

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ

Зорана З. Радибратовић

**Утицај термодинамичких параметара и
хемијских реагенса на ефикасност
флотације раствореним ваздухом у третману
подземних вода**

докторска дисертација

Београд, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Zorana Z. Radibratović

**The influence of thermodynamic parameters
and chemical reagents on the efficiency of
dissolved air flotation in groundwater treatment**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026.

МЕНТОРИ

Др Мирјана Кијевчанин, редовни професор, Универзитет у Београду,
Технолошко-металуршки факултет

Др Марија Перовић, виши научни сарадник,
Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ ДОО

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Ивона Радовић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Технолошко-металуршки факултет

Др Маја Ђолић, доцент, Универзитет у Београду,
Технолошко-металуршки факултет

Др Александар Јововић, редовни професор, Универзитет у Београду,
Машински факултет

Датум одбране: _____

Захвалница

Извод

Флотација раствором ваздухом (DAF) представља физичко-хемијски процес који се широко примењује у третману површинских и индустријских вода за уклањање суспендованих честица, органских материја и појединих токсичних елемената. Иако је ова технологија добро позната и широко примењена у наведеним системима, њена примена у третману подземних вода је знатно мање истражена. Подземне воде у појединим регионима, укључујући и подручје Зрењанина, које је изабрано за детаљнију анализу, карактеришу повишене концентрације арсена, органских материја и боје, што представља значајан изазов за системе водоснабдевања. У таквим условима, ефикасност примене DAF технологије у великој мери зависи од разумевања физичко-хемијских и термодинамичких механизма који одређују формирање и понашање мехурића у систему.

Посебан значај у функционисању DAF процеса имају термодинамички параметри који контролишу растворљивост ваздуха у води, степен презасићења, нуклеацију и стабилност микромехурића. Притисак, температура и режим уноса ваздуха директно утичу на количину раствореног гаса, величину и број формираних мехурића, као и на динамику њихове интеракције са честицама и агрегатима у води. Ови параметри одређују услове масеног преноса између гасне и течне фазе и у великој мери дефинишу ефикасност процеса флотације.

Циљ ове дисертације био је да се испита утицај термодинамичких параметара и хемијских реагенса на ефикасност флотације раствором ваздухом у третману подземних вода, са посебним освртом на уклањање арсена, органских материја и боје. Истраживање је обухватило лабораторијска испитивања, применом JAR тестова, ради оптимизације процеса коагулације и флокулације, као и серију DAF JAR експеримената у којима је анализиран утицај притиска у сатуратору, степена рецикулације и времена уноса ваздуха, при чему су испитивани процесни услови систематски варирани у оквиру појединачних експерименталних серија. Резултати су показали да оптимизација дозе коагуланата и процесних параметара доводи до значајног повећања ефикасности уклањања параметара квалитета воде, при чему је у оптимизованим условима прве фазе истраживања постигнуто уклањање арсена од 88–90%, боје од 70–80% и укупног органског угљеника од 45–55%, што потврђује значај контроле термодинамичких и оперативних услова у управљању процесом флотације раствором ваздухом.

Резултати истраживања показали су да је ефикасност DAF процеса у третману подземних вода директно условљена термодинамичким параметрима формирања микромехурића, при чему су оптимални услови притиска, степена рецикулације и дозе коагуланата омогућили стабилно уклањање арсена, органских материја и боје до вредности које задовољавају захтеве квалитета воде за даљи третман. На основу добијених резултата дефинисани су оптимални процесни услови примене DAF технологије у третману подземних вода специфичног хемијског састава.

Кључне речи: Флотација раствором ваздухом (DAF); подземне воде; термодинамички параметри; микромехурићи; коагулација; уклањање арсена; третман воде.

Научна област: Технолошко инжењерство

Ужа научна област: Хемијско инжењерство

Abstract

Dissolved air flotation (DAF) is a physicochemical process widely applied in the treatment of surface and industrial waters for the removal of suspended particles, organic matter, and certain toxic elements. Although this technology is well established and broadly used in these systems, its application in groundwater treatment has been significantly less investigated. Groundwater in certain regions, including the area of Zrenjanin, is characterized by elevated concentrations of arsenic, organic matter, and color, which represents a major challenge for water supply systems. Under such conditions, the efficiency of DAF technology largely depends on understanding the physicochemical and thermodynamic mechanisms governing bubble formation and behavior within the system.

Thermodynamic parameters play a crucial role in the performance of the DAF process, as they control air solubility in water, the degree of supersaturation, nucleation, and the stability of microbubbles. Pressure, temperature, and the air injection regime directly influence the amount of dissolved gas, the size and number of generated bubbles, and the dynamics of their interaction with particles and aggregates in water. These parameters determine the conditions of mass transfer between the gas and liquid phases and significantly affect flotation efficiency.

The objective of this doctoral dissertation was to investigate the influence of thermodynamic parameters and chemical reagents on the efficiency of dissolved air flotation in groundwater treatment, with particular emphasis on the removal of arsenic, organic matter, and color. The research included laboratory investigations using jar tests to optimize coagulation and flocculation processes, as well as a series of DAF jar experiments in which the effects of saturator pressure, recirculation ratio, and air injection time were analyzed, with the investigated process conditions systematically varied across individual experimental series. The results demonstrated that optimization of coagulant dosage and operational parameters led to a significant increase in treatment efficiency, with the optimized conditions of the first research phase achieving arsenic removal of 88–90%, color removal of 70–80%, and total organic carbon (TOC) removal of 45–55%, confirming the importance of controlling thermodynamic and operational conditions in managing the dissolved air flotation process.

The results of the research showed that the efficiency of the DAF process in groundwater treatment is directly governed by thermodynamic parameters related to microbubble formation, while optimal conditions of pressure, recirculation ratio, and coagulant dosage enabled stable removal of arsenic, organic matter, and color to levels compliant with water quality requirements for further treatment. Based on the obtained results, optimal operational conditions for the application of DAF technology in groundwater treatment of specific chemical composition were defined. The findings contribute to a better understanding of thermodynamic mechanisms in dissolved air flotation and demonstrate the importance of integrating thermodynamic and process parameters in optimizing DAF technology for groundwater treatment.

Keywords:

Dissolved air flotation (DAF); groundwater; thermodynamic parameters; microbubbles; coagulation; arsenic removal; water treatment

Scientific field: Technological Engineering

Scientific subfield: Chemical Engineering

Садржај

Списак симбола и скраћеница.....	9
Списак слика.....	10
Списак табела	12
1 Увод.....	13
1.1 Предмет, циљ и значај истраживања	13
1.2 Полазне хипотезе истраживања	15
1.3 Научни допринос дисертације.....	15
2 Теоријски део	17
2.1 Примена DAF у третману вода – преглед литературе и праксе.....	17
2.1.1 Примена у третману површинских вода	17
2.1.2 Примена у индустријским отпадним водама.....	18
2.1.3 Примена у третману подземних вода	19
2.1.4 Значај овог истраживања	20
2.2 Основе DAF технологије	21
2.2.1 Историјат и развој DAF технологије.....	21
2.2.2 Принцип рада.....	22
2.2.3 Предности у односу на седиментацију	23
2.2.4 Ограничења и изазови.....	25
2.2.5 Поређење DAF технологије са другим технологијама третмана подземних вода	26
2.3 Утицај хемијских и оперативних фактора на DAF процес.....	27
2.3.1 Коагулација и избор коагуланата	29
2.3.2 Флокулација и избор флокуланата	33
2.3.3 Утицај pH, салинитета и вискозности воде на ефикасност DAF процеса ..	34
2.4 Термодинамички фактори	35
2.4.1 Притисак и растворљивост ваздуха.....	35
2.4.2 Температура воде и утицај на мехуриће	37
2.4.3 Величина и стабилност мехурића.....	38
2.4.4 Укупни утицај термодинамичких фактора	39
3 Експериментални део	40
3.1 Карактеризација сирове воде.....	40
3.2 Материјали и методе	43
3.2.1 Примењене аналитичке методе.....	44
3.2.2 Хемијски реагенси и припрема раствора	46

3.2.3	Карактеристике и начин узорковања подземне воде	48
3.3	Прва фаза експерименталног истраживања- JAR тестови	49
3.3.1	JAR 1 Серија	53
3.3.2	JAR 2 Серија	55
3.3.3	JAR 2 додатна серија.....	58
3.3.4	JAR 2 додатна серија 2.....	60
3.4	Друга фаза - DAF JAR тестови на постројењу	62
3.4.1	Лабораторијска DAF поставка и принцип рада.....	63
3.4.2	Поступак DAF JAR тестирања	64
3.4.3	Експериментални услови и визуелни приказ DAF JAR серија.....	65
4	Резултати.....	70
4.1	Карактеризација сирове воде.....	70
4.2	Резултати прве фазе: JAR тестови	73
4.2.1	Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 1 Серија	73
4.2.2	Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 Серија	75
4.2.3	Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатна серија испитивања.....	76
4.2.4	Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатна серија 2 испитивања.....	78
4.2.5	Закључци прве фазе испитивања - JAR тестови.....	79
4.3	Резултати друге фазе: DAF JAR тестови на постројењу	80
4.3.1	Сprovedена тестирања - Серија 5	81
4.3.2	Сprovedена тестирања - Серија 7	86
4.3.3	Сprovedена тестирања - Серија 8	91
4.3.4	Сprovedена тестирања - Серија 9	95
4.3.5	Закључци друге фазе испитивања - DAF JAR тестови.....	99
5	Дискусија	106
6	Закључак	109
7	ЛИТЕРАТУРА.....	111
	Биографија	115
	Изјава о ауторству	117
	Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	118
	Изјава о коришћењу	119

Списак симбола и скраћеница

DAF — Dissolved Air Flotation (флотација раствореним ваздухом)

JAR — JAR тест (лабораторијски тест коагулације и флокулације)

TOC — Total Organic Carbon (укупни органски угљеник)

DOC — Dissolved Organic Carbon (растворени органски угљеник)

NOM — Natural Organic Matter (природна органска материја)

PAC — Polyaluminium Chloride (полиалуминијум хлорид)

FeCl₃ — Iron(III) chloride (гвожђе(III)-хлорид)

NaOCl — Sodium hypochlorite (натријум-хипохлорит)

PE — Polyelectrolyte (полиелектролит)

ICP-OES — Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

NDIR — Non-Dispersive Infrared Detection

As — арсен

Fe — гвожђе

C₀ — почетна концентрација

C — концентрација након третмана

R — ефикасност уклањања (%)

p — притисак (bar)

T — температура (°C)

t — време (min)

Q — проток (l/min)

V — запремина (L)

A/V — однос ваздух/вода у процесу флотације

d_b — пречник мехурића (μm)

Списак слика

Слика 2.1. Шематски приказ третмана воде са применом DAF процеса

Слика 2.2. Шематски приказ процеса коагулације и формирања флокула

Слика 2.3. Шематски приказ процеса формирања и раста флокула у процесу флокулације

Слика 3.1. Шематски приказ фаза JAR теста (коагулација и флокулација)

Слика 3.2. JAR узорци 1- мешање након дозирања хемикалија. (узорци S1-S6)

Слика 3.3. Понашање узорака JAR 1 током таложења и убризгавања ваздуха.

Слика 3.4. JAR 2 Узорци S8–S13 након таложења.

Слика 3.5. JAR 2 Током уноса ваздуха, узорци S12 и S13.

Слика 3.6. JAR 2 након 30 мин искључења ваздуха у Узорцима 12 и 13.

Слика 3.7. JAR 2 додатна серија узорци D12, D13 и D14 након таложења.

Слика 3.8. JAR 2 додатна серија 2 узорци D6, D7, 13D2 и 14D2 након таложења.

Слика 3.9. JAR DAF тестер

Слика 3.10. JAR DAF тестера током уноса ваздуха током експеримената (серије 5 и 9)

Слика 3.11. JAR DAF тестирање након завршне фазе мешања (Серија 7)

Слика 3.12. Експеримент у серији 8 при комбинованим условима

Слика 3.13. Експеримент у серији 9 при различитом времену уноса ваздуха

Слика 4.1. Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 1 Серија

Слика 4.2. Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 Серија

Слика 4.3. Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатна серија испитивања

Слика 4.4. Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатне серије 2 испитивања

Слика 4.5. Зависност концентрације ослобођеног ваздуха од притиска у DAF систему

Слика 4.6. Концентрација арсена у сировој и третираној води након DAF тестирања (серија 5)

Слика 4.7. Вредности боје воде у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 5)

Слика 4.8. Вредност ТОС у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 5)

Слика 4.9. Концентрација As у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 7)

Слика 4.10. Вредности боје у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 7)

Слика 4.11. Вредности ТОС у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 7)

Слика 4.12. Упоредни приказ концентрација арсена, боје и ТОС у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (Серија 8)

Слика 4.13. Упоредни приказ концентрација арсена, боје и ТОС у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (Серија 9)

Слика 4.14. Упоредни приказ концентрација арсена у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9

Слика 4.15. Упоредни приказ концентрација боја у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9

Слика 4.16. Упоредни приказ концентрација ТОС у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9

Списак табела

Табела 2.1 Упоредни приказ DAF и класичне седиментације

Табела 2.2 Упоредни приказ DAF технологије и других технологија за третман подземних вода

Табела 2.3 Хемијски и оперативни фактори и њихов утицај на ефикасност DAF процеса

Табела 3.1 Физичко-хемијске карактеристике сирове воде, укључујући вредност pH, мутноћу, боју, концентрацију арсена и вредност TOC

Табела 3.2 Примењени стандарди и мере контроле квалитета током експерименталних испитивања

Табела 3.3 Опсег испитиваних доза реагенса у лабораторијским испитивањима

Табела 3.4 Карактеристике сирове подземне воде коришћене у експериментима

Табела 3.5 Преглед серија JAR тестова, примењених реагенса и посебних процедура у првој фази истраживања

Табела 3.6. Матрица експеримената JAR 1 серије

Табела 3.7. Матрица експеримената JAR 2 серије

Табела 3.8 Матрица експеримената JAR 2 додатне серија

Табела 3.9. Матрица експеримената JAR 2 додатне серије 2

Табела 3.10. Организација DAF JAR серија и варирани параметри

Табела 3.11. Улазни параметри DAF JAR серија (Серије 5–9)

Табела 4.1 Физичко-хемијске карактеристике сирове воде, укључујући вредност pH, мутноћу, боју, концентрацију арсена и вредност

Табела 4.2. Проценат уклањања арсена, TOC и боје током JAR испитивања – JAR 1 Серија

Табела 4.3. Проценат уклањања арсена, TOC и боје током JAR испитивања – JAR 2 Серија

Табела 4.4. Проценат уклањања арсена, TOC и боје током JAR испитивања – JAR додатне серије испитивања

Табела 4.5. Проценат уклањања арсена, TOC и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатне серије 2 испитивања

Табела 4.6 Синтеза резултата JAR испитивања – почетне вредности, финални опсези, најбоље постигнуте вредности и ефикасност уклањања

Табела 4.7. Упоредни приказ резултата DAF JAR тестова за Серије 7, 8 и 9

1 Увод

1.1 Предмет, циљ и значај истраживања

Флотација раствореним ваздухом (енгл. Dissolved Air Flotation – DAF) представља широко примењив физичко-хемијски процес у третману воде за пиће и отпадних вода, који се користи за уклањање суспендованих честица, органских материја и појединих токсичних елемената, укључујући арсен [1–3]. Процес се заснива на формирању микромехурића ваздуха који се везују за честице и омогућавају њихово издвајање на површини воде, чиме се постиже висок степен сепарације загађујућих супстанци. Иако је флотација раствореним ваздухом широко примењивана у третману површинских и индустријских вода, њена примена у третману подземних вода до сада је знатно ређе разматрана, пре свега због специфичног хемијског састава ових вода и релативно малог садржаја суспендованих честица [1,2,4].

Међутим, примена DAF технологије у третману подземних вода, које карактерише релативно стабилан, али специфичан хемијски састав, до сада је знатно мање заступљена у пракси. Подземне воде, иако су генерално стабилнијег квалитета у односу на површинске воде, могу садржати растворене неорганске и органске компоненте, укључујући боју, природне органске материје, метале и металоиде као што је арсен, чије присуство представља значајан ризик по здравље људи и животну средину. Традиционални третмани ових вода обично се ослањају на адсорпцију активним материјалима, јонску измену или мембранске технологије, али они могу бити ограничени у случајевима када концентрације загађујућих материја варирају или када се ради о сложеним мешавинама органских и неорганских супстанци у води [2]. Према важећем Правилнику о хигијенској исправности воде за пиће, максимално дозвољена концентрација (мдк) арсена у води за пиће износи 10 µg/l [5].

Поред техничке ефикасности, избор технологије за третман подземних вода условљен је и економским, енергетским и еколошким аспектима. Савремени системи за припрему воде за пиће требало би да обезбеде висок степен уклањања загађујућих материја, уз оптималну потрошњу енергије, хемијских реагенса и количину насталог муља. Из тог разлога, последњих година све већа пажња посвећује се развоју процеса који омогућавају интензивирање третмана воде уз истовремено смањење оперативних трошкова и повећање одрживости постројења [4,6,7].

DAF препозната је као једна од технологија која успешно одговара овим захтевима. У односу на класичну седиментацију, DAF омогућава брже издвајање формираних флокула, већу ефикасност уклањања честица мале густине, природних органских материја, алги и колоидних честица, као и стабилнији рад постројења у условима променљивог квалитета сирове воде. Због компактне конструкције и краћег времена задржавања воде, DAF системи све чешће налазе примену у савременим постројењима за припрему воде за пиће, како као самосталан процес, тако и у комбинацији са филтрацијом [1,4,8,9].

Иако је примена DAF технологије добро документована у третману површинских вода и појединих индустријских отпадних вода, број истраживања која се односе на третман подземних вода и даље је ограничен. Посебно је недовољно испитан утицај термодинамичких параметара, као што су притисак, температура и растворљивост ваздуха, на формирање микромехурића и њихову интеракцију са флокулама које садрже арсен и природне органске материје [7,10–13]. Поред тога, већина доступних истраживања усмерена је на оптимизацију процеса коагулације и флотације за

површинске воде, док су истраживања која се односе на подземне воде углавном ограничена на појединачне параметре процеса, без свеобухватне анализе њихове међусобне повезаности [7,13,14].

Полазећи од наведеног, ово истраживање усмерено је на повезивање термодинамичких законитости растворљивости ваздуха са процесима коагулације, формирања флокула и флотације, како би се дефинисали оптимални услови рада DAF система за ефикасно уклањање арсена, укупног органског угљеника и боје из подземних вода специфичног хемијског састава [2,14–17].

Експериментални рад, који чини основу ове дисертације, спроведен је у лабораторијским условима на узорцима подземне воде специфичног хемијског састава и указао је на потенцијал примене DAF технологије у њеном третману. Ово истраживање је показало да, уз адекватно прилагођене оперативне услове, укључујући дозирање и тип коагуланата и флокуланата, оптимизовану димензију мехурића и контролу хидрауличких параметара, DAF систем може представљати погодну технологију у циљу предtretмана и може постићи висок степен уклањања боје, органских материја и арсена, како у лабораторијским тако и у реалним условима [2,18]. Ови резултати представљају основу за даљу анализу процеса и процену потенцијала примене DAF технологије у третману подземних вода.

Посебан значај у анализи DAF процеса имају термодинамички параметри који одређују растворљивост ваздуха у води, механизам формирања микромехурића и њихову стабилност током флотације, јер управо ови фактори контролишу основне механизме масеног преноса и ефикасност сепарације у процесу флотације.

Сходно наведеном, у оквиру ове дисертације анализирају се термодинамички и процесни аспекти DAF технологије кроз:

- развој и примену експерименталних приступа за оптимизацију уклањања арсена из подземних вода специфичног и сложеног квалитета.
- анализу термодинамичких принципа који одређују растворљивост гасова у води и механизам формирања мехурића [10,12,19];
- испитивање интеракције микромехурића и честица у води, као и утицаја оперативних параметара на стабилност и ефикасност флотационог процеса [20–23];

Циљ ове дисертације је да се испита утицај термодинамичких параметара и хемијских реагенаса на ефикасност флотације раствореним ваздухом у третману подземних вода, са посебним освртом на уклањање арсена, органских материја и боје. Посебна пажња посвећена је анализи утицаја температуре, притиска и режима уноса ваздуха на формирање и стабилност микромехурића, као и на ефикасност процеса флотације. На тај начин се омогућава боље разумевање механизма DAF процеса и дефинисање оптималних услова за примену ове технологије у третману подземних вода. Добијени резултати указују на потенцијал примене DAF технологије у третману подземних вода специфичног квалитета у Србији, са потенцијалом примене и у другим регионима са сличним проблемима. Резултати овог истраживања доприносе бољем разумевању процеса флотације раствореним ваздухом и могу послужити као основа за даљу оптимизацију примене DAF технологије у третману подземних вода [2,19].

1.2 Полазне хипотезе истраживања

Полазна основа овог истраживања заснива се на чињеници да третман подземних вода представља сложен процес, пре свега због присуства различитих загађујућих материја, као што су арсен, природне органске материје и једињења која утичу на боју воде. Иако се у пракси најчешће примењују конвенционални поступци третмана, примена флотације раствореним ваздухом (DAF) у третману подземних вода специфичног хемијског састава још увек није довољно истражена.

Полазећи од наведеног, у оквиру ове дисертације постављене су следеће хипотезе:

- Ефикасност DAF процеса значајно зависи од термодинамичких и оперативних параметара, пре свега притиска, температуре и степена рецикулације, који утичу на растворљивост ваздуха, формирање и стабилност микромехурића.
- Оптималним избором врсте и дозе коагуланата и флокуланата могуће је значајно повећати ефикасност уклањања арсена, укупног органског угљеника и боје из подземних вода специфичног хемијског састава.
- Оптимизацијом процесних параметара DAF система могуће је дефинисати услове који обезбеђују високу ефикасност третмана и представљају основу за примену ове технологије као самосталног процеса или предтретмана у припреми подземних вода за пиће.

Постављене хипотезе проверене су кроз лабораторијска и експериментална испитивања спроведена у оквиру ове дисертације, анализом утицаја термодинамичких и процесних параметара, као и применом различитих коагуланата и флокуланата на ефикасност уклањања арсена, природних органских материја (NOM) и боје.

1.3 Научни допринос дисертације

Научни допринос ове дисертације огледа се у систематском испитивању утицаја термодинамичких и процесних параметара DAF процеса и ефикасности уклањања арсена, NOM и боје из подземних вода специфичног хемијског састава, чиме су утврђени оптимални услови примене ове технологије.

Научни допринос дисертације заснива се на:

- анализи утицаја термодинамичких параметара (температуре, притиска и степена рецикулације) на формирање и стабилност микромехурића и ефикасност DAF процеса;
- повезивању процесних параметара (растворљивости ваздуха, степена презасићења и механизма формирања микро-мехурића) са параметрима квалитета, односно концентрацијом арсена, укупног органског угљеника и вредности боје;
- дефинисању оптималних оперативних параметара DAF процеса за третман подземних вода специфичног хемијског састава;
- утврђивању утицаја врсте и дозе хемијских реагенса - коагуланата и флокуланата на формирање и стабилност флокула и ефикасност процеса флотације;
- проширењу научних сазнања о примени DAF технологије у третману подземних вода, области која је у литератури значајно мање истражена у односу на примену ове технологије у третману површинских и индустријских вода.

Посебан стручни и апликативни допринос истраживања огледа се у верификацији лабораторијски дефинисаних оптималних услова DAF процеса у условима реалног рада постројења за пречишћавање воде, чиме је омогућена процена применљивости добијених резултата изван контролисаних лабораторијских услова.

2 Теоријски део

2.1 Примена DAF у третману вода – преглед литературе и праксе

DAF већ неколико деценија представља једну од најефикаснијих технологија за уклањање честица мале густине, колоида, боје и органских материја из различитих типова вода. У поређењу са класичним методама седиментације, DAF показује супериорност у случајевима када је потребно уклонити честице које споро или никако не таложе, јер уместо гравитационог спуштања користи мехуриће ваздуха као механизам подизања нечистоћа на површину. За разлику од аерације, чији је основни циљ размена гасова и оксидација појединих растворених компоненти, DAF користи микромехуриће ваздуха као носиоце флокула и суспендованих честица, омогућавајући њихово издвајање флотацијом. Ефикасност овог процеса заснива се на формирању агрегата мехурић–честица, при чему микромехурићи ваздуха повећавају подизање суспендованих честица и омогућавају њихово брзо издвајање из водене фазе. Овај принцип омогућава постицање високог степена уклањања у кратком времену, што је од посебног значаја у условима високих оптерећења органским и колоидним материјама [4].

2.1.1 Примена у третману површинских вода

Посебан изазов у третману површинских вода представља присуство алги, фитопланктона и колоидних органских материја, које због мале густине и спорог таложења остају у суспензији и тешко се уклањају класичним методама седиментације. У таквим условима јавља се потреба за применом алтернативних технологија које обезбеђују ефикасно уклањање финих и колоидних честица и стабилан рад постројења за пречишћавање воде.

У периоду интензивног „цвећања воде“, када долази до наглог пораста концентрације алги и фитопланктона, проблеми у третману воде постају још израженији. Повећане концентрације алги утичу на естетски квалитет воде, мењајући њену боју и прозирност, а могу изазвати и зачепљење филтера у погонима за пречишћавање воде. Распадајуће органске материје додатно доводе до настанка непријатних мириса и укуса, што утиче на потрошачке перцепције и задовољство квалитетом воде [24]. Поред естетских проблема, присуство алги може довести и до повећане потрошње коагуланата и смањене ефикасности филтрације у каснијим фазама третмана воде.

DAF систем функционише на принципу подизања суспендованих честица уз помоћ микромехурића ваздуха који се формирају у води након декомпресије засићене воде. Када се ваздух растворен у води ослобађа у виду микромехурића, они се причвршћују за честице, алге и колоидне материје, чинећи их лакшим и подстичући њихово подизање на површину. Ово омогућава ефикасно уклањање честица које би иначе биле премале или превише лагане да би потонуле у традиционалном процесу седиментације. Овај механизам чини DAF посебно погодним за третман воде током периода интензивног „цвећања“, када су концентрације суспендованих материја и алги изузетно велике.

Teixeira и Rosa [9] показали су да DAF може постићи уклањање ћелија *Microcystis aeruginosa* изнад 92%, уз већу ефикасност од конвенционалне седиментације у упоредивим условима. Ова разлика указује на значајну предност DAF технологије у третману вода са високим садржајем алги и колоидних органских материја. Поред тога, DAF омогућава ефикасно уклањање NOM, које представљају прекурсоре за формирање дезинфекционих нуспроизвода, као што су трихалометани и халоацетатне киселине. Смањење концентрације NOM је критично за обезбеђење квалитета воде за пиће, јер

коагулација и флокулација представљају важне кораке у њеном уклањању [16,25]. Због тога уклањање NOM представља важан корак у смањењу формирања дезинфекционих нуспроизвода током процеса дезинфекције воде.

На тај начин, DAF системи не само да побољшавају естетски и физичко-хемијски квалитет воде, већ обезбеђују и већу сигурност и стабилност процеса пречишћавања. Њихова примена је посебно оправдана у ситуацијама када површинска вода садржи високе концентрације алги, колоидних материја или других финих честица које се тешко уклањају традиционалним методама, чиме се значајно унапређује стабилност и ефикасност целокупног система за пречишћавање и снабдевање пијаћом водом. Са аспекта воде намењене за људску употребу, микробиолошка исправност обезбеђује се одговарајућим поступком дезинфекције у завршним фазама третмана. Микробиолошки параметри нису били предмет истраживања у оквиру ове дисертације, која је усмерена на физичко-хемијске аспекте третмана и уклањање одабраних параметара квалитета воде.

2.1.2 Примена у индустријским отпадним водама

Други значајан домен примене DAF технологије односи се на третман индустријских отпадних вода. У индустрији хране и пића, као што су млекаре, кланице и пиваре, отпадне воде често садрже високе концентрације масти, уља, протеина и других органских материја, које се у литератури често означавају као масти, уља и масноће (енгл. *fats, oils and grease* – FOG). Ове компоненте се тешко раздвајају класичним методама седиментације и могу значајно оптеретити биолошке системе за третман отпадних вода.

У овом контексту, DAF системи могу функционисати као примарни третман, одвајајући велики део суспендованих честица, масти и уља пре него што вода уђе у биолошке процесе третмана, или као секундарни третман, у којем се додатно уклањају преостале суспендоване материје и емулгована уља. На овај начин се значајно смањује оптерећење биолошких система, повећава њихова стабилност и продужава радни век опреме, чиме се побољшава укупна ефикасност процеса [26].

У петрохемијској и нафтној индустрији, DAF се широко примењује за уклањање уља, нафте и емулзија које се не могу ефикасно раздвојити класичним методама као што су таложење или филтрација. Ефикасност овог процеса заснива се на хидрофобној природи уља и масти, које се лако везују за мехуриће ваздуха и издижу на површину воде. На овај начин се омогућава поуздано и брзо одвајање хидрофобних материја [4], чиме се смањује ризик од загађења животне средине и побољшава ефикасност даљих процеса третмана воде.

У практичним условима, DAF системи се интегришу у линије третмана индустријских отпадних вода као предтретман пре биолошких процеса или као поступак за издвајање уља, масти и суспендованих материја пре наредних фаза пречишћавања. Посебан значај овакве примене огледа се у могућности прихватања ефлуената променљивог састава и оптерећења, карактеристичних за индустријске производне процесе. Уклањањем значајног дела суспендованог и флотацијом издвојивог органског оптерећења у раној фази третмана смањује се оптерећење наредних процесних јединица и доприноси стабилнијем раду целокупног система. Са инжењерског аспекта, могућност прилагођавања радних параметара DAF процеса карактеристикама конкретне отпадне воде представља једну од његових важних предности при примени у реалним индустријским условима [26].

У индустрији папира и целулозе, DAF системи се примењују за уклањање влакана, суспендованих честица и других органских материја из процесних вода. Овај процес не само да побољшава квалитет отпадне воде пре испуштања у околину, већ омогућава и рециклирање процесне воде, чиме се значајно смањује потрошња свежих водних ресурса и унапређује економичност производног процеса [27].

Ови примери показују високу флексибилност DAF система и њихову способност прилагођавања различитим индустријским условима. Без обзира на тип индустрије или природу загађујућих материја, DAF технологија пружа ефикасан и поуздан начин за уклањање суспендованих честица, уља и органских материја, доприносећи бољој заштити животне средине и оптимизацији индустријских процеса.

2.1.3 Примена у третману подземних вода

За разлику од површинских и индустријских вода, у случају подземних вода не постоји значајна традиција примене DAF система. Главни разлог лежи у чињеници да подземне воде обично садрже релативно мале концентрације суспендованих материја и алги, које представљају главне циљне компоненте у третману површинских вода и индустријских отпадних вода. Због тога флотација као примарни метод третмана није уобичајена у системима за пречишћавање подземних вода.

Подземне воде, међутим, често садрже растворене неорганске и органске компоненте, као што су боја, растворене органске материје, гвожђе, манган и микроелементи попут арсена, чије присуство може представљати значајан ризик по здравље људи. У таквим случајевима примењују се различите технологије третмана, укључујући адсорпцију на активним материјалима, јонску измену и мембранске процесе, који се показују ефикасним у уклањању специфичних растворених загађујућих супстанци [28]. Међутим, новија истраживања указују да DAF технологија, у комбинацији са процесима коагулације и флокулације, може представљати ефикасну алтернативу у третману подземних вода [28]. У овом приступу растворене компоненте се најпре преводе у суспендовани облик путем формирања метал-хидроксидних флокула, након чега се ови агрегати могу ефикасно издвојити процесом флотације. На тај начин DAF систем не делује директно на растворене супстанце, већ омогућава њихово уклањање путем индиректног механизма адсорпције и флотационе сепарације.

Kordmostafarour и сарадници [3] показали су у пилот DAF испитивању да примена полиалуминијум-хлорида (PAC), при оптимизованим условима коагулације и флотације, може омогућити приближно 99% уклањања арсена. Механизам процеса обухвата везивање арсена за формиране коагулантне флокуле, након чега микромехурићи ваздуха у DAF систему подижу агрегате ка површини воде и омогућавају њихово издвајање. Овај механизам представља комбинацију хемијске и физичке сепарације. Поред уклањања арсена, примена DAF-а као физичко-хемијског сепарационог процеса у третману подземних вода може допринети и уклањању боје, NOM и финих колоидних честица које прате ове загађујуће компоненте [1,2]. На тај начин флотација може представљати важан предтретман у системима за пречишћавање воде, јер смањује оптерећење каснијих процеса као што су адсорпција, филтрација или мембранска сепарација.

Иако потенцијал примене DAF технологије у третману подземних вода постаје све више препознат у научној литератури, број систематских истраживања у овој области је и даље релативно ограничен. Већина досадашњих радова фокусирана је на површинске воде и индустријске отпадне воде, док је примена DAF система на подземним водама са специфичним геохемијским карактеристикама знатно мање истражена. Због тога

примена DAF технологије у третману подземних вода представља значајан истраживачки изазов, али и потенцијалну могућност за развој нових приступа у пречишћавању воде. Посебно је важно испитати утицај оперативних и термодинамичких параметара на ефикасност овог процеса у условима карактеристичним за подземне воде (специфична геолошка формација Панонског басена, а самим тим и квалитет подземне воде која обилује арсеном), што представља један од основних циљева ове дисертације. У том контексту, примена DAF технологије у третману подземних вода представља недовољно истражен истраживачки правац, посебно у случајевима вода са специфичним геохемијским карактеристикама и присуством елемената као што је арсен, што указује на потребу за даљим систематским истраживањима и оптимизацијом процеса.

2.1.4 Значај овог истраживања

Управо због ограничене примене DAF технологије у третману подземних вода, резултати овог истраживања имају посебан научни и практични значај. У оквиру ове дисертације експериментално је показано да DAF систем, уз адекватно прилагођене оперативне услове и пажљиву контролу термодинамичких параметара процеса, као што су притисак у систему засићивања, температура воде и степен растворљивости ваздуха, као и оптимално дозирање коагуланата и флокуланата и контрола величине мехурића, може постићи висок степен уклањања арсена, растворених органских материја и боје из подземних вода.

Ови резултати указују да DAF технологија може представљати ефикасан приступ у третману подземних вода, посебно у случајевима када је присутна комбинација органских и неорганских загађујућих компоненти. Применом процеса коагулације и флокулације растворене супстанце се могу превести у суспендовани облик, након чега се формирани агрегати могу ефикасно издвојити процесом флотације [4,27].

Научни значај овог рада огледа се у проширењу досадашњих сазнања о могућностима примене DAF технологије изван традиционалних домена третмана површинских и индустријских вода. Посебан допринос представља анализа утицаја термодинамичких и оперативних параметара на ефикасност процеса флотације, што омогућава боље разумевање механизма формирања и стабилности микромехурића, као и њихове интеракције са честицама у води [19,29].

Са практичног аспекта, добијени резултати пружају основу за унапређење постојећих система за третман подземних вода у Србији, посебно у регионима где се јављају повишене концентрације арсена и органских материја, што представља значајан проблем квалитета воде у појединим деловима Панонског басена и Војводине [28]. Применом оптимизованих оперативних параметара могуће је побољшати ефикасност уклањања загађујућих материја, смањити употребу хемијских реагенаса и повећати стабилност рада постројења за пречишћавање воде.

На тај начин резултати истраживања спроведених у оквиру ове дисертације, доприносе развоју нових приступа у примени DAF технологије у третману подземних вода, комбинујући фундаментална научна сазнања са практичним инжењерским решењима која могу бити примењена у реалним системима водоснабдевања у регионима са сличним геохемијским карактеристикама подземних вода. С обзиром на наведене резултате досадашњих истраживања, може се закључити да флотација раствореним ваздухом представља перспективну технологију за уклањање суспендованих и колоидних материја из воде, док је њена примена у третману подземних вода, посебно у условима присуства арсена и органских материја, и даље недовољно истражена. Управо

због тога је у оквиру ове дисертације спроведено систематско експериментално испитивање утицаја термодинамичких и оперативних параметара, пре свега притиска у систему засићивања, температуре воде и растворљивости ваздуха, на формирање и стабилност микромехурића, као и њихове интеракције са честицама у води, у циљу оптимизације ефикасности DAF процеса у третману подземних вода специфичног хемијског састава [19,29].

Посебан научни допринос ове дисертације огледа се у интеграцији термодинамичких принципа и експерименталних испитивања у анализи DAF процеса, што омогућава боље разумевање механизма формирања микромехурића и њихове улоге у уклањању арсена и органских материја из подземних вода.

2.2 Основе DAF технологије

DAF представља напредни физичко-хемијски процес који се користи у третману воде ради уклањања широког спектра нечистоћа, укључујући суспендоване честице, колоиде, растворене органске материје, боју, као и тешке метале и арсенова једињења [2,10,20,30]. За разлику од класичних метода седиментације, које се ослањају на слегање честица под утицајем гравитације, DAF технологија користи принцип подизања – честице се уздижу ка површини воде захваљујући адсорпцији на микро- и наномехуриће ваздуха. Ови мехурићи, формирани под притиском и касније ослобођени у воду, стварају значајну контактну површину са суспендованим честицама, што омогућава њихово поуздано везивање и брзо издвајање.

Физички аспекти процеса обухватају величину, број и стабилност мехурића, њихову способност да задрже честице на површини, као и ефекте хидрауличких услова на циркулацију воде у DAF јединици. Хемијски аспекти укључују интеракцију коагуланата и флокуланата са суспендованим честицама, што повећава адсорптивну способност мехурића и стабилност формираних флокула. Комбинација ових физичко-хемијских механизма омогућава DAF систему да uklони чак и најфиније честице и колоиде које би традиционалне методе седиментације тешко елиминисале, укључујући честице са ниском густином или сложенom површинском структуром.

Процес је изузетно прилагодљив различитим типовима воде и концентрацијама нечистоћа, што омогућава контролу ефикасности уклањања преко прецизног избора коагуланата, флокуланата и оперативних параметара, као што су притисак и проток ваздуха, време контакта и температура воде. Ова флексибилност чини DAF технологију посебно погодном за третман сложених вода, као што су површинске воде са високим садржајем органских материја или индустријске отпадне воде са присуством масти, уља и колоидних супстанци.

Захваљујући овом интегрисаном физичко-хемијском механизму, DAF системи обезбеђују стабилан квалитет пречишћене воде, значајно смањују концентрацију боје, органских материја и токсичних једињења, и представљају поуздану, високо ефикасну и технолошки прилагодљиву методу у савременом третману воде [2,10,20,30].

2.2.1 Историјат и развој DAF технологије

Први DAF системи развијени су средином XX века у Скандинавији, са примарном применом у индустрији папира и целулозе, где је било неопходно уклонити fine суспендоване честице и влакна из процесних вода [6]. Ови рани системи представљали су значајан технолошки напредак у односу на тадашње методе, јер су омогућавали ефикасније и поузданије издвајање честица које класична седиментација није могла

уклонити, чиме се обезбеђивала стабилност производног процеса и квалитет финалних производа. Рана примена DAF технологије омогућила је и бољу контролу процеса уклањања суспендованих материја, што је било критично за индустрије где било какво загађење процесне воде може довести до смањења ефикасности или квалитета производа.

