

Analiza učinkovitosti i hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita u obradi kompostne procjedne vode

Galov, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:615001>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**ANALIZA UČINKOVITOSTI HIBRIDNOG PROCESA
ELEKTROKOAGULACIJE I PRIRODNOG ZEOLITA
U OBRADI KOMPOSTNE PROCJEDNE VODE**

ZAVRŠNI RAD

KARLA GALOV

Matični broj: 1331

Split, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
ZAŠTITA OKOLIŠA

ANALIZA UČINKOVITOSTI HIBRIDNOG PROCESA
ELEKTROKOAGULACIJE I PRIRODNOG ZEOLITA
U OBRADI KOMPOSTNE PROCJEDNE VODE

ZAVRŠNI RAD

KARLA GALOV

Matični broj: 1331

Split, rujan 2022.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TEHNOLOGY
UNDERGRADUET STUDY OF CHEMICAL TEHNOLOGY
ENVIRONMENTAL PROTECTION

**EFFICIENCY ANALYSIS OF THE HYBRID PROCESS
OF ELECTROCOAGULATION AND NATURAL
ZEOLITE FOR COMPOST LEACHATE TREATMENT**

BACHELOR THESIS

KARLA GALOV

Parent number: 1331

Split, September 2022

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Preddiplomski sveučilišni studij: Kemijska tehnologija-zaštita okoliša

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada: je prihvaćena na 25. izvanrednoj sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta održanoj 18.03.2022.

Mentor: prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović

ANALIZA UČINKOVITOSTI HIBRIDNOG PROCESA ELEKTROKOAGULACIJE I PRIRODNOG ZEOLITA U OBRADI KOMPOSTNE PROCJEDNE VODE

Karla Galov, 1331

Sažetak: U ovom radu ispitivana je učinkovitost hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita (EKZ) za obradu kompostne procjedne vode. Eksperimenti su provedeni u elektrokemijskoj ćeliji uz korištenje elektroda od različitih materijala, pri različitim početnim pH vrijednostima te dodatkom elektrolita NaCl i prirodnog zeolita. Tijekom EKZ procesa praćena je promjena pH vrijednosti, električne vodljivosti i temperature, a nakon EKZ procesa proveden je test taloživosti te su u otopini određeni mutnoća, kemijska potrošnja kisika (KPK) i isparni ostatak (TS). Analiza rezultata je pokazala najveću efikasnost uklanjanja štetnih tvari iz otpadne vode u eksperimentima sa aluminijskim elektrodama. Testovi taloženja su pokazali dobra odvajanja taloga od tekuće faze. Temeljem vrijednosti utroška mase elektroda te napona i struje izračunate su potrošnje elektroda i energije pri različitim radnim uvjetima.

Ključne riječi: hibridni proces, elektrokoagulacija, prirodni zeolit, obrada procjedne kompostne vode, učinkovitost

Rad sadrži: 69 stranica, 48 slika, 18 tablica, 26 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović, predsjednik
2. Prof. dr. sc. Sandra Svilović, član
3. Prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović, član-mentor

Datum obrane: 15.09.2022.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko - tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, Split

BASIC DOCUMENTATION CARD

FINAL THESIS

University of Split

Faculty of Chemistry and Technology in Split

Pre-graduate university studies: Chemical Technology - Environmental Protection

Scientific area: Technical Sciences

Scientific field: Chemical Engineering

Thesis subject: was approved by Faculty Council of the Faculty of Chemistry and Technology, session no. 25 (March 18th, 2022)

Supervisor: Ph.D. Nediljka Vukojević Medvidović, full prof.

EFFICIENCY ANALYSIS OF THE HYBRID PROCESS OF ELECTROCOAGULATION AND NATURAL ZEOLITE FOR COMPOST LEACHATE TREATMENT

Karla Galov, 1331

Summary: In this paper, the effectiveness of the hybrid process of electrocoagulation and natural zeolite (ECZ) for the treatment of compost leachate was examined. The experiments were performed in an electrochemical cell using electrodes made of different materials, at different initial pH values, with the addition of NaCl electrolyte and natural zeolite. During the ECZ process, a change in pH, electrical conductivity and temperature was measured, and after, a settleability test was carried out, and turbidity, chemical oxygen consumption (COD) and total solids were determined in the solution. The analysis of the results showed the highest efficiency of removal of harmful substances from wastewater in experiments with aluminum electrodes. Settling tests showed good separation of the precipitate from the liquid phase. Based on values of electrode mass change, voltage and current, consumption of electrodes and energy under different operating conditions were calculated.

Keywords: hybrid process, electrocoagulation, natural zeolite, compost leachate treatment, efficiency

Thesis contains: 69 pages, 48 figures, 18 tables, 26 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Ph. D. Ladislav Vrsalović, full prof. – chairperson
2. Ph. D. Sandra Svilović, full prof. - member
3. Ph. D. Nediljka Vukojević Medvidović, full prof. - supervisor

Defence date: 15th September 2022

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology, Ruđera Boškovića 35, Split

Ovaj završni rad je izrađen na Kemijsko-tehnološkom fakultetu u Splitu u Zavodu za inženjerstvo okoliša, pod mentorstvom prof. dr. sc. Nediljke Vukojević Medvidović.

Istraživanja su provedena u okviru projekta „Razvoj novog hibridnog procesa za obradu otpadnih voda na bazi elektrokoagulacije i prirodnog zeolita“ financiranog od strane Zaklade Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti (Zaklada HAZU).

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Nediljki Vukojević Medvidović na velikoj pomoći i strpljenju prilikom izrade ovog Završnog rada.

Velika zahvala i prof. dr. sc. Ladislavu Vrsaloviću na pomoći prilikom provođenja eksperimentalnog dijela rada.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji i Lovri koji su uvijek bili uz mene i olakšali mi ove studentske dane.

ZADATAK

1. Pripremiti uzorak kompostne procjedne vode i provesti fizikalno-kemijsku karakterizaciju.
2. Provesti hibridni proces elektrokoagulacije uz dodatak prirodnog zeolita (EKZ) na elektrodama od različitih materijala (Fe, Al, Zn) pri različitim početnim pH vrijednostima (4, 6, 8), uz dodatak NaCl elektrolita (0,5, 1 i 1,5 g/L) te dodatak prirodnog zeolita (15, 20 i 25 g/L). Učinkovitost EKZ procesa pratiti preko parametara: pH vrijednosti, električne vodljivosti, temperature, kemijske potrošnje kisika (KPK), mutnoće, isparnog ostatka te izvest zaključke.
3. Provesti test taloženja i odrediti mase taloga za uzorke nakon provedbe procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita.
4. Iz utroška mase elektroda te napona i struje izračunati potrošnju elektroda i energije nakon procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita te izvesti zaključke o isplativosti navedenog procesa.

SAŽETAK

U ovom radu ispitivana je učinkovitost hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita (EKZ) za obradu kompostne procjedne vode. Eksperimenti su provedeni u elektrokemijskoj ćeliji uz korištenje elektroda od različitih materijala, pri različitim početnim pH vrijednostima te dodatkom elektrolita NaCl i prirodnog zeolita. Tijekom EKZ procesa praćena je promjena pH vrijednosti, električne vodljivost i temperature, a nakon EKZ procesa proveden je test taloživosti te su u otopini određeni mutnoća, kemijska potrošnja kisika (KPK) i isparni ostatak. Analiza rezultata je pokazala najveću efikasnost uklanjanja štetnih tvari iz otpadne vode u eksperimentima sa aluminijskim elektrodama. Testovi taloženja su pokazali dobra odvajanja taloga od tekuće faze. Temeljem vrijednosti utroška mase elektroda te napona i struje izračunate su potrošnje elektroda i energije pri različitim radnim uvjetima.

ABSTRACT

In this paper, the effectiveness of the hybrid process of electrocoagulation and natural zeolite (ECZ) for the treatment of compost leachate was examined. The experiments were performed in an electrochemical cell using electrodes made of different materials, at different initial pH values, with the addition of NaCl electrolyte and natural zeolite. During the ECZ process, a change in pH, electrical conductivity and temperature was measured, and after, a settleability test was carried out, and turbidity, chemical oxygen consumption (COD) and total solids were determined in the solution. The analysis of the results showed the highest efficiency of removal of harmful substances from wastewater in experiments with aluminum electrodes. Settling tests showed good separation of the precipitate from the liquid phase. Based on values of electrode mass change, voltage and current, consumption of electrodes and energy under different operating conditions were calculated.

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. OPĆI DIO.....	2
1.1. Trendovi u istraživanju i primjeni hibridnih sustava	3
1.2. Značenje hibridnih sustava za obradu otpadnih voda i dobivanja bioenergije	4
1.3. Vrste hibridnih sustava.....	5
1.3.1. Fizikalno-biološki hibridni sustav.....	6
1.3.2. Fizikalno-kemijski hibridni sustav	7
1.3.3. Kemijsko-biološki hibridni sustav	10
1.3.4. Fizikalno-kemijsko-biološki hibridni sustav.....	12
1.4. Prednosti i ograničenja hibridnog sustava	16
1.5. Analiza primjera hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita	18
2. EKSPERIMENTALNI DIO.....	23
2.1. Karakteristike uzorka komposta.....	24
2.2. Priprema procjedne vode iz procesa kompostiranja.....	24
2.3. Vrsta elektrodnog materijala	25
2.4. Prirodni zeolit.....	26
2.5. Obrada otpadne vode procesom elektrokoagulacije i prirodnog zeolita (EKZ).....	26
2.6. Parametri koji su praćeni prije, tijekom i nakon procesa elektrokoagulacije.....	27
2.6.1. Određivanje pH vrijednosti	28
2.6.2. Određivanje električne vodljivosti	28
2.6.3. Određivanje temperature.....	29
2.6.4. Određivanje kemijske potrošnje kisika (KPK)	29
2.6.5. Određivanje mutnoće	31
2.6.6. Određivanje ukupnog isparnog ostatka.....	32
2.7. Test taloživosti i određivanje mase taloga	32
2.8. Određivanje mase elektroda.....	33
3. REZULTATI.....	34
3.1. Rezultati karakterizacije kompostne procjedne vode.....	35
3.2. Rezultati praćenja hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita	35
3.2.1. Rezultati praćenja pH vrijednosti.....	35
3.2.2. Rezultati električne vodljivosti	36
3.2.3. Rezultati temperature	37
3.2.4. Rezultati kemijske potrošnje kisika (KPK).....	37
3.2.5. Rezultati mutnoće	38

3.2.6.	Ukupni isparni ostatak	38
3.3.	Rezultati testa taloženja suspenzije i mase taloga.....	39
3.4.	Rezultati potrošnje elektroda	40
3.5.	Rezultati napona i struje tijekom procesa EKZ.....	41
4.	RASPRAVA.....	42
4.1.	Analiza rezultata karakterizacije kompostne procjedne vode	43
4.2.	Analiza rezultata parametara praćenih tijekom procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita 44	
4.2.1.	Analiza rezultata pH vrijednosti.....	44
4.2.2.	Analiza rezultata električne vodljivosti.....	45
4.2.3.	Analiza rezultata temperature	47
4.2.4.	Analiza rezultata kemijske potrošnje kisika (KPK)	49
4.2.5.	Analiza rezultata mutnoće.....	51
4.2.6.	Analiza rezultata ukupnog isparnog ostatka	52
4.3.	Analiza rezultata testa taloženja i mase taloga.....	53
4.4.	Analiza rezultata mase elektroda	56
4.5.	Analiza operativnih troškova	59
5.	ZAKLJUČAK	62
6.	LITERATURA	66

UVOD

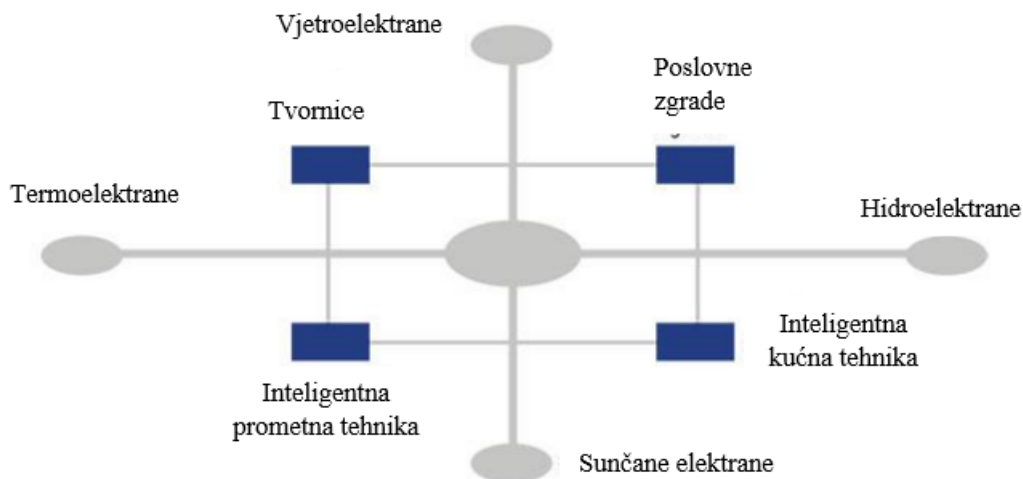
Voda je jedinstven i nezamjenjiv prirodni resurs ograničenih količina i neravnomjerne raspodjele koja se upotrebljava za piće, osobnu higijenu, u industriji te proizvodnji energije. Prvi živi organizmi su se razvili u vodi, a danas voda predstavlja stanište velikog broja biljnih i životinjskih zajednica. Za vodu su vezani svi oblici života i sve ljudske aktivnosti.[1] Gospodarski razvoj i urbanizacija dovode do porasta potrebe za vodom i do ugrožavanja vodnih resursa i vodnog okoliša. Voda zato može postati ograničavajući čimbenik razvoja i prijetnja ljudskom zdravlju pri čemu je nužno zadovoljavanje koncepta održivog razvoja koji podrazumijeva zadovoljavanje potreba današnjih generacija, a da se time ne ugroze potrebe budućih generacija.[2] Korištenjem vode nastaje otpad složenog sastava koji nije moguće obraditi pojedinačnim fizikalnim, kemijskim ili biološkim procesima te su današnja istraživanja usmjerena na razvoj hibridnih, integriranih ili kombiniranih procesa. Kombinacijom dvaju ili više procesa omogućuje se učinkovitija obrada vode koja se kao takva može ponovno koristiti.

U ovom radu naglasak je na hibridnom procesu elektrokoagulacije i prirodnog zeolita u obradi kompostne procjedne vode. Elektrokoagulacija je proces destabilizacije emulzije, suspenzije ili otopljenih štetnih tvari uvođenjem električnog naboja u vodeni medij. Elektrokoagulacija kao proces koristi elektrokemijsku ćeliju u kojoj su uronjene elektrode anoda i katoda. Karakteristika ovog procesa je stvaranje koagulantata *in-situ* i uklanjanje štetnih tvari sweep-floc mehanizmom bez dodavanja kemikalija. Prirodni zeoliti su alumosilikati koji se nalaze u prirodi, a pokazuju dobra adsorpcijska svojstva i svojstva ionske izmjene. Izvrsni su za uklanjanje amonijaka, radioaktivnih iona i teških metala, a njegovi modificirani oblici uklanjaju široku paletu kationskih i anionskih vrsta. U ovom radu ispitat će se učinkovitost hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita na elektrodama od različitog materijala (aluminij, željezo, cink), pri različitim pH vrijednostima te uz dodatak različitih količina elektrolita NaCl i prirodnog zeolita.

1. OPÍCIO

1.1. Trendovi u istraživanju i primjeni hibridnih sustava

Hibridni sustav je općenit naziv za proizvodnju i dobivanje energije iz različitih izvora putem odgovarajućih tehnika/tehnologija pretvorbe energije. Može se smatrati jednom od najučinkovitijih tehnika/tehnologija koje iz obnovljivih izvora proizvode električnu energiju. Hibridni sustavi se također mogu koristiti kao prirodni resursi uz upotrebu spremnika, pri čemu su spremnici sekundarni izvori koji daju unaprijed proizvedene količine prirodnog resursa čije se korištenje temelji na napajanju elektrana tj. kućanstva ili nekog drugog objekta. Na Slici 1.1. je prikazan model hibridnog sustava onako kako bi trebao funkcionirati.



Slika 1.1. Napajanje više objekata iz hibridnih sustava [3]

Primjena hibridnih sustava se temelji na tome da se uz obnovljive izvore smanji korištenje neobnovljivih izvora za dobivanje određene količine električne energije. Međutim, sustav još nije dovoljno razvijen da bi se prebacilo na opskrbu samo obnovljivim izvorima zbog moguće nestabilnosti mreže. Danas se hibridnim sustavom napajanja koriste manje sredine koje su udaljene od centralnog izvora električne energije.

1.2. Značenje hibridnih sustava za obradu otpadnih voda i dobivanja bioenergije

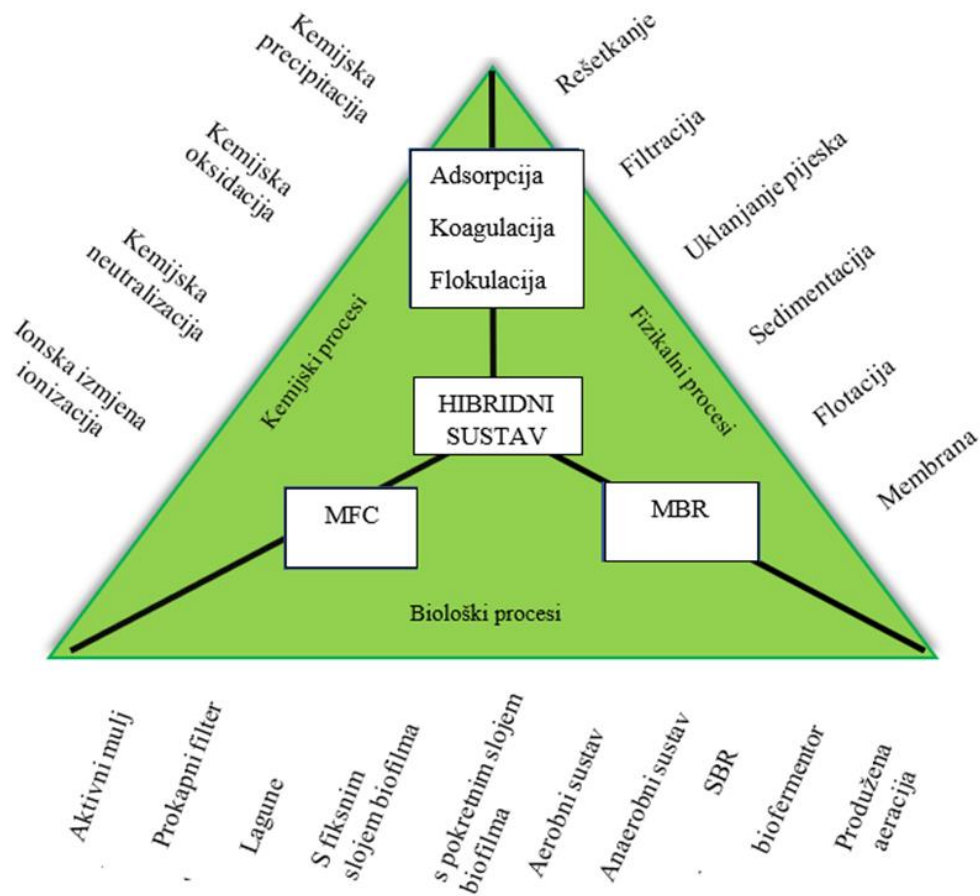
Otpadne vode su sve vode u kojima je došlo do promjene u fizikalnim, kemijskim i biološkim svojstvima tijekom njenog korištenja te ih je za daljnju uporabu potrebno pročistiti. Procesi pročišćavanja otpadnih voda su vrlo kompleksni i zahtijevaju precizan rad te veliku količinu energije kako bi se postigao zadovoljavajući stupanj pročišćavanja. Pročišćavanje zapravo podrazumijeva uklanjanje nepoželjnih tvari pri čemu nastaje mulj. Cjelokupni hibridni energetski sustav sastoji se od dva i više izvora i metoda koje se koriste zajedno kako bi se osigurala što veća ušteda fosilnih goriva i povećala ukupna učinkovitost sustava. Za pročišćavanje otpadnih voda hibridni sustavi se koriste kombinacijom dvaju ili više kemijskih, fizikalnih i bioloških metoda obrade.

