

Analiza utjecaja brzine vrtnje miješala, dodatka zeolita i elektrolita na učinkovitost obrade procjedne vode iz kompostiranja biootpada primjenom integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu

Bobanović, Anđela

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:967581>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**ANALIZA UTJECAJA BRZINE VRTNJE MIJEŠALA, DODATKA
ZEOLITA I ELEKTROLITA NA UČINKOVITOST OBRADNE
PROCJEDNE VODE IZ KOMPOSTIRANJA BIOOTPADA PRIMJENOM
INTEGRIRANOG PROCESA ELEKTROKOAGULACIJE I OBRADNE NA
PRIRODNOM ZEOLITU**

DIPLOMSKI RAD

ANDELA BOBANOVIĆ

Matični broj: 305

Split, studeni 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNILOGIJE:
ZAŠTITA OKOLIŠA

**ANALIZA UTJECAJA BRZINE VRTNJE MIJEŠALA, DODATKA
ZEOLITA I ELEKTROLITA NA UČINKOVITOST OBRADNE
PROCJEDNE VODE IZ KOMPOSTIRANJA BIOOTPADNA PRIMJENOM
INTEGRIRANOG PROCESA ELEKTROKOAGULACIJE I OBRADNE NA
PRIRODNOM ZEOLITU**

DIPLOMSKI RAD

ANDELA BOBANOVIĆ

Matični broj: 305

Split, studeni 2021.

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

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF STIRRING SPEED, ADDITION
OF ZEOLITE AND ELECTROLYTE ON THE EFFICIENCY OF
TREATMENT OF LEACHATE FROM COMPOSTING OF BIOWASTE
USING THE INTEGRATED ELECTROCOAGULATION PROCESS AND
TREATMENT ON NATURAL ZEOLITE**

MASTER THESIS

ANDELA BOBANOVIĆ

Parent number: 305

Split, November 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu

Sveučilišni diplomski studij kemijske tehnologije: Zaštita okoliša

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijско inženjerstvo

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

Mentor: prof. dr. sc. Nediljka Vukojević Medvidović

ANALIZA UTJECAJA BRZINE VRTNJE MIJEŠALA, DODATKA ZEOLITA I ELEKTROLITA NA UČINKOVITOST OBRADNE PROCJEDNE VODE IZ KOMPOSTIRANJA BIOOTPADA PRIMJENOM INTEGRIRANOG PROCESA ELEKTROKOAGULACIJE I OBRADNE NA PRIRODNOM ZEOLITU

Andela Bobanović, 305

Sažetak: Procesom kompostiranja nastaje kompost kao korisni proizvod te procjedna otpadna voda opterećena organskim onečišćenjima i teškim metalima. Upravo zbog toga postoji potreba za njenom obradom. Uzorak simulirane procjedne vode iz kompostiranja biootpada obrađen je integriranim procesom elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita i elektrolita. Ispitivan je utjecaj različite brzine vrtnje miješala (70, 200 i 400 rpm) na učinkovitost procesa preko parametara: pH vrijednost, električna vodljivost, kemijška potrošnja kisika, dušik po Kjeldahlu, temperatura, mutnoća i ukupni isparni ostatak. Uz navedene pokazatelje praćena je i brzina taloženja. Prikupljeni su podaci za utrošak masa elektroda za vrijeme procesa iz čega su određeni operativni troškovi procesa. Rezultati pokazuju da brzina vrtnje miješala, dodatak zeolita i elektrolita mogu utjecati na efikasnost uklanjanja kemijške potrošnje kisika i dušika po Kjeldahlu. Vidljiv je porast temperature i pH dok električna vodljivost prikazuje blagi trend pada. Uklanjanje mutnoće je vrlo visoko, neovisno o promjeni parametara. Vrijednosti ukupnog isparnog ostatka su manje dodatkom zeolita jer on na sebe veže onečišćenja, ali je brzina taloženja bolja uz dodatak elektrolita i zeolita uz manje brzine vrtnje miješala.

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

Rad sadrži: 59 stranica, 19 slika, 19 tablica, 15 grafova, 20 literaturnih referenci

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 Kemijско-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, Split.

