

Analiza utjecaja udaljenosti elektroda i dodatka elektrolita na učinkovitost obrade procjedne vode iz procesa kompostiranja primjenom integrirane elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu

Stojanović, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:415863>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**ANALIZA UTJECAJA UDALJENOSTI ELEKTRODA I DODATKA
ELEKTROLITA NA UČINKOVITOST OBRADNE PROCJEDNE VODE
IZ PROCESA KOMPOSTIRANJA PRIMJENOM INTEGRIRANE
ELEKTROKOAGULACIJE I OBRADNE NA PRIRODNOM ZEOLITU**

DIPLOMSKI RAD

MARIJA STOJANOVIĆ

Matični broj: 306

Split, studeni 2021.

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

**ANALIZA UTJECAJA UDALJENOSTI ELEKTRODA I DODATKA
ELEKTROLITA NA UČINKOVITOST OBRADNE PROCJEDNE VODE
IZ PROCESA KOMPOSTIRANJA PRIMJENOM INTEGRIRANE
ELEKTROKOAGULACIJE I OBRADNE NA PRIRODNOM ZEOLITU**

DIPLOMSKI RAD

MARIJA STOJANOVIĆ

Matični broj: 306

Split, studeni 2021.

**UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
GRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
ENVIRONMENTAL PROTECTION**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ELECTRODE DISTANCE AND
ELECTROLYTE ADDITION ON THE EFFICIENCY OF
TREATMENT OF LEACHATE FROM COMPOSTING PROCESSES
USING INTEGRATED ELECTROCOAGULATION PROCESS AND
TREATMENT ON NATURAL ZEOLITE**

DIPLOMA THEISIS

MARIJA STOJANOVIĆ

Parent number: 306

Split, November 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Sveučilišni diplomski studij kemijske tehnologije: Zaštita okoliša

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada: je prihvaćena na 6. elektronskoj sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta održanoj 15. i 16. prosinca 2020. godine.

Mentor: prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović

ANALIZA UTJECAJA UDALJENOSTI ELEKTRODA I DODATKA ELEKTROLITA NA UČINKOVITOST OBRADNE PROCJEDNE VODE IZ PROCESA KOMPOSTIRANJA PRIMJENOM INTEGRIRANOG PROCESA ELEKTROKOAGULACIJE I OBRADNE NA PRIRODNOM ZEOLITU

Marija Stojanović, 306

Sažetak: U procesu kompostiranja osim komposta nastaju i znatne količine procjedne otpadne vode opterećene organskim i anorganskim štetnim tvarima te mikroorganizmima. Upravo iz ovih razloga postoji potreba za pročišćavanjem otpadnih procjednih voda iz procesa kompostiranja prije njihovog ispuštanja u prirodni recipijent. U ovom radu provedena su ispitivanja učinka procesa elektrokoagulacije pri različitim udaljenostima elektroda, s i bez dodatka zeolita i elektrolita na efikasnost pročišćavanja simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja. Tijekom eksperimenta pratila se promjena pH vrijednosti, temperature i električne vodljivosti. Na početku i kraju eksperimenta određivani su: pH vrijednost, električna vodljivost, temperatura, mutnoća, ukupni isparni ostatak, kemijska potrošnja kisika (KPK), dušik po Kjeldahlu te brzina taloženja suspenzije. Rezultati pokazuju da udaljenost elektroda, dodatak elektrolita i zeolita značajno utječu na pokazatelje kvalitete, brzinu taloženja, potrošnju elektroda i masu nastalog taloga. Provedena je analiza operativnih troškova procesa koristeći prikupljene podatke o utrošku masa elektroda za proces elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita.

Ključne riječi: kompostiranje, simulirana procjedna voda, elektrokoagulacija, zeolit, operativni troškovi

Rad sadrži: 86 stranica, 36 slika, 20 tablica, 32 literaturne reference

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović
2. Prof. dr. sc. Sandra Svilović
3. Prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović

Datum obrane:

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

BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

University of Split

Faculty of Chemistry and Technology Split

Graduate study of 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, electronic session no. 6 (December 15th and 16th 2019)

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ELECTRODE DISTANCE AND ELECTROLYTE ADDITION ON THE EFFICIENCY OF TREATMENT OF LEACHATE FROM COMPOSTING PROCESSES USING INTEGRATED ELECTROCOAGULATION PROCESS AND TREATMENT ON NATURAL ZEOLITE

Marija Stojanović, 306

Abstract: During composting process, in addition to compost production, a large amounts of leachate, containing high concentrations of organic and inorganic harmful substances and microorganisms, are also generated. For that reason there is a need to treat leachate from the composting process before releasing it into the natural recipient. In this paper, analysis of efficiency of the electrocoagulation process at different distances of electrodes, with and without the addition of zeolite and electrolyte, on simulated leachate from the composting process has been carried out. During the experiment, a change in pH, temperature and electrical conductivity was monitored. At the beginning and end of the experiment: pH value, electrical conductivity, temperature, turbidity, chemical oxygen demand (COD), total Kjeldahl nitrogen (TKN) and settling test of suspension were determined. The results show that the distance of electrodes, the addition of electrolytes and zeolites significantly affect quality indicators, settling rate, electrode consumption and precipitate mass. An analysis of the operational costs of the process was carried out using the collected data on the consumption of electrode masses for the electrocoagulation process with and without the addition of zeolites.

Keywords: composting, simulated leachate, electrocoagulation, zeolite, operating costs

Thesis contains: 86 pages, 36 figures, 20 tables, 32 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:

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

Ovaj diplomski 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 strpljenju i pruženoj pomoći pri osmišljavanju i izradi ovog Diplomskog rada.

Veliko hvala prof. dr. sc. Ladislavu Vrsalović na pomoći pri provođenju eksperimentalnog dijela ovog rada.

Posebna zahvala mojoj kolegici Anđeli koja mi je svojom podrškom i razumijevanjem uvelike olakšala studiranje.

Naposljetku od srca zahvaljujem svojim roditeljima kojima posvećujem ovaj rad. Hvala vam što ste mi omogućili ove studentske dane koji će mi zauvijek ostati u lijepom sjećanju.

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

1. Priprema uzorka simulirane procjedne otpadne vode iz procesa kompostiranja i određivanje njegovih karakteristika.
2. Provesti postupak elektrokoagulacije pri različitim udaljenostima elektroda, s i bez dodatka zeolita i elektrolita. Odrediti učinkovitost postupka elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita preko pokazatelja: pH vrijednosti, električne vodljivosti, mutnoće, kemijske potrošnje kisika (KPK) i dušika po Kjeldahlu te izvesti zaključke.
3. Odrediti brzine taloženja i mase taloga za uzorke nakon provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu.
4. Ispitati utrošak aluminijskih elektroda tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu te izvesti zaključke o isplativosti navedenog procesa.

SAŽETAK

U procesu kompostiranja osim komposta nastaju i znatne količine procjedne otpadne vode opterećene organskim i anorganskim štetnim tvarima te mikroorganizmima. Upravo iz ovih razloga postoji potreba za pročišćavanjem otpadnih procjednih voda iz procesa kompostiranja prije njihovog ispuštanja u prirodni recipijent. U ovom radu provedena su ispitivanja učinka procesa elektrokoagulacije pri različitim udaljenostima elektroda, s i bez dodatka zeolita i elektrolita na efikasnost pročišćavanja simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja. Tijekom eksperimenta pratila se promjena pH vrijednosti, temperature i električne vodljivosti. Na početku i kraju eksperimenta određivani su: pH vrijednost, električna vodljivost, temperatura, mutnoća, ukupni isparni ostatak, kemijska potrošnja kisika (KPK), dušik po Kjeldahlu te brzina taloženja suspenzije. Rezultati pokazuju da udaljenost elektroda, dodatak elektrolita i zeolita značajno utječu na pokazatelje kvalitete, brzinu taloženja, potrošnju elektroda i masu nastalog taloga. Provedena je analiza operativnih troškova procesa koristeći prikupljene podatke o utrošku masa elektroda za proces elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita.

SUMMARY

During composting process, in addition to compost production, a large amounts of leachate, containing high concentrations of organic and inorganic harmful substances and microorganisms, are also generated. For that reason there is a need to treat leachate from the composting process before releasing it into the natural recipient. In this paper, analysis of efficiency of the electrocoagulation process at different distances of electrodes, with and without the addition of zeolite and electrolyte, on simulated leachate from the composting process has been carried out. During the experiment, a change in pH, temperature and electrical conductivity was monitored. At the beginning and end of the experiment: pH value, electrical conductivity, temperature, turbidity, chemical oxygen demand (COD), total Kjeldahl nitrogen (TKN) and settling test of suspension were determined. The results show that the distance of electrodes, the addition of electrolytes and zeolites significantly affect quality indicators, settling rate, electrode consumption and precipitate mass. An analysis of the operational costs of the process was carried out using the collected data on the consumption of electrode masses for the electrocoagulation process with and without the addition of zeolites.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| UVOD | 1 |
| 1. OPĆI DIO | 2 |
| 1.1. Procjedne vode od kompostiranja biootpada | 3 |
| 1.1.1. Sastav procjednih otpadnih voda iz procesa kompostiranja | 4 |
| 1.1.2. Pregled metoda obrade procjednih voda | 10 |
| 1.2. Elektrokoagulacija | 14 |
| 1.2.1. Izvedbe procesa elektrokoagulacije | 17 |
| 1.3. Zeoliti | 18 |
| 2. EKSPERIMENTALNI DIO | 21 |
| 2.1. Karakteristike uzorka komposta | 22 |
| 2.2. Priprema simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja | 23 |
| 2.3. Obrada otpadne vode integriranim procesom elektrokoagulacije i obrade na zeolitu | 23 |
| 2.4. Parametri koji su praćeni prije tijekom i nakon provedbe procesa | 26 |
| 2.4.1. Određivanje pH vrijednosti | 26 |
| 2.4.2. Određivanje električne vodljivost | 27 |
| 2.4.3. Određivanje temperature | 28 |
| 2.4.4. Određivanje kemijske potrošnje kisika (KPK) | 28 |
| 2.4.5. Određivanje dušika po Kjeldahlu | 31 |
| 2.4.6. Određivanje mutnoće | 33 |
| 2.4.7. Određivanje ukupnog isparnog ostatka | 34 |
| 2.5. Određivanje brzine taloženja suspenzije i masa taloga | 34 |
| 3. REZULTATI | 36 |
| 3.1. Rezultati karakterizacije uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada | 37 |
| 3.2. Rezultati parametara praćenih prije tijekom i nakon provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu | 38 |
| 3.2.1. pH vrijednost | 38 |
| 3.2.2. Električna vodljivost | 39 |
| 3.2.3. Temperatura | 39 |
| 3.2.4. Kemijska potrošnja kisika | 40 |
| 3.2.5. Dušik po Kjeldahlu | 41 |
| 3.2.6. Mutnoća | 42 |

| | |
|---|----|
| 3.2.7. Ukupni isparni ostatak..... | 42 |
| 3.3. Brzina taloženja suspenzije i masa taloga | 43 |
| 3.4. Mase elektroda..... | 44 |
| 4. RASPRAVA..... | 46 |
| 4.1. Analiza rezultata karakterizacije uzorka procjedne vode iz kompostiranja biootpada..... | 47 |
| 4.2. Analiza rezultata parametara praćenih prije tijekom i nakon provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu | 48 |
| 4.2.1. Analiza rezultata pH vrijednosti | 48 |
| 4.2.2. Analiza rezultata električne vodljivosti | 50 |
| 4.2.3. Analiza rezultata temperature | 51 |
| 4.2.4. Analiza rezultata kemijske potrošnje kisika (KPK)..... | 53 |
| 4.2.5. Analiza rezultata dušika po Kjeldahlu (TKN) za početni uzorak i uzorke nakon provedbe procesa | 55 |
| 4.2.6. Analiza rezultata mutnoće | 57 |
| 4.2.7. Analiza rezultata ukupnog isparnog ostatka | 58 |
| 4.3. Analiza brzine taloženja suspenzije i mase taloga..... | 59 |
| 4.4. Analiza rezultata masa elektroda | 61 |
| 4.5. Analiza operativnih troškova | 63 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 67 |
| 6. LITERATURA | 70 |

UVOD

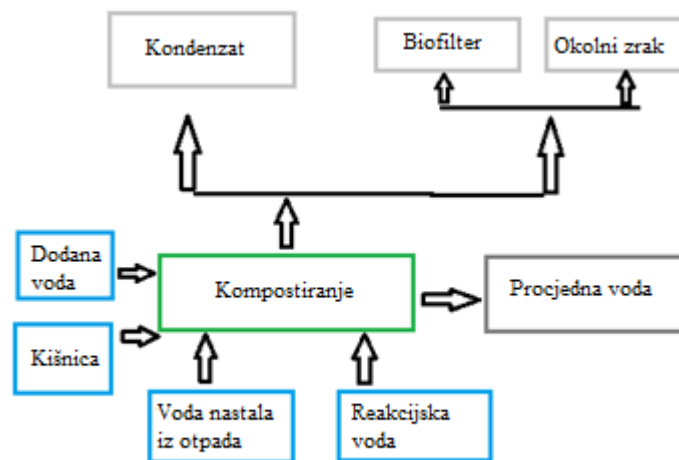
U 2015. godini oporabljeno je tek 18 % komunalnog otpada od čega na kompostiranje i anaerobnu digestiju otpada tek 2 %. [1] Informiranjem javnosti o prednostima procesa kompostiranja dolazi do laganog rasta udjela otpada koji se kompostira. Kompostiranje je proces kontrolirane aerobne biološke razgradnje organske tvari do stabilnog produkta koji se može upotrijebiti u korisne svrhe. [2] Proces kompostiranja je u svojoj osnovi sličan procesu spontane razgradnje biorazgradive tvari. Razlika između dva navedena procesa je u kontroli parametara za vrijeme procesa kompostiranja što dovodi do dobivanja produkta visoke kvalitete. Uz kompost u procesu nastaju određene količine otpadnih voda koje sadržavaju organske i anorganske štetne tvari te mikroorganizme. Takve otpadne vode ne mogu se ispuštati u prirodni vodotok bez prethodne obrade. Neki od procesa biološke ili fizikalno - kemijske obrade koji se koriste su: anaerobna obrada, aerobna obrada, fenton procesi, koagulacija itd. Zbog složenosti sastava procjednih voda pojedinačni fizikalni, kemijski i/ili biološki procesi obrade često ne postižu dovoljan efekt pročišćavanja. Upravo iz ovog razloga razvijaju su integrirani kombinirani ili hibridni procesi. Ovi procesi se sastoje od dva ili više pojedinačnih fizikalnih, kemijskih ili bioloških procesa koji se mogu provoditi istovremeno ili slijediti jedan za drugim. Primjer takvog procesa je i elektrokagulacija uz obradu na prirodnom zeolitu. Elektrokagulacija je proces destabiliziranja suspenzije, emulzije ili otopljenih onečišćenja, u vodenom mediju, uvođenjem električnog napona u taj medij. [3] Istovremeno s procesom elektrokagulacije se provodi obrada na prirodnom zeolitu. Zeoliti se mogu opisati kao alumosilikati specifične prostorne strukture koji imaju svojstva ionske izmjene, adsorpcije te molekulskih sita. [4] U ovom radu ispitat će se učinkovitost obrade procjedne vode iz procesa kompostiranja biootpada primjenom integriranog procesa elektrokagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita.

1. OPĆI DIO

1.1. Procjedne vode od kompostiranja biootpada

Kompostiranje je proces kontrolirane aerobne biološke razgradnje organske tvari do stabilnog produkta, sličnog humusu, koji se naziva kompost.[2] Za razliku od prirodne razgradnje biorazgradive tvari kompostiranje je kontroliran proces u kojem je potrebno pratiti i podešavati različite fizikalne i mikrobiološke parametre. Neki od tih parametara su: protok zraka, pH vrijednost, vrsta mikroorganizama, C:N omjer, veličina čestica i vlaga. Optimizacijom ovih parametara proces razgradnje biorazgradive tvari se odvija u kraćem vremenskom intervalu uz dobivanje proizvoda boljih svojstava. U ovom tehnološkom procesu se stabilizira organski otpad dok u isto vrijeme nastaju velike količine, vrlo onečišćene, procjedne otpadne vode koja predstavlja rizik za okoliš.[5]

Prisutnost vode je jedan od ključnih faktora koji omogućavaju provedbu procesa kompostiranja. Ona je osnovna komponenta koja je zaslužna za preživljavanje i kretanje mikroorganizama, transport tvari i nutrijenata te služi kao medij u kojem se provode kemijske reakcije.[2] Voda koja ulazi u proces kompostiranja sadrži: vodu od samog otpada, reakcijsku vodu koja nastaje procesom kompostiranja, kišnicu (otvoreni sustavi) i vodu koja se dodaje u svrhu optimizacije vlage unutar procesa.[6]



Slika 1.1 Shematski prikaz bilance vode tijekom procesa kompostiranja

Vode koje ulaze u proces kompostiranja kao i vode koje nastaju tijekom procesa, pod utjecajem gravitacije, prolaze kroz reakcijsku masu i gibaju se prema njenom dnu. Ukoliko je količina vode unutar mase veća od količine vode koju masa može zadržati dolazi do pojave procjeđivanja. Količina otpadne vode koja dolazi od samog otpada ovisi o vrsti otpada, a procesom kompostiranja nastaje približno 100 L otpadne vode/t otpada. [7] Procjedna voda nastaje tijekom procesa kompostiranja, prije nego dođe do stabilizacije biorazgradive tvari, zbog čega sadržava organske i anorganske štetne tvari i mikroorganizme. [8] Osim procjedne vode, nakon procesa kompostiranja može se dobiti visokovrijedna i hranjiva tekućina koja se naziva kompostni čaj. Kompostni čaj se dobiva kuhanjem stabiliziranog komposta, uz prisustvo katalizatora, u vodi, uz dodatak hrane za prisutne mikroorganizme. [8] Smjesa se aktivno aerira kako bi se omogućila potrebna količina kisika za održavanje procesa aerobnim. Kompostni čaj povećava mikrobiološku aktivnost u tlu tako što u tlo unosi bakterije, gljive, aktinomicete i protozoe što poboljšava uvjete za rast i razvoj biljaka.

