под виноградима, просечног приноса и уделу ООИВ која се издваја након прераде грозђа, одређене су количине ООИВ за сваки рејон у РС, табела 4.1.

Табела 4.1 Потенцијална количина ООИВ на територији РС по рејонима [123]

| Рејон               | Површина [ha]   | Принос грозђа [t] | Количина ООИВ [t] |
|---------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Суботички           | 336,5           | 2 422,8           | 605,7             |
| Телечка             | 188,3           | 1 355,7           | 338,9             |
| Потиски             | 231,1           | 1 663,9           | 415,9             |
| Банатски            | 106,3           | 765,3             | 191,3             |
| Јужнобанатски       | 729,4           | 5215,6            | 1 303,9           |
| Бачки               | 107,9           | 776,8             | 194,2             |
| Сремски             | 1 535,9         | 1 1058,5          | 2 764,6           |
| Београдски          | 996,5           | 7 174,8           | 1 793,7           |
| Поцерско – ваљевски | 157,5           | 1134              | 283,5             |
| Шумадијски          | 1 403,2         | 10 103,1          | 2 525,7           |
| Млавски             | 846,8           | 6 096,9           | 1 524,2           |
| Неготинска крајина  | 1 036,1         | 7 459,9           | 1 864,9           |
| Књажевачки          | 1 044,1         | 7 517,5           | 1 879,4           |
| Три Мораве          | 5 239,5         | 37 724,4          | 9 431,1           |
| Чачанско–краљевачки | 69,8            | 502,5             | 125,6             |
| Нишки               | 948,9           | 6 832,1           | 1 708,1           |
| Нишавски            | 333,7           | 2 402,6           | 600,6             |
| Топлички            | 743,4           | 5 352,5           | 1 338,1           |
| Лесковачки          | 1 514,3         | 10 902,9          | 2 725,7           |
| Врањски             | 586,9           | 4 225,6           | 1 056,4           |
| <b>Укупно</b>       | <b>18 156,1</b> | <b>130 723,92</b> | <b>32 680,9</b>   |



Годишња количина ООИВ на територији РС износи 32680,9 t. Ова количина укључује све компоненте ООИВ које у њу улазе.

На основу табеле 4.1 се може видети да се на територији коју обухвата рејону Три Мораве генерише највећа количина ООИВ од 9431,1 t/god, а најмање у Чачанско-краљевачком рејону 125,6 t/god.

### Отпадна биомаса из ратарства

Отпадна биомаса у ратарству представља остатке који настају након жетве житарица (пшенице, кукуруза, јечма и сл.), а обухватају сламу и силажу. Према попису пољопривреде из 2023. године на територији РС се налази 3 239 373,53 хектара коришћеног обрадивог земљишта [130]. Структура пољопривредног земљишта је сачињена од ораница, башта, ливада, винограда, воћњака и окућница. Највеће учешће у структури пољопривредног земљишта имају површине под житима око 67,0 % (1694777,36 ha), од чега кукуруз са 50,0 % заступљености (846 769,98 ha) и пшеница са око 40,0 % (682 554,3 ha) [124]. Просечни принос остатака РС износи 3,5 t/ha, док КС 3,8 t/ha [131].

На основу површина које се налазе под житима и просечног приноса остатака који настају након жетве пшенице и кукуруза, одређене су количине биомасе која се генерише на годишњем нивоу за сваки регион у РС, табела 4.2.

Табела 4.2. Количина потенцијалне биомасе у РС [124]

| Регион                           | Пшеница          |                               | Кукуруз          |                               |
|----------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
|                                  | Површина [ha]    | Годишња продукција ПС [t/год] | Површина [ha]    | Годишња продукција КС [t/год] |
| Београдски регион                | 32 418,6         | 113 465,1                     | 34 578,6         | 131 398,9                     |
| Регион Војводине                 | 373 177,4        | 1 306 120,9                   | 472 453,1        | 1 795 321,7                   |
| Регион Шумадије и Западне Србије | 144 604,3        | 506 115,0                     | 198 700,1        | 755 060,4                     |
| Регион Јужне и Источне Србије    | 132 353,9        | 463 238,8                     | 141 038,1        | 535 944,7                     |
| <b>Укупно</b>                    | <b>682 550,3</b> | <b>2 388 939,8</b>            | <b>846 769,9</b> | <b>3 217 725,7</b>            |

Као што се види из табеле 4.2, количине ПС и КС које се генеришу на годишњем нивоу су велике, а како су доступне током целе године, узете су у разматрање као потенцијални ко-супстрати.

### Отпадна биомаса из сточарства

Сточарство представља једну од важнијих грана пољопривреде у РС. Сточарском производњом се бави око 61,7% пољопривредних газдинстава, а 89,0 % се бави живинском производњом [130]. Према подацима пописа пољопривреде из 2023. године број УГ је износио 4855873,0, од чега је 725408 говеда, 2263705,0 свиња и 21604693,0 живине [124].

На основу броја УГ, броја говеда, свиња и живине и на основу екскремената које оне генеришу, одређене су количине животињских екскремената које се генеришу на територији РС, табела 4.3.

Табела 4.3. Количина потенцијалних животињских екскремената

| Животињски екскременти | Број грла [хиљаде] | Количина екскремената по грлу [t/год/грло] | Укупна количина екскремената [t/год] |
|------------------------|--------------------|--|--------------------------------------|
| Краве                  | 725 408            | 19,8                                       | 14 363 078,4                         |
| Свиње                  | 2 263 705          | 1,4  | 3 169 187                            |
| Живина                 | 21 604 693         | 0.06                                       | 1 296 281,5                          |
| <b>Укупно</b>          | <b>22 593 806</b>  | <b>0,8</b>                                 | <b>18 828 546,9</b>                  |

Као што се види из табеле 4.3, количине животињских екскремената које се генеришу на годишњем нивоу су велике, а како су доступне током целе године, узети су у разматрање као потенцијални ко-супстрати.

#### 4.1.1.2 Органска фракција комуналног отпада

На територији РС количина комуналног отпада који се генерише износи 3,07 милиона тона, што представља око 1,26 кг по становнику дневно [132]. Највећи удео у комуналном отпаду чини ОФКО, 45,6 % просечно за целу РС, који чине ЗО, 14,5 % и ОХ, 31,1 % [133].

У табели 4.4 су приказане количине ОФКО, које су добијене на основу броја становника према попису из 2022. године и количине ЗО и ОХ који се генерише по становнику [134].

Табела 4.4 Потенцијали ОФКО на територији РС

| Органска фракција КО | Број становника [хиљаде] | Количина отпада по становнику [t год/ст] | Укупна количина отпада [t/год] |
|----------------------|--------------------------|--|--------------------------------|
| Зелени отпад         | 6 647 003                | 0,03                                     | 202 988,4                      |
| Остаци хране         | 6 647 003                | 0,06                                     | 435 375,1                      |
| <b>Укупно</b>        | <b>13 294 006</b>        | <b>0,05</b>                              | <b>638 363,1</b>               |

На основу приказаних количина у табели 4.4 запажа се да је ОФКО широко заступљена и да је присутна у великом количинама, што је чини погодном за разматрање као потенцијалног ко-супстрата за процес компостирања.



#### 4.1.2 Карактеристике потенцијалних ко-супстрата

У овом под поглављу су приказане карактеристике изабраних врста ОО које су важне за почетак и даљи ток процеса компостирања као што су однос C/N, рН вредност, садржај воде и ОМ као и нутријената и лигноцелулозних материја у укупној маси (УМ) материјала.

##### 4.1.2.1 Карактеристике ООИВ

Код ООИВ сагледане су њене карактеристике као јединствене целине, а такође и њених делова: комине (Ко) и огроздине (Ог). Посматране особине су приказане у табели 4.5.

Табела 4.5 Карактеристике ООИВ [92] [93] [96] [99] [100] [105] [108] [112] [114] [115] [122] [135] [136] [137] [138] [139] [140]

| Компонента<br>Карактеристика | ООИВ        | Ко          | Ог          |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| C/N                          | 9,5 – 53,0  | 18,2 – 28,1 | 21,0 – 48,6 |
| рН вредност                  | 1,0 – 7,3   | 3,8 – 4,4   | 3,9 – 9,5   |
| Садржај воде [%]             | 49,5 – 73,5 | 43,1 – 72,2 | 10,8 – 68,9 |
| ОМ [%]                       | 84,5 – 94,2 | 87,3 – 94,7 | 87,9 – 94,7 |
| Р [g/kg]                     | 0,7 – 4,2   | 0,6 – 3,2   | 0,5 – 1,3   |
| К [g/kg]                     | 5,6 – 17,7  | 10,5 – 37,9 | 22,5 – 41,6 |
| Лигнин [%]                   | 34,3        | 11,0        | 29,7        |
| Целулоза [%]                 | 20,9        | 54,0        | 21,6        |
| Хемицелулоза [%]             | 13,3        | 3,1 – 5,4   | 15,2        |

На основу табеле 4.5 се може видети да се и ООИВ и њене компоненте одликују променљивим односом C/N од 9,5 до 53,0 и рН вредношћу, која може да буде ниска (1,0 – 7,3) или оптимална за процес компостирања. Такође се из табеле види да су и ООИВ и његове компоненте богате ОМ и нутријентима, док садржај лигноцелулозних материја варира. Анализом појединачних параметара, посебно рН вредности, у случају комине (рН између 3,8 – 4,4) намеће се потреба за додавањем ко-супстрата са високом рН вредношћу чиме би се добила мешавина чија рН вредност је таква да може доћи до почетка процеса компостирања (ко-компостирања).

##### 4.1.2.2 Карактеристике отпадне биомасе из ратарства

Карактеристичне особине отпадне биомасе из ратарства, ПС и КС, попут односа C/N, рН вредности, садржаја воде, ОМ, Р и К као и садржаја лигноцелулозних компоненти (лигнина, целулозе и хемицелулозе) приказане су у табели 4.6.

Табела 4.6 Карактеристике отпадне биомасе

[40] [141] [142] [143] [144] [145] [146]

| Компонента<br>Карактеристика | ПС   | КС   |
|------------------------------|------|------|
| C/N                          | 88,8 | 83,3 |
| pH вредност                  | 7,1  | 3,8  |
| Садржај воде [%]             | 10,8 | 5,0  |
| ОМ [%]                       | 87,9 | 94,1 |
| P [g/kg]                     | 2,6  | 3,9  |
| K [g/kg]                     | 14,8 | 8,8  |
| Лигнин [%]                   | 9,5  | 17,5 |
| Целулоза [%]                 | 35,4 | 42,7 |
| Хемицелулоза [%]             | 31,4 | 23,2 |

На основу табеле 4.6 се може видети да се ПС и КС карактеришу високим о односом C/N као и високим садржајем лигноцелулозних компоненти и ОМ са ниским садржајем воде, што указује да их је немогуће саме компостирати, већ да их је могуће додавати другим супстратима како би се постигли оптимални услови за почетак и ток процеса.

#### 4.1.2.3 Карактеристике отпадне биомасе из сточарства

Основне физичко–хемијске карактеристике животињских екскремената које су карактеристичне за процес компостирања су приказане у табели 4.7.

Табела 4.7 Карактеристике животињских екскремената [147] [148] [149] [150] [151]

[152] [153] [154] [155] [156] [157]

| Компонента<br>Карактеристика | КЕ   | СЕ   | ЖЕ   |
|------------------------------|------|------|------|
| C/N                          | 16,6 | 16,3 | 8,7  |
| pH вредност                  | 7,9  | 8,2  | 8,1  |
| Садржај воде [%]             | 78,2 | 82,5 | 71,1 |
| ОМ [%]                       | 65,3 | 91,2 | 54,8 |
| P [g/kg]                     | 0,8  | 3,7  | 7,1  |
| K [g/kg]                     | 2,0  | 0,7  | 3,5  |
| Лигнин [%]                   | 13,5 | 0,9  | 2,3  |
| Целулоза [%]                 | 31,7 | 15,1 | 20,0 |
| Хемицелулоза [%]             | 16,7 | 19,9 | 23,2 |

Из табеле 4.7 се може видети да се сви животињски екскременти одликују ниским односом C/N, а високом pH вредношћу, што указује да је њих немогуће самостално компостирати, већ их је могуће применити комбиновањем са другим супстратима, чиме се могу постићи жељени параметри за компостирање.



#### 4.1.2.4 Карактеристике органске фракције комуналног отпада

У табели 4.8 приказане су основне физичко – хемијске карактеристике ОФКО које је потребно познавати током праћења процеса компостирања.

Табела 4.8 Карактеристике ОФКО [158] [159] [160] [161] [162] [163] [164]

| Компонента<br>Карактеристика | ОХ   | ЗО   |
|------------------------------|------|------|
| C/N                          | 18,4 | 14,1 |
| pH вредност                  | 6,7  | 6,6  |
| Садржај воде [%]             | 70,0 | 60,0 |
| ОМ [%]                       | 87,1 | 50,9 |
| P [g/kg]                     | 0,2  | 0,1  |
| K [g/kg]                     | 0,7  | 0,5  |
| Лигнин [%]                   | 12,0 | 36,2 |
| Целулоза [%]                 | 46,0 | 33,3 |
| Хемицелулоза [%]             | 0,1  | 24,3 |

На основу табеле 4.8 се може видети да се ОФКО карактерише ниским односом C/N и ниским садржајем лигноцелулозних компоненти, а високим садржајем ОМ и pH вредности, што указује да је ове компоненте могуће користити када је потребно повећати pH вредност или снижити однос C/N мешавине при компостирању.

## 4.2 Математичка оптимизација састава мешавина

Вишекритеријумска оптимизација (ВКО) је математичка дисциплина која се бави истовременом оптимизацијом више циљних функција (реалних циљева). Примена ВКО проистиче из сложености реалних проблема, који захтевају истовремено задовољење више различитих и конфликтних циљева, како би се постигла (пронашла) оптимална решења. Код моделирања биолошких процеса, ВКО омогућава одређивање састава мешавина уз примену великог броја критеријума уз учешће доносилаца одлуке.

Код ВКО, карактеристично је да се сви фактори (садржај угљеника, азота, pH вредност или лигноцелулозе) или исходи (састав мешавине) који утичу на процес посматрају као критеријуми чије би вредности након решавања проблема требало да буду оптималне. Решење проблема које се добија треба да буде најбоље међу свим допустивим решењима по неком изабраном додатном критеријуму.

Поступак решавања ВКО проблема се састоји из две фазе. Прва фаза обухвата решавање једнокритеријумских проблема. Њихова решења се називају маргиналним решењима. Од вредности функције у маргиналном решењу се формира идеална вредност вишекритеријумске



функције циља. Недостатак маргиналних решења је у томе што се остварују у различитим тачкама, тј. са различитим учешћем фактора у мешавини. То значи да не постоји савршено решење, а то је у овом случају, исти састав мешавине за који би сви критеријуми достигли своју оптималну вредност. Другу фазу обухвата изналажење оптималног решења ВКО. Увођењем концепта Парето оптималности, омогућава се да се добије јединствено (доминантно) решење уз услов да не постоји друго доминантно решење које би било боље по свим критеријумима. Због претходно наведеног, код ВКО проблема неопходно је да доносилац одлука постави своје преференције (eng. Preferences) са циљем да се изабере решење [165].

Код свих ВКО метода, поступак решавања проблема се састоји из неколико корака:

1. Корак који обухвата дефинисање проблема;
2. Корак који подразумева формирање критеријума, односно формирање минимизационих и максимизационих функција циља;
3. Корак који представља дефинисање граничних услова, област у коме се тражи оптимално решење;
4. Корак који значи избор и примену ВКО, а у складу са природом проблема и потребама доносиоца одлука.

#### 4.2.1 Методе за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације

До сада је развијен велики број метода ВКО, које се примењују у различитим контекстима. Основна одлика ових метода је да деле заједничке фазе и особине приликом процеса одлучивања, а основна разлика ових метода се огледа приликом избора алтернатива, дефинисања тежинских коефицијената и постављања критеријума.

Све методе ВКО, се могу поделити у три групе [166]:

1. *A posteriori metodi* који представљају приступ у ВКО где се доносилац одлуке (ДО) информисе о Парето - оптималним решењима математичког модела, а затим на основу анализе тих решења доноси коначну одлуку. У овим методама, улога математичког модела је да генерише скуп компромисних решења, док је улога ДО да процени ова решења у контексту својих преференција и приоритета.
2. *A priori metodi* су присутни у ВКО где се преференције ДО дефинишу пре самог процеса решавања математичког модела. У овим методама, информације о значају критеријума или њиховим приоритетима се интегришу у модел унапред, што омогућава да се коначна одлука донесе директно на основу решења које модел генерише.

3. **Интерактивни методи** у ВКО укључују активно учешће ДО, који иницијално дефинише своје преференције, а затим их током итеративног процеса прилагођава на основу добијених решења, све док се не постигне коначно задовољавајуће решење.

У табли 4.9 је дат приказ предности и недостатака најчешће коришћених ВКО метода.

**Табела 4.9** Предности и недостаци појединих ВКО метода [166]

| Метода                                 | Предности  | Недостаци  |
|--|--|--|
| Метода глобалног критеријума           | Јасна метрика оптималности.<br>Лака примена.                           | Зависи од нормализације критеријума и избора тежинских коефицијената.                |
| Метода тежинских коефицијената         | Једноставна примена. Омогућава прилагођавање преференцијама.           | Осетљива на избор тежина.<br>Фаворизација једног критеријума.                        |
| Метода са функцијом корисности         | Могућност квантификације задовољства доносиоца одлука.                 | Захтева прецизну дефиницију ф-је корисности. Сложена је примена за више критеријума. |
| Метода ограничења критеријума          | Јасно дефинисање прихватљивих граница. Једноставност за мале проблеме. | Игнорисање важних аспекта других критеријума.  |
| Лексикографска метода                  | Лако разумевање. Примена, одговара приоритетним проблемима.            | Нема могућности компромиса.<br>Занемаривање критеријума нижег приоритета.            |
| Релаксирани лексикографски метод       | Балансира приоритете и потребу за компромисима.                        | Сложенија примена у односу на класичну лексикографску методу.                        |
| Метод ограничења ( $\epsilon$ епсилон) | Јасно дефинисање дозвољеног простора решења.                           | Може значајно утицати на решење ако су границе постављене неадекватно.               |
| Метода растојања                       | Интуитиван приступ. Погодан за анализу компромиса.                     | Осетљива на избор метрике и нормализацију критеријума.                               |
| Метода PROMETHEE                       | Јасно рангирање алтернатива.<br>Укључује преференције корисника.       | Захтева детаљну дефиницију преференцијалних ф-је, сложеност за велике проблеме.      |
| Метода ELECTRE                         | Добра за сложене и конфликтне проблеме.                                | Сложена примена. Захтева детаљну анализу индекса.                                    |

Наведене методе у табели 4.8 се не могу сврстати у једну групу ВКО метода. Избор методе зависи од сложености проблема и међусобног конфликта дефинисаних критеријума. Уобичајено је да се проблем који је неопходно решити задаје у векторској форми, где се функције циљева и критеријуми дефинишу као компоненте вектора. Решење на крају се добија у облику скупа решења, а ДО бира оптимално. Приликом решавања ВКО задатака, исправност добијеног решења у великој мери зависи од јасне и прецизне дефиниције критеријума и њихових преференција у почетној фази задатка. Ово захтева детаљну анализу током постављања параметара и дефинисања преференција ДО, што је кључно за добијање оптималних решења.



#### 4.2.2 Метода глобалног критеријума

Метода глобалног критеријума је једна од најједноставнијих ВКО метода, која не захтева дефинисање преференција међу критеријумима. Поступак решавања се заснива на примени добијених идеалних вредности критеријума, који се користе за формирање помоћног једно критеријумског модела [166].

Први корак приликом примене методе глобалног критеријума обухвата изналажење идеалних решења. Односно, за сваки критеријум  $f_i(x)$  одређује се идеална вредност  $f_i^*$ , која представља најбољи могући резултат (максимална или минимална вредност) за тај критеријум у оквиру дефинисаног скупа алтернатива:

$$\max_{x \in X} f_i(x) = f_i(x_{i,\max}^*) = f_{i,\max}^* \quad (1 \leq i \leq p). \quad (4.1)$$

Други корак се односи на формулисање једнокритеријумског проблема, који обухвата решавање минимизационог проблема:

$$\min_{x \in X} G_r(x) = \sum_{i=1}^p \left( \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_{i,\max}^* - f_{i,\min}^*} \right)^r \quad (1 \leq r) \quad (4.2)$$

где су:

- $f_i(x)$  - остварена вредност критеријума  $i$ ,
- $f_i^*$  - идеална вредност критеријума  $i$ ,
- $p$  - укупан број критеријума,
- $r$  - параметар норме.

Решење проблема методом глобалног критеријума одређује се као минимална вредност придруженог једнокритеријумског модела. Ово решење представља алтернативу која минимизује збир нормализованих одступања остварених вредности критеријума од њихових идеалних вредности. Односно, решење проблема је Pareto оптимум ВКО над допустивим скупом  $X$ .

#### 4.2.3 Формулација задатака

На основу претходно описаног поступка за формирање математичког модела, поглавље 4.2, у првом кораку су изабране врсте ОО које ће улазити у састав мешавине. Врсте које су изабране су из сваке групе по једна: ОХ, ЖЕ, ПС и обе компоненте из ООИВ, и то, комина и



огроздине. Главна компонента је комина, док су остале компоненте додатне и присутне у виду ко-супстрата.

Приликом формирања математичког модела у обзир су узети параметри који директно утичу на процес компостирања и то садржај С, N, и лигнина, као и рН вредност.

Математички модел се састоји из следећих корака:

- Формирање критеријума, тј. функција;
- Постављање одговарајућих ограничења у виду граничних услова;
- Избор и примена одговарајуће методе оптимизације;
- Добијање оптималног решења.

#### 4.2.3.1 Формирање критеријума

Формирање критеријума тј. функција у математичком моделу извршено је на основу процентуално изражених садржаја: угљеника (С), азота (N), воде (V), рН вредности и лигнина (L) у изабраним ОО:

$$C(x) = \sum_{i=1}^n C_i x_i, \quad N(x) = \sum_{i=1}^n N_i x_i, \quad V(x) = \sum_{i=1}^n V_i x_i, \quad (4.3)$$

$$(pH)(x) = \sum_{i=1}^n (pH)_i x_i, \quad L(x) = \sum_{i=1}^n L_i x_i. \quad (4.4)$$

Параметар  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$  – представља удео врсте ОО у мешавини, при чему  $n = 4$  означава број врста ОО у мешавини.

**Критеријуми** који су постављени математичким моделом су:

- постизање максималног садржаја С и максималне рН вредности и
- постизање минималног садржаја N и L.

Овако постављени критеријуми проистичу из особина које поседује ООИВ.

Из ниске рН вредности који има ООИВ је произашао критеријум постизања максималне рН вредности.

Због променљивог односа С/N, који има ООИВ, постизање максималног садржаја С је следећи постављени критеријум.

Са друге стране, због високог садржаја N који поседују поједине врсте ОО, а који треба да буде нижи на почетку процеса, постизање минималног садржаја N је трећи критеријум.



На основу теоријске анализе да присуство лигнина успорава процеса, тј. теже се разлажу и који су присутни у ООИВ и ко-супстратима, постизање минималног садржаја лигнина је последњи (четврти) критеријум.

На основу претходно дефинисаних критеријума формира се проблем ВКО, који је потребно решити по критеријумима који су дати формулама (4.3) - (4.2), и гласи:

$$\left\{ \max_{x \in D} C(x), \max_{x \in D} (pH)(x), \min_{x \in D} N(x), \min_{x \in D} L(x) \right\} \quad (4.5)$$

где  $D$  представља допустиву област у којој се тражи решење а одређена је ограничењима.

#### 4.2.3.2 Избор и примена вишекритеријумске методе

Као метод за решавање ВКО проблема изабран је метод глобалног критеријума. Као што је описано, ова метода не захтева преференције о критеријумима, што веома важно с обзиром да сви дефинисани критеријуми у поглављу 1.2.1 имају подједнаку важност код процеса компостирања.

Како су у ВКО проблему присутни максимизациони и минимизациони проблеми, за сваки појединачни решава се једнокритеријумски проблем са циљем да се добије решење задатка – идеална вредност. Након одређивања идеалне вредности критеријума, формира се помоћни једнокритеријумски проблем са ограничењима (граничним условима) и додатном функцијом критеријума:

$$\begin{aligned} \min G(x) = & \left( \frac{\max C^* - C(x)}{\max C - \min C} \right)^2 + \left( \frac{\max pH^* - (pH)(x)}{\max(pH) - \min(pH)} \right)^2 + \left( \frac{\min N^* - N(x)}{\max N - \min N} \right)^2 \\ & + \left( \frac{\min L^* - L(x)}{\max L - \min L} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Решење ВКО проблема је једнако минималној вредности једнокритеријумског модела, а представља одабрану варијанту збира нормализованих одстојања остварених вредности од идеалних вредности критеријума.

#### 4.2.3.3 Формирање граничних услова

Постављање граничних услова у математичком моделу се заснива на физичко-хемијским параметрима и учешћа појединих врста ОО у оптималној мешавини. Циљ постављања граничних услова је да се посматрани физичко-хемијски параметри налазе у задатом опсегу и да се са променом удела појединачних врста ОО добије увид у њихов међусобни утицај.



У овом моделу уведена су четири гранична услова.

**Први гранични услов** у математичком моделу је да збир врста које улазе у састав оптималне мешавине износи 100%, односно 1:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (4.7)$$

**Други гранични услов**, предвиђен моделом, је да однос C/N буде у интервалу од 25,0 до 35,0, што представља оптимални опсег за несметано одвијање процеса:

$$25 \leq \frac{\sum_{k=1}^n Q_k C_k (100 - V_k) x_k}{\sum_{k=1}^n Q_k N_k (100 - V_k) x_k} \leq 35. \quad (4.8)$$

**Трећи гранични услов** у моделу односи се на садржај воде, а узето је да буде у опсегу од 40,0 % до 60,0 %:

$$40 \leq V(x) \leq 60. \quad (4.9)$$

**Четврти гранични услов** у математичком моделу представља учешће врста ОО које се изражава у опсегу од 0 % до 100 %.

С обзиром да је комина главна компонента, приликом постављања граничних услова праћена је промена њеног удела у оптималној мешавини. Узимајући да број интервала износи R, а корак  $h = 1/R$ , посматра се промена комине (прве компоненте) у интервалу  $kh \leq x_1 \leq (k+1)h$ , где  $k = 0, 1, \dots, R - 1$ , док за остале компоненте, врсте ОО, су постављена ограничења на основу литературних података и удела који се жели постићи. Удео огроздине је мењан од 15,0 %, 25,0 % и 35,0 % односно 0,15, 0,25 и 0,35, док садржај ЖЕ, ОХ и ПС је био од 0 до 1 и од 0,1 до 1. Резултати добијени анализом су показали да се за удео комине,  $x_1 \leq 40,0$  % не може формирати мешавина која задовољава све постављене захтеве, па је овај удео усвојен као доња гранична вредност за удео комине у оптималној мешавини. Повећавајући даље учешће комине, на сваком интервалу  $(kh, (k+1)h)$ , добија се оптимална тачка, тј. вредност свих компоненти које сачињавају оптималну мешавину.

Након дефинисања жељених граничних услова одређује се допуштена област D у којој се тражи оптимално решење за овако дефинисани математички проблем.

### 4.3 Примењене аналитичке методе

У овом делу поглавља дати су списак примењених аналитичких метода за одређивање физичко – хемијских параметара процеса компостирања. Одређивање садржаја C, N, OM,



неорганских форми N, P и K као и лигноцелулозних материја вршено је по сувој основи. Одређивање садржаја температуре, pH вредности као и садржаја воде и промене УМ вршено је по влажној основи материје. Све претходно наведене анализе вршене су у акредитованим лабораторијама.

Одређивање C и N спроведено је помоћу елементарног анализатора LECO CHN 628 [167]. Садржај OM анализиран је уређајем LECO TGA 701 [168].

За одређивање лако приступачних облика N, односно  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јона примењена је метода водене екстракције, док је квантификација извршена јонском хроматографијом [169].

Одређивање лако приступачног P и K у виду јона спроведено је такође применом водене екстракције, након чега је анализа обављена методом индуктивно спрегнуте плазме са оптичком емисијом (ICP-OES), у складу са важећим стандардом [170].

Садржај целулозе, хемицелулозе и лигнина одређен је применом модификоване методе по Soutar и Bryden [171], која је прилагођена за анализу лигноцелулозних компонената.

Садржај воде у узорцима одређен је сушењем у лабораторијској сушници. Принцип мерења заснован је на стандарду SRPS EN ISO 18134-2:2024 [172], а представљене вредности су средње вредности три поновљена мерења по узорку.

pH вредност одређивана је директним мерењем у мешавини коришћењем дигиталног уређаја (pH мерач Ekonomik pH009), са тачношћу  $\pm 0,1$ .

Температура је праћена дигиталним термометром WT- 01 са тачношћу  $\pm 0,1$  °C. Мерење је вршено у три тачке унутар мешавине: при дну, средини и при површини.

Укупна масе узета је као индикатор за процену степена разградње супстрата, при чему је мерење вршено на дигиталној ваги. Степен разградње израчунат је на основу једначине коју су предложили Hungría и сарадници [114]:

$$\text{Степен разградње (\%)} = \frac{M_p - M_k}{M_p} \cdot 100 \quad (4.10)$$

$M_p$  – представља почетну УМ мешавине (у kg, влажна основа) и  $M_k$  – крајња укупна маса мешавине (у kg, влажна основа).



## 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

Експериментално истраживање у овој докторској дисертацији је усмерено на испитивање процеса компостирања ООИВ са различитим врстама ОО као ко-супстратима. Један део истраживања је усмерен на изналажење одговарајуће врсте ОО коју је могуће додати комини (делу ООИВ) како би дошло до покретања и одвијања процеса компостирања. Од посебног значаја је испитивање утицаја огроздине на процес компостирања.

Због сложености процеса компостирања, експериментално истраживање се састоји из два дела: припремне и главне фазе. У припремној фази је извршен избор ко-супстрата који се могу користити за компостирање са комином и огроздином. Ова фаза у свом првом делу обухвата примену развијеног математичког модела за одређивање састава мешавина за почетак процеса компостирања, које ће се користити у експерименталном делу истраживања. У овом делу су посматране промене у активној фази, јер се у њој одвијају најбитније трансформације током процеса компостирања. У главној фази је спроведено експериментално истраживање целог тока процеса компостирања најбољих мешавина које су задовољиле постављене критеријуме, што је установљено у припремној фази.

Цео ток истраживања се може представити на следећи начин:

⇒ **Припремна фаза** - састоји се од два међусобно повезана дела:

- **Припремна фаза I** – обухвата избор састава мешавина за почетак процеса на основу развијеног математичког модела, који је описан у поглављу 4.2.
- **Припремна фаза II** – у овој фази се врши избор најбољих мешавина које ће се пратити при испитивању целог тока процеса компостирања.

⇒ **Главна фаза** - обухвата праћење целог тока процеса најбољих мешавина из припремне фазе II. Обухваћене су мешавине без и са огроздином. Такође, праћен је утицај различитих удела огроздине у мешавинама (15,0 %, 25,0 % и 35,0 %) на процес компостирања.

### 5.1 Припремна фаза експерименталног дела

Припремна фаза у овој дисертацији представља основу за спровођење експерименталног истраживања, а састоји се из два дела. Први део обухвата избор оптималних мешавина за



почетак процеса применом математичког моделовања процеса, док други део подразумева праћење процеса компостирања током активне фазе и фазе хлађења.

Основни циљеви припремне фазе су:

- избор ко-супстрата који ће се користити при компостирању ООИВ;
- избор састава почетних мешавина на основу постављених критеријума и граничних услова у математичком моделу;
- испитивање утицаја присуства различитих врста ко-супстрата на физичко-хемијске параметре и на степен разградње мешавине;
- утврђивање утицаја присуства огроздина на физичко-хемијске параметре и на степен разградње мешавине;
- избор најбољих мешавина за праћења промена целог тока процеса.

Прва два циља се односе на резултате теоријског приступа моделовања процеса, применом ВКО.

Остала три циља се односе на резултате експерименталног спровођења процеса компостирања мешавина.

План експерименталног испитивања процеса компостирања приказан је у оквиру под поглавља 5.1.1.

### 5.1.1 Припремна фаза I - Избор мешавина за почетак процеса

Приликом избора ко-супстрата који ће бити додати ООИВ, изабране су врсте ОО које су локално доступне и присутне у довољним количинама на територији РС и које би према основним карактеристикама могле да се компостирају.

У табели 5.1 су приказане основне карактеристике врста ОО које су разматране приликом развијања математичког модела за избор мешавина за почетак процеса, а то су ОХ, ЖЕ и ПС.

**Табела 5.1** Карактеристике посматраних врста ОО

[40] [99] [157] [173] [174] [175] [176] [177]

| Супстрат                      | Ко   | Ог   | Ко-супстрати |      |       |
|-------------------------------|------|------|--------------|------|-------|
|                               |      |      | ОХ           | ЖЕ   | ПС    |
| С [%] <sup>а</sup>            | 52,4 | 46,4 | 56,5         | 33,3 | 44,4  |
| Н [%] <sup>а</sup>            | 1,7  | 1,2  | 4,0          | 3,2  | 0,3   |
| С/Н                           | 29,8 | 37,7 | 14,1         | 10,4 | 143,3 |
| Садржај воде [%] <sup>б</sup> | 56,6 | 10,8 | 70,0         | 71,1 | 10,8  |
| рН [%] <sup>б</sup>           | 3,9  | 7,3  | 6,7          | 8,2  | 7,1   |
| Лигнини [%] <sup>б</sup>      | 11,1 | 32,3 | 12,1         | 2,0  | 6,5   |

а- експериментално одређено, б – узето из литературе



За одређивање састава мешавина применом развијеног математичког модела, посматрана су два сценарија, први (**Сценарио I**) када у састав мешавине улази комина и једна, односно, три врсте ко-супстрата и други сценарио (**Сценарио II**) који укључује и огроздина, чији је удео вариран. У сценарију II-1 удео огроздине је износио 15,0 %, у сценарију II-2 удео је 25,0 %, а у сценарију II-3 удео је био 35,0 % (табела 5.2). У табели 5.2, X је удео комина у мешавинама, Y удео OX, Z удео ЖЕ и K удео ПС у мешавинама.

**Табела 5.2** Приказ састава мешавина за развој математичког модела

| Мешавине             | Сценарио               | Састав мешавине [%] |    |    |    |      |
|----------------------|------------------------|---------------------|----|----|----|------|
|                      |                        | Ко                  | ЖЕ | ОХ | ПС | Ог   |
| <b>Сценарио I</b>    |                        |                     |    |    |    |      |
| M1                   | Ко + ОХ                | X                   | Y  | -  | -  | -    |
| M2                   | Ко + ЖЕ                | X                   | -  | Z  | -  | -    |
| M3                   | Ко + ПС                | X                   | -  | -  | K  | -    |
| M4                   | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС      | X                   | Y  | Z  | K  | -    |
| <b>Сценарио II</b>   |                        |                     |    |    |    |      |
| <b>Сценарио II-1</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M5                   | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 15,0 |
| M6                   | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 15,0 |
| M7                   | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | K  | 15,0 |
| M8                   | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 15,0 |
| <b>Сценарио II-2</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M9                   | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 25,0 |
| M10                  | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 25,0 |
| M11                  | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | K  | 25,0 |
| M12                  | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 25,0 |
| <b>Сценарио II-3</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M13                  | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 35,0 |
| M14                  | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 35,0 |
| M15                  | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | -  | 35,0 |
| M16                  | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 35,0 |

Предлог мешавина приказаних у табели 5.2 ће се користити у математичком моделу уз дефинисане критеријуме и постављене граничне услове.

### 5.1.2 Припремна фаза II - Избор најбољих мешавина

Избор најбољих мешавина које ће учествовати у главној фази обухвата експериментално праћење процеса мешавина чије је састав одређен применом математичког модела.

У овом делу експеримента, процес је праћен током активног дела који обухвата активну и фазу хлађења током компостирања. Посматране су мешавине у чији састав улазе комина и ко-супстрати, као и мешавине у чији састав улазе комина, ко-супстрати и огроздина.



У даљем тексту је дат опис плана експерименталног истраживања.

### План експерименталног истраживања

План истраживања обухвата два сценарија, где први (**Сценарио I**) обухвата само мешавине комине и изабраних ко-супстрате (M1 - M4), док други (**Сценарио II**) обухвата мешавине у чији састав улази и огроздина са уделом од 25,0 % масено (M9 – M12).

Да би се пратио утицај појединих ко-супстрата у мешавинама M1, M2 и M3 комини је додаван по један ко-супстрат, а у мешавини M4 се посматра укупно дејство свих ко-супстрата. У наставку (**Сценарио II**), код мешавина са огроздином примењен је исти начин формирања мешавина: комина, ко-супстрат и огроздина (M9 – M11) као и мешавина свих компоненти (M12).

У табели 5.3 је приказан модел састава мешавина који ће бити одређен након завршеног експеримента у припремној фази I.

Табела 5.3 Приказ састава мешавина за активни део и фазу хлађења процеса

| Мешавине             | Сценарио               | Састав мешавине [%] |    |    |    |      |
|----------------------|------------------------|---------------------|----|----|----|------|
|                      |                        | Ко                  | ЖЕ | ОХ | ПС | Ог   |
| <b>Сценарио I</b>    |                        |                     |    |    |    |      |
| M1                   | Ко + ОХ                | X                   | Y  | -  | -  | -    |
| M2                   | Ко + ЖЕ                | X                   | -  | Z  | -  | -    |
| M3                   | Ко + ПС                | X                   | -  | -  | K  | -    |
| M4                   | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС      | X                   | Y  | Z  | K  | -    |
| <b>Сценарио II</b>   |                        |                     |    |    |    |      |
| <b>Сценарио II-1</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M5                   | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 15,0 |
| M6                   | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 15,0 |
| M7                   | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | K  | 15,0 |
| M8                   | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 15,0 |
| <b>Сценарио II-2</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M9                   | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 25,0 |
| M10                  | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 25,0 |
| M11                  | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | K  | 25,0 |
| M12                  | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 25,0 |
| <b>Сценарио II-3</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M13                  | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 35,0 |
| M14                  | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 35,0 |
| M15                  | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | -  | 35,0 |
| M16                  | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 35,0 |

Напомена - сиво обележена подручја се не разматрају



У овом делу експеримента праћени су параметри попут температуре, рН вредности, промене садржаја С, N, OM, однос C/N, садржаја воде и промене УМ.

## 5.2 Главна фаза - Испитивање целог процеса компостирања

Након припремне фазе и избора најповољнијих мешавина за почетак и даљи ток, приступа се експерименталном праћењу процеса компостирања дуж целог тока.

Критеријуми за избор најбољих мешавина су:

- постизање и што дуже трајање термофилне фазе;
- што краће трајање киселе фазе.

Како би се одредио оптимални удео огроздине у мешавинама, разматрани су удели од 15,0 %, 25,0 % и 35,0 %.

У овом делу експеримента, поред параметара праћених у припремној фази, посматрана је и промена садржаја лигнина, целулозе и хемицелулозе. Праћени су такође промена садржаја неорганских форми N, P и K.

Циљеви главне фаза обухватају:

- анализу промена температуре, рН вредности, угљеника, азота, односа угљеника према азоту, органске материје, лигноцелулозних материја и нутријената током целог процеса компостирања мешавина без огроздине;
- утврђивање оптималног удела огроздине у мешавинама;
- утврђивање утицаја различитог удела огроздине на степен разградње лигноцелулозних материја;
- испитивање утицаја присуства различитог удела огроздине на промену садржаја нутријената;
- одређивање физичко - хемијских особина компоста добијених из мешавина са и без огроздине;
- одређивање квалитета компоста са аспекта могућности категоризације као „оплемењивача земљишта“.

У наставку, је по аналогији са планом експеримента за припремни део (5.2.2.1), приказан план експеримента за цео ток процеса компостирања.



Резултати до којих се буде дошло праћењем целог тока процеса биће приказани у поглављу 6.

### **План експеримента целог тока процеса**

Други део експерименталног истраживања, који је трајао 6 месеци, обухвата праћење целог тока процеса и подељен је у два дела.

Први део (**Сценарио I**) прати процес најбољих мешавина комине и изабраних ко-супстрата, а други (**Сценарио II**) утицај различитих удела огроздине у изабраним мешавинама комине и ко – супстрата. У састав прве мешавине улазе само комина и ко-супстрат, док је у наставку додаван различит садржај огроздина, 15,0 %, 25,0 % и 35,0 %, масено, уз варирање садржаја комине и ко-супстрата.

Састав и удео огроздине наведених мешавина приказан је у табели 5.4.

**Табела 5.4** Приказ састава мешавина за други део експерименталног истраживања

| Мешавине             | Сценарио               | Састав мешавине [%] |    |    |    |      |
|----------------------|------------------------|---------------------|----|----|----|------|
|                      |                        | Ко                  | ЖЕ | ОХ | ПС | Ог   |
| <b>Сценарио I</b>    |                        |                     |    |    |    |      |
| M1                   | Ко + ОХ                | X                   | Y  | -  | -  | -    |
| M2                   | Ко + ЖЕ                | X                   | -  | Z  | -  | -    |
| M3                   | Ко + ПС                | X                   | -  | -  | K  | -    |
| M4                   | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС      | X                   | Y  | Z  | K  | -    |
| <b>Сценарио II</b>   |                        |                     |    |    |    |      |
| <b>Сценарио II-1</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M5                   | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 15,0 |
| M6                   | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 15,0 |
| M7                   | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | K  | 15,0 |
| M8                   | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 15,0 |
| <b>Сценарио II-2</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M9                   | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 25,0 |
| M10                  | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 25,0 |
| M11                  | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | K  | 25,0 |
| M12                  | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 25,0 |
| <b>Сценарио II-3</b> |                        |                     |    |    |    |      |
| M13                  | Ко + ОХ + Ог           | X                   | Y  | -  | -  | 35,0 |
| M14                  | Ко + ЖЕ + Ог           | X                   | -  | Z  | -  | 35,0 |
| M15                  | Ко + ПС + Ог           | X                   | -  | -  | -  | 35,0 |
| M16                  | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | X                   | Y  | Z  | K  | 35,0 |

Најбитнији параметри који прате ток разградње ОМ у другом делу експеримента су промена УМ, односа С/Н, промена садржаја ОМ као и промена рН вредности. Како је структура ОО сачињена од лигноцелулозних материја, у овом делу истраживања прати се и



разградња лигнина, целулозе и хемицелулозе кроз промену њихових садржаја на почетку и на крају процеса. Прати се и промена садржаја нутријената у облицима који су доступни биљкама, као што су  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јони, фосфор-пентоксид ( $P_2O_5$ ) и калијум-оксид ( $K_2O$ ).

### 5.3 Опис експерименталног истраживања

Експериментално истраживање је спроведено од августа до априла у затвореном простору у условима околине. Коришћене су пластичне посуде запремине 16 литара, димензија 35 cm x 25 cm. Свака од посуда је избушена на дну и са стране како би се омогућило отицање процедних вода које се издвајају у току процеса као и струјање ваздуха кроз мешавину. Експеримент је спроведен у дванаест посуда, а маса сваке мешавине на почетку процеса је износила 3 kg.

Приликом извођења експеримента коришћени су делови ООИВ: комина (покожице, пулпа и семенке) и огроздина са додацима ко-супстрата. ООИВ је добијена након производње вина од белог и црвеног грозђа током периода октобра и након процеса ферментације. ООИВ је чувана на хладном, у херметички затвореним посудама до почетка експерименталног истраживања, да не би дошло до неконтролисане разградње. Ко – супстрати који су коришћени у овом експерименту су ОХ сакупљени из домаћинстава, који у свом саставу садрже велики део отпада биљног порекла; ЖЕ, који су добијени са оближње фарме и ПС, сакупљена након жетве током јула месеца. ОХ и ЖЕ су узети свежи, сакупљени непосредно пре спровођења експеримента. У даљем истраживању посматрано је више параметара коmine, огроздине и ко-супстрата (табела 5.5).

Табела 5.5 Основне карактеристике појединачних врста ОО

| Супстрат                                 | Ко   | Ог    | Ко-супстрати |       |       |
|--|------|-------|--------------|-------|-------|
|  |      |       | ОХ           | ЖЕ    | ПС    |
| С [%] <sup>а</sup>                       | 52,4 | 46,4  | 56,5         | 33,3  | 44,4  |
| Н [%] <sup>а</sup>                       | 1,7  | 1,2   | 4,0          | 3,2   | 0,3   |
| С/Н <sup>а</sup>                         | 29,8 | 37,7  | 14,1         | 10,4  | 143,3 |
| ОМ [%] <sup>а</sup>                      | 96,4 | 94,7  | 97,1         | 65,4  | 92,3  |
| Садржај воде [%] <sup>б</sup>            | 57,1 | 55,1  | 58,8         | 60,9  | 10,8  |
| рН [%] <sup>б</sup>                      | 4,6  | 4,6   | 5,8          | 8,1   | 7,1   |
| Лигнин [g/100 g с.м.] <sup>а</sup>       | 6,5  | 17,8  | 42,8         | 25,8  | 25,8  |
| Целулоза [g/100 g с.м.] <sup>а</sup>     | 28,3 | 8,3   | 6,8          | 13,3  | 8,5   |
| Хемицелулоза [g/100 g с.м.] <sup>а</sup> | 20,2 | 33,8  | 29,8         | 40,9  | 45,4  |
| $NO_3^-$ [g/kg] <sup>а</sup>             | 0,02 | 0,009 | 0,01         | 0,004 | 0,05  |
| $NH_4^+$ [g/kg] <sup>а</sup>             | 0,6  | 2,3   | 0,6          | 0,4   | 0,1   |
| $P_2O_5$ [g/kg] <sup>а</sup>             | 1,2  | 0,9   | 1,5          | 0,5   | 0,05  |
| $K_2O$ [g/kg] <sup>а</sup>               | 41,5 | 4,9   | 11,4         | 3,3   | 2,7   |

а – сува основа, б – влажна основа





дана и на крају процеса. За потребе одређивање садржаја лигноцелулозних материја, узорковање је извршено на почетку и на крају процеса. Узорци на почетку су узети након припремања мешавине. Приликом узорковања на крају фазе хлађења, узорци су узети са дна, средине и врха мешавине у посуди. Код узорковања на крају процеса, узорци су узети након мешања добијеног компоста. Маса узетог узорка за одређивање садржаја воде је 20 g, а маса узорка за одређивање садржаја С, N и OM је износила 40 g. За потребе одређивања садржаја неорганског N, P и K као и лигноцелулозних материја маса узорка је износила 40 g. Овако узети узорци су замрзнути и чувани на  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , до тренутка вршења потребних анализа. Пре самог поступка одређивања С, N, OM и лигноцелулозних материја узорци су сушени на собној температури након чега су уситњени (самлевени). За потребе одређивања неорганског N, P и K узорци су сушени до константне масе.

Припремљене мешавине приказане на слици 5.2 су овлажене како би се постигао оптимални садржај влаге и добро промешане како би се компостна маса хомогенизовала.



## 6 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У овом поглављу приказани су резултати и дискусија до којих се дошло моделовањем процеса компостирања мешавина ООИВ и ко-супстрата са и без присуства огроздине.

Добијени резултати су подељени у три дела, у складу са планом експерименталног истраживања.

У првом делу, приказани су резултати истраживања који прате **припремну фазу**, а обухватају резултате математичког модела – **припремне фазе I** и првог дела експерименталног истраживања – **припремне фазе II**, који прати активну фазу као и фазу хлађења процеса компостирања. Добијени резултати математичког модела представљају уделе појединачних компоненти мешавина које задовољавају постављене критеријуме и граничне услове као и њихове физичко - хемијске параметре. Резултати припремне фазе II, која обухвата два сценарија, приказани су упоредно како би се уочиле разлике између њих. У првом сценарију праћен је процес компостирања комине и ко-супстрата, а у другом, комине, ко-супстрата и 25,0 % огроздине.

Други део обухвата резултате који прате **цео ток процеса компостирања - главну фазу**. Добијени резултати су приказани у зависности од врсте ко-супстрата и удела огроздине у мешавини, и састоје се из два дела. У првом делу приказани су резултати који прате физичко-хемијске параметре процеса. Други део представља анализу карактеристика добијеног компоста са аспекта оцене квалитета, што се огледа кроз садржај нутријената N, P и K као и тражених физичко-хемијских параметара.

Трећи део резултата обухвата верификацију математичког модела, која представља кључни корак у потврђивању тачности и поузданости предвиђања која модел даје.

### 6.1 Резултати и дискусија припремне фазе

У овом делу поглавља приказани су резултати до којих се дошло праћењем процеса током припремне фазе.

Резултати математичког модела (**припремна фаза I**) дати су табеларно, како би се лакше извршила анализа добијених података. Резултати припремне фазе II, који обухватају праћење



физичко - хемијских параметара током експерименталног истраживања активне фазе и фазе хлађења (ФХ), приказани су табеларно и дијаграмима.

### 6.1.1 Резултати и дискусија припремне фазе I

Након примене математичког модела, добијени су резултати појединачних удела комине и ко-супстрата у мешавинама који испуњавају услове за почетак и даљи ток компостирања. Уз то, добијене су и карактеристике тих мешавина, које су приказане у табели 6.1.

Овако добијени резултати представљају оптимална решења у складу са постављеним граничним условима и критеријумима за сваку мешавину појединачно.

У даљем тексту је извршена кратка анализа резултата у зависности од постављених граничних услова и критеријума, и то кроз два сценарија. *Сценарио I* прати мешавине кљука и ко-супстрата, док је у *Сценарију II* праћен утицај присуства различитог удела огроздине на посматране параметре.

Резултати добијени применом математичког модела за оба сценарија показују да су задовољени постављени гранични услови: однос C/N код свих мешавина је био у опсегу од 25,0 до 35,0, при чему се садржај воде кретао у опсегу од 40,0 % до 60,0 %.

Анализом постављених критеријума, у *Сценарију I* је утврђено да максимални садржај C износи 53,1 %, у случају када у састав мешавине улазе комина и ОХ (M1). Највиша рН вредност забележена је у мешавини која обухвата све ко-супстрате (M4), и износила је 4,7. Овај резултат се може повезати са својствима ко-супстрата – ОХ, ЖЕ и ПС, који појединачно имају вишу рН вредност, што чини добијене резултате очекиваним.

Како је један од критеријума био постизање минималног садржаја N, утврђено је да он износи 1,7 % и остварен је у мешавини комине и ПС (M3). Може се закључити да је на овај резултат утицао низак садржај N у оба ко-супстрата – комини и ПС. Даљом анализом утврђено је да минимални садржај лигнина износи 9,9 % и остварен је у мешавини комине и ЖЕ (M2), што је било и очекивано, с обзиром на то да ЖЕ имају најнижи садржај лигнина, како је приказано у табели 5.1.