Током 1970-их, DAF технологија је започела широку примену у третману површинских вода у Европи, нарочито у Норвешкој и Данској, где је показала супериорност у односу на класичну седиментацију код вода са високим садржајем органске материје и боје [8]. У овом периоду развијени су и први стандарди за оптимизацију процеса, укључујући прецизно дозирање коагуланата и флокуланата, контролу величине и стабилности мехурића, као и прилагођавање притиска и протока ваздуха, што је омогућило значајно побољшање ефикасности флотације у широком спектру водних система. Тиме је DAF технологија постала поуздана и предвидива метода за третман воде са сложеним саставом, чиме је утврђена њена дугорочна вредност у индустријским и јавним постројењима.

Данас, DAF системи представљају стандардну технологију у бројним постројењима за пречишћавање површинских вода за пиће и отпадних вода широм света. Они се примењују не само за уклањање суспендованих честица и органских материја, већ и за контролу боје, мириса, и присуства специфичних загађујућих супстанци, што омогућава стабилан квалитет воде у складу са строжим регулативама и стандардама. Захваљујући својој флексибилности, DAF системи се успешно прилагођавају различитим индустријским гранама, укључујући прехранбену, хемијску, нафтну и папирну индустрију, чиме доказују своју способност ефикасног функционисања у веома различитим хемијским и физичким условима воде. Ова технологија је тако постала глобално призната као кључна метода за постизање високог нивоа пречишћавања воде, као и за обезбеђивање одрживог и сигурног водоснабдевања у савременим водопривредним и индустријским системима.

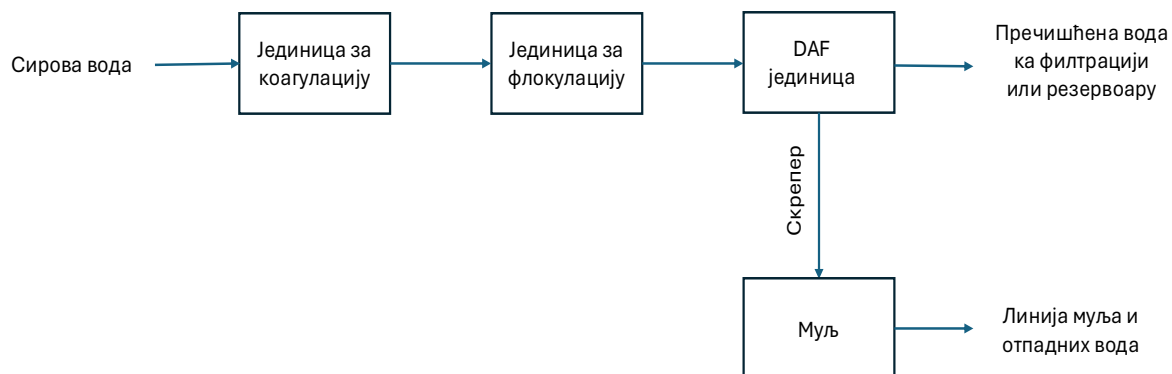
Развој DAF технологије показао је да ефикасност процеса не зависи само од конструкције система и примене коагуланата, већ и од прецизне контроле услова под којима долази до растварања ваздуха, нуклеације и формирања стабилних микромехурића.

2.2.2 Принцип рада

DAF процес се одвија у више добро дефинисаних корака који комбинују физичке и хемијске механизме за уклањање нечистоћа из воде. Најпре се ваздух раствара у води под притиском, обично у опсегу од 4 до 6 bar, чиме се обезбеђује формирање високо стабилних микромехурића [31,32]. Након тога, наглим снижавањем притиска, растворени ваздух се ослобађа у виду микромехурића пречника од 30 до 100 μm , који се равномерно распоређују кроз целу запремину воде. Ови мехурићи се затим везују за суспендоване честице, колоиде и друге нечистоће присутне у води, смањујући њихову ефективну густину и иницирајући процес узгона према површини воде.

На површини коморе формира се густ слој пене или флотационог муља који садржи концентроване нечистоће. Овај слој се механички уклања помоћу стругача, док се пречишћена вода истовремено испушта из доњег дела коморе, чиме се обезбеђује континуирана циркулација и висока ефикасност процеса [33]. Целокупан процес је у великој мери одређен физичким параметрима мехурића – њиховом величином, стабилношћу и концентрацијом – али и хемијским факторима, као што су карактеристике

коагуланата и флокуланата, рН воде и присуство растворених супстанци. Шематски приказ DAF процеса у третману воде дат је на Слици 2.1.



Слика 2.1. Шематски приказ третмана воде са применом DAF процеса

Ефикасност флотације зависи од више међусобно повезаних фактора: концентрације и расподеле мехурића у води, њихове стабилности током контакта са честицама, брзине успона и времена контакта са суспендованим честицама [1,19]. Истраживања показују да се оптимални резултати постижу када су мехурићи довољно мали да обезбеде максималну контактну површину са честицама, али и довољно стабилни да не колабирају пре него што дође до њиховог везивања за честице и формирања стабилних агрегата мехурић–честица [29,34]. Ово значи да величина мехурића, њихова концентрација и интеракција са хемијским адитивима директно утичу на ефективност уклањања и квалитет пречишћене воде.

Детаљно разумевање ових механизма омогућава оптимизацију процеса, тако да се DAF системи могу прилагодити различитим типовима воде и концентрацијама загађујућих материја, обезбеђујући поуздано уклањање суспендованих честица, органских материја и тешких метала, укључујући арсен, у складу са захтевима савремене водопривреде и индустријског третмана воде.

Ефикасност DAF процеса зависи од међусобног дејства термодинамичких услова формирања мехурића, међуфазних интеракција између гасне, течне и чврсте фазе, као и хидродинамичких услова који одређују транспорт и издвајање насталих агрегата.

2.2.3 Предности у односу на седиментацију

У поређењу са класичном седиментацијом, DAF системи пружају значајне предности у третману воде и отпадних вода. Ове предности произилазе из чињенице да се у DAF процесу честице издвајају флотацијом помоћу микромехурића ваздуха, док се код седиментације њихово уклањање заснива искључиво на гравитационом таложењу.

Главне предности DAF система у односу на класичну седиментацију су:

- Уклањање честица ниске густине: Честице које имају густину блиску густини воде или се споро таложе, као што су фине суспензије, колоидне честице, органске материје и микропластика, могу бити ефикасно уклоњене помоћу DAF система. Класична седиментација је у овим случајевима често недовољно ефикасна.

- Висока ефикасност у уклањању органских материја и боје: DAF може значајно смањити концентрацију растворених органских материја, боја и фенола у индустријским и површинским водама. На пример, у преради површинских вода богатих хумусним материјама, DAF системи показују уклањање боје и органских материја изнад 70–90%, док класична седиментација ретко прелази 50–60% [9,21].
- Краће време задржавања воде што омогућава већу процесну ефикасност и стабилнији рад система у условима променљивог оптерећења, и тозбог брзог уклањања честица помоћу флотације, DAF системи захтевају знатно краће време задржавања воде (обично 10–30 минута) у односу на класичне седиментационе базене који захтевају 1–3 сата. Ово омогућава већу продуктивност система и лакше управљање пиковима протока.
- Компактност постројења: DAF постројења захтевају мању површину у односу на класичне базене, што је посебно важно у урбаним или индустријским зонама са ограниченим простором. Захваљујући компактној конструкцији и могућности интеграције са другим процесима (коагулација, флокулација), DAF омогућава ефикасно коришћење простора [9,21].

Поређење DAF и класичног процеса седиментације представљено је у Табели 2.1.

Табела 2.1 Упоредни приказ DAF и класичне седиментације [9,21]

Карактеристика	DAF	Класична седиментација
Принцип рада	Флотација уз помоћ микромехурића ваздуха	Гравитационо таложење честица
Ефикасност уклањања честица ниске густине	Висока	Ниска
Уклањање органских материја и боје	Висока (70–90%)	Средња (40–60%)
Време задржавања воде	Кратко (10–30 мин)	Дуго (1–3 сата)
Просторне потребе	Компактно	Велике површине
Погодност за индустријске воде	Висока (уља, масти, емулзије)	Ограничена

Захваљујући овим предностима, DAF технологија је посебно погодна за:

- Обраду површинских вода са високим садржајем органске материје (реке, језера, водотокови са хумусним материјама);
- Индустријске отпадне воде које садрже уља, масти, емулзије, боје и феноле (нпр. прехранбена, текстилна и пиварска индустрија) [4].

Предности DAF технологије нарочито долазе до изражаја у третману вода које садрже fine суспендоване честице, колоидне материје и органске компоненте које се тешко уклањају класичном седиментацијом. У таквим условима флотација омогућава ефикасније издвајање честица и стабилнију контролу процеса пречишћавања воде.

2.2.4 Ограничења и изазови

Примена DAF система није без одређених технолошких ограничења и изазова. Основна ограничења односе се на:

- повећане трошкове енергије у поређењу са гравитационом седиментацијом, услед рада пумпи и компресора потребних за растварање ваздуха под притиском, као и функционисања система засићивања воде ваздухом. Потрошња енергије представља један од доминантних фактора укупних оперативних трошкова DAF постројења, при чему параметри као што су радни притисак, степен рецикулације воде и конфигурација система засићивања могу значајно утицати на укупну енергетску ефикасност процеса [4];
- потребу за прецизном оптимизацијом дозе коагуланата и флокуланата ради обезбеђивања стабилног рада система, при чему неправилно дозирање може довести до недовољне дестабилизације колоида или формирања флокула неповољних за флотацију. Ефикасност процеса у великој мери зависи и од услова мешања и редоследа додавања реагенаса, због чега се у пракси оптимални услови рада најчешће одређују лабораторијским испитивањима, као што су JAR тестови [35];
- осетљивост на промене у квалитету воде (pH, температура, салинитет и концентрација растворених материја), које директно утичу на растворљивост гасова у води, стабилност микромехурића и механизме коагулације. Чак и мање варијације у саставу воде могу довести до нестабилности флотационог процеса и потребе за додатним оперативним корекцијама [35,36];
- зависност ефикасности процеса од термодинамичких услова рада, пре свега притиска, температуре и степена засићења воде ваздухом. Неадекватна контрола услова засићења и декомпресије може довести до формирања мехурића неповољне величине или до њихове нестабилности, што умањује вероватноћу контакта између мехурића и честица и смањује укупну ефикасност флотације [4,27,29].

Посебно је значајно истаћи да DAF технологија налази најширу примену у случајевима када у води постоји значајан садржај суспендованих материја, колоида и органских нечистоћа, али не и изражена мутноћа која омогућава ефикасну примену класичне седиментације. Управо у таквим условима, где су честице ниске густине и тешко се таложе, флотација раствореним ваздухом показује значајну предност у односу на конвенционалне методе.

До сада није постојала стандардна примена DAF технологије у третману подземних вода, пре свега због њиховог специфичног и релативно стабилног хемијског састава, као и чињенице да оне уобичајено немају висок садржај суспендованих материја. Управо због тога третман подземних вода применом DAF система представља посебан научни и технолошки изазов, који захтева детаљно разумевање физичко-хемијских и термодинамичких механизма процеса, као и пажљиву оптимизацију радних параметара система.

Упркос наведеним ограничењима, уз правилно пројектовање, контролу и оптимизацију процеса, DAF остаје једна од најефикаснијих технологија за третман вода са сложеним физичко-хемијским карактеристикама, обезбеђујући стабилан рад система и висок степен уклањања суспендованих и органских материја.

2.2.5 Поређење DAF технологије са другим технологијама третмана подземних вода

Избор технологије за третман подземних вода зависи од квалитета сирове воде, врсте и концентрације загађујућих материја, захтеваног квалитета пречишћене воде, као и техничко-економских услова примене. Поред флотације раствореним ваздухом (DAF), у пракси се најчешће примењују седиментација, адсорпција, мембрански процеси и јонска измена, при чему свака од наведених технологија има своје предности и ограничења [4,9,21].

Конвенционална седиментација представља један од најчешће примењиваних процеса у припреми воде за пиће, пре свега због једноставности примене и релативно ниских инвестиционих и оперативних трошкова. Међутим, ефикасност седиментације значајно зависи од брзине таложења формираних флокула, због чега је њена примена ограничена код честица мале густине и флокула са слабом способношћу седиментације. За разлику од седиментације, DAF користи микромехуриће ваздуха који се везују за честице и омогућавају њихово издвајање флотацијом, што овај процес чини нарочито погодним за уклањање лакших флокула, природних органских материја, алги и честица мале густине [11,21,29].

Адсорпциони процеси, најчешће применом гранулисаног или прашкастог активног угља, као и адсорбента на бази оксида гвожђа, омогућавају високу ефикасност уклањања арсена и органских материја. Ипак, њихова примена подразумева периодичну регенерацију или замену адсорбента, што повећава оперативне трошкове процеса. Због тога се адсорпција у пракси често примењује као завршна фаза третмана или у комбинацији са претходним процесима уклањања суспендованих материја. У таквим интегрисаним системима, DAF може представљати претходну фазу за уклањање суспендованих и колоидних материја пре наредних поступака третмана [4,20,30].

Мембрански процеси, као што су ултрафилтрација, нанофилтрација и реверзна осмоза, обезбеђују веома висок степен уклањања широког спектра неорганских и органских загађујућих материја. Међутим, њихову примену ограничавају високи инвестициони и оперативни трошкови, значајна потрошња енергије, као и појава мембранског задрљања (енгл. *fouling*), што захтева редовно хемијско чишћење и замену мембранских елемената [4].

У поређењу са наведеним технологијама, DAF представља процес који обезбеђује високу ефикасност уклањања природних органских материја, боје и честица мале густине, уз краће време задржавања у односу на класичну седиментацију. Иако захтева додатну енергију за компресију ваздуха и рад сатуратора, укупни оперативни трошкови могу бити повољнији у случајевима када се захтева ефикасно уклањање лако флотабилних честица и природних органских материја. Из тог разлога, DAF се све чешће примењује као самосталан процес или као предtretман пре филтрације и мембранских процеса, чиме се повећава стабилност рада постројења и продужава век трајања наредних јединица процеса [2,11,29].

У оквиру ове дисертације DAF технологија је изабрана као предмет истраживања због могућности истовременог уклањања арсена, NOM и боје оптимизацијом термодинамичких и процесних параметара, као и због потенцијала примене у третману подземних вода специфичног хемијског састава.

Табела 2.2 Упоредни приказ DAF технологије и других технологија за третман подземних вода [2,4,9,16]

Технологија	Ефикасност уклањања As	Ефикасност уклањања ТОС	CAPEX	OPEX	Енергетски захтеви	Основне предности	Ограничења
DAF	Висока	Висока	Средњи	Средњи	Средњи	Брзо издвајање флокула, висока ефикасност за органске материје и честице мале густине	Потребан сатуратор и компримован ваздух
Таложeње	Средња	Средња	Низак	Низак	Ниски	Једноставан и економичан процес	Слабија ефикасност за лаке флокуле
Адсорпција	Веом а висока	Средња–висока	Средњи	Високи	Ниски	Висока ефикасност уклањања арсена	Потребна регенерација или замена адсорбента
Мембранск и процеси	Веом а висока	Веом а висока	Високи	Високи	Високи	Највећи степен пречишћавања	Високи трошкови и мембранско задрљање

Напомена: Приказане категорије ефикасности уклањања, капиталних и оперативних трошкова и енергетских захтева представљају квалитативну упоредну оцену засновану на литературним подацима и општим процесним карактеристикама разматраних технологија. Стварне вредности зависе од квалитета сирове воде, капацитета постројења, примењених процесних услова и захтеваног степена пречишћавања.

Као што је приказано у Табели 2.2, не постоји универзално најбоља технологија за третман подземних вода, већ избор процеса зависи од квалитета сирове воде, врсте загађујућих материја, захтеваног квалитета пречишћене воде и економских услова примене. Док мембрански процеси обезбеђују највећи степен уклањања широког спектра загађујућих материја, њихова примена је повезана са високим инвестиционим и оперативним трошковима, као и повећаном потрошњом енергије. Са друге стране, седиментација представља једноставан и економичан процес, али њена ефикасност може бити ограничена код честица мале густине и слабо таложивих флокула.

Флотација раствореним ваздухом (DAF) представља добар компромис између ефикасности процеса, енергетских захтева и оперативних трошкова, посебно када се примењује у комбинацији са коагулацијом и флокулацијом. Управо због могућности оптимизације процесних параметара и ефикасног уклањања арсена, NOM и боје, DAF технологија је одабрана као предмет истраживања у оквиру ове дисертације.

2.3 Утицај хемијских и оперативних фактора на DAF процес

Ефикасност DAF процеса у великој мери зависи од правилног избора и дозирања хемијских реагенса, као и од контроле кључних оперативних параметара система. Ови фактори директно утичу на формирање флокула, величину и густину честица, брзину њиховог подизања или седиментације, као и на квалитет пречишћене воде.

Најзначајнији хемијски фактори укључују:

- Тип коагуланта: Тип и својства примењеног коагуланта (нпр. алуминијум-сулфат, гвожђе(III)-хлорид) одређују механизам коагулације и карактеристике формираних флокула, што директно утиче на њихову способност везивања за микромехуриће и ефикасност флотације у DAF систему. .
- Дозирање коагуланта: Доза коагуланта значајно утиче на ефикасност процеса, при чему недовољна количина доводи до непотпуне дестабилизације колоидних честица, док прекомерна доза може изазвати њихову рестабилизацију и нарушавање процеса флокулације.
- Тип и доза флокуланта: Карактеристике и доза примењеног флокуланта одређују морфологију и механичку стабилност флокула. Полимерни флокуланти омогућавају формирање већих и чвршћих агрегата, чиме се унапређује интеракција са микромехурићима и ефикасност процеса флотације.
- рН воде: рН утиче на растворљивост коагуланта, јонску структуру честица и стабилност флокула, што директно одређује ефикасност процеса [7,37].

Поред хемијских фактора, значајну улогу играју и оперативни параметри DAF система:

- Величина и расподела микромехурића ваздуха, која директно утиче на контакт са честицама;
- Време задржавања воде у резервоару значајно утиче на ефикасност процеса, при чему мора бити довољно за потпуно издизање флокула, али истовремено оптимизовано у циљу постизања економичности рада система.
- Контрола повратног муља, која помаже у стабилизацији флокула и побољшању уклањања честица ниске густине.

Главни хемијски и оперативни фактори који утичу на ефикасност DAF процеса детаљно су приказани у Табели 2.3 [7,37]. Ови фактори укључују тип и дозирање коагуланта и флокуланта, рН воде, физичке особине воде као што су вискозност и салинитет, као и параметре као што су величина микромехурића и време задржавања воде.

Табела 2.3 Хемијски и оперативни фактори и њихов утицај на ефикасност DAF процеса [7,37]

Фактор	Опис	Утицај на ефикасност DAF процеса
Тип коагуланта	Алуминијум сулфат, гвожђе (III)-хлорид, други коагуланти	Правила избор обезбеђује стабилне флокуле, побољшава уклањање суспендованих материја [19]
Дозирање коагуланта	Концентрација коагуланта у води	Недовољна доза доводи до непотпуне дестабилизације колоидних честица, док прекомерна доза може изазвати њихову рестабилизацију и нарушавање процеса флокулације [37]
Тип и доза флокуланта	Полимери различите молекуларне тежине	Одређују морфологију и механичку стабилност флокула, што директно утиче на интеракцију са микромехурићима и ефикасност флотације [19,20]
pH воде	Оптималан опсег зависи од коагуланта	Утиче на растворљивост коагуланта и стабилност флокула, директно утиче на ефикасност процеса [20]
Салинитет воде	Присуство растворених соли	Може смањити ефикасност флотације, захтева прилагођавање дозирања реагенса [19,20]
Вискозност воде	Температура, суспендоване материје	Повећана вискозност смањује брзину издизања флокула и негативно утиче на ефикасност процеса флотације [19]
Величина и расподела микромехурића	Квалитет раствореног ваздуха	Мања величина и уједначена расподела мехурића повећавају вероватноћу контакта са честицама и унапређују ефикасност процеса флотације [19,20]
Време задржавања воде	Време задржавања кроз DAF резервоар	Време задржавања директно утиче на ефикасност процеса; недовољно време доводи до непотпуног издизања флокула, док прекомерно време смањује економичност рада система [19]
Контрола повратног муља	Рецикулација делимично флокулисаног муља	Утиче на стабилност флокула и повећава ефикасност уклањања супстанци ниске густине [19,20]

Физичке особине воде, као што су салинитет, вискозност и температура, такође утичу на динамику флокулације и ефикасност флотације. Висока вискозност или присуство растворених соли може успорити издизање флокула, и смањити ефикасност процеса, што захтева прилагођавање оперативних параметара, пре свега дозирање реагенса и протока ваздуха [7,37].

Преглед фактора дат у Табели 2.2. омогућава систематизацију њиховог утицаја на рад DAF система и представља основу за оптимизацију процеса у зависности од карактеристика третиране воде, посебно код површинских и индустријских вода сложеног састава.

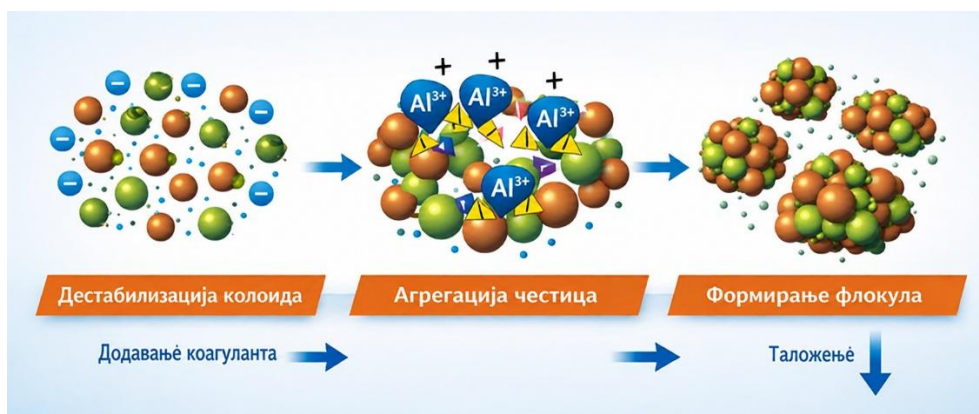
2.3.1 Коагулација и избор коагуланата

Коагуланти представљају кључни хемијски фактор у процесу флотације раствореним ваздухом, јер обезбеђују иницијалну дестабилизацију колоидних честица и омогућавају њихово агрегирање у веће и лакше уклоњиве флокуле. Без адекватне коагулације,

мехурићи ваздуха немају довољно површине за адсорпцију, што значајно умањује ефикасност процеса [7,37].

У контексту DAF технологије, циљ коагулације није искључиво формирање компактних флокула погодних за таложење, већ формирање агрегата који имају повољна површинска својства за интеракцију са микромехурићима ваздуха.

Основне фазе процеса коагулације, које обухватају дестабилизацију колоида, агрегацију честица и формирање флокула, приказане су на Слици 2.2.

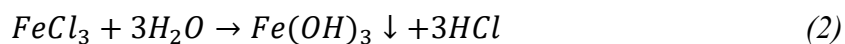
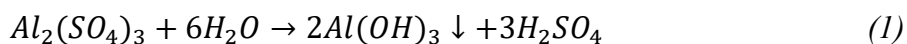


Слика 2.2. Шематски приказ процеса коагулације и формирања флокула

Најчешће коришћени коагуланти у DAF системима су соли алуминијума и гвожђа. Алуминијум-сулфат ($Al_2(SO_4)_3$), познат као алумијум-алунин, један је од најстаријих и најшире примењиваних коагуланата у третману воде. Дејство алуминијумских коагуланата заснива се на хидролизи Al^{3+} јона и формирању хидроксидних врста које имају високу способност везивања за негативно наелектрисане колоидне честице. Са друге стране, гвожђе(III)-хлорид ($FeCl_3$) показује виши афинитет према органским материјама, посебно оним које садрже фенолне и карбоксилне групе, што га чини погодним за уклањање боје и арсена [38].

Хидролиза алуминијумских и гвоздених коагуланата у води доводи до формирања нерастворних метал-хидроксида који представљају активну флокулациону фазу у процесу коагулације. Ови хидроксиди имају велику специфичну површину и способност адсорпције растворених и колоидних материја, што омогућава њихово уклањање из воде путем агрегације и издвајања у виду флокула

Процес хидролизе алуминијумских и гвоздених соли може се поједностављено приказати следећим реакцијама [28]:



Поред наведених реакција, у воденом раствору се формирају различите полимерне и комплексне хидроксидне врсте алуминијума и гвожђа, које имају значајну улогу у процесу дестабилизације колоидних честица и формирања флокула. Ове врсте могу имати различит степен наелектрисања и структуру, што директно утиче на ефикасност коагулације и способност уклањања органских и неорганских загађујућих материја из воде [35].

Ефикасност процеса коагулације у великој мери зависи од услова средине, пре свега рН вредности воде, температуре и алкалитета, јер ови параметри утичу на стабилност формираних хидроксидних врста и њихову способност агрегације и таложења. У оптималним условима долази до формирања компактних и стабилних флокула који омогућавају ефикасно уклањање суспендованих и колоидних честица у наредним фазама третмана воде, као што су флокулација, флотација или седиментација [35].

У новије време, значајну примену налазе и полиалуминијум-хлориди (енгл. Polyaluminum Chloride – РАС), који представљају претходно полимеризоване алуминијумске соли. Њихова предност је у већој стабилности и могућности формирања компактних флокула чак и у условима променљивог рН и температуре. Истраживања су показала да РАС често захтева ниже дозе у односу на традиционалне коагуланте и да даје бољу ефикасност у комбинацији са DAF процесом. Због полимеризоване структуре, РАС формира стабилније развијеније и волуминозније флокуле са већом специфичном површином, што повећава вероватноћу контакта са микромехурићима и унапређује ефикасност флотације у DAF систему [39].

У случају полиалуминијум-хлорида (РАС), у раствору су већ присутне полимерне хидроксидне врсте алуминијума, које се могу представити општим изразом:

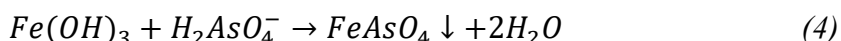


Ове полимерне врсте имају већу способност неутрализације наелектрисања и формирања компактних флокула у поређењу са једноставним алуминијумским јонима, што објашњава већу ефикасност РАС коагуланата у условима променљивог рН и температуре [39].

Дозирање коагуланата је изузетно критичан параметар. Недовољна количина коагуланта резултира непотпуном дестабилизацијом колоида, док прекомерне дозе могу довести до реверзне стабилизације и повећане мутноће. Поред тога, вишак металних јона у третираној води може представљати додатни проблем, посебно у случајевима када се захтевају ниске резидуалне концентрације алуминијума или гвожђа [40].

Још један аспект примене коагуланата односи се на специфичне загађујуће материје или супстанце. У случају арсена, који је у облику арсената (As(V)) анјонски наелектрисан, показано је да Fe^{3+} коагуланти имају већу ефикасност уклањања и механизам адсорпције у поређењу са алуминијумским солима, јер формирају стабилније комплексне везе са арсенатним јонима [15]. Овај механизам се заснива на адсорпцији арсената на свеже формираним $Fe(OH)_3$ површинама, што омогућава њихово ефикасно уклањање у комбинацији са флотацијом. Због тога је у пракси честа комбинација ферихлорида са помоћним флокулантима, како би се постигла висока ефикасност уклањања и при нижим концентрацијама реагенса.

Адсорпција арсенатних јона на свеже формираним површинама гвожђе(III)-хидроксида може се поједностављено описати реакцијом површинског везивања, при чему долази до формирања стабилних комплексних веза између арсенатних јона и хидроксидних група на површини талога [15]:



Овај механизам адсорпције представља један од кључних процеса у уклањању арсена из воде применом коагуланата на бази гвожђа, јер омогућава трансформацију растворених арсенатних јона у нерастворне комплексе који се могу ефикасно издвојити процесом флотације или седиментације [27].

У воденом раствору арсен се може јавити у више протонованих облика, у зависности од рН вредности воде, што директно утиче на механизам његове адсорпције на површини гвожђе-хидроксида. Основне равнотеже дисоцијације арсенатних јона могу се приказати следећим реакцијама [15]:



Ове равнотеже одређују доминантни облик арсена у раствору и имају значајан утицај на ефикасност процеса коагулације и флотације, јер различити јонски облици показују различиту способност адсорпције на површини метал-хидроксида [15].

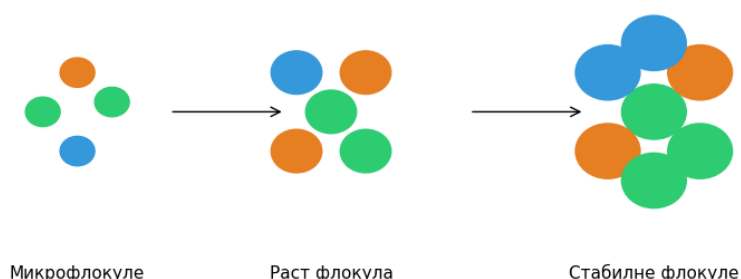
У рН опсегу карактеристичном за испитивану подземну воду, приближно од 7,7 до 8,0, As(V) је претежно присутан у анијонским облицима $H_2AsO_4^-$ и $HAsO_4^{2-}$, при чему са порастом рН расте удео $HAsO_4^{2-}$. Оваква специјација арсена погодује његовом уклањању коагулацијом са Fe(III), услед адсорпције арсенатних врста на свеже формираним површинама гвожђе(III)-хидроксида [15]. Стога рН представља један од кључних параметара квалитета воде који одређује облик арсена и његову интеракцију са формираним флокулама. Са друге стране, температура воде има значајну улогу у DAF процесу јер утиче на растворљивост ваздуха у води, као и на услове формирања и понашања микромехурића [10–12]. Заједничко разматрање ова два параметра омогућава непосредно повезивање хемијских карактеристика реалне подземне воде са механизмима коагулације и флотације: рН одређује специјацију и адсорпционо понашање арсена, док температура утиче на физичке услове генерисања микромехурића и тиме на ефикасност њиховог контакта са формираним флокулама.

Историјски гледано, избор између алуминијумских и коагуланата на бази гвожђа заснива се на карактеристикама третиране воде. Алуминијумски коагуланти су се традиционално примењивали код површинских вода са повишеном мутноће, док су гвоздени коагулатни показали већу погодност у третамну вода са повишеним садржајем органских материја и интензивном бојом [25]. Савремена пракса, међутим, све чешће подразумева комбинацију ових реагенаса, као и примену оптимизационих техника као што су JAR тестови.

JAR тестови представљају лабораторијску методу којом се у контролисаним условима испитује ефекат различитих врста и доза коагуланата (и евентуално флокуланата) на узорку воде. Поступак подразумева серију паралелних мешања воде са различитим дозама реагенаса, након чега следи седиментација или флотација, а затим мерење параметара као што су мутноћа, боја или концентрација специфичних загађујућих материја. На овај начин се добијају оптимални услови за рад на пилот или индустријском систему. При избору оптималне дозе коагуланта посебна пажња се посвећује балансу између ефикасности уклањања загађујућих материја и минимизације резидуалне концентрације метала у третираној води. Оптимална доза дефинише се као количина реагенаса која обезбеђује највеће смањење мутноће, боје или концентрације циљних загађујућих супстанци, уз стабилно формирање флокула погодних за флотацију или седиментацију [4,35]. Поред количине коагуланта, важан критеријум представља и брзина формирања и стабилност флокула, јер сувише мали или нестабилни флокули могу довести до смањене ефикасности раздвајања у наредним фазама третмана воде. Због тога се приликом анализе резултата JAR тестова често прате и додатни параметри, као што су време таложења или флотације, изглед формираних флокула и вредност рН након додавања реагенаса [4].

2.3.2 Флокулација и избор флокуланата

Флокуланти представљају групу хемијских реагенса чија је основна улога да поспеше агрегацију дестабилизованих колоидних честица након коагулације, формирајући крупније и стабилније флокуле. Коагуланти делују првенствено путем електростатичке дестабилизације колоидних честица, док флокуланти омогућавају њихово агрегирање механизмом мостовног повезивања, што доводи до формирања већих и стабилнијих флокула погодних за интеракцију са мехурићима у DAF систему [40]. Овај механизам, познат као полимерно мостовно повезивање, омогућава формирање просторно развијених агрегата који имају већу вероватноћу контакта са микромехурићима у DAF систему. Процес раста и стабилизације флокула током флокулације може се шематски приказати кроз постепено агрегирање микрофлокула у крупније и стабилније структуре, као што је приказано на Слици 2.3.



Слика 2.3. Шематски приказ процеса формирања и раста флокула у процесу флокулације

Флокуланти се углавном деле на природне и синтетичке. Природни флокуланти, као што су скроб, хитозан и гума-арабикум, користе се у специфичним случајевима где је захтевана биодеградабилност и одсуство токсичности, али углавном имају мању ефикасност и слабију контролу молекулске масе. Са друге стране, синтетички флокуланти, најчешће на бази полиакриламида (ПАА) и његових деривата, омогућавају прецизно подешавање молекулске масе и наелектрисања (анјонски, катјонски, неутрални), што омогућава њихову примену у различитим типовима вода са различитим физичко-хемијским карактеристикама [27].

Ефикасност флокуланата зависи од више фактора:

- молекулске масе и наелектрисања – високополимерни флокуланти са одговарајућим наелектрисањем показују боље мостовно повезивање;
- концентрација и доза реагенса – прекомерно дозирање може довести до дестабилизације флокула и смањења ефикасности флотације
- услова мешања – потребно је применити интензивно мешање у првој фази ради дисперзије реагенса, а затим благо мешање ради формирања флокула;
- састава воде – присуство органских материја, јона тешких метала или повећан садинитет могу значајно утицати на њихову ефикасност [24].

У контексту DAF технологије, флокуланти имају посебан значај јер омогућавају формирање флокула ниске густине, које се не таложе већ лако везују за мехуриће и подижу на површину. Такве флокуле имају већу специфичну површину и већу вероватноћу контакта са микромехурићима, што значајно повећава ефикасност процеса флотације. Ово представља значајну предност у односу на класичне седиментационе

процесе, где су пожељне компактне и тешке флокуле. На тај начин, правилан избор флокуланта директно утиче на ефикасност флотације [4].

Додатно, примена флокуланата је показала позитивне ефекте у случају уклањања арсена и органских материја. Катјонски флокуланти могу да повећају ефикасност адсорпције арсената (As(V)) на Fe(OH)_3 честицама формираним коагулацијом, док анјонски флокуланти побољшавају стабилност и величину агрегата, омогућавајући њихово ефикасније уклањање у комбинацији са мехурићима у DAF систему [27].

Због великог броја параметара који утичу на деловање флокуланата, њихов избор и дозирање се, као и у случају коагуланата, најчешће оптимизује експериментално путем JAR тестова, који омогућавају симулацију реалних процесних услова и идентификацију најповољнијих комбинација реагенаса за конкретан извор воде [4].

2.3.3 Утицај рН, салинитета и вискозности воде на ефикасност DAF процеса

рН вредност представља један од најкритичнијих параметара у процесу флотације раствореним ваздухом, јер директно утиче на механизме коагулације и стабилност формираних флокула. Показано је да оптималан рН интервал зависи од врсте примењеног коагуланта: алуминијумски коагуланти показују најбоље резултате у неутралној до благо киселој средини (рН 6,0–7,0), док су коагуланти на бази гвожђа ефикаснији у ширем опсегу рН вредности (рН 5,5–8,0) [24]. При сувише ниским вредностима рН (испод 5), долази до формирања растворљивих комплексних јона који не доприносе формирању флокула, док алкалне вредности (рН > 8) доводе до пада ефикасности због стварања стабилних негативно наелектрисаних хидроксидних врста. Ове промене у хемијском облику коагуланта директно утичу на формирање флокула и њихову способност интеракције са микромехурићима у DAF систему.

Салинитет воде такође има значајан утицај, посебно у случају третмана индустријских отпадних вода и сланих подземних извора. Присуство растворених јона (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) утиче на дебљину електростатичког двослоја око колоидних честица, чиме се мења њихова стабилност. Виши садржај електролита генерално поспешује агрегацију честица и повећава ефикасност коагулације, али може смањити стабилност мехурића, то може негативно утицати на стабилност мехурића и ефикасност процеса флотације [12,41]. Ово је посебно значајно у DAF системима јер величина и дуготрајност мехурића директно утичу на њихову способност везивања за честице.

Вискозност воде зависи пре свега од температуре, али и од присуства растворених и колоидних материја. Са порастом вискозности (на нижим температурама или при већој концентрацији органских материја), смањује се брзина кретања мехурића ка површини и умањује се учесталост њихових судара са честицама. Ово доводи до смањене ефикасности флотације, јер мехурићи не успевају да се у довољној мери адсорбују на површину загађивача. Са друге стране, при нижој вискозности (више температуре), повећава се брзина кретања мехурића, али може доћи и до њиховог бржег спајања и распадања, што такође смањује ефикасност процеса. Ови ефекти показују да температура воде, преко промене вискозности и растворљивости гасова, има значајан утицај на динамику мехурића и стабилност флотационог процеса [10,12].

Из наведеног се може закључити да оптимизација рН, салинитета и вискозности представља важан корак у обезбеђивању стабилног рада DAF система, јер ови параметри истовремено утичу на механизме коагулације, формирање флокула и динамику микромехурића. Управо због тога се у пракси примењује мултиваријантна анализа у којој

се ови параметри посматрају у интеракцији са дозом коагуланта и флокуланта, како би се добили услови који обезбеђују највиши степен уклањања специфичних загађивача [7].

2.4 Термодинамички фактори

Термодинамички фактори представљају кључни сегмент у анализи и оптимизацији DAF система, јер од њих директно зависи количина раствореног гаса у води, механизам стварања мехурића и њихова стабилност у систему. Основу процеса чини појава презасићења воде ваздухом у систему засићивања, након чега долази до наглог ослобађања гаса у облику микромехурића током декомпресије. У условима повишеног притиска у сатуратору долази до повећаног растварања ваздуха у води, што доводи до стања термодинамичке равнотеже између гасне и течне фазе. Након наглог снижавања притиска, равнотежа се нарушава и систем прелази у стање презасићења, што иницира нуклеацију и раст микромехурића у течности [19,29]. Најважнији параметри су притисак, температура и растворљивост ваздуха, а њихово међусобно дејство одређује коначну ефикасност флотације. Ефикасност овог процеса додатно зависи од интензитета масеног преноса између гасне и течне фазе, као и од динамике формирања и раста мехурића, што директно утиче на вероватноћу контакта између мехурића и честица у систему.

2.4.1 Притисак и растворљивост ваздуха

Принцип на којем функционише флотација раствором ваздухом у основи је заснован на Хенријевом закону, према коме је растворљивост гаса у течности пропорционална његовом парцијалном притиску изнад течности [19].

$$C = k_h \cdot p \quad (7)$$

где је:

C — равнотежна концентрација раствореног гаса у течности,

k_h — Хенријева константа,

p — парцијални притисак гаса.