1.1.1. Sastav procjednih otpadnih voda iz procesa kompostiranja

Budući da voda u procesu kompostiranja prolazi kroz biorazgradivu organsku tvar, koja se od složenih organskih molekula razgrađuje na jednostavne, dolazi do značajnog povećanja koncentracije organske tvari, a uz to i drugih toksičnih tvari poput teških metala unutar procjedne vode. Sastav procjednih voda ovisi i o načinu kompostiranja tj. o tome provodi li se kompostiranje u otvorenim sustavima, zatvorenim sustavima ili tunelima. Zatvoreni sustavi u kojima se provodi kompostiranje zaštićeni su od vanjskih utjecaja i dopuštaju jednostavnu kontrolu procesnih parametara. Za razliku od zatvorenih sustava otvoreni sustavi su podložni utjecaju atmosferilija te je kontrola i održavanje osnovnih parametara procesa otežana. Postizanje aerobnih uvjeta je osnova procesa kompostiranja. Kod zatvorenih sustava aerobni uvjeti su konstantni, a postižu se propuhivanjem i mehaničkim miješanjem. Za otvorene sustave održavanje aerobnih uvjeta konstantnima je gotovo nemoguće. Pojavom anaerobnih uvjeta u sustavu dolazi do pada pH vrijednosti procjednih voda zbog brze pretvorbe topljivih organskih molekula u hlapljive masne kiseline (*eng.*

Volatile Fatty Acids, VFA).[9] Zbog promjenjivih uvjeta rada otvorenih postrojenja kvaliteta komposta kao i sastav procjedne vode nisu uvijek jednaki, što otežava i proizvodnju komposta ujednačene kvalitete kao i obradu otpadnih procjednih voda. Kompostiranje u tunelima predstavlja jedan od zatvorenih sustava. Kompostiranje se provodi na način da se biotpad zatvori u tunelu uz propuhivanje zrakom koji je sadržan u spremniku. Zrak korišten u procesu se obrađuje u zatvorenom sustavu te ne dolazi do izlaganja ljudi štetnim plinovima i neugodnim mirisima. Unutar tunela proces kompostiranja je moguće provoditi u optimalnim uvjetima. [10] Vrijednosti fizikalno - kemijskih pokazatelja procjedne vode iz kompostiranja mješovitog komunalnog otpada korištenjem različitih tehnoloških sustava kompostiranja (zatvoreni sustav, otvoreni sustav, kompostiranje u tunelima) prikazane su u *tablici 1.1*

Tablica 1.1 Vrijednosti fizikalno- kemijskih pokazatelja procjednih voda iz procesa kompostiranja mješovitog komunalnog otpada u zatvorenom postrojenju, otvorenom postrojenju i u tunelima.[5]

| Parametar | Mješoviti komunalni kruti otpad | | |
|---|---------------------------------|--|---------------------------------------|
| | Kompostiranje u tunelima | Zatvoreno postrojenje za kompostiranje | Otvoreno postrojenje za kompostiranje |
| KPK (g O ₂ /L) | 8,5-9,0 | 42,2-107,2 | 1,97-2,43 |
| | 14,7-15,7 | 95,5 | 169-185 |
| | 22,9-24,9 | | 25,8-45,5 |
| | 10,6-12,6 | | 0,44-0,48 |
| | 38,8-42,8 | | 22,3-45 |
| | 24,6-25,6 | | 51-109 |
| | 36,8-38,3 | | 23-40 |
| | | | 102,8-107,9 |
| | | | 51,2-71,3 |
| | | | 100 |
| BPK ₅ (g O ₂ /L) | 1,22-1,29 | 40,1 | 1,0-1,6 |
| | 0,67-0,72 | 55,2 | 85-89 |
| | 7,59-7,90 | | 23-55 |
| | 5,70-5,93 | | 67,0-71,6 |
| | | | 26,2-30,4 |
| BPK ₅ /KPK | 0,11 | | 0,49 |

Nastavak tablice 1.1

| | | | |
|--|-----------|---------|-------------|
| | - | 0,58 | |
| | 0,02 | | 0,42-0,53 |
| | 0,33 | | |
| | 0,17 | | |
| TKN mg N/L | 350-400 | 758 | 160-320 |
| | 1100 | 2300 | 43,6-49,2 |
| | 1445-1545 | | 467-1860 |
| | 1445 | | 5,820-6,660 |
| | 2853 | | 1,418-2,967 |
| | 1612 | | 10,056 |
| | 3213 | | |
| | 1445-1545 | | |
| NH ₄ mg N-NH ₄ /L | 250-300 | 520 | 120-300 |
| | 645-655 | | 36-43 |
| | 705-805 | | 258-1290 |
| | 730-800 | | 275-360 |
| | 2250-2275 | | 231-796 |
| | 950-1015 | | |
| | 1550-1625 | | |
| TP mg/L | | 0,52 | 8,2-13,4 |
| | | 280 | 32-193 |
| | | | 104-288 |
| | | | 71 |
| | | | |
| PO ₄ mg P-PO ₄ /L | 12 | | 1,4-5,6 |
| | 81-85 | | |
| | 80-84 | | |
| | 87 | | |
| | 6,8-7,2 | 5,9-7,9 | 7,0-7,4 |
| pH vrijednost | 7,0 | 4,4 | 6,2 |
| | 7,1-8,1 | | 6,6-6,9 |
| | 7,4-7,8 | | 4,3-5,9 |
| | 6,8-7,0 | | 4,2-5,5 |
| | 7,4-7,8 | | 4,2-6,8 |
| | 7,3-7,5 | | 4,6-5,2 |
| | 7,1-8,1 | | 4,7-5,1 |
| | | | 3,8-6,3 |
| | | | 4,9 |

Nastavak tablice 1.1

| | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Električna vodljivost (ms/cm) | 21-25 | 23,3-48,1 | 3,2-5,8 |
| | 8,4-8,8 | 33,5 | 51,5-52,1 |
| | 35,3-36,7 | | 20-56 |
| | 1,9-2,9 | | 27,5-30,3 |
| | 1,4-2,2 | | |
| | 13-17 | | |
| | 23,3-48,1 | | |
| TSS (g/L) | 0,35-0,4 | 4,7-25,8 | 0,22-0,74 |
| | 1,77-1,87 | | 0,05 |
| | 1,86-2,26 | | 10,8-24 |
| | 8,38-11,9 | | 2,9-17 |
| | 18,0-18,3 | | 1,92 |
| | 0,35-23,4 | | 16-33,7 |
| | 1,75-1,90 | | 9,03 |
| TVS (g/L) | 1,78-2,22 | 2,6-11 | 15,7-26,2 |
| | 13,9-14,4 | | 2,3-65 |
| | 6,03-6,13 | | |
| | 9,2-10,9 | | |
| Cl (mg/L) | 2910-3210 | | 3589-9667 |
| | | | 295 |
| Cd (mg/L) | 0,01 | 0,05 | 0,06-1,31 |
| | 0,13 | | 0,07-0,34 |
| | 0,17 | | 0,14-1,58 |
| | 0,03 | | 1,24 |
| | 0,04 | | |
| Cu (mg/L) | <0,01 | 0,8 | 0,34-2,34 |
| | 0,2 | | 0,32-2,25 |
| | 1,5 | | 0,11-0,49 |
| | 1 | | 0,32 |
| | 0,6 | | |
| Ni (mg/L) | 0,05 | 0,75 | 0,72-4,01 |
| | 0,44 | | 0,65-3,8 |
| | 1,47 | | 0-0,19 |
| | 0,61 | | 4,43 |
| | 0,79 | | 0,43 |
| Pb (mg/L) | 0,02 | 1,02 | 0,06-0,95 |
| | 0,85 | | 4,28 |

Nastavak tablice 1.1

| | | | |
|---|------|------|-----------|
| | 1,07 | | |
| | 0,22 | | |
| | 0,22 | | |
| Zn (mg/L) | 0,5 | 1,32 | 1,26-12,7 |
| | 2,3 | | 1,2-11 |
| | 7,8 | | 1,7-37,5 |
| | 3,3 | | 15,8 |
| | 8,2 | | |
| Gdje je: KPK – kemijska potreba za kisikom; BPK ₅ - biokemijska potreba za kisikom; TP (eng.Total Phosphorus)- ukupni fosfor; TSS (eng. Total Suspended Solids)- ukupna suspendirana tvar; TVS (eng. Total Volatile Solids)- ukupna hlapljiva tvar | | | |

Procjedne otpadne vode iz procesa kompostiranja sadrže: ugljik, dušik, fosfor, kalij, amonijak i teške metale. [11]

Iz tablice je vidljivo da je kemijska potreba za kisikom ovisno o načinu kompostiranja te varira između 0,44 i 185 g O₂/L. Za kompostiranje u tunelima KPK ima najmanje vrijednosti čiji je raspon od 8,5 do 42,8 g O₂/L. Vrijednosti biološke potrebe za kisikom kreću se u intervalu od 0,67 do 89 g O₂/L. Najmanje vrijednosti BPK su dobivene za kompostiranje u tunelima i iznose 0,67 - 7,90 g O₂/L.

Osnovni pokazatelj biorazgradivosti procjernih otpadnih voda je omjer BPK₅/KPK. Ukoliko je BPK₅/KPK < 0,1 procjedna voda se smatra teško biorazgradivom, a za omjer BPK₅/KPK > 0,5 procjedna voda se smatra lako biorazgradivom.[6] U tablici 1.1. omjer KPK/BPK₅ se kreće 0,02 - 0,58 i manji je kod kompostiranja u tunelima 0,02 - 0,33. Prosječni omjer BPK₅/KPK procjernih voda za kompostiranje je 0,33 pa se takva voda smatra umjereno biorazgradivom otpadnom vodom.[12]

Iz prikaza podataka u *tablici 1.1* vidljivo je da se ukupna koncentracija dušika po Kjeldahlu (*eng.* Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) kreće od 43,6 do 10 056 mg N/L. Sadržaj amonijaka je jako visok i kreće se između 36 i 2275 mg N-NH₄/L i ima značajno veće vrijednosti kod kompostiranja u tunelima. Također je vidljivo da se koncentracije fosfora kreću od 1,4 do 87 mg P/L. pH vrijednosti procjedne otpadne vode se kreću od 3,8 do 8,1 s tim da pri kompostiranju u otvorenim i zatvorenim sustavima pH vrijednosti iznose ispod

7, a pri kompostiranju u tunelima iznose iznad 7 i to 7 – 8,1 te su takve procjedne vode prihvatljive za ispušt u kanalizaciju obzirom na pH. Vrijednosti ukupne suspendirane tvari (eng. Total Suspended Solids, TSS) iznose 0,05- 33,7 g/L. Najmanje koncentracije TSS u procjednim vodama nastaju kompostiranjem u tunelima. Iz tablice je vidljivo kako vrijednosti za ukupne hlapljive tvari (eng. Total Volatile Solids, TVS) iznose 1,78 – 26,2 g/L te su najmanje za procese kompostiranja u tunelima. U procjednoj otpadnoj vodi sadržani su i teški metali kao što su olovo i kadmij. Prisutnost teških metala i visoke koncentracije organskih i drugih onečišćenja, u odnosu na prirodne vodotoke, ukazuju na potrebu za obradom procjednih otpadnih voda iz procesa kompostiranja. Iz tablice 1.1. vidljivo je da način kompostiranja: kompostiranje u otvorenom postrojenju, zatvorenom postrojenju i tunelima jako utječe na sastav procjedne vode. U nastavku će se više reći o ostalim parametrima koji utječu na sastav procjednih voda iz procesa kompostiranja.

Parametri koji utječu na sastav procjednih voda iz kompostiranja

Dva osnovna parametra koja utječu na sastav procjednih voda iz kompostiranja su: sirovina tj. biootpad iz kojeg se dobiva kompost te tehnološki proces kojim se kompost dobiva. Budući da je procjedna voda opterećena tvarima koje potječu iz sirovine za kompostiranje moguće je kontrolom sirovine, tj. biootpada koji ulazi u proces, kontrolirati i onečišćenja prisutna u procjednoj vodi. Iako je prisutnost štetnih tvari usko povezana sa kvalitetom biootpada koji se kompostira, njihova toksičnost, bioraspoloživost i transport ovise o njihovim fizikalno-kemijskim oblicima. [13]

Ulaskom sirovine u proces javljaju se još dva načina na koja se može utjecati na sastav procjedne otpadne vode koja izlazi iz procesa a to su:

- kontrola opskrbe vodom
- utjecaj na parametre procesa

Parametri procesa na koje se može utjecati za vrijeme procesa kompostiranja su: C:N omjer, pH vrijednost, temperatura, protok zraka, vlažnost supstrata i veličina čestica. [11]

C:N omjer opisuje bilancu hranjivih tvari unutar kompostnog sustava. Predstavlja omjer masenog udjela ugljika i dušika. Za vrijeme kompostiranja ovaj omjer opada zbog

razgradnje složenih organskih spojeva i njihove mineralizacije te oslobađanja CO₂. Postoje dva načina kontrole protoka zraka u procesu: pasivna i prisilna aeracija. Pasivna aeracija se odvija kao posljedica pojave konvekcije usljed razlike u temperaturama u različitim dijelovima supstrata, dok se aktivna aeracija provodi preslagivanjem, miješanjem, ventilatorima i perforiranim cijevima.

1.1.2. Pregled metoda obrade procjednih voda

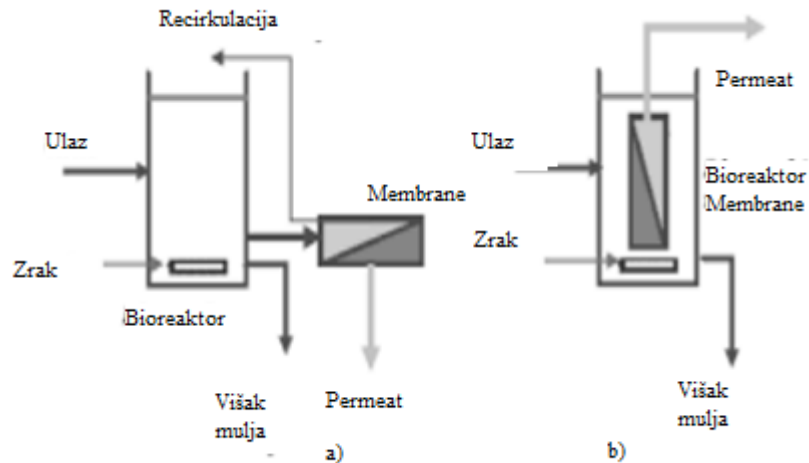
Tehnologije za obradu procjednih voda podijeljene su općenito u tri kategorije:

- biološka obrada (aerobna, anaerobna)
- fizikalno-kemijska obrada (koagulacija, flokulacija, adsorpcija, nanofiltracija, reverzna osmoza)
- napredne oksidacijske tehnologije. (fenton procesi, UV, itd.)

Vrlo često primjena pojedinačnih procesa biološke ili fizikalno - kemijske obrade nije dovoljna za potpuno uklanjanje štetnih tvari iz procjedne vode. Stoga su novija istraživanja usmjerena na kombinaciju dva ili više fizikalnih, kemijskih ili bioloških procesa kako bi se postigli bolji efekti pročišćavanja. Takvi procesi se nazivaju kombinirani, integrirani ili hibridni procesi. U nastavku će se opisati primjeri integriranih procesa obrade otpadne procjedne vode iz procesa kompostiranja. Integrirani procesi obrade procjednih voda sastoje se od dva ili više procesa koji se mogu provoditi istovremeno ili u slijedu.

Integrirani proces biološke obrade i membranske tehnologije - Membranski bioreaktor

Membranski bioreaktori kombiniraju membranu i klasične tehnologije obrade otpadne vode aktivnim muljem. Uvođenjem membrana u proces moguće je unutar procesa imati znatno veću koncentraciju aktivnog mulja što pospješuje i ubrzava uklanjanje štetne tvari. Mikrobiološka kvaliteta obrađene vode je visoka zbog zadržavanja mikroorganizama filtracijom na membrani, pa se obrađena voda može koristiti za više primjena koje uključuju ponovnu upotrebu vode.[14]



Slika 1.2 Shematski prikaz konfiguracija membranskih bioreaktora: a) membrana smještena izvan bioreaktora i b) membrana uronjena direktno u bioreaktor[15]

Integrirani proces koagulacije s polialuminij kloridom i nanofiltracije

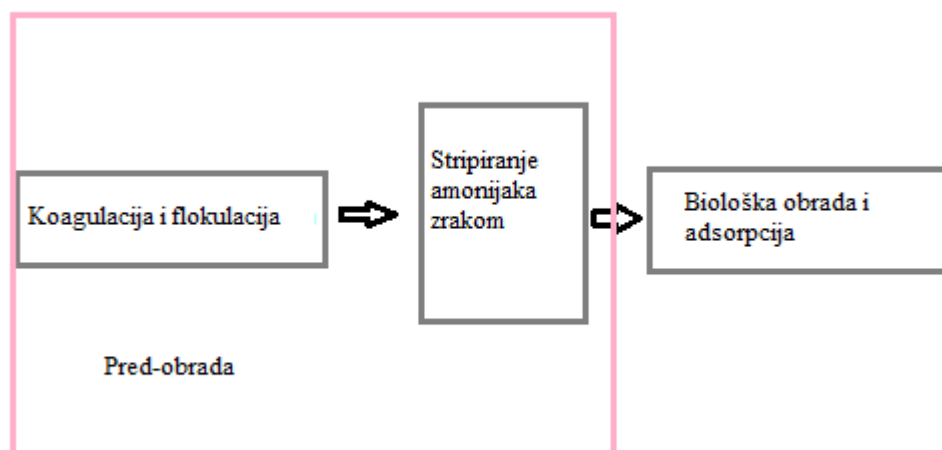
Procesu nanofiltracije prethodi proces koagulacije. Kao sredstvo koje uzrokuje koagulaciju koristi se polialuminijev klorid. [16] Procesom koagulacije te zatim procesom filtracije korištenjem filtera građenog od staklenih vlakana, smanjuje se koncentracija krute tvari u procjednoj vodi. Ovaj korak se provodi kako bi se smanjilo opterećenje na membrani za nanofiltraciju. Nakon procesa nanofiltracije dobije se efluent zadovoljavajuće kvalitete.