Табела 6.1 Састав оптималних мешавина добијених математичком оптимизацијом за оба сценарија

| Мешавине                                    | Сценарио                                       | Удео појединачних компоненти у<br>оптималној<br>мешавини [%] |      |      |     |                | Параметри          |           |             |           |          |                       |
|---|--|--|------|------|-----|----------------|--------------------|-----------|-------------|-----------|----------|-----------------------|
|   |  |  |      |      |     |                | Гранични<br>услови |           | Критеријуми |           |          |                       |
|   |  | К <sub>о</sub>   | ОХ   | ЖЕ   | ПС  | О <sub>Г</sub> | С/Н                | СВ<br>[%] | Max<br>С    | Max<br>рН | Min<br>N | Min<br>Л <sub>Г</sub> |
| <b>Сценарио I (0 % О<sub>Г</sub>)</b>       |  |  |      |      |     |                |                    |           |             |           |          |                       |
| M1  | К <sub>о</sub> + ОХ                            | 85,2   | 14,1 | -    | -   | -              | 26,5               | 58,5      | 53,1        | 4,3       | 2,1      | 11,5                  |
| M2  | К <sub>о</sub> + ЖЕ                            | 84,7   | -    | 15,5 | -   | -              | 26,4               | 58,8      | 49,5        | 4,6       | 1,9      | 9,9                   |
| M3  | К <sub>о</sub> + ПС                            | 98,0   | -    | -    | 2,0 | -              | 30,6               | 55,6      | 52,3        | 4,0       | 1,7      | 11,3                  |
| M4  | К <sub>о</sub> + ОХ + ЖЕ + ПС                  | 76,0   | 10,0 | 10,0 | 3,8 | -              | 26,1               | 58,2      | 50,8        | 4,7       | 2,1      | 10,4                  |
| <b>Сценарио II</b>                          |  |  |      |      |     |                |                    |           |             |           |          |                       |
| <b>Сценарио II-1 (15 % О<sub>Г</sub>)</b>   |  |  |      |      |     |                |                    |           |             |           |          |                       |
| M5  | К <sub>о</sub> + ОХ + О <sub>Г</sub>           | 65,2   | 20,4 | -    | -   | 15,0           | 26,6               | 53,3      | 52,5        | 4,9       | 2,2      | 14,3                  |
| M6  | К <sub>о</sub> + ЖЕ + О <sub>Г</sub>           | 64,6   | -    | 20,3 | -   | 15,0           | 27,1               | 52,6      | 47,6        | 5,3       | 1,9      | 12,6                  |
| M7  | К <sub>о</sub> + ПС + О <sub>Г</sub>           | 76,6   | -    | -    | 8,5 | 15,0           | 34,8               | 45,9      | 50,9        | 4,7       | 1,5      | 14,2                  |
| M8  | К <sub>о</sub> + ОХ + ЖЕ + ПС + О <sub>Г</sub> | 54,0   | 13,6 | 10,0 | 7,4 | 15,0           | 28,9               | 49,5      | 49,6        | 5,5       | 2,1      | 13,2                  |
| <b>Сценарио II- 2 (25 % О<sub>Г</sub>)</b>  |  |  |      |      |     |                |                    |           |             |           |          |                       |
| M9  | К <sub>о</sub> + ОХ + О <sub>Г</sub>           | 54,5   | 20,5 | -    | -   | 25,0           | 28,0               | 47,9      | 51,8        | 5,3       | 2,1      | 16,7                  |
| M10   | К <sub>о</sub> + ЖЕ + О <sub>Г</sub>           | 54,6   | -    | 20,3 | -   | 25,0           | 28,1               | 48,1      | 47,1        | 5,6       | 1,9      | 14,7                  |
| M11   | К <sub>о</sub> + ПС + О <sub>Г</sub>           | 72,9   | -    | -    | 2,1 | 25,0           | 33,2               | 44,2      | 50,8        | 4,8       | 1,5      | 16,5                  |
| M12   | К <sub>о</sub> + ОХ + ЖЕ + ПС + О <sub>Г</sub> | 53,3   | 10,0 | 10,0 | 1,6 | 25,0           | 28,7               | 47,1      | 49,3        | 5,5       | 1,9      | 15,6                  |
| <b>Сценарио II – 3 (35 % О<sub>Г</sub>)</b> |  |  |      |      |     |                |                    |           |             |           |          |                       |
| M13   | К <sub>о</sub> + ОХ + О <sub>Г</sub>           | 44,4   | 20,5 | -    | -   | 35,0           | 28,9               | 43,3      | 51,2        | 5,6       | 2,0      | 18,8                  |
| M14   | К <sub>о</sub> + ЖЕ + О <sub>Г</sub>           | 43,6   | -    | 21,3 | -   | 35,0           | 28,9               | 43,6      | 46,2        | 6,0       | 1,8      | 16,7                  |
| M15   | К <sub>о</sub> + ПС + О <sub>Г</sub>           | 63,8   | -    | -    | -   | 35,0           | 33,7               | 40,0      | 50,2        | 5,1       | 1,5      | 18,6                  |
| M16   | К <sub>о</sub> + ОХ + ЖЕ + ПС + О <sub>Г</sub> | 41,4   | 10,0 | 10,0 | 3,5 | 35,0           | 30,3               | 41,7      | 48,5        | 5,9       | 1,9      | 17,6                  |



Праћењем утицаја присуства огроздине, на разматране критеријуме, *Сценаријо II*, утврђено је да у неким случајевима повољно утичу, док у другим случајевима могу имати супротни ефекат на процес.

Анализом промене садржаја C и N у зависности од удела огроздина, на основу резултата приказаних у табели 6.1, уочава се да повећање садржаја огроздине доводи до смањења садржаја оба елемента у мешавинама, изузев у случају када је ко-супстрат ПС (мешавине M7, M11 и M15). У овој мешавини (M7) садржај N је остао приближно исти без обзира на удео огроздине, што се може објаснити ниским садржајем N у самим супстратима. На крају, може се закључити да је огроздина имала повољан ефекат на садржај C, док њен утицај на садржај N није био значајан.

На основу резултата приказаних у табели 6.1, уочава се да пораст удела огроздине у мешавинама доводи до повећања рН вредности (са изузетком мешавине са високим уделом комине), што указује на њен повољан утицај на овај параметар. У случају садржаја лигнина ефекат је био неповољан, јер се њихов садржај повећавао са порастом удела огроздине у мешавинама.

Запажа се и да је однос C/N виши у случају када је удео огроздине 25,0 %, односно 35,0 %, што указује да огроздина доприноси повећању односа C/N у мешавини. Може се уочити да са порастом удела огроздине у мешавини се снижава садржај воде.

Анализом утицаја присуства различитих ко-супстрата у мешавинама, уочено је да ОХ и ЖЕ доприносе повећању рН вредности, док су у мешавинама са ПС забележене најниже рН вредности. У мешавини која садржи све ко-супстрате, рН вредност је била виша, што се може приписати присуству ОХ и ЖЕ. Иста тенденција утицаја ко-супстрата запажена је у оба сценарија. Ови резултати указују на то да мешавине које садрже ОХ, ЖЕ или све ко-супстрате обезбеђују повољније услове за процес, док присуство ПС, према математичком моделу, може довести до његовог успоравања.

Пошто су све мешавине задовољиле граничне услове и критеријуме, за даљи ток (за припремну фазу II) су узете све мешавине из *Сценарија I*, M1, M2, M3 и M4 и мешавине из *Сценарија II - 2*, M9, M10, M11 и M12.

### 6.1.2 Резултати и дискусија припремне фазе II

На основу резултата математичког модела добијен је састав оптималних мешавина за почетак процеса компостирања (табела 6.2), као и њихови параметри (табела 6.3). Поред

мешавина без огроздине, у овој фази се прати и утицај присуства 25,0 % огроздине у мешавинама с циљем да се експериментално анализира како ова компонента утиче на процес компостирања у активној фази и ФХ процеса као и на физичко - хемијске параметре мешавина.

Табела 6.2 Састав почетних мешавина

| Сценарио<br>Мешавина | Сценарио I |      |      |      | Сценарио II - 2 |      |      |      |
|----------------------|------------|------|------|------|-----------------|------|------|------|
|                      | M1         | M2   | M3   | M4   | M9              | M10  | M11  | M12  |
| Ко (%)               | 85,0       | 85,0 | 98,0 | 76,0 | 55,0            | 55,0 | 73,0 | 53,0 |
| ОХ (%)               | 15,0       | -    | -    | 10,0 | 20,0            | -    | -    | 10,0 |
| ЖЕ (%)               | -          | 15,0 | -    | 10,0 | -               | 20,0 | -    | 10,0 |
| ПС (%)               | -          | -    | 2,0  | 4,0  | -               | -    | 2,0  | 2,0  |
| Ог (%)               | -          | -    | -    | -    | 25,0            | 25,0 | 25,0 | 25,0 |

У табели 6.3 су приказани параметри почетних мешавина.

Табела 6.3 Параметри почетних мешавина

| Сценарио<br>Мешавина       | Сценарио I |      |      |      | Сценарио II - 2 |      |      |      |
|----------------------------|------------|------|------|------|-----------------|------|------|------|
|                            | M1         | M2   | M3   | M4   | M9              | M10  | M11  | M12  |
| Маса (kg)                  | 3,0        | 3,0  | 3,0  | 3,0  | 3,0             | 3,0  | 3,0  | 3,0  |
| C/N                        | 25,5       | 25,0 | 25,9 | 25,1 | 25,1            | 25,3 | 31,6 | 25,1 |
| Вода (%) <sup>a</sup>      | 62,2       | 60,6 | 64,5 | 64,8 | 62,1            | 63,3 | 63,3 | 64,6 |
| ОМ (% у с.м.) <sup>б</sup> | 96,5       | 91,8 | 96,4 | 93,2 | 96,9            | 90,5 | 96,7 | 93,6 |
| pH вредност <sup>a</sup>   | 5,0        | 5,2  | 4,8  | 5,6  | 5,0             | 6,9  | 5,0  | 5,3  |

a – влажна основа, б – сува основа

На слици 6.1 је приказан изглед мешавина у чијем саставу улазе ООИВ и ко-супстрати.



а) M1

б) M2

в) M3

г) M4



д) M9

ђ) M10

е) M11

ж) M12

**Слика 6.1** Приказ мешавина за активни део процеса; а) мешавина Ко и ОХ – М1; б) мешавина Ко и ЖЕ - М2; в) мешавина Ко и ПС – М3; г) мешавина Ко и ОХ, ЖЕ и ПС – М4; д) мешавина Ко, ОХ и 25,0% Ог – М9; њ) мешавина Ко, ЖЕ и 25,0% Ог – М10; е) мешавина Ко, ПС и 25,0% Ог – М11; ж) мешавина Ко, ОХ, ЖЕ, ПС и 25,0% Ог – М12

У даљем тексту поглавља биће приказани резултати експерименталног истраживања до којих се дошло праћењем процеса компостирања током активне фазе и ФХ. Резултати промене температуре, рН вредности и промене садржаја воде су приказани помоћу дијаграма промене по времену. Промене садржаја С, N и односа С/N је приказана табеларно, док су УМ и ОМ приказане на дијаграму и изражене процентима. На основу добијених резултата пратиће се утицај присуства различитих ко-супстрата и огроздине на физичко-хемијске параметре процеса. На крају ће се извршити избор оптималних ко-супстрата и мешавина за даље истраживање.

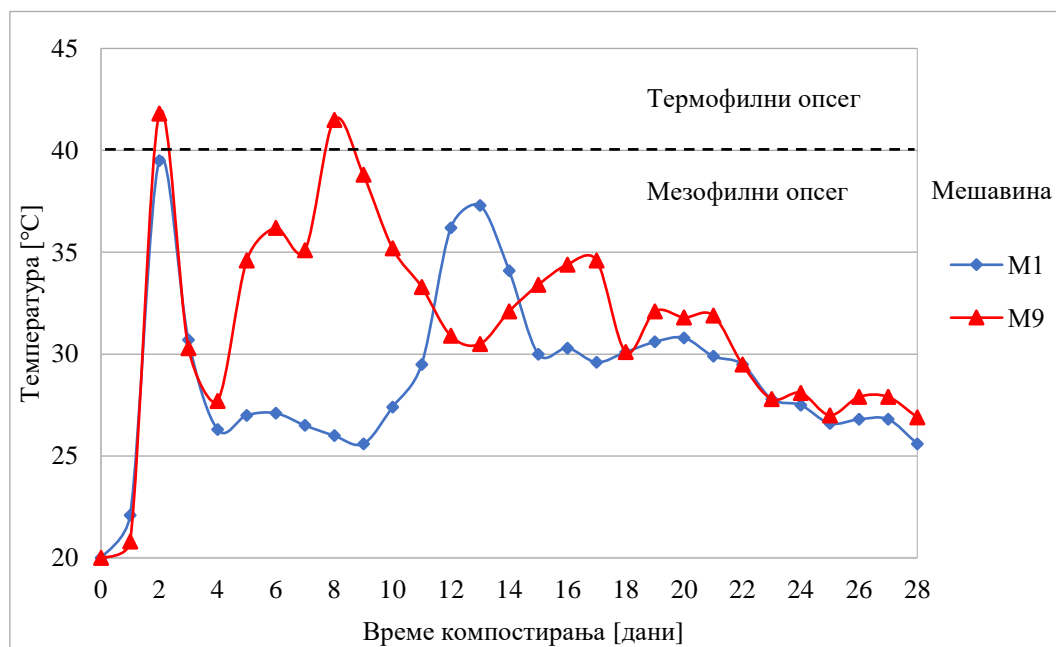
### 6.1.2.1 Промена температуре

Праћење температуре током процеса компостирања је од битног значаја јер представља индикатор микробиолошке активности. Један од кључних показатеља разградње ОМ је постизање термофилне фазе. Ова фаза је од суштинске важности јер омогућава интензивну микробиолошку активност, а њено дуго трајање омогућава потпунију трансформацију ОМ.

Због претходне наведене чињенице, као оцена успешности одвијања процеса компостирања биће посматрана појава и дужина трајања термофилне фазе. Као граница за почетак термофилне фазе узета је температура већа или једнака 40 °С.

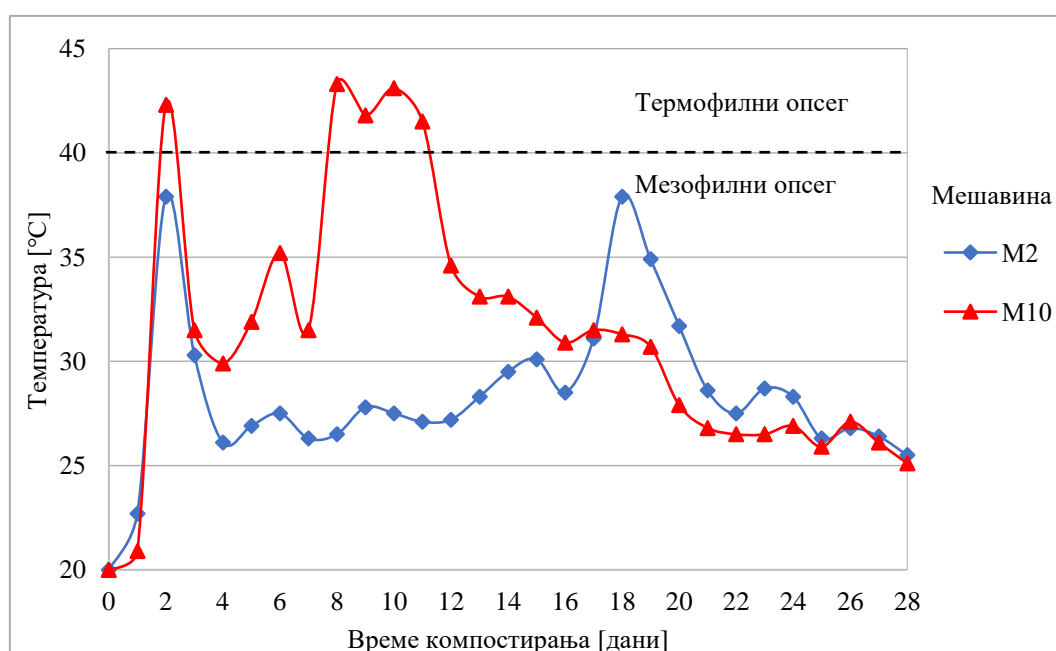
На сликама је дат упоредни приказ промена температуре за оба посматрана сценарија, мешавина без (М1 - М4) и са присуством огроздине (М9 - М12), слике 6.2 – 6.5.

Анализом резултата приказаних на сликама 6.1 – 6.4 се види да је у појединим мешавинама забележена једна односно две термофилне фазе, мешавине: М3, М4, М9, М10 и М12. У осталим мешавинама: М1, М2 и М11, термофилне фазе није било. Објашњење за појаву примарне и секундарне термофилне фазе је приказано у поглављима 2 и 3.



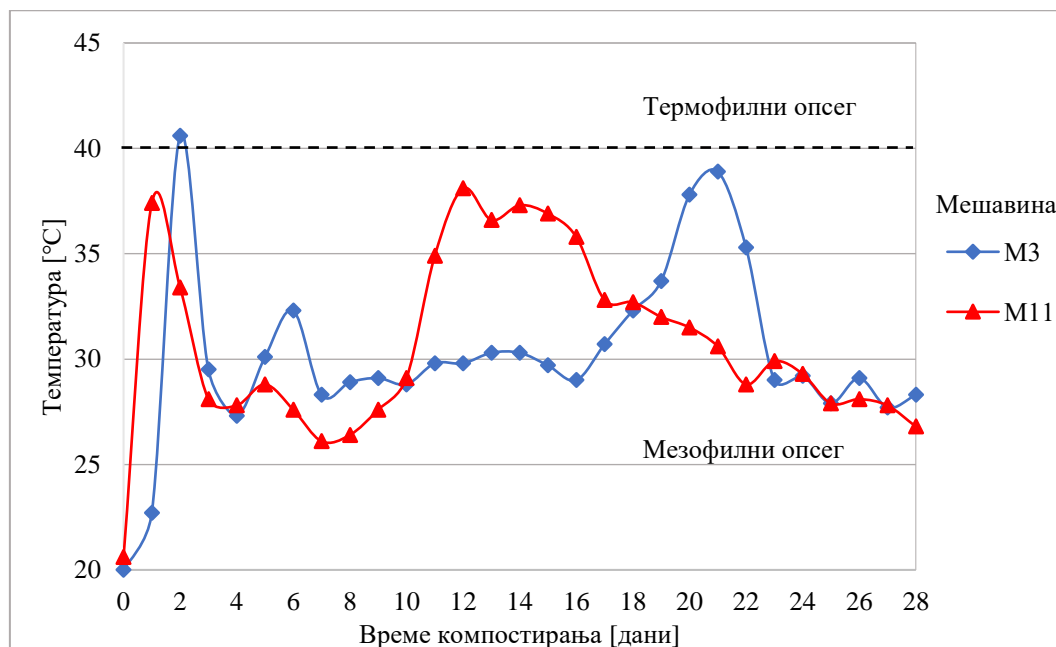
Слика 6.2 Упоредни приказ промене температуре мешавина М1 и М9

Са слике 6.2 се запажа да додавање огроздине у мешавину комине и ОХ (М9) је побољшало услове процеса, што се огледа кроз постизање две термофилне фазе, које су почеле 2. и 8. дана.



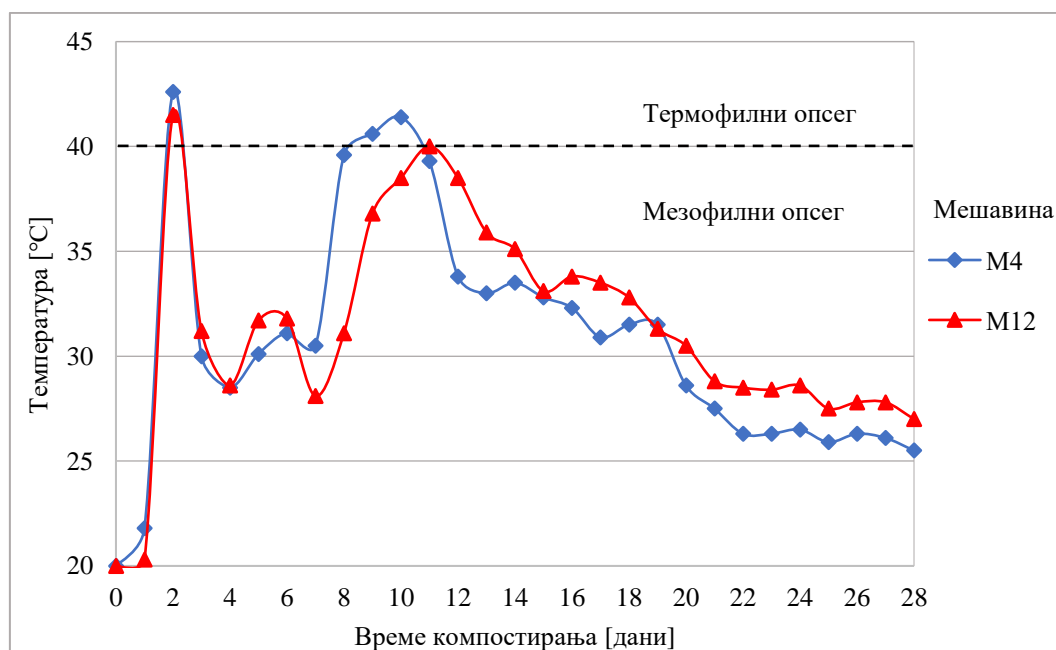
Слика 6.3 Упоредни приказ промене температуре мешавина М2 и М10

Резултати приказани на слици 6.3 јасно показују да присуство огроздине у мешавини комине и ЖЕ такође доприноси интензивирању процеса. Ово се види кроз постизање две термофилне фазе и виших температура.



Слика 6.4 Упоредни приказ промене температуре мешавина M3 и M11

Евидентно је да код мешавине комине са ПС, којој су додате огроздине (слика 6.4) се успорава процес, што се огледа у нижим вредностима температуре. У овој мешавини, није забележена термофилна фаза, док је код мешавине без огроздине термофилна фаза била присутна само на почетку процеса.



Слика 6.5 Упоредни приказ промене температуре мешавина M4 и M12



Резултати приказани на слици 6.5 указују да су код обе мешавине са свим ко-супстратима (М4 и М12) забележене температуре које одговарају термофилним условима. При чему је код мешавине без огроздина (М4) термофилна фаза дуже трајала, 5 дана.

Даљом анализом, упоређивањем мешавина без и са огроздином може се закључити да код мешавине са ОХ (М9) и ЖЕ (М10), додавање огроздине је имало позитиван утицај, што се огледа кроз појаву и дужину трајања термофилне фазе. Код мешавина са ПС (М11) и свим ко-супстратима (М12) присуство огроздине је имало негативан утицај, што се огледа кроз ниже температуре услед превелике порозности.

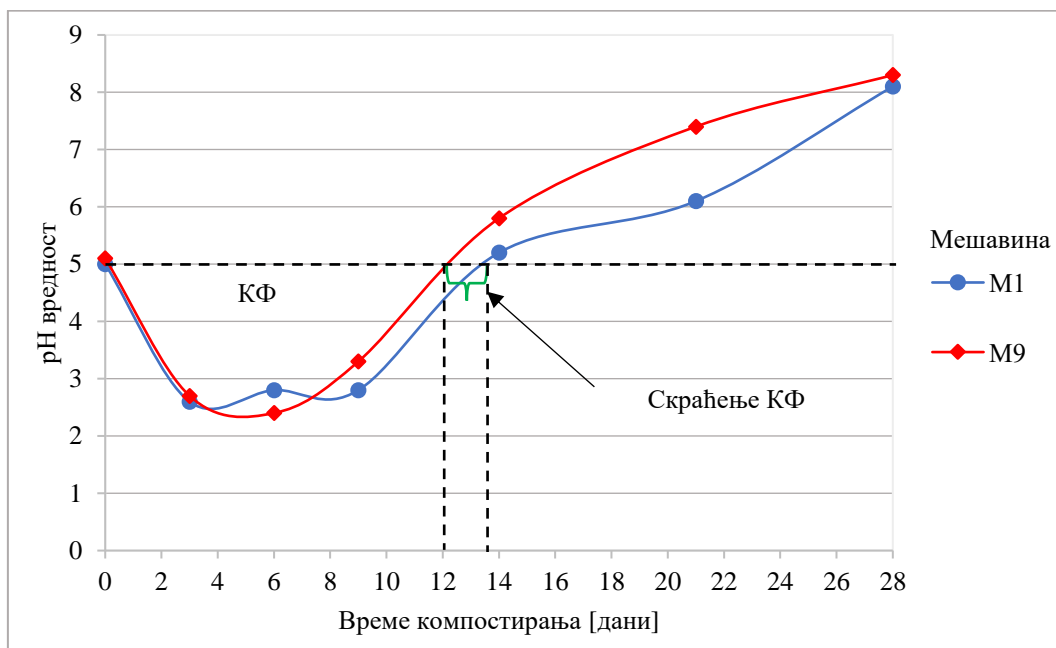
Коначно, може се закључити да је присуство огроздина имало позитиван утицај само у оним мешавинама где не постоји компонента која је порозна (ПС) и где би присуство огроздине повећало порозност мешавине. Може се извући закључак да су оптималне мешавине, без огроздине мешавина са свим ко-супстратима (М4), а мешавина са огроздином оне са ОХ (М9) и ЖЕ (М10).

#### 6.1.2.2 Промена рН вредности

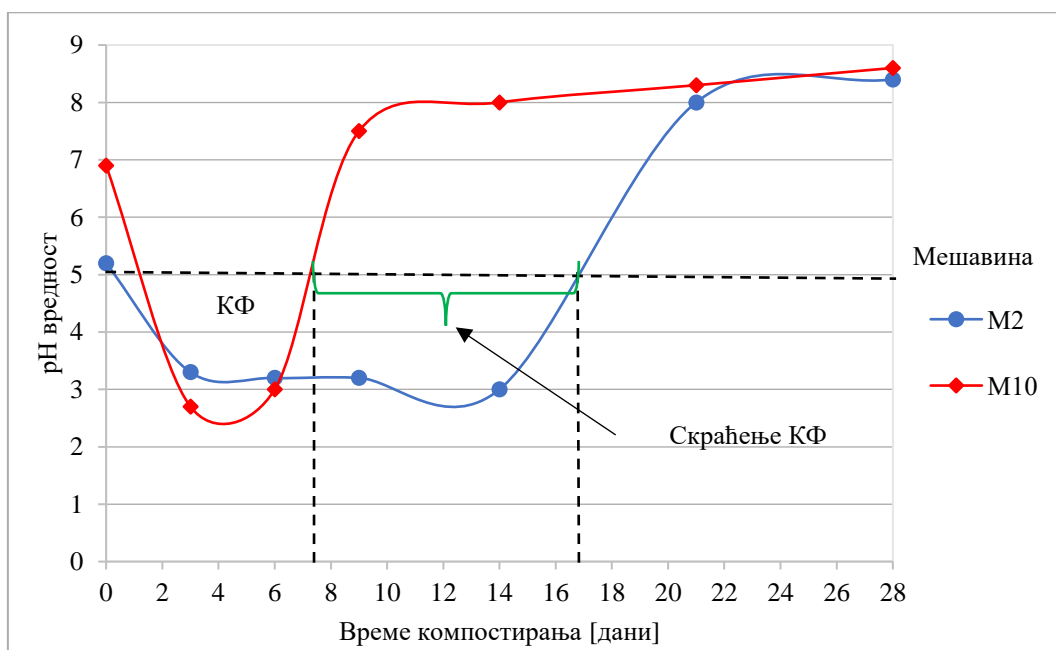
Праћење промене рН вредности је од велике важности јер у зависности од тога може доћи до успоравања или заустављања процеса разградње ОМ. На почетку активне фазе, рН вредност треба да буде од 5,5 – 8,5 [41], са тежњом да буде што виша, како би се створили што повољнији услови за почетак разградње и даљи ток процеса. Са друге стране, присуство ниске почетне рН вредности условљава појаву киселе фазе. Уколико рН вредност падне испод 5,0 долази до инхибиције микробиолошке активности и успоравања трансформације ОМ.

У овој дисертацији, пажња је посвећена појави и дужини трајања киселе фазе. Као граница рН вредности испод које је заступљена кисела фаза је узета вредност нижа од 5,0 [45].

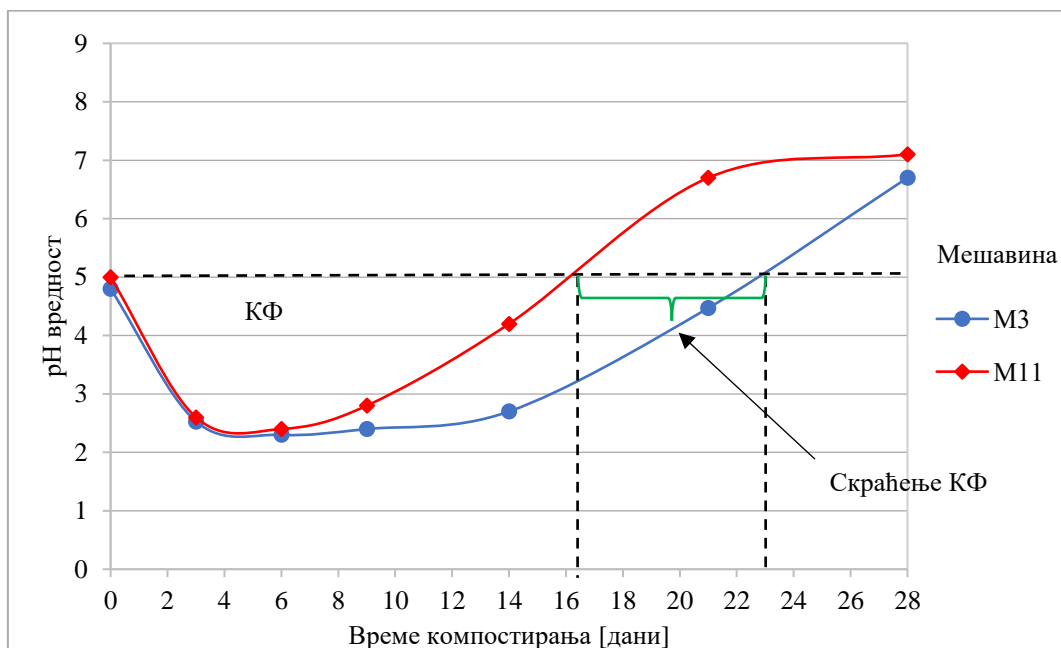
Резултати мерења за оба сценарија (мешавине М1 – М4 и М9 – М12) су приказани на упоредном дијаграму, слике 6.6 - 6.9. Испрекиданом линијом је означена граница за киселу фазу.



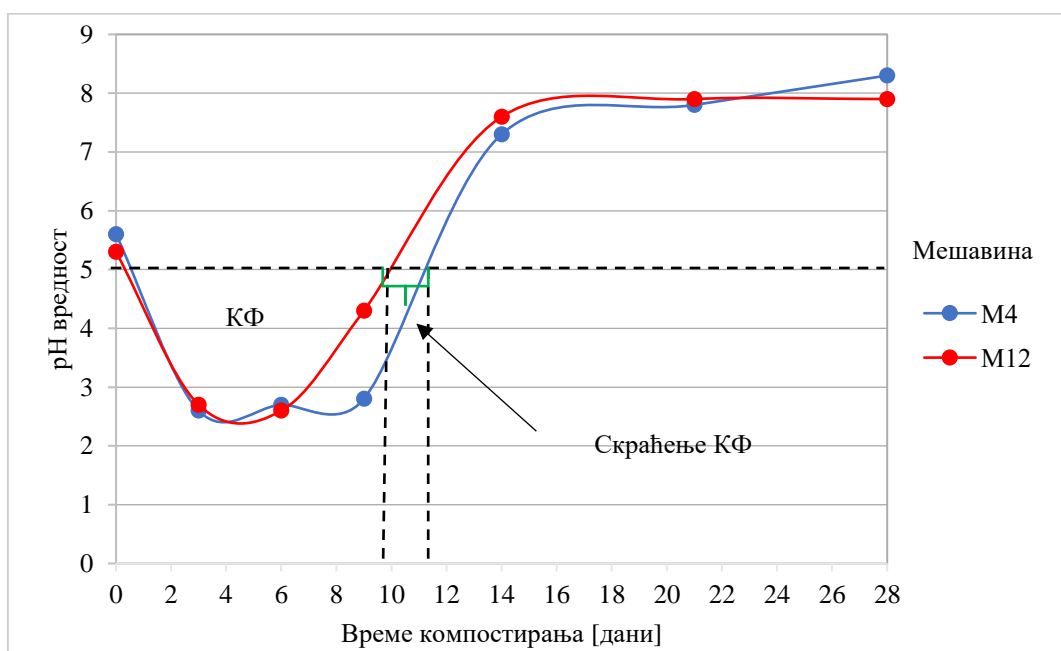
Слика 6.6 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М1 и М9



Слика 6.7 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М2 и М10



Слика 6.8 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М3 и М11



Слика 6.9 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М4 и М12

Праћењем промене рН вредности, слике 6.6 – 6.9, уочава се да су код мешавина са ОХ (М1), ЖЕ (М2) и са свим ко–супстратима (М4) остварене рН вредности више од 5,0. У мешавини када је ко–супстрат ПС (М3), рН вредност је била нижа, 4,8, па се може закључити да се процес одвијао у киселој средини.

Додавањем огроздине, слике 6.6 – 6.9, услови за почетак процеса су побољшани, забележене су више рН вредности, између 5,0 и 6,9.

Упоредивањем мешавина са и без огроздине примећује се да је присуство огроздине допринело и скраћењу киселе фазе. Она је трајала 12, 6, 16, односно 10 дана код мешавина М9 – М12, док је код мешавине без огроздине, М1 – М4 кисела фаза трајала 14, 17, 23 и 10 дана, редом.

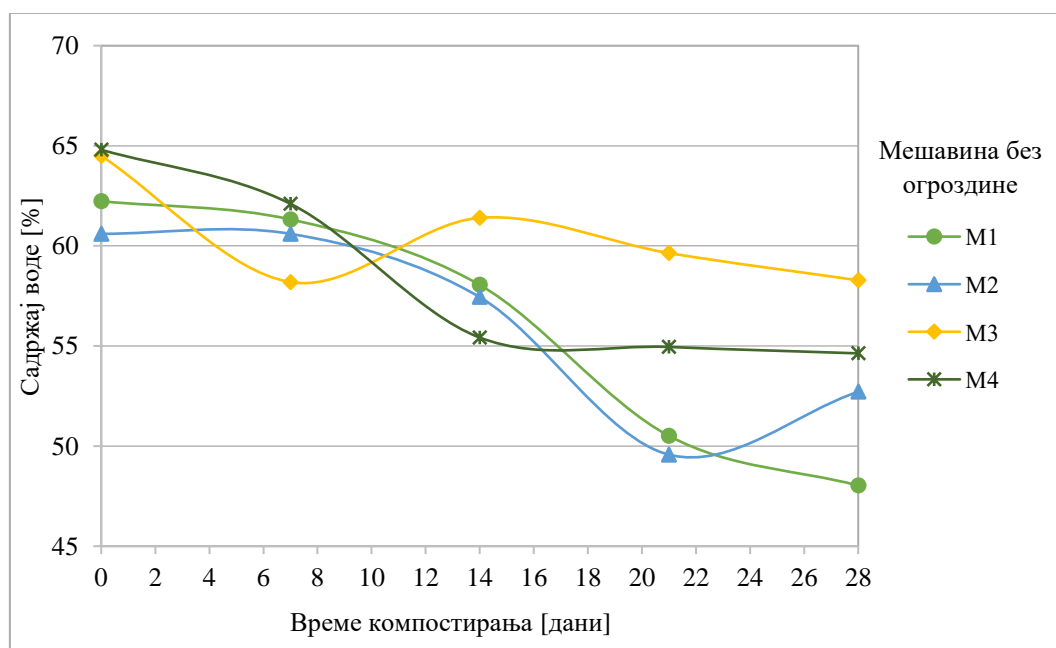
Код свих мешавина на крају ФХ, рН вредност била од 6,7 до 8,6. Сличне резултате су добили Hungria и Bustamante при компостирању ООИВ са ОФКО, односно ООИВ и ЖЕ [114] [77].

Може се закључити да је огроздина имала позитиван утицај на рН вредност у свим мешавинама. Оптималне мешавине су М4 (са свим ко-супстратима), М9 (са ОХ) и М10 (са ЖЕ).

### 6.1.2.3 Промена садржаја воде

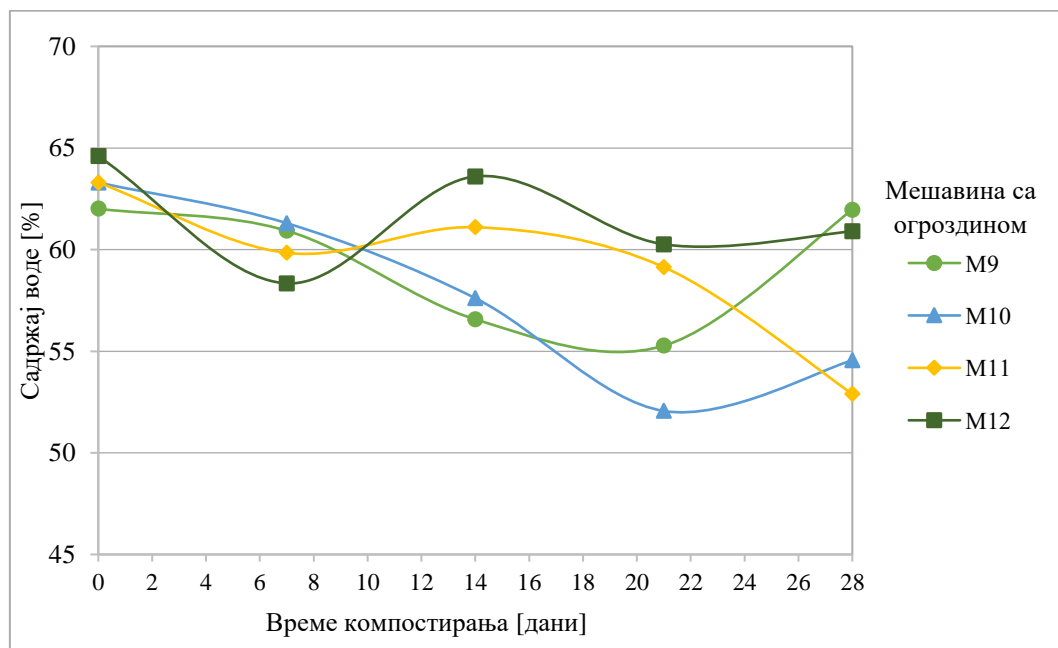
Праћење садржаја воде током процеса компостирања од кључног је значаја јер је одговорна за транспорт хранљивих материја кроз мешавину. Њено присуство више од 65,0 % доводи до појаве анаеробних услова, док смањења садржаја воде испод 40,0 % исушује масу, што такође доводи до успоравања процеса. Резултати промене садржаја воде током активне фазе (АФ) и фазе хлађења (ФХ) процеса компостирања приказани су на сликама 6.10 и 6.11.

Најпре, са слика 6.10 и 6.11 уочава се да је код свих мешавина садржај воде био у оптималном опсегу од 40,0 % до 65,0 % [178].



Слика 6.10 Дијаграм промене садржаја воде за мешавине М1 – М4

На основу приложене слике 6.10, запажа се да је у мешавинама без огроздине, када су ко-супстрати ОХ (М1) и ЖЕ (М2) садржај воде на почетку процеса био виши од 60,0 %. Ово указује на могућност појаве анаеробних услова и успоравања процеса с обзиром на то да компоненте нису порозне. Код мешавина М3 када је ко-супстрат ПС и М4 (мешавина са свим ко-супстратима), садржај воде је био у оптималном опсегу.



Слика 6.11 Дијаграм промене садржаја воде за мешавине М9 – М12

Код мешавина са огроздином (слика 6.11) утврђено је да је садржај воде био у оптималном опсегу. На почетку процеса садржај воде је био између 63,0 % и 65,0 % и није се много променио у даљем току процеса. Изузетак су мешавине са ЖЕ (М10) и ПС (М11) где је опао на вредности испод 55,0 %.

Упоређујући мешавине без и са огроздином може се закључити да додавањем огроздине у мешавини долази до повећања садржаја воде. Ова појава се може приписати њиховој порозној структури и способношћу задржавања воде.

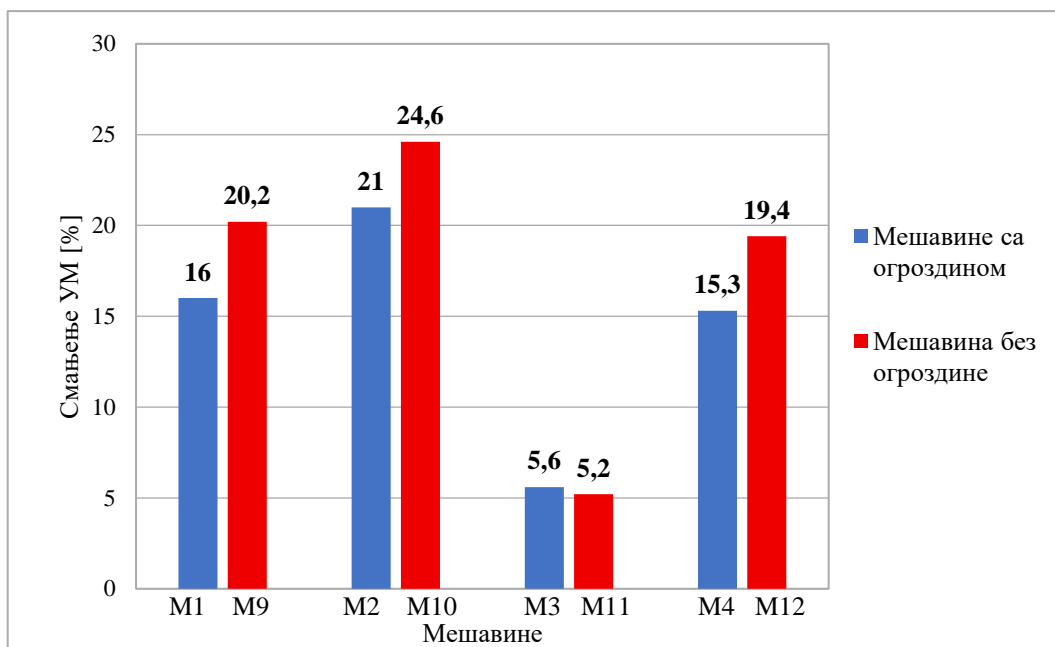
Како је у оба сценарија садржај воде био у оптималном опсегу дуж посматраног периода, резултати указују да је процес добро вођен.

#### 6.1.2.4 Промена укупне масе и органске материје

Вредности УМ и ОМ током процеса су два показатеља да је дошло до трансформације ОО, односно да је дошло до разградње уз ослобађање гасова и смањења УМ.

#### 6.1.2.4.1 Промена укупне масе

Добијени резултати мерења промене УМ приказани су на упоредном дијаграму мешавина без и са огроздином, а представљају процентуално смањење УМ у односу на почетак процеса, слика 6.12.



Слика 6.12 Процентуално смањење УМ у мешавинама M1 – M4 и M9 - M12

Са слике 6.12, се види да је код свих мешавина дошло до смањења УМ од 5.2 % до 24.6 % у односу на почетак процеса.

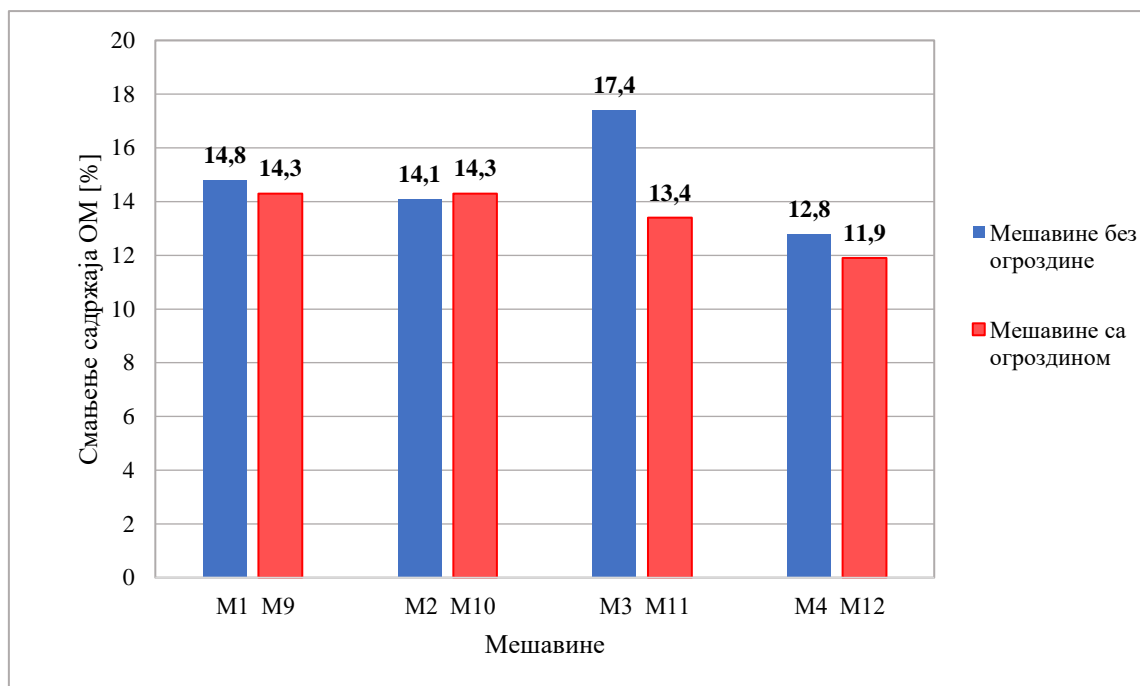
Код мешавина без огроздине највеће смањење УМ је забележено у мешавинама са ОХ (M1) и ЖЕ (M2), што се може објаснити чињеницом да су ови ко-супстрати подложнији разградњи. Код осталих мешавина, M3 и M4 смањење је износило од 5,6 % до 15,3 %.

На основу добијених резултата, слика 6.12, може се уочити да присуство огроздине доприноси смањењу УМ у мешавинама са ОХ (M9), ЖЕ (M10), као и у мешавини са свим ко-супстратима (M12). Овај ефекат се може приписати повољним условима за интензивнију микробиолошку активност и разградњу ОО. Осетно ниска промена УМ забележена је у мешавини M11 (5,2%), која садржи ПС, а може се повезати са повећаним садржајем теже разградивих компоненти које потичу од огроздине и ПС.

На основу напред наведеног се може се закључити да промена УМ није само последица компоненти које се третирају. Она у значајној мери зависи и од услова средине, као што су температура и порозност мешавине.

#### 6.1.2.4.2 Промена садржаја органске материје

Као што је већ поменуто, садржај ОМ је одређиван како би се додатно потврдило да је дошло до разградње ОО. Добијени резултати представљају процентуално смањење ОМ у мешавинама са и без огроздине у односу на почетак процеса, слика 6.13.



Слика 6.13 Процентуално смањење садржаја ОМ у мешавинама M1- M4 и M9 - M12

Са слике 6.13 се види да је смањење ОМ код мешавина без и са присуством огроздине у опсегу од 11,9 % до 17,4 % у односу на почетак процеса.

Код мешавина без огроздине (M1 – M4), слика 6.13, забележено је значајно смањење ОМ. Веома високо смањење ОМ остварено је у мешавини M3 и износи 17,4 %. Према литературним подацима, ова промена се може повезати са виским садржајем ОМ у мешавини [179]. Код осталих мешавина, смањење износи 12,8 % и 14,8 %.

Добијени резултати за мешавине са огроздином (M9 – M12), слика 6.13, упућују да је највеће смањење ОМ забележено у мешавинама са ОХ (M9) и ЖЕ (M10), а износи 14,3 % за обе. Присуством више порозних компоненти (ПС и огроздине) у мешавинама M11 и M12 долази до мањег смањења ОМ, као што је приказано на слици 6.13.

Сличне резултате је добио Paradelo са сарадницима при компостирању ООИВ. Према њиховом објашњењу до већег смањења ОМ није дошло због састава структуре компоненти које се третирају [104].



Упоређивањем мешавине без (M1 – M4) и са огроздином (M9 – M12) се може закључити да додавањем огроздине у мешавине долази до мање разградње ОО у односу мешавина без огроздина.

#### 6.1.2.5 Промена садржаја угљеника, азота и односа угљеника према азоту

Елемнети С, N и односа C/N у мешавинама подвргнутим компостирању представљају кључне параметре који одређују почетак и даљи ток процеса. Њихова улога огледа се у обезбеђивању енергетских и нутритивних потреба неопходних за метаболичке активности микроорганизама, који су одговорни за разградњу ОО. На почетку процеса, висока концентрација С је од суштинског значаја, јер пружа неопходну енергију за раст и размножавање микроорганизама, као и за иницирање механизма разградње. Како процес напредује, потреба за С постепено опада, док садржај N расте, с обзиром на његову улогу у синтези протеина и изградњи нових микроорганизама. Смањење садржаја С и повећање садржаја N током активне фазе процеса одвијају се по одређеној законитости, која се може пратити кроз однос C/N. На почетку процеса овај однос се креће у опсегу од 25,0 до 35,0, док на крају активне фазе опада, што указује да је дошло до разградње ОО и почетка процеса стабилизације.

Због тога се ови параметри сматрају индикаторима разградње ОО и напретка процеса компостирања.

Садржаји С и N су одређени у сувом узорку, однос C/N је одређен рачунски. Добијени резултати су приказани у табели 6.4.