Повећањем притиска у систему засићивања повећава се растворљивост ваздуха у води, што омогућава акумулацију веће количине раствореног гаса у систему. Након наглог снижења притиска при уласку у флотациону комору долази до стања презасићења, при чему растворени ваздух прелази у гасну фазу и формира микромехуриће који учествују у процесу флотације.

Степен презасићења може се дефинисати односом стварне концентрације раствореног гаса и равнотежне растворљивости при атмосферском притиску:

$$S = C/C^* \quad (8)$$

где је:

S — степен презасићења,

C — стварна концентрација раствореног ваздуха,

C^* — равнотежна концентрација при атмосферском притиску.

Када је $S > 1$, систем постаје термодинамички нестабилан и долази до нуклеације и формирања микромехурића. Већи степен презасићења доводи до формирања већег броја ситнијих мехурића, чиме се повећава укупна међуфазна површина и вероватноћа контакта мехурића са честицама у води.

Типичне вредности радног притиска у DAF системима крећу се у опсегу 0,3–0,6 МПа, док нека индустријска постројења примењују и више вредности ради повећања ефикасности, али уз значајно веће енергетске трошкове [11].

Количина раствореног ваздуха у води може се описати Хенријевом константом, која представља однос између парцијалног притиска гаса и његове равнотежне концентрације у течности. Са повећањем притиска у сатуратору расте концентрација раствореног ваздуха, што доводи до већег степена презасићења након наглог пада притиска у флотационом резервоару. Степен презасићења представља један од кључних параметара који одређује број и величину формираних мехурића, јер управо он контролише интензитет нуклеације и раста гасне фазе у течности [19,29]. У условима већег степена презасићења долази до формирања већег броја ситних мехурића, који имају већу специфичну површину и већу вероватноћу контакта са колоидним честицама, што директно утиче на ефикасност флотационог процеса. Промена Хенријеве константе са температуром може се описати Van't Hoff-овом једначином, која повезује енталпију растварања гаса са температурском зависношћу растворљивости:

$$k_h(T) = k_h(T_0) \exp(-\Delta H / R \cdot (1/T - 1/T_0)) \quad (9)$$

где је:

$k_h(T)$ — Хенријева константа на температури T

$k_h(T_0)$ — Хенријева константа на референтној температури T_0

ΔH — енталпија растварања гаса (J/mol)

R — универзална гасна константа (8,314 J/mol·K)

T — апсолутна температура (K)

T_0 — референтна температура (K)

Виши притисак омогућава већу количину раствореног ваздуха, али истовремено захтева снажније пумпе и компресоре, што може чинити систем економски мање одрживим. Из тог разлога, у савременој пракси тежи се ка оптимизацији односа енергије и постигнутог ефекта, чиме се уводи концепт енергетске ефикасности DAF система [42].

Поред количине раствореног ваздуха, притисак у систему засићивања утиче и на величину формираних мехурића. Виши притисак доводи до већег степена презасићења након декомпресије, што резултира формирањем већег броја мањих мехурића. Микромехурићи мањег пречника имају већу специфичну површину и дужи период задржавања у води, што повећава вероватноћу њихове интеракције са честицама и доприноси већој ефикасности флотације [29]. Међутим, сувише високи притисци могу довести до повећане коалесценције мехурића и повећаних енергетских трошкова система, што указује на потребу пажљиве оптимизације радних параметара.

Поред утицаја на растворљивост ваздуха, радни притисак у сатуратору има значајан утицај и на енергетску ефикасност DAF процеса. Повећањем притиска повећава се количина ваздуха која се може растворити у води, чиме се обезбеђује формирање већег броја микромехурића и потенцијално већа ефикасност флотације. Међутим, повећање притиска истовремено захтева већу потрошњу енергије за рад компресора и пумпи, што директно утиче на оперативне трошкове постројења. Због тога се у пракси тежи одређивању оптималног, а не максималног радног притиска, којим се обезбеђује висока ефикасност уклањања загађујућих материја уз рационалну потрошњу енергије [9,21,31].

Поред притиска, на укупну енергетску ефикасност DAF система утичу и степен рецикулације, време сатурације и количина раствореног ваздуха. Оптимизација ових

параметара омогућава постизање стабилног формирања микромехурића, ефикаснију интеракцију са формираним флоковима и смањење специфичне потрошње енергије. Из тог разлога, савремени DAF системи пројектују се тако да се избор процесних параметара заснива на компромису између ефикасности флотације, поузданости рада и економичности процеса [9,29].

2.4.2 Температура воде и утицај на мехуриће

Температура воде значајно утиче на формирање и понашање мехурића у DAF систему. Са повећањем температуре смањује се растворљивост гасова у води, што доводи до мањег броја мехурића приликом декомпресије.

Коефицијент дифузије гаса у течности расте са температуром, што се може описати Аренијусовом зависношћу [27]:

$$D = D_0 \cdot \exp(-E_a / (R \cdot T)) \quad (10)$$

где је:

D — коефицијент дифузије гаса у течности

D_0 — предекспоненцијални фактор

E_a — енергија активације дифузије

R — универзална гасна константа

T — температура (K)

Истовремено, смањена вискозност воде омогућава брже кретање мехурића и учесталије сударе са честицама. Насупрот томе, на нижим температурама повећана растворљивост ваздуха доводи до већег броја мехурића, али повећана вискозност воде ограничава њихову покретљивост и смањује ефикасност колизије са честицама [10].

Поред утицаја на растворљивост гасова и вискозност воде, температура утиче и на брзину дифузије гаса у течности, као и на кинетику формирања и раста мехурића. Са повећањем температуре повећава се коефицијент дифузије гасова у води, што може убрзати ослобађање гаса током декомпресије и утицати на динамику формирања мехурића. Истовремено, температура утиче и на хидродинамичке услове у систему, јер промене вискозности воде мењају брзину кретања мехурића и учесталост њихових судара са честицама, што представља један од кључних фактора ефикасности флотационог процеса [10,27].

Зависност вискозности воде од температуре може се описати експоненцијалном једначином [27]:

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp(B / T) \quad (11)$$

где је:

μ — динамичка вискозност воде

μ_0 — референтна вредност вискозности воде

B — емпиријска константа која зависи од својстава течности

T — апсолутна температура (K)

Ови супротстављени ефекти значе да ефикасност DAF система није линеарна функција температуре, већ да постоји оптималан интервал (обично 15–25 °C) у којем се постиже највећа стабилност мехурића и најбоље уклањање загађујућих материја [27].

2.4.3 Величина и стабилност мехурића

Квалитет формираних мехурића представља централни аспект DAF технологије. Оптималном величином сматрају се микромехурићи пречника 30–100 μm , који имају високу специфичну површину и довољно дуго задржавање у суспензији да остваре контакт са колоидним честицама [4]. Висока специфична површина микромехурића повећава вероватноћу адхезије између мехурића и честица, што представља основни механизам флотационе сепарације. Управо због тога се у DAF системима тежи формирању великог броја ситних мехурића који могу ефикасно да се вежу за честице и формирају агрегате мехурић–честица. Мехурићи пречника мањег од 10 μm поседују ограничену погонску силу и често остају суспендовани у води, без значајног доприноса флотационом процесу. Супротно томе, мехурићи већих димензија ($>150 \mu\text{m}$) одликују се великом брзином издизања и кратким временом контакта са честицама, што резултира смањеном вероватноћом ефективне колизије и адхезије. Брзина издизања мехурића у течности може се описати Stokes-овим законом [24,29]:

$$v = g \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot d^2 / (18 \cdot \mu) \quad (12)$$

где је:

v — брзина издизања мехурића

g — убрзање земљине теже

ρ_l — густина течности

ρ_g — густина гаса

d — пречник мехурића

μ — динамичка вискозност воде

Стабилност мехурића зависи од више фактора:

- концентрације раствореног гаса,
- присуства јона и органских материја,
- температуре и вискозности воде,
- брзине ослобађања гаса.

Поред наведених фактора, значајну улогу у стабилности мехурића има и процес коалесценције, односно спајања мањих мехурића у веће структуре. Коалесценција доводи до смањења укупне специфичне површине мехурића и може умањити ефикасност флотације, јер већи мехурићи брже избијају на површину и имају мању вероватноћу ефективне интеракције са честицама. Стога се у DAF системима тежи условима који омогућавају формирање стабилне дисперзије микромехурића са ограниченом коалесценцијом, јер таква структура мехурића обезбеђује већу укупну површину за интеракцију са честицама и повећава ефикасност процеса флотације [21].

Показано је да присуство органских материја и површински активних супстанци може повећати стабилност мехурића, али истовремено утиче на њихову тенденцију ка спајању у веће структуре [21].

Величина и стабилност мехурића представљају један од кључних параметара који одређују ефикасност флотационог процеса, јер директно утичу на брзину издизања, време контакта са честицама и вероватноћу формирања стабилних агрегата мехурић–честица.

2.4.4 Укупни утицај термодинамичких фактора

У реалним условима рада DAF система, ови параметри делују синергистички и међусобно су условљени, јер промене притиска, температуре и растворљивости гаса истовремено утичу на формирање, величину и стабилност микромехурића у систему. На пример, при ниској температури растворљивост ваздуха је већа, али повећана вискозност умањује ефикасност судара мехурића и честица. Слично томе, при високом притиску добија се више мехурића, али уз већи енергетски трошак. Управо због тога је у савременим истраживањима наглашена потреба за моделовањем и мултиваријационом анализом, како би се дефинисао оптималан баланс између температуре, притиска и концентрације раствореног ваздуха за конкретне услове воде [29].

Сумирајући наведено, јасно је да термодинамички фактори – притисак, температура, растворљивост гасова и стабилност мехурића – представљају један од кључних елемената за разумевање и оптимизацију процеса флотације раствореним ваздухом. Иако су њихови појединачни ефекти добро познати из литературе, у пракси они делују у сложеној интеракцији која се ретко систематски анализира. Управо због тога, досадашња истраживања DAF система најчешће су се ограничавала на избор и дозирање коагуланата и флокуланата, док је утицај термодинамичких услова остао недовољно разрађен. Укупни утицај термодинамичких параметара на ефикасност процеса флотације може се представити функционалном зависношћу [29]:

$$\eta = f(P, T, C) \quad (13)$$

где је:

η — ефикасност флотационог процеса

P — притисак у систему

T — температура воде

C — концентрација раствореног ваздуха

Ова дисертација надограђује постојећа истраживања интегрисањем термодинамичких аспеката у анализу процеса флотације раствореним ваздухом, са циљем да се испита њихов утицај на ефикасност уклањања специфичних полутаната, као што су боја, органске материје и арсен, из подземних вода. Посебан фокус рада усмерен је на анализу међусобног дејства притиска, температуре и растворљивости гасова на формирање и стабилност микромехурића, као и на њихову интеракцију са честицама у води. На тај начин, рад пружа не само теоријски увид у механизме који одређују успешност DAF процеса, већ и практичну основу за оптимизацију рада постројења за третман подземних вода.

На основу наведеног, јасно је да оптимизација DAF процеса захтева интегрално разматрање термодинамичких параметара, јер њихово међусобно дејство директно одређује стабилност мехурића и ефикасност уклањања загађујућих материја.

3 Експериментални део

Експериментални део рада усмерен је на систематско испитивање утицаја физичко-хемијских и термодинамичких параметара на ефикасност третмана подземне воде применом процеса флотације раствореним ваздухом..

У оквиру ове дисертације експериментално су оптимизовани процеси коагулације и флокулације при чему је посебна пажња усмерена на анализу термодинамичких аспеката DAF процеса, укључујући растворљивост ваздуха у води, нуклеацију и стабилност микромехурића, као и њихову интеракцију са формираним флоковима.

Реализовани експериментални део истраживања обухвата две међусобно повезане фазе:

- Прву фазу - оптимизација коагулације и флокулације применом класичних лабораторијских JAR тестова и,
- Другу фазу - испитивање утицаја физичких и термодинамичких параметара у DAF JAR систему у шаржном режиму рада (енгл. *batch mode*).

Овако конципиран експериментални део омогућава повезивање лабораторијских резултата са практичном применом и представља основу за формулисање технолошких препорука за третман подземних вода комплексног хемијског састава.

3.1 Карактеризација сирове воде

Карактеризација сирове воде представља полазну основу за процену ефикасности процеса третмана и избор оптималних услова коагулације и флокулације. Састав и физичко-хемијске карактеристике воде директно утичу на механизме уклањања загађујућих материја, стабилност формираних флокова и укупну ефикасност процеса сепарације.

Сирова вода коришћена у овом истраживању потиче из подземног изворишта и карактерише се повишеним концентрацијама арсена, присуством органске материје и израженом бојом воде, што представља значајан изазов у процесу третмана. Поред концентрације арсена, посебна пажња посвећена је параметрима који указују на присуство природне органске материје, пре свега вредности боје и укупне органске материје изражене параметром ТОС, будући да ови параметри могу утицати на ефикасност коагулације и формирање стабилних флокова.

У природним подземним водама концентрације арсена су најчешће у опсегу од 1 до 10 $\mu\text{g/l}$, док у појединим геохемијски специфичним подручјима могу достићи значајно више вредности. У Србији и региону Панонске низије забележене су концентрације арсена у подземним водама у опсегу од 10 до 100 $\mu\text{g/l}$, што се доводи у везу са редукционим условима у седиментима богатим гвожђем и органском материјом. Концентрација арсена у води коришћеној у овом истраживању износила је 83 $\mu\text{g/l}$ (0,083 mg/l), што је приближно осам пута више од максимално дозвољене концентрације од 10 $\mu\text{g/l}$ прописане регулативом за воду за пиће.

Физичко-хемијске карактеристике сирове воде, укључујући вредност рН, мутноћу, боју, концентрацију арсена и вредност ТОС, приказане су у Табели 3.1. Добијене вредности указују на комплексност састава воде и потребу за оптимизацијом услова третмана у циљу истовременог уклањања неорганских и органских загађујућих материја.

Табела 3.1 Физичко-хемијске карактеристике сирове воде, укључујући вредност рН, мутноћу, боју, концентрацију арсена и вредност ТОС

Параметар	Јединица	Сирова вода	Опсег вредности	МДК [5]
Боја	°Pt-Co	60	40–70	5
Мутноћа	NTU	0,65	0,20–1,00	1
Температура	°C	17	13–17	Температура изворишта
Електрична проводљивост (25 °C)	µS/cm	1190	1135–1276	2500
Растворени кисеоник	mg/l	<0,5	–	–
рН вредност	–	7,72	7,2–8,7	6,8–8,5
Укупне растворене материје	mg/l	625	600–700	–
Амонијак	mg/l	1,5	0,7–1,9	0,5
Нитрати	mg/l	<0,5	–	50
Нитрити	mg/l	<0,01	–	0,03
Хлориди	mg/l	11,6	8–25	250
Сулфати	mg/l	<5	5–10	250
Укупни фосфати (као P)	mgP/l	0,6	0,57–0,62	–
Силицијум	mg/l	8,1	–	–
Сумповодоник	mg/l	0,015	–	Нема
Укупни органски угљеник (ТОС)	mg/l	11	9–12	–
Потрошња КМnO ₄	mg/l	40	–	12
Метан	mg/l	12–21	–	–
Гвожђе	mg/l	0,29	0,2–0,8	0,3
Манган	mg/l	0,032	0,005–0,7	0,05
Калцијум	mg/l	23,9	–	200
Магнезијум	mg/l	14,2	–	50
Натријум	mg/l	291	190–300	200
Калијум	mg/l	1,2	–	12
Алуминијум, укупни	mg/l	<0,02	–	0,2
Антимон	mg/l	<0,001	0,008–0,220	0,003
Арсен	mg/l	0,083	0,050–0,130	0,01
Олово	mg/l	<0,001	–	0,01
Бор	mg/l	1,1	1–1,2	1
Кадмијум	mg/l	<0,0001	–	0,003
Хром	mg/l	<0,001	–	0,05
Бакар	mg/l	<0,01	–	2
Никл	mg/l	<0,001	–	0,02
Селен	mg/l	<0,001	0,001–0,007	0,01
Жива	mg/l	<0,0005	–	0,001

Вредности боје и ТОС у подземним водама обично су релативно ниске, најчешће испод 5 mg/l за ТОС и испод 10 °Pt–Co за боју. У водама са повећаним садржајем природне органске материје, као што су воде из алувијалних седимената, ове вредности могу бити значајно више услед присуства хуминских и фулвинских киселина. У испитиваној води вредност боје износила је 60 °Pt–Co, што је дванаест пута више од прописане граничне

вредности од 5 °Pt–Co, док је концентрација ТОС износила 11 mg/l, што указује на изражено органско оптерећење воде.

Присуство арсена у подземним водама представља значајан здравствени ризик, због чега је његово уклањање један од кључних циљева процеса третмана воде [1,2,11]. Арсен се у природним водама јавља у различитим оксидационим стањима и облицима, чије понашање током процеса коагулације зависи од рН вредности, редокс услова и присуства металних јона. Уклањање арсена у процесу коагулације заснива се пре свега на адсорпцији и копреципитацији са формираним хидроксидима гвожђа.

Поред арсена, значајан утицај на процес третмана има и NOM, која доприноси боји воде и може утицати на стабилност флокова, потрошњу коагуланта и ефикасност уклањања загађујућих материја [19,29]. Уклањање органске материје представља сложен процес који обухвата механизме адсорпције, коагулације и сепарације честица.

Концентрација природне органске материје у подземним водама обично је релативно ниска и најчешће се креће у опсегу од 0,5 до 3 mg/l изражено као ТОС, док су вредности боје најчешће испод 10 °Pt–Co. Повишене вредности ових параметара карактеристичне су за воде које потичу из алувијалних седимената богатих органском материјом, где долази до растварања хуминских и фулвинских киселина у подземној води.

У испитиваној подземној води концентрација ТОС износила је 11 mg/l, што је приближно три до десет пута више од типичних вредности за подземне воде, док је вредност боје износила 60 °Pt–Co, што је дванаест пута више од максимално дозвољене вредности од 5 °Pt–Co за воду за пиће. Ове вредности указују на значајно присуство растворене природне органске материје и потврђују да вода припада категорији органски оптерећених подземних вода.

Повишене концентрације органске материје у подземној води повезане су са геолошким и хидрогеохемијским условима водоносног слоја, пре свега са присуством органских наслага, редукционим условима и дугим временом задржавања воде у седиментима, што омогућава растварање и транспорт хуминских једињења у водену фазу. Ови услови су типични за подземне воде у алувијалним наносима Панонске низије и представљају један од кључних фактора који утичу на избор технологије третмана воде.

Вредности приказане у колони „Сирова вода“ представљају аритметичку средину резултата анализа 30 узорака ($n = 30$) сирове подземне воде, прикупљених свакодневним узорковањем у оквиру редовног мониторинга квалитета воде, чиме је обухваћена краткорочна варијабилност система.

Анализа квалитета сирове подземне воде приказана у Табели 4.1 указује на више значајних карактеристика које су релевантне за процес припреме воде за пиће. Вредност боје износи 60 °Pt–Co, што значајно премашује прописану граничну вредност од 5 °Pt–Co и указује на присуство растворене органске материје и других једињења која доприносе обојености воде. Средња вредност концентрационог нивоа ТОС износи 11 mg/L, што указује на умерено органско оптерећење које може утицати на ефикасност процеса третмана воде и стабилност процеса уклањања органских материја [19,29].

Вредности мутноће су релативно ниске (0,65 NTU), док рН вредност од 7,72 и температура воде од 17 °C указују на услове који су повољни за примену процеса коагулације и флокулације. Концентрације већина неорганских компоненти, укључујући гвожђе, манган, калцијум, магнезијум и поједине елементе у траговима, су у оквиру или испод прописаних максимално дозвољених концентрација.

Међутим, поједини параметри показују средње вредности које премашују регулаторне границе, пре свега натријум (291 mg/L), амонијак (1,5 mg/L), потрошња KMnO_4 (40 mg/L) и арсен (0,083 mg/L), што указује на значајне изазове у процесу третмана воде.

Концентрација раствореног кисеоника је веома ниска ($<0,5$ mg/l), што указује на доминантно редукционе услове у подземној води, у којима нитрати и нитрити нису стабилни, те су њихове концентрације занемарљиве. Присуство сумповодоника детектовано је у ниским концентрацијама (0,015 mg/L), што такође потврђује заступљеност редукционих процеса, карактеристичних за анаеробне услове у подземној води. За овај параметар није дефинисана максимално дозвољена вредност.

Укупно посматрано, добијени резултати указују да је за третман сирове подземне воде неопходна примена вишестепеног процеса третмана који омогућава уклањање како хемијских тако и физичких загађујућих материја, са посебним нагласком на уклањање боје, амонијака, органске материје и нарочито арсена, што представља основу за даља лабораторијска испитивања у оквиру JAR тестова.

3.2 Материјали и методе

Истраживања представљена у овој дисертацији спроведена су кроз више међусобно повезаних експерименталних фаза, које обухватају:

- лабораторијске JAR тестове,
- лабораторијске DAF JAR тестове,
- верификацију добијених резултата у условима реалног рада постројења за пречишћавање воде.

Целокупно истраживање засновано је на систематском експерименталном приступу усмереном на испитивање понашања подземне воде специфичног састава при примени процеса коагулације, флокулације и флотације раствореним ваздухом (DAF) [7]. Експериментални програм обухватио је оптимизацију хемијских и оперативних параметара и њихову верификацију у лабораторијским условима релевантним за реални рад постројења. Сви експерименти спроведени су у складу са важећим стандардима за анализу воде, уз контролу квалитета и проверу репродуктивности резултата.

Основни стандарди, процедуре контроле квалитета и критеријуми за проверу репродуктивности резултата приказани су у Табели 3.2.

Табела 3.2 Примењени стандарди и мере контроле квалитета током експерименталних испитивања

Параметар активност	/ Примењени стандард или процедура	Критеријум контроле квалитета	Сврха примене
Акредитација лабораторије	SRPS ISO/IEC 17025	важећа акредитација	обезбеђење поузданости мерења
Узимање и конзервација узорак	SRPS EN ISO 5667 серија	правилно конзервисани узорци	очување хемијског састава
Калибрација инструмената	интерна процедура лабораторије	$R^2 > 0,995$	тачност мерења

Контролни узорци	Standard Methods QA/QC	одступање < $\pm 5\%$	провера тачности
Понављање мерења	лабораторијска процедура	минимум 3 мерења	провера репродуктивности
Бланк пробе	лабораторијска процедура	без детектованих контаминаната	провера чистоће реагенаса
Интерна контрола квалитета	QA/QC процедура	стабилност резултата	поузданост података

Основни циљ експерименталног дела био је да се испитају могућности и ограничења примене DAF технологије у третману подземних вода комплексног хемијског састава карактеристичног за зрењанинско извориште [43]. Зрењанинско извориште представља један од најдуготрајнијих примера проблема у водоснабдевању у Србији, пре свега због истовременог присуства повишених концентрација арсена, природних органских материја, гвожђа, мангана и изражене боје воде. Управо оваква комбинација загађујућих компоненти представља значајан изазов за конвенционалне поступке третмана, јер је за постизање захтеваног квалитета воде неопходно обезбедити ефикасно уклањање више различитих група загађујућих материја у оквиру јединственог технолошког процеса [2,43]. Посебан акценат стављен је на уклањање арсена, укупног органског угљеника (ТОС) и боје воде, као и на идентификацију параметара који најзначајније утичу на стабилност флокула и ефикасност процеса флотације.

Поред наведених параметара, праћени су и мутноћа, рН вредност, електропроводност и оксидационо-редукциони потенцијал (ORP), као индикатори хемијске активности система, степена оксидације и присуства колоидних честица. Посебна пажња посвећена је термодинамичким аспектима процеса, пре свега растворљивости гасова у води, механизму нуклеације мехурића, њиховој стабилности и условима интеракције са флоковима, што представља интегрални приступ у проучавању DAF процеса [23]. Оваква анализа омогућава повезивање експерименталних резултата са основним физичко-хемијским законима који управљају преносом масе, међуфазним интеракцијама и адсорпцијом на контактної површини мехурић–честица.

3.2.1 Примењене аналитичке методе

Сви физичко-хемијски параметри одређивани су у акредитованој лабораторији Института за водопривреду „Јарослав Черни“, која послује у складу са захтевима стандарда SRPS ISO/IEC 17025 [44]. Анализе су спровођене применом стандардизованих метода у складу са важећим SRPS EN ISO стандардима за испитивање квалитета воде.

Циљ аналитичког дела истраживања био је обезбеђивање тачних, репродуктивних и метролошки следљивих података, који представљају основу за процену ефикасности процеса коагулације и флотације раствореним ваздухом (DAF) [2].

Одређивање концентрације арсена (As)

Концентрација арсена одређивана је методом индуктивно спрегнуте плазме са оптичком емисионом спектрометријом (ICP-OES), у складу са SRPS EN ISO 11885 [45].

Узорци су конзервисани додавањем концентроване азотне киселине (HNO_3) до $\text{pH} < 2$, у складу са стандардом SRPS EN ISO 5667-3 (већ наведен у поглављу 3.1.1).

Калибрација је вршена применом сертифицираних стандардних раствора, а контролни узорци су анализирани уз сваку серију мерења. Калибрационе криве проверене су пре сваке серије мерења. Граница детекције методе била је у опсегу $<1 \mu\text{g/l}$, што омогућава поуздано праћење концентрација испод максимално дозвољене вредности од $10 \mu\text{g/l}$ [5].

Одређивање укупног органског угљеника (ТОС)

ТОС је одређиван методом високотемпературне каталитичке оксидације уз инфрацрвену детекцију CO_2 , у складу са SRPS EN 1484 [46].

Метода подразумева:

- уклањање неорганског угљеника киселинском обрадом,
- оксидацију органских једињења,
- мерење концентрације насталог CO_2 NDIR детекцијом.

Репродуктивност мерења била је боља од $\pm 5\%$, што је у складу са захтевима стандарда [44].

Ова метода омогућава поуздано одређивање укупног садржаја органске материје у води.

Одређивање боје

Боја воде одређивана је спектрофотометријском методом у складу са SRPS EN ISO 7887 [47] и изражавана у $^\circ\text{Pt-Co}$ јединицама.

Ова метода омогућава квантитативну процену присуства растворених хуминских и фулвинских киселина [24], које имају значајну улогу у процесу коагулације и интеракције са мехурићима у DAF систему.

Одређивање гвожђа и мангана

Концентрације гвожђа и мангана одређиване су ICP-OES методом у складу са SRPS EN ISO 11885 [45], након киселе конзервације узорка.

Гвожђе и манган представљају значајне компоненте подземних вода редукованог хидрогеохемијског типа, а њихове концентрације могу утицати на процесе коагулације, формирање флокула и ефикасност флотације у DAF систему.

KMnO_4 индекс

Оксидабилност органске материје одређивана је перманганатном методом у складу са SRPS EN ISO 8467 [36].

Овај параметар представља индикатор присуства редукујућих супстанци и природне органске материје у води.

pH, оксидационо-редукциони потенцијал и електропроводност

pH вредност одређивана је потенциометријски у складу са SRPS EN ISO 10523 [48].

Електропроводност је одређивана кондуктометријском методом у складу са SRPS EN 27888 [49].

Оксидационо-редукциони потенцијал (ORP) мерен је електрохемијском методом применом платинске електроде са референтном Ag/AgCl електродом.

Ови параметри били су од посебног значаја за праћење редокс услова, оксидацију As(III) и анализу стабилности хемијске равнотеже током процеса коагулације и флотације [2].

Контрола квалитета и поузданост резултата

Сва мерења извршена су у најмање три понављања.

Примењене су следеће мере контроле квалитета:

- бланк пробе,
- контролни узорци познате концентрације,
- провера калибрационих кривих ($R^2 > 0,995$),
- интерна провера прецизности и тачности мерења.

Резултати су приказани као средње вредности, уз релативну стандардну девијацију мању од $\pm 5\%$.

На овај начин обезбеђена је поузданост и метролошка следљивост аналитичких података који су коришћени у даљој експерименталној анализи.

Експериментални програм конципиран је кроз девет серија лабораторијских испитивања, у оквиру којих су систематски мењани процесни параметри DAF процеса, као и врста и доза коагуланата и флокуланата. Укупно је испитано више од педесет различитих комбинација експерименталних услова, што је омогућило свеобухватну анализу утицаја појединачних параметара на ефикасност уклањања арсена, NOM и боје.

Поузданост добијених резултата оцењена је на основу доследности уочених трендова у више независних серија експеримената, при чему су оптимални услови процеса дефинисани на основу упоредне анализе добијених резултата.

3.2.2 Хемијски реагенси и припрема раствора

У експерименталном делу истраживања коришћени су неоргански коагуланти, оксидационо средство и полимерни флокулант, који се стандардно примењују у процесима пречишћавања воде. Избор реагенаса заснован је на лабораторијским испитивањима, литературним подацима, као и на специфичним карактеристикама подземне воде са зрењанинског изворишта.

Сви реагенси коришћени су у складу са препорукама произвођача, а припрема раствора вршена је у контролисаним лабораторијским условима, употребом дејонизоване воде.

Коагуланти, гвожђе(III)-хлорид (FeCl_3)

Гвожђе(III)-хлорид коришћен је као примарни коагулант, пре свега због способности формирања $\text{Fe}(\text{OH})_3$ флокула који омогућавају адсорпцију и ко-преципитацију арсена. Реагенс је набављен од произвођача *Merck KGaA* (Darmstadt, Germany) [2].

Матични раствор припреман је растварањем одговарајуће количине чврстог реагенса у дејонизованој води до дефинисане концентрације. Раствори су припремани непосредно пре употребе и нису коришћени дуже од 24 часа од припреме.

Матични раствор гвожђе(III)-хлорида припреман је у концентрацији од 10 g/L, растварањем одмерене количине реагенса аналитичке чистоће у дејонизованој води уз континуирано мешање до потпуног растварања. Припрема раствора вршена је на собној температури (20 ± 2 °C), уз употребу лабораторијске стаклене опреме и аналитичке ваге прецизности $\pm 0,001$ g. Радни раствори припремани су разређивањем матичног раствора непосредно пре дозирања у експерименталном систему.

Полуалуминијум-хлорид (РАС)

Коришћена су два типа полиалуминијум-хлорида:

- ВОРАС М4
- ВОРАС М5

Произвођач: *ВОРАС*, Београд, Србија [2].

РАС је коришћен као коагулант за уклањање органске материје и побољшање формирања флокула. Радни раствори припремани су разређивањем комерцијалног концентрованог раствора до концентрације погодне за прецизно лабораторијско дозирање.

Матични раствор РАС-а припреман је разређивањем комерцијалног концентрованог раствора дејонизованом водом до концентрације од 10 g/l (изражено као Al_2O_3), уз благо мешање у трајању од 5–10 минута до постизања хомогене суспензије. Радни раствори припремани су непосредно пре употребе разређивањем матичног раствора до жељене концентрације, у складу са експерименталним планом. Раствори су чувани у затвореним полиетиленским посудама на собној температури (20 ± 2 °C) и коришћени у року од 24 часа од припреме.

Посебна пажња посвећена је оптимизацији дозирања $FeCl_3$ и РАС коагуланата, при чему су у оквиру серије лабораторијских JAR тестова дозе $FeCl_3$ вариране у опсегу од 10 до 120 g/m³, а РАС-а од 20 до 30 g/m³, уз праћење параметара као што су мутноћа, боја, концентрација арсена и укупни органски угљеник (ТОС), како би се идентификовали оптимални услови за стабилно формирање флокула и ефикасно уклањање загађујућих материја [2].

Оксидационо средство, Натријум-хипохлорит (NaOCl)

Натријум-хипохлорит коришћен је као средство за предоксидацију у циљу:

- Оксидације арсена As(III) у As(V),
- оксидације гвожђа Fe(II) у Fe(III) и мангана Mn(II) у Mn(IV),
- побољшања ефикасности коагулације.

Реагенс је набављен од произвођача *Sigma-Aldrich* (St. Louis, MO, USA) [2].

Раствор натријум-хипохлорита припреман је разређивањем комерцијалног раствора дејонизованом водом до жељене концентрације активног хлора. Концентрација активног хлора контролисана је јодометријском титрацијом непосредно пре примене. Дозирање раствора вршено је помоћу мерне пипете или аутоматске дозирне пумпе у реакциону посуду уз интензивно мешање, како би се обезбедила равномерна дистрибуција оксидационог средства у води..

Полмерни флокулант /полиелектролит (РЕ)

Полимерни флокулант коришћен је у појединим серијама испитивања ради побољшања агрегације и механичке стабилности флокула.

Произвођач: *Kemira* (Helsinki, Finland) [2].

Матични раствор припреман је постепеним додавањем полимера у воду уз споро мешање, како би се избегла агломерација и обезбедила потпуна хидратација. Раствор је остављан да се стабилизује 30–60 минута пре употребе.

Опсег испитиваних доза реагенса

У оквиру експерименталног програма испитиван је широк опсег концентрација реагенса, како би се идентификовали оптимални услови коагулације и предоксидације. Испитивани опсези доза приказани су у Табели 3.3.

Табела 3.3 Опсег испитиваних доза реагенса у лабораторијским испитивањима

Реагенс	Опсег испитиваних доза (mg/l)	Сврха примене
FeCl ₃	10–50	Коагулација, уклањање арсена
PAC (M4/M5)	10–40	Уклањање органске материје
NaOCl	10–20	Предоксидација As(III)
PE	0,2–0,3	Побољшање агрегације флокула

Како је приказано у Табели 3.2, испитивани опсези доза дефинисани су тако да обухвате концентрације које омогућавају постизање ефикасног уклањања арсена, боје и ТОС, уз очување стабилности флокула. Конкретне комбинације доза по експерименталним серијама приказане су у поглављу 3.2.

Начин дозирања и контрола поступка

Дозирање реагенса вршено је аутоматским лабораторијским пипетама прецизности $\pm 1\%$, у складу са унапред дефинисаним експерименталним планом.

Редослед додавања реагенса био је:

1. предоксидација (где је примењена),
2. FeCl₃,
3. PAC,
4. полимерни флокулант.

Контролисано време између додавања реагенса било је од суштинског значаја за правилно формирање флокула и поновљивост експеримената.

3.2.3 Карактеристике и начин узорковања подземне воде

Подземна вода коришћена у свим фазама истраживања потиче са изворишта градског водовода у Зрењанину, смештеног у алувијалним наносима реке Бегеј, на дубинама од 90 до 120 m. Геолошки састав подручја чине слојеви пескова и глиновитих наслага, који условљавају редуковане хидрогеохемијске услове у водоносном слоју, као и повећану растворљивост једињења арсена, гвожђа и мангана [50].

Редукована средина, ниска концентрација раствореног кисеоника и присуство органске материје омогућавају стабилност арсена у тривалентном облику (As(III)), који је технолошки захтевнији за уклањање у односу на пентавалентни облик (As(V)). Због тога се у процесима третмана подземних вода често примењује предоксидација, којом се As(III) оксидује у As(V), што омогућава ефикасније уклањање процесима коагулације и флотације.

Вредности приказане у Табели 3.4 представљају распон концентрација параметара квалитета сирове подземне воде.

Табела 3.4 Карактеристике сирове подземне воде коришћене у експериментима

Параметар	Минимална вредност	Максимална вредност	Јединица
Боја	40	70	°Pt–Co
Мутноћа	0,20	1,00	NTU
Температура	13	17	°C
pH	7,2	8,7	–
Електропроводљивост	1135	1276	μS/cm
ТОС	9	12	mg/l
KMnO ₄ индекс	≈40	≈40	mg/l
Метан	12	21	mg/l
Гвожђе	0,2	0,8	mg/l
Манган	0,005	0,7	mg/l
Арсен	0,050	0,130	mg/l
Натријум	190	300	mg/l
Бор	1,0	1,2	mg/l

Вредности боје у појединим узорцима достигле су 60–95 °Pt–Co, док је ТОС у лабораторијским испитивањима износио 9–12 mg/l [2]. Концентрација арсена у појединим серијама достигла је вредности од 100–140 μg/l, што је значајно изнад максимално дозвољене концентрације од 10 μg/l прописане важећим законским регулативама [5]. Ове вредности потврђују да подземна вода са изворишта у Зрењанину спада у категорију технолошки захтевних вода за третман. Комбинација повишеног садржаја органске материје, растворених метала и редукованих услова сврстава зрењанинску подземну воду у категорију технолошки захтевних вода за третман, посебно у контексту примене мембранских процеса, где органска материја и колоидне честице доприносе појави запушења мембрана (енг. *fouling*) [2].

Узорци сирове подземне воде узимани су са излаза из бунара, пре било каквог третмана, као и на контролним тачкама у систему припреме воде. За анализу метала узорци су конзервисани додавањем 1 М HNO₃, док су узорци за анализу органске материје и боје чувани на температури 4 °C. Све анализе извршене су у року од 24 часа од узорковања, како би се минимизовале промене у хемијској равнотежи система.

3.3 Прва фаза експерименталног истраживања- JAR тестови

Прва фаза истраживања обухватила је серију стандардних JAR тестова спроведених у лабораторијским условима, са циљем оптимизације процеса коагулације и флокулације као предуслова за ефикасну примену DAF технологије. Резултати спроведених

истраживања у оквиру ове фазе публиковани су у радовима у врхунским међународним часописима [2,18].

Циљ ове фазе био је одређивање оптималних доза коагуланата (FeCl_3 и PAC), испитивање потребе за предоксидацијом, процена утицаја полимерног флокуланта, анализа формирања и стабилности флокула, као и дефинисање услова погодних за примену DAF процеса.

У циљу обезбеђивања систематичности, поузданости и међусобне упоредивости добијених резултата, експериментални програм је конципиран као низ међусобно повезаних серија испитивања. У оквиру ових серија варирани су тип и концентрација примењених реагенса, као и одабрани оперативни параметри, укључујући предоксидацију и контролисану инјекцију ваздуха. Овако постављена експериментална шема омогућила је поступно сагледавање утицаја појединачних фактора, а затим и анализу њихових међусобних интеракција, што је било од суштинског значаја за разумевање механизма коагулације и формирања флокула у систему који претходи DAF процесу. Преглед свих експерименталних серија, примењених хемијских реагенса, испитиваних опсега концентрација и посебних процедура дат је у Табели 3.2. Ова табела представља синтетички приказ прве фазе истраживања и омогућава јасно сагледавање логике експерименталног дизајна, који је обухватио иницијалну оптимизацију коагулације (JAR 1), испитивање ширег опсега доза коагуланта (JAR 2), као и додатне серије усмерене на оптимизацију комбинације PAC и полимерног флокуланта и поређење различитих типова PAC коагуланата.

У наставку поглавља и Табели 3.5 детаљно је описан поступак JAR тестирања, док су појединачне серије анализиране кроз њихову улогу у оптимизацији процеса и дефинисању параметара који ће бити примењени у другој фази истраживања, односно у лабораторијским DAF JAR тестовима.