Slika 1.3 Slikovit prikaz redoslijeda integriranog procesa koagulacije i nanofiltracije

Integrirani proces biološke obrade i adsorpcije na aktiviranom ugljenu

Biološka obrada u šaržnom aeracijskom reaktoru i adsorpcija na aktivnom ugljenu provode se istovremeno. [17] Kako bi se poboljšalo uklanjanje štetne tvari prethodno se provodi koagulacija i stripiranje amonijaka zrakom. Zatim se u aeracijski reaktor polako uvodi otpadna voda. Mikroorganizmi unutar spremnika djeluju na otpadnu vodu čija je koncentracija mala zbog polaganog uvođenja u proces. [17] Efluent se iz procesa ne ispušta dok se reaktor ne napuni do kraja.



Slika 1.4 Slikovit prikaz redoslijeda integriranog procesa biološke obrade i adsorpcije na aktiviranom ugljenu uz pred-obradu

Integrirani proces obrade biološkim muljem i zračenja elektronskim zrakama

Proces obrade biološkim muljem prethodi procesu zračenja elektronskim zrakama. Nakon obrade biološkim muljem dolazi do smanjenja biorazgradivosti procjedne vode zbog zaostatka teže razgradivih organskih tvari. Zračenjem elektronskim zrakama dolazi do neselektivne razgradnje organske tvari i uklanjanja u vodi topivih huminskih tvari. [18]



Slika 1.5 Slikovit prikaz redoslijeda integriranog procesa biološke obrade i zračenja elektronskim zrakama

U prethodnom tekstu su prikazani konkretni primjeri korištenja integriranih procesa obrade procjednih voda. Važno je naglasiti da osim prethodno spomenutih primjera integriranih procesa u fazi istraživanja je još puno drugih kombinacija. Potreba za uvođenjem integriranih procesa obrade procjednih voda postoji zbog njihovog sastava. Procjedne vode sadrže različite štetne tvari koje nije moguće ukloniti primjenom nekog od klasičnih procesa obrade. Integrirani procesi se mogu provoditi istovremeno ili slijediti jedan za drugim. Također se mogu provoditi nakon prethodne obrade procjednih voda ili izravno bez ikakve predobrade, a što ovisi o vrsti integriranog procesa. U tablici 1.2. prikazana je učinkovitost prethodno navedenih procesa.

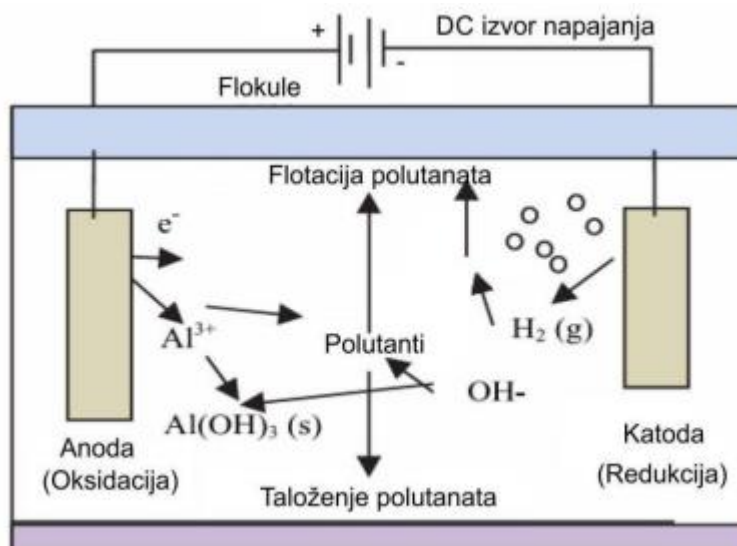
Tablica 1.2 Učinci uklanjanja za navedene primjere integriranih procesa [14] [16] [17] [18]

| Integrirani proces | Učinak uklanjanja % | | | |
|--|---------------------|-----|-----|-----|
| | KPK | BPK | NTU | TSS |
| Biološka obrada i membranska tehnologija | 70 | 93 | - | 99 |
| Koagulacija s polialuminij kloridom i nanofiltracija | 60 | - | 89 | 99 |
| Biološka obrada i adsorpcija na aktiviranom ugljenu | 86 | 94 | - | |
| Biološka obrada i zračenje elektronskim zrakama | 53 | 30 | | |

Budući da se u eksperimentalnom dijelu koristio integrirani proces u nastavku slijedi opis korištenog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu.

1.2. Elektrokoagulacija

Elektrokoagulacija je proces destabilizacije suspenzije, emulzije ili otopljenih štetnih tvari, u vodenom mediju, uvođenjem električnog napona u taj medij.[19] Za vrijeme procesa elektrokoagulacije istovremeno se odvija nekoliko reakcija na anodi i katodi. Mogu se podijeliti na glavne mehanizme, koji uzrokuju destabilizaciju koloida, i sporedne mehanizme kao što je nastajanje vodika.[20] Na anodi se oslobađaju kationi koji će u procesu poslužiti kao koagulant, a na katodi dolazi do nastajanja vodika i OH^- iona. Proces elektrokoagulacije na aluminijskoj elektrodi prikazan je na slici 1.6



Slika 1.6 Shematski prikaz procesa elektrokoagulacije[21]

Reakcije koje se odvijaju na aluminijevoj elektrodi prikazane su jednadžbama (1-1)-(1-6) [22]

➤Na anodi:



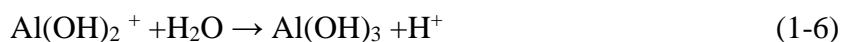
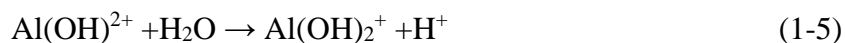
➤Na katodi:



➤Kada je anodni potencijal dovoljno visok odvija se sporedna reakcija nastanka kisika



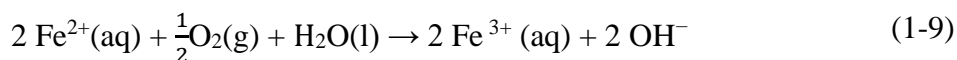
➤Nastali Al^{3+} ioni odmah po nastanku reagiraju prema sljedećim mehanizmima:



Anodne reakcije uzrokuju da je otopina blago kisela u blizini anode, dok je u blizini katode blago alkalna zbog evolucije vodika i proizvodnje OH^{-} iona.[23] Zbog svojstva aluminijeve anode da za vrijeme procesa, ukoliko se on odvija u kiselom mediju, poveća pH odnosno, ukoliko se proces odvija u lužnatom mediju, smanji pH, ona se smatra neutralizatorom pH vrijednosti. Osim aluminijeve elektrode koriste se i željezova elektroda.

Reakcije koje se odvijaju na željeznoj anodi prikazane su jednadžbama (1-7)-(1-12) [24]

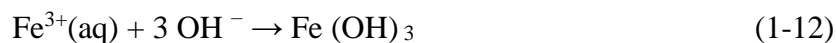
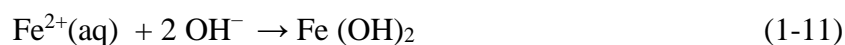
➤Na anodi:



➤Na katodi:



➤Precipitacija/taloženje:



Na početku procesa nastankom OH^{-} iona na katodi dolazi do kratkog rasta pH vrijednosti. Stvaranjem Fe^{2+} iona na katodi i njihovom oksidacijom s kisikom iz otopine dolazi do nastajanja Fe^{3+} iona. Slijedi reakcija u kojoj Fe^{3+} stvaraju netopljive hidrokside te dolazi do njihovog taloženja.

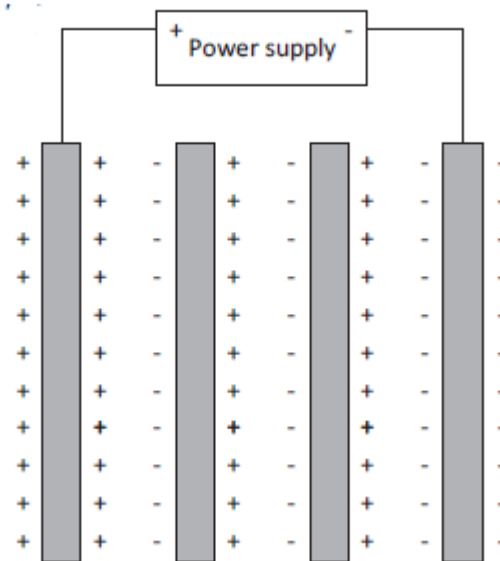
Postoji nekoliko razloga zbog kojih su ove elektrode najčešće korištene. Aluminij i željezo su materijali koji su veoma dostupni i jeftini što smanjuje pogonske troškove. Budući da se procesom elektrokoagulacije nastoji ukloniti onečišćenja iz procjednih voda potrebno je da materijali žrtvovane anode nisu toksični i ne stvaraju otrovne ili štetne hidrokside. Upravo je to slučaj s elektrodama od aluminija i željeza.

Parametri koji imaju utjecaj na efikasnost procesa elektrokoagulacije su:

- materijal od kojeg je izrađena elektroda - najčešće je to aluminij, željezo
- pH vrijednost otopine - utjecaj na ζ potencijal
- gustoća struje- proporcionalna broju elektrokemijskih reakcija koje se odvijaju
- elektrodni potencijal - određuje koje reakcije se odvijaju na anodi odnosno katodi
- koncentracija onečišćenja - reakcije elektrokoagulacije ne prate kinetiku reakcije nultog reda već reakcije pseudo prvog ili drugog reda
- koncentracija aniona - kao što su sulfatni ili floridni, mogu zamijeniti hidroksidni ion u precipitatu
- temperatura - utječe na brzinu reakcija, vodljivost i formiranje flokula
- procesno vrijeme

1.2.1. Izvedbe procesa elektrokoagulacije

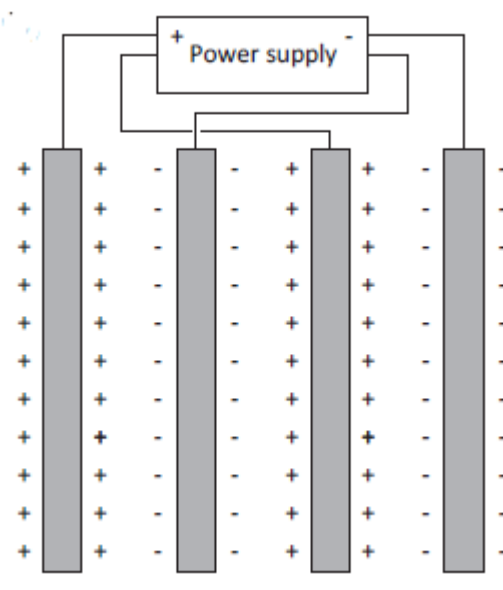
Elektrokoagulacijski sustavi se najčešće sastoje od pločastih elektroda između kojih struji onečišćena voda. Postoji nekoliko izvedbi: monopolarna i bipolarna koje se razlikuju u načinu spajanja elektroda ili smjeru strujanja onečišćene vode. Elektrode se monopolarno povezuju tako što se sve anode međusobno povezuju te isto vrijedi i za katode. Monopolarni spoj je prikazan na *slici 1.7*



Slika 1.7 Prikaz monopolarne konfiguracije elektroda u procesu elektrokoagulacije [20].

Trenutna učinkovitost otapanja elektroda je niža kada su elektrode u bipolarnoj konfiguraciji (64,5%) nego kada su u monopolarnoj konfiguraciji (91,7%)[20]. Važno je naglasiti da su ukupni troškovi procesa znatno niži ukoliko se koristi monopolarna konfiguracija što je uzrok njenoj raširenoj primjeni.

U bipolarnim sustavima najudaljenije elektrode su spojene na izvor električne energije, a struja prolazi kroz ostale elektrode te ih polarizira. Dakle strana elektrode okrenuta prema anodi je negativno polarizirana dok ona okrenuta katodi je pozitivno polarizirana.(*slika 1.8*)

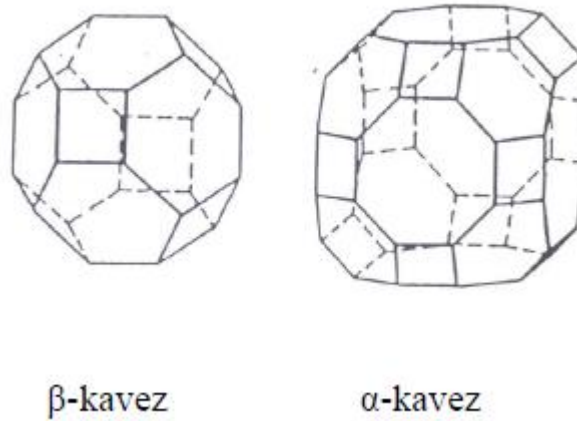


Slika 1.8 Prikaz bipolarne konfiguracije elektroda u procesu elektrokoagulacije [20].

1.3. Zeoliti

Zeoliti su prirodni ili sintetski hidratizirani alumosilikati s karakterističnom strukturom šupljina koje se nazivaju *kanalima* [25]. Struktura zeolita se sastoji od SiO_4 i AlO_4^- tetraedara koji se u veće sekundarne jedinice vežu preko kisikovih atoma. Daljim povezivanjem tih sekundarnih jedinica nastaju tercijarne strukture (poliedri) čijim se

povezivanjem dobivaju prostorne strukture zeolita. Primjeri tercijskih struktura zeolita su λ -kavez i β -kavez prikazani na slici 1.10.



Slika 1.9 Prikaz tercijskih struktura zeolita [25]

U svojoj strukturi zeoliti imaju šupljine različitih oblika i međusobno se razlikuju po geometriji kanala. Važno svojstvo zeolita je koordinacijska nezasićenost Al^{3+} koji se nalazi u središtu osnovne gradivne jedinice zeolita što stvara mogućnost vezanja kationa alkalijskih i zemnoalkalijskih metala koji taj naboj pri tome neutraliziraju. Broj vezanih kationa na zeolitu jednak je broju Al-tetraedara koji grade zeolit. Kationi alkalijskih i zemnoalkalijskih metala mogu se jednostavno zamijeniti za druge katione u strukturi zeolita bez da dođe do narušavanja stabilnosti strukturne rešetke zeolita. Na ovoj pojavi se temelji primjena zeolita kao ionskih izmjenjivača u različitim procesima. Osim svojstva ionske izmjene zeoliti posjeduju i svojstva adsorpcije te se primjenjuju kao molekulska sita.

Prirodni zeoliti nastaju djelovanjem alkalne podzemne vode na nakupine vulkanskog kamena i pepela. Ovaj proces traje milijunima godina.



Slika 1.10 Prirodni zeolit [26]

Nalazišta prirodnih zeolita su relativno česta i pristupačna jer su kopovi pri eksploataciji uglavnom površinski. Prirodni zeolit se može granulirati do željene veličine pri čemu ne gubi svoja svojstva. Procesi pročišćavanja otpadnih voda temelje se na procesima ionske izmjene ili adsorpcije na površinu prirodnih ili modificiranih zeolita. Korištenje prirodnih zeolita u procesima pročišćavanja otpadnih voda ima niz prednosti. Zeoliti su lako dostupni, relativno jeftini, mogu se regenerirati te su okolišno kompatibilni. Zeoliti koji u strukturi imaju alkalijske i zemnoalkalijske metale pokazuju dobru učinkovitost uklanjanja teških metala, amonijaka te radioaktivnih iona, a da se pri tome u otopinu otpuštaju neopasni ioni kalcija, magnezija, natrija i kalija.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

U prvom dijelu ovog rada određene su karakteristike simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja. Nakon određivanja karakteristika simulirane procjedne vode provedena je njena obrada procesom elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita te pri različitim udaljenostima aluminijskih elektroda (1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm).