BASIC DOCUMENTATION CARD

MASTER 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 2020)

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF STIRRING SPEED, ADDITION OF ZEOLITE AND ELECTROLYTE ON THE EFFICIENCY OF TREATMENT OF LEACHATE FROM COMPOSTING OF BIOWASTE USING THE INTEGRATED ELECTROCOAGULATION PROCESS AND TREATMENT ON NATURAL ZEOLITE

Andela Bobanović, 305

Abstract: The composting process produces compost as a useful product and leachate loaded with organic pollutants and heavy metals. That is why there is a need for its processing. Simulated leachate from composting of biowaste was processed by an integrated electrocoagulation process with and without the addition of zeolite and electrolyte. The influence of different stirring speed (70, 200 and 400 rpm) on the process efficiency was investigated over parameters: pH value, electrical conductivity, chemical oxygen demand, total Kjeldahl nitrogen, temperature, turbidity and total solids. In addition to the above indicators, the settling test was also performed. Data for the consumption of electrode masses during the process were collected from which the operational costs of the process were determined. The results show that the stirring speed, the addition of zeolite and electrolyte can affect the efficiency of removal of chemical consumption of oxygen and nitrogen according to Kjeldahl. An increase in temperature and pH is visible while the electrical conductivity shows a slight downward trend. Turbidity removal is very high, independent of parameter changes. The values of the total solids are less with the addition of zeolite because it binds contaminants, but the settling test is better with the addition of electrolyte and zeolite with lower stirring speed.

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

Thesis contains: 59 pages, 19 figures, 19 tables, 15 graphs, 20 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, u razdoblju od lipnja 2021. do studenog 2021.

Istraživanja su provedena u okviru projekta „Razvoj novog hibridnog procesa za obradu otpadnih voda na bazi elektrokoagulacije i prirodnog zeolita“ financiran 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.

Posebno hvala mojoj kolegici Mariji koja mi je svojom podrškom i razumijevanjem uvelike olakšala studiranje.

Na kraju, želim se zahvaliti i svojim roditeljima koji su mi omogućili bezbrižno studiranje. Hvala vam na beskrajnom strpljenju i razumijevanju.

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

1. Priprava uzorka simulirane procjedne otpadne vode iz procesa kompostiranja biootpada i određivanje njegovih karakteristika.
2. Provedba postupka elektrokoagulacije pri različitim brzinama miješanja, sa i bez dodatka zeolita i elektrolita.
3. Određivanje učinkovitosti elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita i elektrolita preko procesnih parametara (pH, električna vodljivost, temperatura, mutnoća, KPK, dušik po Kjeldahlu i ukupni isparni ostatak).
4. Određivanje brzine taloženja suspenzije nakon provedbe procesa elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita i elektrolita.
5. Analiza operativnih troškova te izvedba zaključaka o isplativosti navedenog postupka.

SAŽETAK

Procesom kompostiranja nastaje kompost kao koristan proizvod te procjedna otpadna voda opterećena organskim onečišćenjima i teškim metalima. Upravo zbog toga postoji potreba za njenom obradom. Uzorak simulirane procjedne vode iz kompostiranja biootpada obrađen je integriranim procesom elektrokoagulacije s i bez dodatka zeolita i elektrolita. Ispitivan je utjecaj različite brzine vrtnje miješala (70, 200 i 400 rpm) na učinkovitost procesa preko parametara: pH vrijednost, električna vodljivost, kemijska potrošnja kisika, dušik po Kjeldahlu, temperatura, mutnoća i ukupni isparni ostatak. Uz navedene pokazatelje praćena je i brzina taloženja. Prikupljeni su podaci za utrošak masa elektroda za vrijeme procesa iz čega su određeni operativni troškovi procesa.

Rezultati pokazuju da brzina vrtnje miješala, dodatak zeolita i elektrolita mogu utjecati na efikasnost uklanjanja kemijske potrošnje kisika i dušika po Kjeldahlu. Vidljiv je porast temperature i pH dok električna vodljivost prikazuje blagi trend pada. Uklanjanje mutnoće je vrlo visoko, neovisno o promjeni parametara. Vrijednosti ukupnog isparnog ostatka su manje dodatkom zeolita jer on na sebe veže onečišćenja, ali je brzina taloženja bolja uz dodatak elektrolita i zeolita uz manje brzine vrtnje miješala.

SUMMARY

The composting process produces compost as a useful product and leachate loaded with organic pollutants and heavy metals. That is why there is a need for its processing. Simulated leachate from composting of biowaste was processed by an integrated electrocoagulation process with and without the addition of zeolite and electrolyte. The influence of different stirring speed (70, 200 and 400 rpm) on the process efficiency was investigated over parameters: pH value, electrical conductivity, chemical oxygen demand, total Kjeldahl nitrogen, temperature, turbidity and total solids. In addition to the above indicators, the settling test was also performed. Data for the consumption of electrode masses during the process were collected from which the operational costs of the process were determined.