Табела 3.5 Преглед серија JAR тестова, примењених реагенса и посебних процедура у првој фази истраживања

Серија	Ознаке узорака	Примењени реагенси	Опсег концентрација	Посебна процедура	Референца
JAR 1	S1–S14	FeCl_3 , PAC (BOPAC M4), NaOCl	FeCl_3 : 10–50 mg/l; PAC: 20–30 mg/l; Cl_2 : 10–20 mg/l	Стандардни JAR тест; узорци S4, S5, S12 и S13 подвргнути инјекцији ваздуха у трајању од 5 min након седиментације	[6]
JAR 2	S1–S14	FeCl_3 , PAC (BOPAC M4), NaOCl	FeCl_3 : 40–120 mg/l; PAC: 20–30 mg/l; Cl_2 : 10–20 mg/l	Стандардни JAR тест; одабрани узорци укључују убризгавање ваздуха	[6]
JAR 2 – Додатна серија 1	D1–D5, 12D–14D	FeCl_3 , PAC (BOPAC M4), PE, NaOCl	FeCl_3 : 15–60 mg/l; PAC: 10–30 mg/l; PE: 0,1–0,3 mg/l; Cl_2 : 10–20 mg/l	Оптимизација комбинације PAC + PE; инјекција ваздуха примењена	[6]

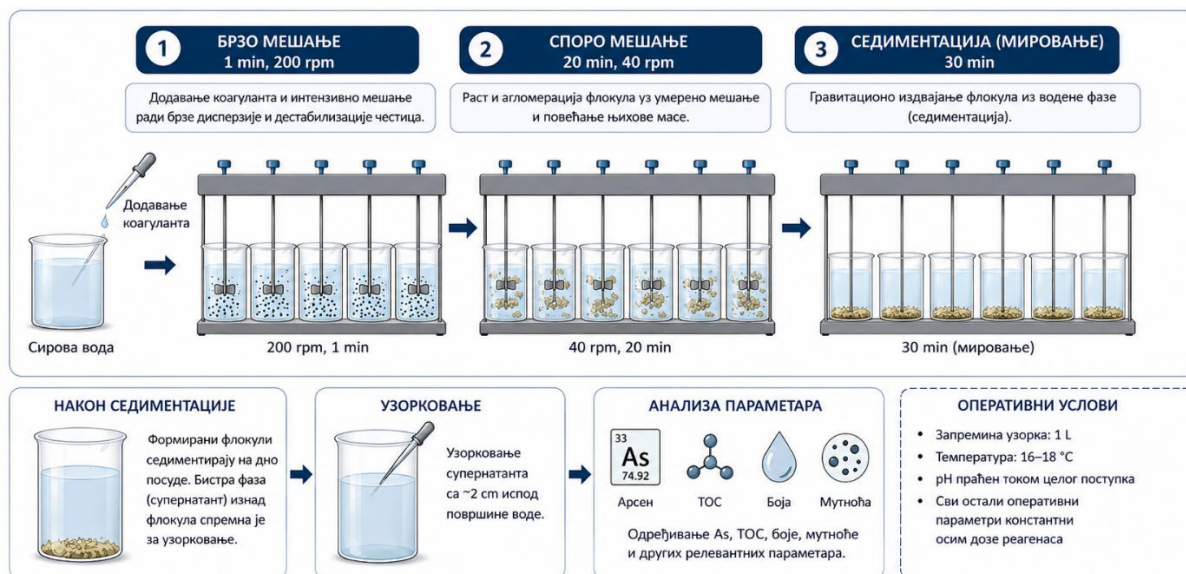
				на одабраним узорцима
JAR 2 – Додатна серија 2	D6, D7, 13D2, 14D2	FeCl ₃ , PAC (БОРАС М5), NaOCl	FeCl ₃ : 20–40 mg/l; PAC: 20–30 mg/l; Cl ₂ : 10–20 mg/l	Поређење типова PAC (БОРАС М4 и БОРАС М5) у погледу уклањања боје и арсена; укључена инјекција ваздуха

[6]

Овако конципирана Табела 3.5 представља синтетички приказ целокупне прве фазе истраживања и омогућава систематично сагледавање експерименталног дизајна, укључујући варијације у дозирању коагуланата, примену предоксидације и додатне поступке оптимизације. Укупно је реализовано 40 JAR експеримената распоређених у четири серије испитивања, при чему су систематски вариране дозе FeCl₃ (10–70 mg/l), PAC-а (10–30 mg/l), NaOCl (0–20 mg/l) и, у појединим серијама, полиелектролита (0,1–0,3 mg/l), у циљу идентификације оптималних услова коагулације и флокулације.

Испитивања су спроведена применом стандардне лабораторијске JAR методе у шестопозиционом апарату, при чему је у сваком стакленом суду коришћена запремина од 1 L сирове воде. Експерименти су извођени на лабораторијској температури (16–18 °C), а рН вредност воде праћена је током целог поступка како би се осигурала упоредивост услова између појединачних серија. Сви остали оперативни параметри били су константни, осим дозе реагенса које су вариране у складу са експерименталним планом приказаним у Табели 3.2, док су сви остали оперативни параметри били константни.

Процес третмана обухватао је три узастопне фазе које симулирају услове реалне коагулације и флокулације у постројењима за припрему воде за пиће. У почетној фази брзог мешања, у трајању од једног минута при 200 rpm, коагулант је додаван у узорак уз интензивно мешање, чиме је омогућена његова равномерна дисперзија и иницирање процеса дестабилизације колоидних честица. Ова фаза је од пресудног значаја за формирање примарних микрофлокула и успостављање услова за даљу агрегацију. Након тога следила је фаза спорог мешања у трајању од 20 минута при 40 rpm, током које је омогућен раст и агломерација флокула, њихова стабилизација и повећање масе честица. Завршна фаза обухватала је период мировања (седиментације) у трајању од 30 минута, током којег је дошло до гравитационог издвајања формираних флокула из водене фазе (Слика 3.1).



Слика 3.1. Шематски приказ фаза JAR теста (коагулација и флокулација)

Извор: аутор

Слика 3.1. Шематски приказ фаза JAR теста (коагулација и флокулација)

У серијама у којима је примењена предоксидација, натријум-хипохлорит је додаван пре коагуланта, уз обезбеђено време контакта од 5–10 минута, како би се омогућила оксидација As(III) у As(V) и повећала ефикасност касније ко-преципитације. Након предоксидације, коагулант FeCl₃ је додаван у фази брзог мешања, док је PAC, у серијама комбиноване коагулације, уношен одмах након почетне дестабилизације система. Полимерни флокулант, када је примењиван, додаван је у почетној фази спорог мешања, како би се подстакла агрегација већ формираних микрофлокула.

По завршетку седиментације, супернатант је пажљиво узоркован са висине од приближно 2–3 cm испод површине течности, водећи рачуна да не дође до ремећења седиментираног слоја. Узорци намењени анализи метала филтрирани су кроз мембрану порозности 0,45 μm, у складу са аналитичком процедуром описаном у поглављу 3.1.2. Након тога одређиване су концентрације арсена, ТОС и боје.

Ефикасност уклањања појединих параметара израчунавана је на основу односа почетне и преостале концентрације након третмана, при чему је као критеријум оптималне дозе коагуланта узета комбинација која обезбеђује максимално уклањање арсена уз истовремено значајно смањење ТОС и боје, без прекомерног повећања резидуалног гвожђа у третираној води. Поред квантитативних резултата, узимана је у обзир и визуелна процена формирања флокула, њихова величина, компактност и стабилност током седиментације.

Свака серија експеримената извођена је у најмање три понављања, а добијени подаци анализирају се ради провере репродуктивности и поузданости. На овај начин обезбеђена је конзистентност експерименталних услова и омогућено јасно раздвајање утицаја појединачних хемијских параметара на ефикасност процеса.

Описани поступак JAR тестирања представља стандардизовану лабораторијску симулацију процеса коагулације и флокулације у припреми воде за пиће, а у оквиру ове дисертације служи као основа за дефинисање оптималних услова који ће у наредној фази бити примењени у DAF систему [2].

3.3.1 JAR 1 Серија

У оквиру прве фазе истраживања, која је обухватила укупно четири серије JAR тестова, Серија 1 представља почетни корак у систематској оптимизацији процеса коагулације. Ова серија испитивања била је усмерена на утврђивање утицаја дозе коагуланта на ефикасност процеса уклањања одабраних параметара квалитета воде- концентрације арсена, вредности боје и укупне органске материје (ТОС), као и на анализу понашања система у условима контролисане коагулације, флокулације и седиментације. Експериментални план JAR 1 серије, укључујући распоред узорак и примењене дозе реагенса, приказан је у Табели 3.6.

Табела 3.6. Матрица експеримената JAR 1 серије

Ознака узорка	FeCl ₃ (mg/l)	PAC M4 (mg/l)	NaOCl (mg/l)	Напомена
S1	0	0	0	Контрола – сирова вода
S2	10	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S3	15	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S4	20	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S5	30	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S6	40	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S7	50	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S8	20	0	10	FeCl ₃ + предоксидација
S9	40	0	15	FeCl ₃ + предоксидација
S10	50	0	20	FeCl ₃ + предоксидација
S11	10	20	0	FeCl ₃ + PAC
S12	15	25	0	FeCl ₃ + PAC
S13	20	30	0	FeCl ₃ + PAC
S14	25	30	0	FeCl ₃ + PAC

Серија 1 обухватила је 14 појединачних JAR тестова, у којима су систематски вариране дозе коагуланта при стандардизованим условима брзог мешања (коагулација), спорог мешања (флокулација) и дефинисаног времена седиментације. Оваквим приступом омогућено је праћење формирања и стабилности флокова, као и процена њихове способности да адсорбују и уклоне растворене и колоидне компоненте присутне у води.

Док уклањање арсена пре свега зависи од процеса адсорпције и копреципитације на формираним хидроксидним флоковима, уклањање органске материје и боје обухвата сложеније механизме интеракције између растворених и колоидних фракција и формираних агрегата.

У оквиру JAR 1 серије спроведено је укупно 14 лабораторијских проба (Табела 3.6). Узорак S1 представљао је контролни узорак сирове воде, док су узорци S2–S7 обухватили испитивања са појединачном применом FeCl_3 у растућем опсегу концентрација. Узорци S8 и S9 били су намењени испитивању утицаја предоксидације натријум-хипохлоритом, док су у узорцима S10–S14 испитивани ефекти комбиноване коагулације применом FeCl_3 и PAC коагуланта (BORAC M4), са циљем процене потенцијалне синергије у уклањању органске материје и побољшању формирања флокула.

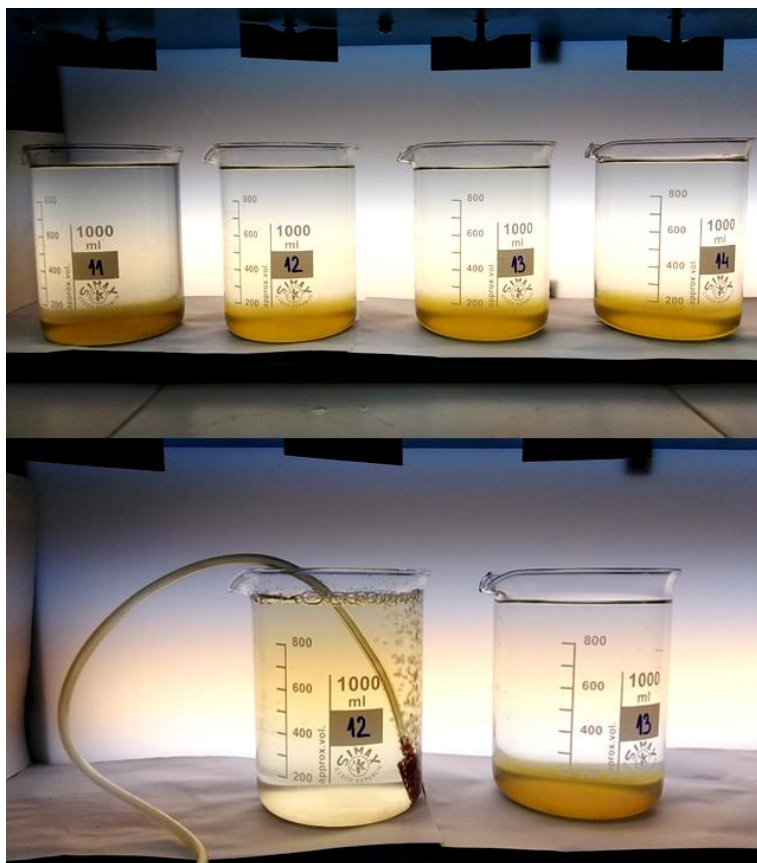
Основни циљ JAR 1 серије био је да се испита утицај различитих доза FeCl_3 на процес дестабилизације колоидног система, као и да се процени ефекат предоксидације и комбиноване примене PAC коагуланта на формирање и стабилност флокула. Испитивања су организована тако да омогуће постепено повећање дозе коагуланта и праћење одговора система у контролисаним условима, уз одржавање свих осталих оперативних параметара константним. Реализовањем прве фазе, обезбеђени су полазни параметри за наредну серију испитивања (JAR 2), у којој је проширен опсег концентрација коагуланта FeCl_3 од 40 до 120 mg/l.

Визуелни приказ процеса формирања флокова дат је на Слици 3.1, која приказује фазу мешања након додавања коагуланта.



Слика 3.2. JAR узорци 1- мешање након дозирања хемикалија. (узорци S1-S6)

Евидентирани промене у узорцима JAR 1 током таложења и убризгавања ваздуха приказане су на Слици 3.3. Секвенцијална визуелна запажања узорака 11–14 након таложења, као и узорака 12 и 13 током и након убризгавања ваздуха, показују да су након периода седиментације формиран компактни флокули са јасно издвојеним супернатантом, док је након увођења ваздуха дошло до њиховог подизања ка површини услед везивања микромехурића за флокуле. Истовремено, уочено је да су флокули задржали своју компактност, без израженог распадања, што указује на њихову добру механичку стабилност и погодност за издвајање процесом флотације.



Слика 3.3. Понашање узорака JAR 1 током таложења и убризгавања ваздуха.

3.3.2 JAR 2 Серија

Након иницијалне оптимизације спроведене у оквиру JAR 1 серије, истраживање је настављено кроз JAR 2 серију испитивања. JAR 2 серија експеримената спроведена је са циљем да се детаљније испита утицај услова коагулације и флокулације на ефикасност уклањања арсена, органске материје и боје из подземне воде. У овој серији вариране су дозе коагуланта и услови мешања како би се анализирано формирање и стабилност флокова, као и њихово понашање током процеса таложења. Детаљан распоред узорака и примењених доза реагенса у оквиру JAR 2 серије приказан је у Табели 3.7.

Табела 3.7. Матрица експеримената JAR 2 серије

Ознака узорка	FeCl ₃ (mg/l)	PAC M4 (mg/l)	NaOCl (mg/l)	Напомена
S1	0	0	0	Контрола – сирова вода
S2	40	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S3	50	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S4	60	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S5	70	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)

S6	80	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S7	100	0	0	FeCl ₃ (једини реагенс)
S8	60	0	10	FeCl ₃ + предоксидација
S9	80	0	15	FeCl ₃ + предоксидација
S10	100	0	20	FeCl ₃ + предоксидација
S11	40	20	0	FeCl ₃ + PAC
S12	50	25	0	FeCl ₃ + PAC
S13	60	30	0	FeCl ₃ + PAC
S14	70	30	0	FeCl ₃ + PAC

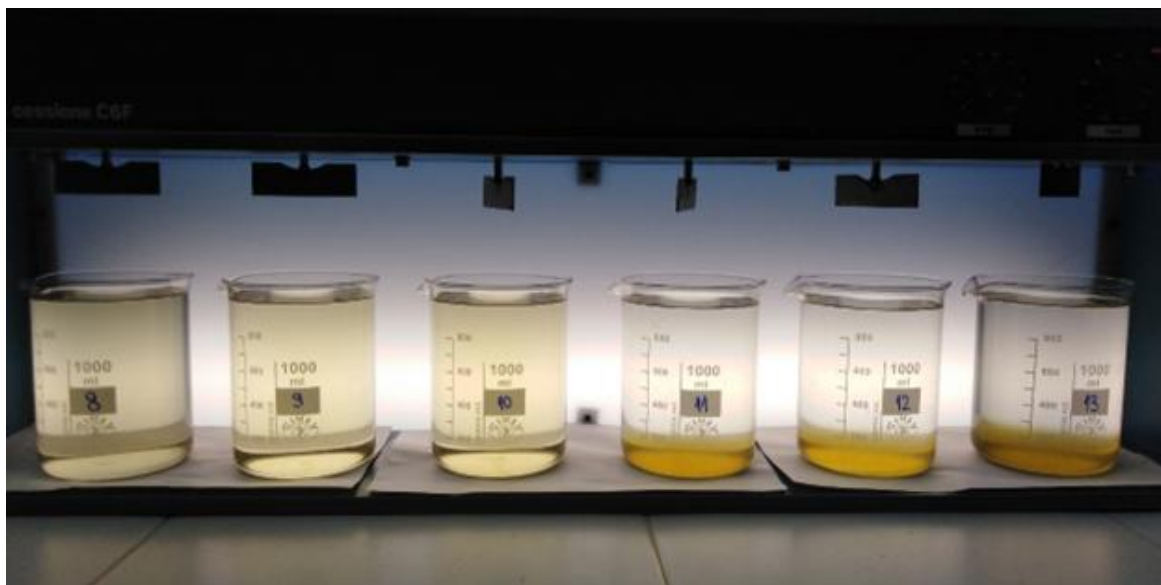
Током експеримената вршена су визуелна посматрања формирања флокова, брзине њиховог таложења и стабилности формираних агрегата. Поред тога, праћене су промене концентрације арсена, концентрације ТОС и боје у третираној води након спроведеног JAR теста. Ова серија експеримената омогућила је поређење резултата са претходном серијом и идентификацију оптималних услова за даље фазе испитивања.

У оквиру JAR 2 серије, задржани су исти оперативни услови мешања, време контакта и поступак узорковања, како би се обезбедила директна упоредивост резултата. Основна разлика односила се на проширени опсег дозирања FeCl₃, који је у овој серији обухватио концентрације од 40 до 120 mg/L.

У оквиру JAR 2 серије такође је спроведено укупно 14 лабораторијских проба, у којима је систематски испитиван утицај повећаних доза коагуланта, уз задржавање испитивања ефеката предоксидације и комбиноване примене PAC коагуланта (BORAC M4). Оваква поставка омогућила је процену да ли повећање дозе FeCl₃ доводи до значајнијег побољшања дестабилизације колоидног система и формирања компактнијих флокула, што је од посебног значаја за каснију примену DAF процеса.

Посебна пажња у овој серији посвећена је и понашању система при вишим концентрацијама коагуланта, имајући у виду потенцијални утицај на резидуално гвожђе, стабилност флокула и услове за њихово накнадно издвајање. На тај начин JAR 2 серија представљала је значајан корак у верификацији оптималног радног опсега коагулације пре преласка на додатне серије усмерене на фино подешавање процеса.

На Слици 3.4 приказани су узорци S8–S13 након таложења, при чему су уочљиве разлике у формирању флокова у зависности од примењених доза хемијских реагенаса. Узорци који садрже само FeCl₃ (S?) формирају мање стабилне флокове, док узорци са додатком PAC-а (S11–S13) формирају густе флокове који се брже таложе.



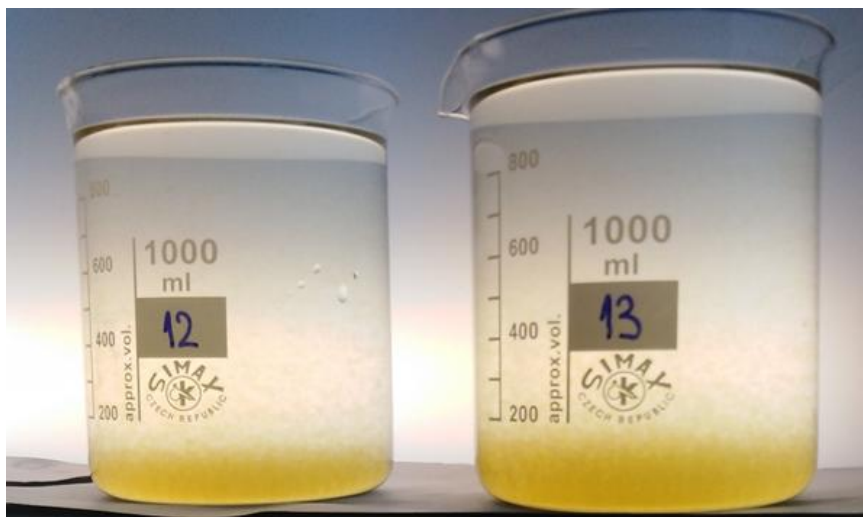
Слика 3.4. JAR 2 Узорци S8–S13 након таложења.

Утицај увођења ваздуха на узорке који садрже РАС приказан је на Слици 3.5. Током аерације флокови се привремено диспергују у воденом стубу, што указује на њихову пловност и пролазно нарушавање структуре флокова.



Слика 3.5. JAR 2 Током уноса ваздуха, узорци S12 и S13.

Слика 3.6 приказује понашање истих узорака (S12 и S13) 30 минута након прекида аерације. Флокови се поново агрегирају и таложе на дно, иако процес таложења захтева нешто више времена у поређењу са узорцима који нису били подвргнути аерацији. Ова запажања потврђују да је РАС кључан за одржавање интегритета флокова током флотације уз помоћ ваздуха, док узорци без РАС-а након увођења ваздуха не формирају стабилне флокове.



Слика 3.6. JAR 2 након 30 мин искључења ваздуха у Узорцима 12 и 13.

3.3.3 JAR 2 додатна серија

Прва JAR 2 допунска серија испитивања спроведена је ради проширеног испитивања утицаја комбинације коагуланата и помоћних реагенаса на формирање и стабилност флокова током коагулације и флокулације. У овој серији тестирања посебна пажња посвећена је утицају додавања полиалуминијум-хлорида (РАС) на структуру и понашање формираних флокова, као и на њихову стабилност у условима увођења ваздуха. Експерименти су спроведени применом стандардног JAR тест поступка, при чему су вариране дозе реагенаса у циљу утврђивања њиховог утицаја на формирање флокова и ефикасност уклањања арсена, органске материје и боје из подземне воде. Током експеримената вршена су визуелна посматрања формирања флокова, њихове стабилности и понашања током таложења и увођења ваздуха, што је омогућило додатно разумевање улоге РАС-а у стабилизацији флокула у систему коагулације–флотације.

Детаљан распоред узорака и примењених доза реагенаса у оквиру JAR 2 додатне серије испитивања приказан је у Табели 3.8.

Табела 3.8 Матрица експеримената JAR 2 додатне серија

Ознака узорка	FeCl ₃ (mg/l)	PAC M4 (mg/l)	PE (mg/l)	NaOCl (mg/l)	Напомена
D1	15	10	0,1	0	FeCl ₃ + PAC + PE
D2	20	15	0,1	0	FeCl ₃ + PAC + PE
D3	30	20	0,2	0	FeCl ₃ + PAC + PE
D4	40	25	0,2	0	FeCl ₃ + PAC + PE
D5	60	30	0,3	0	FeCl ₃ + PAC + PE
D12	30	20	0,2	10	+ предоксидација
D13	40	25	0,2	15	+ предоксидација
D14	50	30	0,3	20	+ предоксидација

Резултати ове серије експеримената представљају основу за анализу утицаја комбинације реагенса на ефикасност процеса и омогућавају поређење са резултатима претходних JAR серија.

Посебан акценат стављен је на оптимизацију дозе PAC коагуланта (BORAC M4) у присуству ниских концентрација полиелектролита (PE), уз контролисано варирање дозе FeCl₃. Испитивања су обухватила више карактеристичних комбинација реагенса, при чему су задржани исти хидродинамички услови JAR теста као у претходним серијама, како би се обезбедила директна упоредивост резултата. Укупно је анализирано више експерименталних тачака (D-серија), које су омогућиле процену утицаја додатка полимера на агрегацију микрофлокула, њихову механичку стабилност и понашање током седиментације.

У појединим одабраним узорцима примењена је и контролисана инјекција ваздуха након фазе седиментације, у циљу симулације услова који ће бити примењени у DAF JAR тестовима. На тај начин JAR 2 додатна серија представљала је прелазни корак између класичне коагулације и флотационог процеса, омогућавајући квалитативну процену понашања формираних флокула у присуству микромехурића.

Таложјење додатних узорака (JAR 2: D12–D14) приказано је на Слици 3.7.



Слика 3.7. JAR 2 додатна серија, узорци D12, D13 и D14 након таложења.

3.3.4 JAR 2 додатна серија 2

У завршној подфази прве етапе истраживања спроведена је JAR 2 додатна серија 2, са циљем упоредне процене утицаја различитих типова полиалуминијум-хлоридних коагуланата на ефикасност процеса коагулације и формирање флокула.

Посебна пажња посвећена је поређењу ефикасности коагуланата ВОРАС М4 и ВОРАС М5 у погледу формирања и стабилности флокова, при чему је задржан исти експериментални протокол као у претходним JAR тестовима, како би се обезбедила директна упоредивост резултата. Испитивања су конципирана тако да омогуће процену утицаја типа РАС коагуланта на формирање и стабилност флокула, као и на услове који су релевантни за накнадну примену DAF процеса. Детаљан распоред узорака и примењених доза реагенса приказан је у Табели 3.9.

Табела 3.9. Матрица експеримената JAR 2 додатне серије 2

Ознака узорка	FeCl ₃ (mg/l)	PAC (тип)	PAC (mg/l)	NaOCl (mg/l)	Напомена
D6	20	M5	20	0	FeCl ₃ + PAC M5
D7	30	M5	25	0	FeCl ₃ + PAC M5
13D2	30	M5	30	10	M5 + предоксидација
14D2	40	M5	30	20	M5 + предоксидација

Експериментални програм обухватио је одабране комбинације доза FeCl₃ и PAC коагуланта, уз задржавање контролисаних услова мешања и времена контакта. У појединим узорцима примењена је и предоксидација натријум-хипохлоритом, како би се проценио њен утицај у комбинацији са различитим типовима PAC коагуланта. Након фазе седиментације, у одабраним пробама спроведена је контролисана инјекција ваздуха ради квалитативне процене стабилности и понашања формираних флокова у условима блиским DAF процесу. .

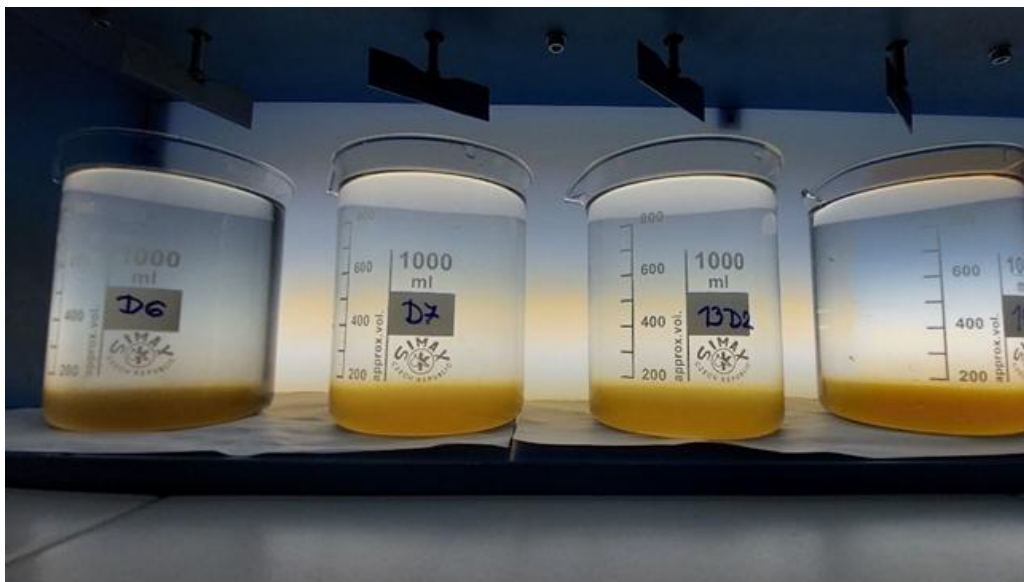
JAR 2 додатна серија 2 експеримената спроведена је са циљем да се додатно анализира понашање формираних флокова и њихова стабилност у условима таложења и увођења ваздуха. У овој серији испитивања посебна пажња посвећена је визуелном праћењу динамике формирања, дисперзије и поновне агрегације флокова у узорцима који садрже различите комбинације коагуланата и помоћних реагенса. Експерименти су изведени применом JAR тест поступка, при чему су анализирани ефекти различитих доза реагенса на формирање флокова, њихову стабилност и понашање током процеса таложења. Поред тога, праћен је утицај увођења ваздуха на структуру и пловност флокова, као и њихова способност поновне агрегације након прекида аерације, у лабораторијски симулираним условима.

Резултати ове серије омогућили су детаљније разумевање стабилности флокова у условима који симулирају флотацију раствореним ваздухом (DAF), као и процену улоге примењених реагенса у одржавању интегритета флокова током процеса.

Током испитивања визуелно је праћена динамика формирања, дисперзије и поновне агрегације флокова, као и процена њихове стабилности у условима таложења и увођења ваздуха. Анализирани су ефекти различитих доза реагенса на структуру флокова, њихову пловност и способност поновне агрегације након прекида аерације, у лабораторијски симулираним условима.

Резултати ове серије омогућили су детаљније разумевање стабилности флокова у условима који симулирају флотацију раствореним ваздухом (DAF), као и процену улоге примењених реагенса у очувању интегритета флокова током процеса. На овај начин JAR 2 додатна серија 2 представљала је завршни корак лабораторијске оптимизације коагулације у оквиру прве фазе истраживања, и обезбедила основу за избор најповољнијег типа коагуланта за даља испитивања применом DAF процеса.

Таложење другог сета додатних узорака JAR 2 (D6, D7, 13D2 и 14D2) приказано је на Слици 3.8.



Слика 3.8. JAR 2 додатна серија 2 узорци D6, D7, 13D2 и 14D2 након таложења.

Основу експерименталног програма чини стандардна лабораторијска JAR метода, која се уобичајено примењује за избор врсте и оптималне дозе коагуланта при пројектовању постројења за припрему воде за пиће. Међутим, експериментални програм у овом

истраживању значајно је проширен, јер је, поред испитивања различитих комбинација реагенса у процесима коагулације и флокулације, уведена и фаза убризгавања ваздуха, којом су симулирани услови флотације раствором ваздухом (DAF). На тај начин омогућено је да се, поред оптимизације коагулације, испита и понашање формираних флокула у условима флотације, што представља суштинску разлику у односу на класичан JAR тест.

3.4 Друга фаза - DAF JAR тестови на постројењу

Друга фаза експеримената усмерена је на испитивање утицаја термодинамичких параметара на процес третмана подземне воде применом JAR тестирања на лабораторијском DAF уређају на локацији постројења:

- Контролисано генерисање микромехурића у DAF систему: испитиван је утицај притиска у сатуратору на растворљивост ваздуха у води и услове формирања микромехурића у складу са Хенријевим законом;
- Утицај степена рецикулације: анализирано је како количина воде засићене ваздухом утиче на концентрацију унетог гаса, динамику дисперзије мехурића и стабилност флотационог слоја;
- Утицај времена уноса ваздуха и величине мехурића: испитиван је комбиновани ефекат ових параметара на формирање контактне зоне мехурић–флок и ефикасност издвајања суспендованих честица и метала;
- Термодинамички аспекти DAF процеса: анализирани су процеси растворљивости гасова, нуклеације мехурића након експанзије притиска и услови њихове стабилности у воденој фази;
- Формирање флотационог слоја: праћена је динамика формирања и стабилности флотационог слоја као индикатор ефикасности процеса флотације.

Ова друга фаза омогућила је оптимизацију лабораторијских услова и припрему за будућа испитивања на DAF јединици са већим волуменима воде и варијацијама параметара у условима реалне примене.

У оквиру друге фазе истраживања спроведена је серија DAF JAR тестова (Серија 5), са циљем да се квантитативно сагледа утицај радних услова DAF процеса на количину ослобођеног ваздуха, уз контролисане услове коагулације и флокулације. Серија 5 је организована у два засебна сета тестирања, при чему је у сваком сету изведено по четири DAF JAR теста.

У првом сету тестирања притисак у сатуратору је одржан на константној вредности (550 kPa), док су вариране дозе реагенса (FeCl_3 , PAC и флокулант), како би се испитала осетљивост система на промену хемијских услова при фиксном уносу ваздуха условљеном притиском. У другом сету тестирања притисак у сатуратору је постављен на другу константну вредност (500 kPa), а затим су спроведена четири теста са изабраним/коригованим комбинацијама доза реагенса у односу на први сет, ради поређења понашања система при различитом притиску, односно различитој количини раствореног и ослобођеног ваздуха.

У свим тестовима у оквиру Серије 5 остали услови су одржани константним: количина рецикулата (200 ml), поступак извођења DAF JAR теста и програм мешања, као и начин припреме узорка. Оваква поставка омогућава да се резултати тумаче кроз повезивање притиска у сатуратору са количином ослобођеног ваздуха (применом Хенријевог

закона), уз истовремено сагледавање утицаја различитих комбинација хемијских доза на стабилност флотације и ефикасност процеса.

У наредном потпоглављу (5.1.1) анализиран је утицај притиска у сатуратору на количину ослобођеног ваздуха у DAF JAR тесту, при чему су експериментални услови и прорачун количине ослобођеног ваздуха разматрани у контексту зависности Хенријевој константе од температуре.

3.4.1 Лабораторијска DAF поставка и принцип рада

Друга фаза истраживања била је усмерена на експериментално испитивање утицаја физичких и термодинамичких параметара DAF процеса на ефикасност издвајања формираних флокула из подземне воде специфичног хемијског састава. У ту сврху примењен је лабораторијски DAF JAR систем у шаржном режиму, који је омогућио контролисано генерисање и увођење микромехурића у претходно коагулисану и флокулацијом припремљену воду.

Основни принцип DAF процеса заснива се на растварању ваздуха у води под притиском и његовом накнадном ослобађању у виду микромехурића након експанзије. Уобичајено, сатурација се остварује у опсегу 4–6 bar, чиме се обезбеђује формирање стабилних микромехурића који су погодни за интеракцију са флоковима; након снижавања притиска растворени ваздух се ослобађа у виду мехурића пречника приближно 30–100 μm [31,32].

Мехурићи се везују за честице и флокуле, смањују њихову ефективну густину и омогућавају њихово подизање ка површини, где се формира флотациони слој који се затим уклања.

У складу са концептом шаржних DAF JAR испитивања, након завршене коагулације/флокулације у JAR чашама, у узорак је увођена вода засићена ваздухом (рециркулациони ток), при чему су притисак у сатуратору и други услови флотације вариран по експерименталним серијама (структура серија је дата у Поглављу 3.4.3), како би се у контролисаним условима изоловао утицај појединачних физичких параметара на ефикасност раздвајања. При томе су задржани исти принципи који су описани у теоријском делу рада (растварање ваздуха под притиском и ослобађање микромехурића након експанзије) [31,32]. Изглед лабораторијског система за спровођење DAF JAR тестова приказан је на Слици 3.9.



Слика 3.9.JAR DAF тестер

Поступак шаржног DAF JAR теста је дефинисан тако да обезбеди репродуктивност. У свакој серији је примењиван исти редослед операција (припрема узорка, формирање флокула, увођење микромехурића, време флотације и узорковање бистре фазе), док су варирани само параметри који су предмет анализе у конкретној серији (нпр. притисак у сатуратору, степен рецикулације или време уноса ваздуха), како би се добили упоредиви резултати у оквиру серије и између серија [31,32].

3.4.2 Поступак DAF JAR тестирања

Након уноса засићене воде, систем је остављан да мирује током дефинисаног времена флотације, након чега је бистра фаза узоркована са одређене дубине испод површине флотационог слоја. Дубина узорковања одређена је експериментално, на основу визуелног праћења положаја флотационог слоја и стабилности бистре фазе, тако да се узорак узимао из зоне у којој није долазило до мешања са флотационим муљем

Експериментални програм друге фазе организован је кроз пет серија DAF JAR испитивања (Табела 3.10, Серије 5–9), осмишљених тако да се издвоји и квантификује утицај појединачних процесних параметара на ефикасност DAF процеса. У оквиру серија испитиван је утицај притиска у сатуратору, степена рецикулације засићене воде, времена уноса ваздуха, као и њиховог комбинованог дејства, док су сви остали услови одржавани константним. Такав експериментални дизајн омогућио је да се независно процени допринос сваког параметра формирању и стабилности флотационог слоја, као и ефикасности издвајања загађујућих материја, што представља основу за оптимизацију рада DAF система [31,32].

У свакој серији испитивања експерименти су понављани под истим условима ради провере репродуктивности, док је узорковање бистре фазе спровођено пажљиво, како би се избегло ремећење формираног флотационог слоја. Овако дефинисан поступак омогућио је поуздану лабораторијску симулацију DAF процеса и обезбедио основу за упоредну анализу резултата приказаних у Поглављу 4.

Преглед експерименталних серија, варираних параметара и услова испитивања дат је у Табели 3.10.

Табела 3.10. Организација DAF JAR серија и варирани параметри

Серија	Основни циљ	Варирани параметар	Фиксни услови	Напомена
Серија 5	Утицај притиска сатурације	Притисак у сатуратору (4-6 bar)	Услови коагулације, рецикулација и време флотације константни	Шаржни DAF JAR
Серија 6	Утицај степена рецикулације	Степен рецикулације (10-25%)	Притисак и време флотације константни	Шаржни DAF JAR
Серија 7	Утицај времена уноса ваздуха	Време уноса ваздуха (60-240 s)	Притисак и рецикулација константни	Шаржни DAF JAR
Серија 8	Комбиновани услови	Одабране комбинације параметара	Основни услови коагулације константни	Верификациона серија
Серија 9	Потврда оптимума	Фино подешавање параметара	Параметри из претходних серија	Контролна серија

Овако дефинисана методологија DAF JAR тестирања омогућила је систематично испитивање утицаја кључних оперативних параметара и представља основу за анализу резултата приказаних у наредном поглављу.

3.4.3 Експериментални услови и визуелни приказ DAF JAR серија

Експериментални програм друге фазе истраживања конципиран је као систематски дефинисан низ DAF JAR серија у којима су варирани кључни физички параметри процеса флотације, док су хемијски услови коагулације и флокулације задржани константним.

Избор варираних параметара заснован је на физичко-хемијским механизмима описаним у теоријском делу рада (Поглавље 2), који обухватају зависност растворљивости гаса од притиска, механизме нуклеације и раста мехурића, као и динамику њихове интеракције са флокулама. На основу ових принципа, притисак у сатуратору, степен рецикулације и време уноса ваздуха идентификовани су као параметри који директно утичу на услове формирања и стабилности флотационог слоја.

Притисак у сатуратору дефинише количину раствореног ваздуха у води у складу са Хенријевим законом, према коме растворљивост гаса расте са повећањем притиска [23]. Након редукције притиска у реакционој зони долази до нуклеације и формирања микромехурића, чија величина и број зависе од иницијалног притиска засићења [7]. Степен рецикулације представља параметар који одређује количину засићене воде која се уводи у систем и директно утиче на концентрацију унетог ваздуха и хидрауличке услове у реакционој зони [18,49]. Време уноса ваздуха контролише динамику дисперзије мехурића и просторну расподелу унутар запремине узорка, чиме се утиче на формирање контактне зоне између мехурића и флокула [43]. Одабрани опсези вредности дефинисани

су тако да буду технолошки реални и у складу са оперативним условима DAF система који се примењују у постројењима за припрему воде за пиће.