2.1. Karakteristike uzorka komposta

Tijekom lipnja i srpnja 2020. godine proveden je proces kompostiranja biootpada u zatvorenom pilot komposteru i otvorenoj posudi. Kompost korišten za simulaciju procjedne vode iz procesa kompostiranja je uzorkovan 13. 07. 2020. iz posude otvorenog tipa. Uzorkovanje je provedeno na 6 mjesta uz prethodno miješanje i homogeniziranje komposta. Karakteristike uzorka komposta prikazane su u *tablici 2.1*, a preuzete su iz literature. [27]

Tablica 2.1 Karakteristike uzorka komposta korištenog za simulaciju procjednih voda kompostiranja[27]

| Karakteristike | |
|---|-------|
| w(H ₂ O), % | 69,08 |
| w(ST), % | 30,92 |
| w(HT), % | 88,02 |
| w(C), % | 48,90 |
| pH | 7,54 |
| G, μS/cm | 671 |
| w(N ₂), % | 0,47 |
| Gdje je: w(H ₂ O) - udio vlage; w(ST)- udio suhe tvari; w(HT) - udio hlapljive tvari; w(C)- udio ugljika; G - električna vodljivost; w(N ₂)- udio dušika | |

2.2. Priprema simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja

Simulirana procjedna voda dobivena je miješanjem 100 g komposta s destiliranom vodom čiji je volumen iznosio 7L. Uzorak je ostavljen da odstoji dva sata. Nakon taloženja je dekantiran gornji dio uzorka te je korišten u procesu elektrokoagulacije. Na simuliranom uzorku procjedne vode određeni su sljedeći pokazatelji:

- pH vrijednost
- električna vodljivost
- kemijska potrošnja kisika (KPK)
- dušik po Kjeldahlu
- mutnoća
- ukupni isparni ostatak

Karakteristike uzorka procjedne vode prikazane su u *tablici 3.1*

2.3. Obrada otpadne vode integriranim procesom elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

Procjedna otpadna voda iz procesa kompostiranja obrađena je postupkom elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita te pri različitim udaljenostima elektroda od 1,5 cm, 3 cm, i 4,5 cm. Korišten je prirodni zeolit iz depozita Vranjska Banja, Srbija, veličine čestica 0,1-0,5 mm, a sastav i karakterizacija se mogu naći u referenci. [28]

Volumen uzorka procjedne vode korišten pri provođenju eksperimenta iznosio je 250 mL. Postupak elektrokoagulacije provodio se u staklenoj čaši u koju su uronjene elektrode od aluminijske legure. Dimenzije elektroda prikazane su u *tablici 2.2*

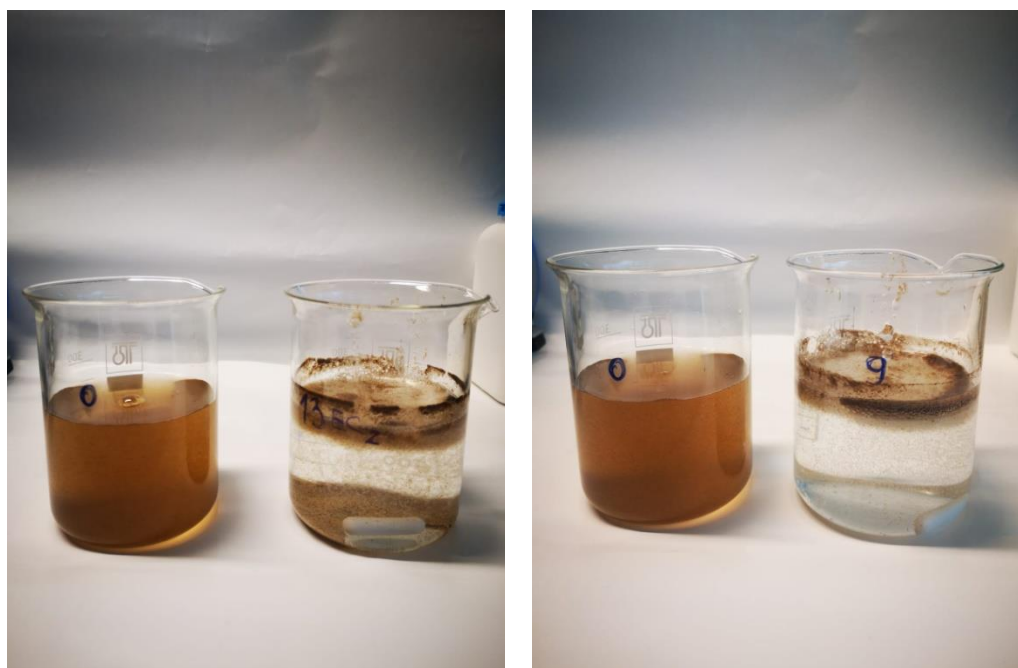
Tablica 2.2 Dimenzije elektroda

| Dimenzije elektroda, cm | |
|-------------------------|-----|
| Dužina/ cm | 1,2 |
| Širina/ cm | 2,4 |
| Visina/ cm ² | 5,3 |

Prije uranjanja elektroda u uzorak potrebno ih je izvagati na analitičkoj vagi. Ovaj postupak se ponavlja i nakon provedbe eksperimenta i sušenja elektroda. Podaci o masama elektroda prije i nakon postupka prikazani su u *tablici 3.11*. Uvjeti pri kojima je obrada provedena su: $I = 0,1 - 0,3 \text{ A}$, $U = 8,3-22,8 \text{ V}$, a kontaktno vrijeme iznosilo je 40 minuta. Za vrijeme provođenja eksperimenta uzorak se miješao magnetskom mješalicom uz konstantnu brzinu miješanja od 70 rpm. U eksperimentima gdje je korišten zeolit njegova masa iznosila je 5 g na 250 mL uzorka a u eksperimentima s dodatkom elektrolita korišten je NaCl koncentracije 1 g/L. Aparatura korištena pri provođenju eksperimenta prikazana je na *slici 2.1*.



Slika 2.1 Izgled aparature korištene pri provođenju eksperimenta



a)

b)

*Slika 2.2 Početni uzorak i uzorak nakon provedene elektrokoagulacije sa zeolitom
a) i bez zeolita b)*

Ukupno je provedeno 8 eksperimenata, a uvjeti provedbe su opisani u tablici 2.3. Eksperimenti 1-4 su provedeni bez dodatka zeolita, a eksperimenti 4-8 uz dodatak zeolita pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm. U eksperimentima 1-3 i 5-7 dodan je elektrolit NaCl u koncentraciji 1 g/ L. Eksperimenti 4 i 8 su provedeni bez dodatka elektrolita pri najmanjoj udaljenosti elektroda 1.5 cm.

Tablica 2.3 Oznake i uvjeti pri kojima su provedeni eksperimenti

| Oznaka eksperimenta | Broj eksperimenta | Udaljenost elektroda, cm | Dodatak elektrolita | Dodatak zeolita |
|---------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 1,5 | + | - |
| EC 3 cm + EL | 2 | 3 | + | - |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 4,5 | + | - |
| EC 1,5 cm | 4 | 1,5 | - | - |

Nastavak tablice 2.3.

| | | | | |
|-----------------|---|-----|---|---|
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 1,5 | + | + |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 3 | + | + |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 4,5 | + | + |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 1,5 | - | + |

2.4. Parametri koji su praćeni prije tijekom i nakon provedbe procesa

Tijekom provođenja integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu praćena je pH vrijednost, električna vodljivost i temperatura. Nakon provedbe eksperimenta određivani su: pH vrijednost, električna vodljivost, temperatura, mutnoća, kemijska potrošnja kisika (KPK) dušik po Kjeldahlu i ukupni isparni ostatak.

2.4.1. Određivanje pH vrijednosti

pH vrijednost je broj koji ukazuje na kiselost ili lužnatost vodenih otopina. pH vrijednost je mjerena za vrijeme provođenja eksperimenta u određenim vremenskim intervalima. Za mjerenje pH vrijednosti korišten je laboratorijski pH - metar koji je prikazan na slici 2.3. Prije mjerenja elektroda pH-metra se ispire destiliranom vodom i zatim suši papirom. Nakon uranjanja elektrode potrebno je pričekati da se vrijednost koju pokazuje pH - metar ustali te je zatim očitati.



Slika 2.3 pH-metar tipa Mettler Toledo

Rezultati određivanja pH vrijednosti uzoraka tijekom elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita i elektrolita, prikazani su u *tablici 3.2*

2.4.2. Određivanje električne vodljivost

Električna vodljivost je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo medija da propušta električnu struju, a vrijednost joj je recipročna električnom otporu. Električna vodljivost se izražava u S/m ili $\mu\text{S/m}$. Električna vodljivost čiste vode je relativno mala, ali dodatkom soli koje provode struju i disociraju u vodi, električna vodljivost postaje znatno veća. Upravo zbog ovoga električna vodljivost je dobar pokazatelj koncentracije otopljenih soli u vodi. Mjerenje električne vodljivosti provodi se uređajem prikazanim na *slici 2.4* pri temperaturi od 25 °C.



Slika 2.4 Konduktometar tipa Mettler Toledo

Rezultati određivanja električne vodljivosti uzoraka za vrijeme i nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.3*.

2.4.3. Određivanje temperature

Promjena temperature je praćena tijekom provođenja procesa u vremenskim intervalima od 5 minuta. Mjerenje je provedeno korištenjem standardnog termometra, Rezultati određivanja temperature uzoraka za vrijeme i nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.4*.

2.4.4. Određivanje kemijske potrošnje kisika (KPK)

Kemijska potrošnja kisika (KPK) jedan je od osnovnih parametara kojim se mjeri onečišćenje ili stupanj opterećenja otpadnih voda. Predstavlja mjeru biološki dostupne i inertne organske tvari koju je moguće oksidirati jakim oksidacijskim sredstvom (permanganat ili bikromat). Izražava se kao masa potrošenog kisika (mg) po litri uzorka. Pri određivanju KPK korištena je bikromatna metoda.

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



Postupak rada:

U odmjernu tikvicu volumena 100 mL doda se 10 mL uzorka i razrijedi se destiliranom vodom do oznake. Zatim se u epruvete doda po 5 mL razrijeđenog uzorka, 3 mL otopine $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, nekoliko zrnaca HgSO_4 te lagano uz stijenku 7 mL H_2SO_4 s Ag_2SO_4 . Zaprilemu slijepe probe postupak je isti ali se umjesto uzorka dodaje 5 mL destilirane vode. Na epruvete se doda povratno hladilo te se uzorak kuha u digestoru 1,5 h na temperaturi od 120 °C (slika 2.6). Nakon kuhanja uzorak se hladi do sobne temperature i titrira s Mohrovom soli uz feroin kao indikator do promjene boje iz žute u crvenu (slika 2.7).



Slika 2.5 Kuhanje smjese u digestoru



Slika 2.6 Promjena boje za vrijeme titracije

Izračunavanje KPK

Kemijska potrošnja kisika izračunava se prema navedenoj formuli:

$$\text{KPK}_{\text{Cr}} = \frac{(b - a) \cdot c_{\text{Fe(II)}} \cdot f_{\text{Fe(II)}} \cdot \frac{1}{4} \cdot M(\text{O}_2) \cdot R \cdot 1000}{V_{\text{uzorka}}} \quad (2-2)$$

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 određivanja KPK uzorka nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.5*.

2.4.5. Određivanje dušika po Kjeldahlu

Određivanjem dušika po Kjeldahlu određuje se organski i amonijakalni dušik. Metoda po Kjeldahlu temelji se na prethodnoj mineralizaciji odnosno oksidaciji uzorka jakim oksidansom pri 420 °C s $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ i K_2SO_4 kao katalizatorom. Reakcijom nastaje amonijev sulfat iz kojeg se destilacijom oslobađa amonijak koji se određuje volumetrijski, kiselo – baznom titracijom s NaOH do prijelaza boje iz ružičaste u žutu (*slika 2.9*).

Koraci pri određivanju dušika po Kjeldahlu:

- Mineralizacija – Prevođenje organskog i amonijakalnog dušika u anorganski
- Alkalizacija s NaOH u suvišku
- Destilacija uz kloridnu kiselinu u suvišku
- Titracija viška neizreagirane kloridne kiseline s otopinom NaOH.

Postupak rada:

U staklene epruvete se doda po 25 mL ispitivanog uzorka, katalizator u omjeru 1:9 i po 10 mL koncentrirane sulfatne kiseline. Staklene kivete se prenesu u uređaj za digestiju i zagrijavaju 20 minuta na 150°C, 30 minuta na 250 °C i 1 sat na 420 °C. Za slijepu probu postupak je isti ali se umjesto uzorka dodaje destilirana voda. Nakon mineralizacije tekućina u epruvetama je zelene boje, a nakon hlađenja svijetlo plave boje. Nakon što otopina poprimi svijetlo plavu boju, u svaku epruvetu se doda po 75 mL destilirane vode. Nakon hlađenja uzorak se stavi u uređaj za destilaciju po Kjeldahlu. U Erlenmeyerovu tikvicu se otpipetira 20 mL 0,1 mol/L kloridne kiseline i stavi par kapi indikatora metil crveno te ta tikvica služi za sakupljanje amonijaka. Uređaj za destilaciju (*slika 2.8*) podese se tako da je vrijeme trajanja destilacije 5 minuta, a zadani volumen 40%-tne NaOH 50 mL. Nakon destilacije provodi se titracija s 0,1 mol/L NaOH do promjene boje iz ružičaste u žutu.



Slika 2.7 Uređaj za destilaciju



Slika 2.8 Promjena boje za vrijeme titracije

Izračunavanje dušika po Kjeldahlu:

$$\gamma(\text{N, mg/L}) = \frac{(V_{\text{NaOH,SP}} - V_{\text{NaOH,uzorak}}) \cdot c(\text{NaOH}) \cdot f(\text{NaOH}) \cdot M(\text{N}) \cdot R \cdot 1000}{V_{\text{uzorka}}} \quad (2-3)$$

gdje je:

$V_{\text{NaOH, SP}}$ – volumen 0,1 mol/L NaOH za titraciju slijepe probe

$V_{\text{NaOH, uzorak}}$ – volumen 0,1 mol/L NaOH za titraciju uzorka

$c(\text{NaOH})$ – koncentracija otopine NaOH, 0,1 mol/L

$f(\text{NaOH})$ – faktor otopine NaOH, 1,0000

$M(\text{N})$ – molarna masa dušika, 14,007 g/mol

V_{uzorka} – volumen uzorka ili slijepe probe

Rezultati određivanja TKN uzoraka nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.6*

2.4.6. Određivanje mutnoće

Mutnoća predstavlja mjeru koncentracije raspršenih (suspendiranih) organskih i anorganskih tvari, posebice čestica koloidnih veličina, zatim mikroorganizama, mjehurića plina i drugih tvari koje nisu vidljive golim okom. Pri mjerenju mutnoće turbidimetrom mjeri se količina svjetlosti koju čestice u otopini apsorbiraju pa zatim raspršuju u svim smjerovima. Izražava se u jedinicama NTU (engl. Nephelometric Turbidity Units).



Slika 2.9 Turbidimetar

Rezultati određivanja mutnoće uzorka nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.7*.

2.4.7. Određivanje ukupnog isparnog ostatka

Ukupni isparni ostatak ukazuje na sadržaj ukupno otopljenih i raspršenih tvari u otpadnoj vodi. Određuje se odmjeravanjem 50 mL uzorka u prethodno izvaganu posudicu koju se ostavlja na sušenje do ustaljenja mase na temperaturi od 105 °C. Nakon postupaka određena je masa posudica s isparnim ostatkom. Iz razlike u masama odredi se ukupni isparni ostatak.

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

Gdje je:

TS - ukupni isparni ostatak, mg/L

m_1 - masa prazne posudice, g

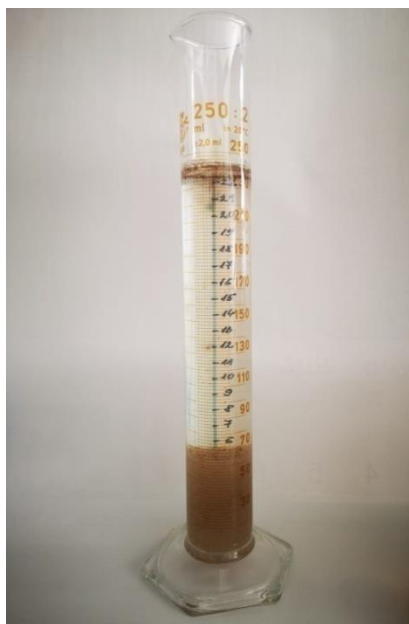
m_2 - masa posudice s uzorkom nakon isparavanja i sušenja na 105 °C, g

V - volumen uzorka, mL

Rezultati određivanja TS uzoraka nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.8*.

2.5. Određivanje brzine taloženja suspenzije i masa taloga

U graduiranu menzuru se ulije uzorak koji je prethodno obrađen procesom elektrokoagulacije. Zatim se u vremenskim intervalima od 5 min bilježi visina stupca mutnog dijela uzorka. Taloženje se prati 30 minuta a zatim se sadržaj menzure filtrira na filter papiru. Nakon filtracije i sušenja određuje se masa taloga.



Slika 2.10 Taloženje

Rezultati određivanja brzine taloženja suspenzije nakon elektrokoagulacije, bez i s dodatkom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.9*.

Nakon taloženja određene su mase taloga na analitičkoj vagi. Masa filter papira korištenog za filtraciju nakon taloženja bila je poznata. Nakon filtracije i sušenja određena je masa taloga koji se nakupio na filter papiru iz čega je određena masa taloga. Rezultati određivanja mase taloga uzoraka nakon elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani su u *tablici 3.10*.

3. REZULTATI

U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti parametara koji ukazuju na kakvoću simulirane procjedne vode. Dio parametara (pH vrijednost, električna vodljivost i temperatura) praćen je za vrijeme provođenja procesa, dok je dio parametara (pH vrijednost, električna vodljivost, kemijska potrošnja kisika, dušik po Kjeldahlu, mutnoća, ukupni isparni ostatak) određivan na početku i kraju procesa.

3.1. Rezultati karakterizacije uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada

U *tablici 3.1.* prikazani su rezultati karakterizacije simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja biootpada.

Tablica 3.1. Karakteristike uzorka procjedne vode

| Parametri | Vrijednost parametra |
|---|----------------------|
| pH vrijednost | 7.95 |
| Električna vodljivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 205.00 |
| KPK (mg O_2/L) | 278.32 |
| TKN (mg N/L) | 30.82 |
| Mutnoća (NTU) | 87.20 |
| TS (g/L) | 0.275 |
| TS (Total Solids)- ukupni isparni ostatak | |

3.2. Rezultati parametara praćenih prije tijekom i nakon provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

3.2.1. pH vrijednost

U *tablici 3.2* prikazani su rezultati pH vrijednosti izmjerene tijekom procesa elektrokoagulacije, bez dodatka zeolita (eksperiment 1 - 4) i s dodatkom zeolita (eksperiment 5 - 8), pri različitim udaljenostima elektroda (1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm) te uz dodatak elektrolita NaCl u koncentraciji 1 g/L. Kod uzoraka 4 i 8 eksperiment je proveden bez dodatka elektrolita pri najmanjoj udaljenosti elektroda.