The results show that the stirring speed, the addition of zeolite and electrolyte can affect the efficiency of removal of chemical consumption of oxygen and nitrogen according to Kjeldahl. An increase in temperature and pH is visible while the electrical conductivity shows a slight downward trend. Turbidity removal is very high, independent of parameter changes. The values of the total solids are less with the addition of zeolite because it binds contaminants, but the settling test is better with the addition of electrolyte and zeolite with lower stirring speed.

Sadržaj

1.OPĆI DIO	2
1.1. Otpad i biootpad	3
1.2. Kompostiranje	4
1.4. Metode obrade procjedne vode	7
1.4.1. Fizikalna i kemijska obrada	7
1.4.2. Membranske tehnologije	8
1.4.3. Integracija procesa koagulacija-flokulacija i naprednih oksidacijskih procesa	9
1.4.4. Integracija biodegradacije i adsorpcije na aktivnom ugljenu	10
1.5. Tehnologija elektrokoagulacije	12
1.6. Zeoliti	16
2.EKSPERIMENTALNI DIO	18
2.1.Priprema uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada	19
2.2. Provedba integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu	20
2.2.Analize parametara	22
2.2.1. Određivanje pH vrijednosti	22
2.2.2. Određivanje električne vodljivosti	22
2.2.3. Određivanje temperature	23
2.2.4. Određivanje kemijske potrošnje kisika (KPK)	24
2.2.5. Određivanje dušika po Kjeldahlu	25
2.2.6. Mutnoća	27
2.2.7. Određivanje ukupnog parnog ostatka	28
2.3. Određivanje brzine taloženja	28
3.REZULTATI	30
3.1.Rezultati karakterizacije uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada	31
3.2.Rezultati vaganja elektroda tijekom procesa elektrokoagulacije	31
3.3.Rezultati praćenja pH, električne vodljivosti i temperatura tijekom elektrokoagulacije ..	32
3.4.Rezultati karakterističnih parametara kakvoće vode prije i nakon procesa elektrokoagulacije (KPK, mutnoća, TS, TKN)	34
4.RASPRAVA	38
4.1.Karakterizacija uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada	39
4.2. Analiza rezultata parametara praćenih tijekom procesa elektrokoagulacije	40
4.2.1. Analiza pH vrijednosti	40
4.2.2. Analiza rezultata električne vodljivosti	41
4.2.3. Analiza rezultata temperature	43
4.3. Analiza rezultata parametara nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu	44
4.3.1. Analiza vrijednosti kemijske potrošnje kisika (KPK)	44

4.3.2. Analiza vrijednosti dušika po Kjeldahlu	45
4.3.3. Analiza rezultata mutnoće.....	47
4.3.4. Analiza rezultata ukupnog isparnog ostatka.....	47
4.3.5. Analiza rezultata masa elektroda.....	48
4.3.6. Analiza brzina taloženja	50
4.3.7. Analiza operativnih troškova	51
4.ZAKLJUČAK.....	54

UVOD

Biootpad je biorazgradivi otpad iz kućanstava kao i ostali biorazgradivi otpad koji je zbog svojih svojstava i sastava sličan otpadu iz kućanstva. Čine ga biorazgradive komponente komunalnoga otpada kao što su papir, karton, otpad iz vrtova i parkova, otpad od hrane, drvo, tekstil i dr.¹ Iako se biootpad može prirodno razgraditi do stabilnih produkata ovakva vrsta razgradnje nije pogodna. Jedan od pogodnih načina za zbrinjavanje biorazgradivog otpada je kompostiranje. Kompostiranje je tehnološki proces gospodarenja otpadom kojim se, pomoću mikroorganizama, u aerobnim uvjetima, obrađuje i stabilizira biorazgradivi otpad uz razvoj topline.² Procesom kompostiranja dolazi do stabilizacije biootpada i smanjenja njegovog volumena, ali i do nastanka procjednih otpadnih voda. Budući da u procesu kompostiranja dolazi do stabilizacije organske tvari procjedne vode iz ovog procesa su opterećene organskim onečišćenjima, imaju visoku električnu vodljivost te se u njima nalaze suspedirane koloidne vrste, teški metali itd. Zbog toga procjedne vode iz kompostiranja nije moguće ispuštati u prirodni vodotok bez prethodne obrade. Neke od metoda obrade procjednih voda su: aerobna obrada, anaerobna obrada, fenton procesi, adsorpcija, koagulacija itd. Primjene ovih procesa nemaju željeni učinak kada se primjenjuju na procjedne vode složenog sastava. Upravo zbog toga danas je naglasak na razvoju integriranih procesa koji kombiniraju dva ili nekoliko fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa kako bi se postigao bolji učinak pročišćavanja.