Испитивања су организована кроз више експерименталних серија. Преглед улазних параметара по серијама дат је у Табели 3.11.

Табела 3.11. Улазни параметри DAF JAR серија (Серије 5–9)

Серија	Варирани параметар	Притисак (bar)	Рециркулација (%)	Време уноса ваздуха (s)	Време флотације (min)	Запремина (l)
5	Притисак у сатуратору / два сета	5–5,5	10-11	60	15	1
7	Време уноса ваздуха	5,5	10	60-240	15	1
8	Комбиновани услови	5,5	0-10	180–360	15	1
9	Време уноса ваздуха	5,5	15	150–360	15	1

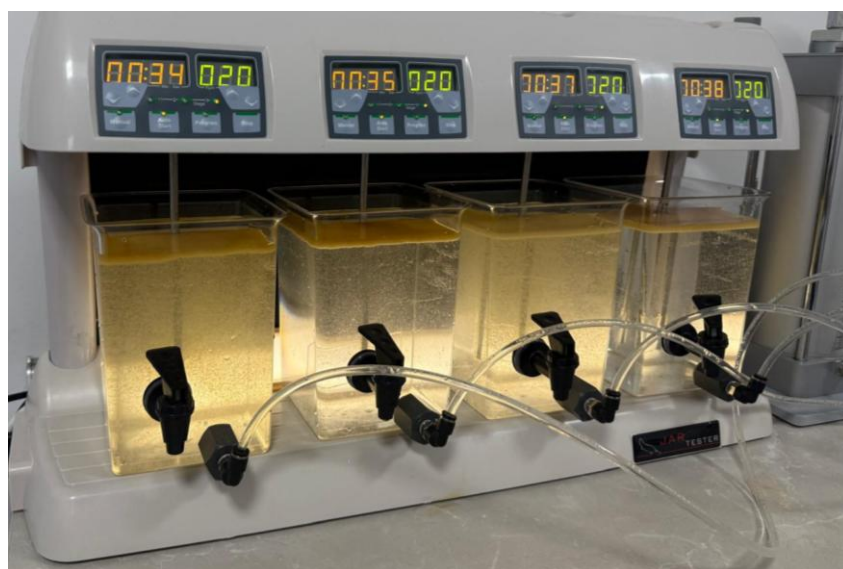
Експериментални програм друге фазе обухватио је пет серија DAF JAR испитивања, са по четири експеримента у свакој серији (укупно 20 експеримената), при чему су систематски варирани одабрани физички параметри DAF процеса. У Серији 5 испитиван је утицај притиска у сатуратору кроз два сета експерименталних услова, при притисцима од 5 и 5,5 bar и степену рециркулације од 10 / 11%, док су време уноса ваздуха (60 s) и време флотације (15 min) били константни. Серија 6 спроведена је као прелиминарна серија у циљу провере оперативних параметара система. Уочена одступања у условима рада указала су на потребу за додатним прилагођавањем експерименталне поставке, те резултати ове серије нису укључени у даљу анализу. Након оптимизације услова рада, експериментални програм је настављен кроз наредне серије испитивања. У Серији 7 варирано је време уноса ваздуха у опсегу 60–240 s, при константном притиску од 5,5 bar и степену рециркулације од 10%. Притисак од 5,5 bar изабран је као референтни радни услов, јер се налази у опсегу који се најчешће примењује у лабораторијским и индустријским DAF системима (4–6 bar) и обезбеђује формирање довољне количине стабилних микромехурића погодних за ефикасну флотацију. При нижим притисцима количина раствореног ваздуха и број формираних микромехурића могу бити недовољни, док повећање притиска изнад овог опсега обично не доводи до значајног повећања ефикасности процеса, уз истовремено веће енергетске захтеве. Због тога је притисак од 5,5 bar усвојен као компромис између ефикасности процеса и оперативне економичности. Серија 8 обухватила је комбиновано варирање процесних услова, при чему је притисак био 5,5 bar, док је степен рециркулације вариран у опсегу 0–10%, а време уноса ваздуха у опсегу 180–360 s. У Серији 9 анализирано је време уноса ваздуха у опсегу 150–360 s, при константном притиску од 5,5 bar и степену рециркулације од 15%. Оваква организација серија омогућила је постепено проширивање експерименталног опсега, од анализе појединачних утицаја до испитивања комбинованих услова рада.

Структурирање испитивања по серијама обезбедило је постепено проширивање опсега истраживања – од анализе појединачних утицаја до испитивања комбинованих процесних услова – при чему је у сваком кораку задржана могућност јасног раздвајања узрочно-последичних односа између варираног параметра и понашања система.

Контролисање притиска у сатуратору, степена рецикулације и времена уноса ваздуха омогућило је испитивање механизма растворљивости гаса, нуклеације мехурића и динамике контактне зоне мехурић–флок у строго дефинисаним лабораторијским условима. На тај начин створена је поуздана основа за каснију анализу ефеката појединачних и комбинованих процесних параметара, уз минимизовање утицаја неконтролисаних варијабли.

Методолошка поставка приказана у Табели 3.11 омогућава директно повезивање експерименталних услова са физичко-хемијским основама DAF процеса описаним у литератури [18,25,49], чиме је обезбеђена теоријска утемељеност истраживања и његова примењивост у реалним условима рада постројења за припрему воде. Истовремено, оваква организација серија представља логичку основу за структуру анализе резултата приказану у Поглављу 4, где су појединачни утицаји параметара разматрани кроз засебне целине.

Слика 3.10 показује JAR DAF тестерање током експеримената у серијама 5 и 7, у којима су испитивани утицај притиска у сатуратору и степена рецикулације на процес флотације. Уочава се присуство великог броја ситних мехурића ваздуха равномерно распоређених у воденој фази, што указује на успешно растварање ваздуха у систему и његово ослобађање у облику микромехурића неопходних за процес флотације.



Слика 3.10. JAR DAF тестерање током уноса ваздуха током експеримената (серије 5 и 7)

Приказ узорака након завршетка фазе мешања, током периода мировања је дат на Слици 3.11 за Серију 7. Формирање слоја флотационог муља на површини воде и постепено бистрење водене фазе указују на ефикасну адхезију мехурића ваздуха на флокуле и њихово издизање ка површини услед процеса флотације.



Слика 3.11.JAR DAF тестирање након завршне фазе мешања (Серија 7)

У серији 8 испитиван је утицај комбинованих оперативних услова (притисак у сатуратору, степен рецикулације и време уноса ваздуха) на процес флотације. Као што се може уочити на слици 3.12, у реакционим посудама присутан је велики број ситних мехурића ваздуха који су равномерно распоређени у воденој фази.



Слика 3.12.Експеримент у серији 8 при комбинованим условима

У серији 9 испитиван је утицај времена уноса ваздуха (30–90 s) на процес флотације. Разлике у расподели мехурића и изгледу водене фазе у појединачним реакционим посудама могу се уочити на слици 3.13, што указује на утицај количине унетог ваздуха на интензитет процеса флотације.



Слика 3.13. Експеримент у серији 9 при различитом времену уноса ваздуха

4 Резултати

4.1 Карактеризација сирове воде

Карактеризација сирове воде представља полазну основу за процену ефикасности процеса третмана и избор оптималних услова коагулације и флокулације. Састав и физичко-хемијске карактеристике воде директно утичу на механизме уклањања загађујућих материја, стабилност формираних флокова и укупну ефикасност процеса сепарације.

Сирова вода коришћена у овом истраживању потиче из подземног изворишта и карактерише се повишеним концентрацијама арсена, присуством органске материје и израженом бојом воде, што представља значајан изазов у процесу третмана. Поред концентрације арсена, посебна пажња посвећена је параметрима који указују на присуство природне органске материје, пре свега вредности боје и укупне органске материје изражене параметром ТОС, будући да ови параметри могу утицати на ефикасност коагулације и формирање стабилних флокова.

У природним подземним водама концентрације арсена су најчешће у опсегу од 1 до 10 $\mu\text{g/l}$, док у појединим геохемијски специфичним подручјима могу достићи значајно више вредности. У Србији и региону Панонске низије забележене су концентрације арсена у подземним водама у опсегу од 10 до 100 $\mu\text{g/l}$, што се доводи у везу са редукционим условима у седиментима богатим гвожђем и органском материјом. Концентрација арсена у води коришћеној у овом истраживању износила је 83 $\mu\text{g/l}$ (0,083 mg/l), што је приближно осам пута више од максимално дозвољене концентрације од 10 $\mu\text{g/l}$ прописане регулативом за воду за пиће.

Физичко-хемијске карактеристике сирове воде, укључујући вредност рН, мутноћу, боју, концентрацију арсена и вредност ТОС, приказане су у Табели 4.1. Добијене вредности указују на комплексност састава воде и потребу за оптимизацијом услова третмана у циљу истовременог уклањања неорганских и органских загађујућих материја.

Табела 4.1 Физичко-хемијске карактеристике сирове воде, укључујући вредност рН, мутноћу, боју, концентрацију арсена и вредност

Параметар	Јединица	Сирова вода	Опсег вредности	МДК [1]
Боја	°Pt-Co	60	40–70	5
Мутноћа	NTU	0,65	0,20–1,00	1
Температура	°C	17	13–17	Температура изворишта
Електрична проводљивост (25 °C)	$\mu\text{S/cm}$	1190	1135–1276	2500
Растворени кисеоник	mg/l	<0,5	–	–
рН вредност	–	7,72	7,2–8,7	6,8–8,5
Укупне растворене материје	mg/l	625	600–700	–
Амонијак	mg/l	1,5	0,7–1,9	0,5
Нитрати	mg/l	<0,5	–	50
Нитрити	mg/l	<0,01	–	0,03
Хлориди	mg/l	11,6	8–25	250
Сульфати	mg/l	<5	5–10	250
Укупни фосфати (као P)	mgP/l	0,6	0,57–0,62	–

Силицијум	mg/l	8,1	–	–
Сумпороводоник	mg/l	0,015	–	Нема
Укупни органски угљеник (ТОС)	mg/l	11	9–12	–
Потрошња KMnO_4	mg/l	40	–	12
Метан	mg/l	12–21	–	–
Гвожђе	mg/l	0,29	0,2–0,8	0,3
Манган	mg/l	0,032	0,005–0,7	0,05
Калцијум	mg/l	23,9	–	200
Магнезијум	mg/l	14,2	–	50
Натријум	mg/l	291	190–300	200
Калијум	mg/l	1,2	–	12
Алуминијум, укупни	mg/l	<0,02	–	0,2
Антимон	mg/l	<0,001	0,008–0,220	0,003
Арсен	mg/l	0,083	0,050–0,130	0,01
Олово	mg/l	<0,001	–	0,01
Бор	mg/l	1,1	1–1,2	1
Кадмијум	mg/l	<0,0001	–	0,003
Хром	mg/l	<0,001	–	0,05
Бакар	mg/l	<0,01	–	2
Никл	mg/l	<0,001	–	0,02
Селен	mg/l	<0,001	0,001–0,007	0,01
Жива	mg/l	<0,0005	–	0,001

Вредности боје и ТОС у подземним водама обично су релативно ниске, најчешће испод 5 mg/l за ТОС и испод 10 °Pt–Co за боју. У водама са повећаним садржајем природне органске материје, као што су воде из алувијалних седимената, ове вредности могу бити значајно више услед присуства хуминских и фулвинских киселина. У испитиваној води вредност боје износила је 60 °Pt–Co, што је дванаест пута више од прописане граничне вредности од 5 °Pt–Co, док је концентрација ТОС износила 11 mg/l, што указује на изражено органско оптерећење воде.

Присуство арсена у подземним водама представља значајан здравствени ризик, због чега је његово уклањање један од кључних циљева процеса третмана воде [1,2,11]. Арсен се у природним водама јавља у различитим оксидационим стањима и облицима, чије понашање током процеса коагулације зависи од рН вредности, редокс услова и присуства металних јона. Уклањање арсена у процесу коагулације заснива се пре свега на адсорпцији и копреципитацији са формираним хидроксидима гвожђа.

Поред арсена, значајан утицај на процес третмана има и NOM, која доприноси боји воде и може утицати на стабилност флокова, потрошњу коагуланта и ефикасност уклањања загађујућих материја [19,29]. Уклањање органске материје представља сложен процес који обухвата механизме адсорпције, коагулације и сепарације честица.

Концентрација природне органске материје у подземним водама обично је релативно ниска и најчешће се креће у опсегу од 0,5 до 3 mg/l изражено као ТОС, док су вредности боје најчешће испод 10 °Pt–Co. Повишене вредности ових параметара карактеристичне су за воде које потичу из алувијалних седимената богатих органском материјом, где долази до растварања хуминских и фулвинских киселина у подземној води.

У испитиваној подземној води концентрација ТОС износила је 11 mg/l, што је приближно три до десет пута више од типичних вредности за подземне воде, док је вредност боје износила 60 °Pt–Co, што је дванаест пута више од максимално дозвољене вредности од

5 °Pt-Co за воду за пиће. Ове вредности указују на значајно присуство растворене природне органске материје и потврђују да вода припада категорији органски оптерећених подземних вода.

Повишене концентрације органске материје у подземној води повезане су са геолошким и хидрогеохемијским условима водоносног слоја, пре свега са присуством органских наслага, редукционим условима и дугим временом задржавања воде у седиментима, што омогућава растварање и транспорт хуминских једињења у водену фазу. Ови услови су типични за подземне воде у алувијалним наносима Панонске низије и представљају један од кључних фактора који утичу на избор технологије третмана воде.

Вредности приказане у колони „Сирова вода“ представљају аритметичку средину резултата анализа 30 узорак ($n = 30$) сирове подземне воде, прикупљених свакодневним узорковањем у оквиру редовног мониторинга квалитета воде, чиме је обухваћена краткорочна варијабилност система.

Анализа квалитета сирове подземне воде приказана у Табели 4.1 указује на више значајних карактеристика које су релевантне за процес припреме воде за пиће. Вредност боје износи 60 °Pt-Co, што значајно премашује прописану граничну вредност од 5 °Pt-Co и указује на присуство растворене органске материје и других једињења која доприносе обојености воде. Средња вредност концентрационог нивоа ТОС износи 11 mg/L, што указује на умерено органско оптерећење које може утицати на ефикасност процеса третмана воде и стабилност процеса уклањања органских материја [19,29].

Вредности мутноће су релативно ниске (0,65 NTU), док рН вредност од 7,72 и температура воде од 17 °C указују на услове који су повољни за примену процеса коагулације и флокулације. Концентрације већина неорганских компоненти, укључујући гвожђе, манган, калцијум, магнезијум и поједине елементе у траговима, су у оквиру или испод прописаних максимално дозвољених концентрација.

Међутим, поједини параметри показују средње вредности које премашују регулаторне границе, пре свега натријум (291 mg/L), амонијак (1,5 mg/L), потрошња KMnO_4 (40 mg/L) и арсен (0,083 mg/L), што указује на значајне изазове у процесу третмана воде.

Концентрација раствореног кисеоника је веома ниска ($<0,5$ mg/l), што указује на доминантно редукционе услове у подземној води, у којима нитрати и нитрити нису стабилни, те су њихове концентрације занемарљиве. Присуство сумповодоника детектовано је у ниским концентрацијама (0,015 mg/L), што такође потврђује заступљеност редукционих процеса, карактеристичних за анаеробне услове у подземној води. За овај параметар није дефинисана максимално дозвољена вредност.

Укупно посматрано, добијени резултати указују да је за третман сирове подземне воде неопходна примена вишестепеног процеса третмана који омогућава уклањање како хемијских тако и физичких загађујућих материја, са посебним нагласком на уклањање боје, амонијака, органске материје и нарочито арсена, што представља основу за даља лабораторијска испитивања у оквиру JAR тестова.

4.2 Резултати прве фазе: JAR тестови

Прва фаза истраживања обухватила је систематска лабораторијска испитивања применом JAR тестова у циљу оптимизације хемијских услова процеса третмана воде и процене ефикасности коагулације и флокулације у уклањању арсена, боје воде и укупне органске материје изражене параметром ТОС из сирове воде. Ова фаза представља основу за разумевање механизма уклањања загађујућих материја током процеса третмана воде и полазну основу за даља испитивања у оквиру друге фазе рада.

У оквиру ове фазе спроведене су четири серије класичних JAR тестова, при чему је изведено укупно 40 појединачних експеримената. Испитивања су обухватила варијације у дозама коагуланта, комбинацијама реагенса и условима формирања флокова, како би се анализирао њихов утицај на уклањање растворених и колоидних компонената присутних у води. Тестирања су спроведена у условима контролисаног брзог и спорог мешања и дефинисаног времена седиментације, што омогућава симулацију процеса који се примењују у постројењима за припрему воде и процену оптималних услова дозирања реагенса [9,21].

Посебна пажња посвећена је праћењу концентрације арсена, вредности боје и укупне органске материје као кључних параметара квалитета воде, будући да они представљају значајне индикаторе ефикасности процеса коагулације и стабилности третмана. Анализа ових параметара омогућава процену доминантних механизма уклањања загађујућих материја, пре свега адсорпције и копреципитације арсена на формираним хидроксидима гвожђа, као и уклањања органских компонената путем процеса коагулације, флокулације и седиментације [1,2,11,19].

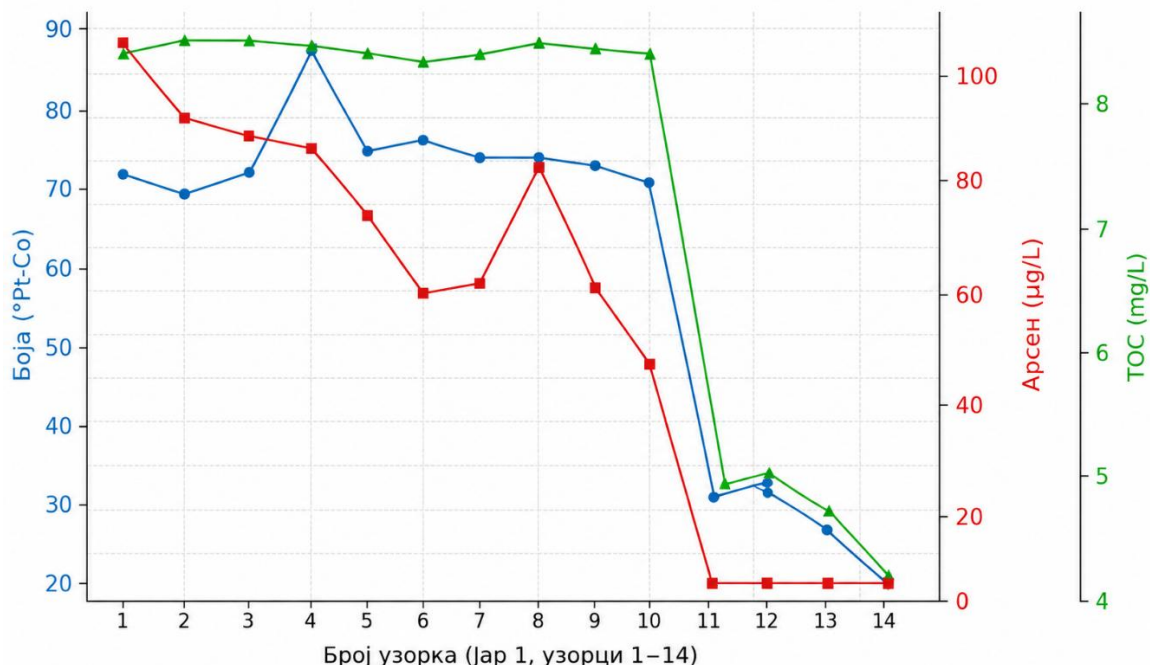
Резултати добијени у овој фази омогућавају идентификацију оптималних услова коагулације и указују на ограничења класичног JAR приступа у уклањању појединих фракција органске материје, што је представљало основу за увођење напреднијих метода сепарације у наставку истраживања. Полазећи од ових резултата, у другој фази рада испитиван је утицај физичких услова сепарације применом DAF JAR тестова.

4.2.1 Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 1 Серија

Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје након третмана спроведених JAR тестова приказан је на Слици 4.1. Резултати се односе на JAR 1 серију, у којој су испитиване дозе FeCl_3 у опсегу од 10 до 50 mg/l, уз додатна испитивања са предоксидацијом NaOCl (10–20 mg/l) и комбинованом применом PAC коагуланта (BORAC M4, 20–30 mg/l), како је приказано у Табели 3.3. Резултати показују да повећање дозе коагуланта доводи до значајног смањења концентрације сва три параметра, што указује на високу ефикасност процеса коагулације. Уклањање арсена заснива се на процесима хидролизе Fe^{3+} јона и формирању аморфних $\text{Fe}(\text{OH})_3$ флокула, који омогућавају адсорпцију и ко-преципитацију арсенатних јона из раствора, у складу са механизмима описаним у Поглављу 2 [29]. Истовремено, уклањање органске материје, праћено кроз промене вредности параметра ТОС, резултат је адсорпције растворених органских једињења на површини формираних флокула, као и њихове агрегације и издвајања из водене фазе, у складу са механизмима коагулације и формирања флокула описаним у Поглављу 2.

Промене вредности боје током испитивања показују сличан тренд као и ТОС, што потврђује да је боја воде превасходно последица присуства растворених хуминских и фулвинских супстанци. Уклањање ових компоненти директно је повезано са механизмом

коагулације и формирањем стабилних флокула, који омогућавају ефикасно издвајање органске материје из раствора [19]. Уочена корелација између смањења концентрације арсена и органске материје указује на значај процеса коагулације као кључног корака у третману подземних вода сложеног хемијског састава.



Слика 4.1.Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 1 Серија [2].

Детаљнији преглед ефикасности уклањања боје, укупног органског угљеника (ТОС) и арсена у оквиру серије JAR 1 приказан је у Табели 4.1. Табела обухвата почетне вредности, опсеге финалних концентрација, најбоље постигнуте вредности, као и процентуално смањење концентрација испитиваних параметара. Резултати показују да је примена полиалуминијум-хлорида (РАС), у комбинацији са FeCl_3 (узорци S11–S14), довела до значајног побољшања формирања и стабилности флокула, што је резултирало најнижим измереним концентрацијама и највишим степеном уклањања испитиваних параметара. Насупрот томе, примена искључиво FeCl_3 коагуланта (узорци S2–S7) довела је до формирања мањих и мање стабилних флокула, што је условило ограничењу ефикасност уклањања и мање изражено побољшање квалитета воде.

Табела 4.2. Проценат уклањања арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 1 Серија [2]

Параметар	Почетна вредност (JAR 1–1)	Крајња Вредност (JAR S1–S14)	Најбоља вредност	Проценат уклањања	Јединица
Color	74	16–33	16	78%	°Pt-Co
TOC	9,22	4,14–5,23	4,14	55%	mgC/l
Arsenic	108,7	10	10	91%	µg/l

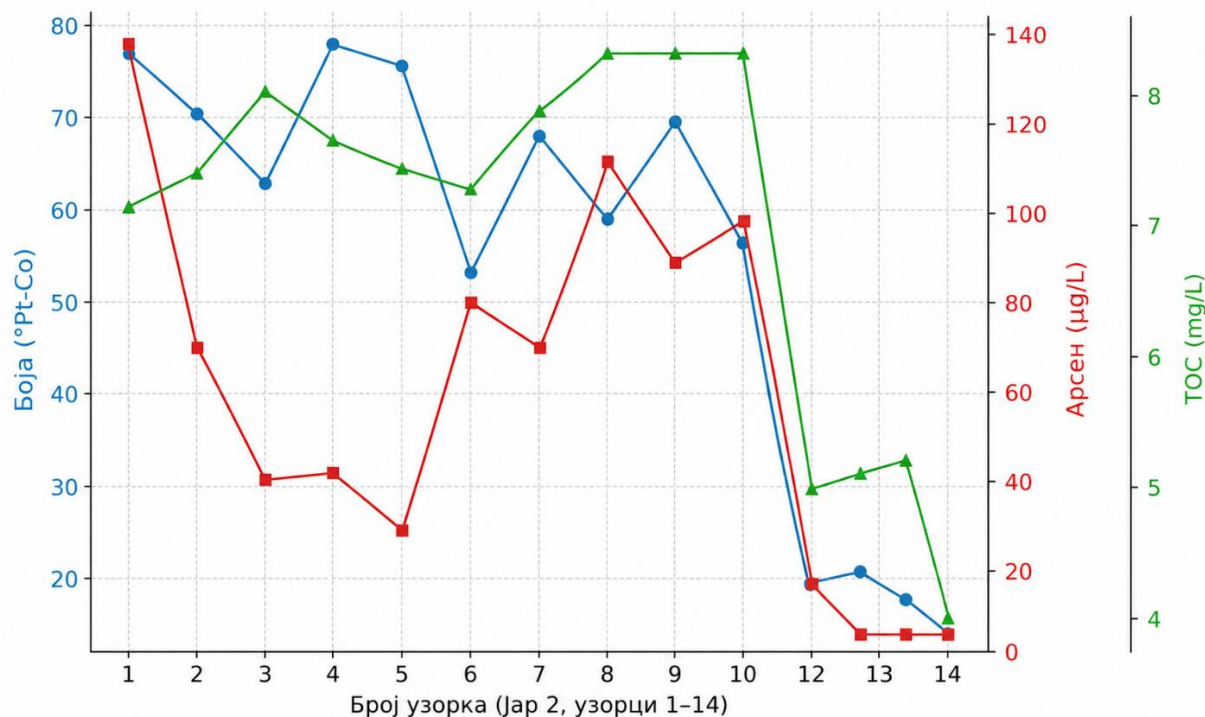
Испитивања која су укључивала аерацију (узорци S12 и S13) показала су да унос ваздуха доводи до привремене дестабилизације и дисперзије формираних флокула, али је након

престанка аерације дошло до њихове поновне агрегације и формирања бистријег супернатанта. Ова појава указује на довољну структурну стабилност формираних флокула и потврђује потенцијал примене флотације раствореним ваздухом у наредним фазама третмана. Укупно посматрано, комбинација FeCl_3 и РАС коагуланата показала је највиши степен ефикасности у уклањању арсена, органске материје и боје, што је у складу са резултатима приказаним у објављеном раду [2] и потврђује значај оптимизације комбинације коагуланата за постизање максималне ефикасности третмана подземних вода сложеног састава.

4.2.2 Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 Серија

Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје након третмана приказан је на Слици 4.2. Резултати показују да повећање дозе коагуланта доводи до израженијег смањења концентрације испитиваних параметара у односу на прву серију, што указује на побољшану ефикасност процеса коагулације.

Промене концентрације ТОС и боје показују висок степен корелације, што потврђује да је боја воде директно повезана са присуством органских супстанци. Ефикасно уклањање ових компоненти указује на побољшано формирање флокула и повећану стабилност система у условима повећаних доза коагуланта.



Слика 4.2.Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 Серија [2].

Проценти уклањања приказани у Табели 4.3 показују да примена комбинације FeCl_3 и РАС коагуланата омогућава постизање високог степена уклањања арсена, ТОС и боје. У поређењу са резултатима добијеним у првој серији, уочава се повећана ефикасност процеса, што указује на значај оптимизације дозе коагуланта за постизање максималног степена уклањања.

Табела 4.3.Проценат уклањања арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 Серија [2]

Параметар	Почетна вредност (JAR 2 S1, Сирова вода)	Крајња вредност (JAR 2 S11–S14)	Најбоља вредност	Проценат уклањања	Јединица	Напомене
Боја	78–95	18–35	18	70–80%	°Pt-Co	РАС додатно побољшава формирање флокула и стабилност
ТОС	9,0–9,5	4,2–5,3	4,2	45–55%	mgC/l	РАС + FeCl ₃ , убрзава таложење
Арсен	100–110	10–12	10	88–90%	µg/l	Додавање РАС постиже највећи степен уклањања

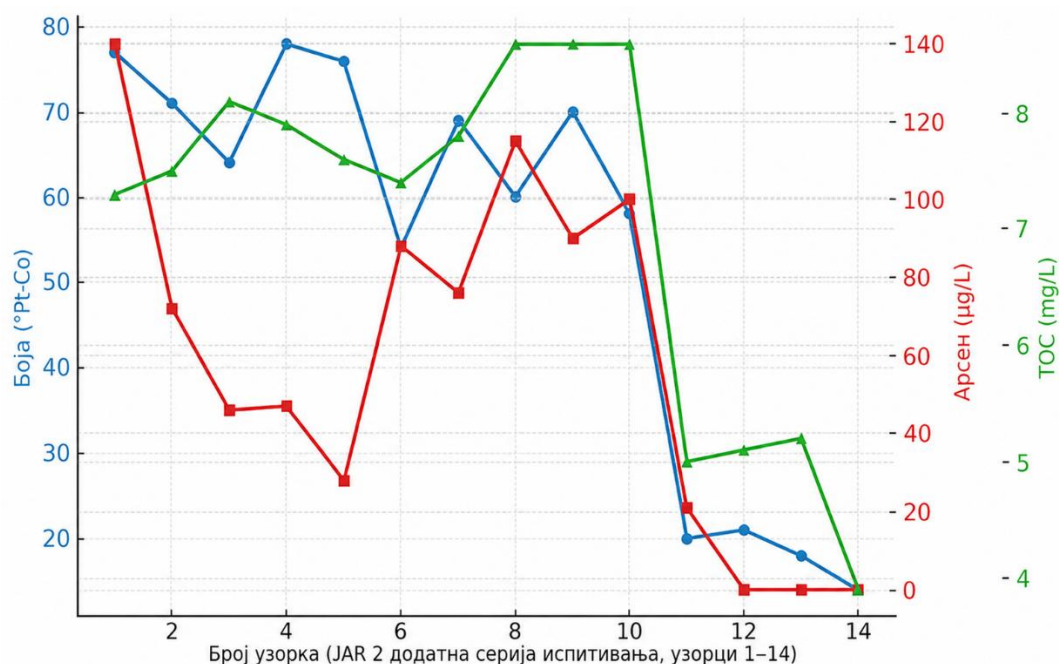
Резултати ове серије потврђују да правилан избор и комбинација коагуланата имају кључну улогу у постизању ефикасног уклањања арсена и органске материје, што представља важан предуслов за даљу примену DAF процеса у третману подземних вода.

4.2.3 Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатна серија испитивања

JAR 2 додатна серија испитивања спроведена је са циљем оптимизације процеса коагулације применом комбинације FeCl₃, РАС и полимерног флокуланта (PE), како би се побољшала ефикасност уклањања арсена, органске материје и боје у односу на претходне серије испитивања. Увођење полимерног флокуланта имало је за циљ побољшање процеса агрегације честица и формирање крупнијих и стабилнијих флокула, што представља важан предуслов за ефикасно издвајање честица у каснијим фазама третмана, укључујући и примену DAF технологије [2].

Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје након третмана приказан је на Слици 4.3. Резултати показују да примена комбинације коагуланата и флокуланта доводи до значајног побољшања ефикасности уклањања у односу на серије у којима је примењен само примарни коагулант. Присуство полимерног флокуланта омогућило је ефикасније повезивање и агрегацију формираних флокула, што је резултирало побољшаним издвајањем суспендованих и колоидних честица, као и растворених компоненти везаних за органску материју [19].

Смањење концентрације арсена у овој серији испитивања указује на побољшану ефикасност адсорпције и ко-преципитације арсенатних јона на површини формираних флокула, што је директна последица побољшаних услова флокулације. Истовремено, значајно смањење концентрације ТОС и боје потврђује повећану ефикасност уклањања органске материје, која представља један од главних фактора који утичу на квалитет воде и стабилност система [29].



Слика 4.3.Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатна серија испитивања [2].

Проценти уклањања приказани у Табели 4.4 потврђују да примена комбинације FeCl_3 , РАС и полимерног флокуланта омогућава постизање високог степена ефикасности уклањања испитиваних параметара. Увођење полимерног флокуланта довело је до побољшане стабилности флокула и повећане ефикасности процеса седиментације, што представља важан корак у оптимизацији процеса припреме воде.

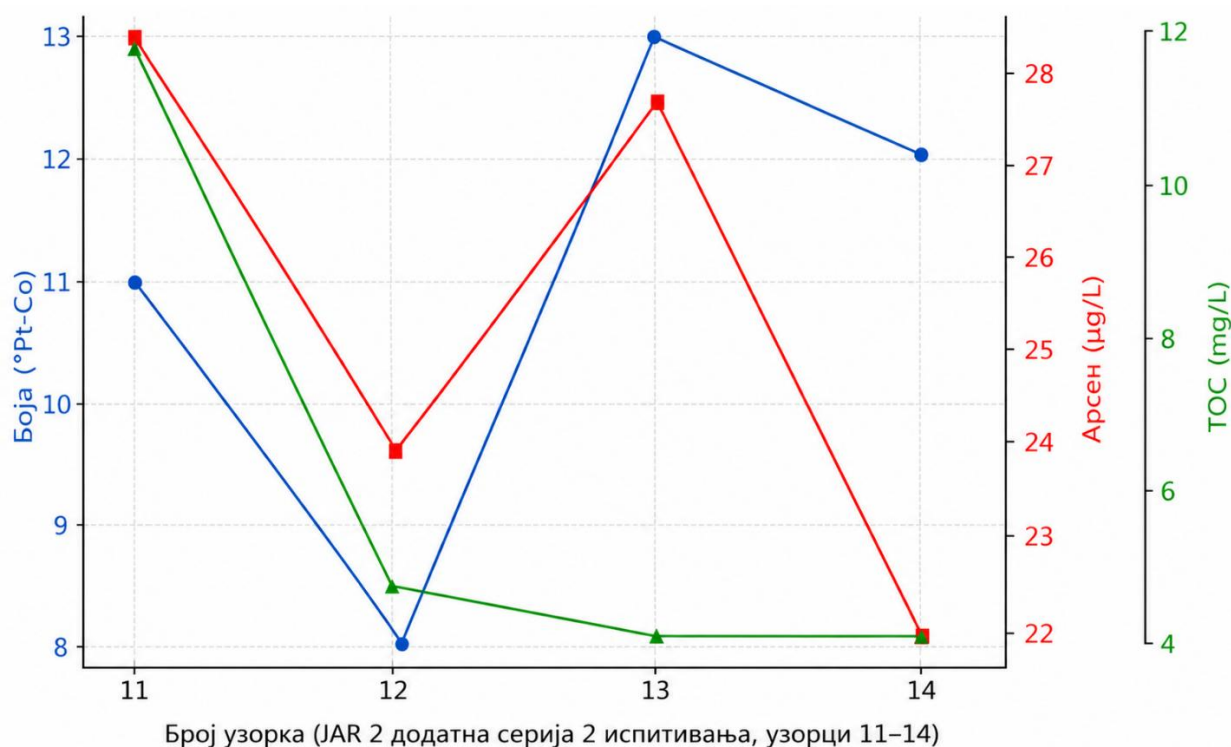
Табела 4.4.Проценат уклањања арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR додатне серије испитивања [2]

Параметар	Почетна вредност (JAR 2 додатна серија - S1, Сирова вода)	Крајња вредност (JAR 2 додатна серија S11–S14)	Најбоља вредност	Проценат Уклањања	Јединица	Напомене
Боја	75–80	14–21	14	70–80%	°Pt-Co	Више дозе РАС (20–40 mg/l) значајно су побољшале уклањање боје; РЕ није показао позитиван утицај.
ТОС	7,5–8,5	3,9–5,2	3,9	45–55%	mgC/l	Комбиновано дозирање FeCl_3 и РАС побољшало је ефикасност коагулације и убрзало таложење органске материје.
Arsen	130–140	0–21	0	≥90%	µg/l	Највеће уклањање постигнуто је у узорцима 12D–14D; комбинација FeCl_3 и РАС дала је оптималне резултате.

4.2.4 Уклањање арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатна серија 2 испитивања

Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје након третмана приказан је на Слици 4.4. Резултати показују да примена различитих типова РАС коагуланата има значајан утицај на ефикасност процеса коагулације. Уочено је да комбинација FeCl_3 и РАС коагуланта омогућава побољшано формирање флокула, што доводи до ефикаснијег уклањања арсена и органске материје из водене фазе. Формирање стабилнијих флокула омогућило је ефикасније издвајање честица током фазе седиментације, што је резултирало нижим финалним концентрацијама испитиваних параметара [19,29].

Промене концентрације ТОС и боје показују да избор типа РАС коагуланта има значајан утицај на ефикасност уклањања органске материје. Побољшана ефикасност уклањања боје указује на ефикасније уклањање растворених органских компоненти, што је директно повезано са побољшаним условима коагулације и стабилношћу формираних флокула. Ови резултати потврђују значај избора оптималног коагуланта као кључног фактора у процесу припреме воде.



Слика 4.4.Компаративни приказ концентрације арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатне серије 2 испитивања [2].

Проценти уклањања приказани у Табели 4.5 показују да комбинација FeCl_3 и РАС коагуланата омогућава постизање високог степена ефикасности уклањања арсена, ТОС и боје.

Табела 4.5.Проценат уклањања арсена, ТОС и боје током JAR испитивања – JAR 2 додатне серије 2 испитивања [2]

Параметар	Почетна вредност (JAR 2 додатна серија 2 - S1, Сирова вода)	Крајња вредност (JAR 2 додатна серија 2 S11–S14)	Најбоља вредност	Проценат Уклањања %	Јединица	Напомене
Боја	75–80	8–13	8	80–85	°Pt-Co	ВОРАС М5 је побољшао ефикасност уклањања боје у поређењу са М4
ТОС	11,8	3,1–4,0	3,1	65–75	mgC/l	Значајно смањење постигнуто је применом више дозе РАС (30 mg/l)
Арсен	100–110	21,8–28,5	21,8	75–80	µg/l	Бољи резултати постигнути су применом ВОРАС М4 у поређењу са М5

Добијени резултати указују да правилан избор типа РАС коагуланта има значајан утицај на ефикасност третмана подземне воде, и представља важан корак у дефинисању оптималних услова за примену напредних процеса третмана воде.

4.2.5 Закључци прве фазе испитивања - JAR тестови

Прва фаза истраживања омогућила је избор оптималних услова коагулације и флокулације за даље испитивање DAF процеса. На основу резултата више серија JAR тестова дефинисане су оптималне комбинације коагуланата и њихове дозе, као и услови формирања стабилних флокула, који су усвојени као полазни услови за другу фазу истраживања. На тај начин обезбеђено је да се у другој фази анализира искључиво утицај процесних параметара DAF-а, без утицаја промене хемијских услова коагулације и флокулације.

Резултати су показали да примена $FeCl_3$ коагуланта омогућава ефикасно уклањање арсена механизмима адсорпције и ко-преципитације, али самостално не обезбеђује формирање довољно стабилних флокула за ефикасно уклањање органске материје и боје. Комбинована примена $FeCl_3$ и РАС коагуланата омогућила је формирање крупнијих и стабилнијих флокула, што је довело до повећане ефикасности уклањања свих испитиваних параметара.