Slika 1.2. prikazuje moguće kombinacije hibridnih sustava između kemijskih, fizikalnih i bioloških procesa. Jedinične operacije su grupirane na način da omogućavaju najbolju razinu obrade kao što su preliminarni, primarni, napredni primarni, sekundarni (s ili bez uklanjanja nutrijenata) te tercijarni procesi obrade. Preliminirani, primarni i napredni primarni procesi koriste fizikalne i/ili kemijske procese čime omogućavaju pripremu efluenta za biološke procese obrade. Tercijarni i napredni procesi teže dodatnom pročišćavanju otpadne vode fizikalnim i/ili kemijskim procesima.[5]

Ovisno o vrsti onečišćujuće tvari u otpadnoj vodi koriste se različiti tipovi hibridnih sustava te tako biološkim procesima uklanjaju se razgradive organske tvari, hlapljive organske tvari, dušik, fosfor te toksične organske tvari iz otpadne vode. U fizikalne procese ubrajaju se filtracija, flotacija i rešetkanje kojima se uklanjaju suspendirane krute tvari. Za uklanjanje štetnih tvari kao što su metali koriste se kemijski procesi. Cilj ovakvog procesa je dobiti pročišćenu vodu sa što manje štetnih tvari da bi se ona mogla koristiti u daljnjoj upotrebi pa tako i za vodoopskrbu.

Budući se trendovi hibridnog sustava za pročišćavanje otpadnih voda temelje na pretvorbi otpada u bioelektričnu energiju uporabom mikrobnih elektrokemijskih tehnologija (MFC, engl. *Microbial fuel cell*). MFC tehnologije predstavljaju najnovije pristupe za proizvodnju bioenergije. Trenutno se većina MFC-ova izvodi u laboratorijske svrhe. Pretpostavlja se da će MFC hibridni sustav zamijeniti postupak s aktivnim muljem (AS, engl. *activated sludge*) ili prokapni filter (TF, engl. *trickling filter*). MFC je kemijsko-

biološki proces obrade i stoga takav hibridni proces može ukloniti organske komponente na isti način kao što se postiže AS-om ili TF-om.[6]



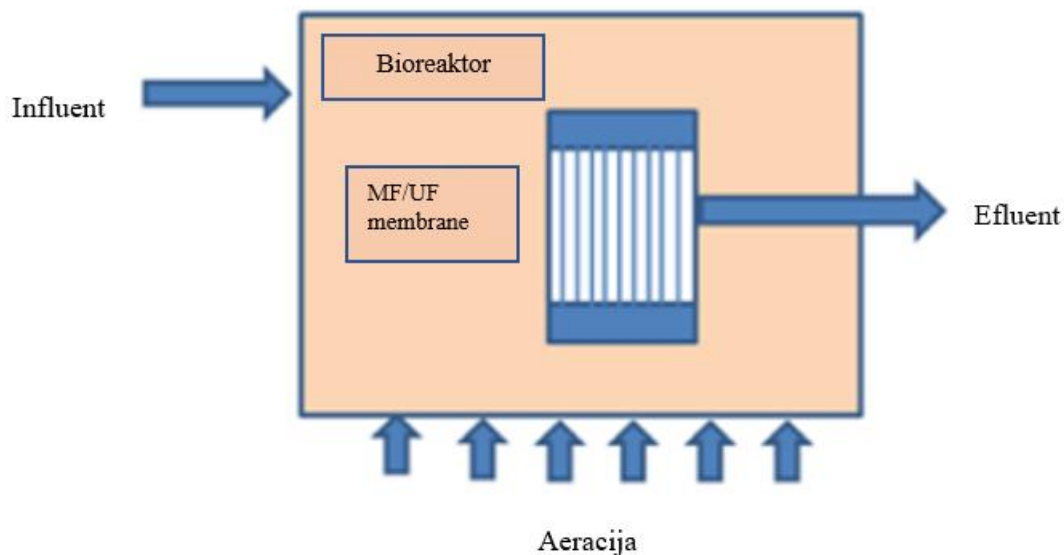
Slika 1.2. Moguće kombinacije hibridnih procesa [4]

1.3. Vrste hibridnih sustava

Vrste hibridnih procesa za obradu otpadnih voda možemo podijeliti u 4 grupe, a to su: (1) fizikalno-biološki hibridni sustav, (2) fizikalno-kemijski hibridni sustav, (3) kemijsko-biološki te (4) fizikalno-kemijsko-biološki hibridni sustav.

1.3.1. Fizikalno-biološki hibridni sustav

Fizikalno-biološki hibridni sustav se koristi kada se onečišćenja sastoje od organskih i anorganskih komponenti, suspendiranih krutih tvari te masti i ulja. Jedan od najvažnijih fizikalno-bioloških hibridnih sustava koji se sve češće koristi u postrojenjima za obradu otpadnih voda je membranski bioreaktor (MBR) prikazan na Slici 1.3.. Prednost korištenja takve tehnologije je što mogu pročititi i najveća onečišćenja, poboljšavaju kvalitetu vode koja se može koristiti u daljnjoj upotrebi te njihovom primjenom dolazi do potpune i stabilne nitrifikacije koja je omogućena zahvaljujući zadržavanju spororastućih nitrifikacijskih bakterija.[7] MBR može zamijeniti procese aktivnog mulja te može služiti kao završni korak bistrenja pročišćene otpadne vode. Način rada MBR-a temelji se na zadržavanju nepoželjnih tvari dok filtrirana bistra voda prolazi kroz membranu. Kombinacija membranske filtracije sa biološkom razgradnjom omogućuje smanjenje kemijske i biokemijske potrebe za kisikom (KPK i BPK) te za amonijakalnim dušikom.

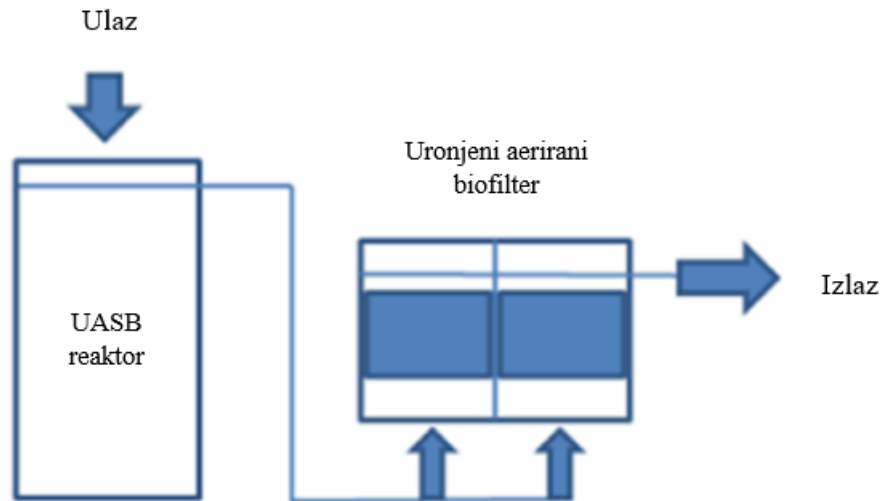


Slika 1.3. Shematski prikaz hibridnog sustava MBR-a [4]

Vrste membrana koje se koriste u MBR hibridnom sustavu su ultrafiltracijske (UF) i mikrofiltracijske (MF), gdje UF ima finije pore u usporedbi sa MF te zbog toga UF može zadržati i najsitnija onečišćenja.

Fizikalno-biološki hibridni sustav može postići velike uštede energije koristeći UASB reaktor s uronjenim aeriranim biofiltrima (UASB, engl. *Submerged aerated biofilters*)

kao što je prikazano na Slici 1.4. UASB ima sposobnost anaerobne stabilizacije 70% organskog supstrata. Zbog toga nastaje manja količina mulja i osigurava se veća ušteda energije.

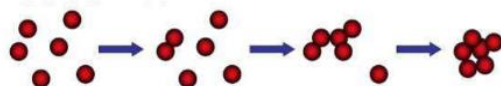


Slika 1.4. Hibridni sustav UASB reaktora i uronjenog aeriranog biofiltra [4]

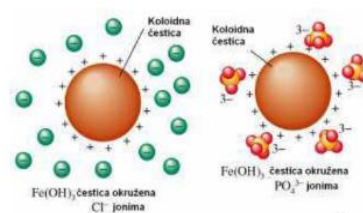
1.3.2. Fizikalno-kemijski hibridni sustav

Fizikalno-kemijski hibridni sustav koristi se za pročišćavanje otpadnih voda koje su opterećene suspendiranim tvarima, mastima i uljima te koje imaju velik sadržaj metala. Kemijska flokulacija i koagulacija su temeljni procesi u kojima miješanjem otpadne vode sa kemikalijama dolazi do stvaranja čestica velikih promjera koje se dalje mogu ukloniti fizikalnim procesima.[8] Zapravo, koagulacija je destabiliziranje čestica smanjenjem odbojnih sila zbog istovrsnog naboja, a flokulacija povezivanje destabiliziranih čestica i stvaranja većih nakupina koji se mogu taložiti djelovanjem sile gravitacije.

koagulacija (zgrušavanje)

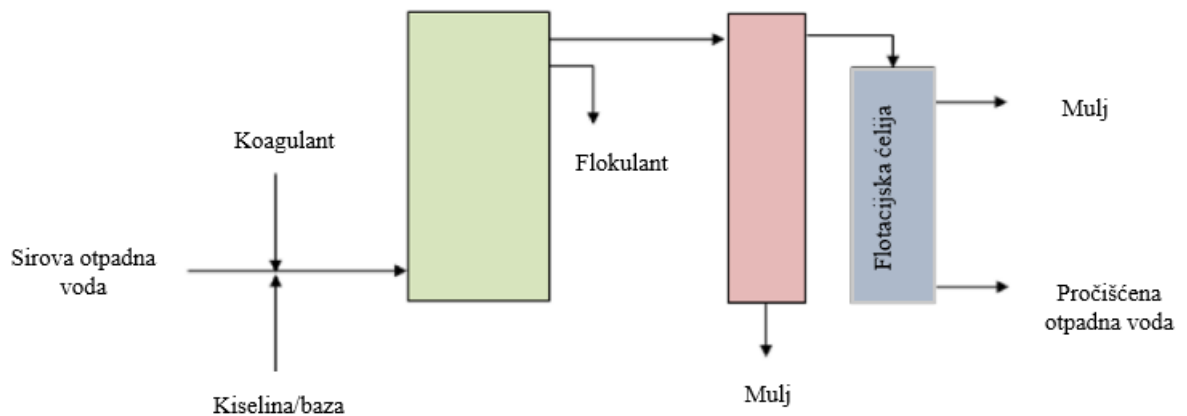


flokulacija (pahuljičenje)



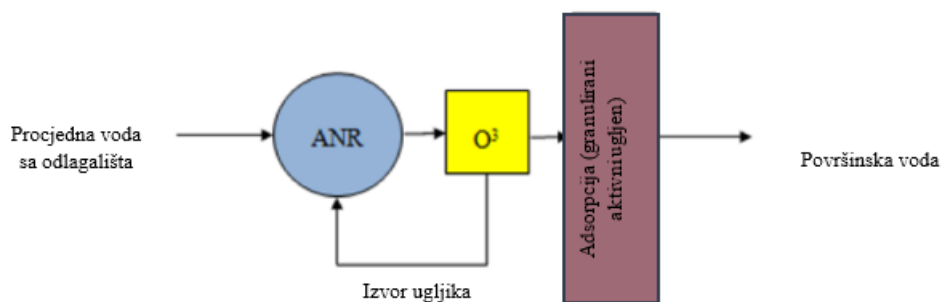
Slika 1.5. Procesi koagulacije i flokulacije [2]

Procesi kemijske flokulacije i koagulacije su najvažniji koraci uklanjanja koloidnih čestica i mutnoće iz otpadne vode u rasponu od 0,1 mm do 10 mm. Bilo kakva integracija sustava koagulacije i flokulacije s fizikalnim operacijom može ukloniti i više od 90% mutnoće. Adsorpcija je jedna od metoda koja se koristi za uklanjanje različitih vrsta onečišćenja u otpadnim vodama. Adsorpcija radi na principu nakupljanja plinovite ili tekuće tvari (adsorbata) na površini krute tvari (adsorbensa). Shematski dijagram hibrida adsorpcija-koagulacija-flotacija s otopljenim zrakom (DAF, engl. *dissolved air flotation*) prikazan je na Slici 1.6.a).



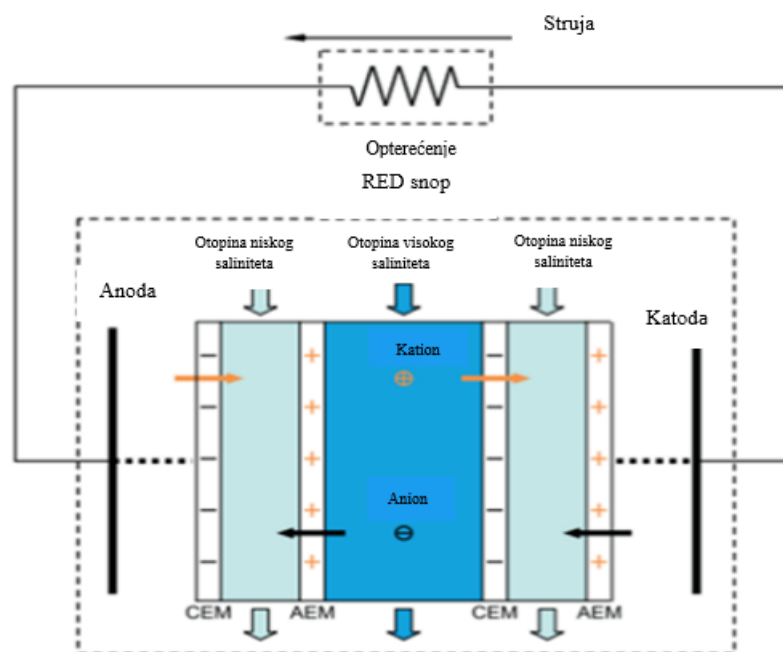
Slika 1.6.a) Hibridni sustav adsorpcije-koagulacije-flokulacije i flotacije [7]

Ozonizacija je jedan od postupaka obrade vode odnosno dezinfekcije vode pomoću ozona, alotropske modifikacije kisika (O_3). Ozon je vrlo toksičan i korozivan plin, međutim snažan je oksidans te je sposoban oksidirati velik broj organskih i anorganskih spojeva u vodi.[1] Shematski dijagram hibridnog sustava s autotrofnim uklanjanjem dušika (ANR, engl. *autotrophic nitrogen removal*) s ozonizacijom i filtracijom na aktivnom ugljenu prikazan je na Slici 1.6.b).



Slika 1.6. b) Hibridni sustav s autotrofnim uklanjanjem dušika (ANR) s ozonizacijom te filtracijom na aktivnom ugljenu [9]

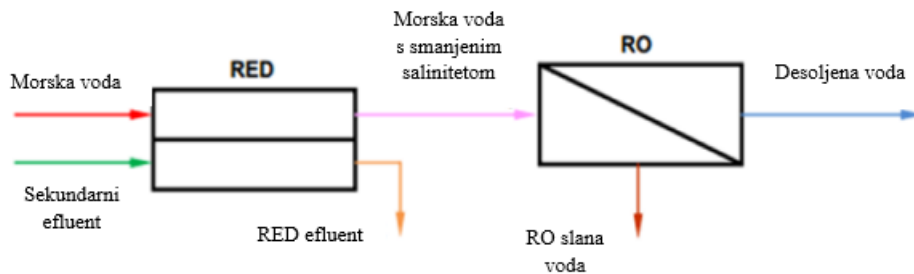
Na Slici 1.6. c) prikazana je reverzna elektrodijaliza (RED, engl. *reverse electrodialysis*). Uslijed narinute električne energije pokreću se kationi i anioni kroz kationske i anionske membrane (CEM i AEM).



Slika 1.6. c) Hibridni sustav reverzne elektrodijalize (RED)[9]

Fizikalno-kemijski hibridni sustav desalinizacije kombinira procese reverzne elektrodijalize (RED) i reverzne osmoze (RO, engl. *reverse osmosis*). RED uređaj prikuplja energiju u obliku električne energije uslijed koncentracijskog gradijenta između visokokonzentrirane vode npr. morske vode i otopine niske koncentracije slanosti npr.

biološki pročišćena otpadna voda. Otopina visokog saliniteta obrađena RED-om ima nižu koncentraciju soli i služi kao otopina za napajanje za RO uređaj kako bi se smanjio rad pumpe. Shematski dijagram hibridnog sustava RED-RO prikazan je na Slici 1.6. d).