Tablica 3.2 Rezultati pH vrijednosti, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim udaljenostima elektroda tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| Uzorak | | pH vrijednost tijekom vremena, - | | | | | | |
|-----------------|---|----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 min | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 40 min |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 7,47 | 8,91 | 8,96 | 9,03 | 9,11 | 9,23 | 9,35 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 7,47 | 8,87 | 8,95 | 9,06 | 9,14 | 9,26 | 9,29 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 7,47 | 8,20 | 8,85 | 9,10 | 9,19 | 9,20 | 9,29 |
| EC 1,5 cm | 4 | 7,95 | 8,71 | 8,90 | 8,98 | 9,07 | 9,19 | 9,18 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 7,47 | 8,71 | 8,79 | 8,93 | 9,04 | 9,13 | 9,21 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 7,47 | 8,74 | 8,81 | 8,95 | 9,02 | 9,15 | 9,24 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 7,47 | 8,75 | 8,85 | 8,92 | 8,97 | 9,09 | 9,16 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 7,95 | 8,39 | 8,60 | 8,74 | 8,93 | 9,14 | 9,19 |

3.2.2 Električna vodljivost

U *tablici 3.3* prikazani su rezultati električne vodljivosti izmjerene tijekom procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda.

Tablica 3.3 Rezultati električne vodljivosti, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim udaljenostima elektroda tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| Uzorak | | Električna vodljivost tijekom vremena, $\mu\text{S}/\text{cm}$ | | | | | | |
|-----------------|---|--|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 min | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 40 min |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 2260 | 2250 | 2210 | 2180 | 2170 | 2140 | 2130 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 2260 | 2240 | 2340 | 2270 | 2240 | 2270 | 2220 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 2130 | 2140 | 2210 | 2240 | 2230 | 2150 | 2050 |
| EC 1,5 cm | 4 | 205 | 209 | 206 | 205 | 204 | 199.5 | 188.4 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 2260 | 2310 | 2300 | 2240 | 2240 | 2130 | 2090 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 2260 | 2300 | 2300 | 2260 | 2320 | 2220 | 2180 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 2260 | 2160 | 2150 | 2260 | 2200 | 2220 | 2230 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 205 | 233 | 224 | 228 | 225 | 224 | 215 |

3.2.3. Temperatura

U *tablici 3.4* prikazani su rezultati temperature izmjerene tijekom procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim udaljenostima elektroda.

Tablica 3.4 Rezultati temperature, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim udaljenostima elektroda tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| Uzorak | | Temperatura °C | | | | | | |
|-----------------|---|----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 min | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 40 min |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 21 | 24,5 | 25 | 25 | 25 | 27 | 27 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 21 | 24 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 21 | 27,5 | 28 | 28,5 | 29 | 30 | 31,5 |
| EC 1,5 cm | 4 | 21 | 23 | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 21 | 24 | 25 | 25 | 25 | 26 | 27 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 21 | 25 | 25 | 26 | 26 | 27 | 28,5 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 21 | 28,5 | 29,5 | 30 | 30,5 | 32 | 33 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 21 | 23 | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 |

3.2.4. Kemijska potrošnja kisika

U tablici 3.5 prikazane su vrijednosti kemijske potrošnje kisika (KPK) za početni uzorak, tj. uzorak prije provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu, i uzorke nakon provedbe procesa.

Tablica 3.5 Rezultati kemijske potrošnje kisika (KPK), s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu uz izračunat postotak uklanjanja

| | | KPK (mg O ₂ L ⁻¹) | % uklanjanja |
|----------------|---|---|--------------|
| Početni uzorak | | 278,3232 | - |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 14,7456 | 94,04 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 0,0001 | 99,34 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 7,3728 | 96,69 |
| EC 1,5 cm | 4 | 3,6864 | 98,01 |

Nastavak tablice 3.5.

| | | | |
|-----------------|---|----------|-------|
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 147,4560 | 46,36 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 40,5504 | 84,77 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 47,9232 | 82,12 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 7,3728 | 96,69 |

3.2.5. Dušik po Kjeldahlu

U tablici 3.6 prikazane su vrijednosti dušika po Kjeldahlu za početni uzorak, tj. uzorak prije provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu, i uzorke nakon provedbe procesa.

Tablica 3.6 Rezultati dušika po Kjeldahlu (TKN), s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu uz izračunat postotak uklanjanja

| | | TKN (mg L ⁻¹) | % uklanjanja |
|-----------------|---|----------------------------|--------------|
| Početni uzorak | | 30,8154 | - |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 30,8154 | 0,00 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 5,6028 | 81,82 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 5,6028 | 81,82 |
| EC 1,5 cm | 4 | 5,6028 | 81,82 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 5,6028 | 81,82 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 19,6098 | 36,36 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 30,8154 | 0,00 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 2,8014 | 90,91 |

3.2.6. Mutnoća

U *tablici 3.7* prikazane su vrijednosti mutnoće za početni uzorak, tj. uzorak prije provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu, i uzorke nakon provedbe procesa.

Tablica 3.7 Vrijednosti mutnoće za početni uzorak i uzorke (1-8) nakon provedbe procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| | | NTU | % uklanjanja |
|-----------------|---|-------|--------------|
| Početni uzorak | | 87,20 | - |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 0,50 | 99,43 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 0,59 | 99,33 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 3,38 | 96,12 |
| EC 1,5 cm | 4 | 1,61 | 98,15 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 0,38 | 99,56 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 0,39 | 99,56 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 0,88 | 99,00 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 0,45 | 99,48 |

3.2.7. Ukupni isparni ostatak

U *tablici 3.8* prikazan je ukupni isparni ostatak za početni uzorak, tj. uzorak prije provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu, i uzorke nakon provedbe procesa.

Tablica 3.8 Vrijednosti ukupnog isparnog ostatka za početni uzorak i uzorke (1-8) nakon provedbe procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| Uzorci | | Masa prazne posudice (g) | Masa nakon sušenja (g) | TS (g L ⁻¹) |
|-----------------|---|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| Početni uzorak | | 74,576 | 74,581 | 0,275 |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 76,392 | 76,426 | 1,700 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 68,100 | 68,131 | 1,530 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 76,395 | 76,418 | 1,165 |
| EC 1,5 cm | 4 | 74,575 | 74,581 | 0,295 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 78,693 | 78,724 | 1,545 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 106,464 | 106,498 | 1,680 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 102,604 | 102,625 | 1,045 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 105,501 | 105,507 | 0,320 |

3.3. Brzina taloženja suspenzije i masa taloga

U tablicama 3.9 i 3.10 prikazane su vrijednosti brzina taloženja suspenzije i masa taloga za uzorke nakon provedbe procesa.

Tablica 3.9 Rezultati brzine taloženja suspenzije nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| Uzorak | Vrijeme / min | Brzina taloženja tijekom vremena, cm | | | | | | |
|-----------------|---------------|--------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 |
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 22,8 | 12,55 | 6,23 | 3,74 | 3,70 | 3,70 | 3,70 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 22,8 | 15,76 | 8,12 | 5,95 | 2,40 | 2,35 | 2,35 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 22,8 | 8,41 | 5,51 | 5,20 | 4,32 | 3,25 | 2,40 |
| EC 1,5 cm | 4 | - | - | - | - | - | - | - |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 22,8 | 7,42 | 5,10 | 2,63 | 2,30 | 2,24 | 2,24 |

Nastavak tablice 3.9.

| | | | | | | | | |
|-----------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 22,8 | 7,35 | 4,76 | 4,52 | 3,74 | 3,22 | 2,39 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 22,8 | 7,45 | 5,51 | 4,52 | 3,21 | 3,10 | 2,32 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | - | - | - | - | - | - | - |

Tablica 3.10 Vrijednosti sadržaja mase taloga za uzorke (1-8) nakon provedbe procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| Uzorci | | Mase filter papira (g) | Filter papir + talog (g) | Masa taloga (g) |
|-----------------|---|------------------------|--------------------------|-----------------|
| EC 1,5 cm + EL | 1 | 0,8461 | 1,0746 | 0,2285 |
| EC 3 cm + EL | 2 | 0,8545 | 1,0776 | 0,2231 |
| EC 4,5 cm + EL | 3 | 0,8419 | 1,0711 | 0,2292 |
| EC 1,5 cm | 4 | 0,8488 | 0,8647 | 0,0159 |
| ECZ 1,5 cm + EL | 5 | 0,8450 | 1,3498 | 0,5048 |
| ECZ 3 cm + EL | 6 | 0,8522 | 1,2340 | 0,3818 |
| ECZ 4,5 cm + EL | 7 | 0,8419 | 1,2773 | 0,4354 |
| ECZ 1,5 cm | 8 | 0,8558 | 0,9908 | 0,1350 |

3.4. Mase elektroda

U tablici 3.11. prikazane su vrijednosti masa elektroda prije i nakon provedbe procesa.

Tablica 3.11. Mase elektroda prije i nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

| | Masa prije (m_1) | Masa nakon (m_2) | $m_1 - m_2$ |
|--------|----------------------|----------------------|-------------|
| Katoda | 50,9473 | 50,9228 | 0,0245 |
| | 49,8821 | 49,8633 | 0,0188 |

Nastavak tablice 3.11.

| | | | |
|-------|---------|---------|--------|
| | 50,8137 | 50,7808 | 0,0329 |
| | 50,8048 | 50,7973 | 0,0075 |
| | 49,7280 | 49,7062 | 0,0218 |
| | 50,7037 | 50,6757 | 0,0280 |
| | 50,2472 | 50,2154 | 0,0318 |
| | 49,6375 | 49,6256 | 0,0119 |
| Anoda | 49,2945 | 49,2603 | 0,0342 |
| | 50,0706 | 50,0309 | 0,0397 |
| | 51,2806 | 51,2158 | 0,0648 |
| | 49,0618 | 49,0546 | 0,0072 |
| | 49,8600 | 49,8032 | 0,0568 |
| | 48,9537 | 48,8923 | 0,0614 |
| | 50,4800 | 50,4272 | 0,0528 |
| | 49,7070 | 49,6974 | 0,0096 |

4. RASPRAVA

4.1. Analiza rezultata karakterizacije uzorka procjedne vode iz kompostiranja biootpada

U tablici 4.1 uspoređene su karakteristike uzorka s maksimalnim dopuštenim koncentracijama (MDK) pokazatelja kakvoće otpadne vode propisane Pravilnikom o граниčnim vrijednostima emisija otpadnih voda.

Tablica 4.1 Usporedba karakteristika uzorka procjedne vode s MDK emisija otpadnih voda[29].

| | Uzorak | Površinske vode | Sustav javne odvodnje |
|--|--------|-----------------|-----------------------|
| pH | 7,95 | 6,50-9,00 | 6,50-9,50 |
| El. vodljivost, $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 205,00 | - | - |
| KPK, mg O_2/L | 278,32 | 125,00 | 700,00 |
| TKN, mg N/L | 30,82 | 15,00* | 50,00* |
| Mutnoća, NTU | 87,20 | - | - |
| TS, mg/L | 275,00 | 35 | - |
| Gdje je: KPK – kemijska potrošnja kisika; TKN – ukupni dupik po Kjeldahlu; TS – ukupni isparni ostatak | | | |

*vrijednosti predstavljaju ukupni dušik jer TKN nije propisan pravilnikom

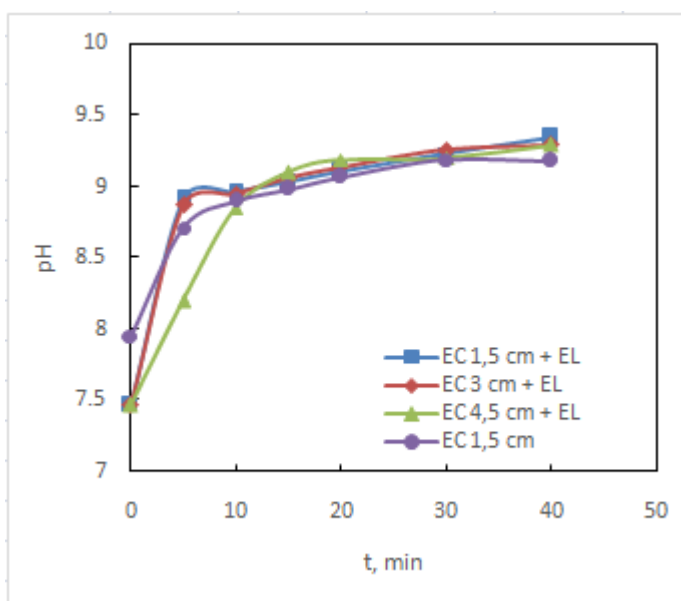
pH vrijednost uzorka simulirane procjedne vode iz procesa kompostiranja iznosi 7,95 i ne prelazi granične vrijednosti za ispust u površinske vode i u sustav javne odvodnje. Električna vodljivost iznosi 205,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a ukupni isparni ostatak iznosi 275,00 mg/L. Vrijednosti električne vodljivosti ukazuju na prisutnost otopljenih tvari koje imaju svojstvo ionske vodljivosti. Međutim u usporedbi s vrijednostima za električnu vodljivost procjednih voda nastalih procesom kompostiranja, iz tablice 1.1, one su znatno manje. Zbog toga je, za provođenje procesa elektrokoagulacije, potrebno dodati elektrolit kako bi se osigurala bolja vodljivost i manji otpor. Vrijednost kemijske potrošnje kisika (KPK) u uzorku iznosi 278,32 što ukazuje na prisutnost kako biorazgradivih tako i anorganskih tvari podložnih

oksidaciji s bikromatom. Ukupni dušik po Kjeldahlu (TKN) iznosi 30,82 mg N/L i pokazuje manje vrijednosti u odnosu na procjedne vode iz procesa kompostiranja (*tablica 1.1*). Mutnoća je jako velika i iznosi 87,20 NTU što je posljedica prisustva otopljenih i raspršenih tvari u procjednoj vodi. Iako vrijednosti za mutnoću nisu propisane ispuštanje vode ove mutnoće u prirodni recipijent izazvalo bi štetne posljedice na proces fotosinteze i sadržaj otopljenog kisika.

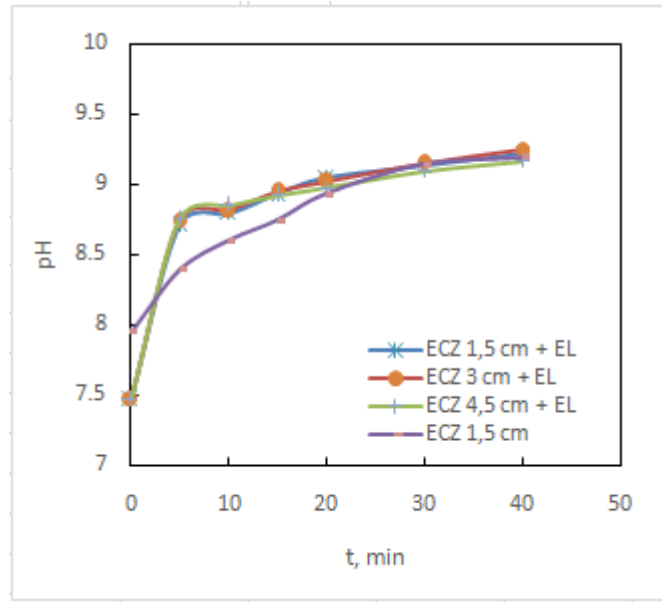
4.2. Analiza rezultata parametara praćenih prije tijekom i nakon provedbe integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

4.2.1. Analiza rezultata pH vrijednosti

Rezultati praćenja pH vrijednosti tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitoj udaljenosti elektroda prikazane u *tablici 3.2* su grafički obrađeni na *slikama 4.1* i *4.2*.