Као оптималан експеримент у JAR 1 серији издвојен је узорак S14, док је у JAR 2 серији најбоље резултате такође остварио узорак S14. У JAR 2 додатној серији испитивања као оптималан је издвојен експеримент 14D, док је у JAR 2 додатној серији 2 најбоље резултате показао експеримент 13D2 применом коагуланта ВОРАС М5. Ови резултати

представљали су основу за избор оптималних услова коагулације и флокулације примењених у другој фази истраживања.

Синтеза резултата JAR испитивања приказана је у Табели 4.6, која обухвата почетне вредности, опсеге финалних концентрација, најбоље постигнуте вредности и ефикасност уклањања испитиваних параметара за оптималне експерименте сваке серије.

Табела 4.6 Синтеза резултата JAR испитивања – почетне вредности, финални опсези, најбоље постигнуте вредности и ефикасност уклањања [2].

Серија	Ознака оптималног JAR теста	Уклањање боје (%)	Уклањање TOC (%)	Уклањање As (%)	Комбинација коагуланата	Напомене
JAR 1	S14	82	65	88	FeCl ₃ + PAC	Полазна оптимизација
JAR 2	S14	84	68	90	FeCl ₃ + PAC	Побољшани однос PAC-а
JAR 2 Додатна серија испитивања	14D	85	70	89	FeCl ₃ + PAC	Побољшана стабилност флокула
JAR 2 Додатна серија 2 испитивања	13D2	86	72	88	FeCl ₃ + BOPAC M5	Висока ефикасност уклањања боје

4.3 Резултати друге фазе: DAF JAR тестови на постројењу

Друга фаза истраживања представља наставак оптимизације започете у првој фази JAR испитивања. Док је у првој фази циљ био избор оптималних услова коагулације и флокулације, у другој фази су ти оптимални хемијски услови задржани константним, а испитиван је искључиво утицај физичких параметара DAF процеса. У том циљу експерименти су организовани у DAF JAR серије (Серије 5–9), при чему свака серија представља засебан скуп испитивања у којем је вариран један процесни параметар (притисак у сатуратору, степен рецикулације или време уноса ваздуха), док су остали услови рада задржани непромењеним. На тај начин омогућено је изоловано сагледавање утицаја сваког процесног параметра на ефикасност флотације.

Означивање DAF JAR серија бројевима 5–9 уведено је ради јасног раздвајања експеримената друге фазе од JAR серија прве фазе (JAR 1, JAR 2 и додатних JAR серија), како би се избегло мешање ознака и обезбедила јединствена систематизација експерименталног програма.

4.3.1 Сprovedена тестирања - Серија 5

Серија 5 обухвата два сета DAF JAR испитивања. Сет S1 реализован је при притиску у сатуратору од 550 kPa и степену рецикулације од 11,11 %, док је сет S2 реализован при притиску од 500 kPa и степену рецикулације од 10 %. Резултати оба сета приказани су упоредо на графицима, при чему плава линија представља резултате сета S1, а црвена линија резултате сета S2.

4.3.1.1 Утицај притиска у сатуратору на количину ослобођеног ваздуха

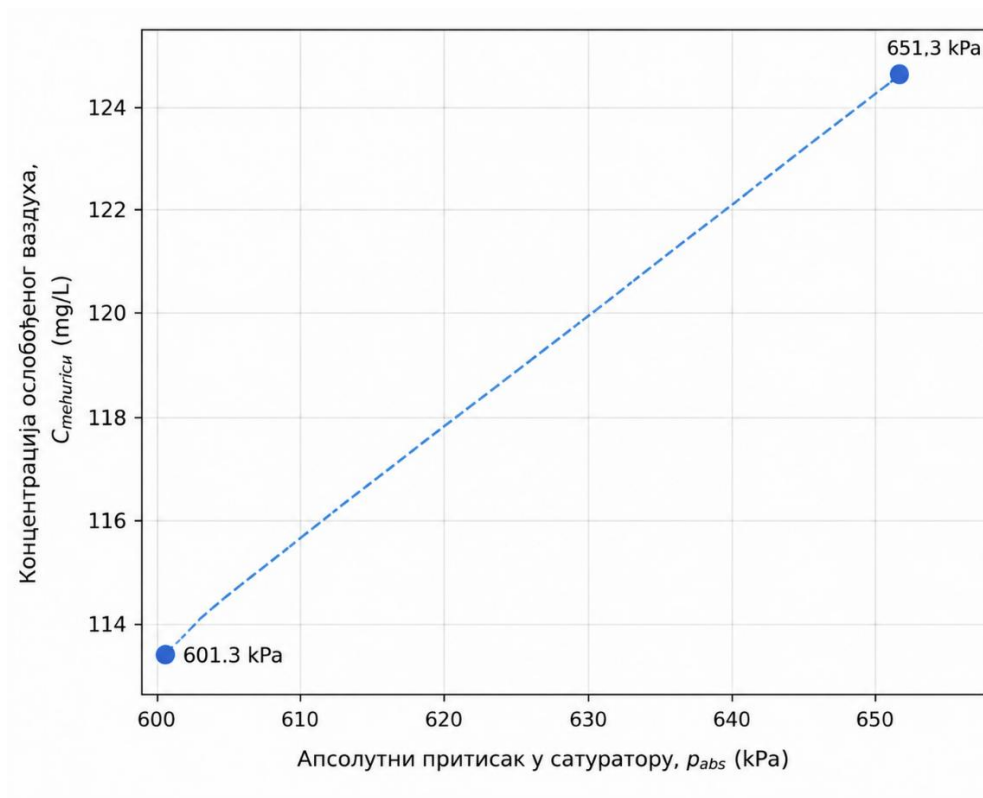
У оквиру ове серије испитивања анализиран је утицај промене притиска у сатуратору на количину ваздуха која се након декомпресије ослобађа у облику мехурића. Испитивања су спроведена при два нивоа притиска у сатуратору, док су остали услови процеса били непромењени, што је омогућило директно поређење добијених резултата.

На Слици 4.5 приказана је зависност концентрације ослобођеног ваздуха у виду мехурића од апсолутног притиска у сатуратору. $C_{mehurići} p_{abs}$ При нижем нивоу притиска измерена је нижа концентрација ослобођеног ваздуха, док је при вишем притиску уочено повећање ове вредности. Добијени резултати јасно показују да промена притиска у сатуратору доводи до промене количине ваздуха која се након декомпресије ослобађа у JAR DAF тестовима.

Разлика између измерених вредности указује да и релативно ограничен опсег промене притиска може имати уочљив утицај на концентрацију ослобођеног ваздуха. Ово је посебно значајно са аспекта лабораторијских JAR DAF тестова, где се и мање промене процесних параметара могу одразити на услове флотације и понашање формираних флокова.

Иако су у оквиру ове серије испитивана само два нивоа притиска, добијени резултати показују јасан и конзистентан пораст концентрације ослобођеног ваздуха при вишем притиску у сатуратору. Приказане вредности представљају дискретне експерименталне тачке, али њихов међусобни однос указује на јасну зависност између притиска и количине ослобођеног ваздуха.

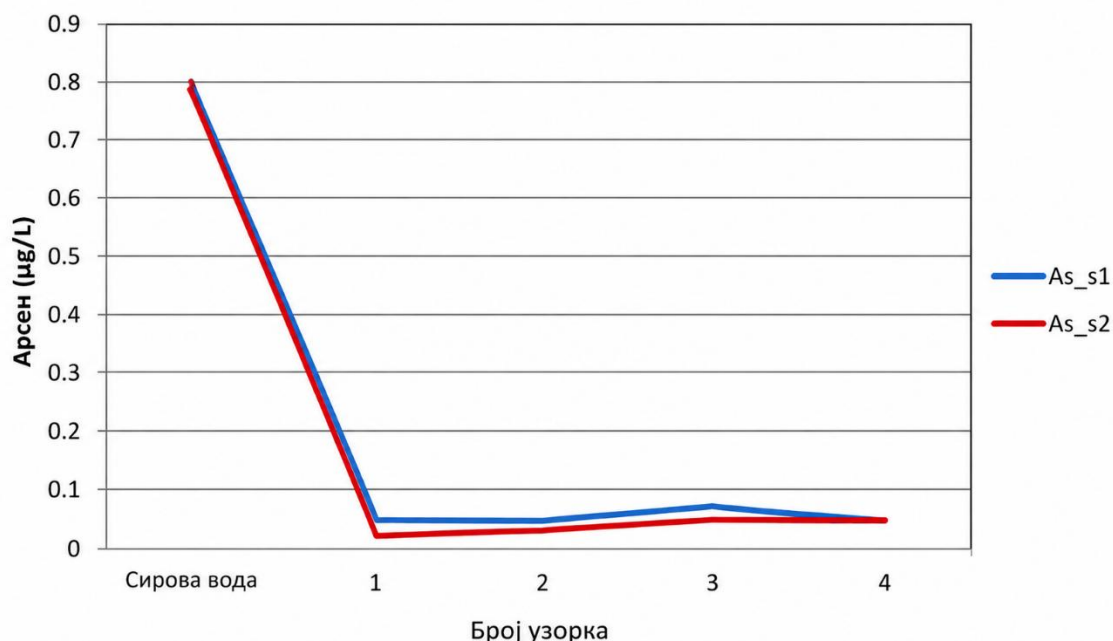
Повећана концентрација ослобођеног ваздуха при вишем притиску подразумева и измењене услове флотације у JAR DAF тестовима.



Слика 4.5. Зависност концентрације ослобођеног ваздуха од притиска у DAF систему

4.3.1.2 Концентрације арсена у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати приказани на Слици 4.6 потврђују да ефикасност уклањања арсена није униформна унутар Серије 5, већ је последица интеракције хемијских услова и количине ослобођеног ваздуха условљене притиском у сатуратору. Овакво понашање указује на значај оптимизације притиска у DAF процесу, како би се обезбедила адекватна количина мехурића неопходна за ефикасну флотацију арсена, уз избегавање неповољних услова који могу настати услед недовољног или прекомерног уноса ваздуха. На Слици 4.6 почетна тачка представља сирову воду пре третмана, док узорци 1–4 представљају резултате појединачних DAF JAR тестова за сетове S1 и S2.



Слика 4.6. Концентрација арсена у сировој и третираној води након DAF тестирања (серија 5)

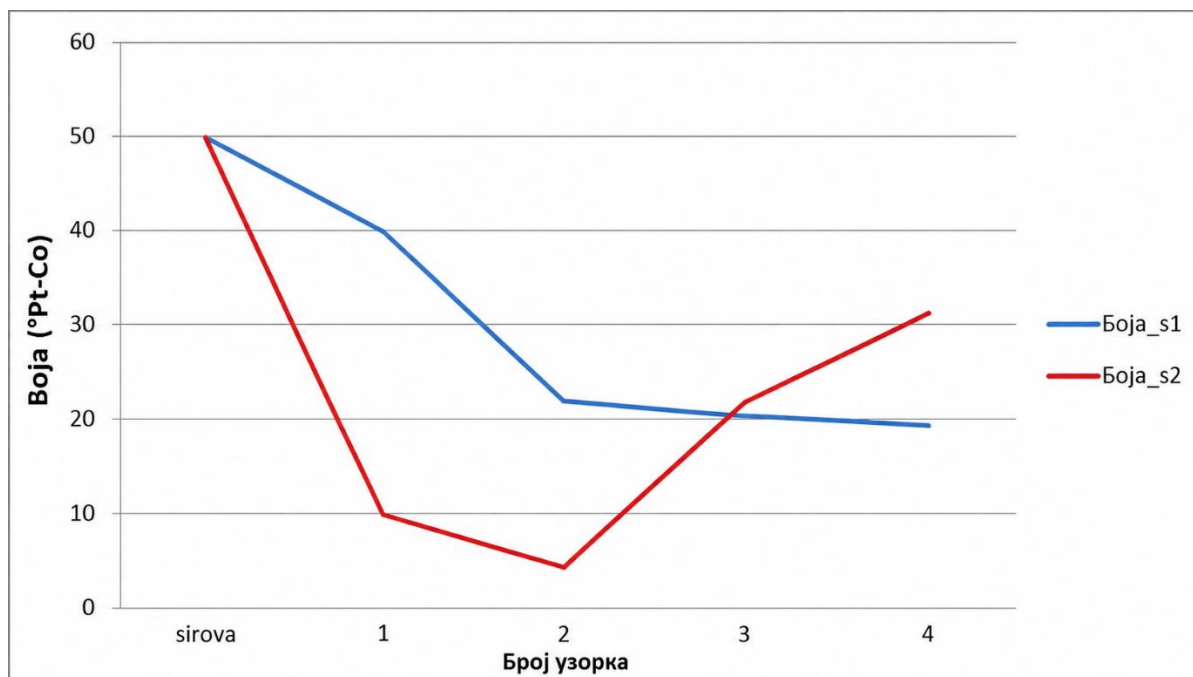
Уочене разлике у концентрацији арсена након DAF JAR тестирања могу се објаснити разматрањем утицаја притиска у сатуратору на количину ослобођеног ваздуха током флотације. Иако су сви тестови довели до значајног смањења концентрације арсена у односу на сирову воду, различита ефикасност уклањања указује на то да процес није одређен искључиво хемијским условима, већ и физичким параметрима DAF процеса.

Повећање притиска у сатуратору доводи до веће количине ваздуха раствореног у води током фазе сатурације, што се након експанзије манифестује као већа количина ослобођених мехурића у JAR чаши. Већа количина мехурића повећава вероватноћу контакта између мехурића и флокула које садрже арсен, чиме се побољшава њихово уздицање и уклањање током флотације. Са друге стране, при нижим притисцима количина ослобођеног ваздуха је мања, што може довести до смањене ефикасности везивања мехурића за флокуле и већих резидуалних концентрација арсена у третираном узорку.

4.3.1.3 Вредности боје у сировој води и JAR DAF тестовима

Вредности боје воде након JAR DAF тестова показују значајно смањење у односу на сирову воду, али са јасно израженим разликама између појединачних JAR тестова (Слика 4.7).

На Слици 4.7 плава линија представља резултате сета S1 (притисак у сатуратору 550 kPa, степен рецикулације 11,11 %), док црвена линија представља резултате сета S2 (притисак 500 kPa, степен рецикулације 10 %). Узорак 1 представља сирову воду пре третмана, док узорци 2–5 представљају резултате појединачних DAF JAR тестова.



Слика 4.7. Вредности боје воде у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 5)

Најнижа вредност боје измерена је у JAR тесту 10 (10 Pt-Co), док су у JAR тестовима 8 и 9 добијене нешто више, али сличне вредности (19 Pt-Co). У JAR тестовима 6 и 7 забележене су више вредности боје, што указује на различиту ефикасност уклањања компонената које доприносе боји воде при различитим процесним условима.

Ови резултати показују да је боја параметар који показује изражену осетљивост на комбинацију примењених доза реагенса и услова флотације у JAR DAF тестовима.

Поред утицаја примењених доза реагенса, уочене разлике у вредностима боје након DAF JAR тестирања могу се довести у везу и са условима флотације. Боја воде је у значајној мери повезана са присуством растворених и колоидних органских материја, чије уклањање зависи од ефикасности контакта између флокула и мехурића ваздуха. Стога, услови под којима долази до формирања и расподеле мехурића имају важну улогу у процесу уклањања боје.

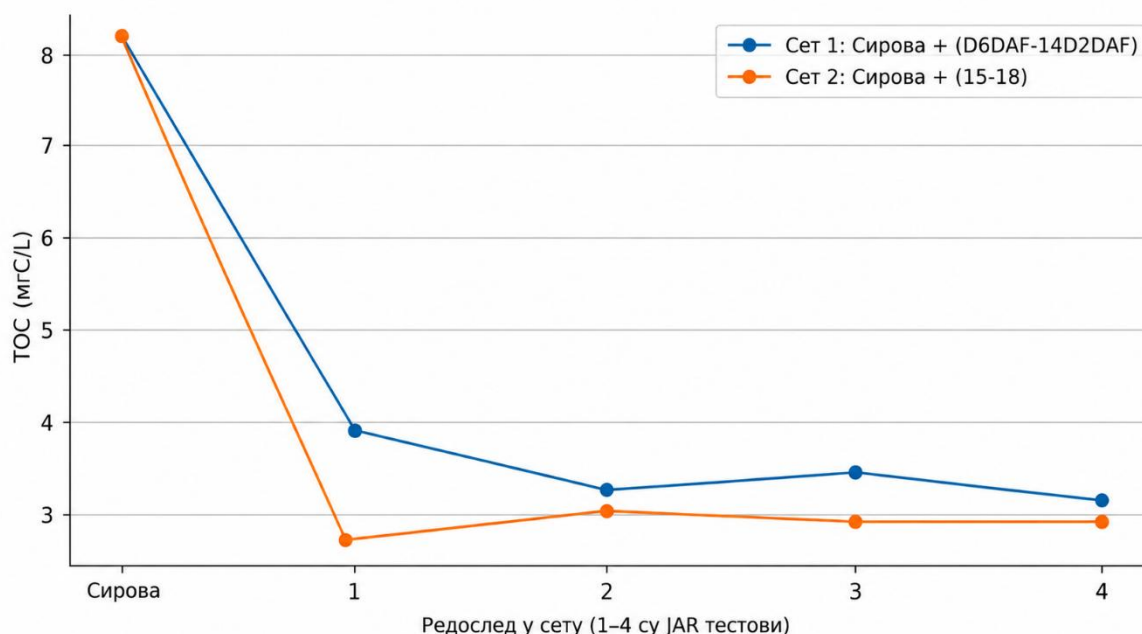
Иако у оквиру Серије 5 није извршена директна квантитативна анализа количине ослобођеног ваздуха, утицај притиска у сатуратору и услова флотације може се разматрати квалитативно. Различити услови флотације могу довести до разлика у интензитету формирања мехурића и њихове интеракције са флокулима, што се одражава на ефикасност уклањања органских компонената које доприносе боји воде.

Овакви резултати указују да боја представља параметар који је посебно осетљив на интеракцију хемијских реагенса и физичких параметара DAF процеса, те да потпуније разумевање механизма њеног уклањања захтева детаљнију анализу количине и динамике ослобођеног ваздуха у будућим серијама испитивања.

4.3.1.4 Концентрације TOC у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати приказани на Слици 4.8 показују да у оба сета испитивања долази до значајног смањења TOC у односу на сирову воду, али и да се понашање система разликује у зависности од примењених процесних услова. Овакви резултати потврђују да TOC

представља осетљив параметар за процену укупне ефикасности DAF процеса и захтева пажљиво усклађивање доза реагенса и услова флотације.



Слика 4.8. Вредност TOC у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 5)

Резултати TOC након JAR DAF тестова показују умерено, али јасно изражено смањење концентрације у односу на сирову воду, уз уочљиве разлике између појединачних JAR тестова. Најнижа концентрација TOC измерена је у JAR тесту 10 (2,84 mgC/L), док су у JAR тестовима 7, 8 и 9 добијене нешто више, али међусобно упоредиве вредности. У JAR тесту 6 измерена је виша концентрација TOC у односу на најбоље резултате, што указује да услови који су били повољни за уклањање арсена не морају истовремено бити оптимални за уклањање укупне органске материје.

За разлику од арсена, чије је уклањање у великој мери повезано са формирањем и стабилношћу флокова, уклањање органске материје обухваћене параметром TOC зависи и од ефикасности интеракције између флокова, колоидних честица и мехурића ваздуха током DAF процеса. Стога, уклањање TOC није искључиво одређено применом хемијских реагенса, већ представља резултат комбинованог утицаја хемијских и физичких услова флотације.

4.3.1.5 Дискусија - комплексни утицај притиска, доза реагенса и процесних услова на резултате JAR DAF тестова

Резултати добијени у оквиру серије 5 омогућавају анализу утицаја притиска у сатуратору, односно количине ослобођеног ваздуха, на услове флотације и резултате JAR DAF тестова. Ова серија представља полазну основу за анализу DAF процеса, јер је испитивање спроведено уз константне дозе реагенса и непромењене остале услове процеса, што је у складу са приступом који је већ описан у теоријском делу рада и претходним истраживањима [9,21].

Повећањем притиска у сатуратору уочено је повећање концентрације ваздуха који се након декомпресије ослобађа у облику мехурића. Овакво понашање је у складу са Хенријевим законом, према коме је растворљивост гаса у течности пропорционална

његовом парцијалном притиску изнад течности [19]. Примена овог принципа у DAF системима, као и типични радни опсези притиска, детаљно су описани у литератури [11].

Повећана концентрација ослобођеног ваздуха подразумева већи број микромехурића доступних за интеракцију са формираним флоковима у JAR DAF тестовима. Иако у оквиру ове серије није анализирана величина мехурића нити њихова дистрибуција, бројна истраживања указују да количина и стабилност микромехурића имају значајан утицај на вероватноћу судара и везивања флок–мехурић, а самим тим и на ефикасност флотације [27,38].

Резултати концентрације арсена показују да је у оквиру испитиваних услова постигнуто стабилно и ефикасно уклањање арсена у свим JAR DAF тестовима. Након третмана, концентрације арсена су значајно ниже у односу на почетну вредност у сировој води, при чему је варијабилност између појединих узорака релативно мала. Овакви резултати су у сагласности са налазима из литературе који указују на високу ефикасност комбинације коагулације гвожђем и DAF процеса у уклањању арсена из воде [1,2,11].

За разлику од арсена, резултати вредности боје показују нешто већу варијабилност између појединих JAR DAF тестова. Иако је у свим узорцима уочено значајно смањење боје у односу на сирову воду, разлике у добијеним вредностима указују да је боја параметар осетљивији на услове процеса. Ово је у складу са чињеницом да боја воде потиче од различитих фракција органске материје, чије уклањање зависи од комбинације коагулације, адсорпције и флотације [9,19].

Резултати ТОС показују умерено смањење концентрације у односу на почетну вредност, са мање израженим разликама између појединих узорака. Овакво понашање је очекивано, јер ТОС обухвата и растворене органске компоненте које нису у потпуности подложне уклањању DAF процесом, што је већ истакнуто у релевантној литератури наведеној у теоријском делу рада [19,29].

Серија 5 потврђује да притисак у сатуратору има директан и мерљив утицај на количину ослобођеног ваздуха и услове флотације у JAR DAF тестовима. Истовремено, резултати уклањања арсена, боје и ТОС показују да се повећање количине доступног ваздуха различито одражава на поједине параметре квалитета воде, што представља основу за даља, детаљнија испитивања у наредним серијама.

Полазећи од утврђеног утицаја притиска у сатуратору на количину ослобођеног ваздуха и услове флотације, у наредној серији испитивања (серија 7) фокус је усмерен на анализу утицаја параметара рецикулације и уноса ваздуха на резултате JAR DAF тестова.

4.3.2 Сprovedена тестирања - Серија 7

Након анализе утицаја притиска у сатуратору у оквиру Серије 5, у наредној фази истраживања спроведена је серија DAF JAR тестова означена као Серија 7. Ова серија испитивања осмишљена је са циљем да се анализира утицај процесних параметара који директно одређују количину и начин уноса ваздуха у DAF систем, а самим тим и услове флотације током JAR тестирања.

За разлику од Серије 5, у којој је фокус био на утицају притиска у сатуратору, у Серији 7 пажња је усмерена на анализу параметара рецикулације и уноса ваздуха, као оперативних величина које у реалним условима рада DAF постројења омогућавају финију контролу процеса. При томе је посебно важно истаћи да током свих испитивања

у оквиру Серије 7 није вршена промена доза коагуланата и флокуланата, чиме је обезбеђено да уочени ефекти буду искључиво последица промене процесних услова флотације.

У оквиру Серије 7, запремина узорка, поступак извођења DAF JAR теста и програм мешања били су задржани константним, док су систематски мењани параметри рецикулације и уноса ваздуха. Оваквим експерименталним приступом омогућено је изоловано сагледавање утицаја количине и начина уноса ваздуха на ефикасност флотације и уклањање одабраних параметара квалитета воде.

У оквиру Серије 7 анализирани су резултати четири појединачна експеримента (5–8). На дијаграмима почетна тачка представља сирову воду, док ознаке 5–8 одговарају редним бројевима експеримената у оквиру ове серије.

4.3.2.1 Утицај степена рецикулације на услове флотације и резултате DAF JAR тестова

Укупно су спроведена четири JAR DAF теста, при различитим вредностима процесних параметара рецикулације и уноса ваздуха, док су остали услови процеса били задржани константним. Степен рецикулације представља један од кључних оперативних параметара DAF процеса, јер директно одређује количину воде која се подвргава сатурацији и, посредно, количину ваздуха која се након декомпресије ослобађа у облику мехурића у флотационом простору.

Током свих испитивања у оквиру овог потпоглавља дозе коагуланата и флокуланата биле су задржане константним, као и запремина узорка и поступак извођења DAF JAR теста. На тај начин омогућено је да се утицај степена рецикулације посматра изоловано, без утицаја промене хемијских услова процеса.

Променом степена рецикулације мења се количина рециркулисане воде под притиском, а самим тим и количина раствореног ваздуха који је доступан за флотацију након експанзије. Овај параметар има значајан утицај на интензитет формирања мехурића и њихову интеракцију са формираним флоковима, што се може одразити на ефикасност уклањања појединих параметара квалитета воде у JAR DAF тестовима.

У наставку овог потпоглавља приказани су резултати JAR DAF тестова спроведених при различитим вредностима процесних параметара рецикулације, са посебним освртом на утицај овог параметра на уклањање арсена, боје и укупне органске материје (TOC), као и на стабилност услова флотације у систему.

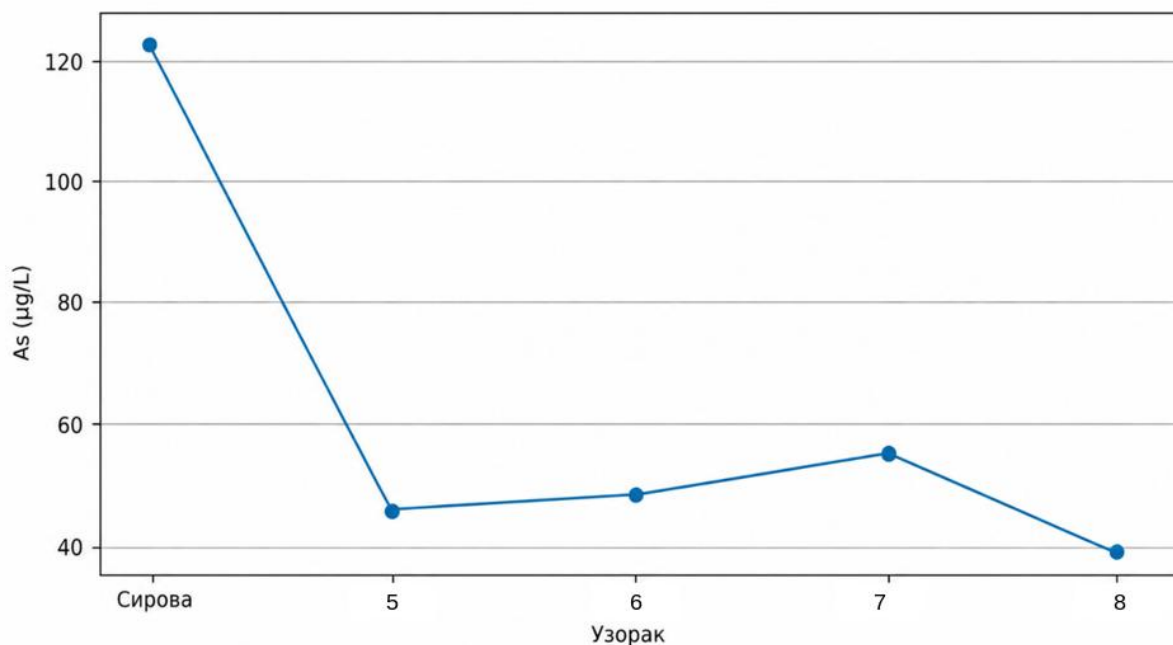
4.3.2.2 Концентрације арсена у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати концентрација арсена након JAR DAF тестова у оквиру Серије 7 показују значајно смањење у односу на концентрацију у сировој води у свим испитиваним узорцима (Слика 4.9). Ово указује да је примењена комбинација коагулације и DAF процеса ефикасна у уклањању арсена и при условима у којима се мењају процесни параметри рецикулације и уноса ваздуха.

Поређењем резултата по појединачним JAR DAF тестовима уочавају се одређене разлике у резидуалним концентрацијама арсена, што указује да промене процесних услова могу утицати на ефикасност уклањања. Ипак, варијабилност између појединих тестова остаје релативно мала, што упућује на стабилно понашање система у погледу уклањања арсена у оквиру испитиваног опсега процесних параметара.

С обзиром да током Серије 7 нису мењане дозе коагуланата и флокуланата, уочене разлике у концентрацијама арсена могу се приписати искључиво утицају процесних услова флотације.

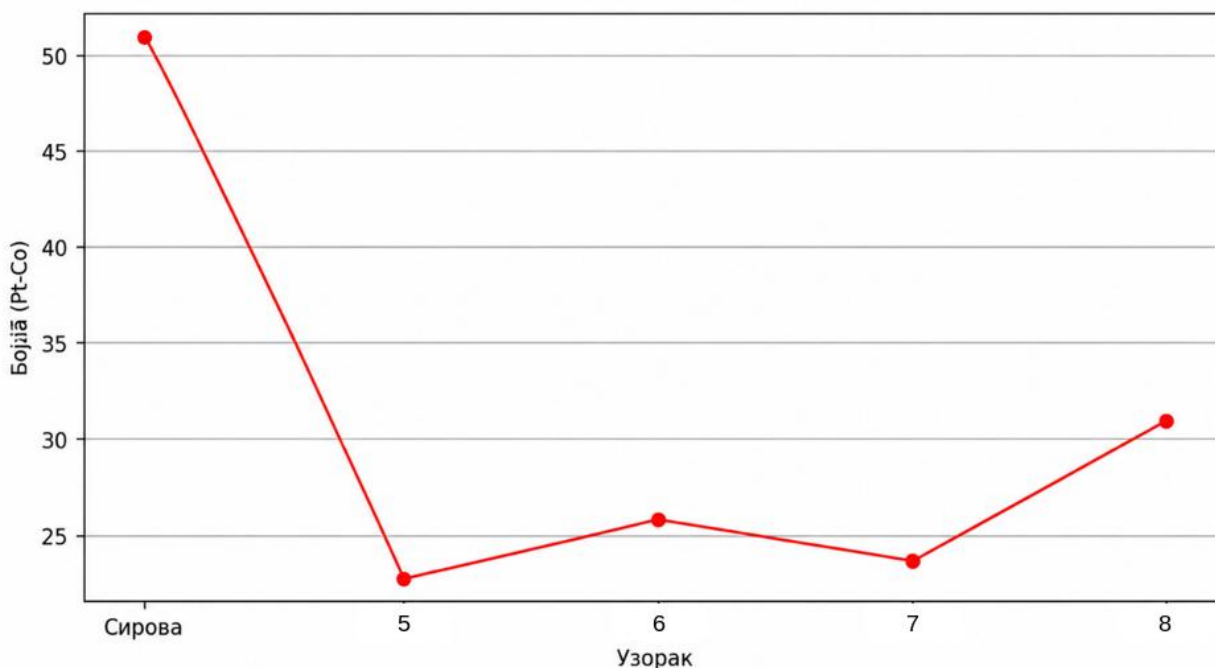
Резултати приказани у овом потпоглављу показују да, иако процесни услови имају утицај на понашање система, уклањање арсена у DAF JAR тестовима остаје поуздано и ефикасно у читавом испитиваном опсегу услова Серије 7. Овакво понашање је у складу са резултатима добијеним у Серији 5 и са налазима из литературе који указују на високу робусност DAF процеса у комбинацији са коагулацијом гвожђем у уклањању арсена из воде [2,29], што је приказано на Слици 4.9 .



Слика 4.9. Концентрација As у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 7)

4.3.2.3 Вредности боје у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати приказани на Слици 4.10 у овом потпоглављу показују да, иако се у свим JAR DAF тестовима постиже значајно смањење боје у односу на сирову воду, оптимални услови за њено уклањање зависе од комбинације процесних параметара флотације. Овакво понашање је у складу са налазима из литературе који указују да је уклањање боје у DAF процесима снажно повезано са физичким условима флотације, поред примене одговарајуће коагулације [2,29].



Слика 4.10. Вредности боје у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 7)

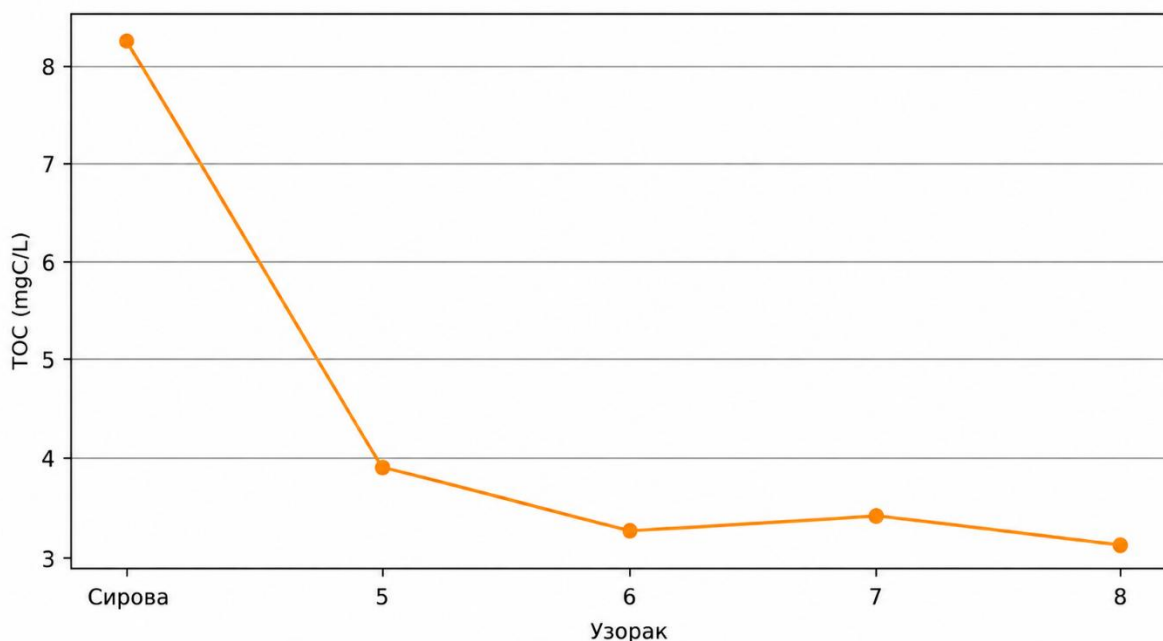
Резултати вредности боје након JAR DAF тестова у оквиру Серије 7 показују значајно смањење у односу на вредност измерену у сировој води у свим испитиваним узорцима. Ово указује да је примењени процес коагулације и флотације ефикасан у уклањању компонената које доприносе боји воде и при условима у којима се мењају процесни параметри рецикулације и уноса ваздуха.

Поређењем резултата по појединачним JAR DAF тестовима уочавају се разлике у резидуалним вредностима боје, што указује да је боја параметар осетљив на промене процесних услова. За разлику од арсена, код кога је уочена релативно мала варијабилност између тестова, вредности боје показују нешто израженије разлике, што упућује на сложенији механизам њеног уклањања.

С обзиром да током Серије 7 нису мењане дозе коагуланата и флокуланата, уочене разлике у вредностима боје могу се приписати искључиво утицају процесних услова флотације. Промена степена рецикулације и уноса ваздуха утиче на број и динамику формирања мехурића, као и на њихову интеракцију са флоковима и колоидним честицама које доприносе боји воде, што се директно одражава на ефикасност њиховог уклањања.

4.3.2.4 Концентрације TOC у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати TOC након JAR DAF тестова у оквиру Серије 7 показују смањење концентрације у односу на вредност измерену у сировој води у свим испитиваним узорцима (Слика 4.11). Иако је уочено да DAF процес доприноси уклањању укупне органске материје, степен смањења TOC је умеренији у поређењу са резултатима добијеним за арсен и боју воде.



Слика 4.11. Вредности ТОС у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (серија 7)

Поређењем резултата по појединачним JAR DAF тестовима уочава се релативно мала варијабилност у концентрацијама ТОС, што указује да промене процесних параметара рецикулације и уноса ваздуха имају ограниченији утицај на уклањање укупне органске материје у оквиру испитиваног опсега услова. Овакво понашање је у складу са чињеницом да ТОС обухвата и растворене органске компоненте које нису у потпуности подложне уклањању DAF процесом.

С обзиром да током Серије 7 нису мењане дозе коагуланата и флокуланата, уочене разлике у концентрацијама ТОС могу се приписати искључиво утицају процесних услова флотације. Промена количине и динамике мехурића услед различитих вредности рецикулације и уноса ваздуха може утицати на уклањање колоидне и флокулисане органске материје, док растворене органске фракције остају у значајној мери присутне у третираној води.

Резултати приказани на Слици 4.11 у овом потпоглављу указују да ТОС представља параметар који интегрише ефекте хемијских и физичких услова процеса, али и да његово уклањање у DAF JAR тестовима показује мању осетљивост на промене процесних параметара у односу на арсен и боју. Ови налази су у складу са резултатима из литературе, где се DAF процес најчешће описује као ефикаснији у уклањању колоидних и флокулисаних, него растворених органских материја [2,29].

4.3.2.5 Дискусија - комплексни утицај притиска, доза реагенса и процесних услова на резултате JAR DAF тестова

Резултати добијени у оквиру Серије 7 омогућавају детаљнију анализу утицаја параметара рецикулације и уноса ваздуха на услове флотације и ефикасност DAF JAR тестова. За разлику од Серије 5, у којој је анализиран утицај притиска у сатуратору, у овој серији фокус је био на процесним параметрима који директно одређују количину воде подвргнуте сатурацији и количину ваздуха доступног за флотацију у систему, при непромењеним дозама коагуланата и флокуланата.

Променом степена рецикулације мења се количина раствореног ваздуха који се након декомпресије ослобађа у облику мехурића, што директно утиче на интензитет и динамику флотације. Овакво понашање је у складу са општим принципима DAF процеса описаним у литератури, који указују да количина и стабилност микромехурића имају значајан утицај на вероватноћу судара и везивања флок–мехурић, а самим тим и на ефикасност уклањања честица [27,38].

Резултати концентрација арсена показују да је у оквиру Серије 7 постигнуто стабилно и ефикасно уклањање арсена у свим JAR DAF тестовима, уз релативно малу варијабилност између појединих испитиваних услова. Оваква робусност процеса у односу на промене параметара рецикулације и уноса ваздуха у сагласности је са налазима из претходних истраживања, која указују да је ефикасност уклањања арсена у DAF системима у великој мери условљена процесима коагулације и формирањем стабилних флокова, док су варијације у условима флотације од секундарног значаја [1,2,9,11,21].