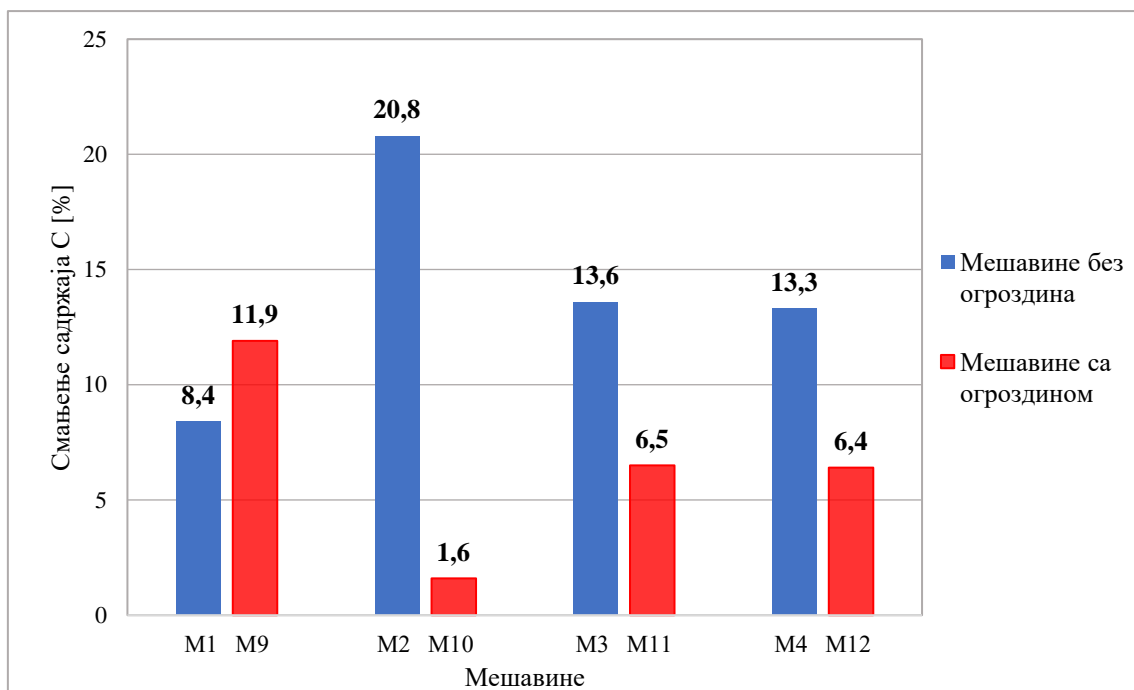
**Табела 6.4** Промена садржаја С, N и односа C/N у мешавинама

| Дани | 0               |      | Смањење<br>С<br>[%] | 28              |     | Повећање<br>N<br>[%] | 0    |      | 28   |  | Смањење<br>C/N<br>[%] |
|------|-----------------|------|---------------------|-----------------|-----|----------------------|------|------|------|--|-----------------------|
|      | С<br>[% у с.м.] |      |                     | N<br>[% у с.м.] |     |                      | C/N  |      |      |  |                       |
| M1   | 53,4            | 48,9 | 8,4                 | 2,1             | 2,2 | 4,5                  | 25,5 | 23,4 | 8,2  |  |                       |
| M2   | 49,0            | 38,8 | 20,8                | 1,9             | 3,8 | 100,0                | 25,0 | 10,1 | 59,6 |  |                       |
| M3   | 51,4            | 44,4 | 13,6                | 1,7             | 1,7 | 0                    | 29,9 | 25,6 | 14,3 |  |                       |
| M4   | 50,6            | 43,9 | 13,2                | 2,0             | 3,8 | 90,0                 | 25,2 | 11,5 | 53,7 |  |                       |
| M9   | 51,7            | 45,5 | 11,9                | 2,1             | 3,2 | 52,4                 | 25,1 | 14,1 | 43,8 |  |                       |
| M10  | 47,1            | 46,3 | 1,6                 | 1,8             | 2,1 | 16,6                 | 25,3 | 22,2 | 12,2 |  |                       |
| M11  | 50,7            | 47,4 | 6,5                 | 1,6             | 2,1 | 31,2                 | 31,6 | 22,7 | 28,1 |  |                       |
| M12  | 49,3            | 46,1 | 6,4                 | 1,9             | 3,7 | 94,7                 | 25,1 | 12,3 | 50,9 |  |                       |

Детаљна дискусија добијених резултата је приказана у даљем тексту.

### 6.1.2.5.1 Промена садржаја угљеника

У циљу јасније интерпретације резултата, промена садржаја С у мешавинама са и без огроздине приказана је у виду процентуалног смањења у односу на почетну вредност. Добијени резултати приказују смањење након 28 дана, слика 6.14.



Слика 6.14 Промена садржаја С у мешавинама M1 – M4 и M9 – M12

Са слике 6.14 се види да је код свих мешавина дошло до смањења садржаја С од 1,6 % до 20,8 %, што потврђује да је дошло до разградње ОО.

Код мешавина без огроздине (M1 – M4), слика 6.14, највеће смањење је постигнуто код мешавине са ЖЕ (M2) од 20,8%. Подаци из литературе указују да до овако високог смањења може доћи због појаве анаеробних услова услед недовољне порозности мешавине као и високе разградње ОМ [180]. Код осталих мешавина смањење је у опсегу од 8,4 % до 13,6 %. Сличне резултате је добио Fernandez са сарадницима при компостирању отпада од маслина [100].

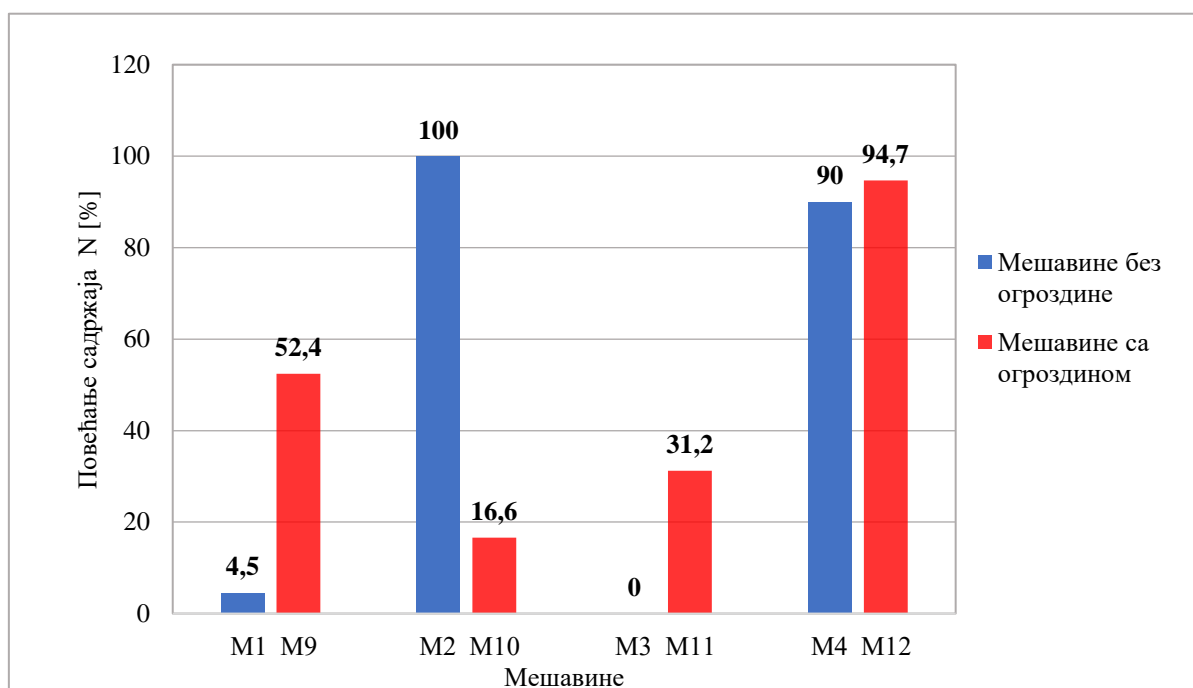
Насупрот томе, код мешавина које садрже огроздину (M9 - M12), слика 6.14, смањење С је знатно мање, а креће се у опсегу од 1,6 % до 11,9 %.

Овако нижи пад С је у сагласности са објашњењем које је добио Ye са сарадницима [181]. Према резултатима њиховог истраживања мала промена садржаја С је последица услова процеса, и то ниске рН вредности и вишег садржаја воде, као и присуства огроздина које су теже разградиве.

Упоређивањем мешавина са и без огроздине може се закључити да је додавање огроздина имало позитиван утицај само код мешавине са ОХ (М9). У осталим мешавинама, додавање огроздине је имало негативан утицај, при чему је најизраженије код мешавине са ЖЕ (М10).

#### 6.1.2.5.2 Промена садржаја азота

Процентуална промена N у мешавинама без и са огроздином приказана је на слици 6.15. Добијени резултати представљају процентуалну промену у односу на почетак процеса.



Слика 6.15 Промена садржаја N у мешавинама М1- М4 и М9 – М12

Резултати упућују да је код већине мешавина дошло до повећања садржаја N од 4,5 % до 100,0 % на крају ФХ.

Слика 6.15 показује да у мешавинама М1 – М4 промена садржаја N није једнозначна. Код мешавина М2 и М4 садржаја N је већи за 100,0 % и 90,0 %, редом. Ови резултати указују да је присуство лакоразградивих компоненти утицало на повећање N услед смањења УМ [36]. У мешавини М3, није дошло до промене садржаја N. Оваква промена се може повезати са условим процеса као што су ниска рН вредност и виши садржај воде, који утичу на задржавање N током компостирања и смањују његове губитке [182].

Међутим, у мешавинама М9 – М12, слика 6.15, пораст садржаја N је забележен у свим случајевима. Примећује се да је код М12 садржај N већи за 94,7 % у односу на почетак. Нешто нижи пораст забележен је код осталих мешавина, од 16,6 % до 52,4 %. Према литературним



подацима, оваква промена може настати због процеса трансформације N из једне форме у другу [183]. Код ових мешавина, смањење УМ је било значајано, што представља додатно објашњење за пораст садржаја N.

Упоређивањем мешавина са и без огроздине може се закључити да је додавање огроздина имало позитиван утицај у свим мешавинама. Изузетак су мешавине са ЖЕ (M10) где је дошло до мањег пораста садржаја N.

#### **6.1.2.5.3 Промена односа угљеника према азоту**

Као што је већ речено, однос C/N је битан параметар када се прати процес разградње ОО. На почетку процеса однос C/N буде између 25,0 и 35,0 због обезбеђивања довољне енергије за почетак и даљи ток процеса. У даљем току процеса треба да опада и достигне нижу вредност, што представља доказ да је дошло до трансформације.

Однос C/N одређен је рачунским путем, на основу садржаја C и N у мешавинама. Резултати промене односа C/N су приказани у табели 6.4. Дате су вредности за почетак и крај активне фазе.

Приложени резултати у табели 6.4 показују да су све мешавине имале одговарајући однос C/N на почетку процеса, чиме су створени услови за покретање почетка трансформације ОМ.

Када се ради о мешавинама без огроздине (M1 – M4) примећује се да је код две мешавине дошло до значајне промене односа C/N. У мешавини са ЖЕ (M2) однос C/N износи 10,1, док је у мешавини свих ко-супстрата (M4) 11,5. Ове вредности су у складу са вредностима за крај процеса [184]. У мешавинама M1 и M3, мешавинама са ОХ и ПС, однос C/N се није много смањио и износи 23,4 и 25,6, редом. Добијене вредности указују да се процес трансформације ОМ није завршио, односно, није прешао у завршну фазу.

Код мешавина са огроздином (M9 – M12), табела 6.4, види се да однос C/N није једнозначан. Код мешавина са ОХ и свим ко-супстратима (M9 и M12) вредности односа C/N су 14,1 и 12,3, редом, што упућује да се процес налази у финалној фази (фази сазревања). Код мешавина са ЖЕ (M10) и ПС (M11) уочава се да је однос C/N и даље висок и износи 22,2 и 22,7, редом. Ово говори да и код ових мешавина процес трансформације ОМ још увек није завршен.



Сличне резултате су добили истраживачи Bustamnte, Paradelo и Hungria при компостирању ООИВ са другим врстама ОО. Њихове вредности односа С/Н на крају активне фазе износиле су 15,0, 30,0, и 11,6 редом [77] [104] [114].

Упоредивањем резултата за оба сценарија, без и са огроздином, може се видети да је присуство огроздина утицало позитивно код мешавина са ОХ (М9) и ПС (М11), док код мешавина са ЖЕ (М10) и са свим ко-супстратима (М12), огроздина је негативно утицала.

#### **6.1.2.6 Крајња дискусија резултата припремне фазе**

У овом поглављу је извршена упоредна анализа и дискусија промена параметара током процеса компостирања мешавина без и са присуства огроздина. Циљ анализе је био избор оптималних ко-супстрата који ће бити разматрани у другом делу експерименталног истраживања.

Параметри који су посматрани као показатељи да је дошло до процеса разградње обухватају промену УМ, садржаја ОМ, С и N у мешавини. Такође су праћене промене температуре и рН вредности као индикатори испуњености постављених критеријума, на основу којих ће бити извршен избор мешавина за даље истраживање.

Анализом промене садржаја УМ, ОМ и С у посматраним мешавинама, приказаних у поглављима 6.1.2.3 и 6.1.2.6, може се закључити да је у свим посматраним мешавинама дошло до њиховог смањења. Ово указује да је дошло до разградње ОМ, имајућу у виду напред наведено објашњење да је том приликом дошло до емисије гасова и издвајање процедурних вода у околину. Пораст садржаја N забележен је у већини мешавина што се може и очекивати ако се зна да је овај елемент само делимично емитован у околину, па се његова концентрација у смањеној УМ морала повећати. Овако добијени резултати, представљају још један од параметара који потврђује да је дошло до декомпозиције ОМ.

Параметри попут промене температуре и рН вредности током периода у активној фази и ФХ би требало да дају одговор које мешавине испуњавају предвиђене услове. Ти услови обухватају што краће трајања киселе фазе (када је рН вредност виша од 5,0) и постизање термофилних услова, што је приказано у поглављу 5. Имајући у виду сложеност процеса компостирања где су најсложенији односи између температуре и рН вредности, у наставку је извршена анализа њиховог међусобног утицаја на мешавине без и са присуством огроздина.

У случају мешавине са ОХ (М1), кисела фаза је трајала 14 дана, а притом нису постигнути термофилни услови. Међутим, додавањем огроздине, мешавина М9, услови су побољшани. Дошло је до скраћења киселе фазе на 12 дана и постизања термофилних услова. Ово указује



да је код мешавина са ОХ могуће започети процес компостирања и његово одвијање током активне фазе и ФС када се мешавини дода огроздина.

За случај мешавине са ЖЕ (М2), кисела фаза је трајала 17 дана, а процес се одвијао у мезофилним условима. Додавањем огроздине овој мешавини, М10, кисела фаза се скратила на 6 дана. Постигнути су и термофилни услови у трајању од 5 дана. Овако добијени резултати говоре да мешавина М10 може започети процес компостирања и његово даље одвијање током АФ и ФХ када се мешавини дода огроздина. Овакав позитиван ефекат потиче од порозности масе.

Код мешавине са ПС (М3), кисела фаза је трајала 22 дана, а постигнута је термофилна фаза само на почетку процеса. Укључивањем огроздине у мешавину (М11), дошло је до скраћења киселе фазе на 17 дана, али је дошло до изостанка термофилних услова. Овако добијени резултати упућују на то да мешавина М11 може започети процеса компостирања, али га не може наставити током активне фазе и ФС. Присуство огроздине у овом случају је имало негативан утицај због превелике порозности мешавине.

У мешавини са свим ко-супстратима, М4, кисела фаза је трајала 10 дана и постигнути су термофилни услови у трајању од 5 дана. Додавањем огроздине мешавини (М12), кисела фаза се скратила само за 1 дан (трајала је 9 дана), а термофилни услови су се погоршали. Добијени резултати указују да мешавина М12 може започети процес компостирања, али да присуство огроздине има негативан утицај у даљем току, што је елиминише за даље истраживање. Међутим, мешавина М4 показује добар потенцијал за даљу анализу.

Из претходно спроведене анализе може се закључити да мешавине у којима није било присуство огроздине, односно мешавине М1 и М2, нису постигле оптималне услове за почетак и даљи ток процеса компостирања. Насупрот томе, процес се успешно одвијао у мешавини са свим ко-супстратима (М4), док се у мешавини са ко-супстратом ПС (М3) процес одвијао спорије. Додавање огроздине, као порозне компоненте, показало је различит утицај. У мешавинама без присуства ПС (мешавине са ОХ и ЖЕ), присуство огроздине позитивно је утицало на процес разградње ОМ. С друге стране, у мешавинама које су садржале ПС (М11 и М12), додавање огроздине негативно је утицало на интензитет разградње. На основу наведеног, може се закључити да је у мешавинама комине и ко-супстрата неопходно постићи одговарајући ниво порозности који ће омогућити адекватан транспорт ваздуха и воде. Ово представља кључне предуслове за несметано одвијање микробиолошких активности. Међутим, уколико је порозност прекомерна (што је уочено код мешавина М3 и М11), долази до пада интензитета ових активности услед превелике порозности мешавине.



На основу спроведене анализе промене параметара за даљи ток истраживања треба узети у разматрање мешавине М4, М9 и М10.

## 6.2 Резултати и дискусија целог тока процеса компостирања

У овом поглављу приказани су резултати и дискусија добијени праћењем целокупног тока процеса компостирања мешавина које су у припремној фази II испуниле додатне критеријуме за избор мешавина. Ту спадају једна мешавина без огроздине, мешавина у којој се налазе сви ко-супстрати (М4) и две мешавине у чијем саставу улази и огроздина (М9 и М10).

Да би се пратио утицај различитих удела огроздине у мешавинама на процес компостирања и квалитет добијеног производа, *Сценарио II* је проширен. Поред *Сценарија II -2*, где улазе комина, ко-супстрат и 25,0 % огроздине (мешавине М9 и М10), додати су и други сценарији. *Сценарио II – 1*, где је мешавинама комине и ко-супстрата додато 15,0 % огроздине (мешавине М5 и М6), док *Сценарио II – 3*, где је мешавинама додато 35,0 % огроздине (М13 и М14). У табели 6.5 је приказан састав мешавина за испитивање целог тока процеса.

Табела 6.5 Састав мешавина за цео ток процеса

| Сценарио            | Сценарио I | Сценарио II     |       |                 |       |                 |       |
|---------------------|------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                     |            | Сценарио II - 1 |       | Сценарио II - 2 |       | Сценарио II - 3 |       |
| Мешавина            | М4         | М5              | М6    | М9              | М10   | М13             | М14   |
| Удео Ог             | 0%         | 15,0%           | 15,0% | 25,0%           | 25,0% | 35,0%           | 35,0% |
| Ко (%) <sup>a</sup> | 76,0       | 65,0            | 65,0  | -               | 55,0  | 44,0            | 44,0  |
| ОХ (%) <sup>a</sup> | 10,0       | 20,0            | -     | 20,0            | -     | 21,0            | -     |
| ЖЕ (%) <sup>a</sup> | 10,0       | -               | 20,0  | -               | 20,0  | -               | 21,0  |
| ПС (%) <sup>a</sup> | 4,0        | -               | -     | -               | -     | -               | -     |
| Ог (%) <sup>a</sup> | -          | 15,0            | 15,0  | 25,0            | 25,0  | 35,0            | 35,0  |

a – влажна основа

У табели 6.6 су приказани исти они параметри почетних мешавина као и у припремној фази. Праћењем ових параметара се може сагледати ток процеса, њихов појединачан, али и синергијски утицај као и потврда да ли је дошло до разградње ОМ. Додатни параметри који су узети у разматрање су садржај лигнина, целулозе и хемицелулозе, а искоришћени су како би се пратио њихов степен разградње током процеса. Такође, посматране су и неорганске форме нутријената у виду јона - N, P и K, односно, њихова промена током процеса компостирања.

Табела 6.6 Параметри мешавина за цео ток процеса

| Сценарио                                 | Сценарио I | Сценарио II     |       |                 |       |                 |       |
|--|------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|  |            | Сценарио II - 1 |       | Сценарио II - 2 |       | Сценарио II - 3 |       |
| Мешавина                                 | M4         | M5              | M6    | M9              | M10   | M13             | M14   |
| Удео Ог                                  | 0%         | 15,0%           | 15,0% | 25,0%           | 25,0% | 35,0%           | 35,0% |
| Маса (kg) <sup>a</sup>                   | 3,0        | 3,0             | 3,0   | 3,0             | 3,0   | 3,0             | 3,0   |
| C/N <sup>b</sup>                         | 25,1       | 25,0            | 25,2  | 25,1            | 25,3  | 25,5            | 25,1  |
| Вода (%) <sup>b</sup>                    | 64,8       | 68,8            | 60,1  | 62,1            | 63,3  | 61,9            | 56,4  |
| ОМ (%) <sup>b</sup>                      | 93,2       | 95,9            | 90,7  | 96,9            | 90,5  | 95,9            | 89,3  |
| pH вредност                              | 5,6        | 6,1             | 5,4   | 5,0             | 6,9   | 5,7             | 4,9   |
| Лигнин [g/100 g с.м.] <sup>b</sup>       | 12,8       | 17,6            | 13,3  | 16,6            | 13,2  | 18,1            | 14,6  |
| Целулоза [g/100 g с.м.] <sup>b</sup>     | 23,8       | 21,0            | 22,2  | 19,0            | 20,2  | 16,8            | 18,1  |
| Хемицелулоза [g/100 g с.м.] <sup>b</sup> | 24,2       | 25,6            | 26,4  | 22,1            | 27,7  | 27,0            | 29,3  |
| $NO_3^-$ [g/kg у с.м.] <sup>b</sup>      | 0,02       | 0,02            | 0,02  | 0,01            | 0,02  | 0,02            | 0,01  |
| $NH_4^+$ [g/kg у с.м.] <sup>b</sup>      | 0,6        | 0,9             | 0,8   | 1,0             | 1,0   | 1,1             | 1,2   |
| $P_2O_5$ [g/kg у с.м.] <sup>b</sup>      | 0,9        | 1,1             | 0,9   | 1,16            | 0,9   | 1,1             | 0,9   |
| $K_2O$ [g/kg у с.м.] <sup>b</sup>        | 33,1       | 34,5            | 40,9  | 35,3            | 41,7  | 37,8            | 42,4  |

а – влажна основа, б – сува основа

На слици 6.17 је приказан изглед мешавина које су посматране у овом делу анализе.



а) M4

б) M5

в) M6

г) M9



д) M10

њ) M13

е) M14

Слика 6.16 Приказ мешавина за цео ток; а)M4; б)M5; в)M6; г) M9; д)M10; њ)M13; е)M14;



У потпоглављу 6.2.1 су приказани резултати и дискусија резултата мешавине комине и свих ко-супстрата (М4). У потпоглављу 6.2.2 су приказани резултати и дискусија мешавина комине, ко-супстрата и различитог садржаја огроздине, М5, М6, М9, М10, М13 и М14. Са друге стране у потпоглављу 6.2.3 кроз вредности одговарајућих параметара утврђено је да ли добијени производи разградње мешавина могу да се користе као оплемењивачи земљишта. У потпоглављу 6.2.4 је извршена генерална дискусија резултата праћења целог тока процеса. На крају, у последњем потпоглављу, 6.3, извршена је верификација математичког модела.

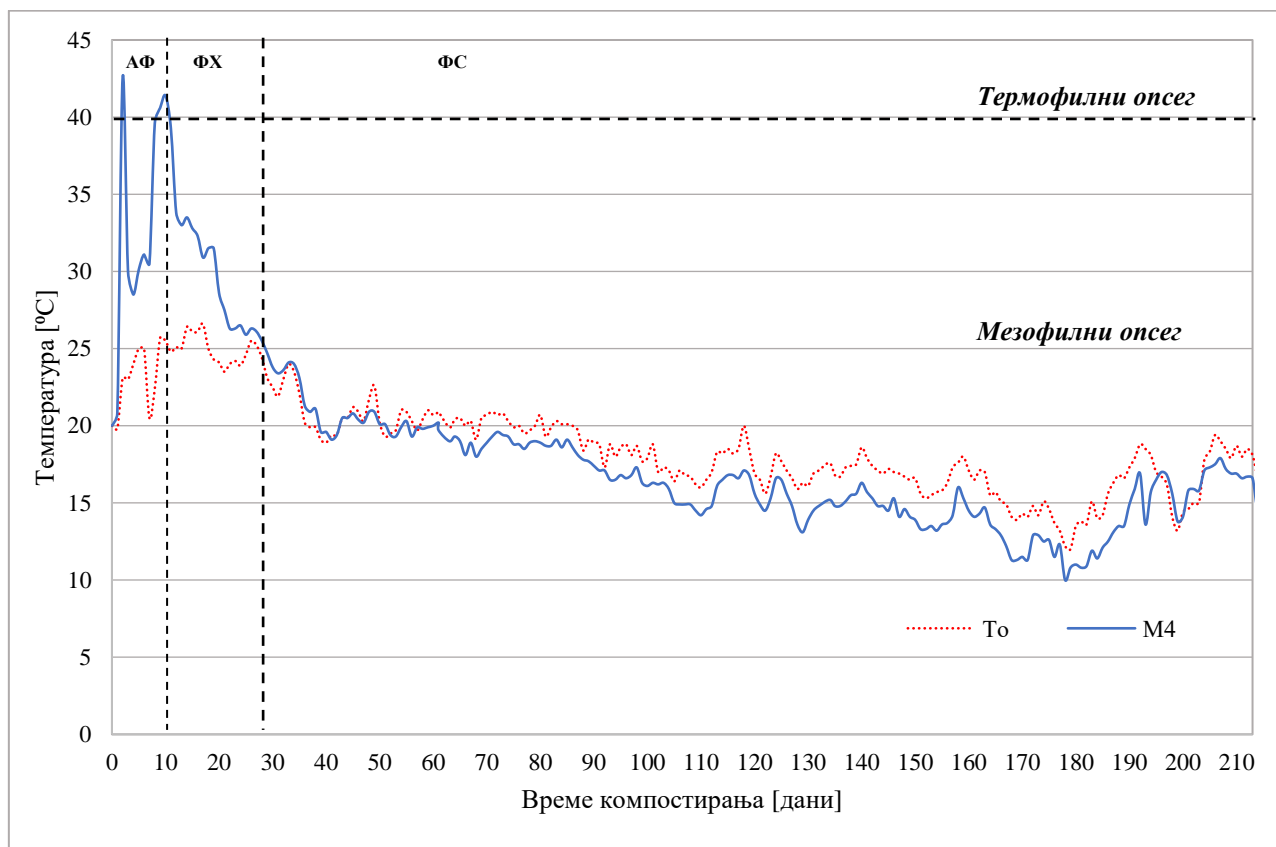
## 6.2.1 Мешавине комине и ко-супстрата без огроздине

У овом делу поглавља приказани су резултати и дискусија до којих се дошло праћењем мешавине комине и свих ко-супстрата (М4). Добијени резултати су приказани преко дијаграма промене у зависности од времена како би се уочиле карактеристичне промене које се дешавају током процеса компостирања.

### 6.2.1.1 Промена температуре

Познавање промене температуре је од великог значаја како током активне фазе (АФ) тако и током фазе стабилизације која обухвата фазу хлађења (ФХ) и фазу сазревања (ФС). На основу њене вредности може се утврдити у којој се фази процес налази, односно, да ли су постигнути услови за почетак термофилне фазе и као ФС што игра битну улогу при разматрању промена које се у њима дешавају. Такође, на основу промене температуре је могуће утврдити да ли је процес трансформације ОМ дошао до краја.

С обзиром да су карактеристичне промене температуре током АФ и ФХ анализирани у поглављу 6.1.2.1, у овом делу је фокус стављен на утврђивању да ли су све фазе биле заступљене како би се утврдило да ли је дошло до разградње ОМ. Посебна пажња је била посвећена дужини трајања ФС с обзиром да се у њој одигравају финалне трансформације ОМ. Као граница за завршетак АФ узима се почетак опадања температуре, односно тренутак када температура падне испод 40,0 °С, што означава крај термофилних услова на крају секундарне термофилне фазе. Ова вредност температуре уједно представља и почетак ФХ, чији се крај дефинише тренутком када температура достигне вредност температуре околине ( $T_0$ ), што уједно означава и почетак ФС, која траје до завршетка процеса. Дијаграм промене температуре приказан је на слици 6.17.



Слика 6.17 Промена температуре мешавине М4

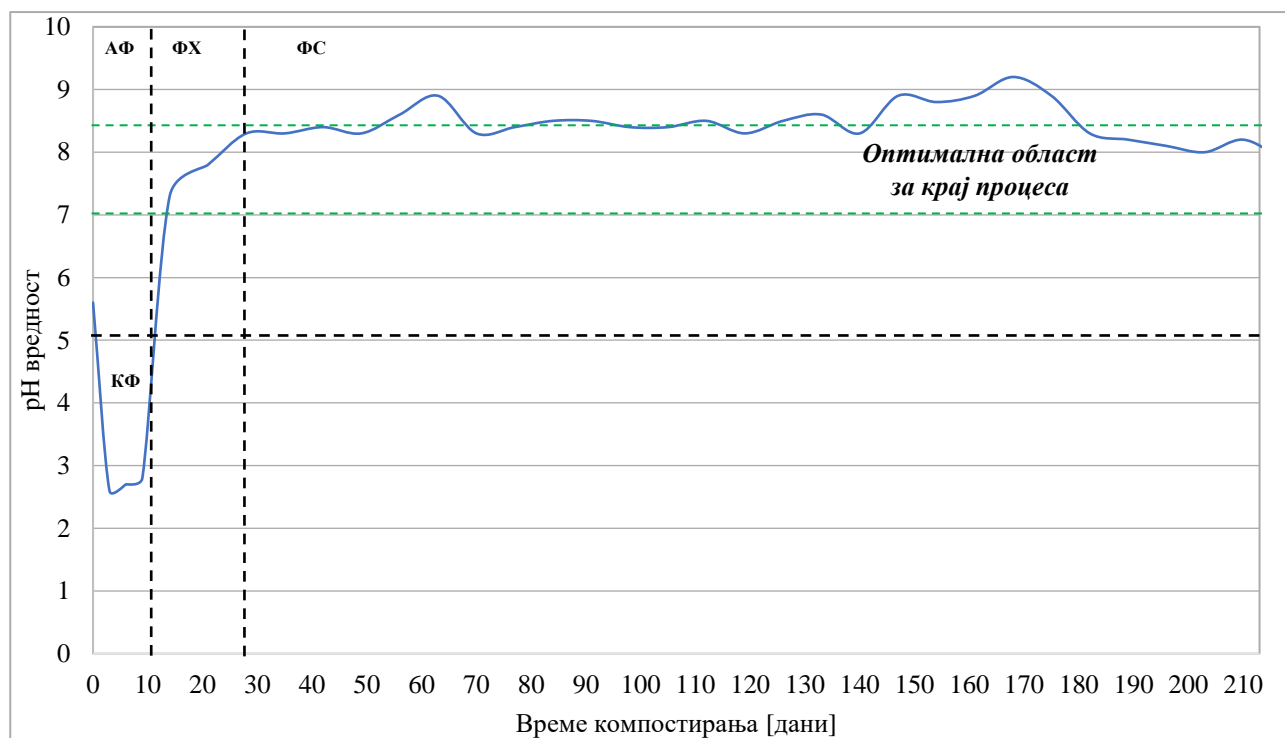
На основу промене температуре мешавине М4, приказане на слици 6.17, може се закључити да су биле заступљене све фазе. Активна фаза је трајала до 10. дана, ФХ од 11. до 28. дана након чега је наступила ФС која је почела 29. дана и трајала до краја процеса компостирања. Са слике се види и да је температура мешавине стално била нижа од температуре околине, што указује да се није одвијала разградња већ стабилизација присутне ОМ. Ово указује да је процес успешно спроведен и да је процес трансформације ОМ завршен.

### 6.2.1.2 Промена рН вредности

Имајући у виду да се прати цео ток процеса компостирања, приликом анализе рН вредности, пажња је посвећена њеним променама током ФС и вредностима на крају процеса. Као оптимална вредност за крај процеса је узет опсег од 7,0 до 8,5 [45] [46]. Дијаграм промене рН вредности приказан је на слици 6.18.

Резултати промене током активног дела и ФХ код мешавине М4 су већ описани (*Сценарио I*, поглавље 6.1.2.2). Запажа се да је током ФС, рН вредност наставила да расте, уз благо осциловање измерених вредности. Ово указује да процес разградње још увек траје. У даљем току, 168. дана је достигнута максимална рН вредност од 9,2. Даљим праћењем промене, након достизања максимума, рН вредност је кренула да опада и приближавала се

опсегу за крај процеса. На крају, измерена је вредност од 7,9 што је у опсегу за завршетак процеса, између 7,0 и 8,5 [46] [180].



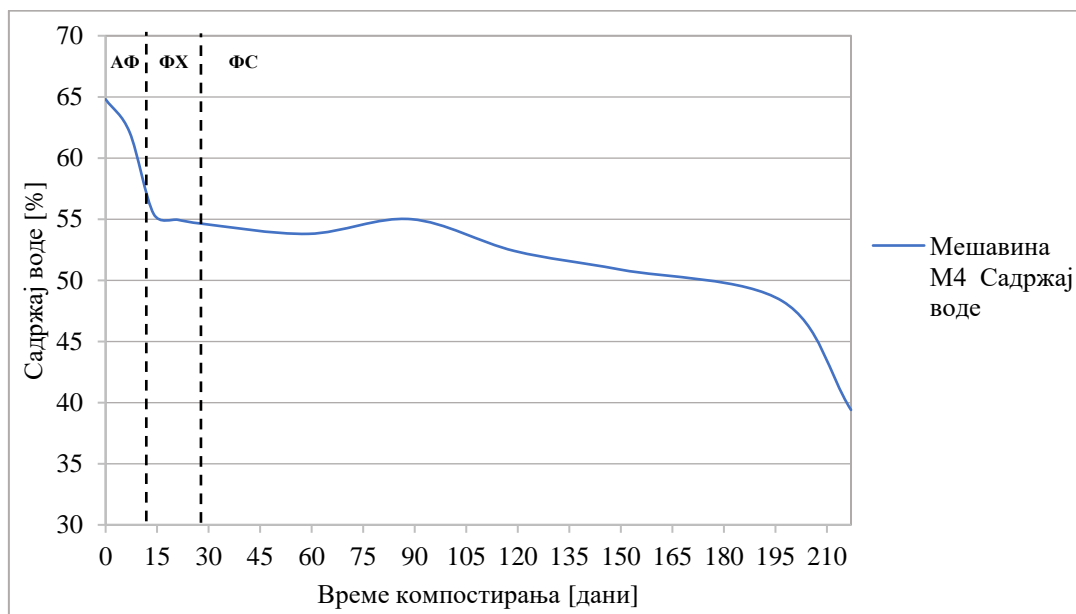
Слика 6.18 Промена рН вредности мешавине М4

Добијени резултати упућују на два закључка. Први, да је постигнута оптимална рН вредност за крај процеса, други, да је процес трансформације ОМ завршен.

### 6.2.2.1 Промена садржаја воде

Важности присуства одговарајућег садржаја воде и њеног утицаја на разградњу је детаљно описана у поглављима 2 и 6.1.2.3. Резултати промене садржаја воде током целог процеса приказани су на слици 6.19.

У овом делу фокус је био на праћењу садржаја воде у мешавини током целог процеса. Оптимални садржај воде за почетак процеса је од 40,0 % до 65,0 %, а за крај мање од 40,0 % [178] [180].



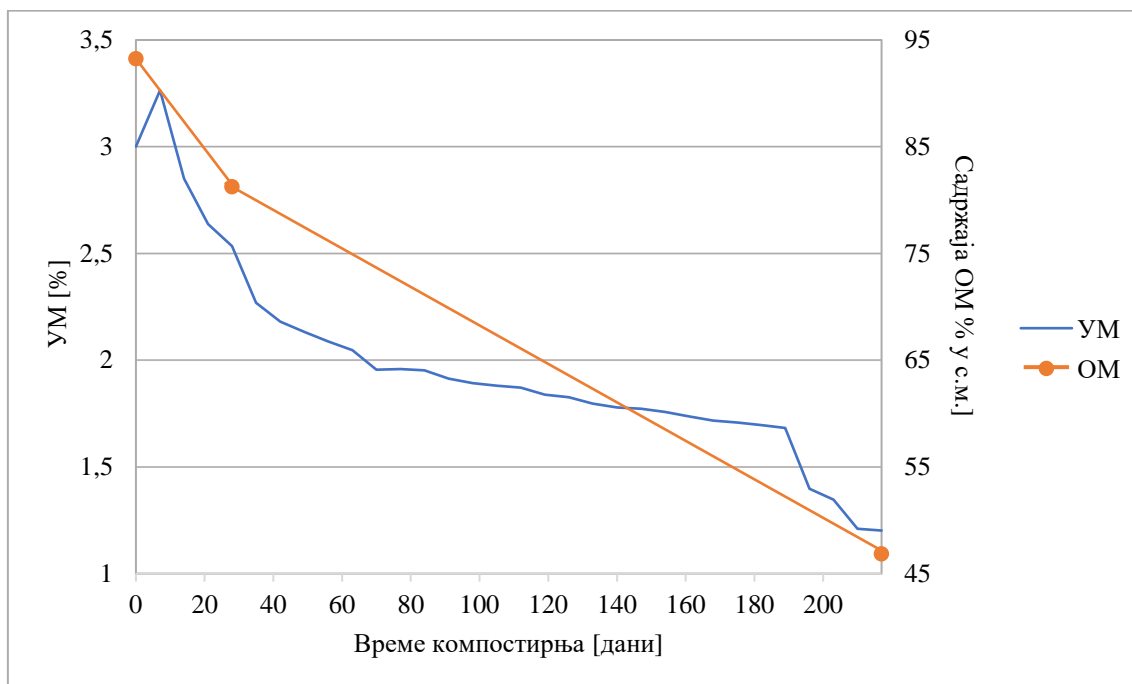
**Слика 6.19** Промена садржаја воде у мешавини М4

Са слике се може закључити да су задовољени услови за почетак и даљи ток процеса, тј. садржај воде је био у оптималном опсегу.

Даљом анализом, током ФС запажа се да је садржај воде био између 40,0 % и 55,0 %, што је нешто изнад од оптималног опсега од 45,0 % до 50,0 % [185], услед чега је дошло до губитка нутријената због веће влажности мешавине. Такође, види се и да је садржај воде током ФС био у сталном паду, посебно у периоду од 100. дана па до краја процеса. У литератури ова промена настаје у условима када долази до успоравања процеса, финалној разградњи теже разградивих материја и стабилизацији компоста [186] [40]. На крају процеса, садржај воде је износио 39,4 %. На основу добијених резултата се може закључити да је садржај воде био у оптималном опсегу дуж целог процеса и њена вредност на крају је у прописаним границама.

#### **6.2.2.2 Промена садржаја укупне масе и органске материје**

У циљу добијања потврде да је дошло до разградње ОО на крају процеса и у овом делу су праћене промена УМ и садржај ОМ. Добијени резултати промена приказани су на слици 6.20.



Слика 6.20 Промена УМ и ОМ мешавине М4

Резултати промене УМ, слика 6.20 показују да је дошло до смањења са 3,0 kg на 1,2 kg, односно за 60,0 %. Ова промена указује да је дошло до високог степена разградње.

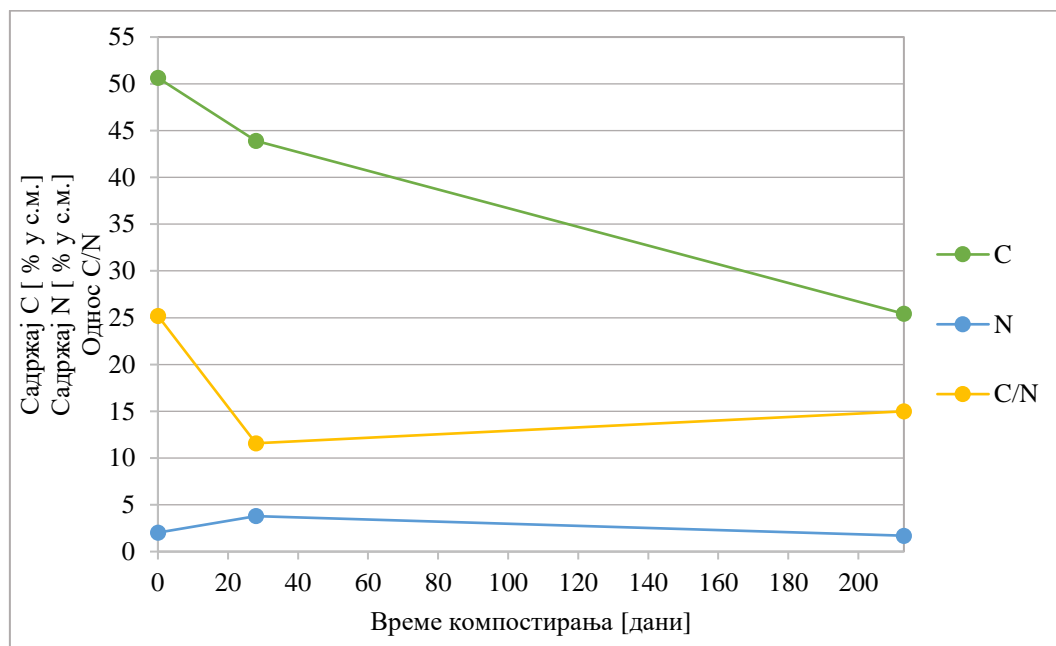
Према резултатима са слике 6.20, садржај ОМ је значајно опао, са 93,2 % на 46,8 % у сувој материји (с.м.), што је смањење од 49,7 %. Овако изражено смањење ОМ може се повезати са више фактора: високог садржаја ОМ који потиче од лако разградивих материја као што су масти, протеини и угљени хидрати тј. њиховој подложности разградњи, као и повољног односа C/N [179] [182]. У поређењу са литературним подацима, где је на крају процеса забележен садржај ОМ од 93,0 % с.м., добијене вредности у овом истраживању су ниже, што се може довести у везу са саставом мешавине и условима процеса компостирања [104].

На основу резултата промене садржаја УМ и ОМ може се закључити да је дошло до процеса разградње.

### 6.2.2.3 Промена садржаја угљеника, азота и односа угљеника према азоту

О важности параметара C, N и односа C/N за почетак и током активног дела процеса је дискутовано у поглављу 2 и 6.1.2.5. Међутим, многе студије показују да је подједнако важно њихово праћење дуж целог процеса. Пре свега, ово се односи на однос C/N који мора бити на крају процеса мањи од 20,0 [17] [96].

Резултати промена C, N и односа C/N су приказани на слици 6.21.



Слика 6.21 Промена садржаја C, N и односа C/N мешавине M4

Резултати приказани на слици 6.21 показују да је садржај C опао са почетних 50,6 % на 25,4 % у с.м., што представља смањење од 49,8 % и указује на висок степен разградње OM. Ansari са сарадницима је указао да до високог смањења C долази услед значајне редукације садржаја OM, што је у сагласности са добијеним резултатима у овом истраживању [187].

Такође, са слике се види да се садржај N током процеса смањио са 2,0 % на 1,7 %, у с.м., што представља смањење од 19,0 % у односу на почетну вредност, односно указује да је дошло до његовог губитка услед трансформација. Ова промена је у складу са литературним подацима, а може се повезати и са условима процеса, као што је виши садржај воде који је додатно допринео смањењу садржаја N током ФС [187] [188].

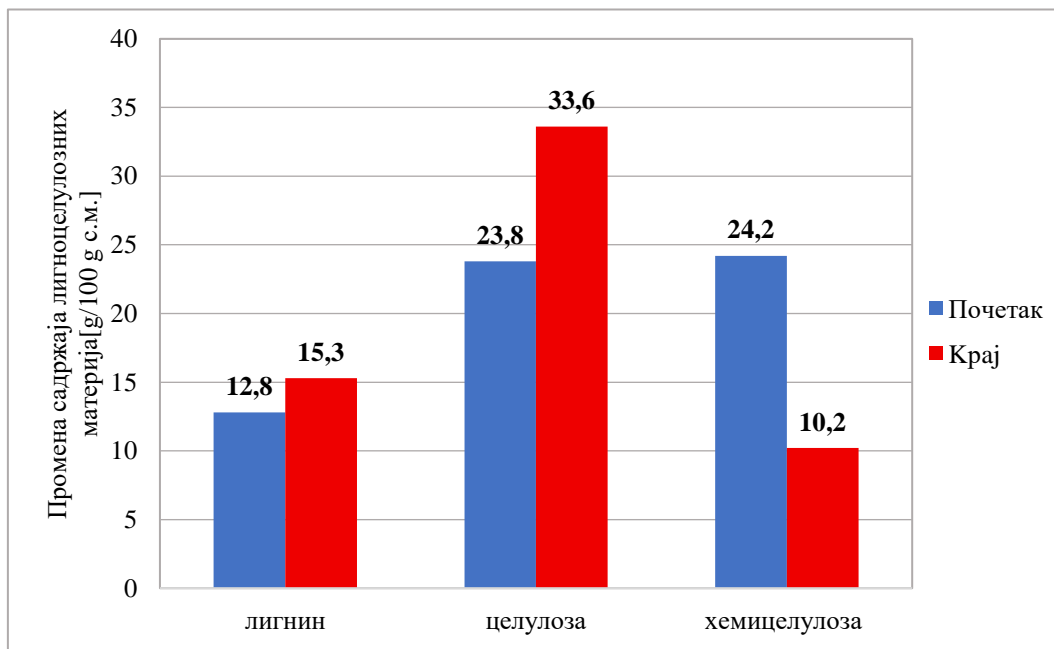
Однос C/N је опао са 25,2 на 15,0 у односу на почетак, што потврђује да је дошло до разградње. На крају процеса, вредност односа C/N износила је 15,0, што је у дозвољеним границама коју добијени компост треба да има [17] [96]. На основу добијених резултата може се закључити да је дошло до процеса разградње, који се огледа смањењем садржаја C и постизањем оптималног односа C/N.

#### 6.2.1.6 Промена садржаја лигноцелулозних материја

Као што је већ описано у поглављу 2, лигноцелулозне материје представљају структурну компоненту ОО, а састоје се од лигнина, целулозе и хемицелулозе. Током процеса компостирања, ове материје играју значајну улогу, пре свега у повећању порозности мешавине, али и као извор енергије услед високог садржаја C. Стога, један од циљева овог

дела истраживања јесте испитивање утицаја присуства различитих ко-супстрата у мешавини са комином на степен разградње лигноцелулозних компоненти.

Промена садржаја лигнина, целулозе и хемицелулозе изражена је у виду процентуалног смањења или повећања на крају процеса у односу на почетак процеса, слика 6.22.



Слика 6.22 Промена садржаја лигноцелулозних материја мешавине М4

Резултати приказани на слици 6.22 показују да је садржај лигнина повећан са 12,9 на 15,3 [g/100 g с.м.], а целулозе са 23,8 на 33,6 [g/100 g с.м.], што представља пораст од 18,6 % и 41,2 %, редом. Повећање садржаја лигнина и целулозе у УМ на крају процеса може се приписати комбинацији два фактора: њиховој слабој разградивости и смањењу УМ, што је додатно утицало на добијене резултате. Слично објашњење је дала Moldes која је пратила компостирање комине, што потврђује образложење које је дато у овом истраживању [42].

Што се тиче садржаја хемицелулозе, слика 6.22 показује да је дошло до њеног смањења са 24,3 на 10,2 [g/100 g с.м.], што представља смањење од приближно 58,0 % у односу на почетну вредност. Ова промена је последица својства хемицелулозе да је подложнија разградњи.

#### 6.2.1.7 Промена садржаја нутријената

Као што је већ описано у поглављу 2, нутријенти се, у зависности од количине која је неопходна биљкама, класификују на макро и микро елементе. Макронутријенти, као основни и најзначајнији елементи за раст и развој биљака, обухватају једињења N, P и K који морају бити у неорганској форми. Најзначајније неорганске форме нутријената укључују амонијум

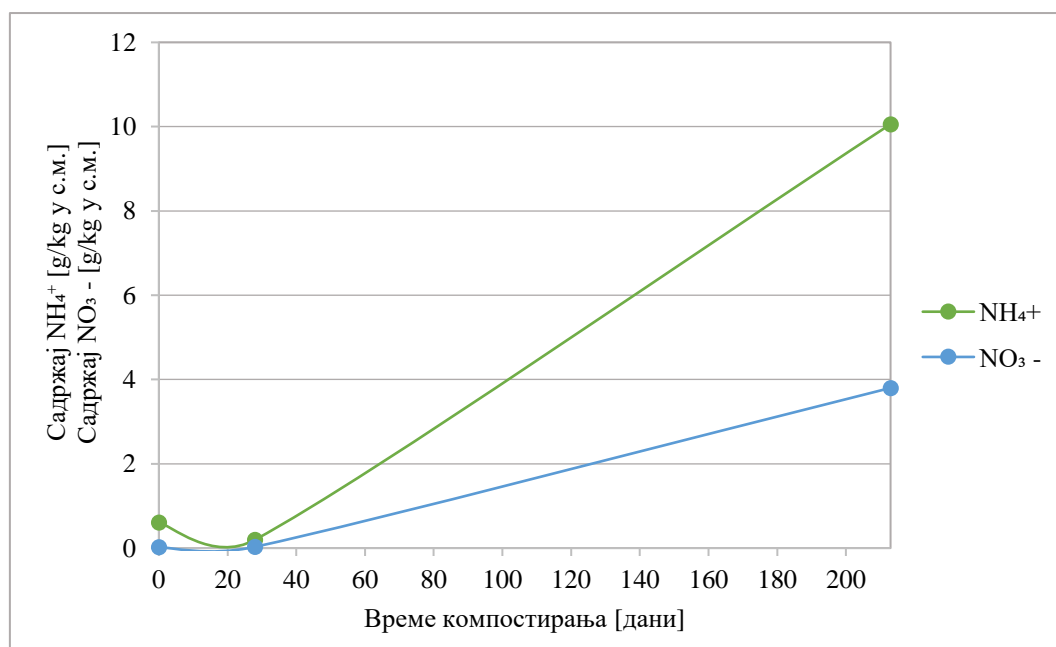
( $NH_4^+$ ) и нитратне ( $NO_3^-$ ) јоне, P у облику фосфор-пентоксида ( $P_2O_5$ ), као и K у облику калијум-оксида ( $K_2O$ ). Током процеса компостирања ОО долази до промена у концентрацијама ових једињења – њихов садржај може расти или опадати у зависности од иницијалног садржаја у ко-супстратима, као и услова вођења процеса.

Стога циљ овог дела истраживања је праћење промене садржаја наведених неорганских форми нутријената током компостирања у мешавини комине и ко-супстрата. Добијени резултати су приказани у даљем делу овог потпоглавља.

#### 6.2.1.7.1 Промена садржаја амонијум и нитратног јона и односа амонијума према нитрату

Као што је већ поменуто у поглављу 2, процес настајања N који је доступан биљкама подразумева његову трансформацију из органског у неорганске облике ( $NH_4^+$  и  $NO_3^-$ ) који су доступни биљкама. Због тога, у овом делу резултата, су приказане промене садржаја  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јона као и њиховог односа дуж целог тока процеса. Према литературним подацима, однос амонијум јона према нитратном јону ( $NO_3^-/NH_4^+$ ) мањи од 1,0, односно, постизање вредности од 0,16 указује на завршен процес трансформације N.

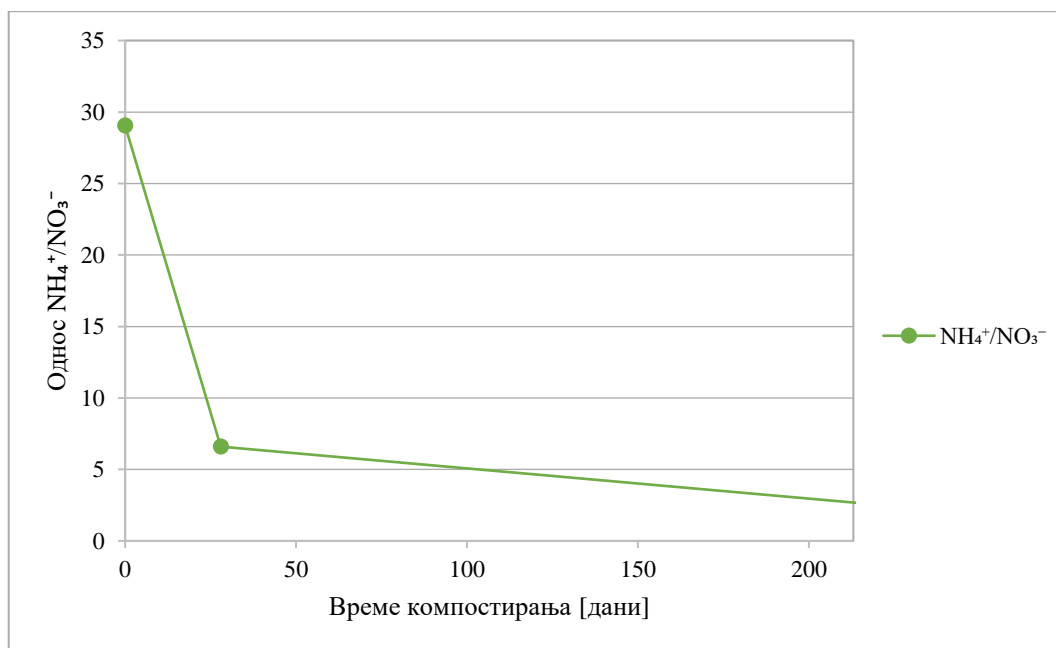
Резултати промене садржаја  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јона приказани су на слици 6.23, а резултати промене односа  $NO_3^-/NH_4^+$  приказани су на слици 6.24.