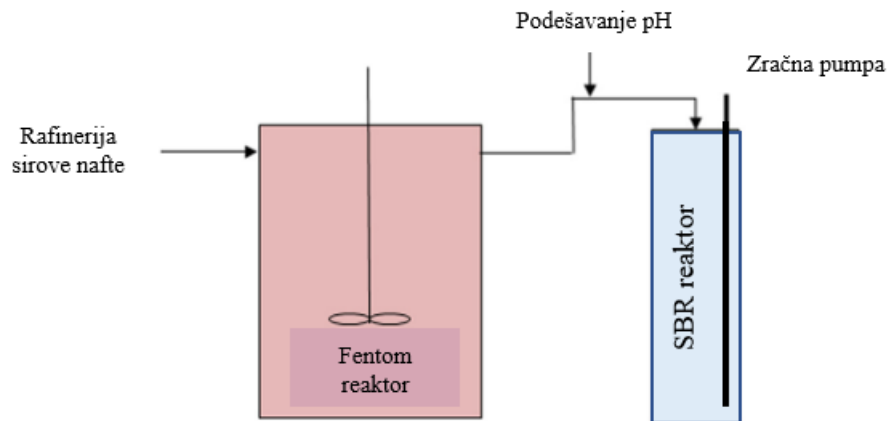


Slika 1.6.d) Hibridni sustav reverzne elektrodijalize (RED) i reverzne osmoze (RO) [9]

1.3.3. Kemijsko-biološki hibridni sustav

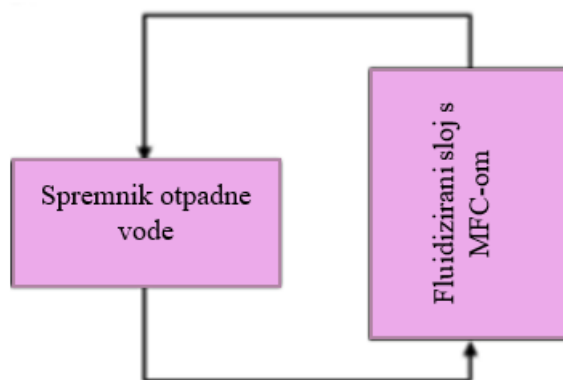
Kemijsko-biološki sustav je hibridni sustav koji se koristi za uklanjanje komponenata kao što su dušik (N), fosfor (P), toksične organske tvari koji se odražavaju kao razina BPK, KPK i ukupni organski ugljik (TOC, engl. *Total Organic Carbon*) iz otpadne vode. Vrste kemijsko-bioloških hibridnih sustava su reaktori s pokretnim slojem biofilma (MBBR, engl. *Moving Bed Biofilm Reactors*) s prethodnom obradom ozonom te kemijska oksidacija sa SBR (SBR, engl. *Sequencing Batch Reactor*).

MBBR sa prethodnom obradom ozonom se pokazao učinkovitiji u odnosu na sami MBBR bez prethodne obrade. Kod MBBR-a uklanja se 18,3 % kiseline (AEF, engl. *acid-extractable fraction*) i 34,8% naftenske kiseline (NA, engl. *naphthenic acids*), dok MBBR sa prethodnom obradom uklanja 41% AEF te 78,8% NA. Hibridni sustavi zajedno sa oksidacijskim sustavom u kraćem vremenskom periodu smanjuju toksičnost i povećavaju biorazgradivost otpadne vode. Fenton je, među naprednim procesima oksidacije, dokazan kao dobar oksidacijski sustav koji uklanja i teško razgradive organske tvari u otpadnim vodama koristeći snažni hidroksilni radikal generiran *in-situ* reakcijom željeza sa vodikovim peroksidom.[10] Proces je prikazan na Slici 1.7.



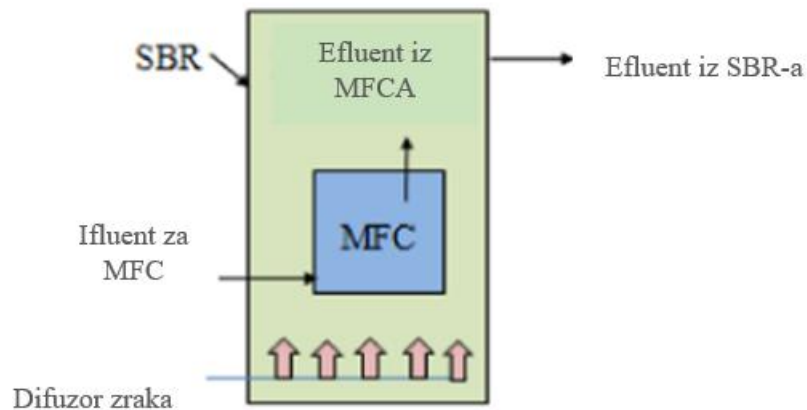
Slika 1.7. Hibridni sustav kemijske oksidacije (Fenton) i SBR

Mikrobna goriva ćelija (MFC, engl. *Microbial fuel cell*) je sustav koji uključuje i biološke i kemijske procese obrade vode. Cilj MFC je pretvaranje otpada u električnu energiju. Budući da su otpadne vode bogate biorazgradivim organskim tvarima MFC tehnologijom može se postići nov način pročišćavanja otpadne vode u svrhu proizvodnje električne energije. Shematski prikaz anaerobnog fluidiziranog sloja s MFC (AFBMFC, engl. *microbial fuel cell anaerobic fluidized bed*) prikazan je na Slici 1.8.a).[11]



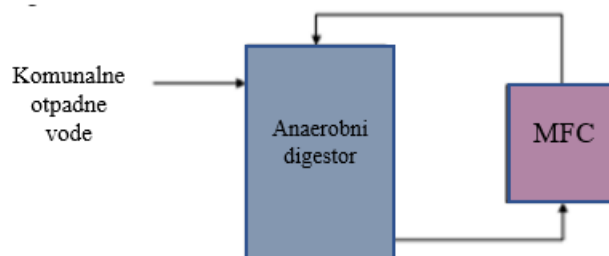
Slika 1.8.a) Hibridni sustav anaerobnog fluidiziranog sloja i MFC [4]

Šaržni reaktor sa MFC i SBR dovodi do visokog uklanjanja KPK u otpadnoj vodi sa više od 90%. Uz to osigurava niže investicijske i operativne troškove. Shematski prikaz takvog procesa prikazan je na Slici 1.8.b).



Slika 1.8. b) Hibridni sustav anaerobnog mulja, MFC i SBR[4]

Hibridni sustav MFC s anaerobnim digestrom (AD) pokazuje bolju učinkovitost u odnosu kad ovi procesi rade zasebno. MFC je osjetljiviji na opterećenja izazvana octenom kiselinom, dok AD nije. AD proces ima mogućnost reguliranja pH vrijednosti za razliku od MFC-a. Shematski dijagram anaerobnog digestora zajedno sa MFC hibridnim sustavom prikazan je na Slici 1.8.c).



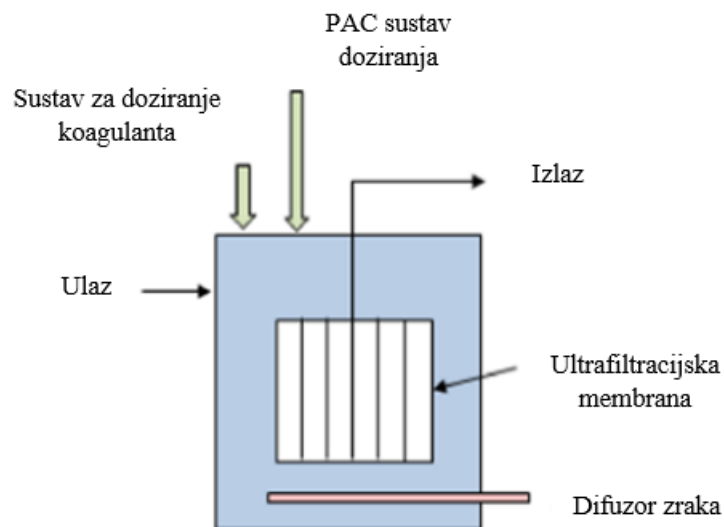
Slika 1.8.c) Hibridni sustav anaerobnog digestora (AD) s MFC [4]

1.3.4. Fizikalno-kemijsko-biološki hibridni sustav

Kao što je već poznato, otpadna voda sadrži različite štetne tvari, kao što su hlapljive organske tvari, hranjive tvari tj. dušik ili fosfor i metali, masti i ulja, te fizikalno-kemijsko-biološki hibridni sustav omogućava njihovo uklanjanje. Primjeri fizikalno-kemijsko-biološkom sustava za obradu otpadnih voda su: membransko koagulacijsko adsorpcijski bioreaktor (MCABR, engl. *membrane coagulation adsorption bioreactor*),

SBR i kemijska DAF te UV dezinfekcija, membransko adsorpcijski bioreaktor (MABR, engl. *membrane adsorption bioreactor*), biljni uređaj s vertikalnim protokom s biofilterom i kemijskim taloženjem (engl. *partially saturated vertical flow constructed wetland with trickling filter with filtration and chemical precipitation*) te hibridni bioreaktor - pokretni biofilm s membranskim bioreaktorom i napredni oksidacijski procesi NOP (AOP, engl. *advanced oxidation proces*). [12]

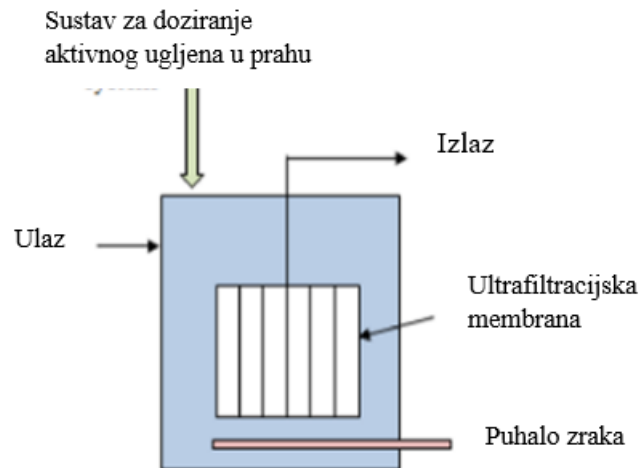
MCABR ima veliku učinkovitost uklanjanja organske tvari iz slabo onečišćene površinske vode uz pomoć korištenja polualuminijevog klorida kao koagulant i aktivnog ugljena u prahu kao adsorbenta u bioreaktoru. U MCABR-u postoje četiri vrste mehanizma koje pridonose uklanjanju otopljene organske tvari, a to su: odvajanje pomoću membrane, biorazgradnja pomoću mikroorganizama, koagulacija pomoću polualuminijevog klorida i adsorpcija pomoću aktivnog ugljena. Slika 1.9. a) prikazuje shematski dijagram integriranog membranskog koagulacijskog adsorpcijskog bioreaktora (MCABR).



Slika 1.9.a) Hibridni sustav membranskog koagulacijskog adsorpcijskog bioreaktora (MCABR)

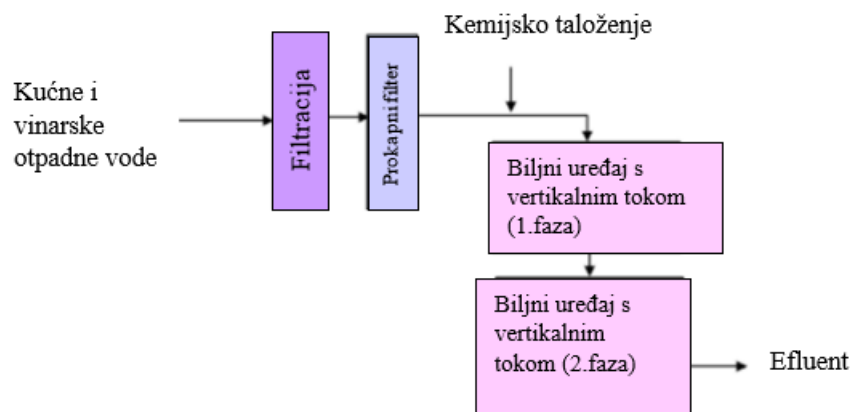
Napredni sustav obrade otpadne vode čini SBR te kemijska DAF i UV dezinfekcije koja se koristi za obradu otpadne vode iz klaonica peradi. SBR se koristi za uklanjanje dušika, a kemijski DAF za uklanjanje fosfora i ostalih suspendiranih krutih tvari, a izlazni efluent

podvrgnut UV dezinfekciji.[13] Hibridni sustav adsorpcijskog bioreaktora (MABR) omogućava veliku efikasnost uklanjanja organske tvari u otpadnoj vodi kombinacijom triju procesa: ultrafiltracijskom membranom, biorazgradnjom mikroorganizama te adsorpcijom aktivnim ugljenom. Shematski prikaz adsorpcijskog bioreaktora prikazan je na slici 1.9. b).



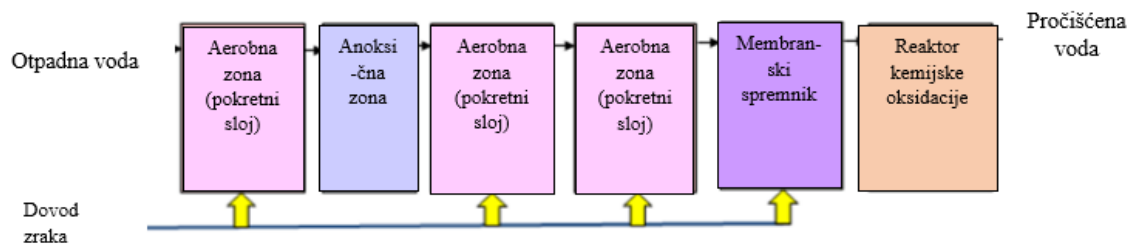
Slika 1.9.b) Hibridni sustav adsorpcijskog bioreaktora sa uronjenom membranom (MABR)

Kada se u bioreaktor doda aktivni ugljen, MABR postiže veću učinkovitost uklanjanja organske tvari u vodi u odnosu na membranski bioreaktor (MBR) bez aktivnog ugljena.[14] Hibridni sustavi s biljnim uređajem s vertikalnim protokom s biofilterom i kemijskim taloženjem izvodi se kako bi se poboljšala denitrifikacija i defosfatacija u odnosu na klasičnu izvedbu. Na slici 1.9. c) shematski je prikazan hibridni sustav s biljnim uređajem s vertikalnim protokom s biofilterom i kemijskim taloženjem.



Slika 1.9. c) Hibridni sustav s biljnim uređajem s vertikalnim protokom s biofilterom i kemijskim taloženjem[4]

Na slici 1.9 d) prikazan je hibridni sustav s pokretnim biofilmom te membranskim bioreaktorom s naprednim oksidacijskim procesima (MBBR-MBR-AOC).



Slika 1.9.d) Hibridni sustav MBBR-MBR-AOC[4]

Napredni oksidacijski proces (AOP) se koristi kad komponente u otpadnoj vodi imaju visoku kemijsku stabilnost i/ili nisku biorazgradivost. Stoga se, kombinacijom biološkog procesa i metoda kemijske oksidacije omogućava učinkovitija obrada što samim biološkim sustavom nije moguće. Za uklanjanje dušika iz otpadne vode najbolje se pokazao MBR sustav.

1.4. Prednosti i ograničenja hibridnog sustava

Hibridni sustavi obrade otpadnih voda i dobivanja energije predstavljaju budućnost koja će se najviše koristiti u industrijskim pogonima koji su prvenstveno veliki potrošači. Hibridni sustavi omogućit će smanjenje pogonskih troškova, a ušteda će dovesti do ulaganja u infrastrukturu. Svaka država ili manja sredina će ovisiti samo o sebi i svojoj proizvodnji što će smanjiti nestabilnost energetske mreže.[3]

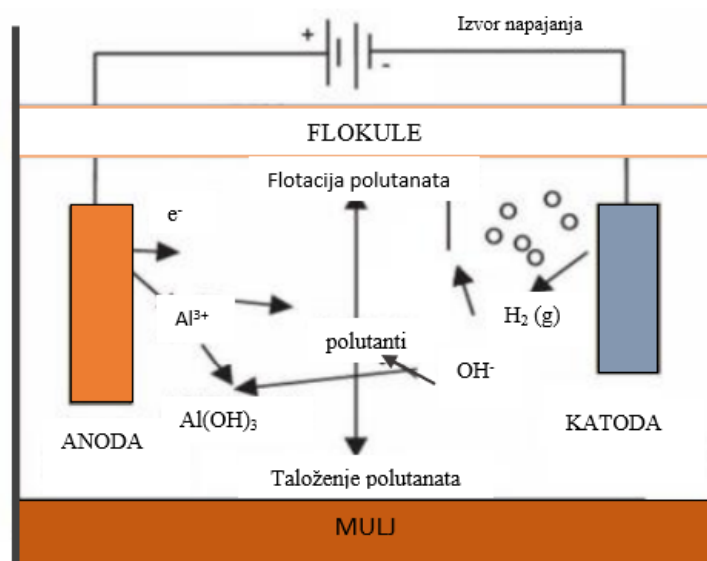
Hibridni sustav u odnosu na samostalne sustave za pročišćavanje otpadnih voda su stabilniji i održiviji, bolja je ukupna efikasnost obrade te potencijalna ušteda energije.[15] MFC procesi imaju mogućnost pretvorbe potencijalne energije u otpadnoj vodi u električnu energiju te takav proces može omogućiti napredno pročišćavanje otpadne vode u svim zemljama. Potrebno je sagledati i ukupne troškove hibridnog sustava u smislu investicijskih troškova te troškova održavanja. Većina troškova ovisi o lokaciji izvedbe, brzini protoka efluenta te i o stupnju željenog pročišćavanja. Hibridni sustav s kombinacijom neke fizikalne obrade kao što je membrana zahtjeva velike troškove u smislu potrošnje energije. Također zahtijevaju velike troškove održavanja ovisno o razini onečišćenja, a sama zamjena membrana je veoma skupa. Kod fizikalno-kemijskog sustava visoki su operativni troškovi, velika potrošnja kemijskih reagensa te potencijalna korozivnost korištenih koagulanata. Dolazi do nastajanja velike količine mulja što dovodi do problema prilikom odlaganja i potrebe razvoja načina njegovog recikliranja ili ponovne upotrebe.[16] Prednosti i nedostaci hibridnog sustava prikazani su u Tablici 1.1.