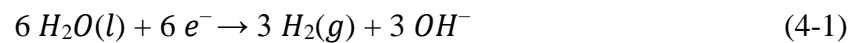


Slika 4.1 Grafički prikaz promjene pH vrijednosti u procesu elektrokoagulacije za uzorke s i bez dodatka elektrolita te bez dodatka zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm, 3cm, 4,5 cm (1 - 4)



Slika 4.2 Grafički prikaz promjene pH vrijednosti u procesu elektrokoagulacije za uzorke s i bez dodatka elektrolita te s dodatkom zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm (5 - 8)

Porast pH vrijednosti za vrijeme procesa elektrokoagulacije posljedica je reakcije hidrolize vode pri čemu dolazi do nastajanja vodika i hidroksidnih iona. [22]

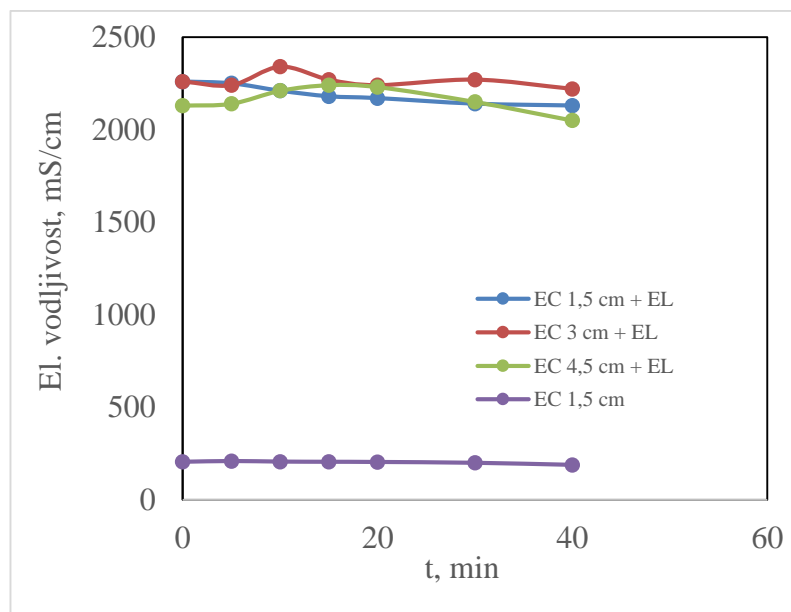


U eksperimentima provedenim bez dodatka zeolita (slika 4.1) vidljivo je da dolazi do porasta pH vrijednosti (9,18-9,35). Za uzorke s dodatkom elektrolita i udaljenosti elektroda 1.5 cm odnosno 3 cm uočava se nagli porast pH vrijednosti u prvih 5 minuta provođenja eksperimenta. Za uzorak s dodatkom elektrolita pri udaljenosti elektroda 4,5 cm također dolazi do povećanja pH vrijednosti, ali u dužem vremenskom intervalu tj. u prvih 10 minuta. Za uzorke sa dodatkom zeolita i elektrolita (slika 4.2) profil rasta pH vrijednosti je neovisan o udaljenosti elektroda i kreće se 9,16 - 9,21. Najveći porast je u prvih 5 minuta provođenja eksperimenta. Porast pH vrijednosti nešto je manji za uzorke koji sadrže zeolit zbog njegove sposobnosti neutralizacije (slika 4.1 i 4.2)

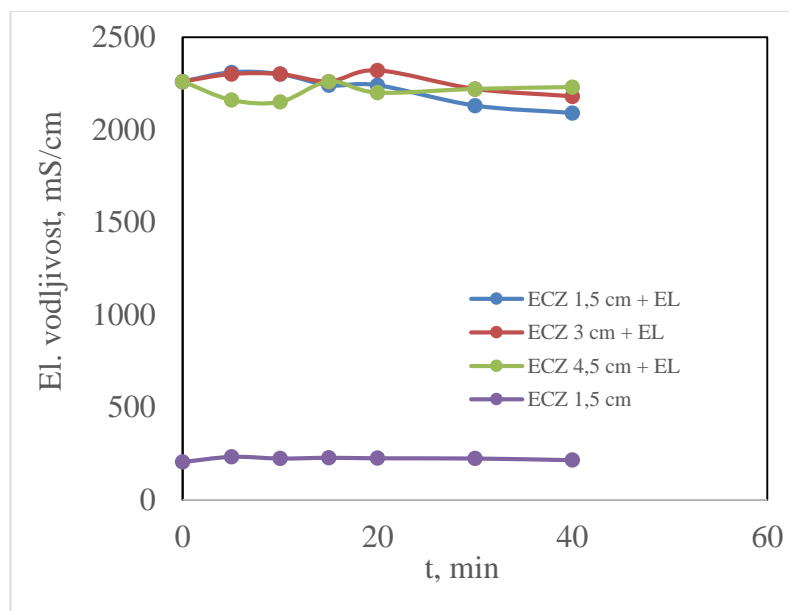
Za sustave bez dodatka zeolita dodatak elektrolita nema velik utjecaj na porast pH vrijednosti. Međutim u uzorcima koji sadrže zeolit dodatak elektrolita značajno mijenja profil rasta pH vrijednosti. Ovo je vidljivo na *slici 4.2* na primjeru uzoraka s dodatkom zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm sa i bez dodatka elektrolita. Dodatkom elektrolita dolazi do naglog porasta pH vrijednosti u prvih 5 min.

4.2.2. Analiza rezultata električne vodljivosti

Rezultati praćenja električne vodljivost tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenosti elektroda prikazane u *tablici 3.3* su grafički obrađeni na *slikama 4.3 i 4.4*.



Slika 4.3 Grafički prikaz promjene električne vodljivosti u procesu elektrokoagulacije za uzorke s i bez dodatka elektrolita, bez dodatka zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm, 3cm, 4,5 cm (1 - 4)

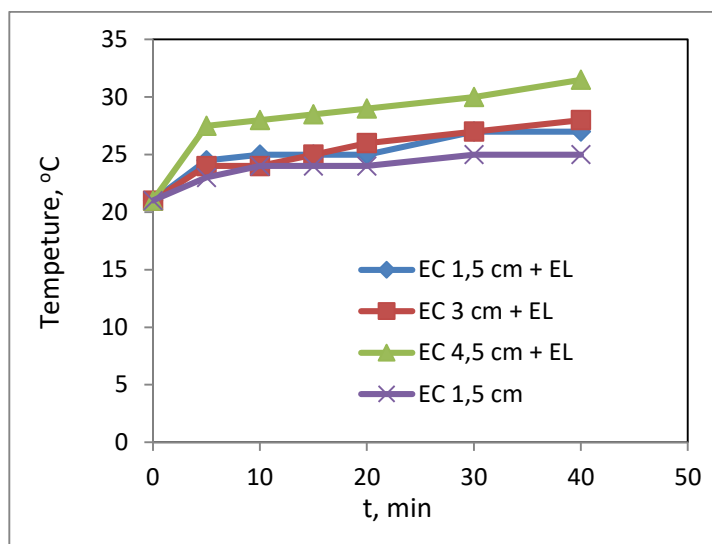


Slika 4.4 Grafički prikaz promjene električne vodljivosti u procesu elektrokoagulacije za uzorke s i bez dodatka elektrolita, s dodatkom zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm, 3cm, 4,5 cm (5 - 8)

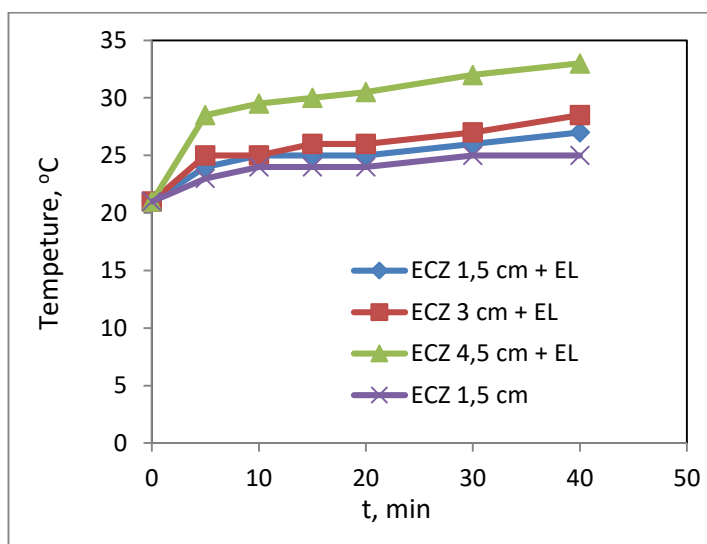
Iz grafičkih prikaza (slika 4.3 i 4.4) je vidljivo da električna vodljivost oscilira za vrijeme provedbe procesa. Isto tako može se primjetiti da električna vodljivost kod svih uzoraka pokazuje trend blagog pada. Razlog tom blagom padu pripisuje se smanjenjenju koncentracije štetnih tvari njihovim vezanjem na flokole nastale procesom elektrokoagulacije. Za uzorke kod kojih je proces proveden bez dodatka elektrolita električna vodljivost je znatno manja u odnosu na uzorke u koje je dodan elektrolit. Udaljenost elektroda (1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm) nema značajnog utjecaja na promjenu električne vodljivosti, kao ni dodatak zeolita.

4.2.3. Analiza rezultata temperature

Rezultati praćenja temperature tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenosti elektroda prikazane u *tablici 3.4* su grafički obrađeni na *slikama 4.5 i 4.6*.



Slika 4.5 Grafički prikaz promjene temperature u procesu elektrokoagulacije za uzorke s i bez dodatka elektrolita, bez dodatka zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm, 3cm, 4,5 cm (1 - 4)

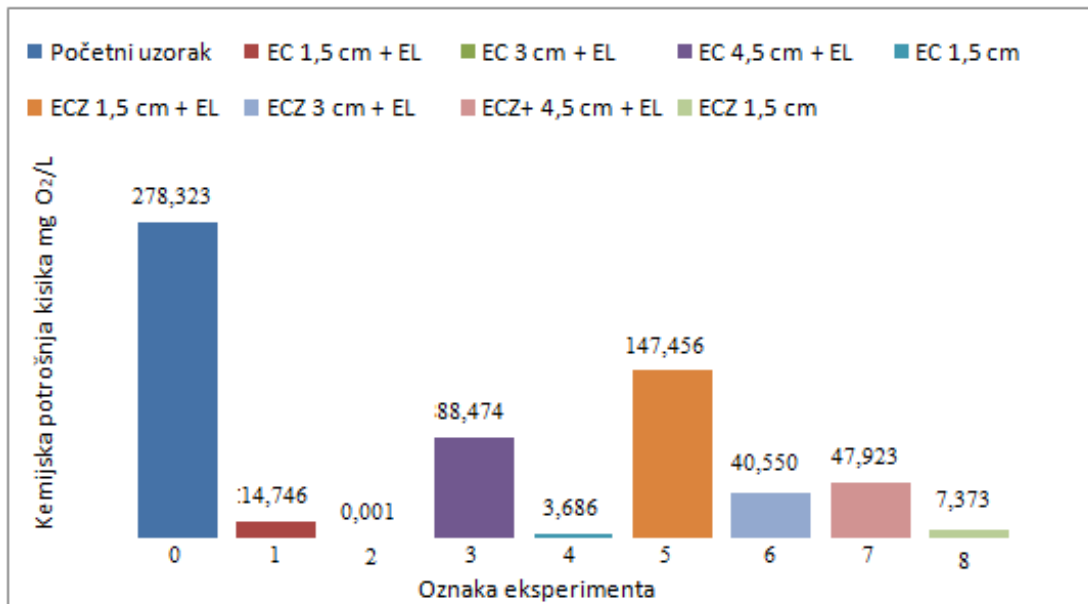


Slika 4.6 Grafički prikaz promjene temperature u procesu elektrokoagulacije za uzorke s i bez dodatka elektrolita, s dodatkom zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm, 3cm, 4,5 cm (5 - 8)

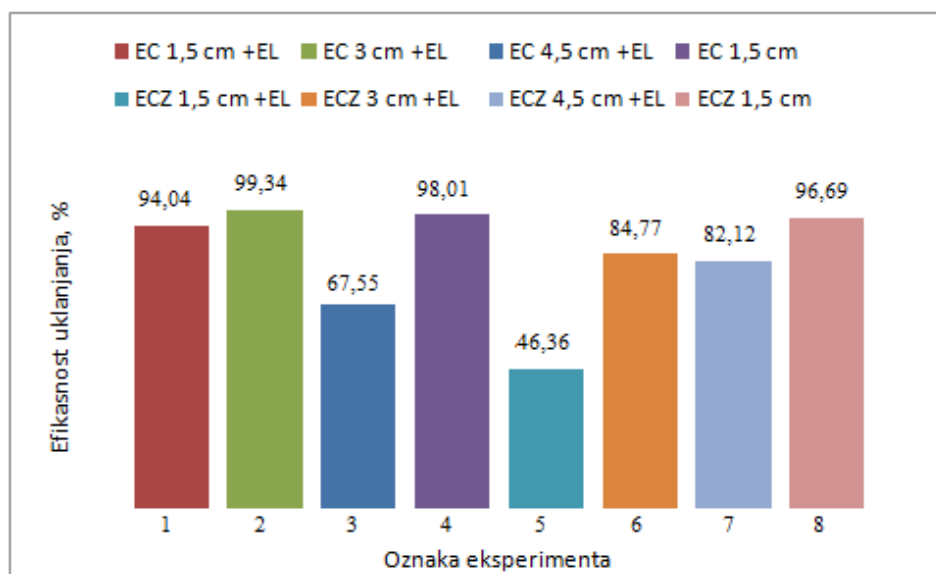
Iz grafičkih prikaza (*slika 4.5 i 4.6*) vidljivo je da za vrijeme provođenja procesa dolazi do blagog porasta temperature za sve uzorke bez obzira na dodatak elektrolita ili zeolita. Porast temperature je značajniji za uzorke kod kojih se proces provodi pri udaljenosti elektroda od 4,5 cm. Iz grafičkih prikaza može se uočiti trend porasta temperature ovisno o povećanju udaljenosti elektroda. Najveći rast temperature zabilježen je za udaljenost elektroda od 4,5 cm i iznosi 21-31,5 °C za eksperiment bez dodatka zeolita, odnosno 21-33 °C za eksperiment s dodatkom zeolita. Najmanje vrijednosti rasta temperature zabilježene su za uzorke bez dodatka elektrolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm i iznose 21- 25 °C. Ispuštanje otpadne vode povišene temperature u prirodne recipijente može uzrokovati termalno onečišćenje, stoga se u praktičnoj promjeni ovaj porast treba kontrolirati smanjenjem omjera površine elektroda i volumena procjedne vode koji se obrađuje.

4.2.4. Analiza rezultata kemijske potrošnje kisika (KPK)

Rezultati kemijske potrošnje kisika (KPK), prije i poslije integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, prikazani u *tablici 3.5* su grafički obrađeni na *slici 4.7*



Slika 4.7 Usporedba vrijednosti kemijske potrošnje kisika (KPK) za početni uzorak i uzorke (1-8) nakon procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda (1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm)

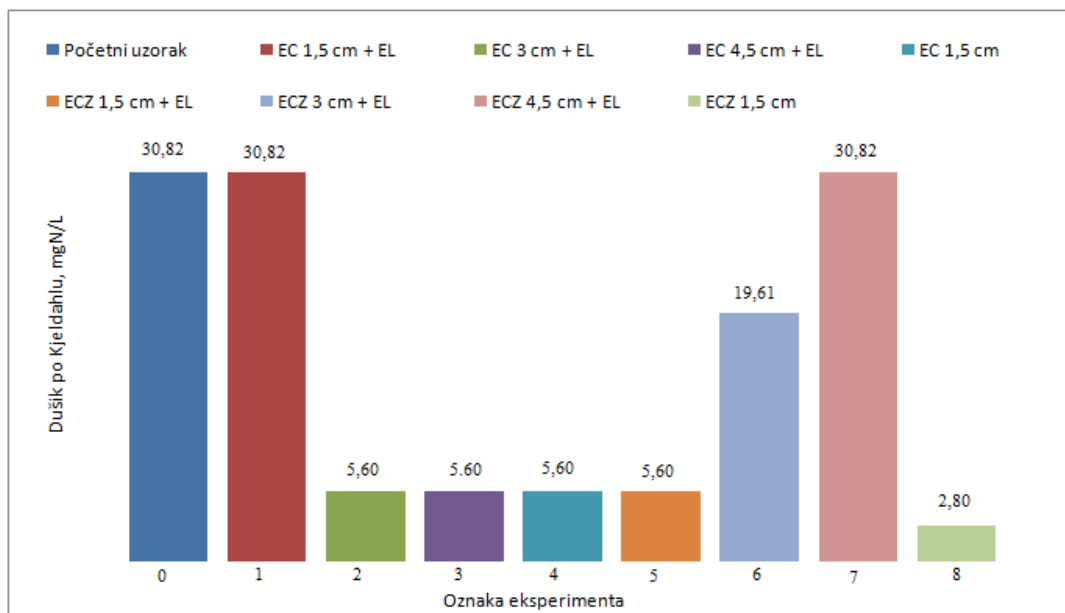


Slika 4.8 Grafički prikaz efikasnosti uklanjanja kemijske potrošnje kisika (KPK) u procesu elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

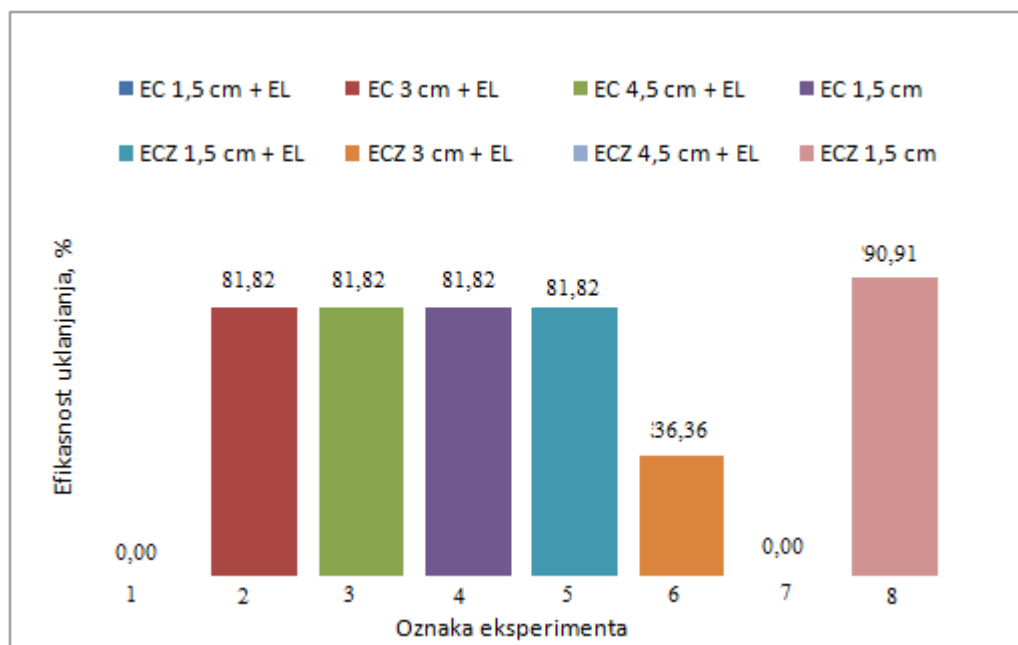
Kemijska potrošnja kisika za početni uzorak iznosi 278,32 mg/L. Nakon provedbe integriranog procesa za svaki od eksperimenata dolazi do značajnog smanjenja kemijske potrošnje kisika. Za uzorke bez dodatka zeolita najveća efikasnost uklanjanja postignuta je pri udaljenosti elektroda 3 cm i iznosi 99,34 %. Smanjivanjem udaljenosti elektroda na 1,5 cm dolazi do smanjenja efikasnosti uklanjanja na 94,04 %. Pri udaljenosti elektroda 4,5 cm dolazi do značajnijeg smanjenja na 67,55 %. Kod uzoraka s dodatkom zeolita i elektrolita (5-7) efikasnost uklanjanja je manja u odnosu na uzorke bez dodatka zeolita (1-3). Iznimka ovom pravilu su uzorci kod kojih je proces proveden pri udaljenosti elektroda 4,5 cm. Efikasnost uklanjanja u ovom slučaju je veća za uzorak s dodatkom zeolita i iznosi 82,12 %. Pri provođenju eksperimenta na uzorcima s dodatkom elektrolita i zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm izražen je utjecaj dodatka zeolita. Dodatkom zeolita se značajno smanjuje efikasnost uklanjanja te iznosi 46,36 % za razliku od uzorka bez dodatka zeolita gdje efikasnost uklanjanja iznosi 94,04 %. Iz ovoga se može zaključiti da dodatak zeolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm iznimno negativno utječe na proces elektrokoagulacije. Za uzorke bez dodatka elektrolita uklanjanja su visoka s i bez dodatka zeolita. Vrijednosti kemijske potrošnje kisika za sve eksperimente osim za eksperiment 5 su ispod maksimalnih dopuštenih koncentracija (MDK) i mogu se ispuštati u površinske vode. [28]

4.2.5. Analiza rezultata dušika po Kjeldahlu (TKN) za početni uzorak i uzorke nakon provedbe procesa

Rezultati dušika po Kjeldahlu, prije i poslije integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitoj udaljenosti elektroda, prikazani u *tablici 3.6* su grafički obrađeni na *slici 4.9*.