Слика 6.23 Промена садржаја  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јона мешавине M4

Са слике 6.23 се може уочити вишеструко повећање концентрације  $NH_4^+$  јона, са почетних 0,6 g/kg на 10,0 g/kg у с.м. услед трансформација органског у неоргански облик N

и смањења УК услед разградње ОМ [189] [190]. Овако добијени резултат није у складу са литературним подацима у којима се описује да долази до смањења садржаја  $NH_4^+$  јона услед даље трансформације у различите облике N [191]. У исто време, због интензивне разградње ОМ, смањења УМ као и трансформације  $NH_4^+$  дошло је до значајног повећања садржаја  $NO_3^-$  јона, слика 6.23 са 0,02 g/kg на 3,8 g/kg у с.м. Оваква промена  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јона резултирала је вишим односом  $NH_4^+/NO_3^-$ , што је приказано на слици 6.24.



Слика 6.24 Промена односа  $NH_4^+/NO_3^-$  мешавине М4

На основу резултата приказаних на слици 6.24, утврђено је да је током процеса дошло до смањења односа  $NH_4^+/NO_3^-$  са 29,0 на 2,6. Међутим, иако је забележен значајан пад, крајња вредност од 2,6 указује да није постигнут пожељан ниво мањи од 1,0, који се обично сматра индикатором зрелости компоста. Ово указује да је процес преласка органских у неорганске форме био интензиван, али да трансформација N није у потпуности завршена [192].

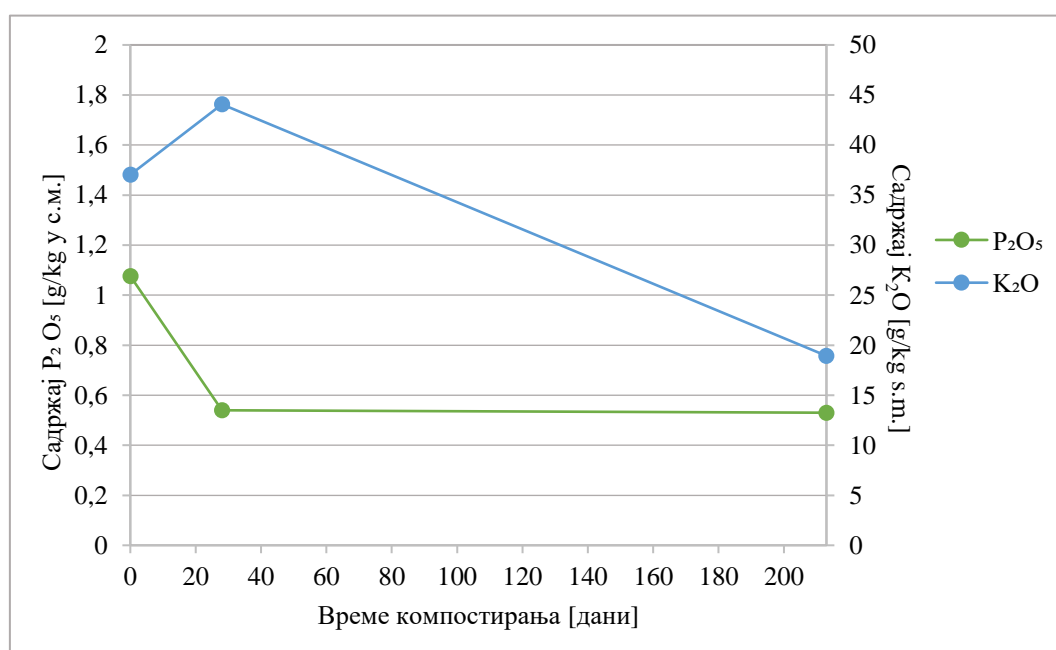
#### 6.2.1.7.1.2 Промене садржаја минералног фосфора и калијума

Када се говори о фосфору и калијуму, посматрају се њихове неорганске форме: P у виду фосфор-пентоксида ( $P_2O_5$ ) и K у виду калијум оксида ( $K_2O$ ). Као и код N, процес настајања неорганског P и K обухвата њихове трансформације из органске у неорганске облике.

Органски облици P најчешће се налазе у структури фосфолипида, нуклеинских киселина и органских фосфата. Током процеса компостирања, ови органски облици пролазе кроз микробиолошку разградњу, односно минерализацију, у ортофосфатне јоне или у  $P_2O_5$ .

Са друге стране, К у ОО углавном није везан у сложене органске облике, већ је присутан као растворљиви јон адсорбован на органским или минералним честицама. Током процеса компостирања, К се ослобађа услед разградње и процеса минерализације. Пошто је К веома мобилан и лако растворљив, његова концентрација у компосту зависи од почетног садржаја у ОО, као и од губитака кроз процедурне воде тј. испирањем услед повишеног садржаја воде. На крају процеса компостирања карактеристично је повећање садржаја К у односу на почетне вредности, што је последица смањења УМ и концентрационог ефекта.

У даљем делу, приказани су резултати промене  $P_2O_5$  и  $K_2O$  током целог процеса компостирања, слика 6.25.



Слика 6.25 Промена садржаја  $P_2O_5$  и  $K_2O$  мешавине М4

Према подацима са слике 6.25, примећује се да је садржај  $P_2O_5$  током процеса компостирања опао, са почетних  $1,1 \text{ g/kg}$  на  $0,5 \text{ g/kg}$  у с.м., што представља пад од приближно 54,5 %. Добијене промене могу се повезати са утицајем више параметара, као што су минерализација органског Р, смањење микроорганизама и условима процеса тј. високог садржаја воде и разградње ОМ. [173] [193] [194].

Резултати приказани на слици 6.25 показују да је садржај  $K_2O$  током АФ и ФХ компостирања растао, док је у ФС дошло до значајног смањења. Укупно, концентрација  $K_2O$  је опала са  $37,0 \text{ g/kg}$  на  $18,9 \text{ g/kg}$  у с.м., што указује на губитке током процеса, вероватно услед испирања у условима повишене влажности [173] [195]. Међутим, финални садржај  $K_2O$  је висок, што се може приписати његовој великој концентрацији у комини.



Овако добијени резултати наводе на закључак да на финални садржај  $P_2O_5$  и  $K_2O$  су у великој мери утицали почетни садржаји ових нутријената у мешавини као и услови процеса, пре свега садржај воде.

## 6.2.2 Мешавине комине, ко-супстрата и огроздине

У овом делу поглавља су приказани резултати до којих се дошло праћењем најбољих мешавина комине и ко-супстрата при различитим уделима огроздине. Најбоље резултате су показале мешавине када су ко-супстрати ОХ и ЖЕ. Удео огроздина од 15,0 %, 25,0 % и 35,0 % узет је у разматрање с циљем одређивања оптималне количине која се може додати у мешавине без нарушавања тока компостирања.

Добијени резултати су приказани помоћу дијаграма промене по времену.

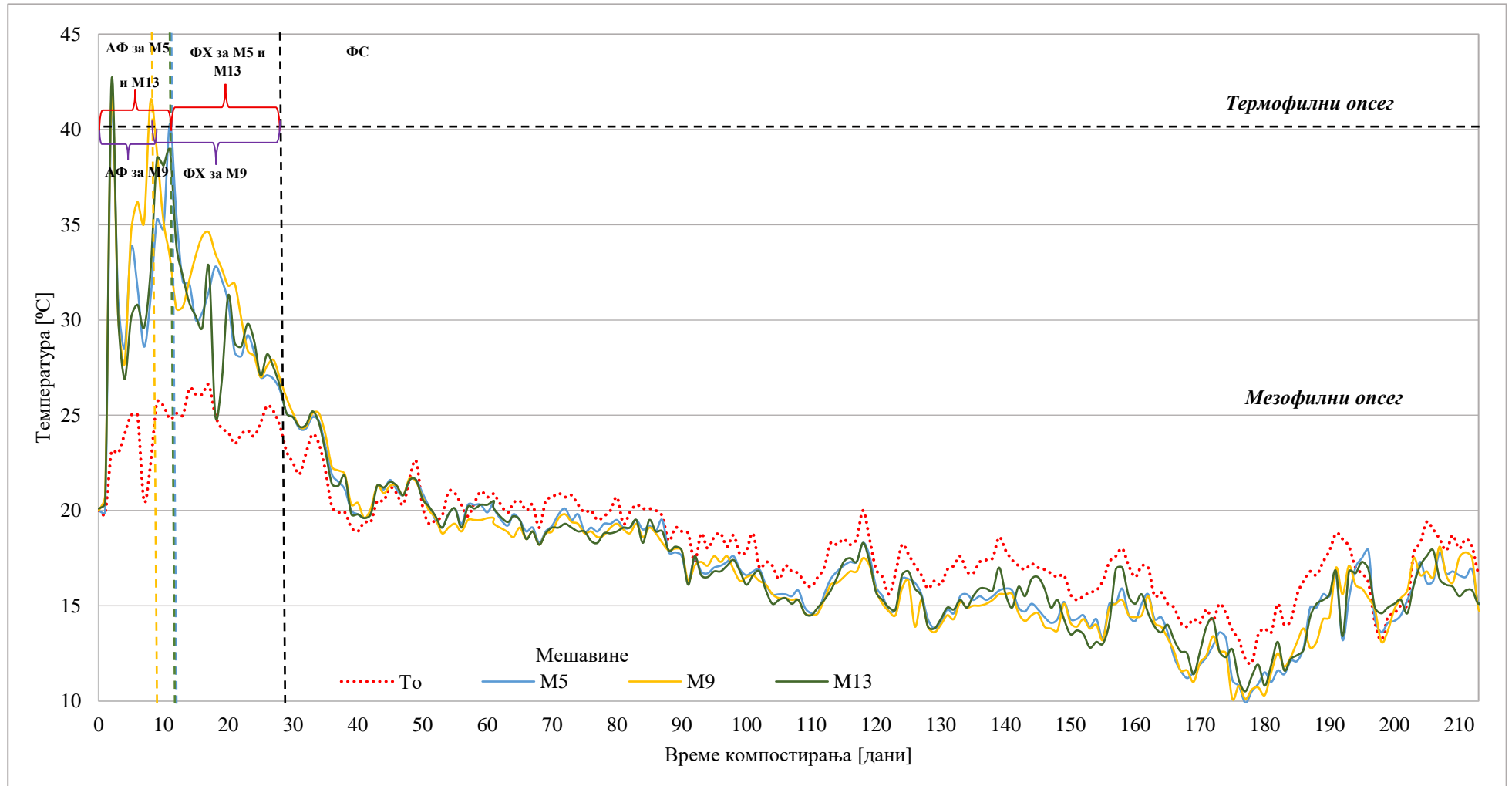
### 6.2.2.1 Промена температуре

О утицају температуре на разградњу и промена које се дешавају током активне фазе (АФ) и фазе хлађења (ФХ) детаљно је описано у поглављу 2 и 6.1.2.1. Посебни значај код процеса компостирања је и промена температуре током фазе сазревања (ФС), с обзиром да у овој фази долази до финалне трансформације и стабилизације ОМ.

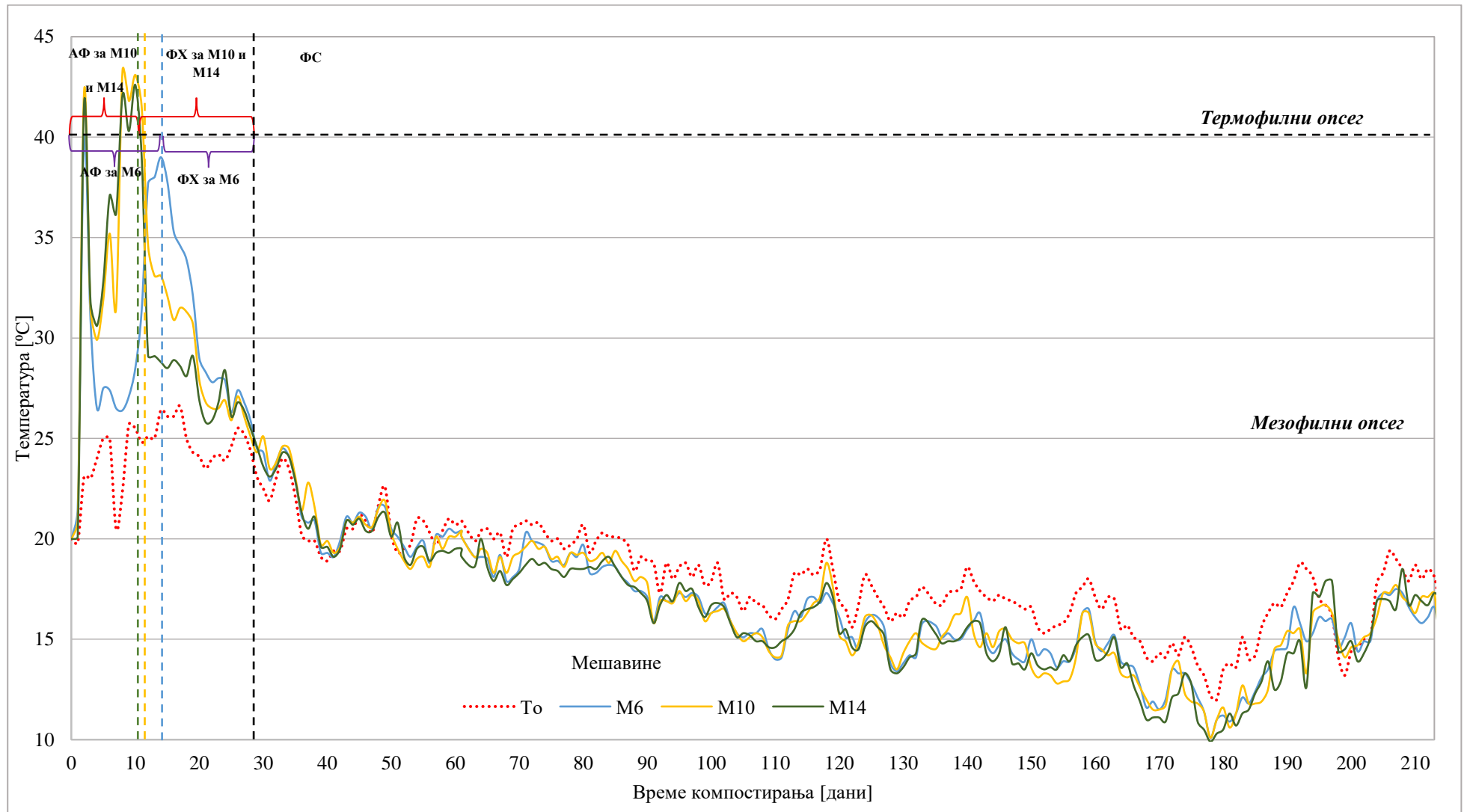
И у овом делу истраживања, пажња је усмерена на ФС, као потврде да је дошло до трансформације ОМ. Ради утврђивања максималног удела огроздине, додатно је разматрана и дужина термофилне фазе јер се њено присуство користи за оцену квалитета компоста, тј. могућности примене на земљишту.

Границе за фазе које се јављају током целог процеса компостирања дефинисане су на исти начин као и у претходном поглављу 6.2.1.1.

Промена температуре је приказана у зависности од врсте ко-супстрата и удела огроздине - слике 6.26 и 6.27.



Слика 6.26 Промене температуре у мешавинама са ОХ - М5, М9 и М13



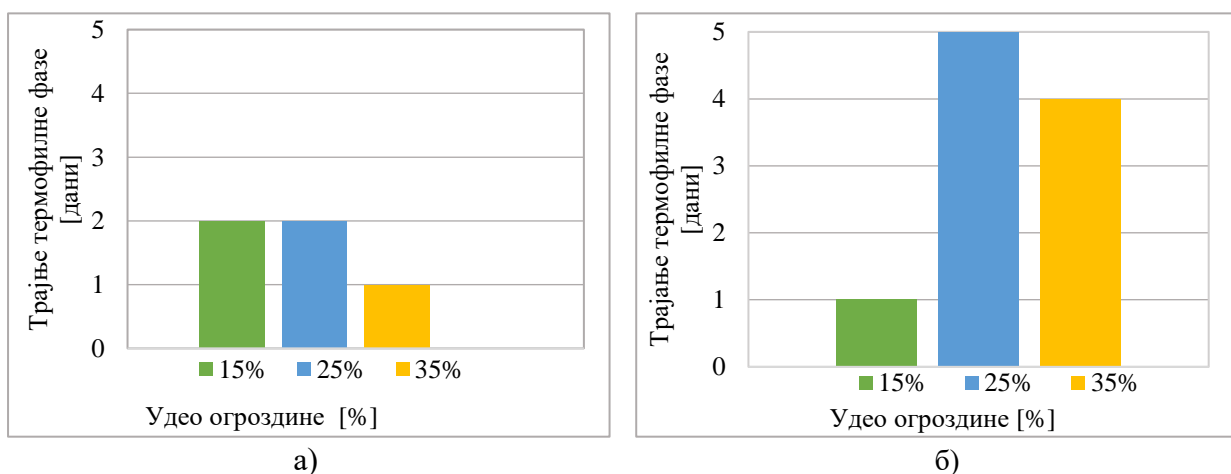
Слика 6.27 Промена температуре у мешавинама са ЖЕ - M6, M10 и M14

На основу добијених резултата може се закључити да су код свих мешавина остварене све фазе процеса: мезофилна, термофилна током АФ, ФХ и ФС. У случају ОХ у мешавини са 25 % огроздине (М9) АФ је трајала 8 дана, док је у мешавинама са 15,0 % (М5) и 35,0 % огроздине њено трајање износило 11 дана. Друга фаза, ФХ је почела 9. односно 12. дана и трајала до 28. дана, након чега је наступила ФС која је трајала до краја процеса.

За мешавине са ЖЕ, АФ је трајала дуже у односу на мешавине са ОХ, и износила је 14, 11 и 10 дана за мешавине са 15 % (М6), 25,0 % (М10) и 35,0 % (М14) огроздине, редом. Такође, ФХ је трајала 13, 16 и 17 дана за мешавине М6, М10 и М14, редом. Код свих мешавина са ЖЕ, ФС је започела 29. дана и трајала до краја процеса.

Добијени резултати о променама фаза потврђују да је процес трансформације ОМ и стабилизације успешно завршен.

На слици 6.28 је приказана дужина трајања термофилне фазе у зависности од удела огроздине у мешавини за обе врсте ко-супстрата.



**Слика 6.28** Дужина трајања термофилне фазе за мешавине са: а) ОХ: М5, М9 и М13; б) ЖЕ: М6, М10 и М14

Приложени резултати на слици 6.28 а и б, показују да дужина термофилне фазе зависи од удела огроздине. У случају када је ко-супстрат ОХ, слика 6.28 а, повећањем удела огроздине на 35,0 % долази до скраћења термофилне фазе.

Може се уочити да у случају када је ко-супстрат ЖЕ, слика 6.28 б, повећање удела огроздине доводи до продужења трајања термофилне фазе у односу на мешавину са 15,0 %, при чему је најдуже трајање забележено у мешавини М10 са уделом од 25,0 %.

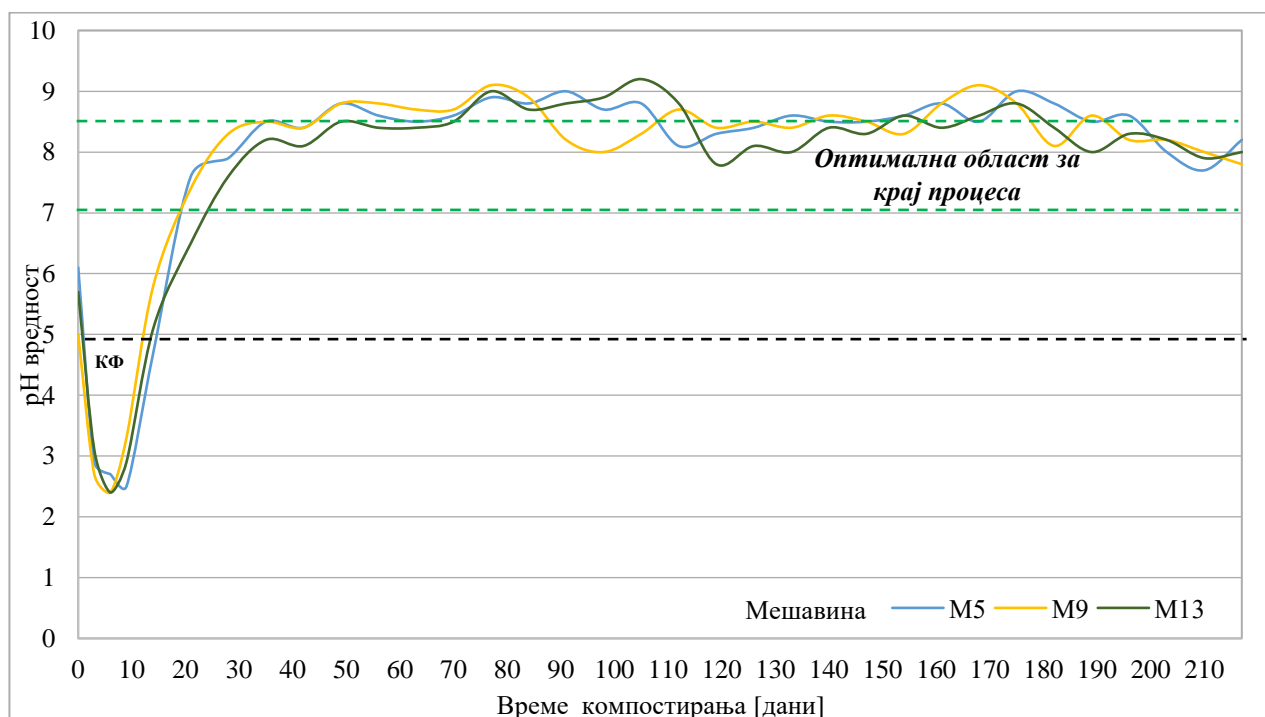
Са слике 6.28 а и б се види да је дуже трајање термофилне фазе забележено у мешавинама са ЖЕ. Ова појава може се објаснити чињеницом да су ЖЕ подложнији разградњи и имају вишу рН вредност чиме су побољшани услови процеса компостирања.

Може се рећи, да је оптимални удео огроздине 15,0 % и 25,0 % када је ко-супстрат ОХ, а 25,0 % у случају ЖЕ.

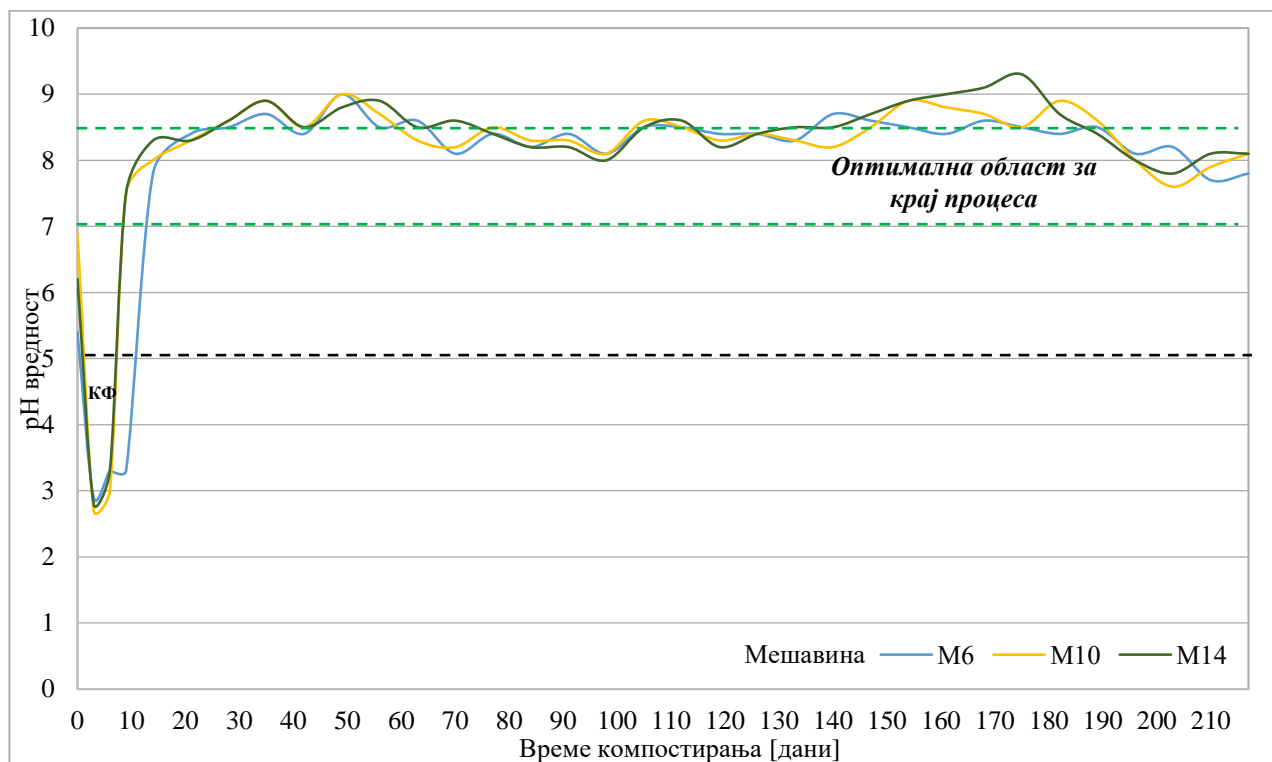
### 6.2.2.2 Промена рН вредности

Праћење рН вредности током целог процеса игра кључну улогу при анализи фаза које се одигравају приликом трансформације ОМ. Пре свега омогућава идентификацију критичних тачака у процесу и потврду да је дошло до разградње ОМ. Односно, промена рН вредности може указати на динамику микробиолошке активности, степен разградње, као и на стабилизацију добијеног компоста.

Као и код поглавља 6.2.1.2 фокус је био усмерен на анализу крајњих вредности рН и дужину трајања киселе фазе у зависности од удела огроздине за обе врсте ко-супстрата. И у овом делу, као граница за крај киселе фазе је узета вредност рН већа од 5,0 [45]. Крај процеса компостирања одређен је достигнутом стабилном рН вредношћу у опсегу од 7,0 до 8,5, што указује на завршену стабилизацију материјала [46] [180].



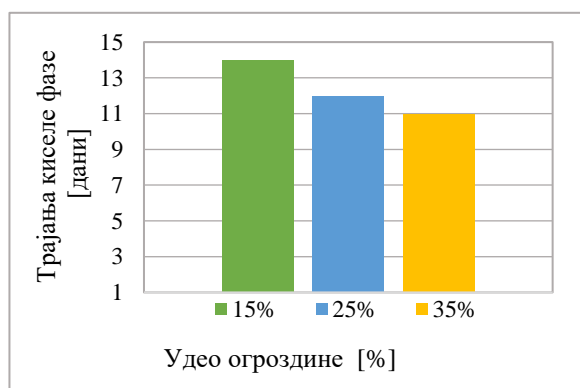
Слика 6.29 Промена рН вредности у мешавина са ОХ М5, М9 и М13



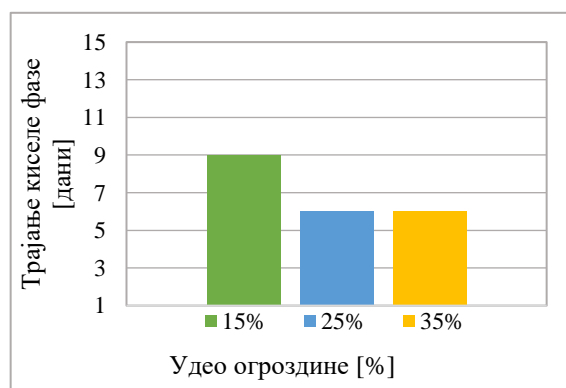
Слика 6.30 Промена рН вредности у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

На основу анализе резултата рН вредности, слике 6.29 и 6.30, може се закључити да су све мешавине имале вишу вредност од 5,0 што је омогућило почетак разградње ОО. Такође, утврђено је да се рН вредност налази у оптималном опсегу за крај процеса. Код мешавина када је ко-супстрат ОХ, рН вредност на крају је била од 7,8 до 8,2, а код ЖЕ од 7,8 до 8,1, што додатно потврђује да је дошло до трансформације ОМ.

На слици 6.31 а и б је приказана дужина трајања киселе фазе у зависности од удела огроздине у мешавини.



а)



б)

Слика 6.31 Дужина трајања киселе фазе за мешавине са; а) ОХ: М5, М9 и М13; б) ЖЕ: М6, М10 и М14

Резултати приказани на слици 6.31 а и б показују да повећање удела огроздине доводи до скраћења киселе фазе, што се може сматрати позитивним ефектом, будући да продужено трајање ове фазе успорава процес трансформације ОМ. Ова зависност важи за обе врсте ко-супстрата. Најкраће трајање киселе фазе бележи се при уделу огроздине од 35,0 % код ОХ и при 25,0 % и 35,0 % код ЖЕ.

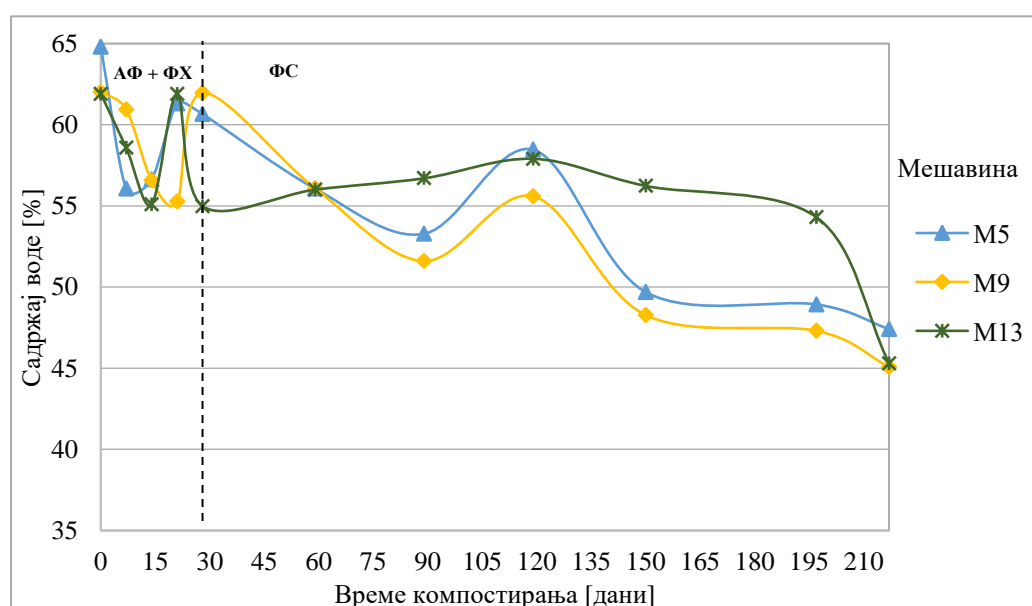
Објашњење за овакву промену се може повезати са чињеницом да је дуже трајање киселе фазе последица ниске почетне рН вредности и недовољне порозности мешавине [107].

Упоређујући резултате за оба случаја може се донети закључак да присуство огроздине са вишим уделом, 25,0 % и 35,0 % има позитиван утицај на скраћење киселе фазе.

### 6.2.2.3 Промена садржаја воде

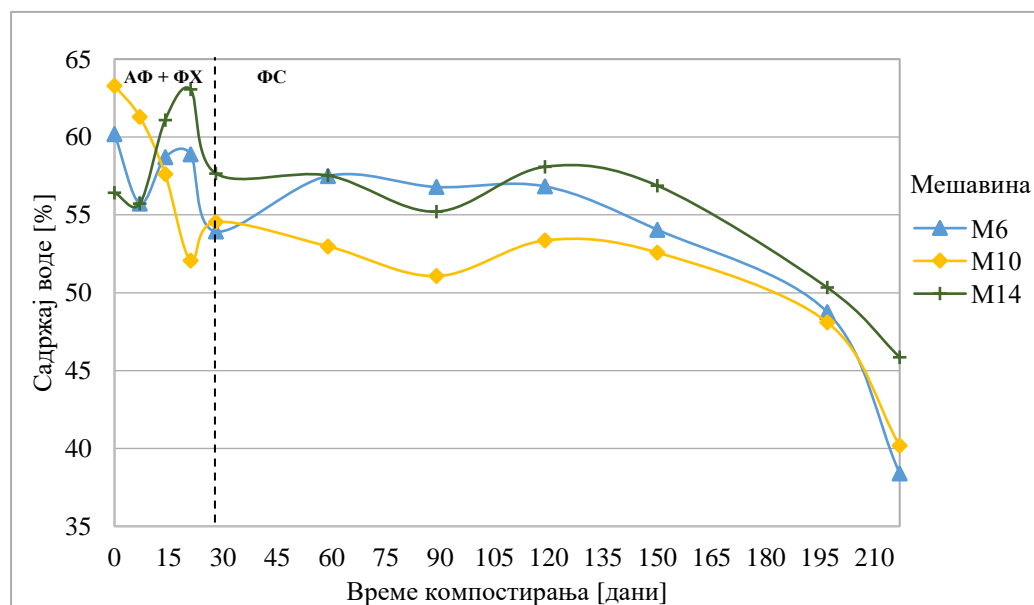
О улози садржаја воде током АФ и ФХ као и ФС било је речи у поглављима 6.1 и 6.2.1.3. У овом делу резултата праћен је утицај садржаја воде дуж целог тока процеса у зависности од удела огроздине за обе врсте ко-супстрата, а добијени резултати су приказани на сликама 6.32 и 6.33. Као и у поглављу 6.1 и 6.2.1.3 оптимални садржај воде за почетак процеса је био од 40,0 % до 65,0 %, а за крај мањи од 40,0 % [178] [180].

Приложени резултати на сликама 6.32 и 6.33 указују да је садржај воде за оба случаја био у оптималном опсегу за почетак процеса. Ово је сагласно са литературним подацима [40] [196]. Међутим, у ФС, у средишњем делу, садржај воде је био између 45,0 % и 60,0 %, што је изнад уобичајене оптималне вредности од 45,0 % до 50,0% [185], па се претпоставља да је имао утицај на остале процесне параметре. На крају је садржај воде пао на 45,0 % - 47,0 %.



Слика 6.32 Промена садржаја воде у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13

На основу резултата приказаних на слици 6.32 утврђено је да је на крају процеса садржај воде у свим мешавинама виши у односу на дозвољену вредност за зрео компост. Ова појава се може објаснити тиме што током процеса није дошло до довољног губитка воде услед испаравања, што може бити последица високог почетног садржаја воде. На крају процеса, мешавине са већим уделом огроздине (25,0 % и 35,0 %) имају нешто нижи садржај воде, који је приближнији оптималној вредности.



Слика 6.33 Промене садржаја воде у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

У случају када је ко-супстрат ЖЕ, оптимални садржај воде на крају процеса забележен је у мешавинама са уделом огроздине од 15,0 % и 25,0 %, и износио је редом 38,4 % и 40,1 %. Примећује се да се са повећањем удела огроздине садржај воде на крају процеса додатно повећава. Овај ефекат може се објаснити својством огроздина да задржава воду и његовом слабијом разградивошћу у поређењу са осталим ко-супстратима, што доприноси споријем губитку воде током процеса компостирања.

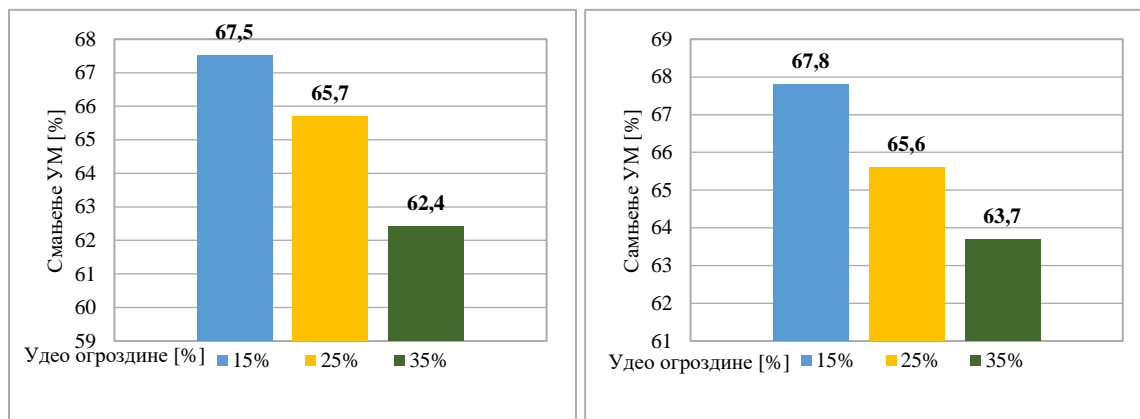
Може се извести закључак да се оптимални садржај воде налази у мешавинама са садржајем огроздине од 25,0 % и 35,0 % код ОХ, а код ЖЕ 15,0 % и 25,0 %.

#### 6.2.2.4 Промена укупне масе и органске материје

Као што је описано у поглављима 6.1.2.4 и 6.2.1.4 промена УМ и ОМ је коришћена ради потврде да је дошло до разградње. Добијени резултати су приказани у подпоглављима 6.2.2.4.1 и 6.2.2.4.2.

#### 6.2.2.4.1 Промена укупне масе

Ради утврђивања утицаја различитог удела огроздине на промену УМ, резултати мерења приказани су на слици 6.34.



а)

б)

Слика 6.34 Промена УМ мешавина са: а) ОХ: М5, М9 и М13; б) ЖЕ: М6, М10 и М14

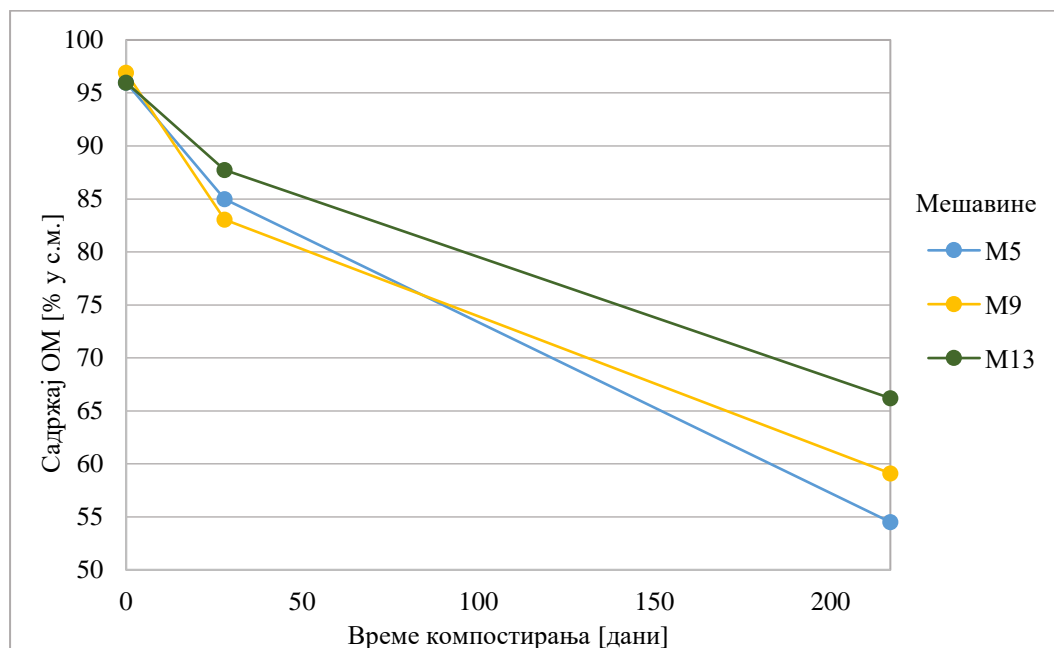
Резултати показују да је код свих мешавина смањење УМ било више од 60,0 %. Овакви резултати указују да је дошло до високог степена разградње ОМ.

Уколико извршимо поређење промене УМ у зависности од удела огроздине, слике 6.34 а и б, разлике се јасно уочавају. Може се закључити да повећањем удела огроздине долази до мањег смањења УМ. Највеће смањење је при уделу од 15,0 % огроздине и износи 67,5 % за ОХ и 67,8 % за ЖЕ. Исти тренд промене је забележен и при осталим уделима огроздине код обе врсте ко-супстрата.

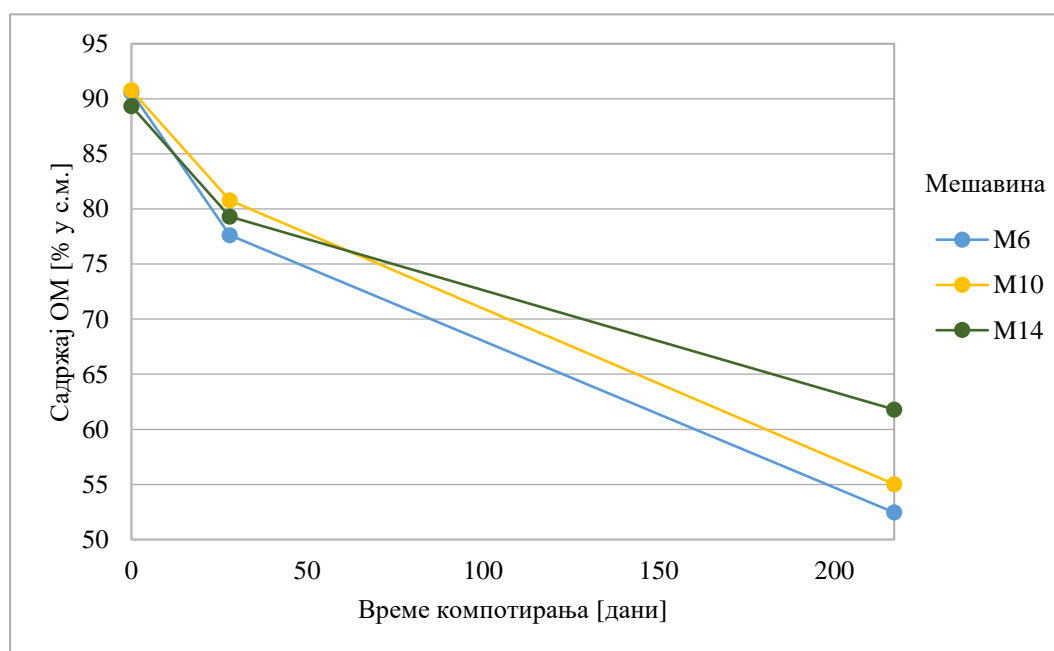
Добијени резултати у овом делу су очекивани и наводе на закључак да је оптимални удео огроздине 15,0 % уколико је циљ да се постигне максимална разградња. С обзиром да су добијене вредности сличне, може се закључити да су сви удели огроздине оптимални.

#### 6.2.2.4.2 Промена садржаја органске материје

Резултати анализе промене садржаја ОМ приказани су на сликама 6.35 и 6.36, а представљају промену по времену.



Слика 6.35 Промена садржаја ОМ у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13



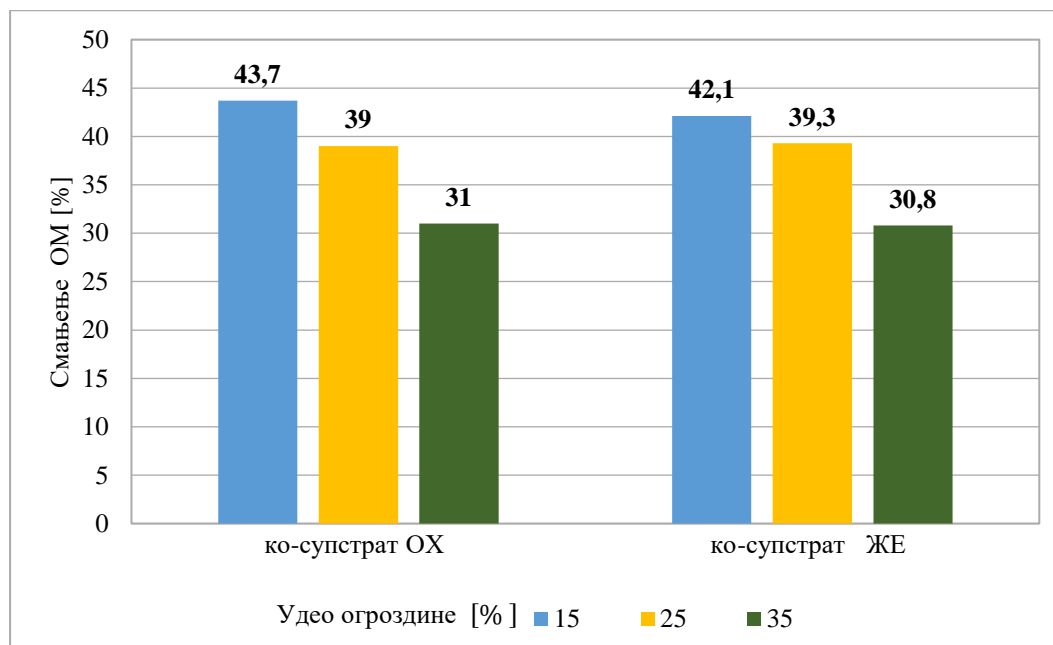
Слика 6.36 Промена садржаја ОМ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

На основу добијених резултата за крај процеса (слике 6.35 и 6.36), утврђено је да се садржај ОМ кретао у распону од 54,4 % до 66,2 % у с.м. за ОХ и од 45,0 % до 61,8 % у с.м. за ЖЕ. Ови подаци указују на значајан степен разградње ОМ, што указује на интензивну микробиолошку активност и ефикасност процеса стабилизације.

Истраживачи Bustamante и Diaz су током процеса компостирања ООИВ и као и ООИВ са отпадом из шећерне индустрије, добили више вредности садржаја ОМ у поређењу са

добијеним вредностима у овом истраживању [77] [108]. Према њиховим резултатима, садржај ОМ на крају процеса износио је 73,9 % у с.м. и 69,5 % у с.м., редом.

Процентуално смањење ОМ у зависности од удела огроздине приказано је на слици 6.37.



Слика 6.37 Процентуална промена садржаја ОМ у мешавинама са ОХ: М5, М9, М13 и ЖЕ: М6, М10 и М14

Резултати приказани на слици 6.37 јасно показују утицај различитог удела огроздине за обе врсте ко-супстрата. Може се закључити да повећањем садржаја огроздине у мешавини долази до мањег смањења ОМ. Највише смањење ОМ је добијено при уделу од 15,0 % огроздине: 43,7 % (са 95,9 % на 54,5 % у с.м.) за ОХ и 42,1 % (са 90,7 % на 55,0 % у с.м.) за ЖЕ. При осталим уделима огроздине запажа се иста законитост промене (добијени су слични резултати), што се поклапа са променом УМ.

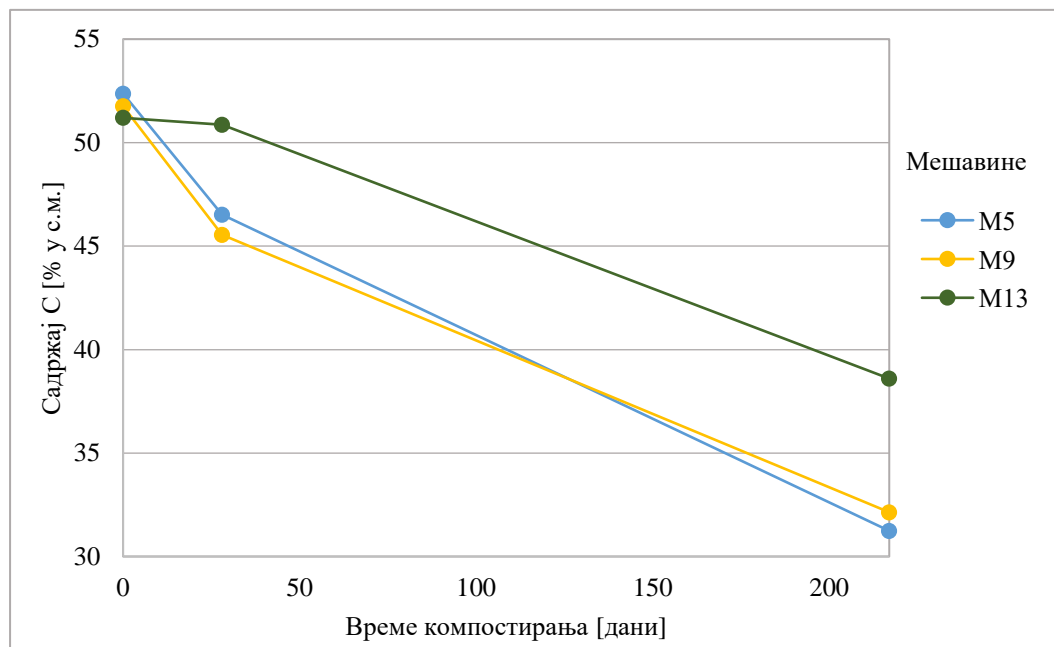
Дакле, може се закључити да присуство високог удела огроздине доводи до мањег смањења ОМ.

#### 6.2.2.5 Промена садржаја угљеника, азота и односа угљеника према азоту

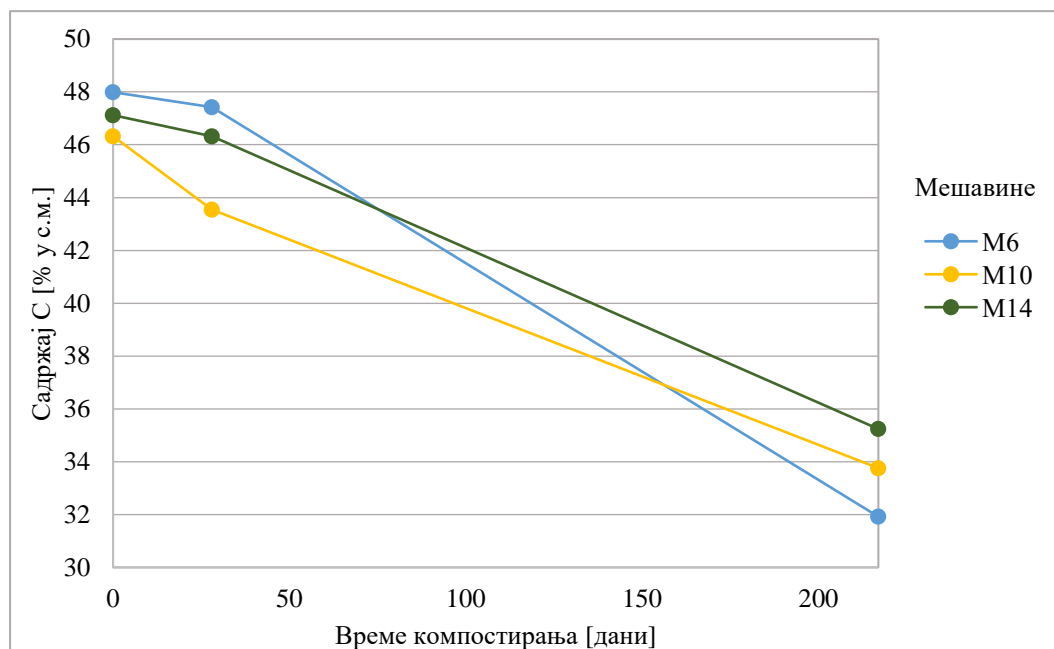
Као што је већ поменуто, промене садржаја С, N и њиховог односа, представљају показатеље степена разградње ОМ током процеса. У овом делу анализирана је њихова промена у зависности од удела огроздине у мешавинама. Праћене су промене ових параметара током целокупног процеса са циљем да се утврди да ли је добијени компост достигао однос С/N мањи од 20,0 [17] [96].