Tablica 1.1. Prednosti i nedostaci hibridnog sustava obrade otpadnih voda[4]

HIBRIDNI SUSTAV	PREDNOSTI	NEDOSTACI
Fizikalno-biološki sustav	<ul style="list-style-type: none"> ○ Učinkovito uklanjanje čestica i suspendiranih krutih tvari ○ Učinkovito uklanjanje KPK, BPK, ukupne raspršene tvari (TSS, engl. <i>total suspended solids</i>) i ukupnog dušika (TN, engl. <i>total nitrogen</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Visoki operativni troškovi zbog velike potrošnje energije ○ Visoki troškovi održavanja zbog onečišćenja na dijelovima reaktora
Fizikalno-kemijski sustav	<ul style="list-style-type: none"> ○ Uklanjanje koloidnih čestica, mutnoće, metala i iona ○ Uklanjanje različitih vrsta onečišćenja (KPK, BPK, boja, masti i ukupne otopljene tvari (TDS, engl. <i>total dissolved solids</i>) ○ Dezinfekcija ozonom ○ Reverznom elektrodijalizom (RED) ostvaruje proizvodnju energije 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Visoki troškovi zbog korištenja koagulanata i flokulanata ○ Nastajanje velike količine mulja ○ Ozonizacija zahtjeva veliku potrošnju energije
Kemijsko-biološki sustav	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ozoniranjem uklanja frakcije koje se mogu ekstrahirati kiselinom (AEF, engl. <i>acid extractable fraction</i>) ○ MFC proces pretvara otpad u električnu energiju ○ Kombinacija MFC-a i SBR dovodi do nižih investicijskih i operativnih troškova 	<ul style="list-style-type: none"> ○ MFC proces sa zračnom elektrodom (MCF, engl. <i>air-cathode</i>) je vrlo skup zbog sustava za prozračivanje u katodnom dijelu. ○ Ozoniranje zahtjeva veliku potrošnju energije
Fizikalno-kemijsko-biološki sustav	<ul style="list-style-type: none"> ○ Najveća učinkovitost uklanjanja štetnih tvari u otpadnoj vodi 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Visoki troškovi rada i održavanja

1.5. Analiza primjera hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita

Elektrokoagulacija je proces destabilizacije emulzije, suspenzije ili otopljenih štetnih tvari uvođenjem električnog naboja u vodeni medij. Elektrokoagulacija se provodi u elektrokemijskoj ćeliji za obradu vode koja se sastoji od anode i katode, koja je prikazana na Slici 1.10.



Slika 1.10. Prikaz procesa elektrokoagulacije [17]

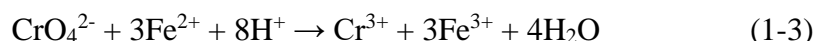
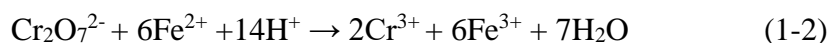
Tijekom procesa elektrokoagulacije odvijaju se reakcije oksidacije na anodi te redukcije na katodi. Anoda, odnosno žrtvena elektroda korodira pri čemu otpušta aktivne katione, koagulanate, a na katodi nastaje vodik i OH^- ion. Elektrokoagulacija zapravo metalne katione dodaje *in-situ*, a ne vanjskim doziranjem.[18] Protokom elektrona koji proizlaze iz pogonske sile električnog izvora održava se protok struje u ćeliji. Što je veća vodljivost manji je električni otpor otopine i smanjena je potrošnja električne energije. Metalni kationi nastali na anodi hidroliziraju u hidrokside, polihidrokside te polihidroksimetalne spojeve te pokazuju jak afinitet prema dispergiranim česticama i protuionima. Proces elektrokoagulacije odvija se u dva stupnja. U prvom stupnju dolazi do stvaranja koagulanata elektrokemijskim procesima na elektrodama. U drugom stupnju dolazi do nastajanja flokula taloga na koje se onečišćenja iz otopine vežu *sweep-flock*

mehanizmom. Elektrokoagulacija u obradi otpadne vode pokazuje niz prednosti kao što su jednostavna oprema, visoka učinkovitost uklanjanja, jednostavno izvođenje procesa te potpuno izbjegavanje dodatka koagulantima (nastaje *in-situ*). EC proces se koristi za pročišćavanje gradskih otpadnih voda, otpadnih ulja, otopina koje sadrže teške metale te za pročišćavanje pitke vode. Elektrokoagulacija sa željeznim elektrodama učinkovita je za obradu vode koja sadrži visoku koncentraciju prirodnih organskih tvari NOM (NOM, engl. *Natural Organic Matter*). Istraživana je početna koncentracija humusne tvari, primijenjeni napon te vrsta pomoćnog elektrolita za elektrokoagulaciju. Na primjerima uklanjanja arsena te teških metala će se pobliže objasniti EC proces i njegov mehanizam u otpadnoj vodi.

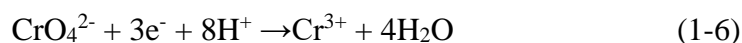
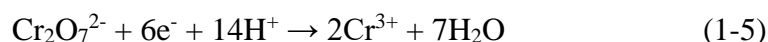
Arsen je kemijski element koji je jako toksičan i korozivan te se u vodi može nalaziti u graničnoj vrijednosti od 10 µg po litri vode za piće. U prirodnoj vodi on se nalazi u obliku anorganskih spojeva, a prevladavaju arsenat (As(V)) i arsenit (As(III)). Efikasnost uklanjanja arsena procesom elektrokoagulacije ovisno o različitim vrstama elektroda pokazuje najbolja uklanjanja sa željezovim, zatim elektrodama od titanija te aluminija. Provedene su razne usporedbe uklanjanja arsenita i arsenata sa kemijskom koagulacijom (sa željezovim kloridom) i elektrokoagulacijom, te je otkriveno da je bolja efikasnost uklanjanja arsenita procesom EC, a oba procesa su pokazala dobru efikasnost uklanjanja As(V). Tijekom procesa EC As(III) djelomično oksidira u As(V). Kristalni željezni oksidi kao što su magnetit i željezov oksid, željezovi oksihidroksidi, aluminijevi hidroksidi nastaju procesom EC. Također dolazi do supstitucije iona Fe^{3+} ionima Al^{3+} na čvrstoj površini, što ukazuje na mehanizam uklanjanja arsena u već navedenim metalnim hidroksidima i oksihidroksidima što osigurava veću površinu za adsorpciju arsena.

Metali kao što su bakar, krom, nikal, srebro i cink su štetni ako se ispuštaju bez obrade. Metoda koja se najviše koristi za pročišćavanje otpadnih voda koja je onečišćena teškim metalima je taloženje sa NaOH i koagulacija sa $FeSO_4$ ili $Al_2(SO_4)_3$ uz dugotrajnu sedimentaciju. Ostale metode su: adsorpcija, ionska izmjena te reverzna osmoza. Svaka od tih metoda ima svoje prednosti i nedostatke te se za uklanjanje teških metala također koristi proces elektrokoagulacije. Kada uzmemo za primjer obradu otpadne vode koja sadrži Cu^{2+} , Zn^{2+} i Cr^{3+} , koristeći aluminij kao elektrodu sva tri elementa se učinkovito uklanjaju procesom elektrokoagulacije, održavajući pH između 4 i 8. Bakar i cink se pet puta brže uklanjaju od kroma. Cr(VI) se prvo reducira do Cr(III) na površini katode, a zatim uklanja taloženjem u obliku $Cr(OH)_3$. Kada je pH veći od 8, dolazi do drastičnog

smanjenja efikasnosti uklanjanja kroma, dok se povećava efikasnost za Cu^{2+} i Zn^{2+} . Kada za elektrodu koristimo željezo, Fe^{2+} ioni nastaju elektrokemijskom redukcijom na površini anode. Istodobno metali poput Cr(VI) se mogu reducirati u Cr(III) pomoću Fe^{2+} u kiseloj otopini kao što je prikazano reakcijama:

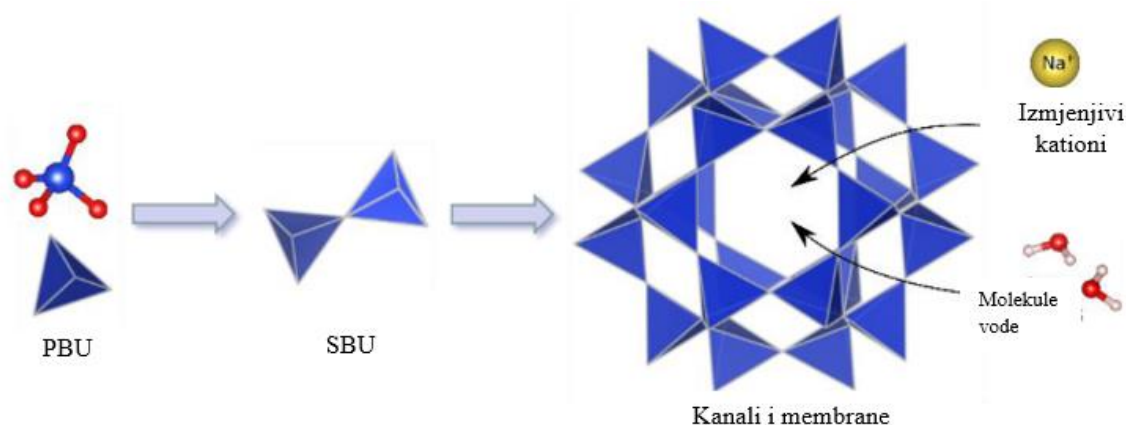


Na katodi osim nastajanja vodika, Cr(VI) se može izravno reducirati u Cr(III), što je opisano reakcijama:



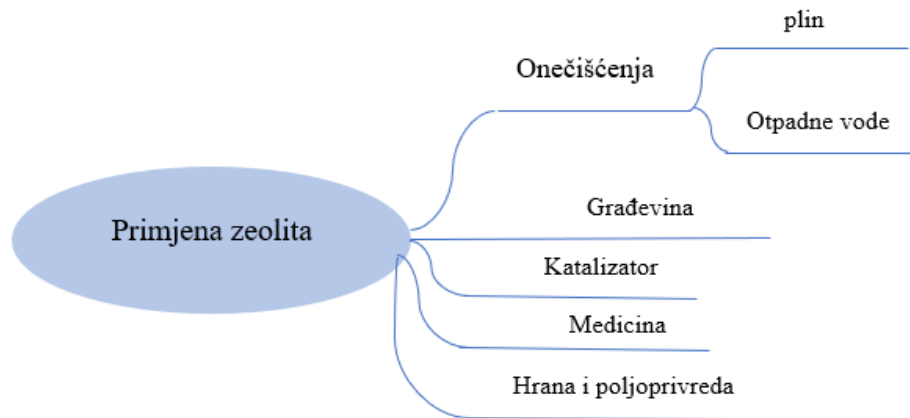
H_2 koji nastaje na katodi povećava pH otpadne vode i time uzrokuje taloženje Cr^{3+} i Fe^{3+} u obliku hidroksida $\text{Cr}(\text{OH})_3$ i $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Novi tip hibridnog sustava je elektrokoagulacija s dodatkom prirodnog zeolita. *Prirodni zeoliti* su alumosilikati koji imaju veliku selektivnost prema teškim metalima, radioaktivnim ionima, amonijaku, a njihovi modificirani oblici mogu ukloniti anionske i kationske vrste. Prirodni zeoliti se zato koriste za pročišćavanje otpadnih voda i remedijaciju okoliša kao ionski izmjenjivači te kao adsorbenti i molekulska sita. Struktura zeolita sastoji se od trodimenzionalne mreže $(\text{SiO}_4)^{2-}$ i $(\text{AlO}_4)^{5-}$ tetraedra koji su povezani kisikovim atomima, kao što je prikazano na Slici 1.11.



Slika 1.11. Shematski prikaz strukture zeolita [19] (PBU, engl. *primary building units*, SBU, engl. *secondary building units*)

U prirodi je pronađeno više vrsta prirodnih zeolita a među najvažnijim su: habazit, klinoptilolit, mordenit, erionit, hojlandit te filipsit. Klinoptilolit je najrasprostranjeniji prirodni zeolit, nalazi se uglavnom u stijenama vulkanskog podrijetla te ima najveću djelotvornost za obradu otpadne vode. Prednost zeolita u odnosu na druge materijale je ta što su lako dostupni, relativno su jeftini te tijekom procesa ne dolazi do njihovog trošenja već se oni mogu lako regenerirati i ponovno koristiti. Nadalje, zeoliti koji u strukturi imaju alkalijske i zemnoalkalijske metale učinkovito uklanjaju teške metale, amonijak i radioaktivne ione pri čemu dolazi do otpuštanja neopasnih iona magnezija, kalcija, kalija i natrija. Modificirani oblici zeolita izmjenjuju katione, anione i organske spojeve dok prirodni izmjenjuju samo katione. Zbog velike količine otpadnih voda bogatih amonijakom koje nastaju u kućanstvu i raznim industrijama, obrada zeolitima je najisplativija i najučinkovitija metoda. Prirodni zeoliti se dodaju životinjskoj prehrani radi adsorpcije mikotoksina, za uklanjanje radionuklida iz voda nuklearnih postrojenja, kao katalizatori, u medicini, građevinarstvu, itd. Modificirani zeoliti se koriste za uklanjanje organskih onečišćenja iz industrijskih otpadnih voda, a kad su obogaćeni dušikom i fosforom mogu se koristiti kao gnojiva za biljke.[20] Slikovit prikaz široke primjene prirodnih zeolita prikazan je na Slici 1.12.



Slika 1.12. Primjena zeolita [21]

U ovom radu ispitat će se učinkovitost hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Karakteristike uzorka komposta

Za pripremu procjedne vode koristio se vrtni kompost proizvođača AGRO. Kompost ima visok udjel organske tvari sa dodatkom dolomita. Proizveden je kompostiranjem izričito biljnog porijekla. Kompost značajno poboljšava strukturu zemlje jer se sastoji od velike količine humusa te vraća zemlji potrebne hranjive tvari. Karakteristike komposta su navedene u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Karakteristike uzorka komposta

KARAKTERISTIKE	VRIJEDNOSTI
pH	6,0-8,5
Spaljivi materijal	min.45%
Ukupni dušik (N)	min.0,6% suhe tvari
Omjer C:N	max. 30
Netopljivi dodaci	max. 2%
Vlaga	40-65%
Sadržaj rizičnih elemenata ispunjava zakonom određene limite u mg/kg suhe tvari:	
	Cd 2
	Pb 100
	Hg 1,0
	As 20
	Cr 100
	Cu 150
	Mo 20
	Ni 50
	Zn 600

2.2. Priprema procjedne vode iz procesa kompostiranja

Procjedna voda od vrtnog komposta (AGRO kompost) simulirana je šaržnim postupkom. Volumen uzorka komposta od 450 g pomiješan je sa 12 L destilirane vode bez

podešavanja početne pH vrijednosti te je ostavljen 24h. Nakon taloženja gornji dio je odekantiran. U pripremljenoj kompostnoj procjednoj vodi ispitivani su sljedeći parametri:

- pH vrijednost
- električna vodljivost
- kemijska potrošnja kisika (KPK)
- mutnoća
- ukupni isparni ostatak (TS)

Karakterizacija je provedena standardnim metodama ispitivanja vode,[22] a rezultati su prikazani u Tablici 3.1.

2.3. Vrsta elektrodnog materijala

Materijal elektroda korišten u ovom radu je: aluminijska legura serije 2000 (AA2007), u kojoj je bakar glavni legirajući element (Al = 92,58%, Cu= 3,84%), ugljični čelik u kojem su glavni elementi željezo i bakar (Fe = 98,27%, Cu = 1,17%) te komercijalne cinkove elektrode u kojima su glavni elementi cink i aluminij (Zn = 99,31- 99,76%, Al = 0,1- 0,5%).

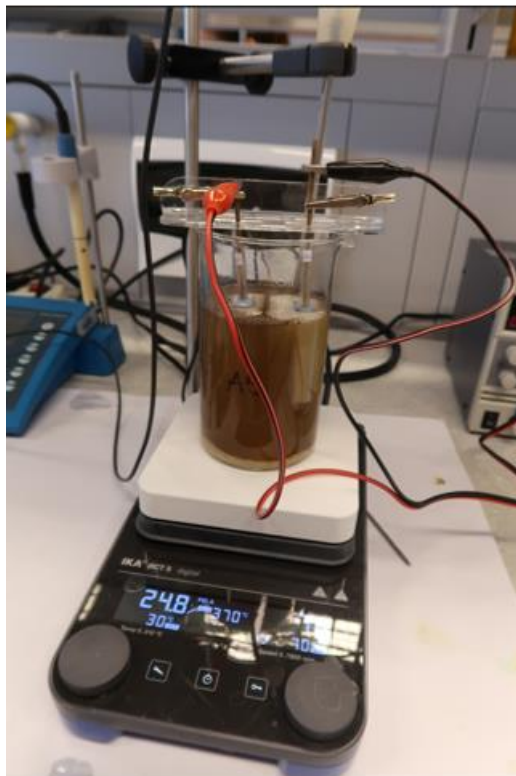
Radi postizanja dobrog električnog kontakta, metalni uzorci su s jedne strane izbušeni i unutar izbušenih rupa uzorka su napravljeni M3 navoji u koje su umetnute bakrene M3 šipke. Šipka je izolirana gumenim crijevom te poliakrilatnom smolom kako bi se izbjegao kontakt s otopinom. Spajanje elektroda s Wantptek NPS605W DC napajanjem (60V, 5A) postignuto je pomoću krokodilskih kopči na M3 navojnu šipku.

2.4. Prirodni zeolit

Prirodni zeolit korišten u ovom radu je podrijetlom iz ležišta Zlatokop, Vranjska Banja, Srbija, granulacije 0,1-0,5 mm. XRD analiza je potvrdila da je glavna mineraloška komponenta klinoptilolit.[23]

2.5. Obrada otpadne vode procesom elektrokoagulacije i prirodnog zeolita (EKZ)

Obrada vode procesom EKZ izvedena je u šaržnoj elektrokemijskoj ćeliji volumena 400 ml, s uronjenim elektrodama. Izvedba procesa prikazana je na Slici 2.1.



Slika 2.1. Izvedba hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita

Provedeno je ukupno 9 eksperimenata preko kojih se ispitivao utjecaj elektroda različitog materijala (Al, Fe, Zn), pH vrijednosti (4, 6, 8) te uz dodatak elektrolita NaCl (0.5, 1, 1.5

g/L) i dodatak zeolita (15, 20 i 25 g/L). Razmak između elektroda održavan je na 3 cm, a brzina okretanja miješala na 70 o/min. Gustoća struje održavana je na $i = 0,0182 \text{ A/m}^2$, dok su jakost struje i primijenjeni napon bili u rasponu $I = 0,38-1,00 \text{ A}$ te $U = 12,39-48,00 \text{ V}$.