Slika 4.9 Usporedba vrijednosti dušika po Kjeldahlu za početni uzorak i uzorke (1-8) nakon procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

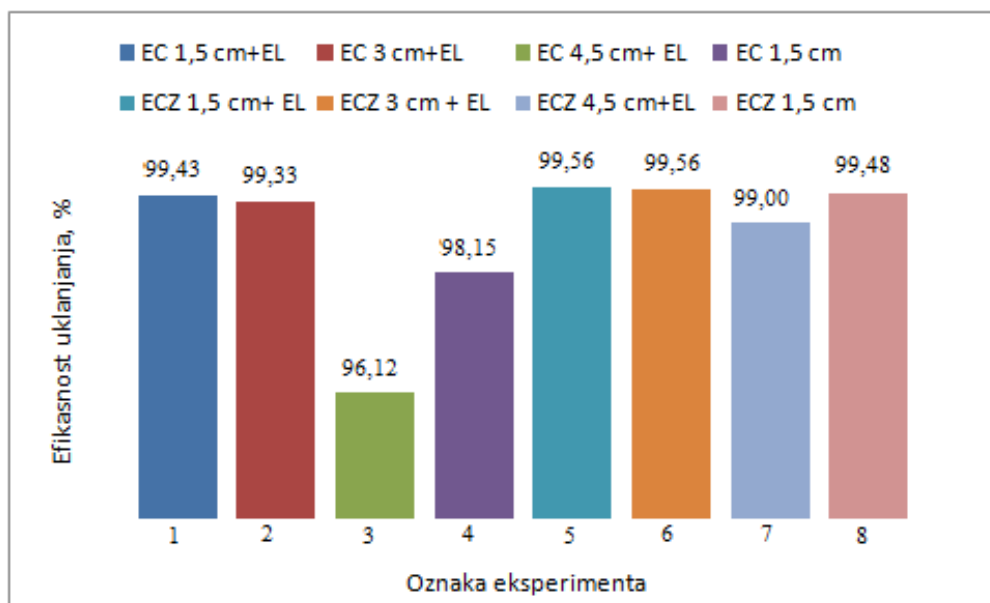


Slika 4.10 Grafički prikaz efikasnosti uklanjanja dušika po Kjeldahlu u procesu elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

Iz grafičkog prikaza je vidljivo da efikasnost uklanjanja dušika po Kjeldahlu ovisi o dodatku zeolita, elektrolita i udaljenosti elektroda. Za eksperimente 1 (bez zeolita uz dodatak elektrolita i udaljenost elektroda 1,5 cm) i 7 (sa dodatkom elektrolita i zeolita uz udaljenost elektroda 4,5 cm) učinak uklanjanja je jednak nuli. Najveća učinkovitost uklanjanja postiže se za eksperimente 4 i 8 provedene bez dodatka elektrolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm. Efikasnost uklanjanja je nešto veća uz dodatak zeolita i iznosi 90,91 % dok bez dodatka zeolita iznosi 81,82 %. Pri istoj udaljenosti elektroda dodatkom elektrolita dolazi do značajnog smanjenja efikasnosti za uzorak koji ne sadrži zeolit i ona iznosi 0,00 %. Povećanjem udaljenosti elektroda na 3 cm i 4,5 cm dolazi do povećanja efikasnosti na 81,82 %. Pri većim udaljenostima elektroda dodatak zeolita negativno utječe na efikasnost uklanjanja dušika po Kjeldahlu.

4.2.6. Analiza rezultata mutnoće

Rezultati mutnoće, prije i poslije integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitoj udaljenosti elektroda, prikazani u *tablici 3.7* su grafički obrađeni na *slici 4.11*

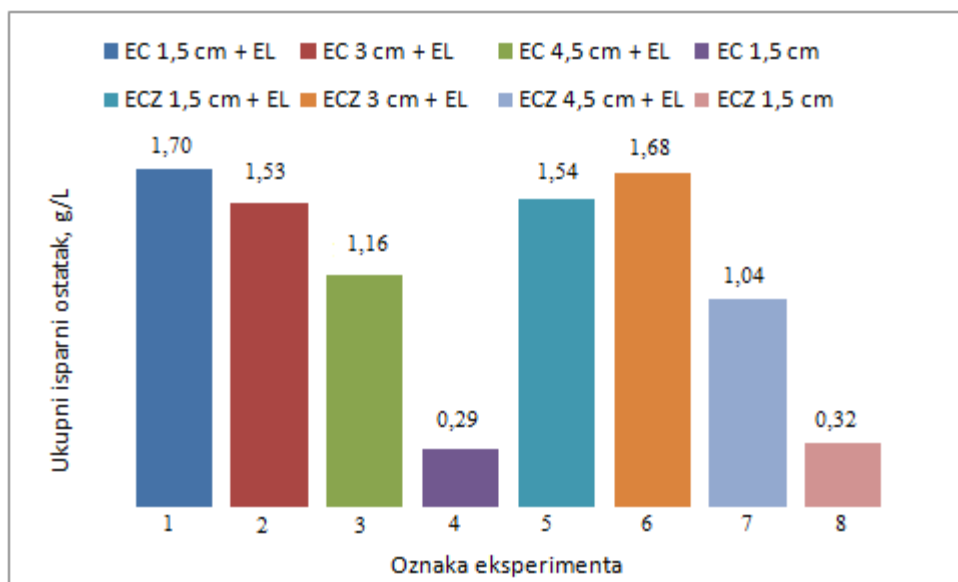


Slika 4.11 Grafički prikaz efikasnosti uklanjanja mutnoće u procesu elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

Učinak uklanjanja mutnoće je visok za sve uzorke bez obzira na prisustvo elektrolita ili zeolita te udaljenost elektroda. Najbolja efikasnost se postiže pri udaljenosti elektroda 1,5 cm i 3 cm uz dodatak zeolita i elektrolita. Najmanja efikasnost se postiže pri udaljenosti elektroda 4,5 cm bez dodatka zeolita uz dodatak elektrolita. Efikasnost uklanjanja je nešto veća za eksperimente provedene s dodatkom zeolita.

4.2.7. Analiza rezultata ukupnog isparnog ostatka

Rezultati ukupnog isparnog ostatka (TS), prije i poslije integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitoj udaljenosti elektroda, prikazani u tablici 3.8 su grafički obrađeni na slici 4.12.

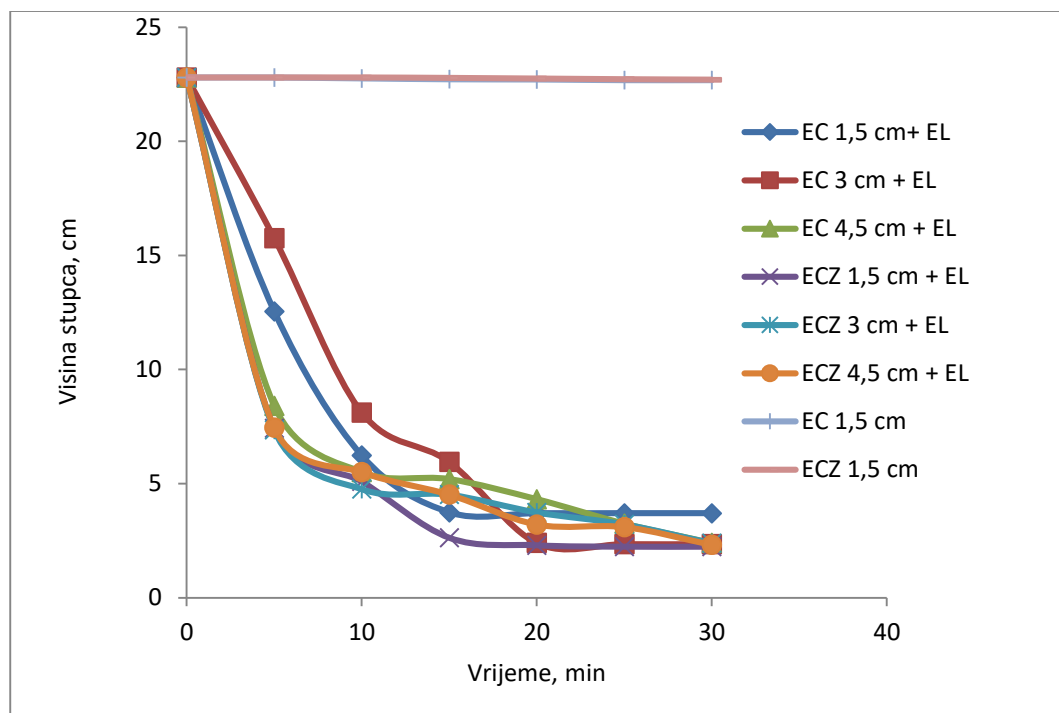


Slika 4.12 Grafički prikaz ukupnog isparnog ostatka nakon procesa elektrokoagulacije sa i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

Iz rezultata je vidljivo da dodatak elektrolita ima velik utjecaj na ukupni isparni ostatak tj. dolazi do povećanja ukupnog isparnog ostatka sa 0,295 odnosno 0,32 na 1,70 odnosno 1,54 g/L. Za uzorke bez dodatka zeolita povećanjem udaljenosti elektroda sa 1,5 cm na 3 cm i 4,5 cm dolazi do smanjenja ukupnog isparnog ostatka. U eksperimentima koji su provedeni sa zeolitom ukupni isparni ostatak je nešto manji u odnosu na uzorke bez zeolita što se može pripisati sposobnosti zeolita da na sebe veže dio onečišćenja.

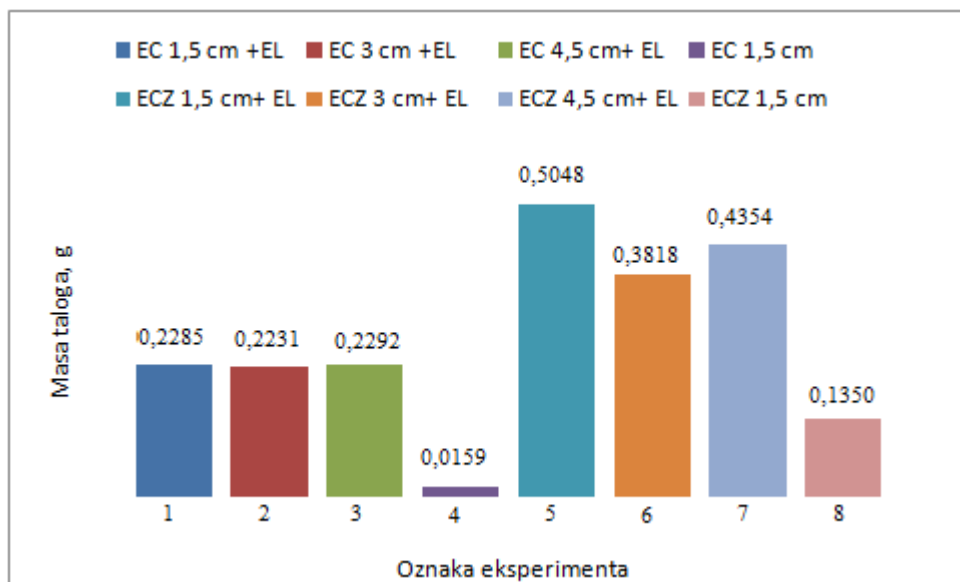
4.3. Analiza brzine taloženja suspenzije i mase taloga

Rezultati brzine taloženja, poslije integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitoj udaljenosti elektroda, prikazani u tablici 3.9 su grafički obrađeni na slici 4.13.



Slika 4.13 Grafički prikaz brzine taloženja suspenzije nakon procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

Kod svih uzoraka koji sadrže elektrolit taloženje je bilo potpuno u 30 minuta što je vidljivo iz ustaljivanja visine stupca taloga. Nagib krivulja taloženja, a time i brzine taloženja, je nešto veći za suspenzije od kojih je proces proveden s dodatkom zeolita u odnosu na suspenzije kod kojih je proces proveden bez dodatka zeolita. Udaljenost elektroda nema velik utjecaj na brzinu taloženja. U suspenzijama u kojima je proces proveden bez dodatka elektrolita taloženje je bilo veoma sporo te u vremenskom intervalu od 30 min nije došlo do razdvajanja taloga iz suspenzije. Mase dobivenih taloga prikazane su u tablici 3.10, a grafički su obrađene na slici 4.14



Slika 4.14 Grafički prikaz masa taloga nakon procesa elektrokoagulacije sa i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

Mase taloga bez dodatka elektrolita iznose 0,1159 g (eksperiment 4) i 0,1350 g (eksperiment 8). Dodatkom elektrolita za iste udaljenosti elektroda mase taloga rastu i iznose 0,2285 g (eksperiment 1) te 0,5048 g (eksperiment 5). Mase taloga rastu i dodatkom zeolita, a udaljenost elektroda nema izražen utjecaj na masu taloga.

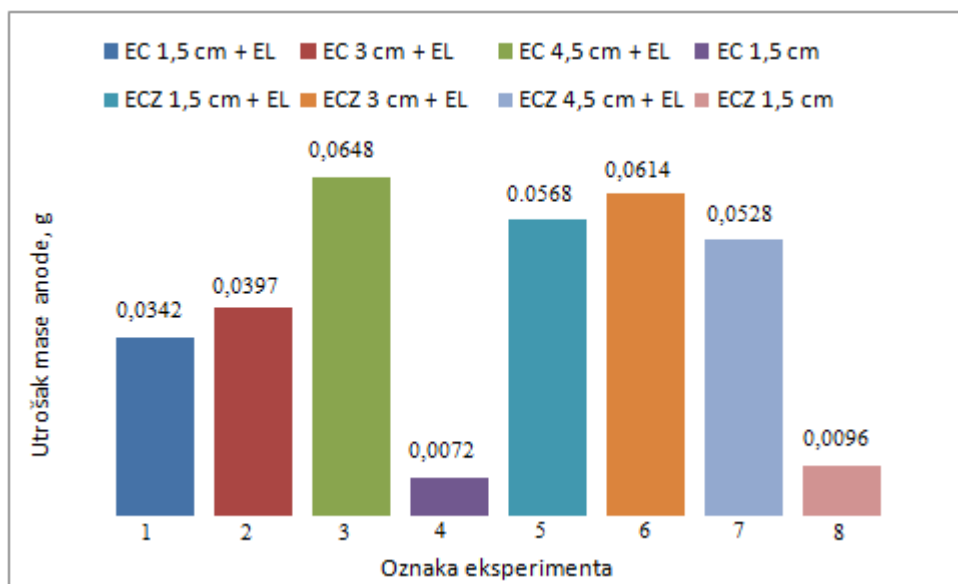
4.4. Analiza rezultata masa elektroda

U tablici 3.11. prikazane su vrijednosti masa elektroda prije i nakon provedbe procesa. Osim očekivanog smanjenja masa žrtvovanih anoda dolazi i do smanjenja masa katoda. Uzrok smanjenju masa katoda je reakcija koja se odvija na katodama:

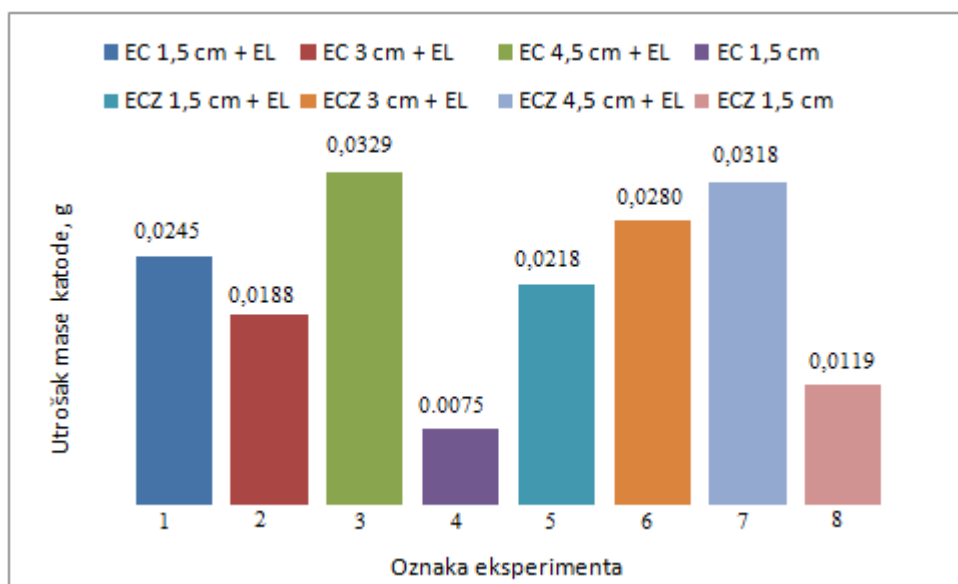


Do ove reakcije dolazi zbog napada OH⁻ iona, nastalih u reakciji izlučivanja vodika, te dolazi do otapanja katode. [30]

Rezultati utroška masa elektroda, integriranog procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitom udaljenosti elektroda, prikazani u *tablici 3.11* su grafički obrađeni na *slikama 4.15 i 4.16*



Slika 4.15 Grafički prikaz utroška mase anode iz procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm



Slika 4.16 Grafički prikaz utroška mase katode iz procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda 1,5 cm, 3 cm, 4,5 cm

Iz grafičkog prikaza je vidljivo da je potrošnja anoda veća u odnosu na potrošnju katoda. Porastom udaljenosti elektroda raste i potrošnja anoda te katoda. Najmanja potrošnja elektroda se dobije bez dodatka elektrolita na udaljenosti od 1,5 cm. Dodatkom zeolita raste potrošnja elektroda.