### 6.2.2.5.1 Промена садржаја угљеника

Резултати промена садржаја С, приказани су на сликама 6.38 и 6.39. Представљају промене по времену при различитим уделима огроздине за обе врсте ко-супстрата.



Слика 6.38 Промене садржаја С у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13

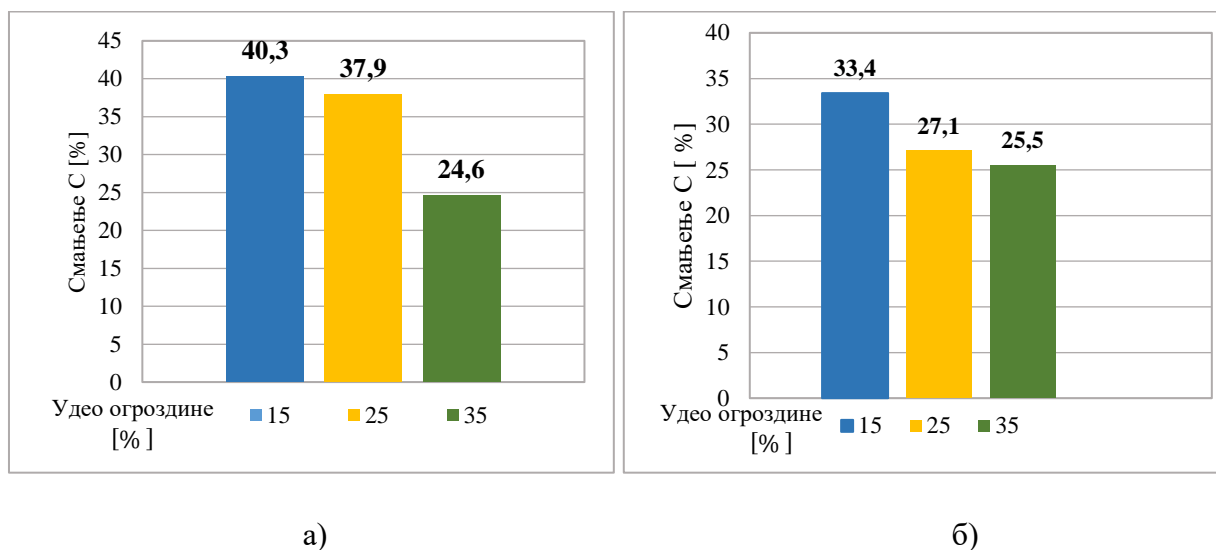


Слика 6.39 Промена садржаја С у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

На основу приказаних резултата, слике 6.38 и 6.39, уочава се да је садржај С на крају процеса знатно нижи у поређењу са почетном вредношћу и креће се од 31,2 % до 38,6 % у с.м.

за ОХ и од 31,9 % до 38,6 % у с.м. за ЖЕ. Ови резултати су очекивани, с обзиром на то да је током процеса дошло до интензивне разградње ОМ, што је довело до значајног смањења УМ.

На слици 6.40 а и б, приказане су процентуалне промене садржаја С при различитим уделима огроздине.



Слика 6.40 Процентуална промена С у мешавинама са; а) ОХ: М5, М9 и М13; б) са ЖЕ: М6, М10 и М14

Приложени резултати на сликама 6.40 а и б наводе на закључак да повећањем удела огроздине долази до мање промене С. Максимални пад садржаја С је при уделу огроздине од 15,0 %: 40,3 % (са 52,3 на 31,2 % у с.м.) за ОХ и 33,4 % (са 47,9 на 31,9 % у с.м.) за ЖЕ. И у овом случају иста законитост промене С важи за обе врсте ко-супстрата при осталим уделима огроздине.

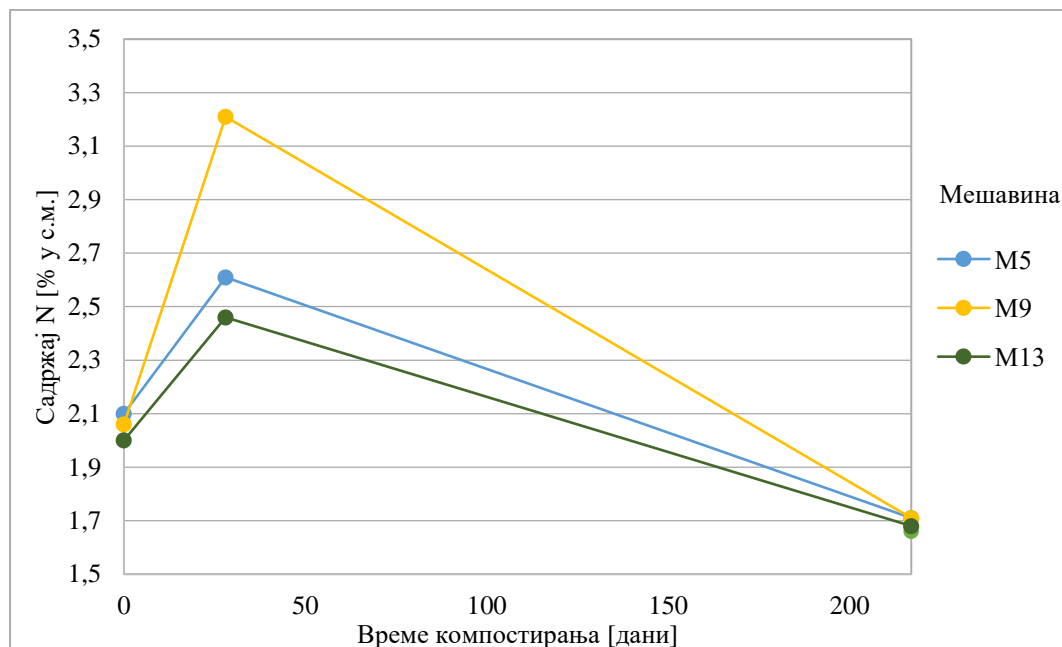
Ови резултати су у складу са резултатима Ferrer-a и Fernández-a, који су при компостирању ООИВ са ОФКО као и ООИВ са ЖЕ добили сличне вредности [99] [107].

Оваква промена ОМ при различитим уделима огроздине може се објаснити различитим степеном разградивости у односу на остале ко-супстрате, као и њиховим утицајем на порозност и аерацију мешавине, што утиче на брзину трансформације ОМ. Поред тога, мање смањење садржаја С у мешавинама са ЖЕ се може повезати са вишим садржајем лигноцелулозних компоненти у овим мешавинама.

На крају, може се закључити да нижи удели огроздине (од 15,0 %) доприносе разградњи С.

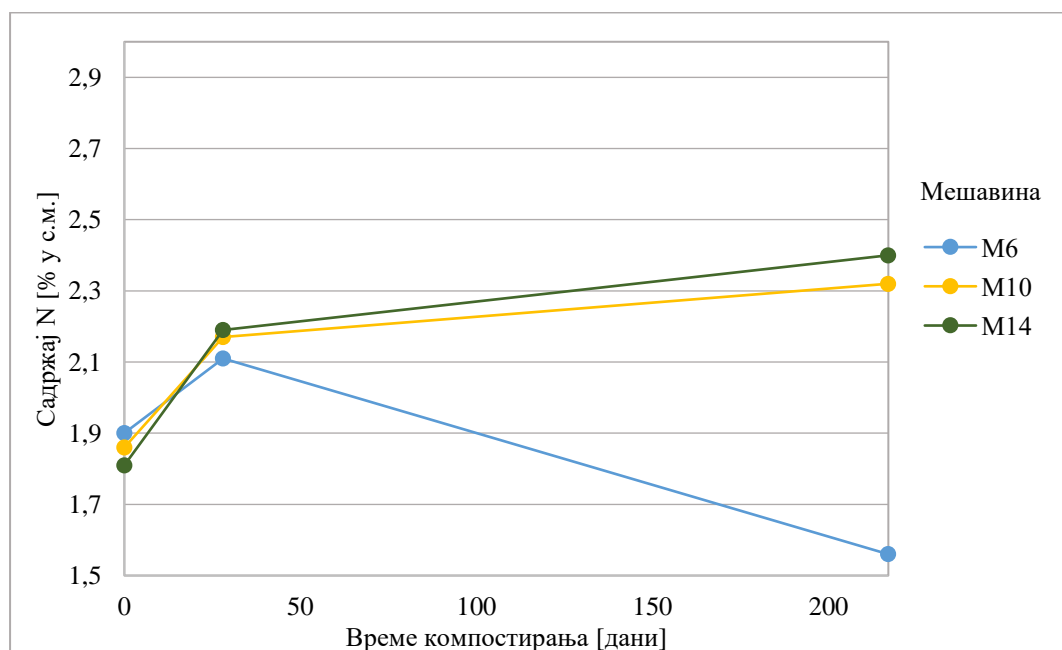
### 6.2.2.5.2 Промена садржаја азота

Резултати промене садржаја N приказани су на сликама 6.41 и 6.42 и представљају промену по времену у зависности од удела огроздине.



Слика 6.41 Промена садржаја N у мешавини са ОХ: M5, M9 и M13

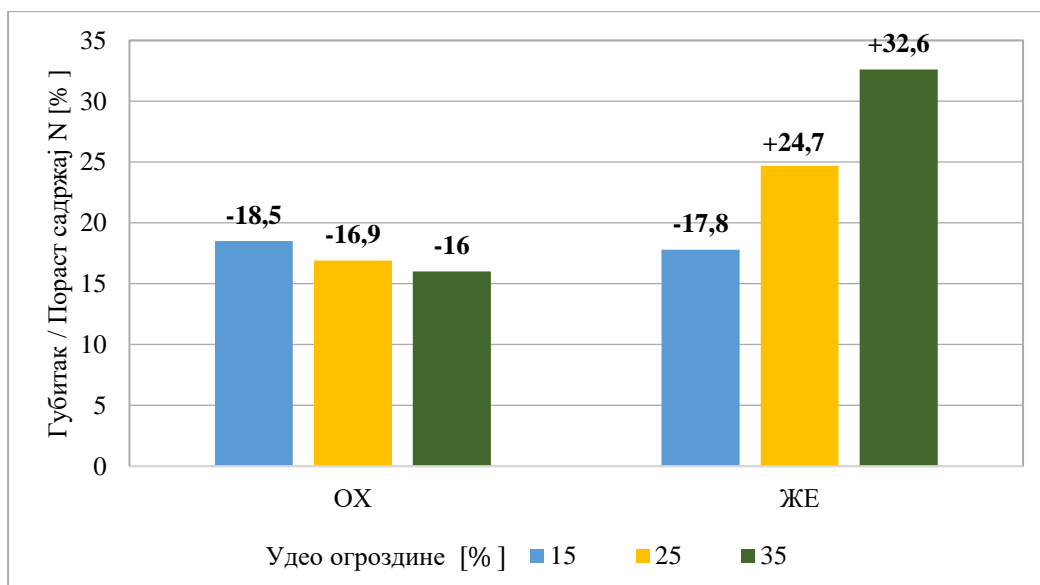
На основу изложених резултата, слика 6.41, примећује се да је у мешавинама са ко-супстратом ОХ дошло до пада садржаја N. На крају процеса код свих мешавина, вредност била око 1,7 % у с.м.



Слика 6.42 Промена садржаја N у мешавини са ЖЕ: M6, M10 и M14

С друге стране, резултати приказани на слици 6.42 указују да је у случају мешавина са ко-супстратом ЖЕ у две од три мешавине дошло до повећања садржаја N. Максимална вредност на крају процеса достигла 2,4 % у с.м. а забележена је код мешавине M14. Објашњење за уочено повећање и смањење садржаја N је у сагласности са наведеним интерпретацијама у поглављима 6.1.2.5.2 и 6.2.15 [36] [108] [197].

На слици 6.43 су приказане процентуалне промене садржаја N при различитим уделима огроздине.



Слика 6.43 Процентуална промена у мешавинама са ОХ: М5, М9, М13 и ЖЕ: М6, М10, М14

Анализом промене садржаја N у зависности од удела огроздине, слика 6.43, може се закључити да повећање удела огроздине доводи до мањег смањења N код мешавина са ОХ, односно до његовог повећања код мешавина са ЖЕ. Минимално смањење садржаја N забележено је при уделу огроздине од 35,0 %, и износило је 16,0 % (са 2,0 % на 1,7 % у с.м.) код мешавина са ОХ. Насупрот томе, највећи пораст садржаја N од 32,6 % (са 1,8 % на 2,4 % у с.м.) утврђен је код мешавина са ЖЕ при истом уделу огроздине.

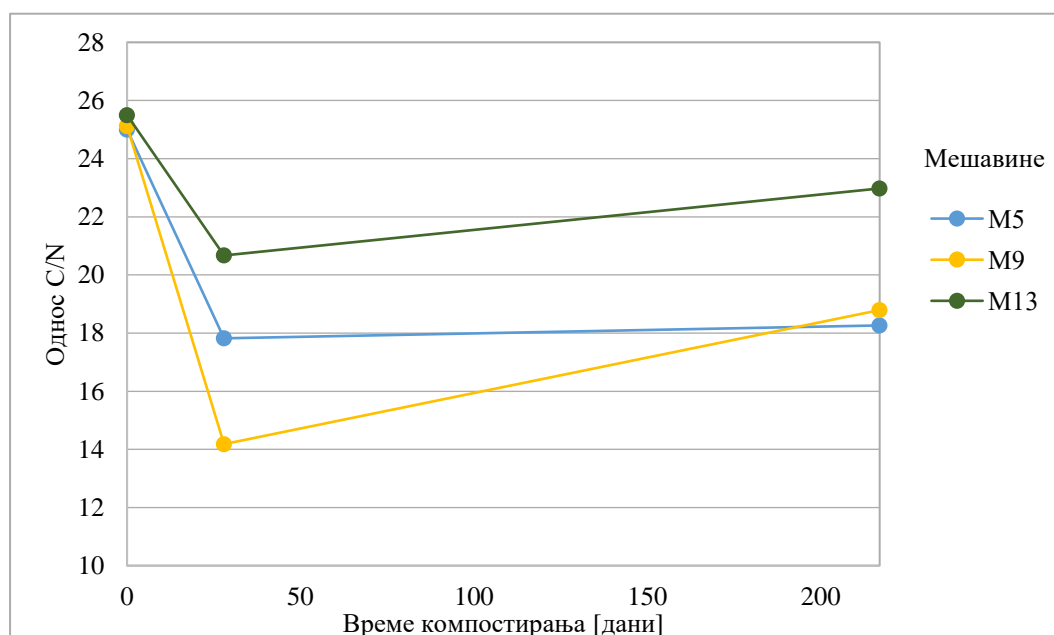
Ова разлика може бити последица различитог садржаја N у почетним мешавинама, као и условима процеса компостирања.

Добијени резултати упућују на закључак да присуство огроздине са виском уделима (35,0 %) има позитиван ефекат на N (смањење и повећање) што је пожељно за крај процеса.

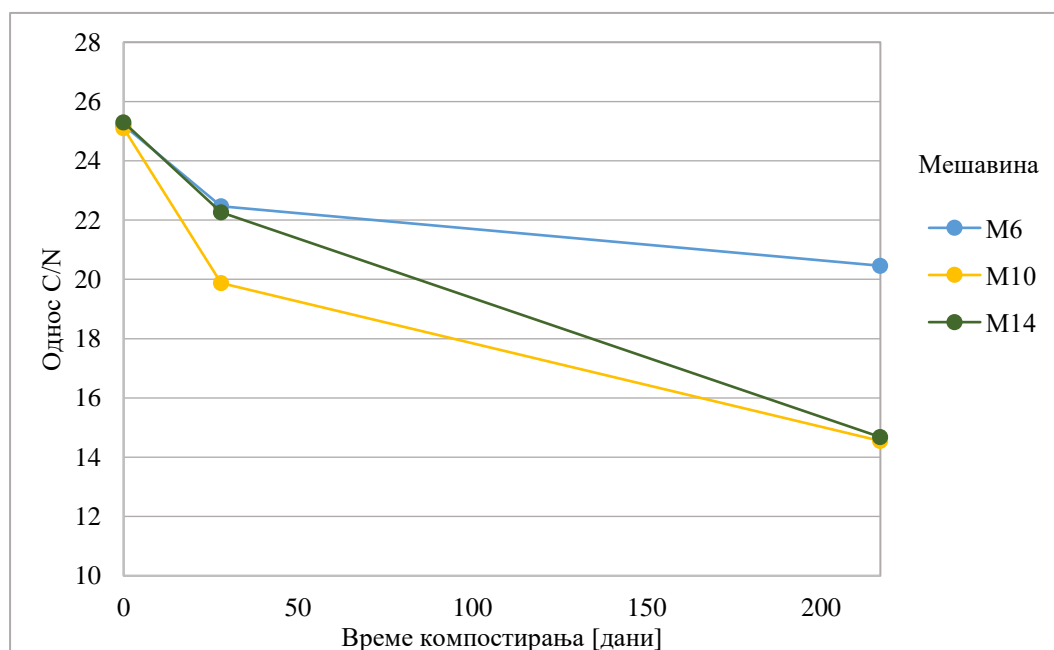
### 6.2.2.5.3 Промена односа угљеника према азоту

О односу C/N и његовом утицају на почетак и на крај процеса је већ било речи у поглављима 2, 6.1.2.5.3 и 6.2.1.5.3. Резултати промене односа C/N по времену у приказани су на сликама 6.44 и 6.45.

Приложени резултати на сликама 6.44 и 6.45 показују да је у већини мешавина (M5, M9, M10 и M14) постигнут одговарајући однос C/N за крај процеса што наводи на закључак да је дошло до трансформације OM.



Слика 6.44 Промена односа C/N у мешавинама са ОХ: M5, M9 и M13



Слика 6.45 Промена односа C/N у мешавинама са ЖЕ: M6, M10 и M14



Анализом утицаја удела огроздине на промену односа C/N се може закључити да повећањем удела доводи до вишег однос C/N на крају процеса код ОХ. Највиши однос C/N је износио 22,9 при уделу од 35,0 %. Супротан утицај огроздине је забележен код ЖЕ, што наводи на закључак да високи удели имају позитиван ефекат на однос C/N на крају процеса. Најниже вредности односа C/N су 14,5 и 14,6 за уделе 25,0 % и 35,0 %, редом.

Овако добијени резултати су очекивани јер је код појединих мешавина дошло до смањења док је код других дошло до повећања садржаја N.

На основу наведених резултата, може се донети закључак да је оптимални удео огроздине 15,0 % и 25,0 % код ОХ, а 25,0 % и 35,0 % за ЖЕ.

#### 6.2.2.6 Промена садржаја лигноцелулозних материја

О улози и механизмима разградње лигноцелулозних компоненти већ је било речи у поглављима 2 и 6.2.1.6. У овом делу истраживања посебна пажња је усмерена на утицај додавања огроздине на промену садржаја лигноцелулозних материја односно на степен њихове разградње током компостирања. Резултати анализа приказани су у подпоглављима 6.2.2.6.1, 6.2.2.6.2 и 6.2.2.6.3.

Садржаји лигноцелулозних материја су одређени у сувом узорку, а добијени резултати су приказани у табели 6.7.

**Табела 6.7** Промена садржаја лигнина, целулозе и хемицелулозе у мешавинама

| Дани                  | 0                       | 213  | Повећање<br>[%] | 0                        | 213  | Повећање<br>[%] | 0                             | 213  | Смањење<br>/<br>Повећање<br>[%] |
|-----------------------|-------------------------|------|-----------------|--------------------------|------|-----------------|-------------------------------|------|---------------------------------|
| Пар.                  | Лигнин<br>[g/100 g с.м] |      |                 | Целулоза<br>[g/100g с.м] |      |                 | Хемицелулоза<br>[g/100 g с.м] |      |                                 |
| <b>Мешавине са ОХ</b> |                         |      |                 |                          |      |                 |                               |      |                                 |
| M5                    | 17,6                    | 21,3 | 21,0            | 21,0                     | 29,1 | 38,6            | 25,6                          | 30,2 | 17,9                            |
| M9                    | 16,6                    | 18,6 | 12,1            | 19,0                     | 47,0 | 147,3           | 22,1                          | 15,1 | 31,6                            |
| M13                   | 18,1                    | 25,2 | 39,2            | 16,8                     | 45,0 | 167,9           | 27,0                          | 12,6 | 53,3                            |
| <b>Мешавине са ЖЕ</b> |                         |      |                 |                          |      |                 |                               |      |                                 |
| M6                    | 13,3                    | 21,4 | 60,9            | 22,2                     | 48,5 | 118,4           | 26,4                          | 17,6 | 33,3                            |
| M10                   | 13,2                    | 18,8 | 41,4            | 20,2                     | 41,4 | 104,9           | 27,7                          | 18,6 | 32,8                            |
| M14                   | 14,4                    | 21,3 | 47,9            | 18,1                     | 50,0 | 176,2           | 29,3                          | 15,6 | 46,7                            |

##### 6.2.2.6.1 Промена садржаја лигнина

Приказани резултати у табели 6.7 указују на закључак да до разградње лигнина није дошло, али због разградње разградивих компоненти процентуални удео се повећао. Сличне резултате је добила Moldes, а објашњење је дато у поглављу 3 и 6.2.1.6 [42].



На основу резултата примећује се да не постоји јасна зависност између удела огроздине и садржаја лигнина. Минимално повећање забележено је при уделу од 25,0 % и износило је 12,1 % за ОХ (са 16,6 на 18,6 g/100 g с.м.) и 41,4 % за ЖЕ (са 13,3 на 18,8 g/100 g с.м.). Међутим, даљим повећањем удела огроздине на 35,0 %, код мешавина са ОХ долази до додатног повећања садржаја лигнина са 18,1 на 25,2 g/100 g с.м., што представља 39,2 %, док је у случају ЖЕ повећање износило 47,9 % (са 14,4 на 21,3 g/100 с.м.) у односу на претходне уделе.

Овакви трендови указују да током процеса нису били испуњени услови неопходни за разградњу лигнина (описани у поглављу 2), као што је дужина трајања термофилне фазе и вредност температуре. Поред тога, и сам висок почетни садржај лигнина у коришћеним супстратима допринео је његовој акумулацији током процеса.

Може се рећи да је на промену садржаја лигнина утицали услови процеса и њихов садржај у мешавинама, при чему оптимални удео огроздине 25,0 % за ове врсте ко-супстрата.

#### **6.2.2.6.2 Промена садржаја целулозе**

Утицај различитог удела огроздине на промену садржаја целулозе приказан у табели 6.7, где су дати почетни и крајњи садржаји. Приказани резултати омогућавају анализу степена разградње или акумулације целулозе, што је кључни показатељ микробиолошке активности и стабилизације ОМ. Смањење садржаја указује на ефикасну разградњу, док повећање може бити последица декомпозиције лакоразградивих компоненти.

Евидентно је да се садржај целулозе у свим мешавинама повећао у односу на почетак процеса, па се може закључити да није дошло до разградње. Ови резултати су контрадикторни литературним подацима [42] [104] [198].

Примећује се да код ко-супстрата ОХ, са повећањем удела огроздине долази до пораста садржаја целулозе, док у случају мешавина са ЖЕ не постоји зависност између ових параметара. Код обе врсте ко-супстрата максимално повећање забележено је при уделу огроздине од 35,0 %: 167,9 % за ОХ ( са 16,8 на 45 g/100 с.м.) и 176.2 % за ЖЕ (са 18,1 на 50,0 g/100 g с.м.). Најмање повећање догодило се у мешавинама са нижим уделом огроздине: 15,0 %: за 38,6 % (са 21,0 на 29,1 g/100 g с.м.) за ОХ, док је за ЖЕ при уделу од 25,0 % за 104,2 % (са 20,2 на 41,4 g/100 g с.м.).

Треба напоменути да услови за разградњу целулозе нису постигнути, пре свега због недовољно високе температуре и кратког трајања термофилне фазе, па су овако добијени резултати очекивани [31]. Поред тога, већи проценат повећања садржаја целулозе у



мешавинама са ЖЕ може се повезати са вишим садржајем ове компоненте у ко-супстрату. Овако добијени резултати наводе на закључак да су на промену садржаја целулозе највише утицали почетни састав мешавине и ограничена разградња.

Добијени резултати додатно упућују на закључак да је оптимални удео огроздине 15,0 % за ОХ и 25,0 % за ЖЕ.

#### **6.2.2.6.3 Промена садржаја хемицелулозе**

Хемицелулоза, важна компонента лигноцелулозних материја, је структурно мање организована од целулозе, што је чини подложнијом микробиолошкој разградњи. У поређењу са лигнинима и целулозом, хемицелулоза се разграђује брже, што је чини важним показатељем трансформације ОМ.

На основу приказаних резултата у табели 6.7 се може закључити да је код већине мешавина дошло до смањења садржаја хемицелулозе у односу на почетак процеса. Добијени резултати (смањење садржаја хемицелулозе) су сагласни са литературним подацима [31] [42] [104].

Анализом присуства различитог удела огроздине уочава се да повећањем удела долази до већег степена разградње хемицелулозе за обе врсте ко-супстрата. Максимално смањење хемицелулозе забележено је у мешавини са ОХ при уделу огроздине од 35,0 %, са 27,0 на 12,6 g/100 g с.м. што представља смањење за 53,3 %. За исти удео огроздине код мешавина са ЖЕ смањење је износило 46,7 %, са 29,3 на 15,6 g/100 g с.м. Већи степен разградње у овим мешавинама може се делимично објаснити почетним саставом супстрата: огроздина и ЖЕ имају релативно висок садржај хемицелулозе, док ОХ садржи мање ову компоненту, па је ефекат удела огроздине посебно видљив у мешавинама са ОХ. Поред тога, услови процеса, као што су краће трајање киселе фазе, боља аерација и повољнији услови за микробиолошку активност, допринели су ефикасној разградњи ОМ.

Једино код мешавине са 15,0 % огроздине код ОХ је дошло до повећања садржаја хемицелулозе, за 18,0 %, са 25,6 на 30,2 g/100 g с.м. У овом случају услови процеса били су неповољнији, што је очекивани резултат и указује да је дошло до акумулације хемицелулозе уместо њене разградње.

Добијени резултати указују на то да повећање садржаја огроздине у мешавинама доводи до вишег степена разградње хемицелулозе, па је оптимални удео 35,0 %.

### 6.2.2.7 Промена садржаја нутријената

О трансформацији, улози и промени садржаја нутријената током процеса компостирања већ је било речи у поглављима 2 и 6.2.1.7. У овом делу истраживања разматране су мешавине у чијем саставу поред комине и ко-супстрата улази и огроздина.

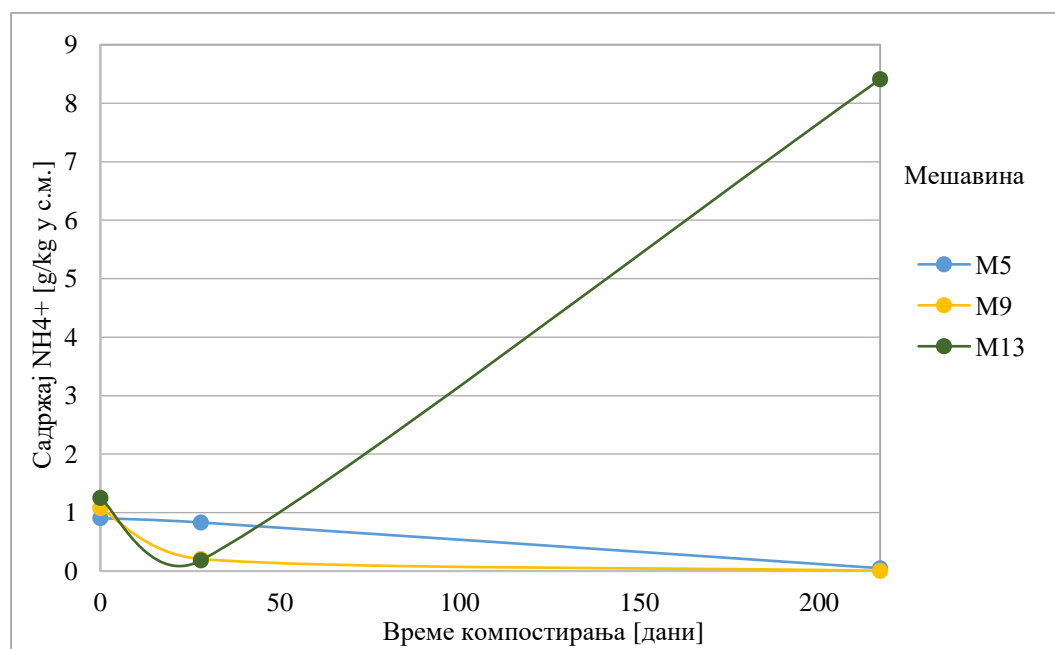
Може се рећи да је циљ овог дела истраживања испитивање утицаја различитих удела огроздине у мешавини комине и ко-супстрата на промену садржаја наведених неорганских форми нутријената током компостирања.

Резултати промене садржаја нутријената су приказани у поглављима 6.2.2.7.1, 6.2.2.7.2, 6.2.2.7.3, 6.2.2.7.4, 6.2.2.7.5 и 6.2.2.7.6.

#### 6.2.2.7.1 Промена садржаја амонијум јона

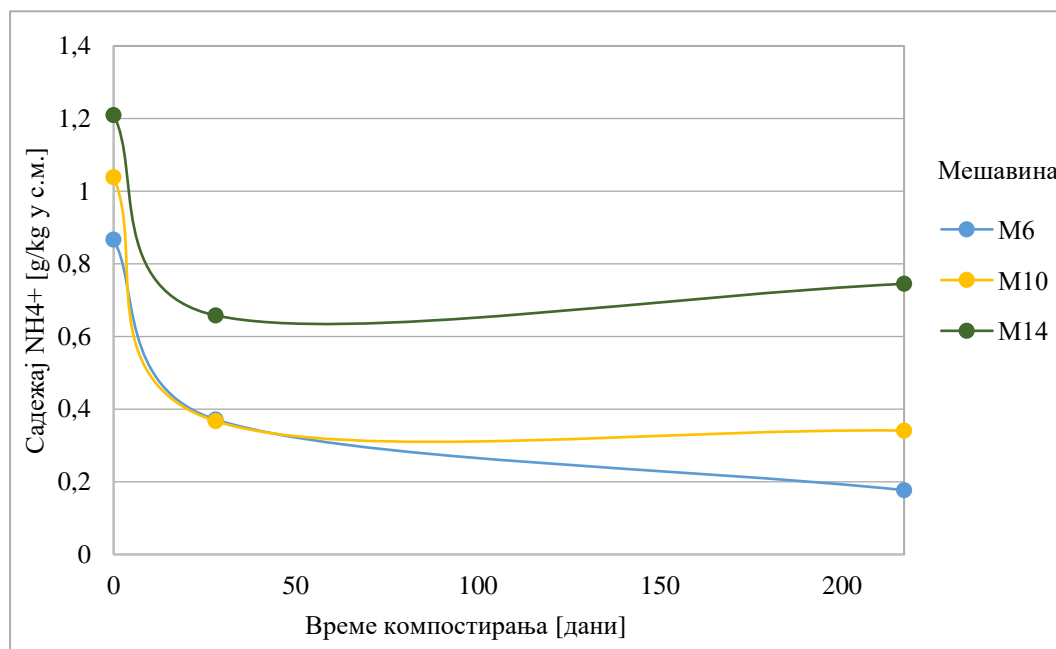
Као што је већ речено у поглављу 6.2.1.7.2  $NH_4^+$  јон, представља једну од најзначајнијих неорганских форми N у компосту. Ниски нивои  $NH_4^+$  могу указивати на његову трансформацију у  $NO_3^-$  или губитке услед испаравања  $NH_3$ , док превисоке концентрације могу довести до инхибиторних ефеката и поремећаја у биолошкој равнотежи земљишта. У овом делу резултата извршена је анализа утицаја различитог удела огроздине на промену садржаја  $NH_4^+$  јона. Добијени резултати су приказани у виду промена са временом, слике 6.46 и 6.47.

На основу резултата приказаних на сликама 6.46 и 6.47 се може запазити да са повећањем удела огроздине се постиже позитиван ефекат на промену садржаја  $NH_4^+$  јона.



Слика 6.46 Промена садржаја  $NH_4^+$  јона у мешавинама са ОХ: M5, M9 и M13

Запажа се да код ОХ при уделу од 35,0 % (M13) је постигнуто значајно повећање  $NH_4^+$  јона са 1,2 g/kg на 8,4 g/kg у с.м. Ову појаву су објаснили Sadeф и Su са сарадницима, који су указали да до повећања концентрације  $NH_4^+$  долази услед трансформације N из органске у неорганску форму, као и интензивне разградње ОМ [189] [190]. При осталим уделима 15,0 % (M5) и 25,0 % (M9), дошло је до значајног смањења  $NH_4^+$  јона, са 1,01 g/kg на 0,04 g/kg у с.м. и 1,1 g/kg на 0,003 g/kg у с.м., редом.



Слика 6.47 Промена садржаја  $NH_4^+$  у мешавинама са ЖЕ: M6, M10 и M14

Код мешавина са ЖЕ, слика 6.47, запажа се да је додавањем огроздине дошло до мањег смањења садржаја  $NH_4^+$  јона у односу на претходну мешавину. Максимални садржај  $NH_4^+$  јона на крају процеса износио је 0,7 g/kg у с.м при уделу од огроздине од 35,0 %, када је дошло до опадања са 1,2 g/kg на 0,7 g/kg у с.м. (што преставља смањење око 41,7 %). Тренд опадања  $NH_4^+$  јона забележен је код мешавина са уделима огроздине од 15,0 % (M6) и 25,0 % (M10), где је дошло до смањења са 0,8 на 0,1 g/kg у с.м. (87,5 %) и са 1,0 на 0,3 g/kg у с.м. (70,0 %), редом.

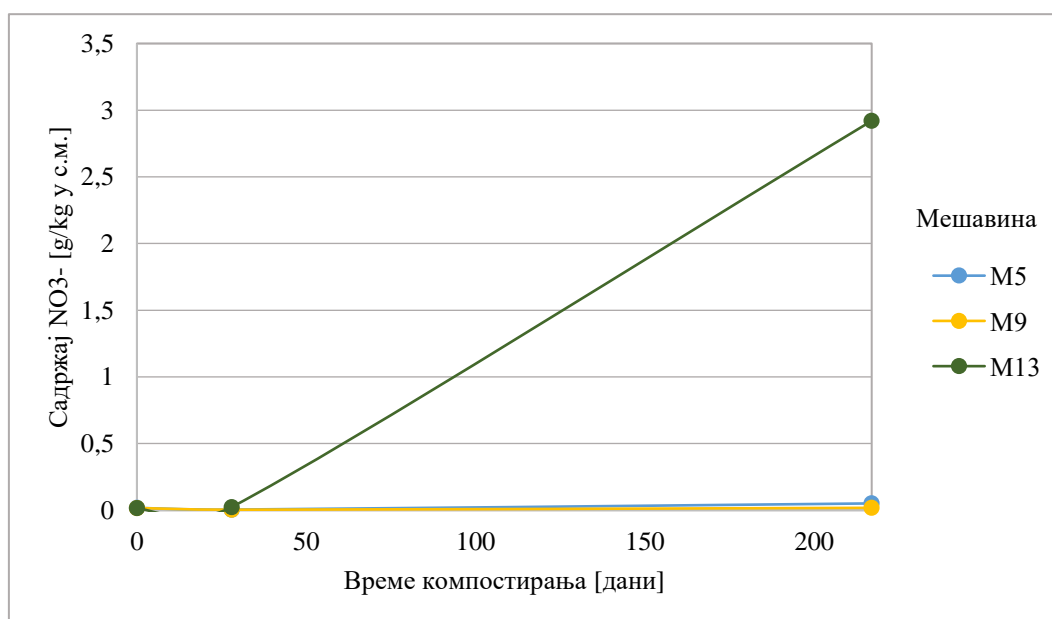
Ова појава указује на интензивнију трансформацију или губитак N током процеса компостирања у мешавинама са нижим уделом огроздина за обе врсте ко-супстрата [100].

На основу добијених резултата се може закључити да повећањем садржаја огроздине долази до мањег степена конверзије  $NH_4^+$  јона, односно до његове непотпуне трансформације.

### 6.2.2.7.2 Промена садржаја нитратног јона

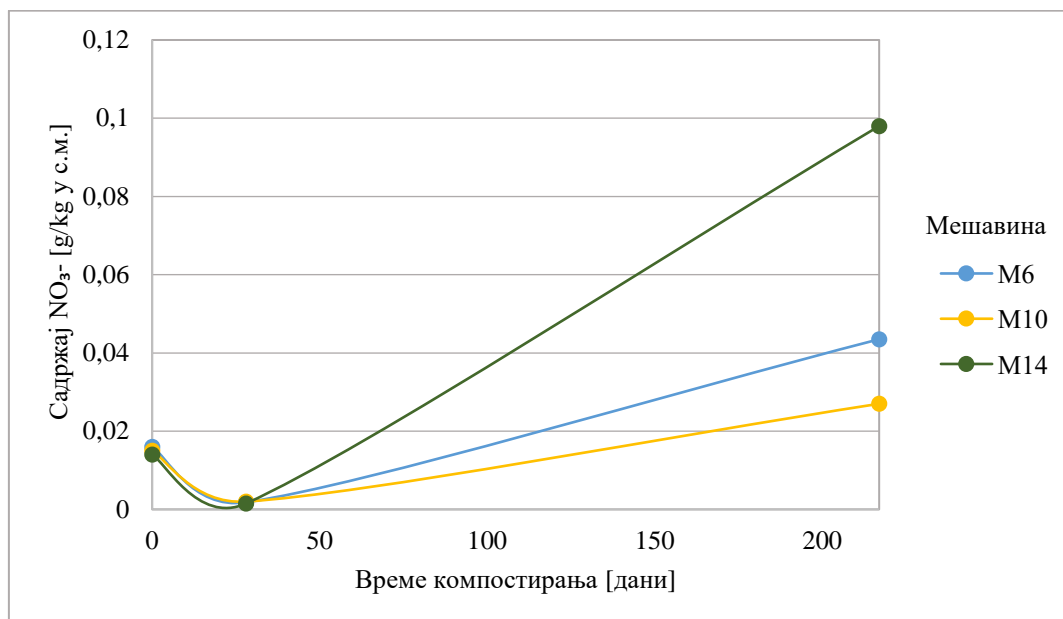
Друга по значају неорганска форма азота је у облику  $NO_3^-$  јона, који се узима у обзир када се посматра садржај укупног N у компосту. Нитрати су кључни облик N који биљке директно усвајају, те њихова концентрација у финалном компосту игра значајну улогу у процени његовог квалитета. Добијени резултати су приказани на сликама 6.48 и 6.49. И у овом делу, праћен је утицај различитог удела огроздина на промену  $NO_3^-$  јона.

Резултати приложени на сликама 6.48 и 6.49 показују да је у свим мешавинама дошло до пораста садржаја  $NO_3^-$  јона у односу на почетак процеса.



Слика 6.48 Промена садржаја  $NO_3^-$  јона у мешавинама са ОХ: M5, M9 и M13

Код мешавина M5, M9 и M13, слика 6.48 садржај  $NO_3^-$  јона се повећавао дуж целог тока процеса. До ове појаве долази при интензивној разградњи ОМ и трансформације  $NH_4^+$  јона [182]. Уочава се да је код мешавине са 35,0 % (M13) огроздине, од 29. дана па до краја процеса дошло до вишеструког повећања садржаја  $NO_3^-$  јона, са почетних 0,01 на 2,9 g/kg у с.м. Код мешавина са 15,0 % (M5) и 25,0 % (M9) огроздине, забележено је мање повећање садржаја  $NO_3^-$  јона: код M5 са 0,02 на 0,05 g/kg у с.м., а код M9 са 0,01 на 0,02 g/kg у с.м., што је знатно ниже у поређењу са вишеструким повећањем код мешавине M13.



Слика 6.49 Промена садржаја  $NO_3^-$  јона у мешавинама са ЖЕ: M6, M10 и M14

Резултати показују да код мешавина M6, M10 и M14 са ЖЕ, слика 6.49, промена садржаја  $NO_3^-$  јона није једнозначна и да не зависи од удела огроздине. Уочава се да је на почетку процеса у свим мешавинама дошло до опадања  $NO_3^-$  јона. Према резултатима које је добио Wang са сарадницима до ове појаве долази услед инхибиције микроорганизама [199]. У даљем току процеса, од 29. дана па до краја, у свим мешавинама забележено је повећање садржаја  $NO_3^-$ . Значајно повећање садржаја  $NO_3^-$  јона забележено је у мешавина са 35,0 % (M14) огроздине, са 0,01 g/kg на 0,09 g/kg у с.м. Код осталих мешавина, са 15,0 % (M6) и 25,0 % (M10) огроздине, повећање је било мање, а износи са 0,01 g/kg на 0,04 g/kg у с.м. и са 0.01 на 0.03 g/kg у с.м., редом.

Објашњење за повећање садржаја  $NO_3^-$  јона током процеса компостирања је дата у поглављу 6.2.1.7.2.

Смањењем удела огроздине бележи се мање повећање садржаја  $NO_3^-$  јона, при чему је исти тренд промене код обе врсте ко-супстрата. Ова појава се може објаснити високим садржајем воде током процеса, што смањује аерацију супстрата и успорава процес трансформације N [200].

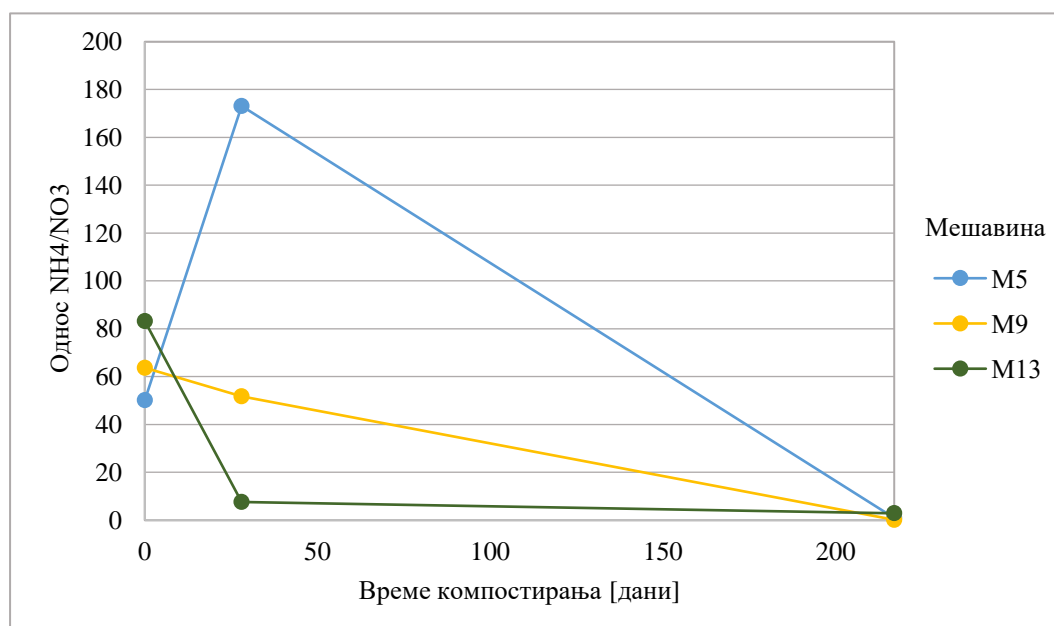
На основу добијених резултата се може закључити да промена  $NO_3^-$  јона код обе врсте ко-супстрата зависи од два фактора. Аерације (веће присутности кисеоника) и микробиолошке активности, која се мења у зависности од удела огроздине. Такође, закључује се да је оптимални удео огроздине 35,0 % код обе врсте ко-супстрата.

### 6.2.2.7.3 Промена односа амонијум јона према нитратном јону

О значају познавања вредности односа  $NH_4^+/NO_3^-$  је већ било речи у поглављу 2 и 6.2.1.7. Као што је већ речено, однос  $NH_4^+/NO_3^-$  мора бити мањи од 1,0 (0,16) као би се компост сматрао зрелим. Ова вредност указује на доминацију  $NO_3^-$  јона као стабилног облика N доступног биљкама, што је резултат успешне нитрификације и потпуне стабилизације ОМ. Виши односи  $NH_4^+/NO_3^-$  указују на недовољно зрео компост.

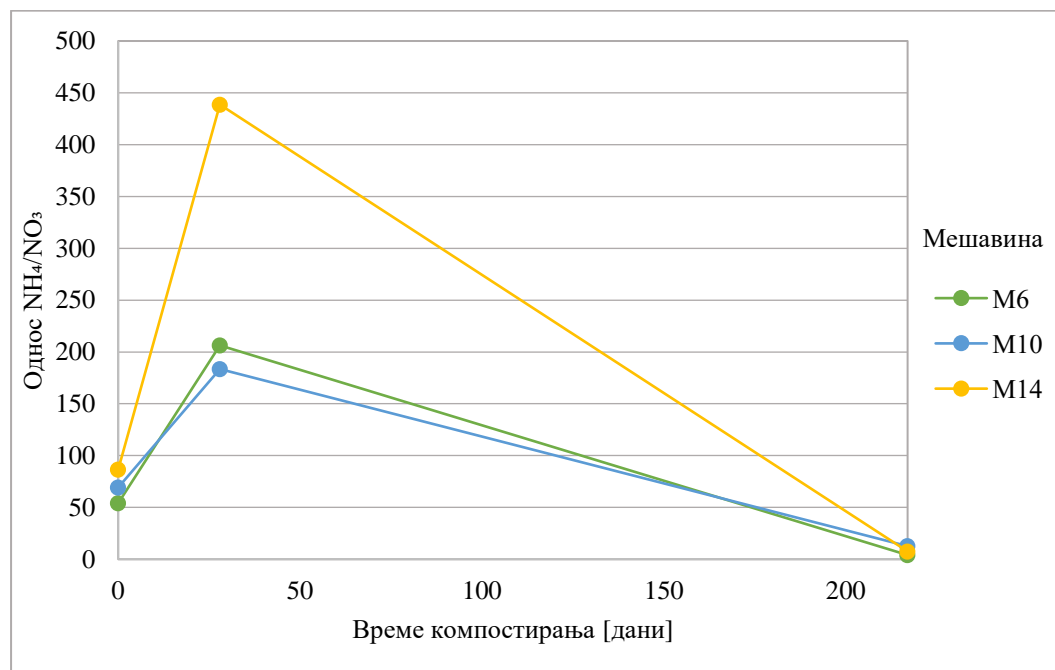
У овом делу анализирана је промена односа  $NH_4^+/NO_3^-$  у мешавинама са различитим уделима огроздине. Однос  $NH_4^+/NO_3^-$  је одређен рачунским путем, а добијени резултати приказани су на сликама 6.56 за мешавину са ОХ и 6.57 за мешавину са ЖЕ.

Резултати приказани на сликама 6.50 и 6.51 указују да је већина мешавина има виши однос  $NH_4^+/NO_3^-$  јона од 1,0. Мешавине М5 и М9 са ОХ су постигле приближну вредност односа  $NH_4^+/NO_3^-$  јона.



Слика 6.50 Промена односа  $NH_4^+/NO_3^-$  у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13

Са слике 6.50 се може видети да однос  $NH_4^+/NO_3^-$  јона бележи пораст при повећању удела огроздине када је ко-супстрат ОХ. Минимална вредност односа  $NH_4^+/NO_3^-$  забележена је у мешавинама са 15,0 % (М5) и 25,0 % (М9) огроздине и износи 0,2 и 0,9, редом. Ови резултати указују на делимично одвијање процеса трансформације N ка стабилнијим формама [25] [198]. При уделу огроздине од 35,0 % (М13) однос  $NH_4^+/NO_3^-$  јона је био висок, а износи 2,8, а што указује да процес трансформације N није још увек завршен.



Слика 6.51 Промена односа  $NH_4^+/NO_3^-$  у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

Са друге стране, код ЖЕ, слика 6.51 примећује се да не постоји зависност између огроздине и односа  $NH_4^+/NO_3^-$ . Уочава се да је код свих мешавина однос  $NH_4^+/NO_3^-$  висок. Најнижи однос  $NH_4^+/NO_3^-$  је при уделу огроздине од 15,0 % (М6) и 35,0 % (М14), а износи 4,0 и 7,6, редом. Код мешавине са 25,0 % (М10) огроздине однос  $NH_4^+/NO_3^-$  је 12,6. Ове вредности могу бити последица присуства огроздине и ЖЕ у мешавини као и смањене активности микроорганизама [116].

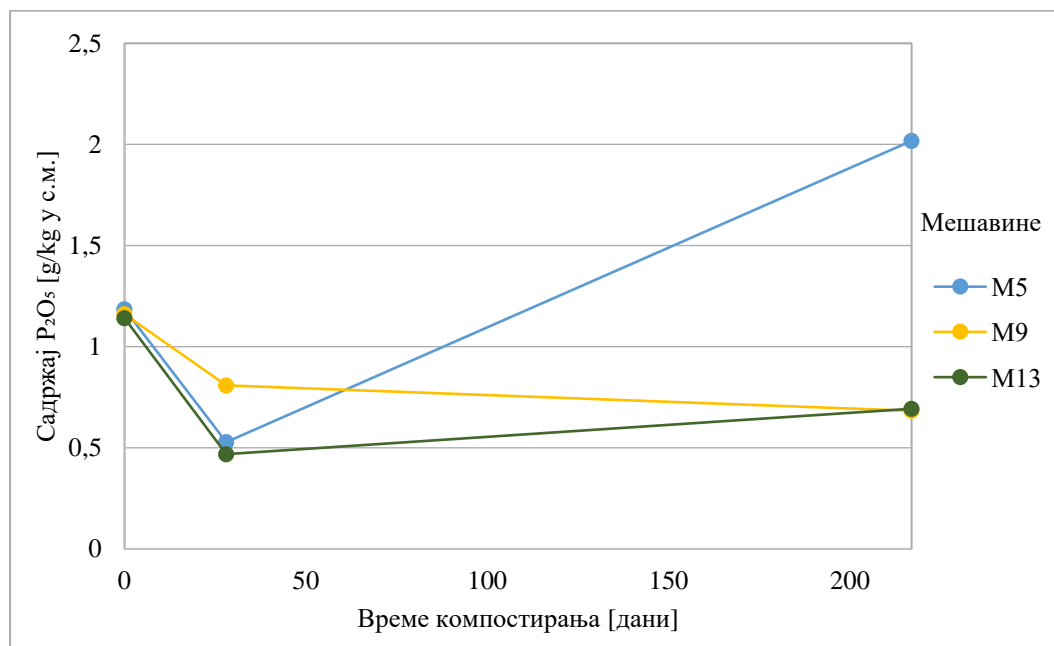
На основу резултата се може закључити да у мешавинама са ОХ, нижи удео огроздине (15,0 и 25,0 %) обезбеђује оптималне услове за потпунију трансформацију N. Насупрот томе, у мешавинама са ЖЕ, без обзира на удео огроздине, високе вредности  $NH_4^+/NO_3^-$  јона указују да још увек није завршена потпуна трансформација N.