Tablica 2.2. Oznake i uvjeti provedenih eksperimenata

Eksp. Br.	Opis eksperimenta	Materijal elektrode	pH	Dodatak elektrolita, g/L NaCl	Dodatak zeolita, g/L
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L	Fe	4	0,5	15
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1 g/L NaCl, 20 PZ g/L	Fe	6	1,0	20
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L	Fe	8	1,5	25
A4	EKZ-Al, pH=4, 1 g/L NaCl, 25 PZ g/L	Al	4	1,0	25
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L	Al	6	1,5	15
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L	Al	8	0,5	20
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L	Zn	4	1,5	20
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L	Zn	6	0,5	25
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1 g/L NaCl, 15 PZ g/L	Zn	8	1,0	15

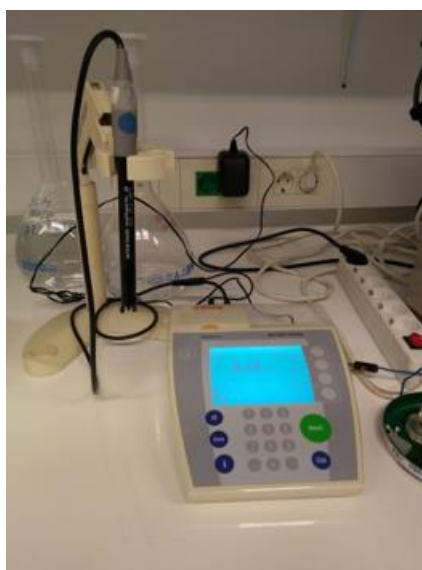
Prije svakog eksperimenta, elektrode su brušene i polirane uzastopnim mokrim SiC brusnim papirima (finoće P800), ultrazvučno očišćene u 70%-tnom etanolu i deioniziranoj vodi.

2.6. Parametri koji su praćeni prije, tijekom i nakon procesa elektrokoagulacije

Tijekom procesa elektrokoagulacije uz dodatak zeolita pratila se pH vrijednost, električna vodljivost i temperatura. Prije i nakon provedenih eksperimenata određivani su: pH vrijednost, električna vodljivost, temperatura, mutnoća, kemijska potrošnja kisika (KPK) te ukupni isparni ostatak.

2.6.1. Određivanje pH vrijednosti

pH vrijednost je mjera koja ukazuje na kiselost odnosno lužnatost otopine. Za određivanje pH vrijednosti korišten je pH- metar prikazan na Slici.2.2. Elektrodu pH- metra obavezno je ispirati destiliranom vodom te osušiti papirnatim ubrusom te zatim staviti u uzorak. Nakon što se vrijednost ustali, očita se pH. Postupak se ponavlja za svih 9 eksperimenata.



Slika 2.2. Laboratorijski pH metar

Rezultati mjerenja pH vrijednosti prikazane su u Tablici 3.2.

2.6.2. Određivanje električne vodljivosti

Električna vodljivost označava fizikalnu veličinu koja opisuje svojstvo tijela da propušta struju. Izražena je u S/m ili $\mu\text{S}/\text{m}$. Određivana je za svaki eksperiment u vremenskim intervalima 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 minuta pri temperaturi od 25°C . Električna vodljivost čiste vode je prilično mala, ali dodatkom soli, koje provode struju, se povećava. To ukazuje da električna vodljivost zapravo ukazuje na koncentraciju otopljenih iona u vodi. Uređaj za mjerenje vodljivosti je konduktometar prikazan na Slici. 2.3.



Slika 2.3. Mettler Toledov konduktometar

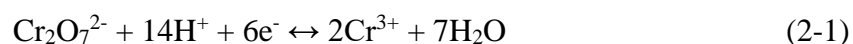
Rezultati određivanja električne vodljivosti tijekom vremena prikazani su u Tablici 3.3.

2.6.3. Određivanje temperature

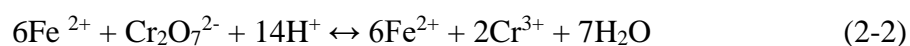
Za mjerenje temperature korišten je standardni termometar. Vrijednost temperature praćena je u vremenskim intervalima od 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 min te očitane vrijednosti prikazane su u Tablici 3.4.

2.6.4. Određivanje kemijske potrošnje kisika (KPK)

Kemijska potrošnja kisika je pokazatelj sadržaja razgradljive i nerazgradljive organske tvari, kao i anorganske tvari koja se može oksidirati pomoću jakog oksidacijskog sredstva (KMnO_4 kalijeva-permanganata ili $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ kalijeva-dikromata). Za određivanje KPK koristila se bikromatna metoda i izražena je kao masa potrošenog kisika u mg po litri određenog uzorka. Oksidacija tvari sa $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ odvija se prema reakciji:

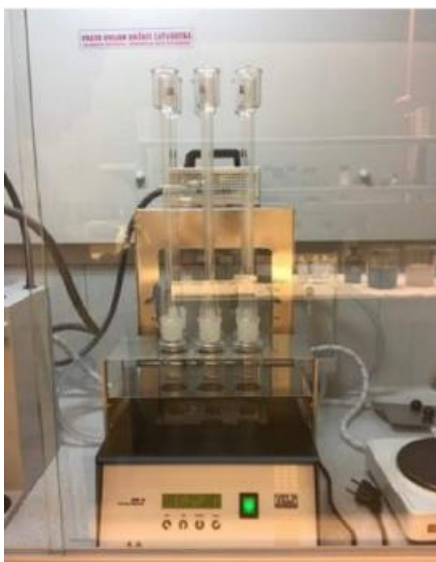


Višak bikromata se titrira s otopinom amonij željezo(II) sulfat heksahidratom $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$, uz ferroin kao indikator prema reakciji:



Postupak rada:

U odmjernu tikvicu od 100 mL doda se 10 mL uzorka te razrijedi destiliranom vodom do oznake. Nakon toga se u epruvetu doda po 5 mL razrijeđenog uzorka, 3 mL otopine kalijevog permanganata, nekoliko zrna HgSO₄ te 7 mL H₂SO₄ s Ag₂SO₄. Za slijepu probu postupak je isti samo se umjesto uzorka doda 5 mL destilirane vode. Na epruvetu se stavi povratno hladilo te se kuha u digestoru 1,5 h pri temperaturi od 120 °C kao što je prikazano na Slici 2.4. Nakon kuhanja uzorak se stavi hladiti na sobnu temperaturu i titrira se s Mohrovom soli uz feroin kao indikator do promjene iz žute u crvenu boju.



Slika 2.4. Prikaz kuhanja u digestoru

Izračunavanje KPK:

Izračunava se prema izrazu:

$$KPK_{Cr} = \frac{(b - a) \cdot c_{Fe(II)} \cdot f_{Fe(II)} \cdot \frac{1}{4} \cdot M(O_2) \cdot R \cdot 1000}{V_{uzorka}} \quad (2-3)$$

gdje je:

b – volumen otopine Fe(II) utrošen za titraciju slijepe probe, mL

a – volumen otopine Fe(II) utrošen za titraciju uzorka, mL

$c_{\text{Fe(II)}}$ – koncentracija otopine Fe(II), 0,025 mol/L

$f_{\text{Fe(II)}}$ – faktor otopine Fe(II)

$M(\text{O}_2)$ – 32 g/mol

R – faktor razrjeđenja

V_{uzorka} – volumen uzorka, 5 mL

Rezultati KPK prije i nakon EKZ, prikazani su u Tablici 3.5.

2.6.5. Određivanje mutnoće

Mutnoća nastaje uslijed prisutnosti raspršenih tvari, osobito koloida, zatim mikroorganizama i mjehurića plina. Mutnoća smanjuje dubinu prodiranja svjetlosti i time ograničava proces fotosinteze. Mjeri se pomoću turbidimetra prikazanog na Slici 2.5., a izražava u mg/L SiO₂ ili neflometrijskim jedinicama mutnoće NTU (engl. NTU – Nephelometric Turbidity Unit). Rezultati određivanja mutnoće prikazani su u Tablici 3.6.



Slika 2.5. Turbidimetar

2.6.6. Određivanje ukupnog isparnog ostatka

Ukupni isparni ostatak je mjera sadržaja raspršenih i otopljenih tvari u otpadnoj vodi. Određuje se odmjeraivanjem 20 mL uzorka u posudu koja je prethodno izvagana i stavlja na sušenje pri temperaturi od 105 ° C. Nakon sušenja i vaganja, isparni ostatak se izračunava prema izrazu:

$$TS = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 1000 \quad (2-4)$$

gdje je:

m_2 – masa posudice s uzorkom nakon isparavanja i sušenja na 105 ° C, g

m_1 - masa prazne posudice, g

V- volumen uzorka, mL

TS – ukupni isparni ostatak, mg/L

Rezultati određivanja isparnog ostatka prikazani u Tablici 3.7.

2.7. Test taloživosti i određivanje mase taloga

Uzorak suspenzije se nakon EKZ ulije u graduiranu menzuru te se prati taloženje tijekom 30 minuta prema Kynch-ovoj teoriji taloženja prikazano na Slici 2.6.. Nakon toga se sadržaj menzure filtrira na filter papiru te nakon filtracije i sušenja odredi se masa taloga. Rezultati brzine taloženja su prikazani u Tablici 3.8., a rezultati mase taloga nakon EKZ prikazani su u Tablici 3.9.



Slika 2.6. Taloženje u menzuri

2.8. Određivanje mase elektroda

Za proces EKZ koristile su se elektrode od različitih materijala. Prije samog procesa EKZ elektrode su se sušile i vagale na analitičkoj vagi te se postupak ponovljao i nakon provedbe procesa. Masa elektroda prije i nakon procesa prikazane su u Tablici 3.10. i 3.11.

3. REZULTATI

3.1. Rezultati karakterizacije kompostne procjedne vode

Rezultati karakterizacije simulirane kompostne procjedne vode prikazani su u Tablici 3.1.

Tablica 3.1. Karakteristike uzorka kompostne procjedne vode

Parametri	Vrijednosti
pH	5,80
Električna vodljivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	594,00
Mutnoća, NTU	167,00
KPK, mgO_2/L	576,92
TS, mg/L	1070,00

3.2. Rezultati praćenja hibridnog procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita

3.2.1. Rezultati praćenja pH vrijednosti

pH vrijednosti tijekom procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita prikazane su u Tablici 3.2. uz različite koncentracije prirodnog zeolita i elektrolita.

Tablica 3.2. Rezultati pH vrijednosti tijekom procesa EKZ

Eksp. br.	Opis eksperimenta	pH vrijednost tijekom vremena							
		0 min	2 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L	4,04	6,38	6,72	8,56	9,05	9,45	9,45	9,72
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1 g/L NaCl, 20 PZ g/L	6,00	6,69	8,22	9,11	9,32	9,62	9,99	10,21
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L	8,00	8,60	9,17	9,25	9,30	9,84	9,97	10,04
A4	EKZ-Al, pH=4, 1 g/L NaCl, 25 PZ g/L	3,98	7,20	8,06	8,43	8,42	8,60	8,54	8,57
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L	6,01	7,85	8,56	8,68	8,75	8,80	8,88	8,85
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L	8,03	8,82	9,08	9,17	9,00	9,06	9,06	9,02
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L	4,01	6,36	7,66	11,26	11,44	11,18	11,25	11,25
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L	6,01	8,81	10,33	10,97	10,68	10,41	10,52	10,52
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1 g/L NaCl, 15 PZ g/L	8,01	8,70	10,75	11,47	11,47	11,34	11,32	11,27

3.2.2. Rezultati električne vodljivosti

Rezultati praćenja električne vodljivosti tijekom procesa EKZ prikazani su u Tablici 3.3.

Tablica 3.3. Prikazane vrijednosti električne vodljivosti u vremenu tijekom procesa EKZ

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Električna vodljivost tijekom vremena, $\mu\text{S}/\text{m}$							
		0 min	2 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L	1699	1723	1706	1648	1574	1589	1629	1629
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1 g/L NaCl, 20 PZ g/L	2750	2700	2710	2700	2680	2590	2550	2520
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L	3740	2600	3600	3510	3620	3560	3610	3630
A4	EKZ-Al, pH=4, 1 g/L NaCl, 25 PZ g/L	2730	2650	2740	2660	2600	2390	2360	2420
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L	3480	3650	3640	3610	3370	3360	3500	3400
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L	1735	1766	1710	1704	1675	1664	1639	1581
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L	3770	3820	3670	3910	4060	3950	3600	3900
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L	1735	1641	1605	1776	1519	1770	1667	1550
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1 g/L NaCl, 15 PZ g/L	2860	2790	2810	3360	3470	3520	3000	3000

3.2.3. Rezultati temperature

Rezultati praćenja promjene temperature tijekom procesa EKZ prikazani su u Tablici 3.4.

Tablica 3.4. Promjena temperature tijekom vremena

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Temperatura tijekom vremena, °C							
		0 min	2 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	22,0	24,0	25,0	25,5	27,0	27,3	28,5	29,3
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	22,0	23,9	24,5	25,3	26,1	27,0	27,6	28,3
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	22,0	24,3	24,7	25,5	25,9	26,5	26,8	27,4
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	22,0	25,5	27,4	31,4	34,5	36,9	39,1	40,7
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	22,0	25,1	26,4	28,2	29,8	31,1	32,4	33,4
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	22,0	25,8	28,7	33,7	37,3	39,5	40,8	41,3
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	22,0	26,6	27,8	30,5	32,4	33,9	35,2	36,3
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	22,0	25,9	29,7	34,5	39,0	42,3	44	41,7
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1 g/L NaCl, 15 PZ g/L	22,0	25,9	27,9	30,8	33,0	35,3	37,7	39,6

3.2.4. Rezultati kemijske potrošnje kisika (KPK)

Rezultati određene kemijske potrošnje kisika i efikasnost uklanjanja nakon procesa EKZ prikazani u Tablici 3.5.

Tablica 3.5. Rezultati KPK i efikasnost uklanjanja

Eksp. br.	Uzorak	KPK, mg/L	Efikasnost uklanjanja, %
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	40,55	92,97
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	62,67	89,14
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	81,10	85,94
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	33,18	94,25
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	55,29	90,42
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	40,550	92,97

Nastavak Tablice 3.5.

A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	62,669	89,14
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	58,982	89,78
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1 g/L NaCl, 15 PZ g/L	66,355	88,50

3.2.5. Rezultati mutnoće

U tablici 3.6. prikazane su vrijednosti mutnoće i efikasnost uklanjanja mutnoće nakon provedbe procesa EKZ izražen u NTU.

Tablica 3.6. Mutnoća nakon provedbe procesa EKZ i efikasnost uklanjanja

Eksp. br.	Uzorak	Mutnoća, NTU	Efikasnost uklanjanja, %
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	2,04	98,78
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	2,45	98,53
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	1,55	99,07
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	0,23	99,86
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	0,77	99,54
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	0,29	99,83
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	36,3	78,26
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	13,89	91,68
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	47,5	71,56

3.2.6. Ukupni isparni ostatak

Rezultati ukupnog isparnog ostatka nakon provedbe procesa EKZ prikazani su u Tablici 3.7.

Tablica 3.7. Rezultati ukupnog isparnog ostatka

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Masa prazne posudice, g	Masa nakon sušenja s 20 ml uzorka, g	TS, g/L
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	105,4975	105,5059	0,84
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	103,8463	103,8588	1,25
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	106,4615	106,4791	1,76
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	102,5887	102,6012	1,25
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	78,6920	78,7096	1,76
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	76,3909	76,4005	0,96
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	74,5705	74,5889	1,84
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	78,6916	78,7002	0,86
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	74,5704	74,5854	1,50

3.3. Rezultati testa taloženja suspenzije i mase taloga

U Tablici 3.8. prikazane su rezultati testa taloženja suspenzije u vremenskim intervalima za svaki eksperiment.

Tablica 3.8. Rezultati testa taloženja

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Visina stupca tijekom vremena, cm								
		0 min	1 min	2 min	4 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	20,50	17,50	12,20	7,80	7,30	5,10	4,55	4,00	3,80
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	20,50	/	/	6,20	5,90	4,00	3,50	3,20	2,90
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	21,00	/	/	8,20	/	5,10	4,30	4,00	3,70
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	20,50	19,10	17,50	13,30	7,30	6,50	5,65	5,10	4,80
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	20,50	18,30	15,00	8,90	10,85	5,10	4,55	3,50	3,20
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	20,50	17,20	13,10	4,80	7,30	2,90	2,15	2,15	2,15
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	20,00	15,00	8,90	6,70	4,00	5,35	4,55	4,30	3,20
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	20,00	13,30	6,20	4,55	4,00	3,20	2,90	2,90	2,90
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	18,85	15,00	7,85	5,35	5,10	4,30	3,70	3,50	3,50

Tablica 3.9. Rezultati mase taloga

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Mase filter papira, g	Filter papir + talog, G	Masa taloga na 400 ml otpadne vode, g/L	Masa taloga, g/L
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	0,8302	1,1560	0,3258	0,8145
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	0,8311	1,9078	1,0767	2,6918
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	0,8278	1,7936	0,9658	2,4145
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	0,8258	2,1034	1,2776	3,1940
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	0,8301	1,4344	0,6043	1,5108
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	0,8294	0,4173	0,5879	1,4698
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	0,8280	1,7774	0,9494	2,3735
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	0,8244	1,6356	0,8112	2,0280
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	0,8286	1,5780	0,7494	1,8735

3.4. Rezultati potrošnje elektroda

U tablici 3.10. i 3.11. prikazane su vrijednosti potrošnje anode i katode nakon procesa EKZ.

Tablica 3.10. Rezultati potrošnje anode prije i nakon provedbe procesa EKZ

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Masa prije, g	Masa nakon, g	Razlika, g
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	78,6769	78,4040	0,2729
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	84,1284	83,9285	0,1999
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	84,6660	84,3156	0,3504
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	64,9045	64,7187	0,1858
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	49,6140	49,4650	0,1490
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	47,96160	47,8630	0,0986
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	202,1106	201,4535	0,6571
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	200,3208	199,7216	0,5992
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	208,8240	208,1993	0,6247

Tablica 3.11. Rezultati potrošnje katode prije i nakon provedbe procesa EKZ

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Masa prije, g	Masa nakon, g	Razlika, g
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	81,1162	81,0526	0,0636
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	81,5520	81,5554	-0,0034
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	83,7479	83,6212	0,1267
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	58,3679	58,2878	0,0801
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	48,6467	48,6043	0,0424
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	48,6372	48,5366	0,1006
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	187,7637	187,7631	0,0006
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	186,6880	186,6940	-0,0060
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	214,0400	214,1200	-0,0800

3.5. Rezultati napona i struje tijekom procesa EKZ

U tablici 3.12. prikazani su rezultati napona i struje tijekom procesa EKZ.