4.5. Analiza operativnih troškova

U operativne troškove procesa se ubrajaju svi troškovi nastali za vrijeme nabave materijala korištenih u procesu, za vrijeme provođenja procesa te nakon provođenja procesa. U slučaju procesa elektrokoagulacije ti troškovi se sastoje od: utroška materijala elektroda, potrošnje električne energije i zeolita te zbrinjavanja otpadnog mulja. [28]

Operativni troškovi procesa za uzorke bez dodatka zeolita računaju se prema formuli:

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

Za uzorke s dodatkom zeolita dodaje se trošak upotrebljenog zeolita:

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

gdje je:

- a – Pretpostavljeni iznos cijene električne energije prema važećim HEP tarifnim modelima za poduzetništvo [31]
- b – prosječna tržišna cijena aluminija [31]
- c- prosječna cijena prirodnog zeolita [32]

Utrošak mase elektroda računa se prema Faradayevom zakonu:

$$C_{\text{elektroda}} = \frac{I \cdot t \cdot M_w}{z \cdot F \cdot V} \quad (4-5)$$

Utrošak električne energije računa se prema izrazu:

$$C_{\text{energija}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{V} \quad (4-6)$$

U izračun operativnih troškova nisu uključeni troškovi potrošnje elektrolita.

Tablica 4.2 Oznake, vrijednosti i jedinice veličina korištenih u proračunu

| Oznaka | Jedinica | Iznos |
|------------------------|----------------------|---------|
| C_{energija} | kWh/m ³ | - |
| $C_{\text{elektroda}}$ | kg Al/m ³ | - |
| C_{zeolit} | kg /m ³ | - |
| a | kn/ kWh | 0,95 |
| b | kn/kg | 11,6 |
| c | kn/kg | 0,5 |
| M_w | g/mol | 26,98 |
| z | - | 3 |
| F | C/mol | 96 487 |
| U | V | - |
| I | A | - |
| t | S | 2400 |
| V | m ³ | 0,00025 |

U sljedećim tablicama (4.3 i 4.4) prikazane su vrijednosti operativnih troškova izračunate na osnovi teorijskog utroška elektroda i vrijednosti operativnih troškova izračunate iz stvarnog utroška elektroda.

U tablici 4.3 prikazane su vrijednosti operativnih troškova procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita, elektrolita i pri različitim udaljenostima elektroda, izračunati na osnovi Faradayevog zakona.

Tablica 4.3 Vrijednosti operativnih troškova procesa izračunati preko Faradayevog zakona

| | U, V | I, A | C _{energija} · a, kn/(kWh/m ³) | C _{elektroda} · b, kn/kg | C _{zeolit} · c, kn/kg | Ukupno. kn/m ³ | Prosječni trošak, kn/m ³ |
|-----------------|------|------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--|
| EC 1,5 cm + EL | 8,3 | 0,3 | 6,245 | 3,115 | | 9,360 | 13,824 |
| EC 3 cm + EL | 13,4 | 0,3 | 10,082 | 3,115 | | 13,197 | |
| EC 4,5 cm + EL | 16,1 | 0,3 | 12,114 | 3,115 | | 15,229 | |
| EC 1,5 cm | 22,8 | 0,1 | 5,718 | 1,038 | | 6,757 | |
| ECZ 1,5 cm + EL | 9,3 | 0,3 | 6,997 | 3,115 | 10 | 20,112 | 21,1,0 |
| ECZ 3 cm + EL | 12,8 | 0,3 | 9,631 | 3,115 | 10 | 22,746 | |
| ECZ 4,5 cm + EL | 16,1 | 0,3 | 12,114 | 3,115 | 10 | 25,229 | |
| ECZ 1,5 cm | 21,2 | 0,1 | 5,317 | 1,038 | 10 | 16,355 | |

Najveća potrošnja napona je bila za eksperimente bez dodatka elektrolita. Dodatkom elektrolita napon pada a struja raste na 0,3 A. Povećanjem udaljenosti elektroda napon raste a struja ostaje ista.

Tablica 4.4 Vrijednosti operativnih troškova procesa izračunati preko smanjenja masa elektroda

| | C _{energija} · a, kn/(kWh/m ³) | C _{elektroda} · b, kn/kg | C _{elektroda} · b, kn/kg | C _{zeolit} · c, kn/kg | Ukupno. kn/m ³ | Prosječni trošak, kn/m ³ |
|-----------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--|
| | | anoda | katoda | | | 11,203 |
| EC 1,5 cm + EL | 6,245 | 1,587 | 1,137 | | 8,969 | |
| EC 3 cm + EL | 10,082 | 1,842 | 0,872 | | 12,797 | |
| EC 4,5 cm + EL | 12,114 | 3,007 | 1,526 | | 16,647 | |
| EC 1,5 cm | 5,718 | 0,334 | 0,348 | | 6,400 | |
| ECZ 1,5 cm + EL | 6,997 | 2,635 | 1,012 | 10 | 20,644 | 21,694 |
| ECZ 3 cm + EL | 9,631 | 2,849 | 1,299 | 10 | 23,779 | |
| ECZ 4,5 cm + EL | 12,114 | 2,449 | 1,475 | 10 | 26,039 | |
| ECZ 1,5 cm | 5,317 | 0,445 | 0,552 | 10 | 16,315 | |

Iz analize operativnih troškova procesa može se zaključiti kako proces elektrokoagulacije proveden bez dodatka zeolita zahtjeva manje operativne troškove. Prosječni operativni

troškovi za elektrokoagulaciju bez dodatka zeolita prema Faradayevom zakonu iznose 13.824 kn/m³. Prosječni troškovi istog procesa izračunati po masama utrošenih elektroda iznose 11.203 kn/m³. Za eksperimente provedene uz dodatak zeolita operativni troškovi su veći i iznose 21.110 kn/m³ ukoliko se računaju korištenjem Faradayevog zakona, odnosno 21.694 kn/m³ ukoliko se računaju preko utroška masa elektroda. Efikasnost uklanjanja kemijske potrošnje kisika i dušika po Kjeldahlu je bila nešto veća za procese elektrokoagulacije provedene bez dodatka zeolita, ali u obzir treba uzeti činjenicu da je maksimalna efikasnost uklanjanja dušika po Kjeldahlu dobivena za eksperiment proveden s dodatkom zeolita. Važno je naglasiti i da su brzine taloženja u prosjeku nešto veće za eksperimente provedene sa zeolitom, što ubrzava cjelokupan proces pročišćavanja. Za vrijeme provođenja eksperimenata bilo je uočljivo znatno brže bistrenje suspenzija koje su sadržavale zeolit. Budući da se razlika u troškovima između procesa provedenih s i bez zeolita svodi upravo na troškove nabave zeolita važno je naglasiti kako je nakon provedbe procesa moguća regeneracija korištenog zeolita. Vidljiv je utjecaj udaljenosti elektroda na troškove procesa. Troškovi procesa rastu s povećanjem udaljenosti elektroda kako za eksperimente provedene s dodatkom zeolita tako i za eksperimente provedene bez dodatka zeolita.

5. ZAKLJUČAK

1. Simulirana procjedna voda procesa kompostiranja opterećena je organskom i anorganskom tvari, (kemijske potrošnja kisika iznosi 278,32 mg O₂/L), sadržajem organskog i amonijakalnog dušika (dušik po Kjeldahlu i iznosi 30,82 mgN/L), izražene mutnoće (87,20 NTU) te umjerene vrijednosti električne vodljivosti (205 µS/cm) i ukupnog isparnog ostatka (275 mg/L). pH vrijednost iznosi 7,95. Usporedbom ovih vrijednosti s MDK prema pravilniku o emisijama otpadnih voda može se zaključiti kako se dobiveni uzorak simulirane procjedne vode može ispustiti u sustav javne odvodnje ali, ne i u površinske vode.
2. Za vrijeme provedbe procesa dolazi do povećanja pH vrijednosti sa 7,95 na maksimalnih 9,35 za uzorke bez dodatka zeolita, odnosno 9,24 za uzorke s dodatkom zeolita. Dodatak elektrolita nema utjecaja na pH vrijednost u uzorcima bez dodatka zeolita, dok za uzorke s dodatkom zeolita dolazi do promjene profila rasta pH vrijednosti. Promjena udaljenosti elektroda nema utjecaj na pH vrijednost.
3. Električna vodljivost pokazuje blagi trend pada za vrijeme provođenja eksperimenta. Pad električne vodljivosti za vrijeme procesa može se objasniti vezanjem štetnih tvari na flokule nastale elektrokoagulacijom.
4. Tijekom procesa temperatura raste što predstavlja problem jer može dovesti do termalnog onečišćenja.
5. Efikasnost uklanjanja kemijske potrošnje kisika ima nešto više vrijednosti za uzorke bez dodatka zeolita (67,55 % -99,34 %) u odnosu na vrijednosti za uzorke s dodatkom zeolita (46,36 %- 96,69 %). Smanjenjem udaljenosti elektroda sa 4,5 cm na 3 cm te zatim na 1,5 cm kemijska potrošnja kisika pada pa raste. Dodatak zeolita pri udaljenosti 1,5 cm negativno utječe na efikasnost uklanjanja kemijske potrošnje kisika.

6. Efikasnost uklanjanja dušika po Kjeldahlu ovisi o dodatku zeolita, elektrolita i udaljenosti elektroda. Najveća učinkovitost uklanjanja postiže se za eksperimente provedene bez dodatka elektrolita pri udaljenosti elektroda 1,5 cm. Efikasnost uklanjanja je nešto veća uz dodatak zeolita i iznosi 90,91 % dok bez dodatka zeolita iznosi 81,82 %. Pri većim udaljenostima elektroda dodatak zeolita negativno utječe na efikasnost uklanjanja dušika po Kjeldahlu.
7. Kod svih eksperimenata koji sadrže elektrolit taloženje je bilo potpuno u 30 minuta, dok za uzorke bez elektrolita nije bilo moguće provesti taloženje. Nagib krivulje taloženja nešto je veći za uzorke s dodatkom zeolita. Uklanjanje mutnoće je visoko za sve uzorke, bez obzira na dodatak elektrolita i zeolita, te iznosi 96,12% - 99,56 %
8. Prosječni operativni troškovi za elektrokoagulaciju bez dodatka zeolita prema Faradayevom zakonu iznose 13,824 kn/m³. Prosječni troškovi istog procesa izračunati po masama utrošenih elektroda iznose 11,203 kn/m³. Za uzorke kod kojih je proces proveden uz dodatak zeolita operativni troškovi su veći i iznose 21,110 kn/m³ ukoliko se računaju korištenjem Faradayevog zakona, odnosno 21,694 kn/m³ ukoliko se računaju preko utroška masa elektroda.
9. Na temelju prikazanih rezultata vidljivo je da uz dodatak elektrolita i dodatka zeolita značajno utječe na parametre: kemijsku potrošnju kisika (značajno oscilira), dušik po Kjeldahlu (značajno oscilira), temperaturu i pH (rastu), vodljivost (opada). Ukupni isparni ostatak raste dodatkom elektrolita, a brzina taloženja suspenzije uz dodatak elektrolita i zeolita je bolja. Uklanjanje mutnoće je visoko neovisno o uvjetima provođenja procesa. Rezultati pokazuju da udaljenost elektroda, dodatak elektrolita i zeolita značajno utječu na vrijednosti pokazatelja, brzinu taloženja, potrošnju elektroda i masu taloga.

6. LITERATURA

1. HAOP, *Stanje gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj*, (2016) 6-10.
2. Graves, R. E., Hattemer, G. M., *National Engineering Handbook., Composting*, United States Department of Agriculture, (2000) 10-12.
3. https://www.der.wa.gov.au/images/documents/our-work/licences-and-works-approvals/Applications/3_Electrocoagulation_Overview.pdf (07.10. 2021.)
4. Mgbemere, H.E., Ekpe, I.C., Lawal, G.I., *Zeolite Synthesis, Characterization and Application Areas: A Review*, Vol. 6(10), 45-59, (2017) 45, 47.
5. Roy, D., Azais, A., Benkaraache, S., Drogui, P., Tyagi, R.D., *Composting leachate: characterization, treatment and future perspectives*, Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 17 (2018) 323-349.
6. Krogmann, U., Woyczehowski, H., *Selected characteristics of leachate, condensate and runoff released during composting of biogenic waste*, Waste Management & Research 18(3) (2000) 235-240.
7. Rajabi, S., Vafajoo, L., *Investigating the treatability of a compost leachate in a hybrid anaerobic reactor: an experimental study*, Int. J. Environ. Chem. Ecol. Geol. Geophys. Eng. 6(1) (2012) 42-45.
8. Diver, S., *Notes on Compost Teas: A Supplement to the ATTRA*, (2002).
9. Cho, J.K., Park, S.C., Chang, H.N., *Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes*, Biores. Technol. 52(3) (1995) 245-250.
10. C. I. O. S. Grupa, *Postrojenje za kompostiranje biorazgradivog otpada - Kloštar Ivanić, idejni projekt*, (2014)
[Postrojenje za kompostiranje biorazgradivog otpada - Kloštar Ivanić \(klostar-ivanic.hr\)](http://postrojenjezaikompostiranje.com)
11. *Zavod za elektrokemiju i zaštitu materijala, Recikliranje krutog otpada*, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split (2021)
12. Henze, M., Harremoës, P., la Cour Jansen, J., Arvin, E., *Wastewater treatment: biological and chemical processes*, Springer. Berlin Heidelberg, (2002).
13. Bolea, E., Laborda, F., Castillo, J.R., *Metal associations to microparticles, nanocolloids and macromolecules in compost leachates: size characterization by*

- asymmetrical flow field-flow fractionation coupled to ICP-MS*, Anal. Chim. Acta. 661(2) (2010) 206-214.
14. Đukić, V., *Uspješnost obrade komunalne otpadne vode u membranskom bioreaktoru* Panevropski univerzitet APEIRON, Banja Luka , Tehnika – Naše građevinarstvo, 69 (2015) 920-928.
 15. Martinović, M., *Obrada otpadnih voda tehnologijom membranskog bioreaktora*, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek,(2016).
 16. Simonič, M., *Compost leachate treatment using polyaluminium chloride and nanofiltration*, Open. Chem. 15 (2017) 123-128.
 17. Kargi, F., Pamukoglu, M. Y., *Simultaneous adsorption and biological treatment of pre-treated landfill leachate by fed-batch operation*, Process Biochemistry 38 (2003) 1413-1420.
 18. Bae, B-U., Jung, E-S., Kim, Y-R., Shin, H-S., *Treatment of Landfill Leachate Using Activated Sludge Process and Electron-Beam Radiation*, Wat. Res. Vol. 33, No. 11, pp., (1999) 2669-2673.
 19. https://www.der.wa.gov.au/images/documents/our-work/licences-and-works-approvals/Applications/3_Electrocoagulation_Overview.pdf (06.10.2021.)
 20. Vepsäläinen, M., Sillanpää, M., *Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters*, Advanced Water Treatment, Electrochemical methods (2020) 1-78.
 21. Jukić, I., *Analiza i obrada procjednih voda od kompostiranja biootpada*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Kemijsko- tehnološki fakultet, Split, (2021)
 22. Mouedhena, M., Feki, M., Ayedi H.F., *Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process*, Journal of Hazardous Materials 150 (2008) 124–135.
 23. Petković, I., *Primjena elektrokemijskih procesa u pročišćavanju vode od pranja ruku*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2019.
 24. Bazrasafshan, E., Ownagh, K. A., Mahvi, A.H., *Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes for Fluoride Removal from Aqueous Environment*, E-Journal of Chemistry, 9(4), (2012), 2297-2308.

25. Kovačić, T., Andričić, B., *Kataliza*, Sveučilište u Splitu, Kemijsko- tehnološki fakultet, Split, (2010).
26. [Zeolite Granules Media bag \(pacificwater.com.au\)](http://zeolitegranulesmedia.com.au) (24.10.2021.)
27. Šunjić, A., *Analiza procesa kompostiranja biootpada*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Kemijsko- tehnološki fakultet, Split, (2020).
28. Vukojević Medvidović, N., *Lead removal on natural zeolite clinoptilolite- column process modelling*, Doctoral theses, Faculty of chemistry and tehnology in Split, Split (2007)
29. Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda NN 26/20, Tablica 1, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_26_622.html
30. 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) 97e105.
31. Lončar, G., Halkijević, I., Posavčić, H., Ban, I., *Primjena elektrokoagulacijskog uređaja s ciljem smanjenja koncentracije amonijaka*, Hrvatske vode 27 (2019) 108, 129-142.
32. Edith M. Flanigen , Robert W. Broach and Stephen T. Wilson, *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis*, Wiley Online Library, Chapter 1, 2010.