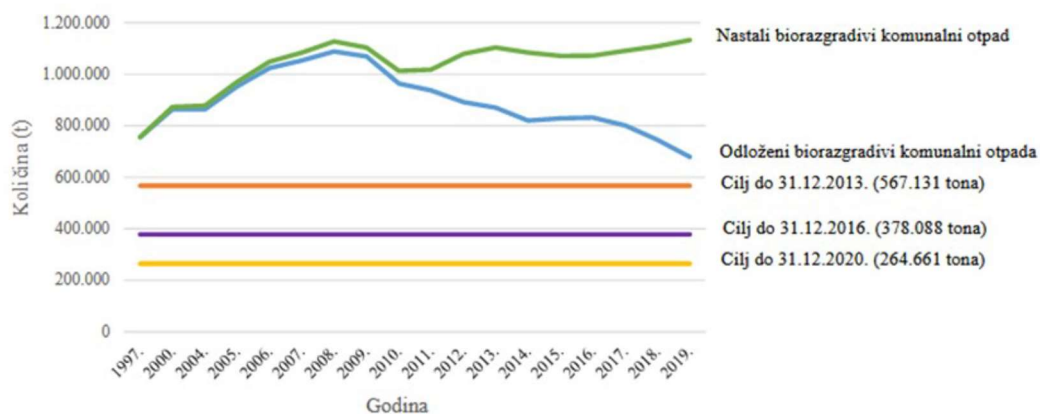
U ovom radu ispitivana je učinkovitost elektrokoagulacije uz obradu na prirodnom zeolitu. Elektrokoagulacija je tehnologija pri kojoj se za postupak koagulacije i flokulacije oslobađaju kationi iz žrtvujućih anoda pod utjecajem električnog polja. Prirodni zeoliti su alumosilikati specifične prostorne strukture s kanalima i šupljinama te izmjenjivim kationima koji omogućuju njihovu primjenu kao ionski izmjenjivači i adsorbensi. Očekuje se da će integracija ova dva procesa osigurati učinkovitiju obradu procjedne vode iz kompostiranja biootpada.

1. OPĆI DIO

1.1. Otpad i biootpad

Otpad je svaka tvar ili predmet koji posjednik odbacuje, namjerava ili mora baciti. Na razini Europske Unije prosječno 5 tona otpada nastane po stanovniku u periodu od godine dana. Ukupna količina otpada u EU-28 nastalog u svim gospodarskim djelatnostima i kućanstvima tijekom 2014. iznosila je 2503 milijuna tona. Bio je to najveći iznos zabilježen za EU-28 tijekom razdoblja od 2004. do 2014.³ Koncept održivog gospodarenja otpadom usmjeren je na postizanje nula otpada na odlagalištu, a što je vizija opće prihvaćena prema potpunoj eliminaciji otpada (*engl.* zero waste concept). Tako osmišljen program želi utjecati na društvo i na kulturu ljudi. Prvenstveno ih želi osvijestiti i probuditi njihovu zainteresiranost kako bi postali društvo koje reciklira, a što je jedino moguće uz pravodobnu edukaciju. Ključna je prilagodba infrastrukture koja će osigurati sakupljanje i odvajanje otpada. Onaj otpad koji je neupotrebljiv se treba svesti na minimum. Gospodarenje otpadom provodi se prema načelima zaštite okoliša koja su propisana zakonom. Prema ovim načelima: „otpadom se treba upravljati bez opasnosti za ljudsko zdravlje i za okoliš, a posebice bez rizika utjecaja na vodu, zrak, tlo, biljke ili životinje, bez stvaranja smetnji bukom ili mirisima i bez negativnog djelovanja na okolicu ili mjesta od posebnog interesa.“ Po zakonu definicija glasi: „gospodarenje otpadom su djelatnosti sakupljanja, prijevoza, uporabe i zbrinjavanja i druge obrade otpada, uključujući nadzor nad tim postupcima te nadzor i mjere koje se provode na lokacijama nakon zbrinjavanja otpada, te radnje koje poduzimaju trgovac otpadom ili posrednik“. ⁴ Svi, od državnih struktura i inspekcija, proizvođača, do krajnjeg potrošača, morat će shvatiti bit problema i naći zajednički put za ostvarivanje cjelovitog sustava održivog gospodarenja otpadom.