#### 6.2.2.7.4 Промена садржаја минералног фосфора

Као што је већ речено P, као један од есенцијалних макроелемената, заједно са азотом, има кључну улогу у биохемијским процесима и доступности хранљивих материја у земљишту.

У овом делу истраживања анализирана је промена садржаја P у облику  $P_2O_5$  зависности од удела огроздине, а добијени резултати приказани су на сликама 6.52 и 6.53.

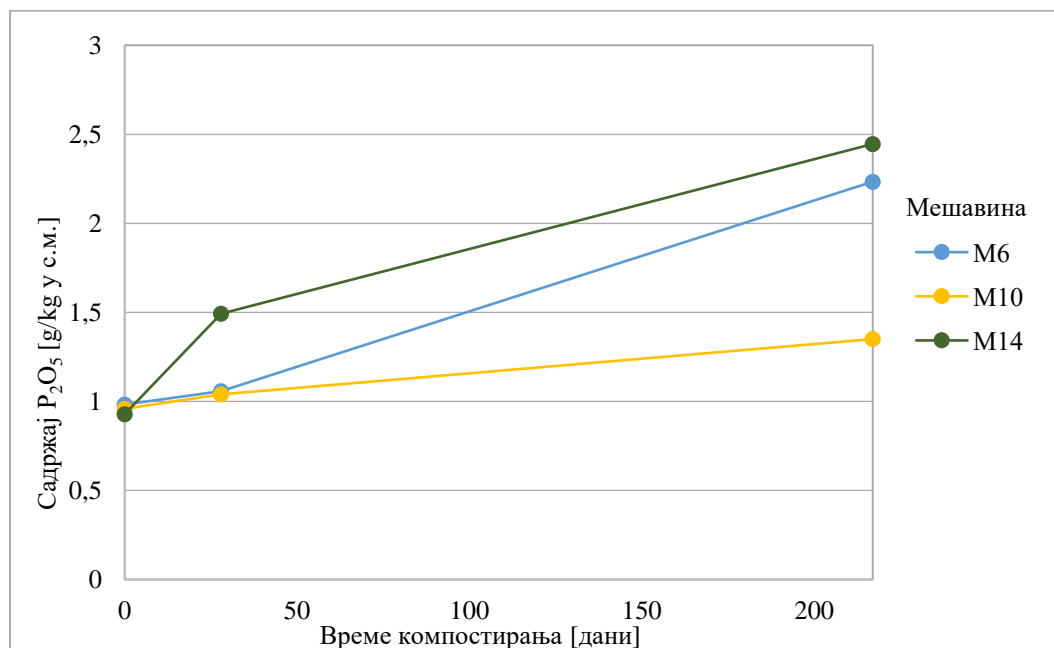
Приложени резултати на сликама 6.52 и 6.53 показују да се у неким мешавинама на почетку процеса садржај  $P_2O_5$  повећавао, док се у другим смањивао. Сличне промене су забележене и у од 29. дана па до краја процеса.



Слика 6.52 Промена садржаја  $P_2O_5$  у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13

Код мешавина са ОХ, слика 6.52, резултати приложени на слици указују да повећањем садржаја огроздине долази до смањења садржаја  $P_2O_5$ . Примећује се да је код свих мешавина на почетку компостирања (током 28 дана) дошло до пада  $P_2O_5$ , а може се приписати условима процеса (температури и садржају воде) [200] [201]. Види се и да је у даљем току процеса, од 29. дана па до краја дошло до значајног смањења садржаја  $P_2O_5$ , код мешавине М9 (25,0 %) са 0,8 на 0,6  $g/kg$  у с.м. Овај тренд промене је у складу са претходно наведеним објашњењима из литературе.

Супротно томе, у мешавини са 15,0 % (М5) и 35,0 % (М13) огроздине, према резултатима са слике 6.59, уочено је повећање садржаја  $P_2O_5$  од 29. дана па до краја процеса са 0,5 на 2,0  $g/kg$  у с.м. и са 0,5 на 0,7  $g/kg$  у с.м., редом. Ова појава се може објаснити интензивнијом минерализацијом ОМ [202].



Слика 6.53 Промена садржаја  $P_2O_5$  у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

Са друге стране, са слике 6.53 се види да низак (15,0 %) и висок (35,0 %) удео огроздине има позитиван утицај на промену садржаја  $P_2O_5$ . Максимални пораст садржаја  $P_2O_5$  у овим мешавинама, М6 и М14, је износио са 0,9 на 2,2  $g/kg$  у с.м. и са 0,9 на 2,4  $g/kg$  у с.м., редом. Код мешавине са 25,0 % огроздине (М10), садржај  $P_2O_5$  се умерено повећао, са 0,9  $g/kg$  на 1,3  $g/kg$  у с.м.

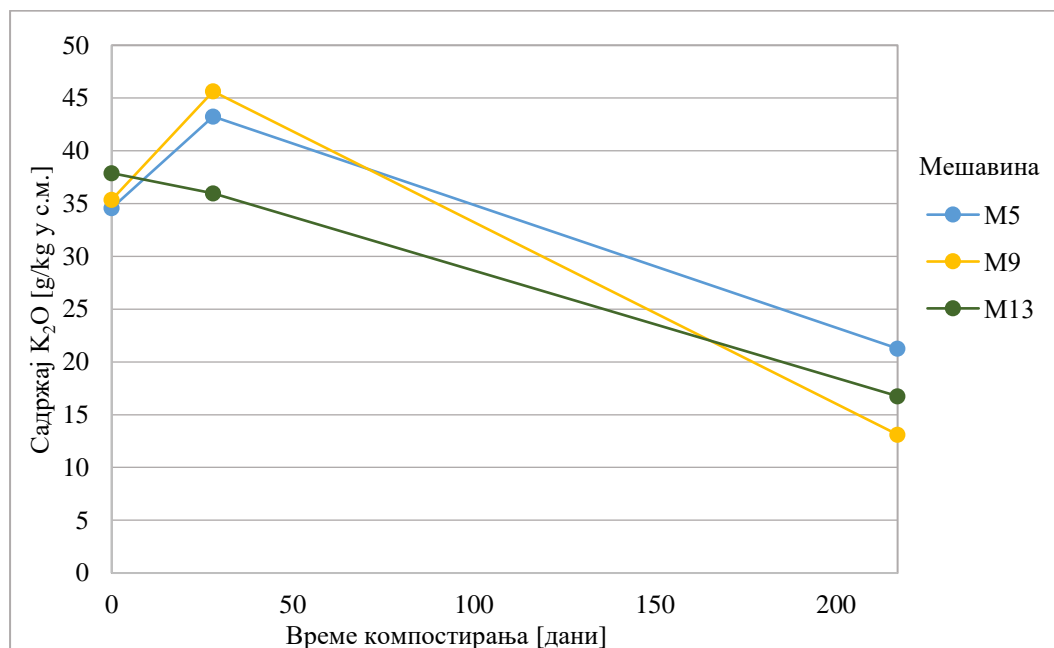
Овакав тренд може се повезати са својством ЖЕ да су подложнији разградњи чиме доприносе интензивирању процеса и смањењу УМ [202] [203].

У поређењу добијених резултата за различите уделе огроздине, произилази закључак да низак (15,0 %) и висок (35,0 %) удео има позитиван ефекат.

#### 6.2.2.7.5 Промена садржаја минералног калијума

О значају К и његовим трансформацијама током процеса компостирања детаљно је описано у поглављу 6.2.1.7.2. И у овом делу истраживања праћена је неорганска форма К, у зависности од врсте ко-супстрата и удела огроздине у мешавини.

На сликама 6.54 и 6.55 приказане су промене садржаја  $K_2O$  током процеса, у зависности од удела огроздине за обе врсте ко-супстрата.

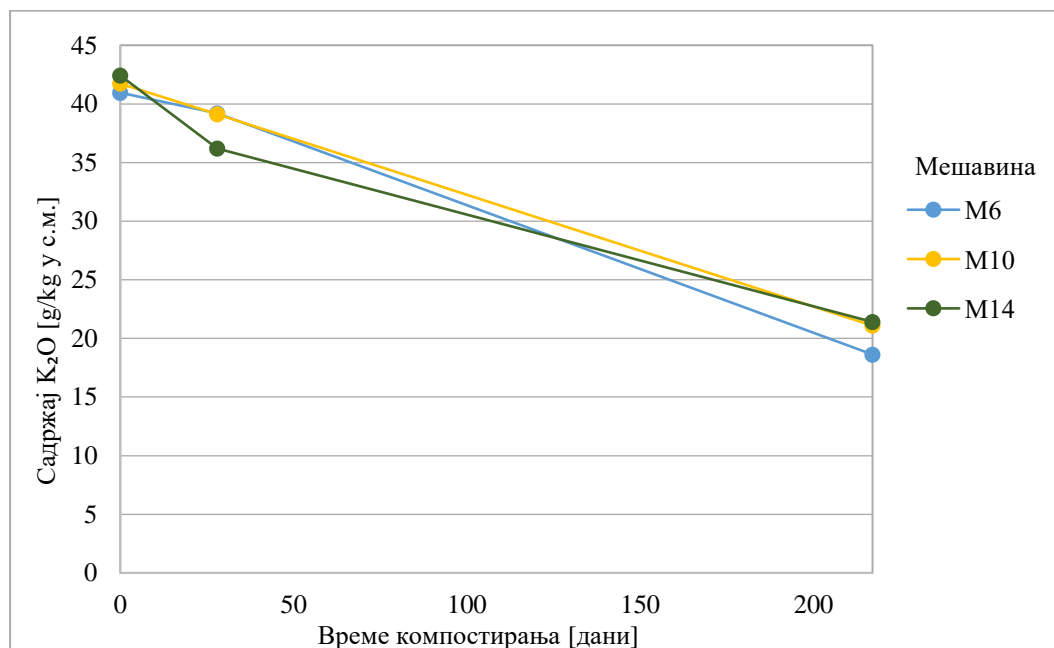


Слика 6.54 Промена садржаја  $K_2O$  у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13

Резултати приказани на слици 6.54 показују да присуство високог удела огроздине у мешавини са ОХ има негативан утицај на садржај  $K_2O$ .

Примећује се да код мешавина са 15,0 % (М5) и 25,0 % (М9) огроздине је на почетку процеса, дошло до повећања садржаја  $K_2O$ , а може се приписати смањењу УМ [173]. У даљем току процеса, у свим мешавинама је дошло до значајног смањења садржаја  $K_2O$ . Максимални пад садржаја  $K_2O$  забележен је при уделу огроздине од 25,0 % са 35,3 g/kg на 13,1 g/kg у с.м. што представља значајно смањење. Најмање смањење забележено је при уделу огроздине од 15,0 % и то са 34,5 g/kg на 21,2 g/kg у с.м.

Овако добијени резултати указују на то да је дошло до губитка  $K_2O$ , вероватно услед његовог испирања и издвајања путем процедурних вода [204].



Слика 6.55 Промена садржаја  $K_2O$  у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14

У поређењу са претходним мешавинама, са слике 6.55 се уочава да виши удео огроздине у мешавини са ЖЕ доприноси мањем смањењу садржаја  $K_2O$ . Најмање смањење је остварено при уделу огроздине од 25,0 % (М10) и 35,0 % (М14) са 42,4 g/kg на 21,4 g/kg у с.м. и са 41,7 g/kg на 21,1 g/kg у с.м., што представља смањење за 49,4 % и 49,5 %, редом. Са друге стране, вишеструко смањење је забележено при уделу огроздине од 15,0 % са 40,9 g/kg на 18,6 g/kg у с.м., што је око 54,5 %.

Оваква промена садржаја  $K_2O$  у присуству ЖЕ као ко-супстрата у сагласности је са претходно изнетим објашњењима.

На основу претходних резултата се може се закључити да је дошло до пада садржаја  $K_2O$  током процеса. Добијене вредности на крају процеса компостирања се налазе у прихватљивим границама, пре свега јер се сви посматрани супстрати одликују високим садржајем  $K_2O$ . Може се закључити да уколико се жели да се постигне максимални садржај калијума у мешавини, онда је оптимални удео огроздине 15,0 % за ОХ и 25,0 % и 35,0 % за ЖЕ.

### 6.2.3 Оцена квалитета добијеног компоста

Као што је претходно речено, циљ примене процеса је поред смањења количина ОО и добијање компоста који је могуће користити као органско ђубриво. Због тога саставни део праћења процеса компостирања обухвата и испитивање и оцењивање добијеног компоста по одређеним параметрима како би се утврдио квалитет компоста. Провера квалитета представља упоређивање добијених вредности физичко-хемијских параметара компоста са истим



параметрима које су дефинисани. Ови параметри су дефинисани од стране надлежних институција на нивоу државе али упоређивање се врши и према литературним подацима.

У овом поглављу провера квалитета компоста биће извршена на основу литературних података и на основу правилника који је дефинисан од стране РС. С обзиром да провера квалитета компоста обухвата велики број метода и параметара, у овом истраживању биће приказани резултати доступних анализа (параметара) које су урађене и праћене током процеса компостирања. Пре свега биће приказани резултати садржаја нутријената, ОМ, воде, односа С/Н, боје, рН вредности. На овај начин биће утврђено да ли добијени компост испуњава задате услове и која је оптимална мешавина.

Провера квалитета компоста биће приказана по параметрима како је описано у поглављу 2.

#### **6.2.4.1 Физички параметри**

Као што је описано у поглављу 2, физички параметри представљају један од начина провере квалитета добијеног компоста. У физичке параметре спадају температура, мирис (гасови) и боја. У даљем делу под поглавља су приказани резултати физичких параметара.

##### **6.2.4.1.1 Температура, мирис (гасови) и боја**

На основу промене температуре, која је приказана на сликама 6.2.1.1 и 6.2.2.1 може се закључити да је добијени компост стабилан.

Мирис добијеног компоста је карактеристичан и на основу промене у мирису може се одредити у којој фази се налази процес. Стабилан компост одликује мирис земље што указује да је дошло до потпуне минерализације ОМ, а то је запажено код свих добијених компоста у овом истраживању.

Боја добијеног компоста представља један од параметара који се користи за проверу квалитета компоста. На сликама 6.56, 6.57 и 6.58, приказан је визуелни изглед добијеног компоста.



Слика 6.56 Визуелни приказ добијеног компоста мешавине М4



а)



б)



в)

Слика 6.57 Визуелни приказ добијеног компоста мешавина: а) мешавина М5; б) М9 и в) М13



а)



б)



в)

Слика 6.57 Визуелни приказ добијеног компоста мешавина: а) М6; б) М10 и в) М14 ;

Како према стандардима компост треба да има браон или црну боју, на основу резултата приказаних на сликама може се закључити да добијени продукт задовољава услове по овом параметру.

#### 6.2.4.1.2 Хемијски параметри

Како се литературни параметри и стандарди прописани од стране државе за физичко-хемијске параметре делимично подударају, да не би дошло до понављања приказа резултата они су приказани заједно. У табели 6.8 дат је приказ физичко-хемијских параметара са референтним вредностима и добијене вредности праћених параметара у овом истраживању.

Табела 6.8 Приказ хемијских параметра добијеног компоста

| Пар.                | C/N   | pH      | Вода [%] | Садржај ОМ [%] | $NH_4^+/NO_3^-$ | $NH_4^+$ [%] | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%] | K <sub>2</sub> O [%] |
|---------------------|-------|---------|----------|----------------|-----------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|
| Референтна вредност | < 20  | 7,4-8,1 | 30 - 40  | 35             | < 0,16 (1,0)    | > 1%         | > 1%                              | > 1%                 |
| M4                  | 15,00 | 7,9     | 39,4     | 46,8           | 2,6             | 1,0          | 0,05                              | 1,8                  |
| M5                  | 18,2  | 8,2     | 47,4     | 54,5           | 0,9             | 0,005        | 0,2                               | 2,2                  |
| M6                  | 20,4  | 7,8     | 38,4     | 52,4           | 4,0             | 0,01         | 0,2                               | 1,8                  |
| M9                  | 18,5  | 7,8     | 45,0     | 59,1           | 0,19            | 0,003        | 0,06                              | 1,3                  |
| M10                 | 14,5  | 8,1     | 40,1     | 55,0           | 12,6            | 0,03         | 0,1                               | 2,1                  |
| M13                 | 22,9  | 8,0     | 46,3     | 66,2           | 2,8             | 0,8          | 0,06                              | 1,6                  |
| M14                 | 14,6  | 8,1     | 45,8     | 61,8           | 7,6             | 0,07         | 0,2                               | 2,1                  |

На основу приказаних резултата у табели 6.8, може се запазити да се добијени компост по већини посматраних физичко-хемијских параметара задовољава прописане стандарде.

Добијени резултати указују на то да већина компоста има одговарајући однос C/N. Ниже вредности односа C/N забележене су у случају мешавина M4, M5, M9, M10 и M14, а налазе се у оптималном опсегу. Међутим, у мешавинама M6 и M13 однос C/N је виши, па оне не задовољавају стандарде.

Вредност pH у већини мешавина је у оптималном опсегу између 7,4 - 8,1 што указује да је добијени компост стабилан. Код појединих компоста pH вредност је виша за 0,2 и 0,1 што се може занемарити с обзиром да је у питању ниска вредност. Овако добијене вредности указују да све мешавине задовољавају стандард.

За разлику од односа C/N и pH вредности, добијени резултати за садржај воде на крају процеса указују да добијени продукт у већини случајева садржи вишак воде. У случају мешавине M5, M6 и M10, садржај воде је у оптималном опсегу. Код осталих мешавина, садржај воде је био виши. С обзиром да се ради о физичком параметру који не утиче хемијске



особине, овај проблем може бити решен додатним сушењем компоста на ваздуху. На овај начин био би постигнут одговарајући садржај воде, па би се добијени компост могао сматрати стабилним.

Садржај ОМ у свим мешавинама је виши од минималне прописане вредности, што указује да је добијени продукт доброг квалитета и задовољава прописане стандарде.

Однос  $NH_4^+/NO_3^-$  представља још један од параметара који служи за оцену квалитета добијеног компоста. На основу приказаних резултата у табели 6.8 се може уочити да је код свих добијених компоста однос  $NH_4^+/NO_3^-$  виши од дозвољеног, изузев у мешавинама са 15,0 % и 25,0 % огроздине када је ко-супстрат ОХ где је овај однос приближан.

Садржај  $NH_4^+$  јона је један од кључних параметара за оцену квалитета добијеног компоста с обзиром да овај облик N биљке усвајају. Добијени резултати указују да је код већине компоста садржај  $NH_4^+$  јона нижи од минималне прописане вредности. У случају мешавине М4 уочава се да је садржај  $NH_4^+$  јона на доњој граници (1,0 %), што указује да је добијени компост у случају ове мешавине доброг квалитета по питању садржаја амонијум јона.

На основу добијених резултата приказаних у табели 6.8 се може запазити да код свих добијених компоста садржај  $P_2O_5$  је нижи од прописане референтне вредности. Може се закључити да по овом критеријуму добијени компост не задовољава прописане стандарде.

Добијени резултати приказани у табели 6.8 упућују на то да је код свих добијених компоста садржај  $K_2O$  виши од прописане референтне вредности. Ово указује да је добијени компост доброг квалитета и да задовољава прописане стандарде о садржају  $K_2O$  у финалном продукту.

Да би добијени компост могао да се користи као органско ђубриво у складу са Правилником о оплемењивачима земљишта, неопходно је да током компостирања достигне температуру која одговара термофилним условима (табела 2.3). Термофилну фазу су постигле све мешавине, па се може закључити да по овом критеријуму сви добијени продукти задовољавају прописан услов.

На основу добијених резултата за прописане стандарде о квалитету компоста може се закључити да ниједан од добијених продуката не задовољава постављене услове, због високог односа  $NO_3^-/NH_4^+$  и ниског садржаја  $NH_4^+$  и  $P_2O_5$ .



#### 6.2.4 Генерална дискусија резултата целог тока процеса компостирања

Овај део докторске дисертације је посвећен генералној дискусији целог тока процеса компостирања најбољих мешавина из активне фазе, које су задовољиле постављене критеријуме - дуже трајање термофилне фазе и краће трајање киселе фазе. У ту групу спада једна мешавина без огроздине (мешавина М4), као и две мешавине са 25,0% огроздином (мешавине М9 и М10). Како би се пратио утицај различитог удела огроздине, мешавинама М9 и М10 додати су нижи, 15,0% (мешавине М5 и М6) и виши удео, 35,0 % огроздине (мешавине М13 и М14).

Имајући у виду сложеност спроведеног експерименталног истраживања где се за праћење тока компостирања посматра велики број параметара, у овом делу је приказан утицај кључних параметара с циљем да се утврди њихов заједнички утицај на процес разградње органске материје. Приликом спровођења упоредне анализе у разматрање су узети карактеристични параметри за праћење процеса компостирања као и параметри који се користе за оцену квалитета компоста.

Параметри који су посматрани као показатељи процеса разградње су оптимална рН вредност, промена УМ мешавина, промена садржаја воде, ОМ, С и N, односа С/N. Поред тога, праћена је и промена садржаја лигноцелулозних материја. Са друге стране, параметри који су коришћени за оцену квалитета компоста су постизање одговарајућег односа С/N однос  $NH_4^+/NO_3^-$  и садржај нутријената: - N, P и K у виду њихових јона.

Анализом промене УМ, садржаја С и ОМ у посматраним мешавинама са и без огроздине, приказаних у поглављима 6.2.1.4 и 6.2.1.5, 6.2.2.4 и 6.2.2.5 може се закључити да је у свим посматраним мешавинама дошло до пада њиховог садржаја, што представља потврду да је дошло до разградње. Даљом анализом, добијени резултати су показали да је у појединим мешавинама дошло до повећања садржаја N док је код неких забележен његов губитак. Са друге стране, анализом промене садржаја лигноцелулозних материја, на основу резултата приказаних у поглављима 6.2.1.6 и 6.2.2.6 може се закључити да је дошло до повећања садржаја лигнина и целулозе и смањења хемицелулозе.

Параметри попут промене температуре, рН вредности и садржаја воде и односа С/N треба да дају одговоре које мешавине испуњавају услове за почетак и даљи ток процеса. Са друге стране, параметри попут садржаја воде, односа С/N и  $NH_4^+/NO_3^-$  као и садржаја нутријената би требало да дају одговоре које мешавине задовољавају услове за крај процеса уколико се разматра квалитет компоста.



Табела прати карактеристике које се односе на квалитет компоста, а дијаграми прате цео ток процеса компостирања три групе мешавина. Ту спадају: мешавине комине и ко-супстрата, М4, (слика 6.59), мешавине комине и ОХ са различитим уделима огроздине М5, М9 и М13 (слика 6.60 а, б и в) и мешавине комине и ЖЕ са различитим уделима огроздине М6, М10 и М14 (слика 6.61 а, б и в).

У табели 6.9 су дате вредности односа  $C/N$  и  $NH_4^+/NO_3^-$ , садржаја  $NH_4^+$  јона, као и Р и К у њиховим јонима ( $P_2O_5$  и  $K_2O$ ) за оба разматрана сценарија, **Сценарио I** – мешавине без огроздине и **Сценарио II** – мешавине са различитим уделима огроздине када су ко-супстрати ОХ и ЖЕ. Поред тога, у табели 6.9 су унети литературни подаци за оптималне вредности према задатим параметрима да би се пратио ниво постизања тих параметара.

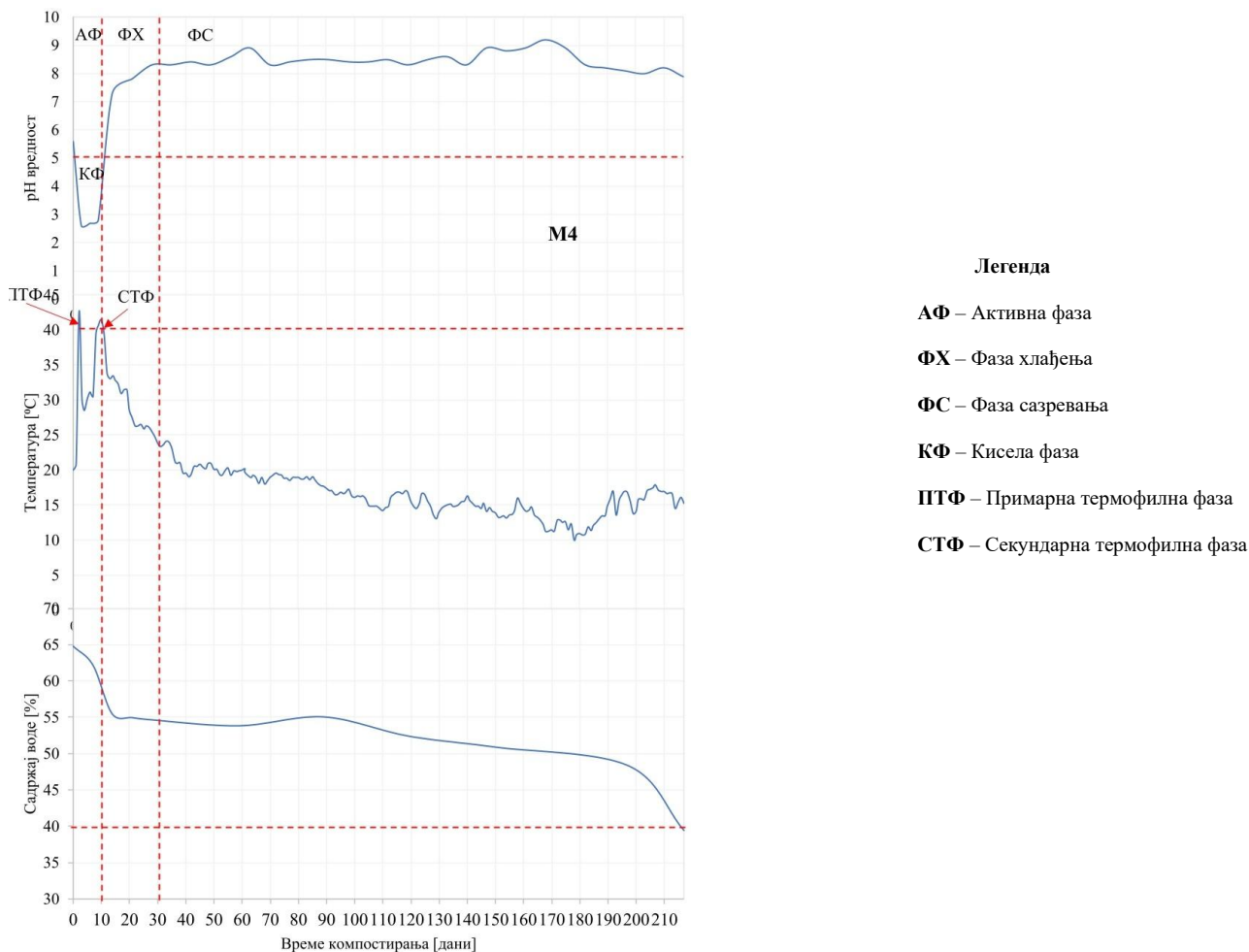
**Табела 6.9** Приказ карактеристичних параметара добијеног компоста у зависности од удела огроздине

| Параметар       | Оптимална вредност за крај процеса | Сценарио I                 | Сценарио II        |                    |                    |                     |                     |                     |
|-----------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                 |                                    | М4                         | Сценарио II-1      |                    | Сценарио II-2      |                     | Сценарио II-3       |                     |
|                 |                                    | Ко + ОХ + ЖЕ + ПС<br>0% Ог | М5<br>Ко + ОХ + Ог | М6<br>Ко + ЖЕ + Ог | М9<br>Ко + ОХ + Ог | М10<br>Ко + ЖЕ + Ог | М13<br>Ко + ОХ + Ог | М14<br>Ко + ЖЕ + Ог |
| C/N             | < 20                               | <b>15,0</b>                | <b>18,2</b>        | 20,4               | <b>18,5</b>        | <b>14,5</b>         | 22,9                | <b>14,6</b>         |
| $NH_4^+/NO_3^-$ | < 1 (0,16)*                        | 2,6                        | 0,9                | 4,0                | 0,2                | 12,6                | 2,8                 | 7,6                 |
| $NH_4$ [%]      | > 1%                               | <b>1,0</b>                 | 0,005              | 0,01               | 0,003              | 0,03                | 0,8                 | 0,07                |
| $P_2O_5$ [%]    | > 1%                               | 0,05                       | 0,2                | 0,2                | 0,06               | 0,1                 | 0,06                | <b>0,2</b>          |
| $K_2O$ [%]      | > 1%                               | <b>1,8</b>                 | <b>2,2</b>         | <b>1,8</b>         | <b>1,3</b>         | <b>2,1</b>          | <b>1,6</b>          | <b>2,1</b>          |

\* - Податак преузет из литературе који указује да однос амонијм јона према нитратном јону од приближно 0,16 представља индикатор стабилног и зрелог компоста [79][80].

На дијаграмима у наставку је приказана упоредна анализа промене рН вредности, температуре и садржаја воде као најбитнијих параметара који прате процес компостирања од активне фазе, преко фазе сазревања до фазе хлађења.

У случају мешавина са свим ко-супстратима, али без огроздине, М4, слика 6.59, са дијаграма за промену рН вредности се види да је кисела фаза трајала 10 дана (од 1. до 11. дана) и да су постигнути термофилни услови у трајању од 5 дана кроз два термофилне фазе (1 дан у ПТФ и 4 дана у СТФ). У исто време, садржај воде је опадао, што указује на интензивну микробиолошку активност и губитак воде испаравањем.



**Слика 6.59** Упоредни приказ промене рН вредности, температуре и садржаја воде за мешавину са свим ко-супстратима: мешавина М4

У даљем току процеса, током ФХ, рН вредност се повећала са 5,0 на 8,3. Истовремено, дошло је до пада температуре и изједначавања са спољашњом што је довело до успоравања микробиолошке активности и разградње лако доступних ОМ. Садржај воде се није битно променио у овој фази, износио је око 55,0 %.

У завршној фази, ФС (од 30. дана до краја процеса), температура је била у мезофилном опсегу, док је рН вредност била највећим делом у опсегу од 8,3 до 9,2. На крају процеса је износила 7,9, што указује на достигнуту биолошку стабилност компоста. Садржај воде је током ФС постепено опадао, достижући вредности ниже од 40,0 % при завршетку процеса, што се сматра једним од критеријума зрелости компоста.

Подаци из табеле 6.9 показују да је постигнут оптималан однос С/Н, мањи од 20, што указује на успешну разградњу ОМ. Међутим, однос  $NH_4^+/NO_3^-$  износи 2,6, што је висока вредност у односу на оптималну ( $< 1,0$ ) и може ограничити примену компоста. Види се да је

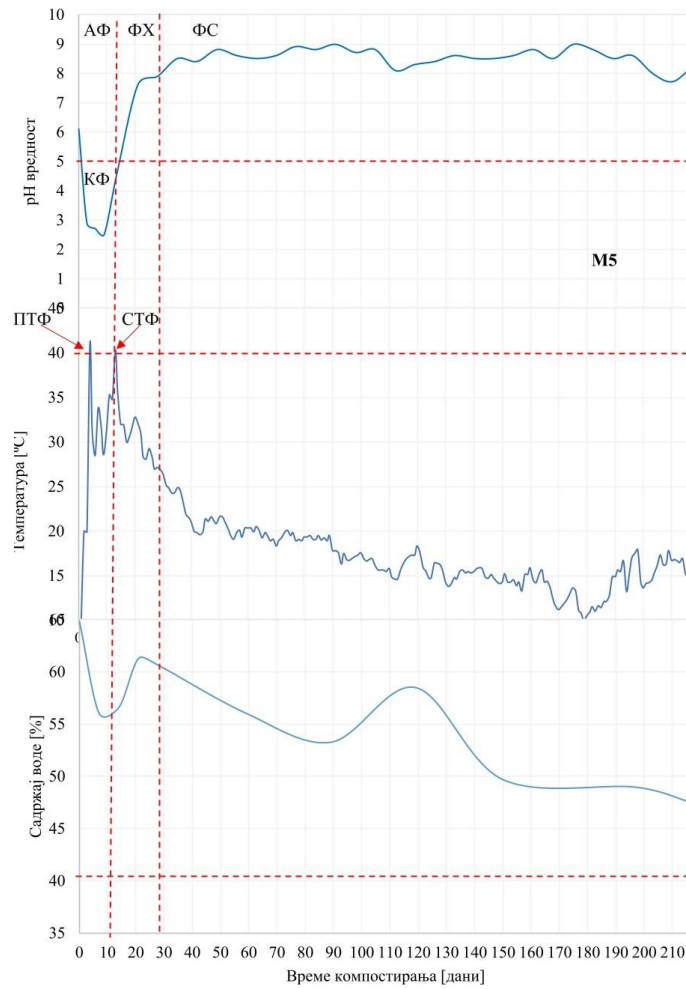


садржај  $NH_4^+$  и  $K_2O$  износи 1,0 % што сугерише да су задовољени критеријуми у погледу њиховог минималног садржаја у зрелом компосту. Из табеле 6.9 се такође види да је садржај  $P_2O_5$  низак (0,05 %), што утиче на нутритивни квалитет финалног производа.

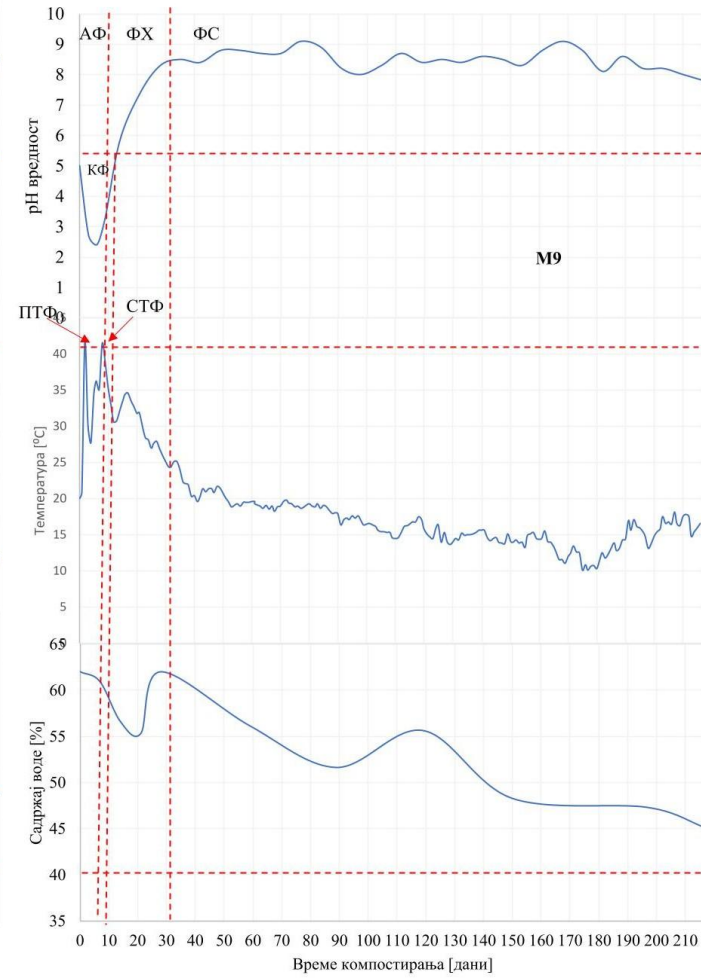
На крају се може закључити да је мешавина М4 успешно започела процес компостирања пре свега захваљујући високој рН вредности од 6.1 и да су постигнута две термофилне фазе што говори о високој микробиолошкој активности. У наставку тока процеса компостирања, током ФХ и ФС, постигнуте су вредности оптималне за крај процеса, рН је износила 7,9, а температура је била једнака спољашњој, што говори о високом степену разградња ОМ. Може се закључити и да ипак није дошло до потпуне трансформације N, односно  $NH_4^+$  није у потпуности прешао у  $NO_3^-$  јон што се види кроз висок однос  $NH_4^+/NO_3^-$ . Када су у питању нутријенти ова мешавина је постигла оптимални ниво  $NH_4^+$  и  $K_2O$  јона, док је садржај  $P_2O_5$  нижи што говори да ова мешавина није задовољила критеријуме о минималном садржају нутријената.

На основу ових резултата може се закључити да је комину могуће компостирати заједно са ко-супстратима, али добијени компост неће имати повољне нутритивне карактеристике за практичну примену као оплемењивач земљишта.

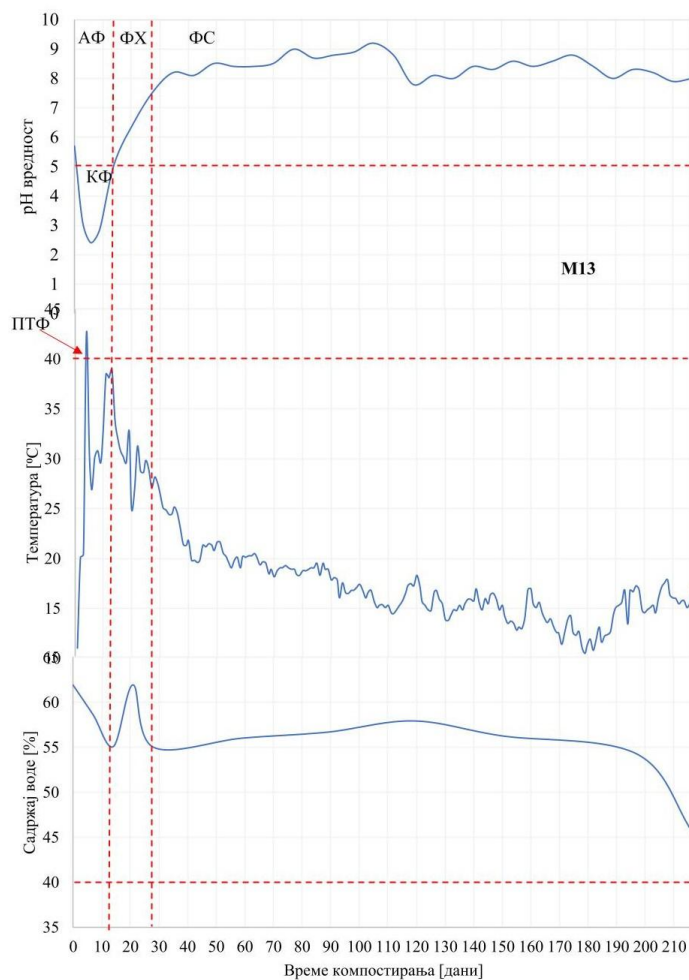
На следећој групи дијаграма дат је приказ промена параметара рН вредности, температуре и састава мешавина комине грозђа са ОХ када је у мешавини присутно 15,0 % огроздине (а), 25,0 % (б) и 35,0 % (в).



а)



б)



в)

**Слика 6.60** Упоредни приказ промене рН вредности, температуре и садржаја воде мешавина са ОХ: а) М5; б) М9; в) М13

На основу дијаграма приказаних на слици 6.60 (а, б и в), уочава се да садржај огроздине утиче на промену рН вредности, температуре и садржаја воде током процеса компостирања.

Види се да код свих мешавина, М5 (15,0 % Ог), М9 (25,0 % Ог) и М13 (35,0 % Ог), у почетној фази компостирања је присутна „кисела фаза“. Запажа се да са повећањем удела огроздине, долази до скраћења киселе фазе са 14 (од 2. до 16. дана) на 12 (од 1. до 12. дана) и 11 (од 2. до 13. дана) дана. Забележено је да су се и термофилни услови, који су трајали по 2 дана у мешавинама са 15,0 % (М5) и 25,0 % (М9) огроздине (1 дан у ПТФ и 1 дан у СТФ) смањили на 1 дан (1 дан у ПТФ) при уделу од 35,0% (М13). Истовремено, садржај воде у почетној фази био је у границама оптималне вредности (60,0 % – 65,0 %) код свих мешавина. На крају активне фазе уочено је да је повећањем удела огроздине у мешавини дошло до смањења садржаја воде са 61,9 %, 60,6 % и 54,9 %, редом. Ова промена може се приписати



већој порозности масе која потиче од вишег удела огроздине, што је омогућило ефикасније издвајање воде.

Током ФХ, температуре су код свих мешавина опале и постигнуте су мезофилни услови. Вредност рН се током процеса повећавала, прелазећи из киселе у благо алкалну (2,8 – 8,5). Садржај воде током ФХ није показивао значајне варијације и кретао се у опсегу од 55,2 % до 61,9 %. Ипак, на крају ове фазе уочено је да повећањем удела огроздине у мешавини долази до благог опадања садржаја воде са 61,9 % у мешавини М5, на 60,6 % у М9, односно 54,9 % у М13.

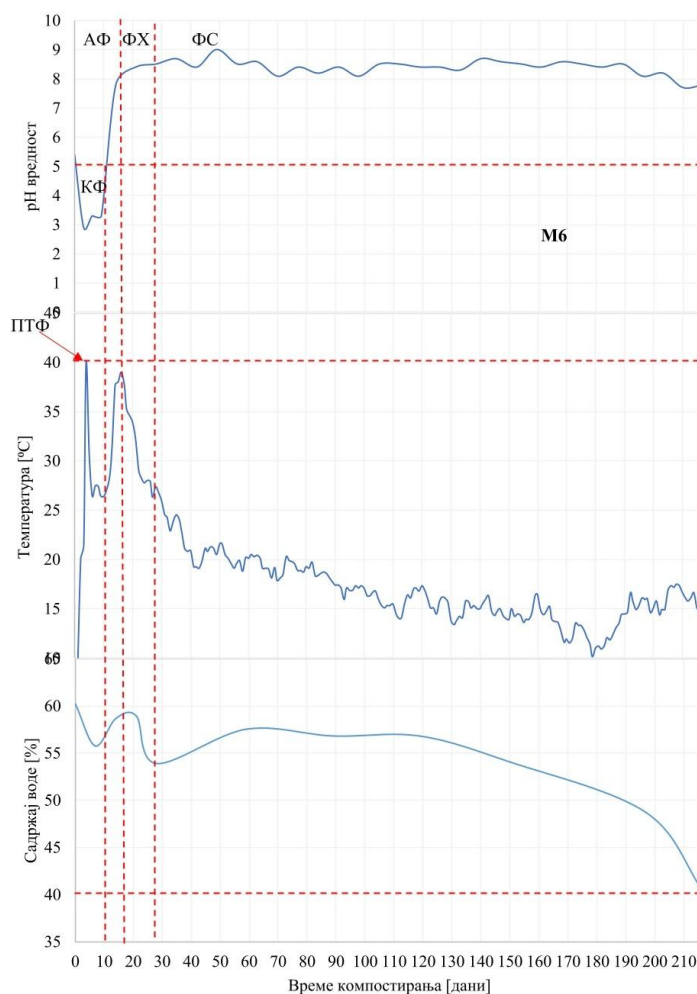
У ФС (од око 30. дана до краја), у све три мешавине долази до стабилизације температуре и рН вредности. Температура је била једнака спољашњој, а рН вредности су у интервалу од 7,5 до 9,3, што указује на достигнуту стабилност компоста. Садржај воде код М5 је до краја процеса опао до вредности испод 45,0 %, што одговара зром компосту. Међутим, код М9 и М13, све до завршетка процеса, садржај влаге је био виши.

Подаци из табеле 6.9 за мешавине са ко-супстратом ОХ (М5, М9 и М13), указују на то да је у две од три мешавине постигнут повољан однос С/Н (мањи од 20), и то у мешавинама са 15,0 % и 25,0 % огроздине. Са друге стране, код мешавине са 35,0 % огроздине, однос С/Н је виши (износи 22,9), што указује да још увек није дошло до потпуне трансформације ОМ. Примећује се и да је дошло до недовољне трансформације N, што се види кроз однос  $NH_4^+ / NO_3^-$  који треба да буде мањи од 1 (0,16). Најнижа вредност овог односа је забележена код мешавине М9 (25,0 %) и износи 0,2. Код мешавина М5 и М13 однос  $NO_3^- / NH_4^+$  је био значајно виши (0,9 и 2,8, редом) од дозвољене вредности што ограничава примену добијеног компоста. Такође, из табеле 6.9 се види да повећањем удела огроздине у мешавини долази до смањења садржаја  $P_2O_5$ , са 0,2 % у мешавини са 15,0 % огроздине на 0,06 % код мешавина са 25,0 % и 35,0 % као и садржаја  $K_2O$ , са 2,1 % при уделу од 15,0 % огроздине на 1,3 % и 1,6 % при уделу од 15,0 % и 35,0 %, редом.

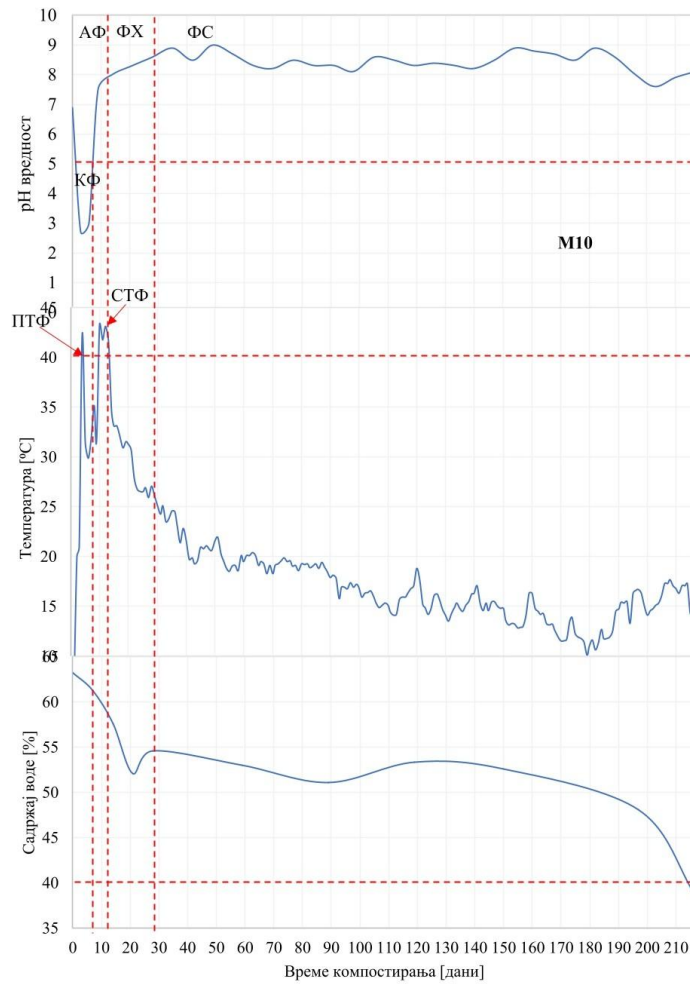
На крају се може закључити да су све мешавине са ОХ успешно отпочеле процес компостирања, што је пре свега резултат почетне рН вредности више од 5,0. У мешавинама М5 и М9 забележена су два термофилна пика, док је у мешавини М13 постигнут један, што указује на задовољавајућу микробиолошку активност у току активне фазе процеса. Међутим, виша порозност мешавине М13, са 35,0 % огроздине, довела је до већих губитака топлоте, што је потврђено остваривањем само једног термофилног пика. У току ФХ и ФС, код свих мешавина постигнуте су вредности карактеристичне за завршетак процеса компостирања.

Вредности рН су износиле 8,2 (М5), 7,8 (М9) и 8,0 (М13), док је температура била изједначена са спољашњом, што указује на висок степен разградње ОМ. Ипак, није дошло до потпуне трансформације N, што се огледа у високом односу  $NH_4^+/NO_3^-$  код мешавина М5 (15,0 %) и М13 (35,0 %). Једино је код мешавине М9 (25,0 %) овај однос био приближан оптималној вредности (0,16). Када је реч о садржају нутријената, све мешавине показале су повишен ниво  $K_2O$ , уз нижи садржај  $NH_4^+$  и  $P_2O_5$  јона. На основу ових резултата може се закључити да ниједна од испитиваних мешавина није испунила критеријуме нутритивне вредности неопходне за практичну примену компоста као оплемењивача земљишта.

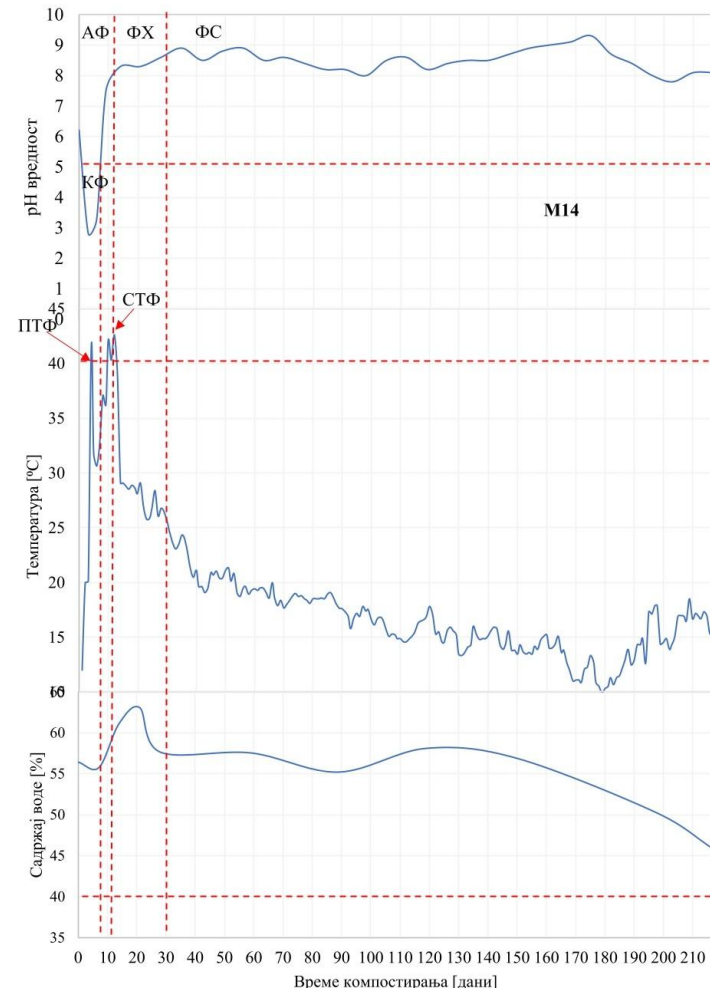
На основу ових резултата може се закључити да је комину, ОХ и огроздине могуће компостирати заједно једино при уделу огроздине од 15,0 % и 25,0 %, али добијени компост неће имати повољне карактеристике за практичну примену због недостатака појединих нутријената. У даљем тексту, на групи дијаграма дат је приказ промена параметара рН вредности, температуре и састава мешавина комине грозђа са ЖЕ када је у мешавини присутно 15,0 % огроздине (а), 25,0 % (б) и 35,0 % (в).



а)



б)



в)

Слика 6.61 Упоредни приказ промене рН вредности, температуре и садржаја воде мешавина: а) М6; б) М10; в) М14



Упоредна анализа мешавина са ко-супстратом ЖЕ (М6, М10 и М14), у зависности од удела огроздине (15,0 %, 25,0 % и 35,0 %), указује да постоји утицај садржаја огроздине на промену карактеристичних параметара током процеса компостирања.