Tablica 3.12. Napon i struja tijekom procesa EKZ

Eksp. br.	Opis eksperimenta	Napon, V	Struja, A
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	39,00	0,38
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	15,88	0,38
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	12,39	0,38
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	25,70	0,91
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	17,25	0,75
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	48,00	0,70
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	20,37	1,00
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	39,08	1,00
A9	EKZ-Zn, pH=8, 1g/L NaCl, 15 PZ g/L	24,66	1,00

4. RASPRAVA

4.1. Analiza rezultata karakterizacije kompostne procjedne vode

Karakteristike uzorka procjedne vode uspoređene su s pokazateljima kakvoće otpadne vode s maksimalnim dopuštenim koncentracijama (MDK) koje su propisane Pravilnikom o граниčnim vrijednostima emisija otpadnih voda prikazanih u Tablici 4.1.[24]

Tablica 4.1. Usporedba vrijednosti procjedne vode s MDK otpadnih voda

Parametri	Vrijednosti uzorka	Površinske vode	Sustav javne odvodnje
pH	5,80	6,00-9,00	6,50-9,50
Električna vodljivost (μS/cm)	594,00	-	-
Mutnoća, NTU	167,00	-	-
KPK, mgO ₂ /L	576,92	125,00	700,00
TS, mg/L	1070,00	35*	-

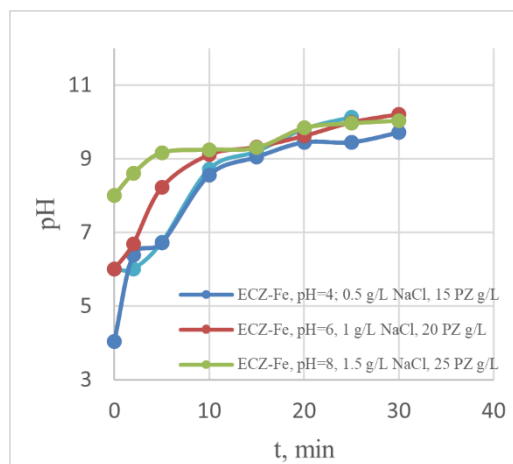
*- uspoređuju se vrijednosti za ukupne suspendirane tvari (TSS) budući da vrijednosti za ukupni isparni ostatak (TS) nisu propisane Pravilnikom

pH vrijednost otpadne procjedne vode iz uzorka iznosi 5,8 što je ispod dopuštene granične vrijednosti za ispušt u površinske vode i sustav javne odvodnje. Električna vodljivost za uzorak iznosi 594,00 μS/cm što ukazuje na prisutnost otopljenih tvari koji imaju svojstvo ionske vodljivosti. Mutnoća uzorka iznosi 167,00 NTU te iako nije propisana Pravilnikom ispuštanjem takve vode u vodne sustave narušava proces fotosinteze i utječe na sadržaj otopljenog kisika. Kemijska potrošnja kisika (KPK) iznosi 576,92 mg O₂/L iz čega se vidi da se takva voda ne može ispustiti u površinske vode, ali može u sustav javne odvodnje. Vrijednost ukupnog isparnog ostatka (TS) uspoređena s vrijednošću ukupne suspendirane tvari (TSS), budući da vrijednosti za TS nisu propisane Pravilnikom. TS u iznosu od 1070 mg/L ukazuje na prisutnost suspendiranih i taložnih tvari u polaznom uzorku.

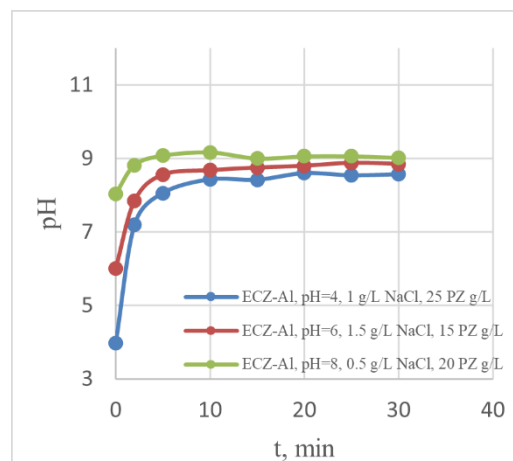
4.2. Analiza rezultata parametara praćenih tijekom procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita

4.2.1. Analiza rezultata pH vrijednosti

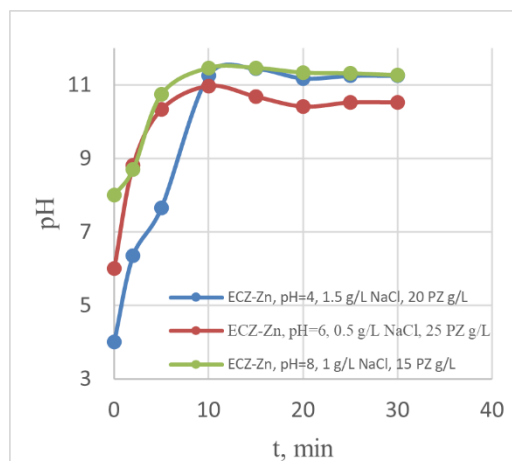
Rezultati pH vrijednosti koji su dani u Tablici 3.2. grafički su prikazani na Slikama 4.1.,4.2., i 4.3.



Slika 4.1. Grafički prikaz promjene vrijednosti pH tijekom procesa EKZ provedeni na elektrodama od Fe pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

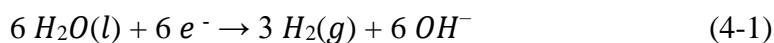


Slika 4.2. . Grafički prikaz promjene vrijednosti pH tijekom procesa EKZ provedeni na elektrodama od Al pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita



Slika 4.3. Grafički prikaz promjene vrijednosti pH tijekom procesa EKZ provedeni na elektrodama od Zn pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

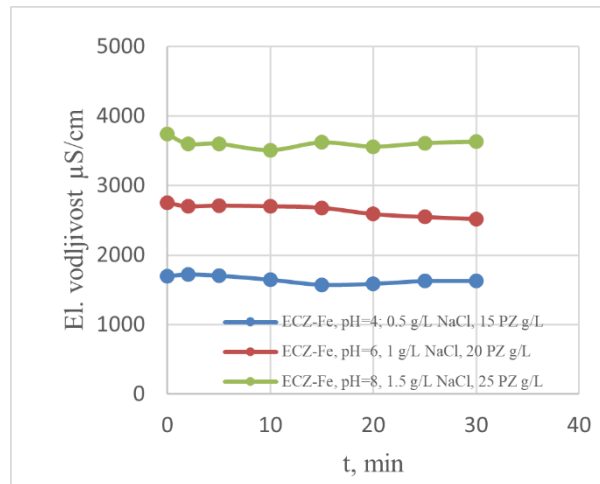
Uočen je porast pH vrijednosti kod svih eksperimenata u prvih cca. 15 minuta, a nakon čega je vidljiv lagani rast ili stegnacija. Najveći porast je kod eksperimenata sa Zn elektrodama, zatim sa Fe elektrodama, a najmanji je porast kod eksperimenata sa Al elektrodama. Porast pH se događa zbog reakcije hidrolize vode gdje nastaje vodik i OH-ion[25], a prema reakciji:



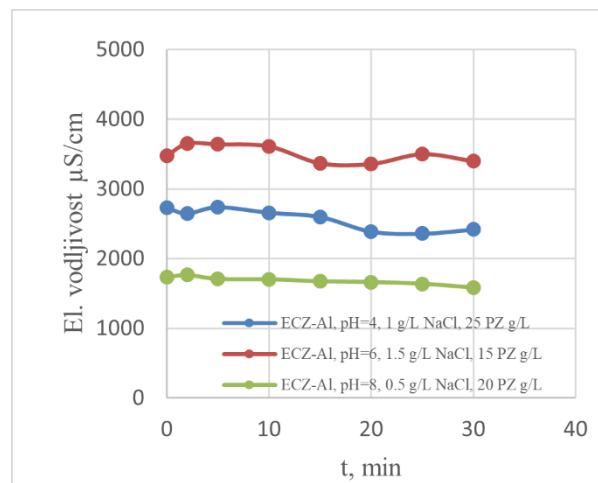
pH vrijednosti za eksperimente s Al elektrodama (6,01-9,17) su unutar graničnih vrijednosti propisanih Pravilnikom te je takvu vodu moguće ispustiti u sustav javne odvodnje.

4.2.2. Analiza rezultata električne vodljivosti

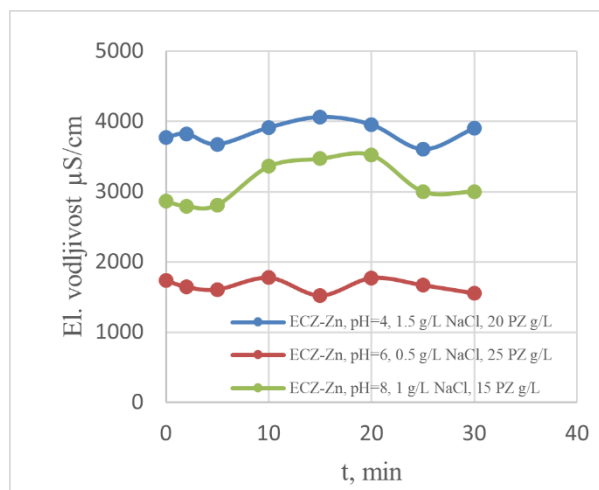
Rezultati analize električne vodljivosti prikazane u Tablici 3.3 grafički su prikazani na Slikama 4.4., 4.5. i 4.6.



Slika 4.4. Grafički prikaz električne vodljivosti tijekom procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Fe pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita



Slika 4.5. Grafički prikaz električne vodljivosti tijekom procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Al pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

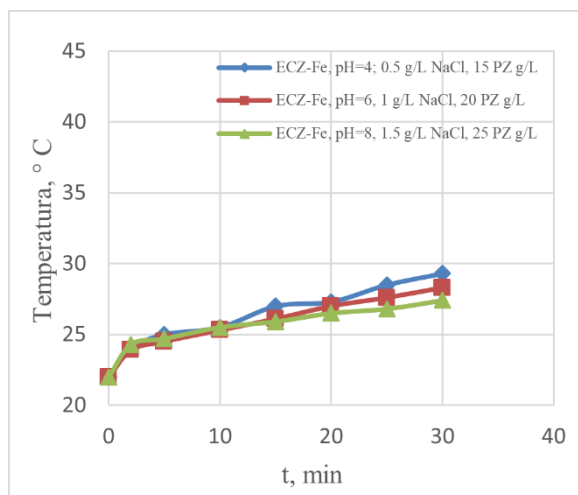


Slika 4.6. Grafički prikaz električne vodljivosti tijekom procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Zn pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

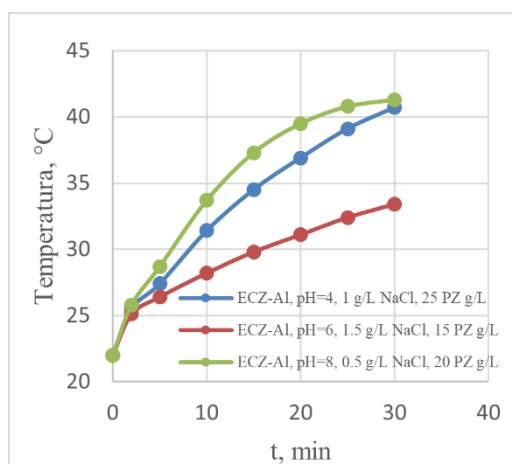
Dodatak elektrolita utječe na porast početne vrijednosti električne vodljivosti u svim eksperimentima. Tijekom provedbe eksperimenta uočava se da krivulje električne vodljivosti osciliraju (posebno kod eksperimenta sa Zn elektrodama), ali uz blagi trend pada, a što se prepisuje vezanju štetnih tvari na flokule koje su nastale tijekom procesa elektrokoagulacije i dodatku prirodnog zeolita. Konačne vrijednosti električne vodljivosti su visoke te treba imati na umu da takva otpadna voda može djelovati korozivno na kanalizacijski sustav.

4.2.3. Analiza rezultata temperature

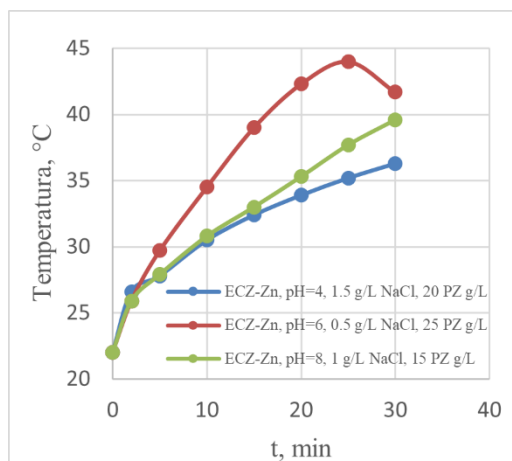
Promjena temperature tijekom procesa elektrokoagulacije prikazana u Tablici 3.4. prikazan je grafički na Slikama 4.7.,4.8. i 4.9.



Slika 4.7. Grafički prikaz promjene temperature tijekom procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Fe pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita



Slika 4.8. Grafički prikaz promjene temperature tijekom procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Al pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

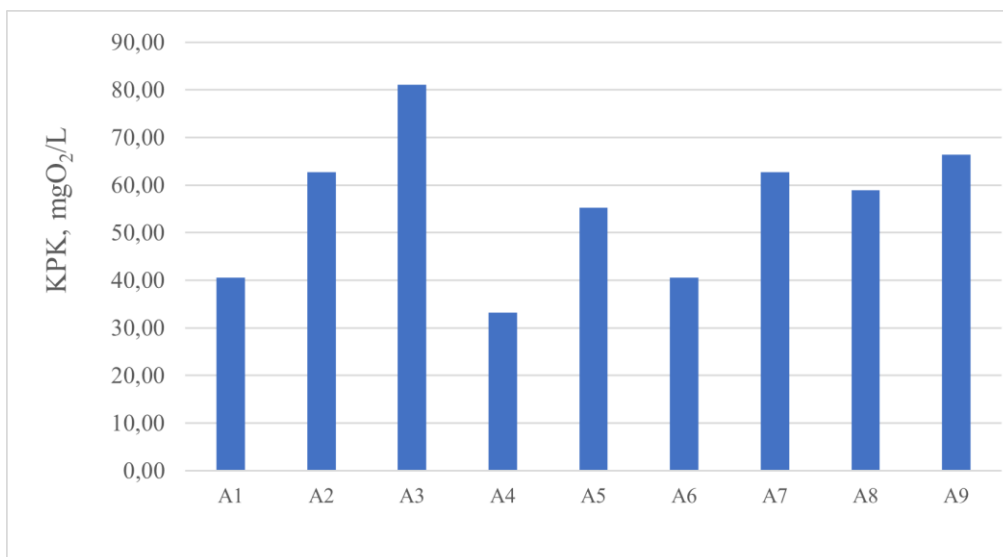


Slika 4.9. Grafički prikaz promjene temperature tijekom procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Zn pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

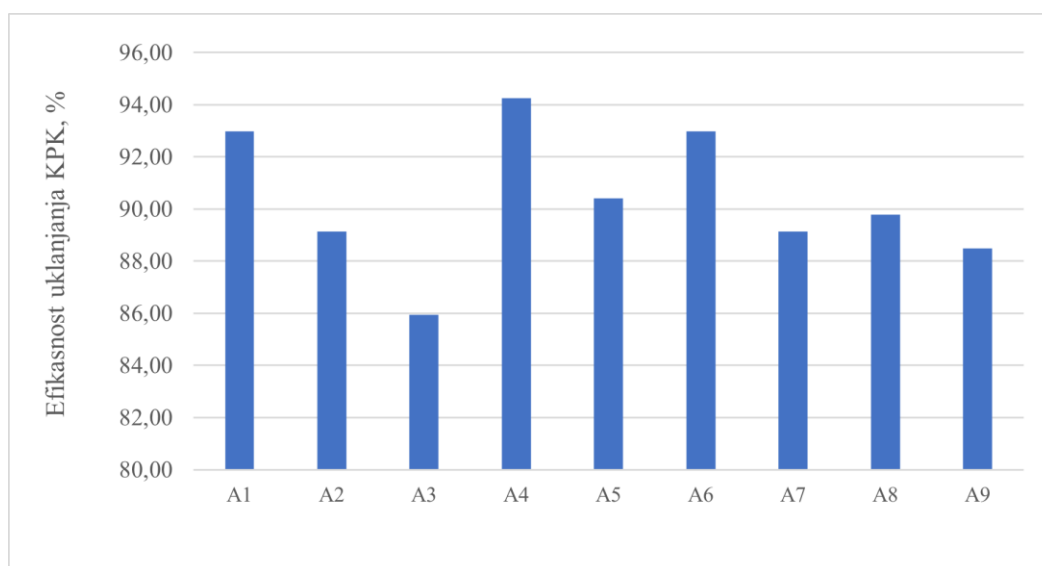
Porast temperature uočen je kod svih eksperimenata. Najveći porast temperature je u eksperimentima sa Al elektrodama gdje temperature doseže vrijednost od $41,3^{\circ}\text{C}$ te eksperimentima sa Zn elektrodama gdje je najveća temperatura od $41,7^{\circ}\text{C}$. Kod eksperimenata s Fe elektrodama uočen je blaži rast temperature. Razlog porasta temperature otopine povezuje se sa trošenjem elektroda. Također, veći porast temperature je uočen kod eksperimenata s manjom električnom vodljivošću (tj. manjim dodatkom elektrolita NaCl), što je posljedica većeg otpora prolazu struje pa se dio struje gubi u obliku topline. Ispuštanjem vode sa povišenom temperaturom u sustav javne odvodnje ili u površinske vode može dovesti do termalnog onečišćenja. Zato se u praktičnoj primjeni taj porast kontrolira smanjenjem omjera površine elektroda i volumena procjedne vode koja se obrađuje.

4.2.4. Analiza rezultata kemijske potrošnje kisika (KPK)

Vrijednosti kemijske potrošnje kisika prikazani u Tablici 3.5. grafički su obrađeni na Slici 4.10. te efikasnost uklanjanja na Slici 4.11.