Danas gotovo trećinu otpada iz kućanstva čini biootpad. Biootpad je biološki razgradiv otpad iz vrtova i parkova, hrana i kuhinjski otpad iz kućanstava, restorana, ugostiteljskih i maloprodajnih objekata i slični otpad iz proizvodnje prehrambenih proizvoda. Porijeklom može biti komunalni, ali i proizvodni otpad. Ne uključuje ostatke iz šumarstva i poljoprivrede, uključujući gnoj, mulj iz uređaja za pročišćavanje ili ostali biorazgradivi otpad kao što je prirodni tekstil, papir ili prerađeno drvo.⁴



Slika 1.1. Nastali i odloženi biorazgradivi komunalni otpad za razdoblje od 1997. do 2019. godine u odnosu na ciljane količine propisane Direktivom o odlaganju²

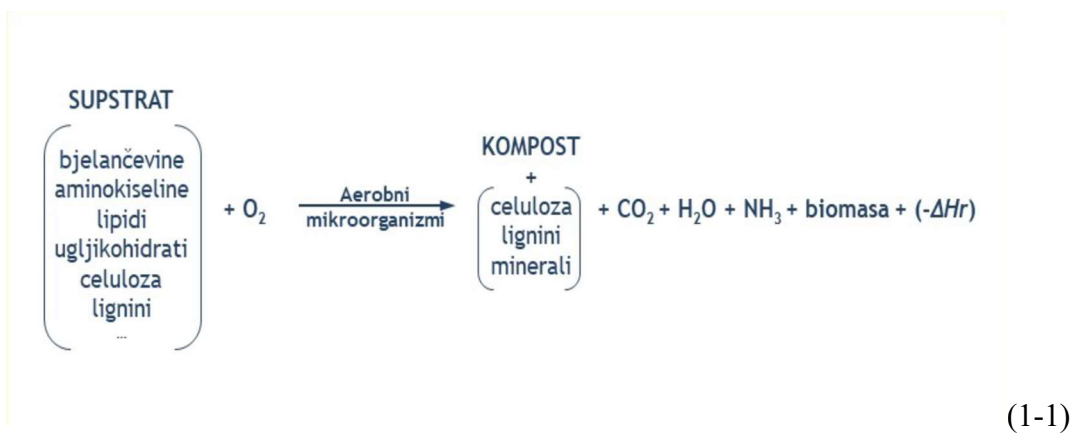
Na slici 1.1. uspoređene su količine nastalog i odloženog komunalnog otpada za razdoblje od 1997. do 2019. godine, u odnosu na ciljane količine propisane Direktivom o odlaganju. Vidljivo je kako ciljevi nisu postignuti. No uočava se značajno smanjenje količina odloženog otpada u odnosu na 2007. i 2008. godinu kada maksimum krivulje pokazuje su su odložene količine iznosile preko 1 100 000 tona.

1.2. Kompostiranje

Kompostiranje je biološki proces gospodarenja otpadom kojim se odvija razgradnja čvrstog otpada uz prisustvo kisika (aeroban proces). Svakodnevno se prirodni procesi razgradnje biomase događaju svuda oko nas. Kompostiranje zahtjeva uvjete pogodne za rad mikroorganizama, obzirom da u kompostiranju sudjeluju mikroorganizmi koji obrađuju, pomažu u razgradnji te stabiliziraju biootpad uz razvoj topline. Proces truljenja ne spada u proces kompostiranja budući da se biološkom razgradnjom u tom procesu ne upravlja. Kompostiranjem se pridonosi smanjenju količina otpada u svijetu, tlo se obogaćuje humusom i na kraju se stvaraju uvjeti za život organizama u tlu te pogoduje rastu i razvoju biljaka. Kompostirati se može u vlastitom kućanstvu (vrtu ili dvorištu), u naselju na pogodnoj lokaciji ili u velikim kompostanama. Kompostiranjem se uspostavlja prirodan kružni tok tvari u prirodi. Na ovaj način se prvenstveno štiti okoliš, pridonosi se uštedi fosilnih goriva (neobnovljivi izvori energije), smanjuje se potreba za navodnjavanjem i upotrebom mineralnih gnojiva.

Pretvorba organske tvari iz biorazgradivog otpada u kompost vrši se zbog tri glavna razloga: izbjegavanje fitotoksičnosti, uklanjanje/uništavanje mikroorganizama te proizvodnje gnojiva ili sredstava za oplemenjivanje tla i/ ili recikliranje organskog otpada i biomase. Na slici 1.2. je prikaz kemijske reakcije dobivanja komposta kao glavnog produkta.

Kod izrade komposta treba posvetiti pažnju odabiru idealnog položaja u vrtu, tipu kompostera te na vrstu otpada koji odlažemo na kompostnu hrpu. Ovisno o godišnjem dobu i klimatskim uvjetima, treba voditi računa o vlazi, zračenju te o temperaturi komposta.⁵



Slika 1.2. Dobivanje komposta prikazano reakcijom (1-1)



Slika 1.3. Zreli kompost⁵

Zreli kompost spada u vrlo kvalitetna gnojiva zbog svog kemijskog sastava. Kemijski sastav je dosta promjenjiv ovisno o ishodišnim tvarima i samom postupku kompostiranja.