У све три мешавине са ко-супстратом ЖЕ, током почетка процеса компостирања заступљена је кисела фаза. Примећује се да са повећањем удела огроздине долази до скраћења киселе фазе, са 9 (од 2. до 11. дана) на по 6 дана (од 2. до 8. дана) М10 (25,0 %) и М14 (35,0 %). Истовремено су забележени и термофилни услови, који су трајали 1 дан у мешавини са 15,0 % (М6) (1 дан у ПТФ) и повећали на 5 (1 дан у ПТФ и 4 дана у СТФ) и 4 дана (1 дан у ПТФ и 3 дана у СТФ) при уделу огроздине од 25,0 % и 35,0 % (1 дан у ПТФ и 4 дана у СТФ). Истовремено, садржај воде у почетној фази био је у границама оптималне вредности (56,4 % – 65,0 %) код свих мешавина.

Током ФХ, температуре су код свих мешавина опадале и постигнути су мезофилни услови. Вредности рН кретале су се од киселе до благо алкалне (3,3 – 8,6). Мешавина М6 је спорије прешла у ФХ у односу на М10 и М14, што указује на побољшање услова разградње при вишим уделима огроздине.

Садржај воде током фазе ФХ није показивао значајне варијације и кретао се у опсегу од 52,6 % до 57,66 %. Ипак, на крају ове фазе уочено је да повећањем удела огроздине у мешавини долази до варијација у садржају воде, од 54,5 % у мешавини М6, преко 53,9 % у М10, до 57,6 % у М14. Ова појава може се довести у везу са утицајем огроздине на порозност масе, што може истовремено омогућити убрзан губитак воде, али и њено задржавање у структури огроздине.

У ФС у све три мешавине долази до стабилизације температуре и рН вредности. Температура је била једнака спољашњој, а рН вредности су у интервалу од 7,5 до 9,3, што указује на достигнуту стабилност компоста. Садржај воде код М6 и М10 је до краја процеса опао до вредности испод 40,0 %, што одговара зрелом компосту. Међутим, код М14 садржај влаге је био виши и износио је 45,8 %.

Подаци из табеле 6.9 за мешавине са ко-супстратом ЖЕ (М6, М10 и М14), указују на то да две мешавине постигле повољан однос С/Н (мањи од 20), са 25,0 % и 35,0 % огроздине. У мешавини са 15,0 % огроздине однос С/Н је на горњој граници, износи 20,4. Примећује се и да је дошло до недовољне трансформације N јер је код свих мешавина однос  $NH_4^+/NO_3^-$  био значајно виши. Најнижа вредност овог односа је забележена код мешавине М6 (15,0 %) и износила је 4,0. Код мешавина М10 и М14 однос  $NH_4^+/NO_3^-$  је био значајно виши, 12, 6 и 7,0.



Подаци из табеле 6.9 показују да повећање удела огроздине у мешавини утиче на садржај  $P_2O_5$ , који се смањује са 0,2 % у мешавини са 15,0 % огроздине на 0,1 % при 25,0 %, али затим благо расте на 0,2 % у мешавини са 35,0 % огроздине. Истовремено се из табеле 6.9 види да повећањем огроздине у мешавини долази до повећања садржаја  $K_2O$ , са 1,8 % при уделу од 15,0 % огроздине на 2,1 % и 2,4 % при уделу од 15,0 % и 35,0 %, редом.

На крају се може закључити да су све мешавине са ЖЕ успешно отпочеле процес компостирања, што је пре свега резултат почетне рН вредности више од 5,0. У мешавинама М10 и М14 забележена су две термофилне фазе, док је у мешавини М6 постигнута једна, што указује на задовољавајућу микробиолошку активност у току АФ процеса. Међутим, нижа порозност мешавине М6, са 15,0 % огроздине, довела је до појаве анаеробних услова, што је потврђено остваривањем само једне термофилне фазе. У току ФХ и ФС, код свих мешавина постигнуте су вредности карактеристичне за завршетак процеса компостирања. Вредности рН су биле 7,8 (М6), 8,1 (М10) и 8,0 (М14), док је температура била изједначена са спољашњом, указујући на висок степен разградње ОМ. Ипак, није дошло до потпуне трансформације N, што се огледа у високом односу  $NH_4^+/NO_3^-$  код свих мешавина. Када је реч о садржају нутријената, све мешавине су постигле висок садржај  $K_2O$ , док је садржај  $NH_4^+$  и  $P_2O_5$  нижи. На основу ових резултата може се закључити да ниједна од мешавина са ЖЕ није постигла одговарајуће вредности за садржај нутријената пре свега због ниског удела  $NH_4^+$  и  $P_2O_5$  као и односа  $NH_4^+/NO_3^-$ .

На основу спроведене анализе може се закључити да је мешавина која садржи само комину и ко-супстрат (мешавина М4) имала повољне услове за отпочињање и даљи ток процеса компостирања, што се огледа у постизању две термофилне фазе и високој микробиолошкој активности. Присуство огроздине у мешавинама са ко-супстратом ОХ утиче на смањење трајања термофилне фазе услед повећане порозности и смањења садржаја воде, што доводи до непотпуне трансформације N и смањења садржаја нутријената. Насупрот томе, код мешавина са ко-супстратом ЖЕ, повећан удео огроздине није имао негативан утицај на дужину термофилне фазе, већ је допринео стабилнијем току процеса захваљујући бољем задржавању воде и оптималној порозности. Ипак, и у овим мешавинама, однос  $NH_4^+/NO_3^-$  је висок, што представља ограничење у нутритивном квалитету добијеног компоста.

У погледу нутритивних карактеристика, мешавина без огроздине показала је повољнији однос основних нутријената, са оптималним концентрацијама  $NH_4^+$  и  $K_2O$ . Насупрот томе, код мешавина са огроздином, нарочито оних са већим уделом, забележен је смањен ниво  $P_2O_5$  и



променљив садржај  $K_2O$ , што указује на мању стабилност и нутритивну вредност финалног компоста.

На основу добијених резултата, може се закључити да су све мешавине постигле висок степен разградње што указује да је могуће применити процес компостирања. Најбоље резултате је показала мешавина комине и свих ко-супстрата, уколико се упореде мешавине без и са огроздином. До овог закључка се дошло јер ова мешавина, М4, има највиши садржај нутријената. Са друге стране, уколико би се у процес компостирања комине и ко-супстрата укључила и огроздина, оптималан удео огроздине у мешавинама би износио од 15,0 – 25,0 % када се користи ко-супстрат ОХ, односно од 25,0 – 35,0 % у присуству ко-супстрата ЖЕ. На овај начин би постигли одговарајуће услове за почетак и даљи ток разградње.

### 6.3 Верификација математичког модела

Као што је већ описано у поглављу 4, математички модел је развијен са циљем одређивања састава мешавина које ће се користити за експериментално спровођење процеса компостирања комине и изабраних ко-супстрата.

Како би се верификовао математички модел, извршена је упоредна анализа резултата добијених математичким моделом са добијеним експерименталним резултатима, табела 6.10. У разматрање су узети гранични услови, критеријуми, као и утицај огроздине и врсте ко-супстрата на постављене граничне услове и критеријуме.

У првом кораку су упоређене вредности за постављене граничне услове (однос  $C/N$  и  $CB$ ) и критеријуме (садржај  $C$ ,  $N$ , вредности  $pH$  и садржај лигнина) који су добијени математичким и експерименталним путем. Приликом приказивања резултата, вредности посматраних параметара су дате за различите садржаје мешавина и садржаја огроздине: **Сценарио I** без огроздине и **Сценарио II** са различитим садржајем огроздине. Такође, у табели су представљени и оптимални параметри који су били полазни услови код развијања математичког модела.

Најпре, експериментално је потврђено да је код свих мешавина, које су предложене математичким моделом, дошло до покретања и наставка одвијања процеса. Ово указује да су постављени критеријуми и гранични услови добро дефинисани. То потврђује и однос  $C/N$  који је између 25 и 32,4 при експерименталним условима што представља оптимални опсег за почетак процеса компостирања.



Анализом постављених граничних услова из табеле 6.10 се види да су за оба сценарија претпоставке уведене математичким моделом делимично потврђене експерименталним путем. Код свих мешавина при експерименталним условима однос  $C/N$  је био између 25,0 и 32,4, што је у опсегу који је предложен математичким моделом од 25,0 до 35,0, па се може закључити да је по овом граничном услову математички модел верификован. Садржај воде је у експерименталном истраживању био између 56,4 % и 68,8 % што је више од вредности које су уведене математичким моделом, који је био од 40,0 % до 60,0 %. Намеће се закључак да математички модел није верификован и по граничном услову о садржају воде.

Када су у питању постављени критеријуми, у случају **Сценарија I**, експериментално добијене вредности за максимални садржај  $C$ , као и за минимални садржај  $N$  и лигнина су компатибилне са вредностима добијеним математичким моделом. У случају  $pH$  вредности, експериментално добијене вредности су сличне вредностима које су добијене математичким моделом, са појединим одступањима у границама од 0,2 до 0,5. У случају **Сценарија II**, експериментално добијене вредности за максимални садржај  $C$ , као и за минимални садржај  $N$  и лигнина су у сагласности са вредностима које су добијене математичким путем. Ово наводи на закључак да је математички модел верификован по ова три критеријума за **Сценарио II**. Када су у питању  $pH$  вредности, експериментално добијене вредности су блиске вредностима из математичког модела за четири мешавине,  $M_6$ ,  $M_9$ ,  $M_{11}$  и  $M_{12}$ . Код мешавина,  $M_5$ ,  $M_{10}$ ,  $M_{13}$  и  $M_{14}$  уочено је одступање  $pH$  вредности добијене експерименталним путем од вредности добијене математичким моделом. Ова појава може се повезати са особиним коришћених ко-супстрата, који у полазном стању имају више  $pH$  вредности, као и са специфичним условима средине током почетка процеса компостирања.



Табела 6.10 Упоредни приказ резултата математичког модела и експерименталних резултата

| Сценарио                                    | Параметри математичког модела      |                |             |         |       |        | Параметри експеримента |                |             |         |       |        |      |
|---|------------------------------------|----------------|-------------|---------|-------|--------|------------------------|----------------|-------------|---------|-------|--------|------|
|   | Гранични услови                    |                | Критеријуми |         |       |        | Гранични услови        |                | Критеријуми |         |       |        |      |
|   | С/Н                                | СВ [%]         | Макс С      | Макс рН | Мин N | Мин Лг | С/Н                    | СВ [%]         | Макс С      | Макс рН | Мин N | Мин Лг |      |
| <b>Оптимални параметри</b>                  | <b>25 - 35</b>                     | <b>40 - 60</b> |             |         |       |        | <b>25 - 35</b>         | <b>40 - 60</b> |             |         |       |        |      |
| <b>Сценарио I (0 % O<sub>2</sub>)</b>       |                                    |                |             |         |       |        |                        |                |             |         |       |        |      |
| M1  | К <sub>о</sub> + ОХ                | 25.5           | 57.3        | 53.1    | 4.7   | 2.1    | 11.8                   | 25,5           | 62,2        | 53,4    | 5,0   | 2,1    | 11,9 |
| M2  | К <sub>о</sub> + ЖЕ                | 25.5           | 57.1        | 49,5    | 5.1   | 1.9    | 9.3                    | 25,0           | 60,6        | 49,0    | 5,2   | 1,9    | 9,6  |
| M3  | К <sub>о</sub> + ПС                | 30.7           | 56.0        | 52.3    | 4.6   | 1.7    | 6.5                    | 29,9           | 64,5        | 51,4    | 4,8   | 1,7    | 6,1  |
| M4  | К <sub>о</sub> + ОХ + ЖЕ + ПС      | 25.3           | 55.9        | 50.6    | 5.1   | 2.1    | 12.1                   | 25,1           | 64,8        | 50,6    | 5,6   | 2,0    | 12,8 |
| <b>Сценарио II</b>                          |                                    |                |             |         |       |        |                        |                |             |         |       |        |      |
| <b>Сценарио II - 1 (15 % O<sub>2</sub>)</b> |                                    |                |             |         |       |        |                        |                |             |         |       |        |      |
| M5  | К <sub>о</sub> + ОХ + Ог           | 25.0           | 57.1        | 52.3    | 4.8   | 2.1    | 15.1                   | 25,0           | 68,8        | 52,3    | 6,1   | 2,1    | 17,6 |
| M6  | К <sub>о</sub> + ЖЕ + Ог           | 25.1           | 57.5        | 48.0    | 5.2   | 1.9    | 11.7                   | 25,2           | 60,1        | 47,9    | 5,4   | 1,9    | 13,2 |
| <b>Сценарио II - 2 (25 % O<sub>2</sub>)</b> |                                    |                |             |         |       |        |                        |                |             |         |       |        |      |
| M9  | К <sub>о</sub> + ОХ + Ог           | 25.1           | 56.9        | 51.7    | 4.8   | 2.1    | 16.5                   | 25,1           | 62,1        | 51,7    | 5,0   | 2,1    | 16,6 |
| M10   | К <sub>о</sub> + ЖЕ + Ог           | 25.2           | 57.3        | 47.2    | 5.3   | 1.9    | 13.1                   | 25,3           | 63,3        | 46,3    | 6,9   | 1,8    | 13,3 |
| M11   | К <sub>о</sub> + ПС + Ог           | 32.4           | 55.5        | 50.8    | 4.6   | 1.6    | 9.7                    | 31,6           | 63,3        | 50,7    | 5,0   | 1,6    | 9,7  |
| M12   | К <sub>о</sub> + ОХ + ЖЕ + ПС + Ог | 25.8           | 56.2        | 49.3    | 5.0   | 1.9    | 10.2                   | 25,1           | 64,6        | 49,3    | 5,3   | 1,9    | 10,8 |
| <b>Сценарио II - 3 (35 % O<sub>2</sub>)</b> |                                    |                |             |         |       |        |                        |                |             |         |       |        |      |
| M13   | К <sub>о</sub> + ОХ + Ог           | 25.6           | 56.7        | 51.2    | 4.8   | 2.0    | 17.6                   | 25,5           | 61,9        | 51,2    | 5,7   | 2,0    | 18,1 |
| M14   | К <sub>о</sub> + ЖЕ + Ог           | 25.5           | 57.2        | 46.5    | 5.3   | 1.8    | 14.3                   | 25,1           | 56,4        | 47,1    | 6,2   | 1,8    | 14,6 |



Након упоређења граничних услова и критеријума праћен је утицај садржаја огроздине на постављене граничне услове. Математички модел је показао да додавањем огроздине у мешавине за обе врсте ко-супстрата ће вредности бити сличне за однос  $C/N$  и садржај воде. Овај резултат је експериментално потврђен само код односа  $C/N$ , док је у случају садржаја воде дошло до њеног смањења када је ко-супстрат ОХ. За мешавина са ЖЕ не постоји зависност између удела огроздине и садржаја воде. Може се закључити да математички модел није у потпуности сагласан са експерименталним подацима.

Анализом постављених критеријума, промене садржаја  $C$  у зависности од удела огроздине у мешавини, математички модел је предвидео да ће доћи до повећања садржаја  $C$ . Добијени резултати експерименталним путем су сагласни са резултатима математичког модела.

Када се разматра промена рН вредности у зависности од удела огроздине математички модел је показао да додавањем огроздине долази до побољшања услова, односно, до благог пораста рН вредности. Овај тренд је и експериментално потврђен.

Математички модел је предвидео и да ће доћи до пада садржаја  $N$  при повећању удела огроздине у мешавини. Добијени резултати нису експериментално потврђени у свим мешавинама. У мешавинама са 15,0 % и 25,0 % огроздине садржај азота је исти, док је једино при уделу од 35,0% дошло до његовог пада.

Када је у питању садржај лигнина у мешавинама, математички модел је показао да долази до пораста његовог садржаја у мешавинама са повећањем удела огроздине, што је и очекивано имајући у виду висок садржај лигнина у огроздини. Овакав тренд је експериментално потврђен за мешавине са обе врсте ко-супстрата.

На крају је извршена упоредна анализа вредности посматраних критеријума и граничних услова добијених математичким моделом и експерименталним путем за поједине ко-супстрате (ОХ, ЖЕ, ПС). Анализом података када се у мешавинама налазе ко-супстрати без огроздине (**Сценарио I**) може се уочити да код свих мешавина има слагања у трендовима промена вредности попут односа  $C/N$ , садржаја  $C$ ,  $N$  и рН вредности, док је садржај воде добијен експерименталним путем растао, а код математичког модела опадао. У исто време се може видети да у оба случаја мешавине са ПС имају одступања, што је ту мешавину елиминисало из даљег тока експерименталног истраживања. Код мешавине комине и свих ко-супстрата забележена је највиша рН вредност, па је ова мешавина узета за праћење дуж целог тока процеса.



Занимљиво је такође видети да ли код мешавина код који је додавана огроздина долази до поклапања трендова промена вредности добијених математичким моделом и експерименталним путем (*Сценарио II*). Додавањем различитог садржаја огроздине у мешавине однос C/N се није битно мењао ни код математичких ни код експерименталних података за све мешавине. Праћењем утицаја садржаја огроздине на поједине врсте ко-супстрата види се да код мешавина са ОХ има великог слагања по критеријумима за садржај C, N и лигнина (изузев у мешавини са 15,0 % огроздине), док за рН вредност и садржај воде има одступања. Код мешавина са ЖЕ пораст садржаја огроздине је повећао садржај C и код математички и експериментално добијених вредности. Такође, види се слагање у порасту рН вредности са повећањем садржаја огроздине у мешавинама изузев у мешавини са 25,0 %. Код садржаја азота постоји поклапање у вредностима. Када је у питању утицај садржаја огроздине на податке добијене математичким и експерименталним путем постоји поклапање у тренду пораста садржаја лигнина у мешавинама са порастом садржаја огроздине.

На крају, на основу спроведене анализе, може се закључити да је развијени математички модел ефикасан инструмент за избор састава мешавина за почетак процеса компостирања. Резултати су показали да модел у највећем броју случајева даје вредности параметра по посматраним граничним условима и критеријумима који се поклапају са експериментално добијеним подацима. Такође, овако развијен модел се може унапредити и користити као основ за оптимизацију процеса по више параметара.



## 7 ЗАКЉУЧАК

Органски отпад из индустрије вина је врста ОО заступљена у РС која се одликује високим садржајем ОМ доступне за микробиолошку разградњу, што га номинује за третман процесом компостирања. Захваљујући значајној концентрацији нутријената, пре свега Р и К пружа се могућност да се користи као органско ђубриво тј. оплемењивач земљишта, након завршетка процеса компостирања.

Међутим, због недовољно повољних карактеристика, пре свега ниске рН вредности, која представља ограничавајући фактор за почетак компостирања, неопходно је додавати различите врсте ОО у виду ко-супстрата. Њихове особине омогућавају формирање таквих мешавина са ООИВ да се процес компостирања може успешно започети и наставити.

Теоријско и експериментално истраживање спроведено у овој докторској дисертацији је показало да је могуће користити ООИВ за добијање компоста у мешавинама са различитим ко-супстратима.

Да би се боље сагледали потенцијали ОО које је могуће употребити као ко-супстрате, направљена је база података о доступним врстама ООИП. Сагледане су врсте ООИП и њихове карактеристике. Утврђено је да се на територији РС годишње генеришу значајне количине ООИВ, око 32680,9 тона, које је могуће третирати процесом компостирања. Такође, постоје значајни потенцијали ООП који је могуће искористити као ко-супстрате: 2388939,8 тона ПС и 3217725,7 КС из групе биомасе, док је из групе отпадне биомасе из сточарства затупљено: 14363078,4 тона КЕ, 3169187 тона СЕ и 1296281,5 ЖЕ. Поред тога, утврђено је да постоје и значајне количине ОФКО: 202 988,4 тона ЗО и 435 375,1 тона ОХ.

Имајући у виду сложеност деловања утицајних параметара на одигравање трансформације ОО, за потребе овог истраживања развијен је математички модел за одређивање удела ООИВ и појединих ко-супстрата за почетак процеса компостирања. Развијени модел предвиђа више корака приликом дефинисања састава мешавина (граничне услове и критеријуме) и користи методу ВКО, метод глобалног критеријума. Као ко-супстрати приликом развијања модела изабрани су ОХ, ЖЕ и ПС тј. из сваке групе ООИП по један. Резултати математичког модела су показали да су задовољени постављени гранични услови тј,



однос C/N је између 25,0 и 35,0, а садржај воде је од 40,0 % до 60,0 %. Анализом утицаја огроздине на граничне услове утврђено је да повећање њеног удела у мешавини доводи до пораста односа C/N и смањења садржаја воде. Праћењем утицаја огроздине на постављене критеријуме утврђено је да она негативно утиче на садржај C, рН и лигнин, што резултује смањењем или повећањем ових параметара. Такође, доказан је и позитиван ефекат присуства огроздине што се види кроз пад садржаја N са повећем њиховог удела. Анализом утицаја ко-супстрата на граничне услове и критеријуме математички модел је показао да присуство ОХ и ЖЕ утиче на повећање рН вредности и на смањење садржаја лигнина. Такође, утврђен је и негативан ефекат ПС што се огледа кроз ниску рН вредност, висок садржај линина као и низак садржај N.

За праћење активне фазе и фазе хлађења током спроведеног експеримента додата су додатна два критеријума: постизање термофилних услова и краће трајање киселе фазе, што је одлучивало које мешавине ће се посматрати током целог експерименталног истраживања. Утврђено да је у мешавинама са ко-супстратима ОХ, ЖЕ и ПС, постављени додатни услови процеса нису били задовољавајући или нису постигнути.

Најбоље резултате је дала мешавина у којој су присутни сви ко-супстрати (M4) у чији састав улази комина, ОХ, ЖЕ и ПС. У овој мешавини постигнута је термофилна фаза која је дуго трајала, пет дана, што је омогућило интензивну разградњу ОМ. Овакво продужење термофилне фазе може се приписати повољним условима процеса, пре свега постигнутој порозности која потиче од ПС и присуство компоненти подложне разградњи које подижу рН вредност (ОХ и ЖЕ). Трајање киселе фазе је било 10 дана, што краће у поређењу са осталим мешавинама где је кисела фаза трајала 14, 17 и 22 дана. Због напред поменутих повољних услова, мешавина са свим ко-супстратима је задовољила постављене критеријуме за избор за даље експериментално разматрање, односно за цео ток испитивања.

Степен разградње ОМ током процеса компостирања праћен је постигнутим параметрима попут крајње температуре, рН вредности, односа C/N и садржаја воде. Такође, ефикасност процеса разградње је праћена кроз промену садржаја лигноцелулозних материја и кроз пораст или опадање неорганских форми нутријената. Мешавина M4 је постигла ове параметре, што значи да су постављени критеријуми и гранични услови током АФ и ФХ и у математичком моделу били добро постављени.

Како је један од циљева и потврда да је дошло до биолошке разградње најбоље мешавине без огроздине праћењем мешавине M4 током целог процеса, утврђено је да на крају процеса



температура је постигла температуру околине, а рН вредност је износила 7,9, што потврђује успешну разградњу. Такође, дошло је до адекватног пада односа C/N који је на крају процеса износио 15,0, што спада у очекивану област за крај процеса. Током процеса, посебно током већег дела ФС садржај воде је био нешто виши од уобичајеног, од 40,0 % до 55,0 % али је на крају процеса достигао оптималну вредност од 40,0 %. Као доказ разградње утврђено је да је дошло до разградње хемицелулозе за 58,0 %, док су се садржај лигнина и целулозе повећали за 18,6 % и 41,2 %, редом. Такође, потврђено је да је неопходно задовољити оптималне услове (температуру и дужину трајања термофилне фазе) и да би дошло до разградње лигноцелулозних материја посебно лигнина и целулозе. Кроз пораст садржаја  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$  јона се види да је дошло до разградње ОМ, али да процес још није завршен, што се огледа кроз висок однос  $NH_4^+/NO_3^-$  који износи 2,6. Садржај  $P_2O_5$  и  $K_2O$  је опао, што се објашњава њиховим испирањем током процеса услед високог садржаја воде.

Праћењем процеса компостирања током активне фазе и ФХ показано је да се комина може компостирати са огроздином уз додатак одређених ко-супстрата ОХ и ЖЕ. Код мешавина са обе врсте ко-супстрата дошло је до пораста температуре, скраћења киселе фазе, при чему је код ЖЕ постигнут најбољи резултат. У мешавинама са ПС и свим ко-супстратима дошло је до изостанка или скраћења термофилних услова и скраћења киселе фазе што говори о томе да је присуство огроздине прекомерно повећало порозност што је утицало на губитак енергије у околину. Може се закључити да огроздина може преузети улогу компоненте која даје порозност што је у претходном случају била ПС. Додавањем огроздине се елиминише присуство ПС која је била носилац порозности.

Анализом резултата за мешавине са ОХ и ЖЕ, при различитим уделима огроздине, утврђено је да је оптимални удео 25,0 %, узимајући у обзир однос C/N и садржај воде.

Показано је да нижи удео огроздине, 15,0 % негативно утиче на краће трајање термофилне фазе, дуже трајање киселе као и већи губитак N што је утицало на постизање оптималног односа C/N на крају процеса. Такође, утврђено је да удео огроздине од 15,0 % неповољно утиче на садржај  $P_2O_5$  и  $K_2O$  код мешавине са ОХ, док у случају  $NO_3^-$  неповољан ефекат забележен за обе врсте ко-супстрата.

Додавањем 35,0 % огроздине у мешавини са ОХ и ЖЕ, на основу добијених резултата може се закључити да висок удео огроздине има више негативних ефеката, што се огледа кроз краће трајање термофилне фазе и мање смањење УМ и ОМ. Такође, виши садржај воде је забележен у мешавини са ЖЕ. У мешавини са ко-супстратом ОХ виши удео огроздине



резултирао је већим садржајем  $NH_4^+$  јона. Такође, однос  $NH_4^+/NO_3^-$  показује тенденцију раста са повећањем удела огроздине у случају ко-супстрата ОХ, што представља још један негативан ефекат.

Праћењем параметара квалитета компоста попут боје, мириса као и хемијских параметара може се закључити да је мешавина без огроздине М4 постигла задовољавајући ниво разградње. Ово се огледа кроз оптималан однос C/N (мањи од 20), одговарајућу рН вредност, као и садржај ОМ, воде и нутријената  $NH_4^+$  и  $K_2O$  јона. Утврђено је да нису постигнути сви параметри који се захтевају да би компост био оплемењивач земљишта, и то садржај  $P_2O_5$  јона и одговарајући однос  $NH_4^+/NO_3^-$ .

Када су у питању мешавине огроздине са ОХ и ЖЕ такође је утврђено да је постигла одговарајући степен разградње што се види кроз боју и мирис компоста као и одговарајуће рН вредности, садржај ОМ и воде као и однос C/N. У мешавинама са 35,0 % (М13) однос C/N је био већи од 20,0, док је код мешавина М5, М9, М13 и М14 садржај воде био виши од 40,0 %, па ове мешавине нису задовољиле ове услове. Такође, код свих мешавина није постигнут ниво квалитета оплемењивача земљишта због ниског садржаја  $P_2O_5$  и високог односа  $NH_4^+/NO_3^-$ .

На основу спроведене анализе, упоређивањем експерименталних вредности са резултатима математичког модела за постављене граничне услове и критеријуме, може се закључити да је развијени математички модел ефикасан инструмент за избор састава мешавина за почетак процеса компостирања.

Експериментално је потврђено да је код свих мешавина, које су предложене математичким моделом, дошло до покретања и наставка одвијања процеса компостирања. Ово указује да су постављени критеријуми и гранични услови добро дефинисани. То потврђују однос C/N који је између 25 и 32,4 при експерименталним условима и рН вредност од 5 - 6,9, што представља минималне услове за почетак процеса компостирања.

У случају мешавина без огроздине може се закључити да је математички модел верификован по граничном услову за однос C/N, за постављене критеријуме садржаја С, N и лигнина, а у случају рН вредности постоје мања одступања. Праћењем утицај ко-супстрата утврђено је да код свих мешавина има слагања у трендовима промена вредности односа C/N, садржаја С, N и рН вредности, док по питању садржаја воде није дошло до слагања у трендовима.

Праћењем различитог удела огроздине у мешавинама показано је да су резултати математичког модела у складу са експериментално добијеним вредностима за гранични услов



односа C/N. За критеријуме је потврђено поклапање резултата за садржај C, рН вредност и лигнин. Ако се посматра утицај ко-супстрата код мешавина са ЖЕ математички моделом је верификован а у случају мешавина са ОХ постоје одступања код садржај воде и рН вредности.

У наставку истраживања предвиђено је коришћење додатних математичких метода за оптимизацију, где би главни критеријум био постизање одговарајуће или што више рН вредности. Такође истраживања треба усмерити и на праћење мешавина када је удео огроздине између 15,0 % и 25,0 % како би се утврдио њихов минимални удео. Од значаја би такође било додатно испитивање процеса компостирања комине са већим бројем ко-супстрата у једној мешавини, пошто се у овом истраживању показало да мешавина са три ко-супстрата има најбоље карактеристике. Имајући у виду и да је већина ОО из пољопривреде богат лигноцелулозним материјама треба усмерити истраживања на налажење (постизање) услова да се повећа њихов степен разградње. На крају, да би се постигао одговарајући квалитет компоста потребно је сагледати услове за смањење испирања које је негативно утицало на садржај калијума, фосфора и азота. Да би се омогућила што већа валоризација ООИБ за претварање у компост, додатна даља истраживања биће усмерена ка проширивању базе података о доступним врстама ОО на територији РС и њиховој квалитативној и квантитативној анализи



## 8. Литература

- [1] Brown, P. H., Zhao, F. J., & Dobermann, A. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. *Plant and Soil*. 2022, 476(1), 11 - 23.
- [2] A. & C. Saeid, Fertilizers: need for new strategies. In *Organic Farming*. Woodhead Publishing. pp. 91 - 116, 2019.
- [3] Д. Варага, Приручник за ђубрење ратарских и повртрских култура, 2015.
- [4] Д. и. Ц. Т. Ј. Мијатовић, *Ђубрење vinograda*.
- [5] Bremner, J. M. Inorganic forms of nitrogen. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*. 1965, 9, 1179-1237.
- [6] Rennenberg, H., Dannenmann, M., Gessler, A., Kreuzwieser, J., Simon, J., & Papen, H. Nitrogen balance in forest soils: nutritional limitation of plants under climate change stresses. *Plant Biology*. 2009, 11, 4 - 23
- [7] Harrison, A. F. Soil organic phosphorus. A review of world literature. 1987, 257.
- [8] Wild, A. Plant nutrients in soil: phosphate. In *Russell's soil conditions and plant growth. Eleventh edition*, London, Longman Group. 1988, 695-742.
- [9] Pierzynski, G. M., McDowell, R. W., & Thomas Sims, J. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. *Phosphorus: Agriculture and the environment*. 2005, 46, 51-86..
- [10] Oelkers, E.H., Valsami-Jones, E. Phosphate mineral reactivity and global sustainability. *Elements*. 2008, 4, 83 - 87.
- [11] Kiyasudeen S, K., Ibrahim, M. H., Quaik, S., Ahmed Ismail, S., Ibrahim, M. H., Quaik, S., & Ismail, S. A. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. *Prospects of organic waste management and the significance of earthworms*. 2016, 23-44.
- [12] de Lemos Chernicharo, C. A. Anaerobic reactors, IWA publishing. 2007.
- [13] Atlas, R. M. Microbial ecology: fundamentals and applications, Pearson Education India. 1988.
- [14] Cooperband, L. The art and science of composting, Center for Integrated agricultural systems. 2002.
- [15] Dziejowski, J. E., & Kazanowska, J. Heat production during thermophilic decomposition of municipal wastes in the Dano-system composting plant. *Microbiology of composting*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [16] Epstein, E. Industrial composting. Environmental engineering and facilities management, New York: Taylor and Francis Group, 2011.



- [17] Diaz, L. F., De Bertoldi, M., & Bidlingmaier, W. (Eds.). Compost science and technology, Elsevier, 2011.
- [18] Boniecki, P., Dach, J., Mueller, W., Koszela, K., Przybyl, J., Pilarski, K., & Olszewski, T. Neural prediction of heat loss in the pig manure composting process. *Applied Thermal Engineering*. 2013, 58(1-2), 650-655.
- [19] Mahapatra, S., Ali, M. H., & Samal, K. Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin. *Energy Nexus*. 2022 6, 100062.
- [20] Murphy, J. D., & Power, N. M. A technical, economic and environmental comparison of composting and anaerobic digestion of biodegradable municipal waste. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 2006, 41(5), 865-879.
- [21] Pezzolla, D., Cucina, M., Proietti, P., Calisti, R., Regni, L., & Gigliotti, G. The use of new parameters to optimize the composting process of different organic wastes. *Agronomy*. 2021, 11 (10), 2090.
- [22] Chen, L., de Haro Marti, M., Moore, A., & Falen, C. (2011). The composting process. Dairy Manure Compost Production and Use in Idaho. *Dairy Manure Compost Production and Use in Idaho*. 2011, 2, 513-532.
- [23] Van Der Wurff, A. W., Fuchs, J. G., Raviv, M., & Termorshuizen, A. Handbook for composting and compost use in organic horticulture, BioGreenhouse, 2016.
- [24] Neves, L., Ferreira, V., & Oliveira, R. Co-composting cow manure with food waste: The influence of lipids content. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009, 58, 986-991.
- [25] Gea, T., Ferrer, P., Alvaro, G., Valero, F., Artola, A., & Sánchez, A. Co-composting of sewage sludge: fats mixtures and characteristics of the lipases involved. *Biochemical Engineering Journal*. 2007,33(3), 275-283.
- [26] <https://www.slideshare.net/slideshow/mechanism-of-aerobic-an-aerobic-biodegradation/39892621>, [приступљено 20.08.2023].
- [27] <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/composting>, [приступљено 20.08.2023].
- [28] Yang, I. S., Ji, M. K., & Jeon, B. H. A review on efficient operation technology of compost depot. *Clean Technology*. 2017, 23 (4), 345-356.
- [29] Guo, X. X., Liu, H. T., & Wu, S. B. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of the total environment*. 2019, 662, 501-510.
- [30] Zhu, N., Zhu, Y., Li, B., Jin, H., & Dong, Y. Increased enzyme activities and fungal degraders by *Gloeophyllum trabeum* inoculation improve lignocellulose degradation efficiency during manure-straw composting. *Bioresource Technology*. 2021, 337, 12542.



- [31] Pérez, J., Munoz-Dorado, J., De la Rubia, T. D. L. R., & Martinez, J. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International microbiology*. 2002, 5, 53-63.
- [32] Beffa, T., Blanc, M., Lyon, P. F., Vogt, G., Marchiani, M., Fischer, J. L., & Aragno, M. Isolation of *Thermus* strains from hot composts (60 to 80 degrees C). *Applied and environmental microbiology*. 1996, 62(5), 1723-1727.
- [33] Luo, W., Chen, T. B., Zheng, G. D., Gao, D., Zhang, Y. A., & Gao, W. (2008). Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008, 52(4), 635 - 642.
- [34] Tsai, S. H., Liu, C. P., & Yang, S. S. Microbial conversion of food wastes for biofertilizer production with thermophilic lipolytic microbes. *Renewable energy*. 2007, 32(6), 904-915.
- [35] Peigné, J., & Girardin, P. Environmental impacts of farm-scale composting practices. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2004, 153, 45 -68.
- [36] Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., & Bernal, M. P. Co-composting of distillery and winery wastes with sewage sludge. *Water science and technology*. 2007, 56( 2),187-192 .
- [37] Sundberg, C., & Jönsson, H. Process inhibition due to organic acids in fed-batch composting of food waste–influence of starting culture. *Biodegradation*. 2005, 16, 205 - 213.
- [38] Sundberg, C., Smårs, S., & Jönsson, H. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource technology*. 2004, 95(2), 145 - 150.
- [39] Shin, H. S., & Jeong, Y. K. The degradation of cellulosic fraction in composting of source separated food waste and paper mixture with change of C/N ratio. *Environmental technology*. 1996, 17(4), 433-438.
- [40] Petric, I., Šestan, A., & Šestan, I. Influence of initial moisture content on the composting of poultry manure with wheat straw. *Biosystems engineering*. 2009, 104(1), 125-134.
- [41] De Bertoldi, M. D., Vallini, G., & Pera, A. The biology of composting: a review. *Waste Management & Research*. 1983, 1 (1), 157-176.
- [42] Moldes, A. B., Vázquez, M., Domínguez, J. M., Díaz-Fierros, F., & Barral, M. T. Evaluation of mesophilic biodegraded grape marc as soil fertilizer. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2007, 141, 27-36.
- [43] Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Thami Alami, I. Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic agriculture*. 2018, 8, 141-158.
- [44] Ho, T. T. K., Le, T. H., Tran, C. S., Nguyen, P. T., Thai, V. N., & Bui, X. T. (2022). Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2022, 6, 100211.



- [45] Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2008). Solid waste management by composting: state of the art. *Critical reviews in environmental science and technology*. 2008, 38(5), 311 - 400.
- [46] Yang, F., Li, G. X., Yang, Q. Y., & Luo, W. H. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*. 2013, 93(7), 1393-1399.
- [47] Ivanović, M., Stefanović, G., Stanković, S., & Milutinović, B. (2024). Co-composting a grape marc: An influence of grape stalks and different biowastes presence on the physical-chemical parameters of the mixture. *Renewable Energy*. 2024, 232, 120966.
- [48] Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*. 2009, 100(2), 5444-5453.
- [49] Schulze, K. L. Continuous thermophilic composting. *Applied Microbiology*. 1962, 10(2), 108-122.
- [50] [Rich, N., Bharti, A., & Kumar, S. Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality. *Bioresource technology*. 2018, 252, 83-90.
- [51] Cheng, K. H., Huang, M. C., Lu, M. F., Chou, Y. J., & Lin, J. J. M. Assessment of degree of maturity of compost produced by different kitchen waste composting methods. *Advanced Materials Research*. 2013, 652, 1642-1651.
- [52] Pathak, A. K., Singh, M. M., & Kumar, V. Composting of municipal solid waste: a sustainable waste management technique in Indian cities—A review. *International Journal of Current Research*. 2011, 3(12), 339-46.
- [53] Cooperband, L. The art and science of composting, Center for Integrated agricultural systems, 2022.
- [54] Oviedo-Ocaña, E. R., Soto-Paz, J., Sanchez-Torres, V., & Sánchez, A. Incorporation of substrates and inoculums as operational strategies to promote lignocellulose degradation in composting of green waste—a pilot-scale study. *Processes*. 2023, 11 (1), 241.
- [55] Negahdar, L., Delidovich, I., & Palkovits, R. Aqueous-phase hydrolysis of cellulose and hemicelluloses over molecular acidic catalysts: Insights into the kinetics and reaction mechanism. *Applied catalysis B: environmental*. 2016, 184, 285-298.
- [56] Jeffries, T. W. Biodegradation of lignin and hemicelluloses. *Biochemistry of microbial degradation*. 1994, 233-277.
- [57] Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., López, M. J., Vargas-García, M. C., López-González, J. A., & Moreno, J. Enhanced turnover of organic matter fractions by microbial stimulation during lignocellulosic waste composting. *Bioresource Technology*. 2015, 186, 15 - 24.
- [58] Wei, Y., Wu, D., Wei, D., Zhao, Y., Wu, J., Xie, X., & Wei, Z. Improved lignocellulose-degrading performance during straw composting from diverse sources with actinomycetes inoculation by regulating the key enzyme activities. *Bioresource technology*. 2019, 271, 66 - 74.



- [59] Heitner, C., Dimmel, D., & Schmidt, J. (Eds.). Lignin and lignans: advances in chemistry, CRC press, 2016.
- [60] Kumar, A., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2020). Utilization of lignin: A sustainable and eco-friendly approach. *Journal of the Energy Institute*. 2020, 93(1), 235-271.
- [61] Fustec, E., Chauvet, E., & Gas, G. Lignin degradation and humus formation in alluvial soils and sediments. *Applied and environmental microbiology*. 1989, 55(4), 922-926.
- [62] Waksman, S. A., Cordon, T. C., & Hulpoi, N. J. S. S. Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition processes in composts of stable manure. *Soil Science*. 1939, 47(2), 83-114.
- [63] Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itävaara, M. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource technology*. 2000, 72(2), 169-183.
- [64] Tomati, U., Galli, E., Pasetti, L., & Volterra, E. Bioremediation of olive-mill wastewaters by composting. *Waste management & research*. 1995, 13(5), 509-518.
- [65] Nusbaumer, C., Job, D., & Aragno, M. Etude de l'altération par les champignons de l'état physico-chimique des composés lignocellulosiques dans un processus naturel de compostage. *Mycologia Helvetica*. 1996, 8, 51-67.
- [66] Zhu, N., Gao, J., Liang, D., Zhu, Y., Li, B., & Jin, H. Thermal pretreatment enhances the degradation and humification of lignocellulose by stimulating thermophilic bacteria during dairy manure composting. *Bioresource Technology*. 2021, 319, 124149.
- [67] Huang, D. L., Zeng, G. M., Feng, C. L., Hu, S., Lai, C., Zhao, M. H., ... & Liu, H. L. Changes of microbial population structure related to lignin degradation during lignocellulosic waste composting. *Bioresource technology*. 2010, 101(11), 4062-4067..
- [68] Chen, X., Cheng, W., Li, S., Tang, X., & Wei, Z. The "quality" and "quantity" of microbial species drive the degradation of cellulose during composting. *Bioresource Technology*. 2021, 320, 124425.
- [69] Stutzenberger, F. J., Kaufman, A. J., & Lossin, R. D. Cellulolytic activity in municipal solid waste composting. *Canadian Journal of Microbiology*. 1970, 16(7), 553-560.
- [70] Stehouwer, R., Cooperband, L., Rynk, R., Biala, J., Bonhotal, J., Antler, S., ... & Nichols, H. Compost characteristics and quality. *The Composting Handbook*. Academic Press. 2022, 737-775.
- [71] Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel Jr, F. C. Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. *Advances in agronomy*. 2017, 144, 143-233.
- [72] Wichuk, K. M., & McCartney, D. (2010). Compost stability and maturity evaluation—a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010, 37(11), 1505-1523.



- [73] Antil, R. S., Raj, D., Abdalla, N., & Inubushi, K. Physical, chemical and biological parameters for compost maturity assessment: a review. *Composting for sustainable agriculture*. 2014, 83-101.
- [74] Sugahara, K., Harada, Y., Inoko A. Color change of city refuse during composting process. *Soil Science Plant Nutr.* 1979, 25, 197–208.
- [75] Stickelberger, D. Survey if city refuse composting. In: Organic matters as fertilizers. *Swedish International Development Authority, FAO, Soils Bulletin.* 1975, 27, 185-209.
- [76] Wichuk, K. M., & McCartney, D. Compost stability and maturity evaluation—a literature review. *Journal of Environmental Engineering and Science.* 2013, 8(5), 601-620.
- [77] Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere.* 2008, 72 (4), 551-557.
- [78] Golueke, C.G. Principles of biological resources recovery. *BioCycle.* 1981, 22, 36-40.
- [79] Zucconi F, de Bertoldi M (1987) Compost specification for the production and characterization of compost from municipal solid waste. In: De Berfoldi M, Feerranti MP, Hermite PL, Zucconi F (eds). *Compost: production, quality and use*. Elsevier, Barking. 1987 30-50.
- [80] Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A., Cegarra, J. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresour. Technol.* 1988a, 63, 91-99.
- [81] Закон о управљању отпадом, ("Сл. гласник РС", бр. 36/2009, 88/2010, 14/2016, 95/2018 - др закон и. 35/2023).
- [82] Законом о средствима за исхрану биља и оплемењивачима земљишта ("Сл. гласник РС", бр. 41/2009 и 17/2019).
- [83] Правилник о условима за разврставање и утврђивање квалитета средстава за исхрану биљака, одступања од хранљивог садржаја и минималним и максималним вредностима дозвољеног одступања садржаја хранљивих материја и о садржини декларације и начину обележавња.
- [84] Iora, S. R., Maciel, G. M., Zielinski, A. A., da Silva, M. V., Pontes, P. V. D. A., Haminiuk, C. W., & Granato, D. Evaluation of the bioactive compounds and the antioxidant capacity of grape pomace. *International Journal of Food Science & Technology.* 2015, 50(1), 62 - 69.
- [85] Peixoto, C. M., Dias, M. I., Alves, M. J., Calhelha, R. C., Barros, L., Pinho, S. P., & Ferreira, I. C. Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. *Food chemistry.* 2018, 253, 132-138.
- [86] Pauletto, M., Elgendy, R., Ianni, A., Marone, E., Giantin, M., Grotta, L., ... & Martino, G. Nutrigenomic effects of long-term grape pomace supplementation in dairy cows. *Animals.* 2020, 10(4), 714.



- [87] Schwantes, D., Gonçalves Jr, A. C., De Varennes, A., & Braccini, A. L. Modified grape stem as a renewable adsorbent for cadmium removal. *Water Science and Technology*. 2018,78(11), 2308-2320.
- [88] Roos, C. J. Clean heat and power using biomass gasification for industrial and agricultural projects, Olympia, WA, USA: Northwest CHP Application Center, 2010.
- [89] Benetto, E., Jury, C., Kneip, G., Vázquez-Rowe, I., Huck, V., & Minette, F. Life cycle assessment of heat production from grape marc pellets. *Journal of Cleaner Production*. 2015, 87,149-158.
- [90] Chen, G., Yao, J., Liu, J., Yan, B., & Shan, R. (2016). Biomass to hydrogen-rich syngas via catalytic steam reforming of bio-oil. *Renewable Energy*. 2016, 91, 315-322.
- [91] Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Espinosa, A., & Pérez-Murcia, M. D. Uses of winery and distillery effluents in agriculture: characterisation of nutrient and hazardous components. *Water Science and Technology*.2005, 51(1), 145-151.
- [92] Bustamante, M. A., Moral, R., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., & Pérez-Murcia, M. D. Agrochemical characterisation of the solid by-products and residues from the winery and distillery industry. *Waste management*. 2008, 28(2), 372-380.
- [93] Bustamante, M. A., Pérez-Murcia, M. D., Paredes, C., Moral, R., Pérez-Espinosa, A., & Moreno-Caselles, J. Short-term carbon and nitrogen mineralisation in soil amended with winery and distillery organic wastes. *Bioresource technology*.2007, 98(17), 3269-3277.
- [94] Nóvoa-Muñoz, J. C., Simal-Gándara, J., Fernández-Calviño, D., López-Periago, E., & Arias-Estévez, M. Changes in soil properties and in the growth of *Lolium multiflorum* in an acid soil amended with a solid waste from wineries. *Bioresource technology*. 2008, 99, 6771-6779.
- [95] Moldes, A. B., Vázquez, M., Domínguez, J. M., Díaz-Fierros, F., & Barral, M. T. Negative effect of discharging vinification lees on soils, *Bioresource technology*. 2008, 99(13),5991-5996.
- [96] Bertran, E., Sort, X., Soliva, M., & Trillas, I. Composting winery waste: sludges and grape stalks. *Bioresource technology*.2004, 95, 203-208.
- [97] Marhuenda-Egea, F. C., Martínez-Sabater, E., Jordá, J., Sánchez-Sánchez, A., Moral,R., Bustamante, M. A., ..& Pérez-Murcia, M. D. Evaluation of the aerobic composting process of winery and distillery residues by thermal methods. *Thermochimica Acta*. 2007, 454, 135-143.
- [98] Bustamante, M. A., Moral, R., Paredes, C., Vargas-García, M. C., Suárez-Estrella, F., & Moreno, J. Evolution of the pathogen content during co-composting of winery and distillery wastes. *Bioresource technology*. 2008, 99(15), 7299-7306.
- [99] Fernández, F. J., Sánchez-Arias, V., Villaseñor, J., & Rodríguez, L. Evaluation of carbon degradation during co-composting of exhausted grape marc with different biowastes. *Chemosphere*.2008,73(5), 670-677.



- [100] Fernández, F. J., Sánchez-Arias, V., Rodríguez, L., & Villaseñor, J. Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste and winery waste in a rotary drum reactor. *Waste Management*. 2010, 30(10), 1948-1956.
- [101] Semitela, S., Pirra, A., & Braga, F. G. Impact of mesophilic co-composting conditions on the quality of substrates produced from winery waste activated sludge and grape stalks: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource technology*. 2019, 289, 121622.
- [102] Faure, D., & Deschamps, A. M. Physico-chemical and microbiological aspects in composting of grape pulps. *Biological wastes*. 1990, 34(3), 251-258.
- [103] Faure, D., & Deschamps, A. M. The effect of bacterial inoculation on the initiation of composting of grape pulps. *Bioresource Technology*. 1991, 37(3), 235-238.
- [104] R. M. A. B. & B. M. T. (. E. o. o. m. d. t. m. c. o. l. w. w. Paradelo, ,, Journal of environmental management,“ т. 116, pp. 18-26.
- [105] Zhang, L., & Sun, X. Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc. *Bioresource technology*. 2016, 218, 335-343.
- [106] Díaz, M. J., Madejón, E., López, R., Ron Vaz, M. D., & Cabrera, F. Co-Composting Process of (Sugarbeet) Vinasse and Grape Marc. *The Science of Composting*. 1996, 1134-1137.
- [107] Ferrer, J., Páez, G., Mármol, Z., Ramones, E., Chandler, C., Marin, M., & Ferrer, A. Agronomic use of biotechnologically processed grape wastes. *Bioresource Technology*. 2001, 76(1), 39-44.
- [108] Diaz, M. J., Madejon, E., Lopez, F., Lopez, R., & Cabrera, F. Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochemistry*. 2002, 37(10), 1143-1150.
- [109] Díaz, M. J., Madejon, E., Cabrera, F., Jimenez, L., & De Bertoldi, M. Using a second-order polynomial model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in-vessel composting. *Compost science & utilization*. 2004, 12(3), 273-279.
- [110] Marhuenda-Egea, F. C., & Moral, R. Co-composting of winery-distillery wastes with orange juice waste. *In 13th RAMIRAN International Conference*.
- [111] Paradelo, R., Moldes, A. B., & Barral, M. T. Utilization of a factorial design to study the composting of hydrolyzed grape marc and vinification lees. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2010, 58(5), 3085-3092.
- [112] Burg, P., Vítěz, T., Turan, J., & Burgová, J. Evaluation of grape pomace composting process. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendel. Brun*. 2014, 62, 875-881.
- [113] Torres-Climent, A., Gomis, P., Martín-Mata, J., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Murcia, M. D., ... & Moral, R. Chemical, thermal and spectroscopic methods to assess biodegradation of winery-distillery wastes during composting. *PloS one*. 2015, 10(9), e0138925.