Slika 4.10. Grafički prikaz vrijednosti KPK tijekom procesa EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenata čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)



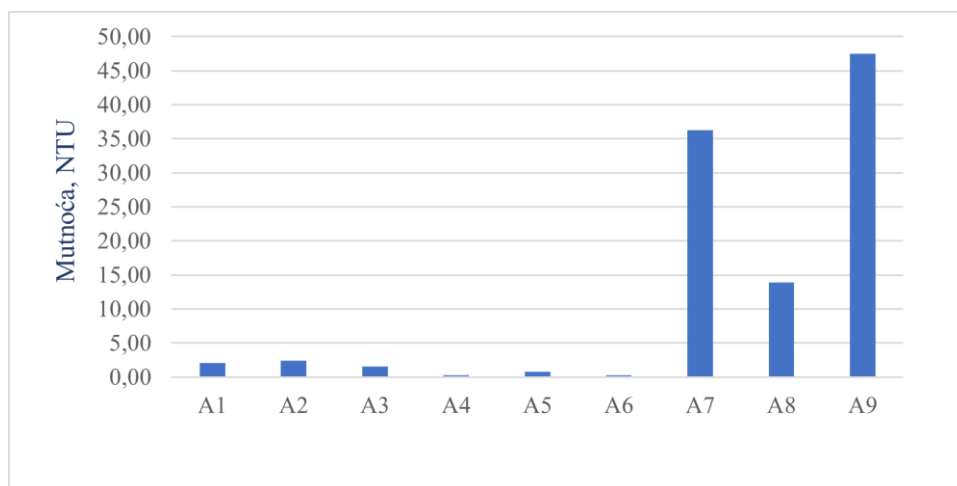
Slika 4.11. Grafički prikaz efikasnosti uklanjanja KPK tijekom procesa EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenata čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

Kemijska potrošnja kisika za početni uzorak iznosi 576,92 mg/L. Nakon procesa EKZ dolazi do značajnog smanjenja te vrijednosti. Najveća efikasnost uklanjanja od 94,25% postignuta je u eksperimentu sa aluminijskom elektrodom pri pH=4, uz dodatak 1 g/L

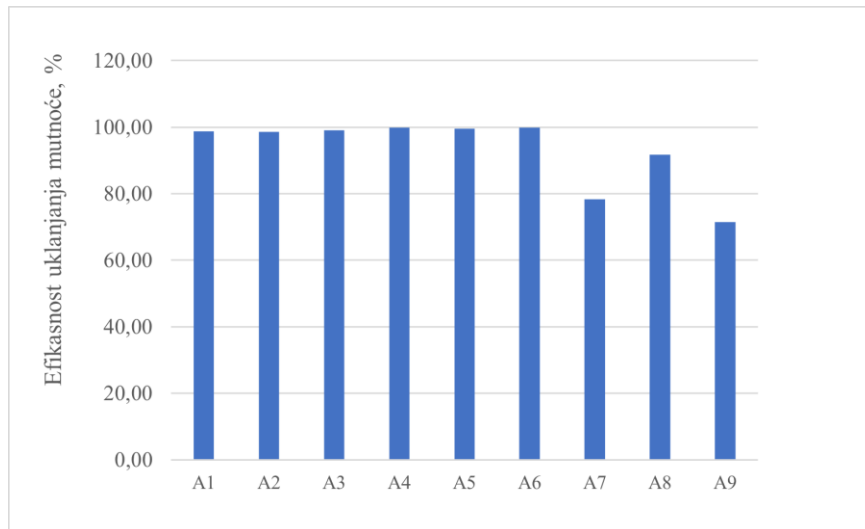
NaCl i 25 g/L prirodnog zeolita (A4), a najmanja u eksperimentu sa elektrodama od željeza uz dodatak 1,5g/L NaCl i 25 g/L prirodnog zeolita uz pH vrijednost 8 (A3). Konačni KPK je kod svih eksperimenata ispod graničnih vrijednosti propisanih Pravilnikom. [23]

4.2.5. Analiza rezultata mutnoće

Rezultati određivanja mutnoće odnosno efikasnosti uklanjanja mutnoće prikazanih u Tablici 3.6. grafički su prikazani na Slici 4.12. i 4.13.



Slika 4.12. Grafički prikaz rezultata mutnoće nakon procesa EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenata čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

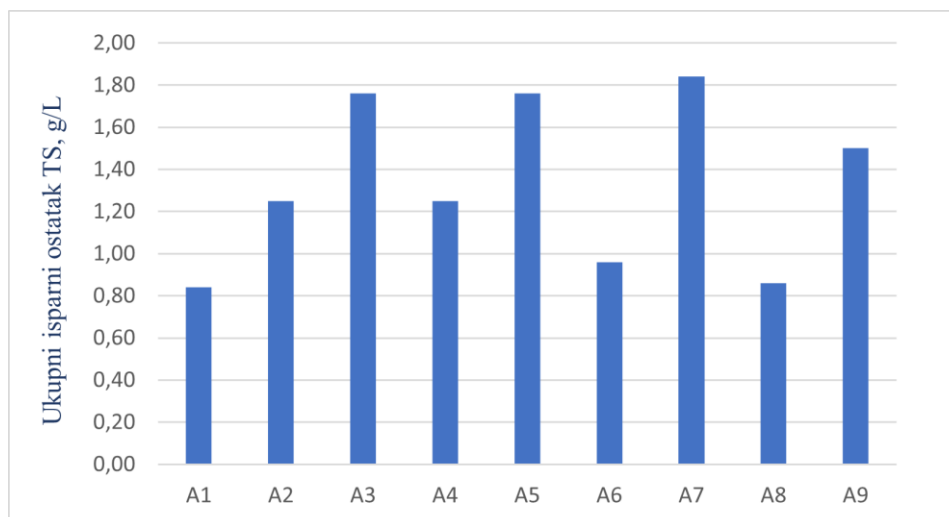


Slika 4.13. Grafički prikaz efikasnosti uklanjanja mutnoće procesom EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

Zbog prisustva otopljenih i raspršenih tvari u uzorcima, dolazi do pojave mutnoće. Nakon procesa EKZ vidljivo je da je efekt uklanjanja izrazito velik te doseže i do 99,86% kod eksperimenta A4 sa Al elektrodom pri pH= 4, uz dodatak 1 g/L elektrolita NaCl i 25 g/L prirodnog zeolita. Najmanja efikasnost uklanjanja je kod eksperimenata sa Zn elektrodama i kreće se u rasponu od 71,56-91,68%.

4.2.6. Analiza rezultata ukupnog isparnog ostatka

Rezultati ukupnog isparnog ostatka nakon procesa EKZ prikazanih u Tablici 3.7. prikazani su grafički na Slici 4.14.

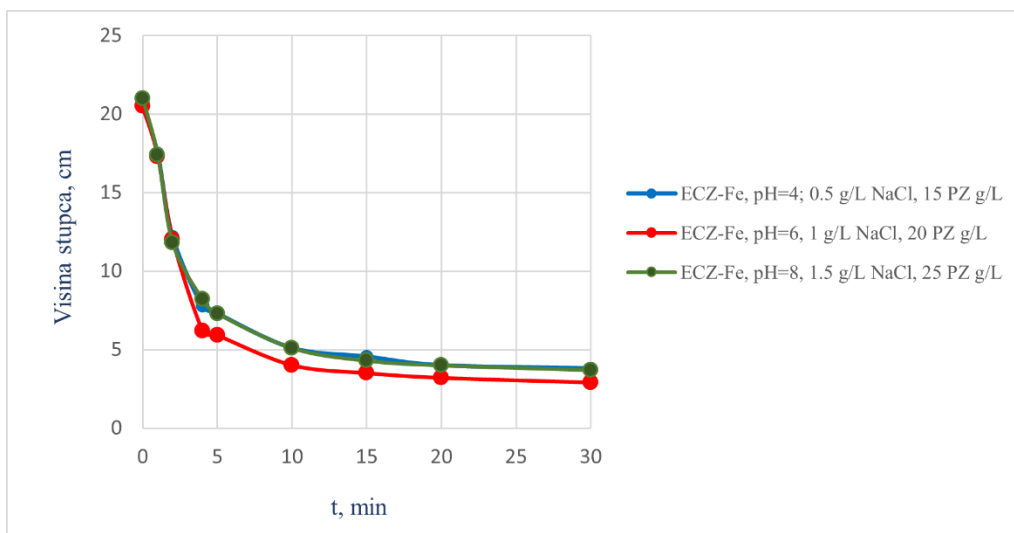


Slika 4.14. Grafički prikaz rezultata TS nakon procesa EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

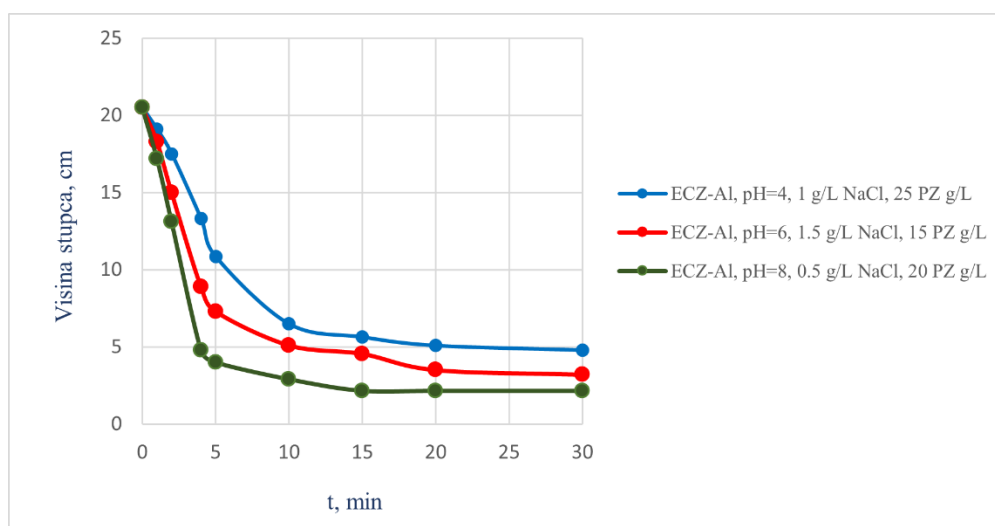
Iz rezultata se uočava da uz veći dodatak elektrolita dolazi do povećanja isparnog ostatka u odnosu na početnu vrijednost koja iznosi 1,07 g/L. Tako je kod eksperimenta A3 uz dodatak elektrolita u koncentraciji od 1,5 g/L isparni ostatak 1,76 g/L, kod eksperimenta A5 uz dodatak 1,5 g/L NaCl iznosi 1,76 g/L a kod eksperimenta A7 iznosi 1,84 g/L. Najmanja vrijednost isparnog ostatka je kod eksperimenata A1, A6 i A8 te iznosi 0,84 g/L, 0,96 g/L i 0,86 g/L. Kod tih eksperimenata je zajednički dodatak elektrolita od 0,5 g/L. To ukazuje da na vrijednost TS najviše ima utjecaja dodatak elektrolita. Dodatak zeolita također utječe na vrijednost TS budući zeolit ima sposobnost vezanja na sebe dio onečišćenja.

4.3. Analiza rezultata testa taloženja i mase taloga

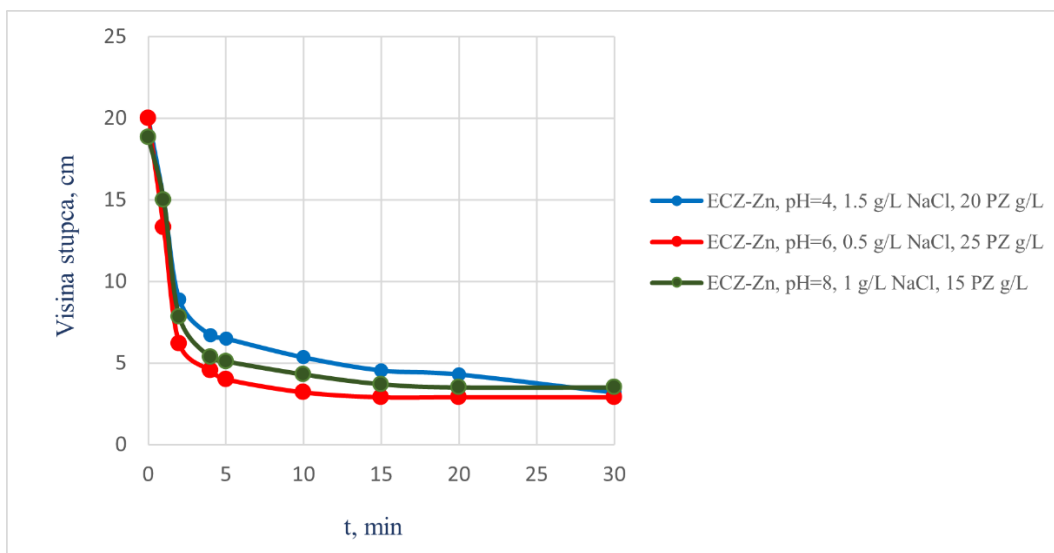
Rezultati testa taloženja nakon procesa EKZ prikazanih u tablici 3.8. prikazani su na Slici 4.15.



Slika 4.15. Analiza rezultata testa taloženja nakon procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Fe pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

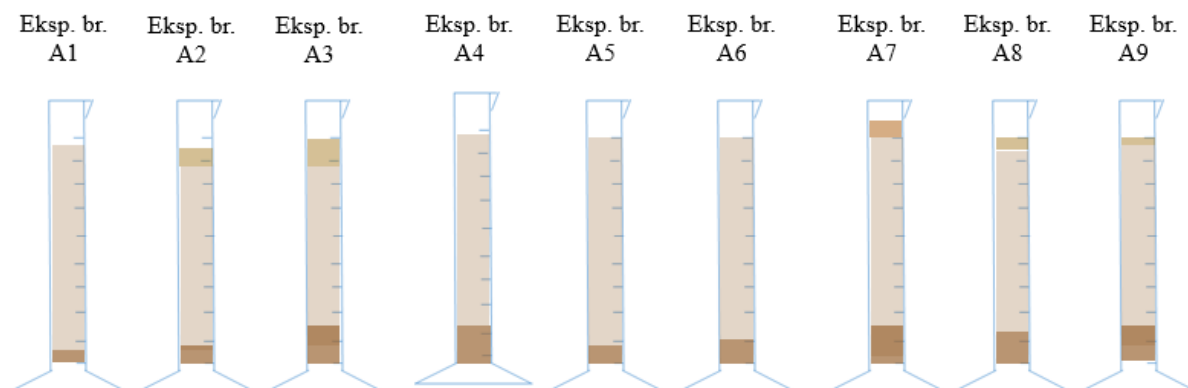


Slika 4.16. Analiza rezultata testa taloženja nakon procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Al pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita



Slika 4.17. Analiza rezultata testa taloženja nakon procesa EKZ koji su provedeni na elektrodama od Zn pri različitim pH vrijednostima, uz dodatak elektrolita i zeolita

Kod svih eksperimenata je uočeno jako dobro odvajanje taloga od tekuće faze. Praćenje promjene visine stupca u menzuri prikazano je na Slici 4.18.

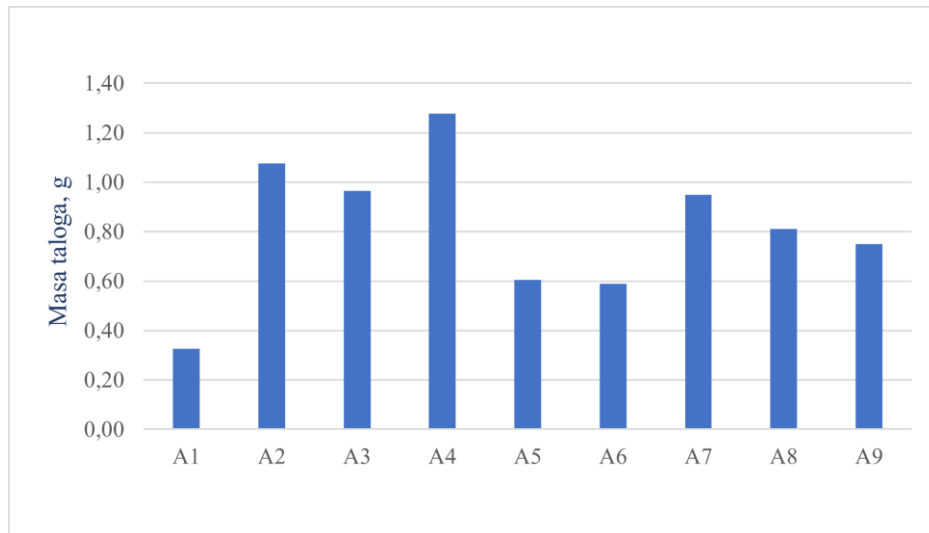


Slika 4.18. Praćenje promjene visine stupca u menzuri nakon procesa EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

Kod eksperimenata sa Al elektrodama (A4, A5 i A6) i kod eksperimenta A1 sa Fe elektrodom (pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L) nije došlo do izvajanja floata na vrhu, kao

kod ostalih eksperimenata. Najbrže taloženje uočeno je kod eksperimenta A6 sa Al elektrodom (pH=8, 0,5 g/L NaCl, 20 PZ g/L).

Na Slici 4.19. prikazani su rezultati mase taloga koji su dobiveni filtracijom nakon procesa EKZ.

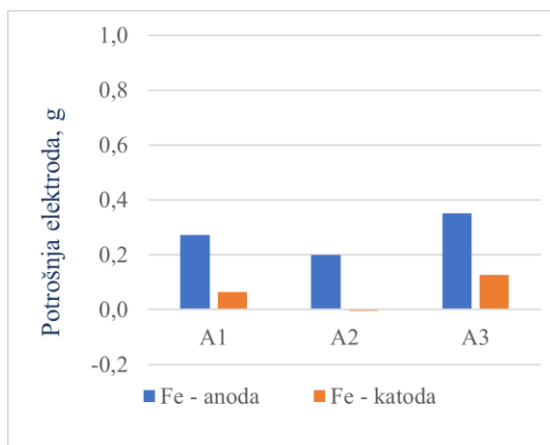


Slika 4.19. Grafički prikaz mase taloga nakon procesa EKZ (Napomena: oznake A1 do A9 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

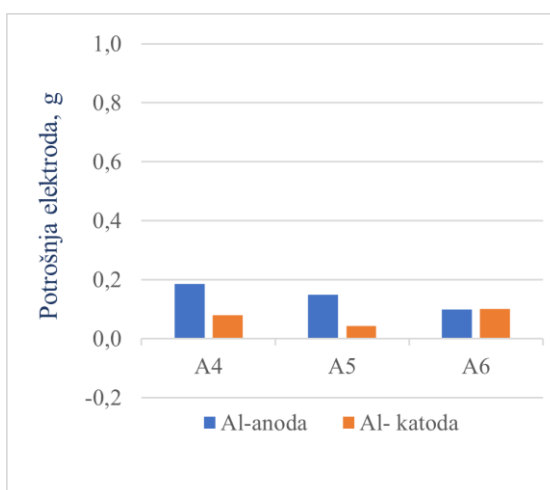
Mase taloga osciliraju u rasponu od 0,8145 g/L do 3,1940 g/L. Najveće su u eksperimentima A2 i A4, gdje iznose 2,6918 g/L i 3,1940 g/L, a najmanje u eksperimentima A1, A5 i A6 gdje iznose 0,8149 g/L, 1,5108 g/L te 1,4698 g/L.