Prosječan sastav komposta je sljedeći: 70-80% organske tvari, oko 0,3% dušika, oko 0,2% fosfora, oko 2,25% kalija i 2-3 % kalcija.⁵

1.3. Procjedne vode od kompostiranja biootpada

Kako u svakom tehnološkom procesu nastaju nusproizvodi, tako nastaju i u kompostiranju. Nusproizvod kompostiranja su procjedne vode. Procjedne vode iz aktivnih gomila komposta ili svježeg komposta često su žućkaste, blijedosmeđe ili tamnosmeđe boje zbog otopljenih čestica organske tvari. Neugodnog su mirisa, visoke vodljivosti, s visokim organskim opterećenjem od čega više od 70% čini organska tvar. Kemijski i fizikalni pokazatelji prirode procjedne vode komposta su od ključne važnosti jer procjedna voda migrira u tlo i podzemne vode ili teče u površinska vodna tijela. Procjedna voda iz komposta sa sobom nosi otopljene i suspendirane čestice organskog i anorganskog porijekla. Provedeno je istraživanje na kompostima u kojima se pratilo stanje za sedam teških metala (Cd, Ni, Co, Zn, Cu, Pb i Cr) u procjednim vodama u razdoblju od 30 mjeseci.⁶ Pokazalo se da otopljene organske tvari u procjednim vodama komposta mogu učinkovito apsorbirati i mobilizirati teške metale. Također su otopljene organske tvari u procjednoj vodi važni izvori C, H, N, O i P. U tablici 1.1. je prikaz sadržaja aniona i kationa različitih koncentracija u procjednim vodama.⁶

Tablica 1.1. Sadržaj aniona i kationa u procjednim vodama ⁶

<i>Anioni i kationi</i>	<i>Koncentracije</i>		
	0-100 mg/L	100-200 mg/L	>200 mg/L
Na ⁺	600-2100	50-600	0-400
K ⁺	200-1800	100-1200	40-700
Ca ²⁺	250-1100	100-600	70-400
Mg ²⁺	60-400	30-270	10-200
Mn ²⁺	0,1-1,3	0,1-0,6	0-0,5
Fe ³⁺	0,8-14	2-4	0,5-3,8
Cl ⁻	500-2500	40-800	0-500
SO ₄ ²⁻	180-1400	100-650	0-300

Podaci iz tablice 1.1. pokazuju da procjedne vode iz procesa kompostiranja mogu sadržavati znatne količine aniona i kationa.

Najvažniji pokazatelji koji utječu na procjedne vode su sirovina i tehnologija samog procesa kompostiranja. Sirovina za dobivanje komposta u velikoj mjeri određuje sastav procjedne vode. Postupnim i kvalitetnim upravljanjem procesa kompostiranja moguće je ograničiti materijale iz sirovog organskog otpada koji ulazi u proces kompostiranja da se ne bi našli u nastalim procjednim vodama. Najveći izazov prilikom kompostiranja predstavlja gospodarenje nastalim procjednim vodama. Naime, visoke vrijednosti KPK u procjednim vodama od kompostiranja iscrpit će otopljeni kisik u prihvatnim vodenim tijelima. Kompletno se može narušiti flora i fauna recipijenta. Dakle, ako se procjedne vode ne obrade na odgovarajući način, cijeli ekosustav se dovodi u opasnost jer te procjedne vode mogu sadržavati potencijalne mikroorganizme, otopljene organske tvari, anorganske makrokomponente, teške metale i ksenobiotičke organske spojeve. Zbog kompleksnosti sastava u usporedbi s ostalim vrstama industrijskih efluenta procjedne vode su najteže obradive i da bi se postigla propisana kvaliteta izlaznog efluenta potrebna je primjena kombinacije metoda obrade.⁶ U nastavku teksta dan je pregled nekih od metoda obrade procjednih voda iz kompostiranja.

1.4. Metode obrade procjedne vode

1.4.1. Fizikalna i kemijska obrada

Koagulacija/flokulacija primjenom željezovih, kalcijevih i aluminijevih soli se često primjenjuje kao predtretman procjednih voda prije adsorpcije, biološke ili membranske obrade, a također i kao završna obrada za uklanjanje rezidualne organske tvari koja nije podložna biorazgradnji. Nedostatak ove metode je visoka produkcija mulja te povećanje koncentracije željeza i aluminijskih iona u pročišćenoj vodi. U fizikalnoj i kemijskoj obradi se najčešće provode postupci kemijskog taloženja i adsorpcije.