- [114] Hungría, J., Gutiérrez, M. C., Siles, J. A., & Martín, M. A. (2017). Advantages and drawbacks of OFMSW and winery waste co-composting at pilot scale. *Journal of Cleaner Production*. 2017,164,1050-1057.
- [115] Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability, *Chemosphere*, 2008, 72, 551-557.
- [116] Salgado, M. M. M., Blu, R. O., Janssens, M., & Fincheira, P. Grape pomace compost as a source of organic matter: Evolution of quality parameters to evaluate maturity and stability. *Journal of Cleaner Production*. 2019, 216, 56-63.
- [117] Moral, R., Bustamante, M. A., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Paredes, C., ... & EPS-Orihuela, O. Agronomic use of exhausted grape marc composts on tomato crop: Yield, biomass production and morphological aspects. y *12th Ramiran International conference, Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-Farm Perspective*, 2006.
- [118] Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral, R., Agulló, E., Pérez-Murcia, M. D., & Abad, M. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008, 52(5), 792-799.
- [119] Bustamante, M. A., Said-Pullicino, D., Agulló, E., Andreu, J., Paredes, C., & Moral, R. Application of winery and distillery waste composts to a Jumilla (SE Spain) vineyard: Effects on the characteristics of a calcareous sandy-loam soil. *Agriculture, ecosystems & environment*. 2011, 140(1-2), 80-87.
- [120] Carmona, E., Moreno, M. T., Avilés, M., & Ordovás, J. Use of grape marc compost as substrate for vegetable seedlings. *Scientia Horticulturae*. 2012, 137, 69-74.
- [121] Requejo, M. I., Cartagena, M. C., Villena, R., Arce, A., Ribas, F., Cabello, M. J., & Castellanos, M. T. Wine-distillery waste compost addition to a drip-irrigated horticultural crop of central Spain: risk assessment. *Biosystems engineering*. 2014,128, 11-20.
- [122] Bolechowski, A., Moral, R., Bustamante, M. A., Bartual, J., Paredes, C., Pérez-Murcia, M. D., & Carbonell-Barrachina, A. A., Winery–distillery composts as partial substitutes of traditional growing media: Effect on the volatile composition of thyme essen. *Scientia Horticulturae*. 2015, 193, 69-76.
- [123] Ivanišević, D., Jakšić, D., & Korać, N. Vinogradarski atlas: Popis poljoprivrede 2012: poljoprivreda u Republici Srbiji,“ Republički zavod za statistiku, 2015.
- [124] <https://popispoljoprivrede.stat.gov.rs/sr-Cyrl/tabele/>,“ [приступљено 25.06.2025].
- [125] <https://dev.agropross.org.rs/download/ZK-2023-II-knjiga.pdf>,“ [приступљено 25.06.2025].
- [126] Sirohi, R., Tarafdar, A., Singh, S., Negi, T., Gaur, V. K., Gnansounou, E., & Bharathiraja, B. Green processing and biotechnological potential of grape pomace: Current trends and opportunities for sustainable biorefinery. *Bioresource Technology*. 2020, 314, 123771.



- [127] Galanakis, C. M. (Ed.). Handbook of grape processing by-products: sustainable solutions, Academic Press, 2017.
- [128] Nerantzis, E. T., & Tataridis, P. Integrated enology-utilization of winery by-products into high added value products. *J. Sci. Tech.* 2006, 1(3),79-89.
- [129] Zhang, N., Hoadley, A., Patel, J., Lim, S., & Li, C. E. Sustainable options for the utilization of solid residues from wine production. *Waste Management.*2017, 60,173-183.
- [130] <https://popispoljoprivrede.stat.gov.rs/sr-cyrl/brosura/>,“ [приступљено 26.06.205 ].
- [131] Ђуркчковић, А, Јовановић, Љ., Супић, Д., Распољиви потенцијали жетвених остатака за производњу биомасе на територији општина Бечеј, Србобран, Кула и Врбас, Министарство пољопривреде, шумарства и водопривреде, ПСС Врбас, Универзитет Едуконс Сремска Каменица.
- [132] <https://sepa.gov.rs/wp-content/uploads/2024/12/Otpad2011-2023.pdf>, [приступљено26.06.2025].
- [133] Г . Вујић, Утврђивање састава отпада и процене количине у циљу дефинисања стратегије управљања секундарним сировинама у склопу одрживог развоја Републике Србије, Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука, Департман за инжењерство заштите животне средине.
- [134] <https://popis2022.stat.gov.rs/sr-latn/popisni-podaci-eksel-tabele/>,[приступљено 26.06.2025].
- [135] Reis, M., Soliva, M., Martinez, F. X., & Monteiro, A. A. Composting Olive Pomace and Grape Marc: chemical and physical changes. *In Conference: International Symposium on Composting of Organic Matte*, at: Halkidiki, Greece, Avgust, 1999.
- [136] Spigno, G., Maggi, L., Amendola, D., Dragoni, M., & De Faveri, D. M. Influence of cultivar on the lignocellulosic fractionation of grape stalks. *Industrial Crops and products.* 2103, 46, 283-289.
- [137] Toscano, G., Riva, G., Duca, D., Pedretti, E. F., Corinaldesi, F., & Rossini, G. Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery. *Biomass and Bioenergy.* 2013, 55, 260-267.
- [138] Filippi, K., Georgaka, N., Alexandri, M., Papapostolou, H., & Koutinas, A. Valorisation of grape stalks and pomace for the production of bio-based succinic acid by *Actinobacillus succinogenes*. *Industrial Crops and Products.*2021, 168, 113578.
- [139] Paudel, S. R., Banjara, S. P., Choi, O. K., Park, K. Y., Kim, Y. M., & Lee, J. W. Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges. *Bioresource Technology.*2017, 245, 1194-1205.
- [140] El Achkar, J. H., Lendormi, T., Hobaika, Z., Salameh, D., Louka, N., Maroun, R. G., & Lanoisellé, J. L. Anaerobic digestion of grape pomace: Biochemical characterization of the fractions and methane production in batch and continuous digesters. *Waste Management.* 2016, 50, 275-282.



- [141] Sucu, E. Effects of microalgae species on in vitro rumen fermentation pattern and methane production. *Annals of Animal Science*. 2020, 20(1), 207-218.
- [142] Jin, X., Ai, W., Zhang, Y., & Dong, W. Application of functional microbial agent in aerobic composting of wheat straw for waste recycling. *Life sciences in space research*. 2022, 33, 13-20.
- [143] Qu, T., Guo, W., Shen, L., Xiao, J., & Zhao, K. Experimental study of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin. *Industrial & engineering chemistry research*. 2011, 50(18), 10424-10433.
- [144] Allesina, G., Pedrazzi, S., Guidetti, L., & Tartarini, P. Modeling of coupling gasification and anaerobic digestion processes for maize bioenergy conversion. *Biomass and Bioenergy*. 2015, 81, 444-451.
- [145] Wei, M., Chen, Z., Wei, S., Geng, G., & Yan, P. (2018). Comparison among methods of effective energy evaluation of corn silage for beef cattle. *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2018, 31(6), 851.
- [146] Fonseca, A. J. M., Cabrita, A. R. J., Lage, A. M., & Gomes, E. Evaluation of the chemical composition and the particle size of maize silages produced in north-west of Portugal. *Animal feed science and technology*. 2000, 83(3-4), 173-183.
- [147] Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., & Domínguez, J. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere*. 2008, 70(3), 436-444.
- [148] Karak, T., Sonar, I., Paul, R. K., Das, S., Boruah, R. K., Dutta, A. K., & Das, D. K. Composting of cow dung and crop residues using termite mounds as bulking agent. *Bioresource technology*. 2014, 169, 731-741.
- [149] Zhu, P., Li, J., Wen, X., Huang, Y., Yang, H., Wang, S., ... & Li, Q. Biochar-based solid acid accelerated carbon conversion by increasing the abundance of thermophilic bacteria in the cow manure composting process, *Journal of Environmental Management*. 2022, 308, 114682.
- [150] Soliva Torrentó, M., & Felipó, M. T. M. T. Organic wastes as a resource for Mediterranean soils. In Workshop "Biological treatment of biodegradable wastes—Technical aspects", 2002.
- [151] ur Rehman, K., Cai, M., Xiao, X., Zheng, L., Wang, H., Soomro, A. A., ... & Zhang, J. Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (*Hermetia illucens* L.). *Journal of environmental management*. 2017, 196, 458-465.
- [152] Chen, Z., Bao, H., Wen, Q., Wu, Y., & Fu, Q. Effects of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> modified biochar on heavy metal mobility and resistance genes removal during swine manure composting. *Bioresource Technology*. 2022, 346, 126632.
- [153] Xiu, S., Shahbazi, A., Shirley, V., & Cheng, D. Hydrothermal pyrolysis of swine manure to bio-oil: Effects of operating parameters on products yield and characterization of bio-oil. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2010, 88(1), 73-79.



- [154] Wu, S., Shen, Z., Yang, C., Zhou, Y., Li, X., Zeng, G., ... & He, H. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017, 119, 429-436.
- [155] Petric, I., Avdihodžić, E., & Ibrić, N. Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure. *Ecological engineering*. 2015, 75, 242-249.
- [156] Liu, M., Li, F., Liu, H., & Wang, C. H. Synergistic effect on co-gasification of chicken manure and petroleum coke: An investigation of sustainable waste management. *Chemical Engineering Journal*. 2021, 417, 128008.
- [157] Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y., & Liu, X. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. *Bioresource technology*. 2013, 149, 406-412.
- [158] M. Ivanović, G. Stefanović, A. Momčilović, B. Milutinović, Anaerobic Co Digestion of Sewage Sludge and Organic Fraction of Municipal Waste: A Case Study City of Niš, " y *18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia - SIMTERM*, 17-20. Oktobar, Sokobanja, Srbija.
- [159] M. Ivanović, G. Stefanović, P. Rajković, B. Milutinović, Optimization of the composting process of the mixture of different fractions of organic waste, " y *Proceedings of the XIV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements - SAUM*, 14-16. Novemabr, Nis, Srbija.
- [160] Ravindran, B., Awasthi, M. K., Karmegam, N., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Selvam, A., & Munuswamy-Ramanujam, G. (2022). Co-composting of food waste and swine manure augmenting biochar and salts: Nutrient dynamics, gaseous emissions and microbial activis. *Bioresource Technology*. 2022, 344, 126300.
- [161] Azeem, Muhammad & Chaudhry, Arshad. The Co-composting of Poultry litter and Fast Food Wastes. A Study Of Nutrients Release Pattern During Co- composting. Lap Lambert Academic Publishing, 2012.
- [162] Komilis, D. P., & Ham, R. K. The effect of lignin and sugars to the aerobic decomposition of solid wastes. *Waste management*. 2003, 25(5), 419-423.
- [163] Francou, C., Linères, M., Derenne, S., Le Villio-Poitrenaud, M., & Houot, S. Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource technology*. 2008, 99(18), 8926-8934.
- [164] Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste management*. 2018, 77, 486-499..
- [165] Чупић, М., и други. Специјална поглавља из теорије одлучивања: квантитативна анализа, Нови Сад: Факултет техничких наука, 2004.



- [166] Станимировић, П. С., Стојковић, Н. В., и Петковић, М. Д. Математичко програмирање, Природно-математички факултет, 2007.
- [167] <https://leco Peru.com/wp-content/uploads/2018/05/CHN628-ESPECIFICACIONES-ENG-29052018.pdf> [Приступљено 30.06.2025].
- [168] LECO Corporation. (2018). TGA701 consumables & spare parts reference card (Form No. 203-104-044 Rev. 10.5). LECO Corporation. <https://leco Peru.com/wp-content/uploads/2018/05/TGA701-ESPECIFICACIONES-ENG-28052018.pdf> [приступљено 30.06.2025].
- [169] Стандард VM 057-2, <https://www.mol.rs/images/2-01-227.pdf> [приступљено 30.06.2025].
- [170] Стандард VM 092, <https://www.mol.rs/images/2-01-227.pdf>, [приступљено 30.06.2025].
- [171] Garner, W., Textile laboratory manual, volume 5: fibres. Heywood Books, London, 52–113, 1967.
- [172] Стандард SRPS EN ISO 18134-2:2024, <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:105608> [приступљено 30.06.2025].
- [173] Huang, G. F., Wong, J. W. C., Wu, Q. T., & Nagar, B. B. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste management*.2004, 24(8), 805-813.
- [174] Spigno, G., Maggi, L., Amendola, D., Dragoni, M., & De Faveri, D. M. (2013). Influence of cultivar on the lignocellulosic fractionation of grape stalks. *Industrial Crops and products*. 2013, 46, 283-289.
- [175] Komilis, D. P., & Ham, R. K. The effect of lignin and sugars to the aerobic decomposition of solid wastes. *Waste management*.2003, 23(5), 419-423.
- [176] Petric, I., Avdihodžić, E., & Ibrić, N. Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure. *Ecological engineering*. 2015, 75, 242-249.
- [177] Spigno, G., Pizzorno, T., & De Faveri, D. M. Cellulose and hemicelluloses recovery from grape stalks. *Bioresource Technology*. 2008, 99(10), 4329-4337.
- [178] Mohee, R., & Mudhoo, A. Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix. *Powder Technology*.2005, 155(1), 92-99.
- [179] Petric, I., Helić, A., & Avdić, E. A. Evolution of process parameters and determination of kinetics for co-composting of organic fraction of municipal solid waste with poultry manure. *Bioresource technology*. 2012, 117, 107-116.
- [180] Wang, K., Du, M., Wang, Z., Liu, H., Zhao, Y., Wu, C., & Tian, Y. Effects of bulking agents on greenhouse gases and related genes in sludge composting. *Bioresource Technology*. 2022, 344, 126270.



- [181] Ye, P., Fang, L., Song, D., Zhang, M., Li, R., Awasthi, M. K., ... & Chen, X. Insights into carbon loss reduction during aerobic composting of organic solid waste: A meta-analysis and comprehensive literature review. *Science of The Total Environment*. 2023 862, 160787.
- [182] Zhang, D., Luo, W., Li, Y., Wang, G., & Li, G. Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions. *Bioresource technology*. 2018, 250, 853-859.
- [183] Tam, N. F. Y., & Tiquia, S. M. Nitrogen transformation during co-composting of spent pig manure, sawdust litter and sludge under forced-aerated system. *Environmental technology*. 1999, 20(3), 259-267.
- [184] Golueke, C., Principles of biological resource recovery, 1982.
- [185] Lalremruati, M., & Devi, A. S. Duration of composting and changes in temperature, pH and C/N ratio during composting: a review. *Agricultural Reviews*. 2023, 44(3), 350-356.
- [186] Madejón, E., Panettieri, M., Madejón, P., & Perez-de-Mora, A. Composting as sustainable managing option for seaweed blooms on recreational beaches. *Waste and Biomass Valorization*. 2022, 13(2), 863-875.
- [187] Ansari, A. A., & Rajpersaud, J. Physicochemical changes during vermicomposting of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and grass clippings. *International Scholarly Research Notices*. 2012, 1, 984783.
- [188] Wang, X., Chen, T., & Zheng, G. Perlite as the partial substitute for organic bulking agent during sewage sludge composting. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, 42, 1517-1529.
- [189] Ma, Q., Li, Y., Xue, J., Cheng, D., & Li, Z. Effects of turning frequency on ammonia emission during the composting of chicken manure and soybean straw. *Molecules*. 2022, 27( 2), 472.
- [190] Sadeh, Y., Poulsen, T. G., & Bester, K. Optimized sampling strategy for measurement of biomass properties during full-scale composting. *Waste management & research*. 2013, 31( 8), 775-782.
- [191] Su, B., Yan, Z., Li, Y., Tang, S., Pan, X., Zhang, X., ... & Li, Y. Co-compost application of magnesium salts and orthophosphate adjusted biochar and cyanobacteria for fixing nitrogen, improving maize quality, and reducing field nutrient loss. *Agronomy*. 2022, 12(10), 2406.
- [192] Rihani, M., Malamis, D., Bihaoui, B., Etahiri, S., Loizidou, M., & Assobhei, O. In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting. *Bioresource technology*. 2010, 101(15), 5988-5995.
- [193] Sarika, D., Singh, J., Prasad, R., Vishan, I., Varma, V. S., & Kalamdhad, A. S. Study of physico-chemical and biochemical parameters during rotary drum composting of water hyacinth. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2014, 3, 1-10.
- [194] Xie, S., Tran, H. T., Pu, M., & Zhang, T. Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste: Research trends. *Materials Science for Energy Technologies*. 2023, 6, 331-342.



- [195] Sharpley, A., & Moyer, B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*. 2000, 29(5), 1462-1469.
- [196] Aboutayeb, R., El-Mrini, S., Zouhri, A., & Azim, K. Effect of carbon to nitrogen ratio and aeration rate on phosphorus and exchangeable cation contents and their leaching in the soil during olive pomace and turkey manure co-composting. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023, 70(1),12.
- [197] Govindaraju, M., Sathasivam, K. V., & Marimuthu, K. Waste to wealth: value recovery from bakery wastes. *Sustainability*. 2021,13(5), 2835.
- [198] Wang, X., Chen, T., & Zheng, G. Perlite as the partial substitute for organic bulking agent during sewage sludge composting. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, 42, 1517-1529.
- [199] Cunha, F. S., Lima, S. B., & Pires, C. A. D. M. Upgrade of bio-oil produced from the sisal residue composting. *GCB Bioenergy*. 2024, 16(3), e13129.
- [200] Wang, H., Lu, Y., Xu, J., Liu, X., & Sheng, L. Effects of additives on nitrogen transformation and greenhouse gases emission of co-composting for deer manure and corn straw. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, E28, 13000-13020.
- [201] Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., & Hoveidi, H. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*. 2009,29 (2), 570-573.
- [202] Yan, B., Lan, T., Lv, Y., Xing, C., Liang, Y., Wang, H., ... & Guo, W. Q. Enhancing simultaneous nitrogen and phosphorus availability through biochar addition during Chinese medicinal herbal residues composting: Synergism of microbes and humus. *Science of The Total Environment*. 2024, 930, 172515.
- [203] Wu, Q., & Wan, W. Insight into application of phosphate-solubilizing bacteria promoting phosphorus availability during chicken manure composting. *Bioresource Technology*.2023, 373, 128707.
- [204] Aboutayeb, R., El-Mrini, S., Zouhri, A., & Azim, K. Effect of carbon to nitrogen ratio and aeration rate on phosphorus and exchangeable cation contents and their leaching in the soil during olive pomace and turkey manure co-composting. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023, 70(1), 12.



## 9 ПОПИС ТАБЕЛА

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Табела 2.1 | Потребе појединих биљних врста за нутријентима.....                                       | 22  |
| Табела 2.2 | Параметри зрелости и стабилности компоста.....  | 42  |
| Табела 2.3 | Критеријуми за органске оплемењиваче земљишта.....  | 46  |
| Табела 4.1 | Потенцијална количина ООИВ на територији РС по рејонима.....                              | 63  |
| Табела 4.2 | Количина потенцијалне биомасе РС.....   | 64  |
| Табела 4.3 | Количина потенцијалних животињских екскремената.....                                      | 65  |
| Табела 4.4 | Потенцијали ОФКО на територији РС.....  | 65  |
| Табела 4.5 | Карактеристике ООИВ.....  | 66  |
| Табела 4.6 | Карактеристике отпадне биомасе .....  | 67  |
| Табела 4.7 | Карактеристике животињских екскремената.....  | 67  |
| Табела 4.8 | Карактеристике ОФКО.....  | 68  |
| Табела 4.9 | Предности и недостаци појединих ВКО метода.....   | 70  |
| Табела 5.1 | Карактеристике посматраних врста ОО.....  | 77  |
| Табела 5.2 | Приказ састава мешавина за развој математичког модела.....                                | 78  |
| Табела 5.3 | Приказ састава почетних мешавина за активни део и фазу хлађења процеса .....              | 79  |
| Табела 5.4 | Приказ састава мешавина за други део експерименталног истраживања.....                    | 81  |
| Табела 5.5 | Основне карактеристике појединачних врста ОО.....   | 82  |
| Табела 6.1 | Састав оптималних мешавина добијених математичком оптимизацијом за оба сценарија .....    | 87  |
| Табела 6.2 | Састав почетних мешавина на основу математичког модела.....                               | 89  |
| Табела 6.3 | Параметри почетних мешавина.....  | 89  |
| Табела 6.4 | Промена садржаја С, N и односа С/N у мешавинама .....                                     | 100 |
| Табела 6.5 | Састав мешавина за цео ток процеса .....  | 106 |
| Табела 6.6 | Параметри мешавина за цео ток процеса.....  | 107 |
| Табела 6.7 | Промена садржаја лигнина, целулозе и хемицелулозе у мешавинама.....                       | 134 |
| Табела 6.8 | Приказа хемијских параметра добијеног компоста.....                                       | 149 |
| Табела 6.9 | Приказ карактеристичних параметра добијеног компоста у зависности од удела огроздине..... | 152 |



**Табела 6.10** Упоредни приказ резултата математичког модла и експерименталних резултата  
.....165



## 10 ПОПИС СЛИКА

|  |       |
|--|-------|
| Слика 2.1. Циклус азота. ....  | 23    |
| Слика 2.2. Циклус фосфора у земљишту. ....   | 25    |
| Слика 2.3 Шема процеса компостирања. ....  | 28    |
| Слика 2.4 Примарне фазе процеса компостирања. ....   | 29    |
| Слика 2.5 Разградања појединих компоненти ОО током процеса компостирања. ....  | 31    |
| Слика 2.6 Температурни профил при појави секундарног пика. ....  | 34    |
| Слика 2.7 Дијаграм промене рН вредности током процеса компостирања. ....   | 36    |
| Слика 2.8 Подела параметара који дефинишу квалитет компоста. ....  | 41    |
| Слика 4.1 Структура ОО која је узета у разматрање. ....  | 61    |
| Слика 4.2 Шематски приказ процеса прераде грозђа. ....   | 63    |
| Слика 5.1 Фотографски приказ коришћених врста ОО у експерименталном делу: а) Ко; б) Ог; в) ОХ; г) ПС; д) ЖЕ. ....  | 83    |
| Слика 6.1 Приказ мешавина за активни део процеса; а) мешавина Ко и ОХ – М1; б) мешавина Ко и ЖЕ - М2; в) мешавина Ко и ПС – М3; г) мешавина Ко и ОХ, ЖЕ и ПС – М4; д) мешавина Ко, ОХ и 25,0% Ог – М9; њ) мешавина Ко, ЖЕ и 25,0% Ог – М10; е) мешавина Ко, ПС и 25,0% Ог – М11; ж) мешавина Ко, ОХ, ЖЕ, ПС и 25,0% Ог – М12. .... | 89-90 |
| Слика 6.2 Упоредни приказ промене температуре мешавина М1 и М9. ....   | 91    |
| Слика 6.3 Упоредни приказ промене температуре мешавина М2 и М10. ....  | 91    |
| Слика 6.4 Упоредни приказ промене температуре мешавина М3 и М11. ....  | 92    |
| Слика 6.5 Упоредни приказ промене температуре мешавина М4 и М12. ....  | 92    |
| Слика 6.6 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М1 и М9. ....  | 94    |
| Слика 6.7 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М2 и М10. ....   | 94    |
| Слика 6.8 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М3 и М11. ....   | 95    |
| Слика 6.9 Упоредни приказ промене рН вредности мешавина М4 и М12. ....   | 95    |
| Слика 6.10 Дијаграм промене садржаја воде за мешавине М1 – М4. ....  | 96    |
| Слика 6.11 Дијаграм промене садржаја воде за мешавине М9 – М12. ....   | 97    |



|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Слика 6.12 | Процентуални губитак УМ у мешавинама М1 – М4 и М9 - М12 .....                                 | 98  |
| Слика 6.13 | Процентуално смањење садржаја ОМ у мешавинама М1- М4 и М9 - М12 .....                         | 99  |
| Слика 6.14 | Промена садржаја С у мешавинама М1 – М4 и М9 – М12 .....                                      | 101 |
| Слика 6.15 | Промена садржаја N у мешавинама М1- М4 и М9 – М12 .....                                       | 102 |
| Слика 6.16 | Приказ мешавина за цео ток; а)М4;б)М5;в)М6;г)М9;д)М10;ђ)М13;е) М14.....                       | 107 |
| Слика 6.17 | Промена температуре мешавине М4.....  | 109 |
| Слика 6.18 | Промена рН вредности мешавине М4.....   | 110 |
| Слика 6.19 | Промена садржаја воде у мешавини М4 .....   | 111 |
| Слика 6.20 | Промена УМ и ОМ мешавине М4 .....   | 112 |
| Слика 6.21 | Промена садржаја С, N и односа С/N мешавине М4.....   | 113 |
| Слика 6.22 | Промена садржаја лигноцелулозних материја мешавине М4 .....                                   | 114 |
| Слика 6.23 | Промена садржаја $NH_4^+$ и $NO_3^-$ јона мешавине М4 .....                                   | 115 |
| Слика 6.24 | Промена односа $NO_3^-/NH_4^+$ мешавине М4 .....  | 116 |
| Слика 6.25 | Промена садржаја $P_2O_5$ и $K_2O$ мешавине М4 .....  | 117 |
| Слика 6.26 | Промене температуре у мешавинама са ОХ - М6, М9 и М13 .....                                   | 119 |
| Слика 6.27 | Промена температуре у мешавинама са ЖЕ - М6, М10 и М14 .....                                  | 120 |
| Слика 6.28 | Дужина трајања термофилне фазе за мешавине са: а) ОХ: М5, М9 и М13; б) ЖЕ: М6, М10 и М14..... | 121 |
| Слика 6.29 | Промена рН вредности у мешавинама са ОХ М5, М9 и М13 .....                                    | 122 |
| Слика 6.30 | Промена рН вредности у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                                  | 123 |
| Слика 6.31 | Дужина трајања киселе фазе за мешавине са; а)ОХ: М5, М9 и М13; б) ЖЕ:М6, М10 и М14.....       | 123 |
| Слика 6.32 | Промена садржаја воде у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13.....                                   | 124 |
| Слика 6.33 | Промене садржаја воде у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                                 | 125 |
| Слика 6.34 | Промена УМ мешавина са: а)ОХ: М5, М9 и М13; б) ЖЕ: М6, М10 и М14.....                         | 126 |
| Слика 6.35 | Промена садржаја ОМ у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13 .....                                    | 127 |
| Слика 6.36 | Промена садржаја ОМ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М114 .....                                  | 127 |



|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Слика 6.37 | Процентуална промена садржаја ОМ у мешавинама са ОХ: М5, М9, М13 и ЖЕ: М6, М10 и М14..... | 128 |
| Слика 6.38 | Промене садржаја С у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13 .....                                 | 129 |
| Слика 6.39 | Промена садржаја С у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                                | 129 |
| Слика 6.40 | Процентуална промена С у мешавинама са; а)ОХ: М5, М9 и М13; б) са ЖЕ: М6, М10 и М14.....  | 130 |
| Слика 6.41 | Промена садржаја N у мешавини са ОХ: М5, М9 и М13.....                                    | 131 |
| Слика 6.42 | Промена садржаја N у мешавини са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                                  | 131 |
| Слика 6.43 | Процентуална промена азота у мешавинама са ОХ: М5, М9, М13 и ЖЕ: М6, М10, М14.....        | 132 |
| Слика 6.44 | Промена односа C/N у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13 .....                                 | 133 |
| Слика 6.45 | Промена односа C/N у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14.....                                 | 133 |
| Слика 6.46 | Промена садржаја $NH_4^+$ мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13.....                             | 137 |
| Слика 6.47 | Промена садржаја $NH_4^+$ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                         | 138 |
| Слика 6.48 | Промена садржаја $NO_3^-$ у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13 .....                          | 139 |
| Слика 6.49 | Промена садржаја $NO_3^-$ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                         | 140 |
| Слика 6.50 | Промена односа $NO_3^- / NH_4^+$ у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13.....                    | 141 |
| Слика 6.51 | Промена односа $NO_3^- / NH_4^+$ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                  | 142 |
| Слика 6.52 | Промена садржаја $P_2O_5$ у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13 .....                          | 143 |
| Слика 6.53 | Промена садржаја $P_2O_5$ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                         | 144 |
| Слика 6.54 | Промена садржаја $K_2O$ у мешавинама са ОХ: М5, М9 и М13 .....                            | 145 |
| Слика 6.55 | Промена садржаја $K_2O$ у мешавинама са ЖЕ: М6, М10 и М14 .....                           | 146 |
| Слика 6.56 | Визуелни приказ добијеног компоста мешавине М4.....                                       | 148 |
| Слика 6.57 | Визуелни приказ добијеног компоста мешавина: а) мешавина М5; б) М9 и в) М13.....          | 148 |
| Слика 6.58 | Визуелни приказ добијеног компоста мешавина: а) М6; б) М10 и в) М14.....                  | 148 |



---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Слика 6.59</b> Упоредни приказ промене рН вредности, температуре и садржаја воде за мешавину са свим ко-супстратима: мешавина М4..... | 153       |
| <b>Слика 6.60</b> Упоредни приказ промене рН вредности, температуре и садржаја воде мешавина са ОХ: а) М5; б) М9; в) М13.....            | 155 - 156 |
| <b>Слика 6.61</b> Упоредни приказ промене рН вредности, температуре и садржаја воде мешавина са ЖЕ: а) М6; б) М10; в) М14.....           | 159 - 160 |



## 11 БИОГРАФИЈА АУТОРА

Милица П. Ивановић рођена је 14. маја 1991. године у Нишу, где је завршила основну и средњу школу. Основне академске студије уписала је школске 2010/2011. године на Машинском факултету Универзитета у Нишу, на смеру Енергетика и процесна техника. Завршни рад под називом „Пречишћавање димних гасова методом апсорпције са посебним освртом на одсумпоравање димних гасова“ одбранила је 2014. године са оценом 10 и тиме стекла звање инжењера машинства.

Мастер академске студије уписала је школске 2013/2014. године на истом факултету и смеру, где је 2015. године одбранила мастер рад под називом „Управљање отпадним водама Града Ниша“ са оценом 10, чиме је стекла звање мастер инжењера машинства.

Докторске академске студије уписала је новембра 2015. године на Машинском факултету Универзитета у Нишу, на смеру Енергетика и процесна техника. Успешно је положила све испите предвиђене планом и програмом, са просечном оценом 9,44.

Током докторских студија учествовала је на курсу International Course for Young Researchers: “Computational Engineering”, који организују Leibniz University of Hannover, Technical University of Sofia, University of Niš и University “Sts. Cyril and Methodius”. Такође је учествовала на скупу „WBAA Workshop: Making a Regent“, који организује Машински факултет Универзитета у Бањалуци под покровитељством Western Balkans Alumni Association. Успешно је завршила модул „Одрживи, интелигентни и еколошки транспорт и логистика у урбаном контексту: промоција стандарда и принципа Европске уније у региону југоисточне Србије“ на Машинском факултету у Нишу, у оквиру Erasmus+ програма.

Своју професионалну каријеру започела је 2017. године у Иновационом центру Универзитета у Нишу, где је била ангажована као сарадник на пројектима.

Током 2018. године учествовала је као сарадник на националном иновационом пројекту „Развој поступка за изоловање природних антиоксиданаса из љуске кромпира“ (број пројекта: 391–00–16/2017–16/33, Иновациони центар Универзитета у Нишу), као и на пројекту „Идентификација параметара и избор турбине мини хидроелектране за оптимално искоришћење енергије“ – пројекат Фонда за иновациону делатност.



Године 2019. учествовала је као сарадник на пројекту „Развој и пројектовање аутономне чистилице за фине решетке у водозахватима малих хидроелектрана“, такође финансираном од стране Фонда за иновациону делатност.

У октобру 2019. године изабрана је за асистента на Високој техничкој школи струковних студија у Пожаревцу, на Катедри за машинство. Године 2022. изабрана је за наставника вештина на Академији струковних студија Београд – Одсек примењене инжењерске науке Пожаревац, за област процеси и технологије за повраћај енергије и материје, на Катедри за машинско инжењерство. Чланица је SDEWS центра.

Током 2022. године као сарадник је учествовала на развојно-истраживачком пројекту „План управљања отпадом на територији Града Пожаревца за период 2023–2032“.

Године 2024. учествовала је на скупу „The China — Serbia Technological Experts Communication Workshop — Poverty Alleviation Through Science and Technology“, који је организовало Министарство науке, технолошког развоја и иновација.

Учествовала је и на више семинара организованих од стране Регионалне привредне коморе у Нишу, као и на пројектима реализованим за потребе привредних субјеката.

Аутор је више радова у часописима са SCI листе (категорија M20), на којима је први потписани аутор и коаутор. Објавила је више од 30 радова у националним часописима, као и на међународним и националним научним конференцијама.

**Прилог 4:**

**ИЗЈАВЕ АУТОРА ДОКТОРСКИХ ДИСЕРТАЦИЈА**

**Изјава 1.**

**ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ**

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

**„Моделовање процеса компостирања комине грожђа применом  
вишекритеријумске оптимизације“**

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 05.11.2025

Потпис аутора дисертације:



---

Милица П. Ивановић

**Изјава 2.**

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: „Моделовање процеса компостирања комине грожђа применом вишекритеријумске оптимизације“

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 05.11.2025

Потпис аутора дисертације:



---

Милица П. Ивановић

### Изјава 3:

#### ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

#### „Моделовање процеса компостирања комине грожђа применом вишекритеријумске оптимизације“

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)<sup>1</sup>

У Нишу, 05.11.2025

Потпис аутора дисертације:



---

Милица П. Ивановић

---

<sup>1</sup> Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

|                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Презиме, име једног родитеља и име | Милица Предраг Ивановић |
| Датум и место рођења               | 14.05.1991, Ниш         |

### Основне студије

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| Универзитет       | Универзитет у Нишу   |
| Факултет          | Машински факултет    |
| Студијски програм | Машинско инжењерство |
| Звање             | Инжењер машинства    |
| Година уписа      | 2010                 |
| Година завршетка  | 2014                 |
| Просечна оцена    | 7,74                 |

### Мастер студије, магистарске студије

|                      |   |
|----------------------|---|
| Универзитет          | Универзитет у Нишу                                  |
| Факултет             | Машински факултет                                   |
| Студијски програм    | Машинско инжењерство                                |
| Звање                | Магистар инжењер машинства                          |
| Година уписа         | 2013  |
| Година завршетка     | 2015  |
| Просечна оцена       | 8,94  |
| Научна област        | Енегетика и процесна техника                        |
| Наслов завршног рада | Управљање отпадним водоама на територији града Ниша |

### Докторске студије

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| Универзитет               | Универзитет у Нишу   |
| Факултет                  | Машински факултет    |
| Студијски програм         | Машинско инжењерство |
| Година уписа              | 2015                 |
| Остварен број ЕСПБ бодова | 150                  |
| Просечна оцена            | 9,44                 |

### НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

|   |   |
|---|---|
| Наслов теме докторске дисертације                               | Моделовање процеса компостирања комине грожђа применом вишекритеријумске оптимизације |
| Име и презиме ментора, звање                                    | Гордана Стефановић, редовни професор  |
| Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације | НСВ број 8/20 – 01 – 002/23 – 015 од 27.02.2023                                       |

### ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

|                              |               |  |          |           |        |           |  |               |  |  |
|------------------------------|---------------|--|----------|-----------|--------|-----------|--|---------------|--|--|
| Број страна                  | 179           | <b>МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ</b><br>Примљено: 25.12.2025.<br><table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Орг.јед.</td> <td>Број</td> <td>Прилог</td> <td>Вредности</td> </tr> <tr> <td></td> <td>612-80-294/25</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> | Орг.јед. | Број      | Прилог | Вредности |  | 612-80-294/25 |  |  |
| Орг.јед.                     | Број          |  | Прилог   | Вредности |        |           |  |               |  |  |
|                              | 612-80-294/25 |  |          |           |        |           |  |               |  |  |
| Број поглавља                | 7             |  |          |           |        |           |  |               |  |  |
| Број слика (шема, графикона) | 72            |  |          |           |        |           |  |               |  |  |
| Број табела                  | 27            |  |          |           |        |           |  |               |  |  |
| Број прилога                 | /             |  |          |           |        |           |  |               |  |  |

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА  
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

| Р. бр.  | Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице  | Категорија |
|---|--|------------|
| 1   | <p><b>M. Ivanović, G. Stefanović, S. Stanković, &amp; B. Milutinović, <i>Co-composting a grape marc: an influence of grape stalks and different biowastes presence on the physical-chemical parameters of the mixture</i>, Renewable Energy, Vol. 232, pp. 120966, 2024. <a href="https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120966">https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120966</a></b></p> | M21        |
| <p>У раду је испитиван процес ко-компостирања комине грожђа са различитим органским отпадом (остацима хране, живинским екскрементима, пшеничном сламом). Праћене су две групе мешавине, са и без огроздине са циљем да се оцени утицај присуства појединих ко-супстрата и комине грожђа на процес компостирања. Утврђено је да присуство огроздине у мешавинама са ОХ и ЖЕ даје боље резултате, што се огледа кроз вишу температуру и дужи термофилни период, као и краће трајање киселе фазе. Поред тога, присуство огроздине у мешавини доприноси бољој разградивости, осим у случају када је ко-супстрат пшенична слама, када су ови параметри били лошији.</p>  |  |            |
| 2   | <p><b>M. Ivanovic, G. Stefanovic, P. Rajkovic, M. Jovceviski, I. Radojevic, <i>Development of a mathematical model for selection of the optimal mixture for composting process</i>, Journal of Environmental Protection and Ecology, Vol. 24, No 4, pp. 1211-1221, 2023.</b></p>   | M23        |
| <p>У овом раду развијен је математички модел за одређивање оптималне мешавине за процес компостирања, у којој су комина грожђа и огроздина главне компоненте. Посматране су доступне фракције органског отпада: комина грожђа и огроздина, живинске екскременти, органска фракција комуналног отпада и пшенична слама. У моделу су дефинисани критеријуми, као и гранични услови: C/N (25-35) и садржај воде (40-60%). Резултати су показали да је могуће добити оптималну мешавину са уделом од 40 до 98% комине и до 35% огроздине, при чему више присуство огроздине утиче на повећање односа C/N, pH вредности и садржаја лигнина и док опада садржај воде.</p>   |  |            |
| 3   | <p><b>M. Ivanović, G. Stefanović, D. Savić, <i>Potentials of grape pomace for compost production on the three Morava's region: a case study</i>, Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection, 2022, Vol.19, No.2, pp. 85 – 99, <a href="https://doi.org/10.22190/FUWLEP2202085I">https://doi.org/10.22190/FUWLEP2202085I</a></b></p>                        | M52        |
| <p>У раду су приказане основне карактеристике и потенцијали КГ и других доступних фракција ОО пољопривредног порекла са циљем сагледавања могућности њихове употребе. На основу заступљености винограда на територији РС и локално доступних супстрата, а коришћењем претходно развијеног математичког модела, израчунате су количине посматраних фракција супстрата и добијеног компоста. Применом математичког модела на градове у области Три Мораве, показано је да највећи удео КГ у оптималној мешавини износи 40%, када су супстрати пшенична слама и свињски екскременти. Коришћењем средње вредности процента ко - супстрата и КГ, модел је примењен на територију Три Мораве. Показано је да постоје довољне количине свих супстрата при чему су задовољени критеријуми модела.</p>                             |  |            |
| 4   | <p><b>M. Ivanović, G.Stefanović, A. Janković, S. Stanković, <i>Identification of the optimal co-substrate for co-composting with grape pomace by using multi criteria analysis</i>, International Scientific And Professional Conference Politehnika 2023, 15.12.2023, Belgrade, Serbia, pp. 930 - 936</b></p>   | M33        |
| <p>Математички модел који је коришћен и приказан у претходном раду за одређивање максималног удела кљука у смеси у овом раду је коришћен за одређивање оптималне мешавине за процес компостирања и максималног удела комине грожђа (КГ). Показано је да су критеријуми задовољени када КГ чини 65%, уз 15-20% ко-супстрата. Модел је такође показао да је могуће у потпуности елиминисати КГ уз замену другим фракцијама органског отпада (остаци хране, живински екскременти). Резултати показују да су нутритивне вредности високе, посебно фосфор и калијум, а нешто већи садржај NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> постигнут је са живинским екскрементима. Закључено је да живински екскременти представљају оптималан ко-супстрат који треба додати КГ и огроздине током ко-компостирања.</p> |  |            |
| 5   | <p><b>M. Ivanović, P.Rajković, A. Janković, S. Stanković, <i>Optimization of the mixture composition and initial process parameters for composting grape pomace and co-substrates: selection of an appropriate method</i>, International Scientific And Professional Conference Politehnika 2025, 28.11.2025, Belgrade, Serbia, pp. 1054 - 1060</b></p>                                  | M33        |
| <p>Овај рад се бави упоређивањем две математичке методе оптимизације – методе глобалног критеријума и методе тежинских коефицијената, са циљем утврђивања која је од посматраних метода повољнија за одређивање састава мешавине за почетак процеса. Резултати су показали да су обе методе задовољиле граничне услове процеса и постављене критеријуме. Такође је утврђено да тежина критеријума од 0,4 у методи тежинских коефицијената одговара циљу, при чему се постиже максимална pH вредност, што је био један од захтеваних циљева. Закључено је да су обе методе повољне, али да се метода тежинских коефицијената показала применљивијом у пракси, јер се њоме постижу повољнији услови за почетак процеса.</p>   |  |            |
| 6   | <p><b>M. Ivanović, G. Stefanović, A. Momčilović, B. Milutinović, A. Stojić, <i>Dobijanje optimalnih smeša za kompostiranje primenom mateamtičkog modeliranja</i>, Konferencija Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, 4 – 6.04.2023, Vrnjačka Banja, pp. 104 – 111, ISBN 978 – 86 – 81618 – 14 – 1.</b></p>  | M61        |
| <p>У овом раду примењен је претходно развијени математички модел за одређивање оптималне мешавине за процес компостирања и максималног удела кљука у смеси. Показано је да су сви критеријуми задовољени када је удео кљука у оптималној мешавини у опсегу од 57% до 67%. Остала добијена решења су одбачена јер критеријум за постизање pH вредности није испуњен, односно pH је био нижи од 5,0. Резултати такође показују да претходно развијени математички модел заснован на мултикритеријумској оптимизацији може бити примењен за добијање</p>   |  |            |

оптималне мешавине за процес компостирања било које врсте органског отпада уз могућност корекције граничних услова по потреби.

**НАПОМЕНА:** уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

### ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА НЕ

Тема докторске дисертације је раније одобрена кандидату, а достављени рукопис је усклађен са предложеном темом и задовољава критеријуме у погледу структуре, обима и научног квалитета. На основу објављених научних и стручних радова, кандидат испуњава све критеријуме неопходне за приступање одбрани докторске дисертације.

### ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

Докторска дисертација се састоји из 7 поглавља

У **првом поглављу** представљени су предмет и циљеви истраживања, као и структура докторске дисертације.

**Друго поглавље** посвећено је теоријском прегледу у области и састоји се из три целине. У првом делу поглавља описани су циклуси нутријената, као и потребе земљишта за њима. Друга целина обухвата опис процеса компостирања, кључне параметре који на њега утичу, као и механизме разградње ОО током фаза процеса. Трећи део односи се на параметре квалитета и законску регулативу у вези са квалитетом компоста.

У **трећем поглављу** извршена је детаљна анализа доступне литературе о карактеристикама органског отпада из индустрије вина (ООИВ), утицају појединих компоненти и карактеристичним појавама које се јављају током процеса компостирања. Такође, приказана је анализа могућности примене добијеног компоста.

**Четврто поглавље** посвећено је опису примењених материјала и метода. Најпре су приказане количине и карактеристике доступних врста органског отпада пољопривредног порекла (ООПП) на територији РС, са посебним акцентом на ООИВ, односно његов настанак, састав, особине и количине. Такође, приказане су количине и особине осталих доступних врста ООПП. Друга потцелина посвећена је вишекритеријумској оптимизацији параметара, опису и развоју математичког модела за избор оптималног састава мешавина за почетак процеса компостирања. У трећој потцелини дат је опис примењених аналитичких метода за одређивање физичко-хемијских параметара који су праћени током експеримента.

У **петом поглављу** дат је опис експерименталног истраживања које је подељено на припремну и главну фазу. У припремној фази I извршен је избор мешавина за компостирање применом развијеног математичког модела, док су у припремној фази II праћене изабране мешавине из фазе I, са и без огроздине, током активне фазе и фазе хлађења процеса компостирања. У овом делу утврђени су и критеријуми за избор најбољих мешавина које ће се пратити током целог процеса компостирања. У главној фази истраживања праћене су мешавина које су изабране у припремној фази II, при различитим уделима огроздине (15%, 25% и 35%) током периода активне фазе, фазе хлађења и фазе сазревања.

**Шесто поглавље** обухвата резултате и дискусију спроведеног истраживања и састоји се из више целина. У првом делу приказани су резултати припремне фазе I и припремне фазе II. У оквиру припремне фазе I представљени су резултати математичког модела, односно приказани су оптимални састави мешавина, њихови физичко-хемијски параметри, као и утицај огроздине на граничне услове и критеријуме. У припремној фази II, која обухвата експериментално праћење активне фазе процеса компостирања, упоредо су приказане промене физичко-хемијских параметара мешавина комине и ко-супстрата, као и мешавина са додатком огроздине. На крају овог дела извршен је избор најбољих мешавина за праћење током целог процеса компостирања. Други део поглавља односи се на резултате и дискусију праћења целог тока процеса компостирања најбољих мешавина из припремне фазе II. Најпре су приказани резултати праћења компостирања најбоље мешавине комине и ко-супстрата, а затим ових мешавина са различитим масеним уделима огроздине (15%, 25% и 35%). За оба случаја анализирану су утицаји промене температуре, рН вредности, садржаја воде, садржаја C и N, C/N односа, укупне масе и OM као и промене садржаја лигноцелулозних компоненти и неорганских форми нутријената током процеса компостирања. Поред тога, дати су резултати анализе квалитета добијеног компоста. У трећем делу поглавља извршена је верификација примењеног математичког модела.

У **седмом поглављу** су приказана закључна разматрања и дати будући правци истраживања.

### ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

У оквиру ове докторске дисертације у потпуности су остварени постављени циљеви истраживања који су се односили на сагледавање могућности примене ООИВ у процесу компостирања, као и на дефинисање оптималног састава мешавина за покретање и даљи ток процеса. Теоријским и експерименталним истраживањима потврђено

је да се ООИВ, упркос неповољним почетним карактеристикама, може ефикасно компостирати уз примену одговарајућих ко-супстрата.

Формирана база података о доступним врстама ООИП у Републици Србији омогућила је сагледавање њихових потенцијала. Развијени математички модел, заснован на методи вишекритеријумске оптимизације, показао се као ефикасан алат за избор састава мешавина за почетак и даљи ток процеса, што је експериментално потврђено кроз успешно покретање и одвијање процеса компостирања код предложених мешавина.

Посебни циљеви, који обухватају избор ко-супстрата, анализу утицаја огроздине на различите саставе мешавина, праћење физичко-хемијских параметара, процену квалитета добијеног компоста и верификацију математичког модела, остварени су у значајној мери. Утврђени су оптимални услови и мешавине за компостирање комине, као и оптималан удео огроздине. Иако добијени компост није у потпуности испунио све критеријуме за категоризацију као оплемењивач земљишта, добијени резултати представљају основу за даља унапређења процеса. Експериментална испитивања омогућила су верификацију модела и потврду постављених граничних услова за однос C/N, рН вредност и садржај воде, чиме је потврђено да су сви циљеви докторске дисертације успешно реализовани.

#### Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Научни доприноси докторске дисертације су:

- Потврђен је доказ концепта да је могуће применити процес компостирања за третман свих компоненти ООИВ уз примену одређених ко-супстрата на основу њихових физичко-хемијских карактеристика.
- Развијен је математички модел за избор мешавина комине, огроздине и ко-супстрата које су након биолошке разградње постигле особине које карактеришу компост.
- Формирана је база података о доступним врстама, количинама и карактеристика ООИП.
- Утврђена је најбоља мешавина комине и изабраних ко-супстрата са аспекта одвијања процеса компостирања и квалитета крајњег производа.
- Одређен је максимални удео огроздине у мешавинама комине и ко-супстрата, који омогућава успешан ток процеса компостирања без негативног утицаја на кључне процесне параметре.
- Крајњи продукт процеса компостирања – компост, повољних је карактеристика, што претсваља потврду разградње посматраних мешавина.
- Утврђено је да, иако је добијени компост достигао одговарајући ниво стабилности и зрелости, поједини параметри квалитета нису били у оквиру прописаних граничних вредности, услед чега крајњи производ није погодан за примену као органски оплемењивач земљишта.
- Верификован је математички модел за избор мешавине комине грожђа и ко-супстрата за постизање оптималних услова за почетак и даљи ток процеса компостирања.

#### Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Током израде докторске дисертације кандидаткиња Милица Ивановић је показала висок ниво самосталности, аналитичког приступа и систематичности у раду. Кроз свеобухватно експериментално истраживање процеса ко-компостирања комине, ко-супстрата и огроздине, као и кроз примену математичког моделирања, кандидаткиња је на оригиналан и научни приступ решила постављене задатке.

На основу спроведених истраживања и остварених резултата, може се закључити да кандидаткиња поседује адекватна теоријска и практична знања из области биолошких третмана органског отпада и математичког моделирања. Значајни научни резултати, представљени у докторској дисертацији, објављени су у рецензираним научним часописима и зборницима међународних конференција, чиме је доказан научни и стручни допринос рада.

#### ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу свих изложених чињеница, остварених научних резултата кандидаткиње, значаја обрађене теме и квалитета поднете докторске дисертације, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључује да дисертација представља оригиналан и значајан научни и стручни допринос. С тим у вези, чланови Комисије предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета у Нишу да рад кандидаткиње Милице Ивановић, мастер инжењера машинства, под насловом:

**„Моделовање процеса компостирања комине грожђа применом вишекритеријумске оптимизације“**  
прихвати као докторску дисертацију и да кандидаткињу позове на јавну усмену одбрану.

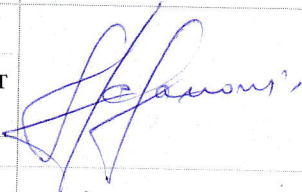
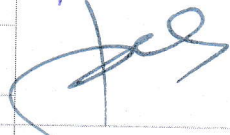

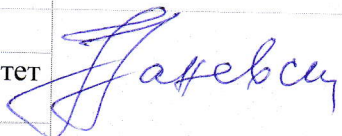
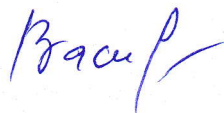
## КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовану Комисије

НСВ 820-01-08/25-25

Датум именовања Комисије

17.12.2025

| Р. бр. | Име и презиме, звање   |   | Потпис  |
|--------|--|---|---|
| 1.     | др Гордана Стефановић, редовни професор                                  | председник  |  |
|        | Термотехника, термоехергетика и процесана техника<br>(Ужа научна област) | Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу<br>(Установа у којој је запослен)            |   |
| 2.     | др Драгиша Савић, редовни професор                                       | члан  |  |
|        | Прехрамбене технологије и биотехнологија<br>(Ужа научна област)          | Универзитет у Нишу, Технолошки факултет у Лесковцу<br>(Установа у којој је запослен)      |   |
| 3.     | др Предраг Рајковић, редовни професор                                    | члан  |  |
|        | Математика и информатика<br>(Ужа научна област)                          | Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу<br>(Установа у којој је запослен)            |   |
| 4.     | др Јелена Јаневски, редовни професор                                     | члан  |  |
|        | Термотехника, термоехергетика и процесана техника<br>(Ужа научна област) | Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу<br>(Установа у којој је запослен)            |   |
| 5.     | др Зорица Ранковић Васић, редовни професор                               | члан  |  |
|        | Опште виноградарство<br>(Ужа научна област)                              | Универзитет у Београду, Пољопривредни факултет у Земуну<br>(Установа у којој је запослен) |   |

Датум и место:

Децембар, 2025 у Нишу и Београду