4.4. Analiza rezultata mase elektroda

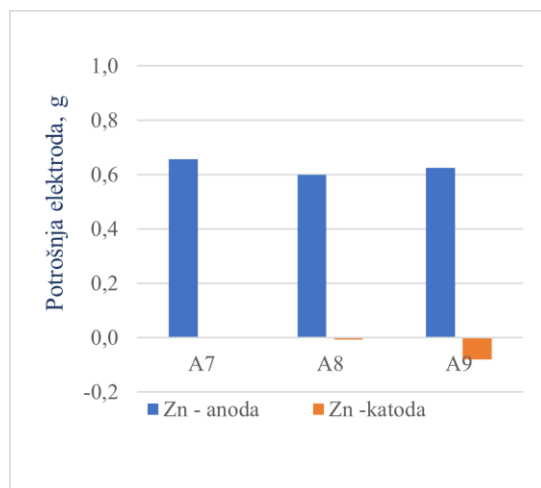
U Tablici 3.10. i 3.11. prikazani su rezultati potrošnje elektroda tijekom procesa elektrokoagulacije. Grafički prikaz promjene mase elektroda prikazan je na Slikama 4.20., 4.21., i 4.22.



Slika 4.20. Grafički prikaz promjene mase Fe- elektroda (Napomena: oznake od A1 do A3 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)



Slika 4.21. Grafički prikaz promjene mase Al- elektroda (Napomena: oznake od A4 do A6 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

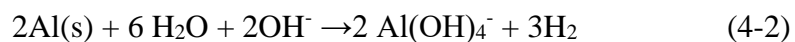


Slika 4.22. Grafički prikaz promjene mase Zn-elektroda (Napomena: oznake od A7 do A9 označavaju broj eksperimenta čiji uvjeti provedbe su napisani u Tablici 2.2.)

Rezultati na Slici 4.20. pokazuju potrošnju na elektrodama od Fe, gdje je najveća potrošnja anode kod eksperimenta A3 (pH=8, 1,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L). Međutim uočena je potrošnja katode kod eksperimenata A1 (pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L) i A3, dok je u eksperimentu A2 (pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L) došlo do porasta mase katode uslijed stvaranja korozivnih produkata na površini elektroda koji se nisu mogli u potpunosti ukloniti uz obradu u deioniziranoj vodi.

Na slici 4.21. prikazani su rezultati potrošnje mase Al elektroda. Uočeno je da dolazi do potrošnje na anodama i katodama, ali su potrošnje kod Al-katode manje nego kod Fe i Zn.

Uzrok smanjenja mase katoda opisana je reakcijom:[26]



Na slici 4.22. prikazani su rezultati potrošnje mase Zn elektroda. Rezultati pokazuju izrazito visoku potrošnju anode koja je vidljiva kod eksperimenta A7 (pH=4, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L), a kod eksperimenata A8 (pH= 6, 0,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L) i A9 (pH=8,1 g/L NaCl, 15 PZ g/L) uočen je porast mase katode zbog stvaranja korozivnih produkata.

4.5. Analiza operativnih troškova

Operativni troškovi obuhvaćaju sve troškove koji su nastali tijekom procesa, što uključuje nabavu materijala, koji su se koristili prije, tijekom i nakon procesa. Za proces EKZ, troškovi se sastoje od: utroška materijala elektroda, potrošnje električne energije i zeolita kao i zbrinjavanje otpadnog mulja.[23]

Operativni troškovi za uzorke sa dodatkom zeolita računaju se prema izrazu:

$$\text{Operativni troškovi} = C_{\text{energija}} + C_{\text{elektroda}} + C_{\text{zeolit}} \quad (4-3)$$

Utrošak mase elektroda računa se prema Faradayevom izrazu:

$$C_{\text{elektroda}} = \frac{I \cdot t \cdot Mw}{z \cdot F \cdot V} \quad (4-4)$$

Utrošak električne energije računa se prema izrazu:

$$C_{\text{energija}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{V} \quad (4-5)$$

U izračun operativnih troškova nisu uključeni troškovi potrošnje elektrolita.

Tablica 4.2. Oznake, jedinice i vrijednosti korištene u proračunu

Oznaka	Jedinica	Iznos
Mw	g/mol	Fe=55,845 Al=26,989 Zn= 65,39
Z		Fe=2 Al=3 Zn=2
F	c/mol	96 487
T	S	1800
V	m ³	0,0004

U Tablici 4.3. prikazana je usporedba potrošnje energije i elektroda izračunate preko Faradayevog zakona i smanjenja mase elektroda.

Tablica 4.3. Usporedba potrošnje elektroda i energije

Eksp. br.	Opis eksperimenta	U, V	I, A	Izračun preko Faradayevog zakona		Izračun preko smanjenja mase elektroda			C _{zeolit} kg/m ³
				C _{energija} , kWh/m ³	C _{elektroda} , kg/m ³	C _{anoda} kg/m ³	C _{katoda} kg/m ³	C _{anoda+katoda} kg/m ³	
A1	EKZ-Fe, pH=4, 0,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	39,00	0,38	18,62	0,50	0,68	0,16	0,84	15
A2	EKZ-Fe, pH=6, 1g/L NaCl, 20 PZ g/L	15,88	0,38	7,57	0,50	0,50	-0,009	0,49	20
A3	EKZ-Fe, pH=8, 1,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	12,39	0,38	5,92	0,50	0,87	0,32	1,19	25
A4	EKZ-Al, pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L	25,70	0,91	29,23	0,38	0,46	0,20	0,66	25
A5	EKZ-Al, pH=6, 1,5g/L NaCl, 15 PZ g/L	17,25	0,75	16,16	0,31	0,37	0,11	0,47	15
A6	EKZ-Al, pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	48,00	0,70	42,00	0,29	0,24	0,25	0,49	20
A7	EKZ-Zn, pH=4, 1,5g/L NaCl, 20 PZ g/L	20,37	1,00	25,46	1,52	1,64	0,001	1,64	20
A8	EKZ-Zn, pH=6, 0,5g/L NaCl, 25 PZ g/L	39,08	1,00	48,85	1,52	1,49	-0,02	1,47	25
A9	EKZ-Zn, pH=8,1 g/L NaCl, 15 PZ g/L	24,66	1,00	30,82	1,52	1,56	-0,20	1,36	15

Iz rezultata prikazanih u Tablici 4.3. uočava se da je za odvijanje procesa i postizanja odgovarajuće vrijednosti struje morao biti primijenjen najveći napon u eksperimentu A6 ($U = 48,00 \text{ V}$) dok je najmanji napon zabilježen u eksperimentu A3 ($U = 12,39 \text{ V}$). Uz dodatak veće količine elektrolita, napon se smanjuje zbog povećanja vodljivosti otopine.

Utrošak električne energije najmanji je kod eksperimenta A2 sa Fe elektrodom (pH=6, dodatak 1 g/L elektrolita NaCl, 20 g/L PZ), gdje iznosi $7,57 \text{ kWh/m}^3$ i kod eksperimenta A3 sa Fe elektrodom (pH=8, 1,5 g/L NaCl, 25 g/L PZ), gdje iznosi $5,92 \text{ kWh/m}^3$. Najveći utrošak električne energije je kod eksperimenta A6 sa Al elektrodom (pH=8, 0,5 g/L NaCl te 20 g/L PZ), gdje iznosi $42,00 \text{ kWh/m}^3$ i kod eksperimenta A8 sa Zn elektrodom (pH=6, 0,5 g/L NaCl, 25 g/L PZ), gdje iznosi $48,85 \text{ kWh/m}^3$. Utrošak mase elektroda izračunate preko Faradayevog zakona je jednaka za sve eksperimente sa Fe elektrodama zbog istog utroška struje te iznosi $0,50 \text{ kg/m}^3$. Isto vrijedi i za eksperimente sa Zn elektrodom gdje utrošak mase elektroda izračunate preko Faradayevog zakona iznosi $1,52 \text{ kg/m}^3$. Najveće vrijednosti potrošnje elektroda dobivene su sa Zn elektrodama u svim eksperimentalnim uvjetima, a najmanje kod eksperimenata sa Al elektrodama. Kod EKZ procesa dodatak elektrolita također će predstavljati izvjesni trošak no treba imati na umu da se korišteni zeolit može regenerirati i ponovno koristiti.

5. ZAKLJUČAK

- Eksperimenti su provedeni na uzorcima kompostne procjedne vode opterećene raznim organskim i anorganskim štetnim tvarima. pH vrijednost iznosi 5,80, električna vodljivost 594 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mutnoća 167 NTU, kemijska potrošnja kisika (KPK) 576,92 mg O_2/L te ukupni isparni ostatak (TS) u iznosu od 1070 mg/L. Usporedbom dobivenih vrijednosti sa MDK vrijednostima propisanih Pravilnikom takva voda nije podobna za ispuštanje u površinske vode ni u sustav javne odvodnje.
- Tijekom provedbe procesa elektrokoagulacije i prirodnog zeolita dolazi do naglog porasta pH vrijednosti. Dodatak zeolita utječe na početni pH otopine, porast je veći što je početni pH otopine niži. Dodatak elektrolita nema značajan utjecaj. Najveći porast pH je kod eksperimenata sa Zn elektrodama, a najmanji sa Al elektrodama gdje su te vrijednosti (6,01-9,17) unutar graničnih vrijednosti MDK propisanih Pravilnikom.
- Dodatak elektrolita utječe na početnu vrijednost električne vodljivosti. Tijekom provedbe svih eksperimenata uočava se blagi pad električne vodljivosti. Taj pad se prepisuje vezanju štetnih tvari na flokule koje nastaju procesom elektrokoagulacije. Konačne vrijednosti električne vodljivosti nakon procesa EKZ su visoke te takva voda može djelovati korozivno na kanalizacijski sustav.
- Porast temperature je vidljiv za sve eksperimente tijekom procesa EKZ. Veliki porast bilježe eksperimenti sa Al elektrodom (41,3 °C) i Zn elektrodom (41,7 °C). Porast temperature otopine povezuje se s potrošnjom elektroda. Veći porast temperature uočen je kod eksperimenata s manjom električnom vodljivošću, odnosno s manjim dodatkom NaCl, a to utječe na veći otpor prolazu struje i porastu zagrijavanja otopine. Ispuštanjem vode s povišenom temperaturom može dovesti do termalnog onečišćenja.
- Nakon procesa EKZ dolazi do značajnog smanjenja kemijske potrošnje kisika KPK. Najveća efikasnost uklanjanja postignuta je u eksperimentu A4 sa Al elektrodom (pH=4, 1g/L NaCl, 25 PZ g/L) gdje iznosi 94,25%, a najmanja u

eksperimentu A3 sa Fe elektrodom (pH=8, 1,5 g/L NaCl, 25 PZ g/L) gdje iznosi 85,94%.

- Efikasnost uklanjanja mutnoće nakon procesa EKZ u eksperimentima sa Al elektrodom doseže i do 99,86%. Veći dodatak elektrolita dovodi do povećanja isparnog ostatka, a dodani zeolit ima sposobnost vezanja na sebe dio onečišćenja što utječe na krajnje rezultate.
- Kod svih eksperimenata uočeno je dobro odvajanje taloga od tekuće faze. Međutim, tijekom taloženja u eksperimentu A1 sa Fe elektrodom (pH=4, 0,5 g/L NaCl, 15 PZ g/L) i svim eksperimentima sa Al elektrodama nije došlo do stvaranja floata na vrhu otopine kao kod ostalih eksperimenata. Najbrže taloženje je postignuto u eksperimentu A6 sa Al elektrodom (pH=8, 0,5g/L NaCl, 20 PZ g/L).
- Najveća potrošnja anoda je kod eksperimenata sa elektrodama od Zn, zatim kod eksperimenata s elektrodama od Fe, a najmanja sa elektrodama od Al. Masa katode je kod nekih eksperimenata porasla, a kod nekih se smanjila. Kod eksperimenata sa Al elektrodom dolazi do potrošnje katoda, dok se kod ostalih elektroda (Fe i Zn) uočava i potrošnja i porast ovisno o eksperimentalnim uvjetima.
- Utrošak električne energije nakon procesa EKZ najmanji je za eksperimente sa Fe elektrodama u svim eksperimentalnim uvjetima, a najveći u eksperimentu A6 sa Al elektrodama (pH=8, g/L NaCl, 25 PZ g/L). Utrošak mase elektroda izračunate preko Faradayevog zakona je jednaka za sve eksperimente sa Fe elektrodama i Zn elektrodama zbog istog iznosa struje te iznosi $0,5 \text{ kg/m}^3$, odnosno $1,52 \text{ kg/m}^3$.
- Elektrokoagulacija uz dodatak zeolita s Al, Fe i Zn elektrodama može se učinkovito koristiti za obradu kompostne procjedne vode. Najveće uklanjanje mutnoće, najbolja sposobnost taloženja, najmanja potrošnja elektroda postignuta

je u eksperimentima sa Al elektrodama, dok je potrošnja struje najmanja sa Fe elektrodama. Dodatak prirodnog zeolita utječe na troškove procesa, međutim oni se mogu regenerirati i ponovno koristiti. Nadalje, operativni troškovi EKZ procesa ovisit će o tržišnoj cijeni svakog metala. Cijena metala je nedavno drastično porasla, što će negativno utjecati na ukupne oprativne troškove procesa EKZ. Stoga se preporučuje korištenje otpadnih metalnih materijala kao elektroda tijekom procesa EKZ.

6. LITERATURA

1. Mayer D., *Voda od nastanka do upotrebe*, Prosvjeta, Zagreb, 2004.
2. Briški F., *Zaštita okoliša*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Element, Zagreb, 2016.
3. <http://www.energetika-net.com/specijali/nove-tehnologije/hibridni-energetski-sustavi-buducnost-energetike-27985>, 22.08.2022.
4. Tee P.F., Abdullah M.O., Tan I.A.W., Abdul Rashid N.K., Mohamed Amin M.A., Nolasco-Hipolito C., Bujang K., *Review on hybrid energy systems for wastewater treatment and bio-energy production. Membrane bioreactors for wastewater treatment and reuse: a success story*. *Water Sci Technol* 47 (2003) 1–5.
5. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D., *Wastewater engineering treatment and reuse*; Metcalf and Eddy. 4th ed.. New York: McGraw-Hill; 2003.
6. Weld RJ, Singh R. *Functional stability of a hybrid anaerobic digester/microbial fuel cell system treating municipal wastewater*. *Bioresour Technol* 102 (2) (2011) 842-847.
7. Davies W.J., Le M.S., Heath C.R. *Intensified activated sludge process with submerged membrane microfiltration*, *Water Sci Technol* 38 (4–5) (1998) 421–8.
8. Adin A., Asano T., *The role of physical–chemical treatment in wastewater reclamation and reuse*, *Water Sci Technol* 37(10) (1998)79–90.
9. Li W., Krantz W.B., Cornelissen E.R., Post J.W., Verliefde A.R., Tang C.Y., *A novel hybrid process of reverse electrodialysis and reverse osmosis for low energy seawater desalination and brine management*, *Appl Energy* 104 (2013)592–602.
10. Martins R.C., Rossi A.F., Quinta-Ferreira R.M. *Fenton's oxidation process for phenolic wastewater remediation and biodegradability enhancement*. *J Hazard Mater* 2010;180(1):716–21.
11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.00643/full>
22.8.2022.
12. Tian J.Y., Chen Z.L., Nan J., Liang H., Li G.B., *Integrative membrane coagulation adsorption bioreactor (MCABR) for enhanced organic matter removal in drinking water treatment*. *J Membr Sci* 352(1) (2010) 205–12.

13. De Nardi I.R., Del Nery V., Amorim A.K.B., dos Santos N.G., Chimenes F., *Performances of SBR, chemical-DAF and UV disinfection for poultry slaughterhouse wastewater reclamation*, *Desalination* 269(1) (2011) 184–189.
14. Leyva-Díaz J.C., Calderón K., Rodríguez F.A., González-López J., Hontoria E., Poyatos J.M., *Comparative kinetic study between moving bed biofilm reactor membrane bioreactor and membrane bioreactor systems and their influence on organic matter and nutrients removal*, *Biochem Eng J* 77 (2013) 28–40.
15. Abdullah M.O., *A multi-purpose mini hybrid fuel cell-battery-solar portable device for rural applications: laboratory testing*. *International journal of recent research and applied studies- JRRAS* 7 (4) (2011) 390-402.
16. Balamane-Zizi O., Ait-Amara H., *Study of the simultaneous elimination of phosphates and heavy metals contained in dairy wastewater by a physical-chemical and biological mixed process; consequences on the biodegradability*, *Energy Procedia* 18 (2010) 1341–60.
17. Rakhmania, Kamyab H., Yuzir M.A., Abdullah N., Quan L.M., Riyadi F.A., Marzouki R., *Recent Applications of the Electrocoagulation Process on Agro-Based Industrial Wastewater: A Review*, *Sustainability*, 14 (1985) (2022) 4-19.
18. Dura A., *Electrocoagulation for water treatment: the removal of pollutants using aluminium alloys, stainless steels and iron anodes*. PhD thesis, National University of Ireland Maynooth, 2013.
19. Krol M., *Natural vs. Synthetic zeolites*, *Crystals* 10 (622) (2020) 1-8.
20. Misaelides, P. *Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review*, *Microporous and Mesoporous Materials*, 144 (1–3) (2011) 15-18.
21. Kallo D., *Application of natural zeolites in water and wastewater treatment*, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 45 (1) (2001) 519-550.
22. Eaton A.D., Clesceri L.S., Rice E.W., Greenberg A.E.; Franson M.A.H.; (Eds.). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21st ed.; American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF): Washington, DC, USA, 2005.
23. Vukojević Medvidović N., *Lead removal on natural zeolite clinoptilolite-column process modelling*, *Doctoral theses*, Faculty of Chemistry and Tehnology in Split, Split 2007.

24. Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda NN 26/20, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_26_622.html (22.8.2022.)
25. Mouedhena M., Feki M., Ayedi H.F., *Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process*, Journal of Hazardous Materials 150 (2008) 124–135.
26. Linares-Hernandez I., Barrera-Díaz C., Roa-Morales G., Bilyeu B., Ureña-Núñez F., *Influence of the anodic material on electrocoagulation performance*, Chem. Eng. J. 148(1) (2009) 97-105.