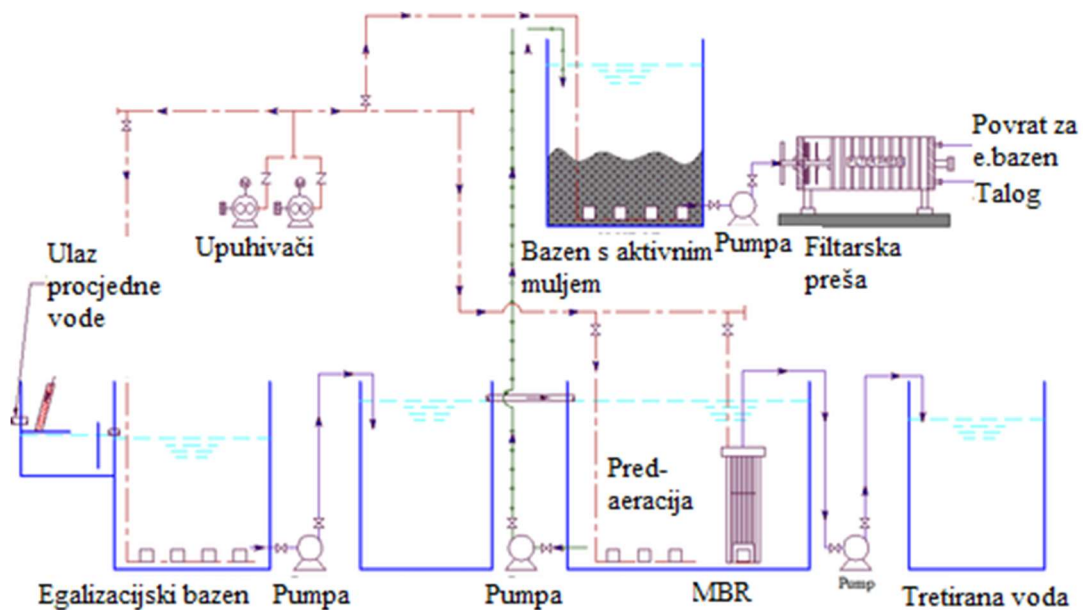
Kemijsko taloženje se najčešće koristi za uklanjanje visokih koncentracija NH_4^+ iona i ostalih dušikovih spojeva iz procjednih voda prije biološke obrade kako isti ne bi toksično djelovali na biološki sustav.

Adsorpcija se, također, često koristi kao predtretman procjednih voda prije membranske i biološke obrade ili oksidacije, pri čemu se aktivni ugljen koristi kao najučestaliji adsorbens (u praškastom ili granularnom obliku). Ovom metodom postižu se značajno bolji

rezultati u uklanjanju teško razgradljive organske tvari u odnosu na koagulaciju/flokulaciju bez obzira na ulazne koncentracije organske tvari u procjednoj vodi. Potreba česte regeneracije kolone i značajan utrošak aktivnog ugljena, ukoliko se koristi u praškastom obliku, su glavni nedostaci ove metode. Osim aktivnog ugljena, zeolit se također pokazao kao odličan adsorbens.⁷

1.4.2. Membranske tehnologije

Membranski bioreaktori (MBR) čine sustav koji se sastoji od aeriranog spremnika napunjenog vodom koji sadrži aktivni mulj i više membranskih cijevi u obliku kapilara. Pore membrana ultrafiltracije imaju promjer približno 20-50 nm, što učinkovito zadržava mikroorganizme, makromolekule i suspendirane krutine. Onečišćenja se tako razgrađuju na manje štetne tvari. Tehnologija membranskog bioreaktora ima mnoge prednosti u odnosu na konvencionalnu biološku obradu aktivnim muljem. Sekundarni taložnici koji se obično koriste mogu biti zamijenjeni membranskim sustavom koji smanjuje prostor potreban za tretman procjedne vode. Ukupno vrijeme zadržavanja je dulje u MBR, što povećava kontaktno vrijeme bakterija sa zagađivačima te rezultira visokom učinkovitosti. KPK otpadnih voda pomoću MBR uspješno je smanjen za više od 99% u odnosu na početne procjedne vode kojima je KPK iznosio 116 g/L. Visoka smanjenja primijećena su i kod amonijaka i teških metala.⁸