За разлику од арсена, резултати боје показују израженију осетљивост на промене процесних услова. Иако је у свим JAR DAF тестовима постигнуто значајно смањење боје у односу на сирову воду, уочене разлике између појединих тестова указују да уклањање компонената које доприносе боји воде у већој мери зависи од физичких услова флотације и ефикасности интеракције мехурића са колоидним органским честицама [9,19].

Резултати ТОС показују умерено смањење концентрације у односу на сирову воду, са мање израженим разликама између појединих JAR DAF тестова. Овакво понашање је очекивано, с обзиром на то да ТОС обухвата и растворене органске компоненте које нису у потпуности подложне уклањању DAF процесом. Промене у рецикулацији и уносу ваздуха утичу пре свега на уклањање флокулисане и колоидне органске материје, док растворене органске фракције остају у значајној мери присутне у третираној води [19,29].

Укупно посматрано, резултати Серије 7 потврђују да параметри рецикулације и уноса ваздуха имају значајан утицај на услове флотације и понашање DAF система, али да се њихов ефекат различито одражава на поједине параметре квалитета воде. Док је уклањање арсена релативно стабилно у широком опсегу процесних услова, уклањање боје и ТОС показује већу осетљивост на промене у динамици флотације. Ови резултати представљају основу за даљу оптимизацију процесних параметара DAF система и дефинисање услова рада који омогућавају истовремено ефикасно уклањање више параметара квалитета воде [18,49].

4.3.3 Сprovedена тестирања - Серија 8

У оквиру Серије 8 спроведена су четири JAR DAF теста (JAR 9–JAR 12), при чему је притисак у сатуратору током свих испитивања био константан и износио 550 kPa. Дозе коагуланата и флокуланата, запремина узорка (1800 ml) и програм мешања били су задржани непромењени, док су варирани процесни услови флотације кроз комбинацију степена рецикулације и времена уноса ваздуха. На тај начин омогућено је да се анализира утицај динамике процеса флотације без утицаја промене хемијских услова третмана.

У оквиру Серије 8 испитиван је комбиновани утицај степена рецикулације и времена уноса ваздуха на ефикасност DAF процеса. Експериментални програм обухватио је четири појединачна експеримента означена бројевима 9–12, при чему су испитиване комбинације процесних услова са и без рецикулације, као и различита времена уноса ваздуха, док су сви остали параметри били задржани константним. Оваквим приступом

омогућено је да се процени утицај ових параметара на формирање услова флотације и ефикасност уклањања арсена, боје и ТОС. Резултати концентрација арсена, боје и ТОС показују да су комбиновани процесни услови имали различит утицај на поједине параметре квалитета воде. Концентрације арсена након третмана кретале су се од 37,16 до 56,25 µg/l, док су концентрације ТОС биле у опсегу од 3,11 до 3,41 mgC/l. Вредности боје су смањене са 51 °Pt–Co у сировој води на 9–16 °Pt–Co након DAF третмана. Ови резултати показују да је уклањање арсена релативно стабилно у испитиваном опсегу услова, док боја и ТОС показују већу осетљивост на промене динамике флотације.

Ови резултати потврђују да анализа комбинованих процесних услова представља неопходан корак ка разумевању понашања DAF система у реалним условима рада и пружа основу за даљу оптимизацију параметара флотације у циљу истовременог ефикасног уклањања више параметара квалитета воде.

У наставку су резултати приказани за експерименте 9–12, док почетна тачка на свим дијаграмима представља сирову воду пре третмана

4.3.3.1 Концентрације арсена у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати концентрација арсена након JAR DAF тестова у оквиру Серије 8 показују значајно смањење у односу на концентрацију измерену у сировој води. Почетна концентрација арсена у сировој води износила је 122,4 µg/l, док су након третмана измерене вредности у опсегу од 37,16 до 56,25 µg/l. Најнижа резидуална концентрација арсена измерена је у JAR 9 тесту (37,16 µg/l), док је највиша вредност забележена у JAR 10 тесту (56,25 µg/l).

Ови резултати указују да је примењени DAF процес, у комбинацији са коагулацијом гвожђем, ефикасан у уклањању арсена и у условима комбинованих процесних параметара флотације.

Поређењем резултата по појединачним JAR DAF тестовима уочавају се одређене разлике у резидуалним концентрацијама арсена, што указује да промене процесних услова могу утицати на ефикасност уклањања. Разлика између најниже и највише измерене вредности арсена износила је приближно 19 µg/l, што указује на релативно стабилно понашање система у испитиваном опсегу услова.

С обзиром на то да су током Серије 8 дозе коагуланата и флокуланата, као и притисак у сатуратору, били задржани константним, уочене разлике у концентрацијама арсена могу се приписати утицају комбинованих процесних услова флотације, пре свега присуству или одсуству рецикулације и различитом времену уноса ваздуха. Ови параметри утичу на количину и динамику формирања мехурића, као и на њихову интеракцију са флоковима који садрже арсен.

Резултати Серије 8 показују да је уклањање арсена мање осетљиво на варијације процесних услова у поређењу са органским параметрима, што је у складу са резултатима претходних серија. Ипак, уочене разлике указују да оптимизација комбинованих процесних параметара може допринети додатном побољшању ефикасности и стабилности процеса уклањања арсена у условима који су ближи реалном раду DAF постројења.

4.3.3.2 Вредност боје у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати вредности боје након JAR DAF тестова у оквиру Серије 8 показују значајно смањење у односу на вредност измерену у сировој води. Почетна вредност боје износила је 51 °Pt–Co, док су након третмана измерене вредности од 9 до 16 °Pt–Co у испитиваним

JAR DAF тестовима. Најниже вредности боје добијене су у JAR 10 и JAR 11 тестовима (9 °Pt–Co), док је највиша резидуална вредност измерена у JAR 9 тесту (16 °Pt–Co). Ови резултати указују да је примењени DAF процес ефикасан у уклањању компонената које доприносе боји воде и у условима комбинованих процесних параметара флотације.

Поређењем резултата по појединачним JAR DAF тестовима уочава се варијабилност у резидуалним вредностима боје, при чему је разлика између најниже и највише измерене вредности износила 7 °Pt–Co. За разлику од арсена, код кога је у Серији 8 уочена релативно стабилна ефикасност уклањања, вредности боје показују израженију зависност од услова флотације, пре свега од комбинације присуства рецикулације и времена уноса ваздуха.

С обзиром на то да током Серије 8 нису мењане дозе коагуланата и флокуланата, као ни притисак у сатуратору, уочене разлике у вредностима боје могу се приписати искључиво утицају процесних услова флотације. Промене у динамици формирања мехурића и њиховој интеракцији са флокулисаним и колоидним органским честицама директно утичу на ефикасност уклањања компонената које доприносе боји воде.

Резултати Серије 8 указују да оптимални услови за уклањање боје не морају у потпуности да се поклапају са условима који су најповољнији за уклањање арсена, што потврђује сложену природу DAF процеса у третману воде. Ови налази додатно наглашавају значај анализе комбинованих процесних услова приликом дефинисања оптималног режима рада DAF постројења.

4.3.3.3 Концентрације TOC у сировој води и JAR DAF тестовима

Резултати TOC након JAR DAF тестова у оквиру Серије 8 показују смањење концентрације у односу на вредност измерену у сировој води у свим испитиваним узорцима. Почетна концентрација TOC у сировој води износила је 8,1 mgC/l, док су након третмана измерене вредности у опсегу од 3,11 до 3,41 mgC/l. Најнижа концентрација TOC измерена је у JAR 9 тесту (3,11 mgC/l), док је највиша резидуална вредност забележена у JAR 12 тесту (3,41 mgC/l). Ови резултати указују да DAF процес, у комбинацији са коагулацијом, доприноси уклањању укупне органске материје и у условима комбинованих процесних параметара флотације.

Поређењем резултата по појединачним JAR DAF тестовима уочава се умерена варијабилност у концентрацијама TOC, при чему је разлика између најниже и највише измерене вредности износила 0,30 mgC/l. Овакво понашање указује на различите механизме уклањања органских компоненти које доприносе TOC у односу на параметре који се везују пре свега за флокулисану фазу.

С обзиром на то да су током Серије 8 дозе коагуланата и флокуланата, као и притисак у сатуратору, били задржани константним, уочене разлике у концентрацијама TOC могу се приписати утицају комбинованих процесних услова флотације, пре свега присуству рецикулације и различитом времену уноса ваздуха. Ови параметри утичу на ефикасност уклањања колоидне и флокулисане органске материје, док растворене органске фракције остају у значајној мери присутне у третираној води.

Резултати Серије 8 потврђују да TOC представља интегрални параметар који одражава заједнички утицај хемијских и физичких услова процеса. Иако се у свим JAR DAF тестовима постиже смањење TOC у односу на сирову воду, оптимизација комбинованих процесних параметара флотације може допринети додатном побољшању ефикасности уклањања органске материје у условима који су ближи реалном раду DAF постројења.

4.3.3.4 Дискусија - комплексни утицај притиска, доза реагенса и процесних услова на резултате JAR DAF тестова

Упоредни приказ концентрација арсена, боје и ТОС у оквиру Серије 8 (Слика 4.12) омогућава интегрално сагледавање утицаја комбинованих процесних услова на понашање DAF система. Иако су у свим JAR DAF тестовима постигнута значајна смањења концентрација у односу на сирову воду, јасно је уочљива различита осетљивост појединих параметара квалитета воде на варијације процесних услова.

Најизраженије смањење у односу на почетну вредност уочено је код концентрације арсена, што потврђује високу ефикасност комбинације коагулације гвожђем и DAF процеса у његовом уклањању. Релативно мала варијабилност концентрација арсена између појединих JAR DAF тестова указује на стабилност механизма уклањања, који је у великој мери одређен хемијским условима коагулације и формирањем стабилних флокова, што је добро документовано у литератури за процесе коагулације гвожђем и DAF третман подземних вода [1,2,11]. Мањи утицај варијација физичких услова флотације на уклањање арсена такође је потврђен у претходним истраживањима [9,21].

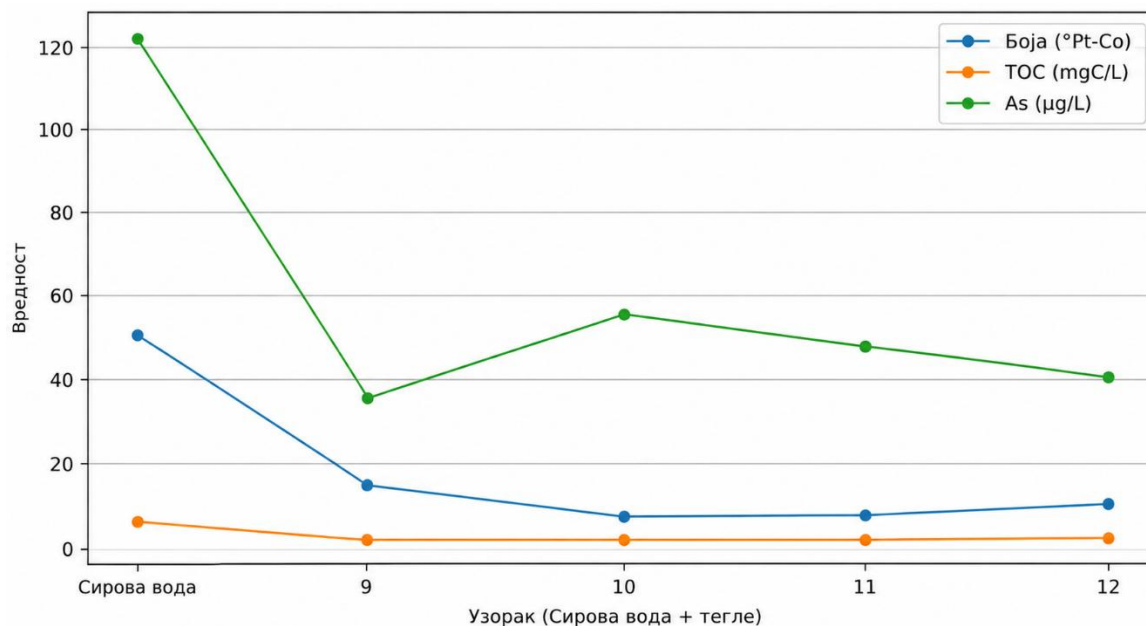
За разлику од арсена, вредности боје показују израженију осетљивост на комбиноване процесне услове. У оквиру овог истраживања боја је након DAF третмана смањена са 51 на 9–16 °Pt–Co, док су концентрације арсена смањене са 122,4 на 37,16–56,25 µg/l, а ТОС са 8,1 на 3,11–3,41 mgC/l. Сличну осетљивост боје на промене физичких услова флотације наводе и други аутори [9,19], који истичу да ефикасност уклањања обојених органских материја у већој мери зависи од формирања и интеракције мехурића ваздуха и флокула него што је то случај код уклањања арсена. Овакво поређење указује да боја представља параметар који је осетљив на физичке услове процеса и може служити као индикатор оптималности флотационих услова.

Концентрације ТОС након третмана кретале су се у релативно уском опсегу (3,11–3,41 mgC/l), што указује на умерену варијабилност унутар Серије 8. Овакви резултати су у складу са чињеницом да ТОС обухвата широк спектар органских компоненти, укључујући и растворене фракције које нису у потпуности подложне уклањању DAF процесом. Промене процесних услова флотације утичу пре свега на уклањање колоидне и флокулисане органске материје, док растворене органске фракције остају присутне у значајној мери у третираној води [19,29].

Посматрањем резултата Серије 8 у контексту претходних серија може се уочити да комбиновани процесни услови доводе до сложенијег одзива система у поређењу са појединачним варијацијама параметара испитиваним у Серијама 5 и 7. Док је у Серији 5 доминантан утицај имао притисак у сатуратору, а у Серији 7 параметри рецикулације и уноса ваздуха, резултати Серије 8 указују да је за постизање стабилног и ефикасног рада DAF система неопходно истовремено разматрати више процесних параметара. Овакав тренд је у складу са резултатима других истраживача [27,38], док су добијени резултати потврђени и у оквиру сопствених претходних истраживања [49]. Примењени експериментални поступак и услови испитивања били су усклађени са захтевима одговарајућег стандарда [18].

Резултати Серије 8 приказани на Слици 4.12 потврђују да различити параметри квалитета воде различито реагују на комбиноване процесне услове DAF система. Док је уклањање арсена релативно робусно и мање осетљиво на варијације процесних услова, уклањање боје и ТОС у већој мери зависи од физичких услова флотације и динамике мехурића. Ови налази указују на значај систематске оптимизације процесних параметара

DAF постројења у циљу постизања стабилног рада и истовременог ефикасног уклањања више параметара квалитета воде [42,51].



Слика 4.12. Упоредни приказ концентрација арсена, боје и TOC у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (Серија 8)

4.3.4 Сprovedена тестирања - Серија 9

Серија 9 представља завршну фазу лабораторијских DAF JAR испитивања и спроведена је у условима оптимизованих процесних параметара дефинисаних на основу резултата претходних серија. Ова серија обухвата четири појединачна експеримента, означена бројевима 13–16. За разлику од претходних серија, у којима су анализирани појединачни и комбиновани утицаји процесних параметара, Серија 9 је била усмерена на процену стабилности и репродуктивности рада DAF система у условима који су најближи реалном режиму рада постројења за припрему воде. Посебна пажња посвећена је утицају времена уноса ваздуха на ефикасност уклањања арсена, боје и укупне органске материје (TOC), као и на стабилност флотационог слоја и понашање система у условима стабилованих хемијских и хидродинамичких параметара. Резултати ове серије омогућавају коначно сагледавање утицаја динамике флотације на ефикасност DAF процеса и представљају основу за процену применљивости добијених резултата у реалним условима рада постројења.

4.3.4.1 Утицај времена уноса ваздуха на услове флотације и резултате DAF тестирања

Резултати концентрација арсена након DAF тестирања у оквиру Серије 9 показују значајно смањење у односу на концентрацију измерену у сировој води у свим испитиваним узорцима. Ови резултати потврђују да су одабрани процесни услови, дефинисани на основу претходних серија испитивања, погодни за ефикасно уклањање арсена у условима стабилованог рада DAF система.

Поређењем резултата добијених при различитим временима уноса ваздуха уочава се ограничена варијабилност резидуалних концентрација арсена. Овакво понашање указује да је уклањање арсена у оквиру Серије 9 релативно робусно у односу на промене

динамике флотације, што је у складу са механизмом уклањања арсена путем коагулације и инкорпорације у стабилне флокове.

У контексту термодинамичких разматрања, утицај времена уноса ваздуха на концентрацију арсена може се повезати са степеном у којем се формирани флокови ефикасно везују за мехуриће и транспортују ка површини. При краћем времену уноса ваздуха, систем може остати у стању непотпуне реализације потенцијала флотације, док продужење времена омогућава успостављање повољнијих услова за интеракцију флок–мехурић и стабилније издвајање арсена из воде.

4.3.4.2 Концентрације арсена у сировој води и JAR DAF тестовима

Концентрација арсена у сировој води током Серије 9 износила је 122,4 µg/l, што представља полазну вредност за процену ефикасности DAF процеса. Након JAR DAF тестова, у свим испитиваним условима уочено је значајно смањење концентрације арсена, при чему су измерене вредности биле у опсегу од 14,7 до 17,2 µg/l.

Најнижа концентрација арсена измерена је у JAR тесту 16 (14,7 µg/l), који је изведен при најдужем времену уноса ваздуха (6 min), док су у тестовима са краћим временом уноса ваздуха (2,5–5 min) добијене нешто више, али међусобно блиске вредности (16,1–17,2 µg/l). Овакви резултати указују да продужење времена уноса ваздуха доводи до благог побољшања ефикасности уклањања арсена, али без значајних промена у односу на краће временске интервале.

Посматрано у контексту термодинамичких разматрања, уочене разлике могу се повезати са степеном реализације потенцијала флотације. При краћем времену уноса ваздуха, систем може остати у стању непотпуне квазиравнотеже између раствореног и ослобођеног ваздуха, док продужење времена омогућава стабилније услове за интеракцију мехурића и флокова који инкорпорирају арсен.

Ипак, релативно мали распон добијених концентрација арсена указује да је у условима Серије 9 процес уклањања арсена у великој мери ограничен хемијским условима коагулације и формирањем стабилних флокова, док физички услови флотације, дефинисани временом уноса ваздуха, имају секундарни утицај. Ови резултати потврђују да је уклањање арсена у оптимизованим условима рада DAF система стабилно и робусно у односу на варијације динамике процеса.

4.3.4.3 Вредност боје у сировој води и JAR DAF тестовима

Почетна вредност боје у сировој води током Серије 9 износила је 53 °Pt–Co, што указује на изражено присуство органских компонената које доприносе обојености воде. Након JAR DAF тестова, у свим испитиваним условима уочено је значајно смањење боје, при чему су измерене вредности биле у опсегу од 10 до 20 °Pt–Co.

Најнижа вредност боје измерена је у JAR тесту JAR 13 (10 Pt–Co), који је изведен при најкраћем времену уноса ваздуха (2,5 min). У JAR тестовима са средњим временима уноса ваздуха (3.5 и 5 min) добијене су сличне вредности боје (12 °Pt–Co), док је при најдужем времену уноса ваздуха (6 min) забележена виша резидуална вредност боје (20 °Pt–Co).

За разлику од концентрација арсена, код којих је продужење времена уноса ваздуха довело до благог побољшања ефикасности уклањања, резултати боје указују на сложенији одзив система. Овакво понашање може се повезати са различитим механизмима уклањања органских компонената које доприносе боји, као и са утицајем динамике флотације на стабилност флокова и њихову интеракцију са мехурићима.

Са аспекта термодинамике и кинетике процеса, продужење времена уноса ваздуха може довести до интензивнијих интеракција у систему, али истовремено и до ремећења стабилности флотирајућих агрегата, посебно у случају флокова који садрже органску материју мање густине и слабије структуре. Ово може резултирати делимичним ре-дисперговањем или мање ефикасним задржавањем органских компонената у флотирајућој фази.

Резултати Серије 9 јасно показују да је боја параметар који је осетљивији на време уноса ваздуха у поређењу са арсеном. Ови налази указују да оптимални услови за уклањање боје не морају у потпуности да се поклапају са условима који обезбеђују најстабилније уклањање арсена, што додатно наглашава значај пажљиве оптимизације процесних параметара DAF система у реалним условима рада.

4.3.4.4 Концентрације TOC у сировој води и JAR DAF тестовима

Вредност укупне органске материје изражене кроз параметар TOC у сировој води током Серије 9 износила је 8,2 mgC/l. Након примене DAF JAR тестова, у свим испитиваним условима забележено је смањење TOC, при чему су резидуалне вредности биле у опсегу од 3,0 до 3,6 mgC/l.

Као што је приказано на слици 4.13 најнижа концентрација TOC измерена је у JAR тесту 15 (3,0 mgC/l), који је изведен при времену уноса ваздуха од 5 min, док су при краћем (2,5 и 3,5 min) и најдужем времену уноса ваздуха (6 min) добијене нешто више, али међусобно блиске вредности (3,3–3,6 mgC/L). Овакви резултати указују да постоји оптималан временски интервал уноса ваздуха у коме је уклањање укупне органске материје најефикасније.

За разлику од арсена, чије је уклањање у оквиру Серије 9 показало релативно малу осетљивост на време уноса ваздуха, и за разлику од боје за коју је утврђена израженија варијабилност, TOC представља интегрални параметар који обухвата различите фракције органске материје. Стога је његов одзив на промене процесних услова умерен и резултат је комбинације уклањања флокулисаних и колоидних органских материја, док растворене органске фракције остају присутне у третираној води.

Са аспекта термодинамике процеса, утицај времена уноса ваздуха на уклањање TOC може се повезати са динамиком успостављања равнотеже између раствореног и ослобођеног ваздуха, као и са временом контакта мехурића и органских флокова. При прекратком времену уноса ваздуха, део потенцијала флотације остаје неискоришћен, док при претдугом времену додатни ефекат уклањања постаје ограничен кинетиком процеса и стабилношћу флотирајућих агрегата.

Резултати Серије 9 показују да TOC реагује на време уноса ваздуха мање изражено него боја, али осетљивије него арсен, што потврђује да уклањање укупне органске материје у DAF процесу зависи од пажљивог усклађивања хемијских и физичких услова. Ови налази додатно наглашавају значај оптимизације времена уноса ваздуха у условима стабилизованог рада DAF система.

4.3.4.5 Дискусија - комплексни утицај притиска, доза реагенса и процесних услова на резултате JAR DAF тестова

Након анализе концентрација арсена, боје и TOC у појединачним потпоглављима, њихов упоредни приказ (Слика 4.13) омогућава интегралну процену утицаја времена уноса ваздуха на ефикасност DAF процеса у условима оптимизованих процесних параметара. За разлику од претходних анализа, у којима су параметри разматрани појединачно, у

овом потпоглављу разматра се њихово међусобно поређење и укупни одзив система на промену времена уноса ваздуха.

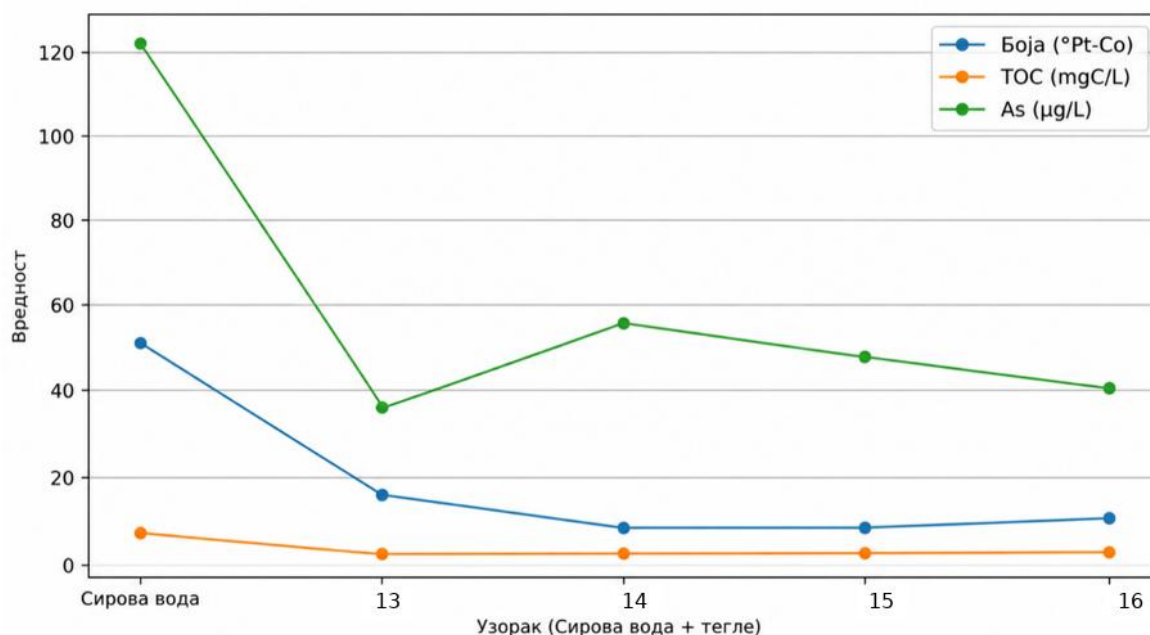
Најизраженији ефекат третмана уочен је код концентрације арсена, где долази до наглог пада у односу на сирову воду и релативно мале варијабилности између појединачних JAR тестова. Овакво понашање потврђује да је уклањање арсена у условима оптимизованог рада DAF система превасходно контролисано хемијским механизмима коагулације и инкорпорације арсена у стабилне флокове, док варијације у времену уноса ваздуха имају секундарни утицај [1,2,9,11,21]. Ови резултати су у сагласности са налазима из литературе који указују да је ефикасност уклањања арсена у DAF процесима релативно робусна у односу на промене физичких услова флотације у оптимизованом режиму рада [27,38].

За разлику од арсена, вредности боје показују израженију осетљивост на време уноса ваздуха. Иако је у свим JAR DAF тестовима постигнуто значајно смањење боје у односу на сирову воду, уочене разлике између појединачних тестова указују на сложенију интеракцију између органских компонената, флокова и мехурића. Ово је у складу са чињеницом да боја воде потиче од различитих фракција органске материје, чије уклањање зависи не само од коагулације, већ и од динамике флотације и стабилности флотирајућих агрегата [9,19,25].

Резултати ТОС показују умерено смањење у односу на сирову воду и најмању варијабилност унутар Серије 9. Овакво понашање је очекивано, јер ТОС представља интегрални параметар који обухвата и растворене органске фракције које нису у потпуности подложне уклањању DAF процесом [19,29]. Са аспекта термодинамике и кинетике процеса, утицај времена уноса ваздуха на ТОС може се повезати са временом потребним за успостављање квазиравнотеже између раствореног и ослобођеног ваздуха, као и са ограничењима преноса масе и судара мехурића са органским флоковима [50].

Посматрано у целини, упоредни приказ резултата јасно показује да различити параметри квалитета воде различито реагују на промене динамике флотације. Док је уклањање арсена доминантно условљено хемијским факторима, уклањање боје и укупне органске материје у већој мери зависи од физичких услова процеса, укључујући време уноса ваздуха и хидродинамику флотационог простора. Ови резултати потврђују да оптимизација DAF процеса мора бити заснована на интегралном приступу који обухвата и термодинамичке и кинетичке аспекте процеса [42,43,51,52].

Серија 9 приказана на Слици 4.13, као завршна лабораторијска серија, потврђује применљивост резултата добијених у претходним испитивањима и указује на значај дефинисања оптималног временског интервала уноса ваздуха у циљу постизања стабилног и ефикасног рада DAF постројења у реалним условима.



Слика 4.13. Упоредни приказ концентрација арсена, боје и TOC у сировој и третираној води након DAF JAR тестирања (Серија 9)

4.3.5 Закључци друге фазе испитивања - DAF JAR тестови

Друга фаза истраживања обухватила је серију лабораторијских DAF JAR тестова (Серије 5, 7, 8 и 9), чији је циљ био систематично испитивање утицаја појединачних и комбинованих процесних параметара на ефикасност уклањања арсена, боје воде и укупне органске материје. Кроз прогресивну оптимизацију процесних услова, од испитивања појединачних утицаја до стабилизованог режима рада, омогућено је дубље разумевање понашања DAF процеса и идентификација параметара који имају кључну улогу у постизању стабилног и ефикасног третмана воде.

У овом поглављу приказана је синтезна и компаративна анализа резултата добијених у оквиру Серија 7, 8 и 9, са посебним освртом на упоредно понашање различитих параметара квалитета воде у условима различитих процесних концепата. Оваквим приступом омогућено је да се резултати појединачних серија сагледају у ширем контексту и да се изведу закључци релевантни за примену DAF процеса у реалним условима рада постројења за припрему воде.

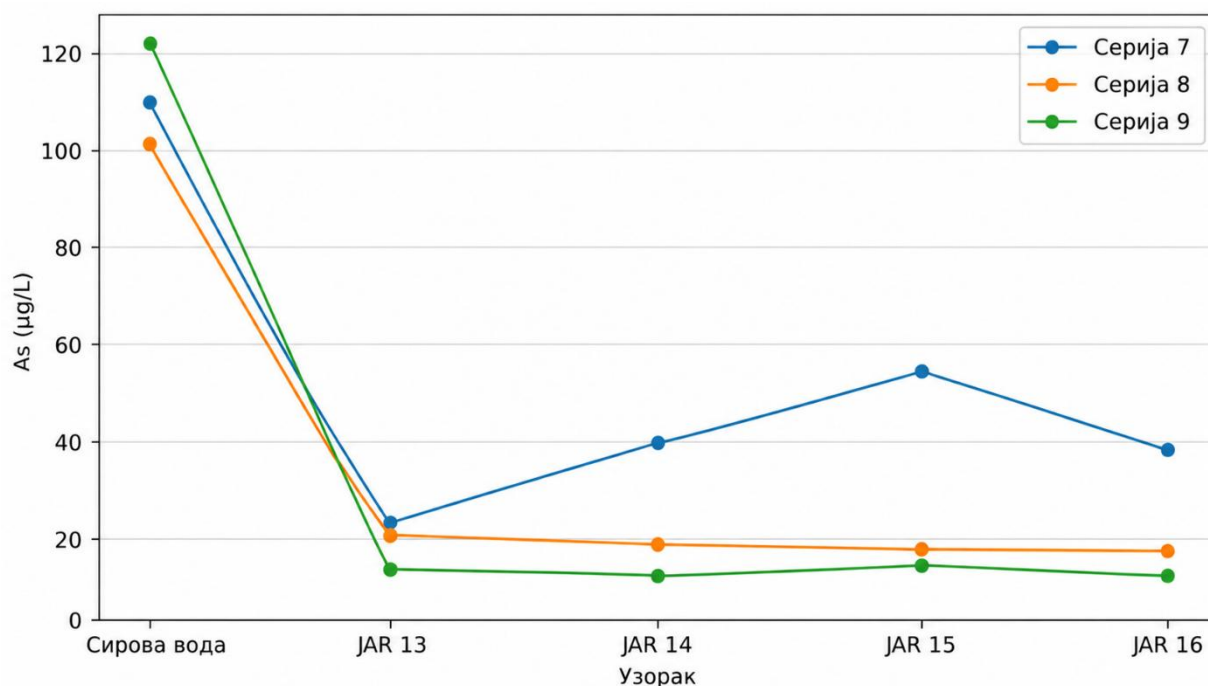
4.3.5.1 Упоредна анализа резултата Серија 7, 8 и 9

Упоредна анализа резултата добијених у Серијама 7, 8 и 9 омогућава сагледавање понашања DAF процеса у условима различитих процесних концепата, при чему су анализирани параметри арсен, боја воде и укупна органска материја (TOC), дати су у Табели 4.7. За разлику од претходних поглавља, у којима су резултати разматрани по појединачним серијама, овде је акценат стављен на упоређивање трендова и стабилности процеса у условима прогресивне оптимизације процесних параметара.

Табела 4.7. Упоредни приказ резултата DAF JAR тестова за Серије 7, 8 и 9

Серија	Арсен у сировој води (µg/l)	Арсен после третмана (µg/l)	Боја у сировој води (°Pt–Co)	Боја после третмана (°Pt–Co)	ТОС у сировој води (mgC/l)	ТОС после третмана (mgC/l)	Основни закључак
Серија 7	122,4	39,57–56,35	51	23-31	8,1	3,06-3,26	Осетљивост на рецикулацију
Серија 8	122,4	37,16–56,25	51	9–16	8,1	3,11–3,41	Стабилизација процеса
Серија 9	122,4	14,7–17,2	53	10–20	8,2	3,0–3,6	Најстабилнији услови

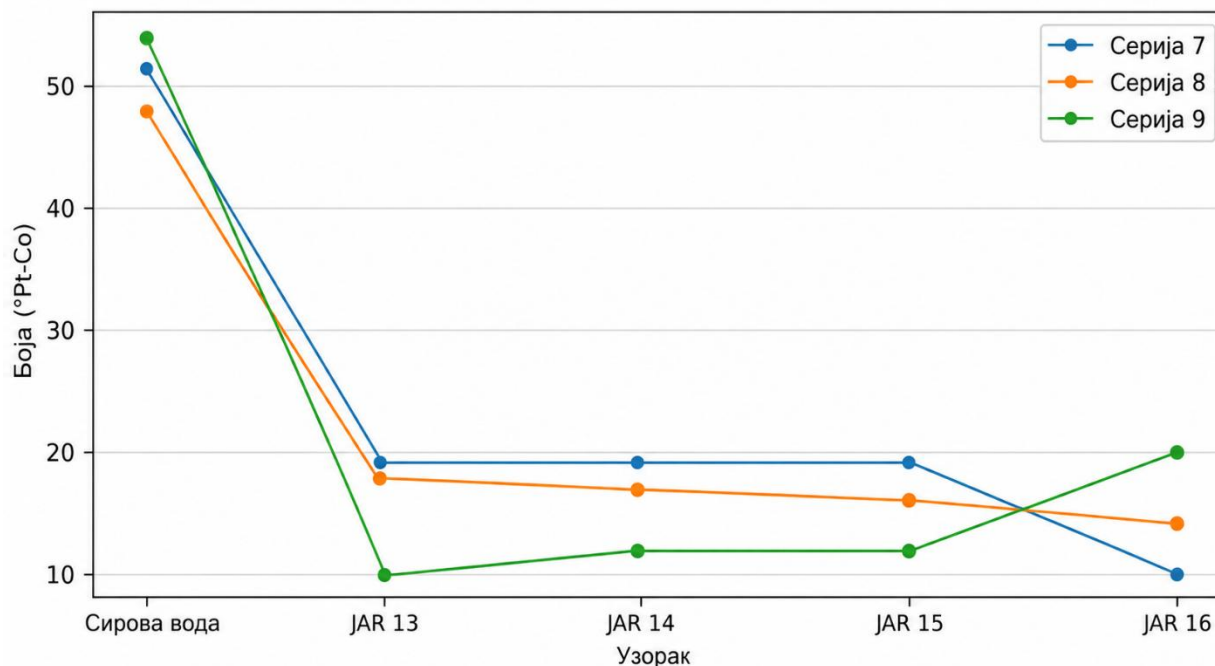
Упоредни приказ концентрација арсена у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9 (Слика 4.14) показује да је у свим серијама постигнуто значајно смањење концентрације арсена у односу на сирову воду. Истовремено, уочава се да прелазак са Серије 7 на Серије 8 и 9 доводи до смањења варијабилности резултата између појединачних JAR тестова, што указује на стабилизацију процеса. Овакво понашање потврђује да је уклањање арсена у DAF процесу превасходно контролисано хемијским условима коагулације и формирањем стабилних флокова, док оптимизација физичких услова флотације доприноси углавном поузданости и репродуктивности резултата [1,2,9,11,21]. Ови налази су у складу са литературом која истиче да, након успостављања адекватних услова коагулације, додатне промене параметара флотације имају ограничен утицај на ефикасност уклањања арсена [27,38].



Слика 4.14. Упоредни приказ концентрација арсена у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9

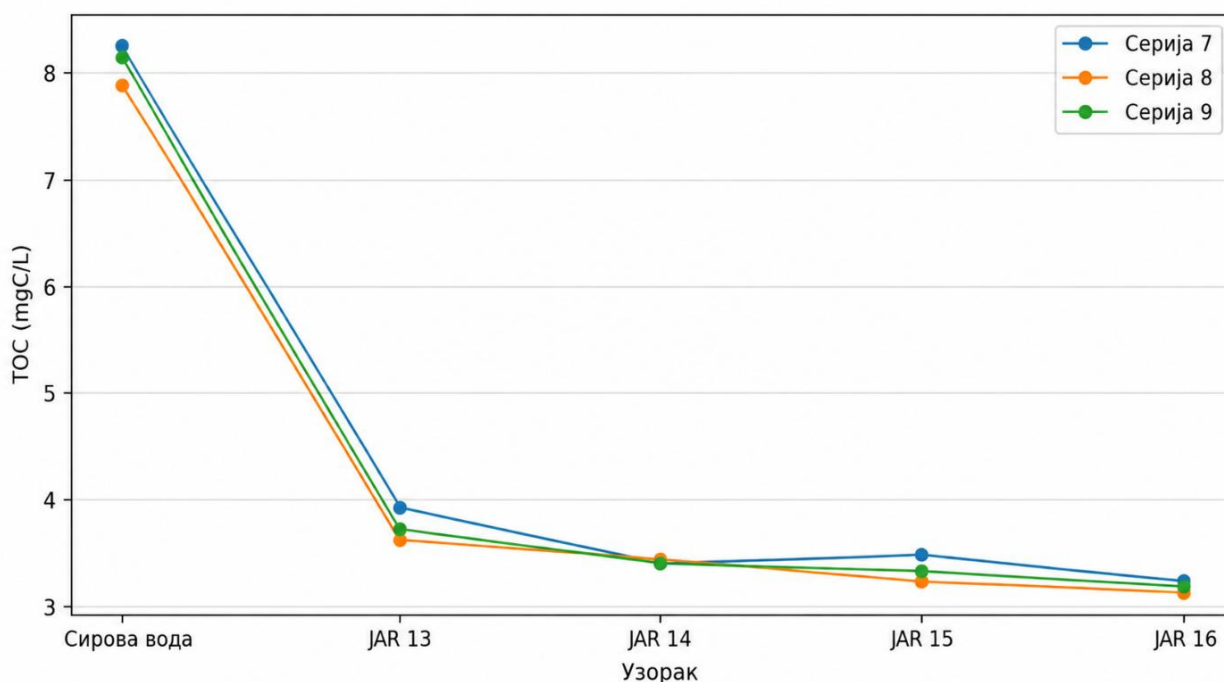
За разлику од арсена, упоредни приказ вредности боје воде у Серијама 7, 8 и 9 (Слика 4.15) указује на израженију осетљивост овог параметра на процесне услове. Иако је у

свим серијама уочено значајно смањење боје у односу на сирову воду, варијабилност резултата је најизраженија у Серији 7, док у Серијама 8 и 9 долази до постепене стабилизације вредности. Ово указује да уклањање компонената које доприносе боји воде, за разлику од арсена, у већој мери зависи од физичких услова флотације, као што су начин и динамика уноса ваздуха, као и интеракција мехурића са органским и хидрофобним фракцијама [9,19,43]. Посебно је значајно што Серија 9 показује најконзистентније резултате, што указује на важност оптимизације динамичких услова процеса за стабилно уклањање боје.



Слика 4.15. Упоредни приказ концентрација боја у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9

Упоредна анализа ТОС у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9 (Слика 4.16) показује умерено смањење концентрације у односу на почетну вредност, уз релативно мале разлике између појединачних серија. Овакво понашање је очекивано, јер ТОС представља интегрални параметар који обухвата различите фракције органске материје, од којих су само одређене подложне уклањању DAF процесом. Иако оптимизација процесних услова у Серијама 8 и 9 доводи до нешто стабилнијих резултата, укупни степен уклањања ТОС остаје ограничен, што је у складу са налазима из литературе који указују да DAF процес превасходно уклања колоидну и флокулисану органску материју, док растворене органске фракције у значајној мери остају присутне у третираној води [19,29].



Слика 4.16. Упоредни приказ концентрација ТОС у сировој и третираној води за Серије 7, 8 и 9. Укупно посматрано, упоредна анализа Серија 7, 8 и 9 показује да различити параметри квалитета воде различито реагују на промене процесних услова. Док је уклањање арсена доминантно условљено хемијским факторима и релативно робусно у односу на варијације физичких услова флотације, уклањање боје и укупне органске материје показује већу осетљивост на динамику процеса. Ови резултати потврђују да је за оптимизацију DAF процеса неопходан интегрални приступ који обухвата и хемијске и физичке механизме уклањања, што је у складу са концептима описаним у релевантној литератури [9,21,42,51].

Посматрано са термодинамичког аспекта, упоредни резултати Серија 7, 8 и 9 указују да се са прогресивном оптимизацијом процесних услова DAF систем постепено помера од кинетички ограниченог режима ка стабилованом режиму ближем квази-равнотежном стању. У таквим условима, расподела загађујућих материја између растворене и флоатбилне фазе постаје доминантно условљена хемијским и површинским интеракцијама, док даље промене физичких параметара процеса имају ограничен утицај на коначну ефикасност уклањања, што је у складу са општим термодинамичким концептима флотације [42,43,51].

У том контексту, стабилно и репродуктивно уклањање арсена у Серијама 8 и 9 може се повезати са успостављањем повољне равнотеже адсорпције арсена на флокове, након чега физички услови флотације доприносе пре свега поузданости процеса, а не значајном повећању ефикасности уклањања [1,2,11,27,38]. Насупрот томе, израженија осетљивост боје и умерена варијабилност ТОС указују да органске фракције присутне у води поседују различиту термодинамичку стабилност и флоатбилност, те да њихово уклањање у већој мери зависи од кинетичких услова процеса, као што су време контакта, број и дистрибуција мехурића и хидродинамика система [9,19,29].

4.3.5.2 Осетљивост параметара квалитета воде на процесне услове

Резултати добијени у оквиру Серија 7, 8 и 9 показују да поједини параметри квалитета воде испољавају различит степен осетљивости на промене процесних услова DAF система. Ове разлике одражавају различите механизме уклањања и доминантне факторе који управљају понашањем сваког параметра током коагулације и флотације. Различита осетљивост испитиваних параметара последица је различитог удела хемијских и физичких механизма који учествују у њиховом уклањању током DAF процеса.

Концентрација арсена показује најмању осетљивост на варијације процесних параметара након успостављања адекватних хемијских услова коагулације. Једном формирани стабилни флокови, у које је арсен инкорпориран путем адсорпције и копреципитације, омогућавају ефикасно издвајање арсена у широком опсегу физичких услова флотације. У том смислу, промене притиска, степена рецикулације или времена уноса ваздуха утичу пре свега на стабилност и репродуктивност процеса, а не на саму ефикасност уклањања арсена [1,2,9,11,21,27,38].

За разлику од арсена, боја воде показује израженију осетљивост на процесне услове, посебно на параметре који утичу на динамику флотације. Органске компоненте које доприносе боји воде обухватају различите фракције са различитим степеном хидрофобности и афинитета ка флоковима, због чега је њихово уклањање у већој мери зависно од кинетике интеракција флок–мехурић и хидродинамичких услова у флотационом простору. Овај резултат је у складу са литературом која указује да је уклањање боје један од параметара који најосетљивије реагују на промене физичких услова DAF процеса [9,19,43].

Параметар ТОС показује умерену осетљивост на процесне услове и представља интегрални показатељ укупног понашања система. Иако оптимизација физичких услова флотације доводи до стабилнијих резултата у Серијама 8 и 9, укупни степен уклањања ТОС остаје ограничен присуством растворених органских фракција које су термодинамички стабилне у воденој фази. Ово указује да је ТОС параметар који истовремено одражава ефекте и хемијских и физичких услова процеса, али и њихова фундаментална ограничења [19,29].

Укупно посматрано, осетљивост параметара квалитета воде на процесне услове може се рангирати у следећем редоследу: арсен < ТОС < боја. Овакав редослед последица је различитих механизма уклањања који доминирају код појединих параметара. Уклањање арсена је превасходно условљено хемијским процесима коагулације, адсорпције и копреципитације на хидроксидима гвожђа, због чега је мање зависно од накнадних промена физичких услова флотације. Насупрот томе, уклањање боје у већој мери зависи од ефикасности интеракције флокула и микромехурића, па је осетљивије на промене процесних услова који утичу на формирање и транспорт флотационих агрегата. ТОС представља интегрални параметар који обухвата и колоидне и растворене органске материје, због чега испољава средњи степен осетљивости. Ови резултати указују да оптимизација DAF процеса мора бити усмерена на усклађивање хемијских и физичких услова процеса, што је у складу са налазима из литературе [9,21,42,51]. Овакво понашање указује да избор оптималних процесних услова не треба заснивати искључиво на максималном уклањању једног параметра, већ на постизању равнотеже између ефикасности уклањања различитих параметара квалитета воде и стабилности рада DAF система.

4.3.5.3 Импликације резултата за реални рад DAF постројења

Резултати добијени у оквиру друге фазе испитивања, обухватајући Серије 7, 8 и 9, пружају значајне смернице за примену DAF процеса у реалним условима рада постројења за припрему воде. Систематском анализом утицаја појединачних и комбинованих процесних параметара омогућено је идентификовање услова који обезбеђују стабилан рад процеса и поуздано уклањање више параметара квалитета воде, што је у складу са приступима описаним у литератури [9,21,42,51].

Један од кључних закључака односи се на уклањање арсена, које се показало као релативно робусно у односу на варијације физичких услова флотације након успостављања адекватних хемијских услова коагулације. Ово указује да у реалном раду постројења примарни фокус треба усмерити на правилно дозирање коагуланата и контролу услова формирања флокова, док оптимизација параметара као што су притисак у сатуратору, степен рецикулације и време уноса ваздуха има значајнију улогу у обезбеђивању стабилности и репродуктивности процеса, а не у повећању саме ефикасности уклањања арсена [1,2,11,27,38].

За разлику од арсена, резултати за боју и ТОС указују на већу осетљивост ових параметара на физичке услове процеса, што има директне импликације за оперативно управљање DAF постројењем, посебно у условима променљивог састава сирове воде. У таквим условима, прилагођавање параметара флотације, као што су динамика уноса ваздуха и хидродинамика флотационог простора, може имати значајан утицај на постизање задовољавајућег квалитета третиране воде, чак и када су хемијски услови третмана непромењени [9,19,29,43].

Посматрано са термодинамичког и кинетичког аспекта, резултати указују да DAF процес у реалним условима рада функционише у режиму у коме је неопходно постићи равнотежу између ефикасности уклањања и стабилности процеса. Прекомерно повећање уноса ваздуха или продужавање времена флотације не мора нужно довести до побољшања резултата, а у појединим случајевима може негативно утицати на стабилност флокова и оперативну поузданост система. Ова запажања су у сагласности са концептима који истичу значај оптимизације процеса у оквиру његових термодинамичких и кинетичких ограничења [42,43,51].

У целини посматрано, резултати ове фазе испитивања потврђују да лабораторијски DAF JAR тестови представљају поуздан алат за дефинисање и проверу процесних услова релевантних за реални рад DAF постројења. Закључци изведени на основу Серија 7, 8 и 9 пружају основу за даљу примену и оптимизацију DAF технологије у пракси, као и за развој стратегија управљања процесом у условима променљивог квалитета сирове воде, што је у складу са досадашњим искуствима и препорукама из литературе [9,21,42,51].

4.3.5.4 Синтеза оптималних процесних услова

На основу резултата добијених током обе фазе експерименталног истраживања може се закључити да је ефикасност DAF процеса последица међусобног дејства термодинамичких, хидродинамичких и хемијских параметара процеса. Испитивања су показала да се оптимални резултати не постижу максималним вредностима појединачних параметара, већ њиховом међусобно усклађеном оптимизацијом. Посебан значај има правилан избор врсте и дозе коагуланта и флокуланта, као и избор радног притиска, степена рецикулације и времена уноса ваздуха, који одређују услове формирања стабилних микромехурића и њихове интеракције са формираним флокулама.

Резултати испитивања утицаја притиска показали су да повећање притиска у сатуратору доводи до повећања количине раствореног ваздуха и формирања већег броја микромехурића, што позитивно утиче на ефикасност флотације. Међутим, након достизања оптималне вредности, даље повећање притиска није довело до пропорционалног повећања ефикасности уклањања, што указује да је неопходно успоставити равнотежу између процесне ефикасности и енергетских захтева система.

Испитивања степена рецикулације показала су да повећање количине рециркулисане воде обезбеђује већу количину раствореног ваздуха и интензивније формирање микромехурића, али само до вредности при којој се обезбеђује оптималан однос количине ваздуха и хидрауличких услова у флотационој комори. Слично томе, време уноса ваздуха утицало је на количину формираних микромехурића и стабилност процеса, при чему је утврђено да прекомерно продужење времена сатурације не доводи до значајног побољшања ефикасности процеса.

Резултати JAR испитивања потврдили су да избор коагуланта и флокуланта представља један од кључних предуслова успешне примене DAF технологије. Правилно формиране флокуле обезбеђују ефикасније везивање микромехурића, што директно утиче на ефикасност уклањања арсена, NOM и боје. Стога се оптимизација процеса не може посматрати искључиво кроз избор термодинамичких параметара, већ као резултат истовременог прилагођавања физичко-хемијских и оперативних услова рада.

Сумирајући добијене резултате, може се закључити да DAF технологија, уз оптималан избор процесних параметара и хемијских реагенса, представља ефикасно решење за третман подземних вода специфичног хемијског састава. Дефинисани оптимални услови рада представљају основу за примену процеса у реалним постројењима, али и смернице за његову даљу оптимизацију и скалирање.

5 Дискусија

Добијени резултати показују да ефикасност DAF процеса у третману испитиване подземне воде није одређена једним процесним параметром, већ међусобним дејством хемијских услова коагулације, притиска у сатуратору, степена рецикулације и времена уноса ваздуха. Иако су термодинамички механизми формирања микромехурића описани у теоријском делу рада, резултати експерименталних серија показују да се коначна ефикасност процеса одређује тек њиховим усклађивањем са карактеристикама формираних флокова и саставом подземне воде.

Овакви резултати потврђују да се DAF процес не може посматрати као искључиво физички процес издвајања честица, већ као интегрисани физичко-хемијски систем у коме су механизми коагулације, флокулације и флотације међусобно условљени. Због тога је оптимизација процеса захтевала истовремено разматрање термодинамичких и процесних параметара.

Резултати свих експерименталних серија показали су да се арсен уклања значајно стабилније у односу на боју и ТОС, што указује да је механизам његовог уклањања доминантно условљен хемијским процесима коагулације и адсорпције на $\text{Fe}(\text{OH})_3$ флоковима. Након успостављања повољних услова коагулације, даље промене физичких параметара флотације имале су ограничен утицај на коначну ефикасност уклањања арсена, али су значајно утицале на стабилност процеса и репродуктивност резултата. Насупрот томе, вредности боје и ТОС показале су већу осетљивост на динамику процеса флотације, што указује да уклањање органске материје у већој мери зависи од интеракције микромехурића са флокулисаним и колоидним органским фракцијама.

Добијени резултати у складу су са литературним наводима да је уклањање арсена у DAF процесу првенствено последица његове адсорпције на хидроксидним флоковима гвожђа, док флотација омогућава њихово ефикасно издвајање из водене фазе. Са друге стране, уклањање природне органске материје представља сложенији процес који зависи од молекулске структуре органских једињења, степена њихове коагулабилности и ефикасности интеракције са микромехурићима. Ово објашњава већу варијабилност концентрације ТОС и боје у односу на концентрацију арсена, што је уочено и током спроведених експерименталних испитивања.

Поређење резултата по серијама показује постепену стабилизацију DAF процеса током истраживања. У Серији 5 доминантан утицај имао је притисак у сатуратору, јер је количина раствореног и накнадно ослобођеног ваздуха директно одређивала интензитет формирања микромехурића и вероватноћу њихове интеракције са флоковима. У Серији 7 уочено је да параметри рецикулације и времена уноса ваздуха утичу пре свега на стабилност флотационог слоја и равномерност процеса, док су у Серијама 8 и 9 добијени најстабилнији и најрепродуктивнији резултати. Ово указује да оптимизација DAF процеса не подразумева максимизацију појединачног параметра, већ успостављање уравнотежених хидродинамичких и хемијских услова у систему.

Поређење резултата по експерименталним серијама показује да је током истраживања постепено постигнута стабилизација DAF процеса, што указује на значај систематске оптимизације процесних параметара. У Серији 5 доминантан утицај имао је притисак у сатуратору, јер је количина раствореног и накнадно ослобођеног ваздуха директно одређивала број формираних микромехурића и вероватноћу њихове интеракције са флоковима. У Серији 7 показало се да степен рецикулације није утицао само на количину доступног ваздуха, већ и на хидродинамичке услове у флотационој комори, што се одразило на стабилност флотационог слоја и репродуктивност резултата. Током

Серија 8 и 9, након оптимизације процесних параметара, постигнути су најстабилнији резултати за све испитиване параметре квалитета воде, што потврђује да успешност DAF процеса није последица максимизације појединачног параметра, већ њиховог међусобног усклађивања. Овакви резултати указују да је оптимизација DAF процеса неопходно заснована на интегралном приступу који истовремено обухвата хемијске, термодинамичке и хидродинамичке услове рада система.

Иако су у оптимизованим условима постигнута значајна смањења концентрација арсена, боје и ТОС, резултати указују да DAF процес има и одређена ограничења, посебно у случају растворених органских фракција. У свим серијама део органске материје остао је присутан у третираној води, што указује да механизми флотације и коагулације нису подједнако ефикасни за све фракције природне органске материје. Ово указује да део растворених органских фракција остаје стабилан у условима примењене коагулације и флотације, што представља једно од ограничења DAF процеса у третману вода са сложеним органским саставом. Поред тога, уочено је да продужење времена уноса ваздуха и повећање интензитета флотације не доводе нужно до пропорционалног повећања ефикасности процеса. У појединим условима интензивнији унос ваздуха доводио је до делимичне дестабилизације флокова и повећане варијабилности резултата, што указује на постојање оптималног опсега процесних параметара изнад којег даље повећање интензитета процеса не даје додатни ефекат.

Ови резултати указују да се оптимизација DAF процеса не може заснивати искључиво на интензивирању физичких услова флотације. Напротив, након достизања оптималног опсега процесних параметара, даље повећање притиска или интензитета уноса ваздуха може довести до повећане потрошње енергије без значајног побољшања ефикасности уклањања загађујућих материја. Са практичног аспекта, ово потврђује да је за економичан и стабилан рад DAF постројења неопходно успоставити равнотежу између ефикасности процеса и енергетских захтева система.

Овакво понашање DAF система у складу је са налазима из литературе који указују да ефикасност флотације није искључиво условљена количином ослобођеног ваздуха, већ и стабилношћу формираних флокула, расподелом величине микромехурића и хидродинамичким условима у систему [9,38,43]. Сличне резултате наводи Edzwald [9], који истиче да прекомерно повећање количине микромехурића може довести до ремећења стабилности флокула и смањења ефикасности раздвајања у DAF системима. Више аутора наводи да прекомерно интензивирање процеса флотације може довести до ремећења структуре флокова и смањења ефикасности раздвајања, посебно у системима са значајним уделом органске материје [9,19,51]. Резултати добијени у овом истраживању потврђују ове наводе, јер су најстабилнији резултати постигнути у условима умерених и уравнотежених процесних параметара, а не при максималним вредностима притиска или времена уноса ваздуха.

Добијени резултати додатно указују да успешност DAF процеса у третману подземних вода није условљена само оптимизацијом појединачних процесних параметара, већ њиховим међусобним усклађивањем са хемијским карактеристикама воде која се третира. Поред утицаја појединачних процесних параметара који су широко разматрани у литератури, резултати овог истраживања показују значај њиховог интегралног деловања, чиме се обезбеђује стабилан рад система и висока ефикасност уклањања арсена, природне органске материје и боје. Оваква запажања представљају значајан допринос бољем разумевању примене DAF технологије у третману подземних вода сложеног хемијског састава.

Посебан значај добијених резултата огледа се у чињеници да је истраживање спроведено на реалној подземној води сложеног хемијског састава, са повишеним концентрацијама арсена, органске материје, гвожђа и мангана. У таквим условима DAF процес није функционисао као изолован физички механизам раздвајања, већ као интегрални систем у коме су хемијски услови коагулације, својства формираних флокула и хидродинамика флотације међусобно зависни. Управо због тога резултати овог истраживања имају значај не само са аспекта лабораторијске оптимизације, већ и са аспекта примене DAF процеса у реалним постројењима за припрему подземних вода са повишеним садржајем природне органске материје и арсена.

Практична вредност овог истраживања огледа се у томе што су дефинисани процесни услови који могу послужити као основа за пројектовање и оптимизацију DAF система за третман подземних вода сличног хемијског састава. Истовремено, добијени резултати указују да се висока ефикасност процеса може постићи без непотребног повећања радног притиска и интензитета флотације, што представља важан аспект са становишта енергетске ефикасности и оперативних трошкова будућих постројења.

Иако су добијени резултати показали висок потенцијал DAF процеса у третману испитиване подземне воде, потребно је узети у обзир и ограничења спроведеног истраживања. Испитивања су изведена у лабораторијским шаржним условима, који омогућавају високу контролу процесних параметара, али не могу у потпуности репродуковати сложене хидродинамичке услове реалних континуалних DAF система. Због тога добијене резултате треба тумачити као основу за даљу оптимизацију процеса у пилот и индустријским условима. Поред тога, у раду нису анализиране дугорочне промене карактеристика флокова, стабилност система у условима варијације састава сирове воде, као ни потенцијални утицај сезонских промена на ефикасност процеса. Будућа истраживања требало би усмерити ка пилот и полуиндустријским испитивањима, са посебним освртом на дугорочну стабилност рада, потрошњу реагенса, продукцију муља и енергетску ефикасност DAF процеса.

Укупно посматрано, резултати овог истраживања показују да успешна примена DAF процеса у третману подземних вода са повишеним концентрацијама арсена и природне органске материје захтева интегралну оптимизацију хемијских, термодинамичких и хидродинамичких параметара процеса. Док су услови коагулације и избор коагуланата имали доминантан утицај на ефикасност уклањања арсена, физички параметри флотације, пре свега притисак, степен рецикулације и време уноса ваздуха, показали су значајан утицај на стабилност процеса и ефикасност уклањања природне органске материје и боје. Резултати добијени у оптимизованим условима потврђују да комбинација FeCl_3 и PAC коагуланата, уз пажљиво дефинисане оперативне услове DAF процеса, обезбеђује стабилан и ефикасан третман испитиване подземне воде. Истовремено, добијени резултати представљају основу за даљу примену и оптимизацију DAF технологије у пилот и индустријским условима, као и допринос бољем разумевању повезаности термодинамичких услова, процесних параметара и ефикасности уклањања загађујућих материја у третману подземних вода.

6 Закључак

Дисертација показује да DAF процес представља термодинамички утемељену и технолошки оправдану опцију за третман подземних вода специфичног хемијског састава, чиме се проширује област примене ове технологије у односу на њену традиционалну употребу у третману површинских вода [17,50]. Формулисањем термодинамичко-хидродинамичког оптимума рада указано је на могућност преласка са претежно емпиријске оптимизације ка научно заснованом приступу анализи и оптимизацији DAF процеса. Примена DAF технологије у третману подземних вода захтева прилагођавање процесних и термодинамичких услова специфичном хемијском саставу воде и интерфацијалним и електрохемијским механизмима који се одвијају у систему. Експериментална испитивања показала су да су, поред оптимизације оперативних параметара, избор и дозирање хемијских реагенса од кључног значаја за ефикасност процеса.

Сprovedена лабораторијска JAR и DAF JAR испитивања потврдила су постављене полазне хипотезе. Утврђено је да термодинамички и процесни параметри, пре свега притисак, температура и степен рецикулације, директно утичу на растворљивост ваздуха, формирање микромехурића и ефикасност флотације. Истовремено, избор и дозирање коагуланата и флокуланата показали су се као кључни за формирање стабилних флокула и уклањање арсена, органских материја и боје.

Повећање притиска у сатуратору повећава растворљивост ваздуха, али ефикасност уклањања не расте линеарно са притиском, што указује на постојање оптималног, а не максималног режима рада DAF система. Температура такође има значајан утицај на процес, јер истовремено утиче на растворљивост ваздуха, вискозност воде и динамику интеракције мекхурића и флокула. Ови резултати потврђују да се оптимални услови рада постижу усклађивањем процесних параметара, а не њиховим појединачним максимизовањем.

Анализа услова нуклеације показала је да формирање и стабилност микромехурића зависе од степена презасићења, површинске напетости и хемијског састава воде. Специфичности подземних вода стога захтевају прилагођавање услова формирања микромехурића, јер њихова величина, број и стабилност непосредно утичу на ефикасност интеракције са формираним флокулама и, последично, на ефикасност флотације.

Научни допринос дисертације огледа се у:

- систематском испитивању примене DAF технологије у третману подземних вода специфичног хемијског састава;
- утврђивању утицаја термодинамичких параметара, растворљивости ваздуха, степена презасићења и формирања микромехурића на ефикасност уклањања арсена, ТОС и боје применом DAF процеса;
- дефинисању оптималних процесних услова рада DAF система, укључујући притисак у сатуратору, степен рецикулације и услове примене коагуланата;
- потврди значаја термодинамичко-хидродинамичког приступа у анализи и оптимизацији DAF процеса;
- проширењу постојећих научних сазнања о примени DAF технологије у третману подземних вода, области која је до сада била знатно мање истражена у односу на третман површинских и индустријских вода.

Иако су добијени резултати засновани на систематичном експерименталном раду и показују висок степен репродуктивности, неопходно је указати на одређена ограничења истраживања која одређују оквир применљивости добијених закључака.

Пре свега, експериментални рад спроведен је у лабораторијским условима применом модификованог DAF JAR система, са контролисаним хидродинамичким условима који се могу разликовати од услова у реалним постројењима. Због тога је за пренос добијених резултата на пуни технички систем неопходна њихова додатна верификација у реалним условима рада. Друго, истраживање је обухватило подземну воду специфичног хемијског састава, при чему испитивани опсег јонске јачине, органског садржаја и других параметара није обухватио све могуће хидрогеохемијске услове. Због тога примена добијених резултата на изворе воде са значајно различитим карактеристикама захтева додатну експерименталну проверу. Треће, енергетска и техно-економска анализа DAF процеса нису биле предмет овог истраживања. Стога анализа односа између специфичне потрошње енергије, оперативних услова и постигнуте ефикасности уклањања представља важан правац будућих истраживања и оптимизације DAF процеса у реалним условима рада.

Пре свега, даља истраживања треба усмерити на развој интегрисаног математичког модела који би повезао степен презасићења, нуклеациону кинетику и масени пренос у јединствени предиктивни систем управљања DAF процесом [21]. Такав модел омогућио би поузданије предвиђање и управљање процесом на основу реалних параметара воде. Верификација дефинисаног термодинамичко-хидродинамичког оптимума у условима пуног оптерећења постројења представља неопходан корак за потврду предложеног концепта и пренос резултата у техничку праксу [43,50].

Посебан правац будућих истраживања представља енергетска и техно-економска оптимизација DAF процеса, укључујући анализу односа између специфичне потрошње енергије и постигнуте ефикасности уклањања контаминаната у реалним условима рада [29]. Будућа истраживања треба усмерити и на испитивање утицаја сезонских варијација температуре и хемијског састава подземних вода на стабилност микромехурића и ефикасност процеса, као основу за развој адаптивних режима управљања DAF системом [44,53]. Коначно, развој хибридних система који интегришу DAF са напредним технологијама третмана, као што су адсорпциони и мембрански процеси, представља перспективан правац за повећање ефикасности уклањања специфичних контаминаната и проширење домена примене технологије [17,50].

Показано је да ефикасност DAF процеса није резултат изолованог утицаја појединачних параметара, већ њиховог међусобног дејства. Дефинисање термодинамичко-хидродинамичког оптимума представља основу за прелазак са претежно емпиријске оптимизације ка научно заснованом приступу анализи и управљању процесом. На тај начин, DAF процес се може посматрати као термодинамички контролисан систем фазних трансформација у трокомпонентном систему чврсто–течно–гас, чија се стабилност и ефикасност могу квантитативно описати и оптимизовати.

Резултати ове дисертације показују да DAF технологија има значајан потенцијал за примену у третману подземних вода са повишеним концентрацијама арсена, NOM и компонената које условљавају боју воде. Добијени резултати представљају научну основу за даља истраживања и практичну примену DAF технологије у пројектовању и оптимизацији система за третман подземних вода, уз интеграцију термодинамичких и процесних принципа у циљу постизања веће ефикасности и одрживости процеса.

7 ЛИТЕРАТУРА

1. Edzwald JK. Dissolved air flotation and me. *Water Research*. 2010;44(7):2077–2106. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.040>
2. Radibratović ZZ, Cakić BB, Kijevčanin M, Radović IR, Mitrović DM. Application Possibilities and Expected Effects of Dissolved Air Flotation in Groundwater Treatment for Removing TOC, Color and As. *Applied Sciences*. 2025;15(20):11255. <https://doi.org/10.3390/app152011255>
3. Kordmostafapour F, Pourmoghadas H, Shahmansouri MR, Parvaresh A. Arsenic Removal by Dissolved Air Flotation. *Journal of Applied Sciences*. 2006;6(5):1153–1158. <https://doi.org/10.3923/jas.2006.1153.1158>
4. Edzwald JK. *Dissolved Air Flotation for Water Clarification*. Denver, CO: American Water Works Association (AWWA); 2012.
5. Правилник о хигијенској исправности воде за пиће. „Службени лист СРЈ“, бр. 42/98 и 44/99 и „Службени гласник РС“, бр. 28/2019.
6. Haarhoff J, Edzwald JK. Chapter 6: Dissolved Air Flotation in Drinking Water Treatment. In: *Interface Science and Technology*. Vol. 10. Elsevier; 2006. p. 293–511. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(06\)80075-X](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80075-X)
7. Haarhoff J, Edzwald JK. Dissolved air flotation modelling: Insights and shortcomings. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. 2004;53(3):127–150. <https://doi.org/10.2166/aqua.2004.0012>
8. Malley JP Jr, Edzwald JK. Concepts for dissolved air flotation treatment of drinking waters. *AQUA – Journal of Water Supply: Research and Technology*. 1991;40(1):7–17.
9. Teixeira MR, Rosa MJ. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*: Part I: The key operating conditions. *Separation and Purification Technology*. 2006;52(1):84–94. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.03.017>
10. Fanaie VR, Khiadani M, Sun G. Effect of salinity and temperature on air dissolution in an unpacked air saturator of a dissolved air flotation system. *Desalination and Water Treatment*. 2019;170:91–100. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24718>
11. Dassey AJ, Theegala CS. Optimizing the air dissolution parameters in an unpacked dissolved air flotation system. *Water*. 2012;4(1):1–11. <https://doi.org/10.3390/w4010001>
12. Rajapakse N, Zargar M, Sen T, Khiadani M. Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution, bubble size and rise velocity in dissolved air flotation: A review. *Separation and Purification Technology*. 2022;289:120772. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120772>
13. Fanaie VR, Khiadani M, Ayres T. Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;575:382–390. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.027>
14. Amiri S, Vatanpour V, He T. Optimization of Coagulation–Flocculation Process in Efficient Arsenic Removal from Highly Contaminated Groundwater by Response

- Surface Methodology. *Molecules*. 2022;27(22):7953.
<https://doi.org/10.3390/molecules27227953>
15. Aremu JO, Glasgow G, Lay M. The impact of competing anions on arsenate removal in dissolved air flotation. *Results in Engineering*. 2025;25:104374.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104374>
 16. Matilainen A, Vepsäläinen M, Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;159(2):189–197. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>
 17. Edzwald JK, Walsh JP, Kaminski GS, Dunn HJ. Flocculation and Air Requirements for Dissolved Air Flotation. *Journal AWWA*. 1992;84(3):92–100.
<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1992.tb07325.x>
 18. Radibratović Z, Cakić B, Kijevčanin M, Radović I, Mitrović D, Perović M. Thermodynamic and Microbubble-Dynamics Framework for Dissolved-Air Flotation Pretreatment of Arsenic-Rich Groundwater. *Water*. 2026;18(5):633.
<https://doi.org/10.3390/w18050633>
 19. Henry W. Experiments on the Quantity of Gases Absorbed by Water, at Different Temperatures, and under Different Pressures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1803;93:29–42. <https://doi.org/10.1098/rstl.1803.0004>
 20. Han M, Kim T, Kim J. Effects of floc and bubble size on the efficiency of the dissolved air flotation (DAF) process. *Water Science and Technology*. 2007;56(10):109–115. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.779>
 21. Rodrigues RT, Rubio J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. *Minerals Engineering*. 2003;16(8):757–765. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00181-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00181-X)
 22. Nair SS, Pinedo-Cuenca R, Stubbs T, Davis SJ, Ganesan PB, Hamad F. Contemporary application of microbubble technology in water treatment. *Water Science and Technology*. 2022;86(9):2138–2156. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.328>
 23. Patnaik N, Menon A, Gupta T, Joshi V. Dynamics of bubble–particle interaction in different flotation processes and applications: A review of recent studies. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020;56(6):206–224.
<https://doi.org/10.37190/ppmp/128610>
 24. Bae YH, Sung NC, Lee SS, Kim YH, Lee EJ, Kim HJ. Potable Water Treatment by Polyacrylamide Base Flocculants, Coupled with an Inorganic Coagulant. *Environmental Engineering Research*. 2007;12(1):21–29.
<https://doi.org/10.4491/EER.2007.12.1.021>
 25. Sharp EL, Parsons SA, Jefferson B. The impact of changing NOM composition on coagulation performance, sludge production and final water quality. *Water Research*. 2006;40(8):1577–1583. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.009>
 26. Gregory J. *Particles in Water: Properties and Processes*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005. <https://doi.org/10.1201/9780203508459>
 27. Lee CS, Robinson J, Chong MF. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92(6):489–508.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.010>

28. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. 2002;17(5):517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
29. Yang M, Fernandes del Pozo D, Torfs E, Rehman U, Yu D, Nopens I. Numerical simulation on the effects of bubble size and internal structure on flow behavior in a dissolved air flotation tank: A comparative study of CFD and CFD–PBM approach. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2021;7:100131. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100131>
30. Levitsky I, Tavor D, Gitis V. Micro and nanobubbles in water and wastewater treatment: A state-of-the-art review. *Journal of Water Process Engineering*. 2022;47:102688. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102688>
31. De Rijk S, Van der Graaf JHJM, Den Blanken JM. Bubble size in flotation thickening. *Water Research*. 1994;28(2):465–473. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90284-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90284-4)
32. Agarwal A, Ng WJ, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*. 2011;84(9):1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
33. Vlaški A, Van Breemen AN, Alaerts GJ. The role of particle size and density in dissolved air flotation and sedimentation. *Water Science and Technology*. 1997;36(4):177–189. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00438-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00438-1)
34. Rebhun M, Lurie M. Control of organic matter by coagulation and dissolved air flotation. *Water Science and Technology*. 1993;27(11):1–11.
35. Zainal-Abideen M, Aris A, Yusof F, Abdul-Majid Z, Selamat A, Omar SI. Optimizing the coagulation process in a drinking water treatment plant: Comparison between traditional and statistical experimental design jar tests. *Water Science and Technology*. 2012;65(3):496–503. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.561>
36. SRPS EN ISO 8467:2007. Water quality—Determination of permanganate index. Institut za standardizaciju Srbije; 2007.
37. Amirtharajah A, O'Melia CR. Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: Pontius FW, editor. *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 1990.
38. Song Y, Dong B, Gao N, Deng Y. Comparative Evaluation of Aluminum Sulfate and Ferric Sulfate-Induced Coagulations as Pretreatment of Microfiltration for Treatment of Surface Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015;12(6):6700–6709. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606700>
39. Zarchi I, Friedler E, Rebhun M. Polyaluminium chloride as an alternative to alum for the direct filtration of drinking water. *Environmental Technology*. 2013;34(9):1199–1209. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.743594>
40. Bolto B, Gregory J. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*. 2007;41(11):2301–2324. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>
41. Kim T, Temesgen T, Park H, Han M. Physical characteristics of bubbles in dissolved air flotation processes in seawater reverse osmosis desalination plants. *Desalination and Water Treatment*. 2017;70:19–23. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20359>

42. Ali SM, Aziz SQ. Dissolved Air Flotation (DAF) Operational Parameters and Limitations for Wastewaters Treatment with Cost Study. *Recycling and Sustainable Development*. 2023;16(1):91–97. <https://doi.org/10.5937/ror2301091A>
43. Sancha AM. Review of Coagulation Technology for Removal of Arsenic: Case of Chile. *Journal of Health, Population and Nutrition*. 2006;24(3):267–272. PMID: 17366767.
44. SRPS ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Institut za standardizaciju Srbije; 2017.
45. SRPS EN ISO 11885:2011. Water quality—Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Institut za standardizaciju Srbije; 2011.
46. SRPS EN 1484:2012. Water analysis—Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). Institut za standardizaciju Srbije; 2012.
47. SRPS EN ISO 7887:2013. Water quality—Examination and determination of colour. Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
48. SRPS EN ISO 10523:2016. Water quality—Determination of pH. Institut za standardizaciju Srbije; 2016.
49. SRPS EN 27888:2009. Water quality—Determination of electrical conductivity. Institut za standardizaciju Srbije; 2009.
50. Černi Đ, Ilić M. Hydrogeological Characteristics of the Zrenjanin Water Source. *Journal of the Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources*. Belgrade, Serbia; 1998.
51. Takahashi M. Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: Electrical properties of the gas–water interface. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005;109(46):21858–21864. <https://doi.org/10.1021/jp0445270>
52. Muñoz-Alegría JA, Muñoz-España E, Flórez-Marulanda JF. Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Uses in Wastewater Treatment. *TecnoLógicas*. 2021;24(52):e2111. <https://doi.org/10.22430/22565337.2111>
53. Zouboulis AI, Avranas A. Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2000;172(1–3):153–161. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00561-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00561-6)

Биографија

Зорана З. Радибратовић рођена је 31. јануара 1979. године у Београду, где је завршила основну школу и XIII београдску гимназију. Основне академске студије хемијског инжењерства завршила је 2004. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Хемијско инжењерство, одбранивши рад „Експериментално одређивање волуметријских особина тернарног система етанол + хлороформ + бензен у температурном интервалу 288,15–313,15 K“ под менторством проф. др Мирјане Кијевчанин.

Након дипломирања, од 2005. до 2008. године радила је у компанији ИК „Консалтинг и пројектовање“, као пројектант-сарадник на развоју технолошких решења и пројеката у области припреме воде и третмана отпадних вода. Од 2008. године запослена је у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“ у Београду, где је напредовала од самосталног истраживача и водећег истраживача до руководећих позиција. Од 2017. до 2020. године била је шеф Сектора за водоснабдевање, од 2020. до 2024. руководилац Сектора за машинство и технологију, а од 2024. руководилац Сектора за машинство, технологију и архитектуру.

У професионалном раду учествовала је у вођењу и изради више од педесет студија, идејних, пројеката за грађевинску дозволу и пројеката за извођење у области припреме воде за пиће и пречишћавања отпадних вода, као и у пуштању постројења у рад и надзору.

Кандидаткиња је активан члан Инжењерске коморе Србије и Коморе Републике Српске, ангажована је као ментор у Републичкој комисији за полагање стручног испита, а учествује и у раду комисија Института за стандардизацију Србије за квалитет воде (KS H147) и системе управљања заштитом животне средине (KS A207). Поседује лиценце одговорног пројектанта и одговорног извођача у Србији, као и лиценце за пројектовање и ревизију техничке документације у Републици Српској.

Резултати досадашњег научноистраживачког и стручног рада кандидаткиње објављени су у категоријама M21, M23, M33, M63 и M81.

Верификација научних доприноса

Из истраживања непосредно повезаних са овом докторском дисертацијом кандидаткиња Зорана Радибратовић публиковала је два научна рада у међународним часописима категорије M20 (два M21 и један M23).

Категорија M21

1. **Radibratović Z.**, Cakić B., Kijevčanin M., Radović I., Mitrović D. (2025) Application possibilities and Expected Effects of Dissolved Air Flotation in Groundwater Treatment for Removing TOC, Color and As, Applied Sciences, 15(20), 11255. (IF=2,5) (ISSN: 2076-3417) (<https://doi.org/10.3390/app152011255>)

2. **Radibratović Z.**, Cakić B, Kijevčanin M, Radović I, Mitrović D, Perović M. Thermodynamic and Microbubble-Dynamics Framework for Dissolved-Air Flotation Pretreatment of Arsenic-Rich Groundwater. *Water*. 2026;18(5):633. <https://doi.org/10.3390/w18050633>

Категорија M23

3. **Radibratović Z.**, Cakić B., Vilotijević M., Radović I.R., Kijevčanin M.L. (2025) Implementation of emergency measures to improve the efficiency of nickel removal from water at the existing water treatment plant. *Hem Ind*, 79 (1), 9. (IF=0,5) (ISSN: 0367-598X) (<https://doi.org/10.2298/HEMIND240425024R>)

4. Научни и практични допринос резултата истраживања додатно је верификован техничким решењем „Развој и примена иновативног DAF поступка за предtretман подземних вода сложеног квалитета“ (категорије M81 – ново техничко решење примењено на међународном нивоу), аутора Зоране Радибратовић, Мирјане Кијевчанин и Марије Перовић.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Зорана Радибратовић

Број индекса 4036/2022

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај термодинамичких параметара и хемијских реагенса на ефикасност флотације
раствореним ваздухом у третману подземних вода

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Зорана Радибратовић

Број индекса 4036/2022

Студијски програм Хемијско инжењерство

Наслов рада Утицај термодинамичких параметара и хемијских реагенаса на ефикасност флотације раствореним ваздухом у третману подземних вода

Ментор Проф. Др Мирјана Кијевчанин

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај термодинамичких параметара и хемијских реагенаса на ефикасност флотације раствореним ваздухом у третману подземних вода

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе 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 прерада (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.