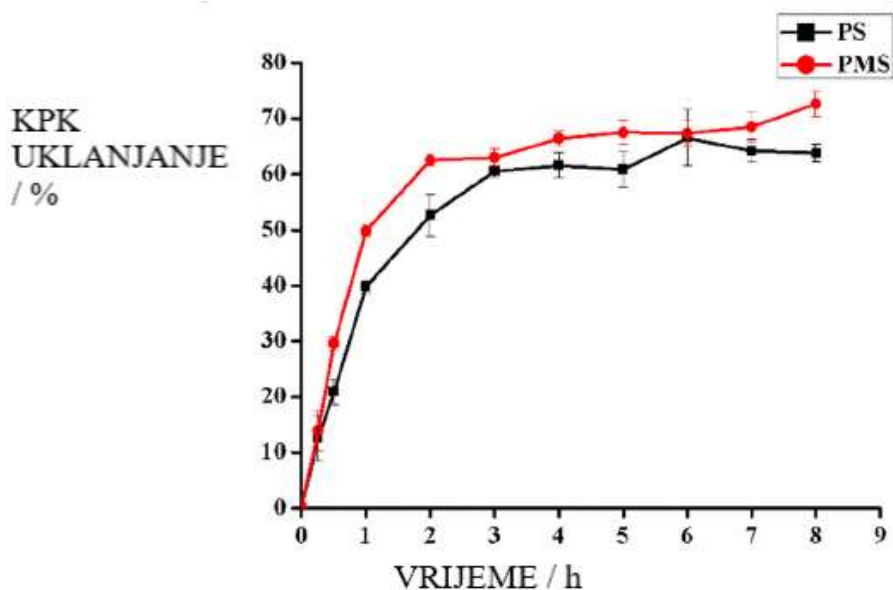
Slika 1.4. Sustav MBR⁸

Na slici 1.4. je prikaz sustava MBR-a. Procjedna voda najprije prolazi kroz egalizacijski bazen iz kojeg se pumpa u aerirani spremnik s aktivnim muljem. U aeriranom spremniku se najčešće zadržava oko 39 sati. Povrat, odnosno refluks, koji nije dovoljno pročišćen se vraća natrag u egalizacijski bazen kako bi ponovo prošao cijeli proces obrade.

1.4.3. Integracija procesa koagulacija-flokulacija i naprednih oksidacijskih procesa

Ovakvi procesi kombiniraju procese koagulacije i flokulacije kao predobradu procjednih voda nakon kojih slijede napredni oksidacijski procesi na bazi UV-zraka i aktivacija sulfat radikala polisulfata i peroksimonosulfata (*eng.* UV-based sulfate radical oxidation process, UV-SRAOP), odnosno UV-PS i UV-PMS.

Napredni oksidacijski procesi (*eng.* advanced oxidation processes, AOP) stekli su interes i popularnost u posljednjem desetljeću za pročišćavanje otpadnih voda. Početni koncept AOP-a odnosio se na *in situ* stvaranje hidroksilnog radikala (OH*) u dovoljnim količinama kako bi se postigao učinak pročišćavanja vode. Boja i visoka mutnoća apsorbiraju UV zračenje i sprječavaju aktiviranje PS (polisulfata) i PMS (peroksimonosulfata). Metode pročišćavanja vode na bazi UV zraka često su limitirane mutnoćom i bojom vode. Stoga ih je potrebno ukloniti predtretmanom procesima koagulacije i flokulacije. Koagulacija i flokulacija su relativno jednostavne i kontrolirane tehnike koje se naširoko koriste u predtretmanu obrade procjedne vode. To je bitna faza za smanjenje ukupne krute tvari, organskog sadržaja i boje radi poboljšanja učinkovitosti sljedećeg procesa obrade. Koagulacija uključuje destabilizaciju koloidne suspenzije i samim tim dovodi do nakupljanja čestica. Destabilizacija čestica može se postići dodatkom kemijskih koagulanata. FeCl₃ se pokazao učinkovitijim koagulantom od koagulanata na bazi aluminijske soli. Učinkovitost uklanjanja kemijske potrošnje kisika uvelike ovisi o omjeru KPK:FeCl₃ i pH vrijednosti početnog uzorka. Općenito, utvrđeno je da postotak uklanjanja KPK raste sa 64,0 na 75,3% pri povećanju omjera KPK:FeCl₃ od 1:1,1 do 1:2,2. U procjednim vodama, koloidne čestice su negativno nabijene kada je pH u rasponu od 5–9. Tijekom UV/PS-a, UV zračenje prenosi energiju na PS anione što rezultira cijepanjem peroksidne veze za stvaranje dva mola SR (sulfatna radikala).⁹



Slika 1.5. Prikaz uklanjanja KPK tijekom vremena uz dodatak PS (polisulfata) i PMS (peroksimonosulfata)⁹

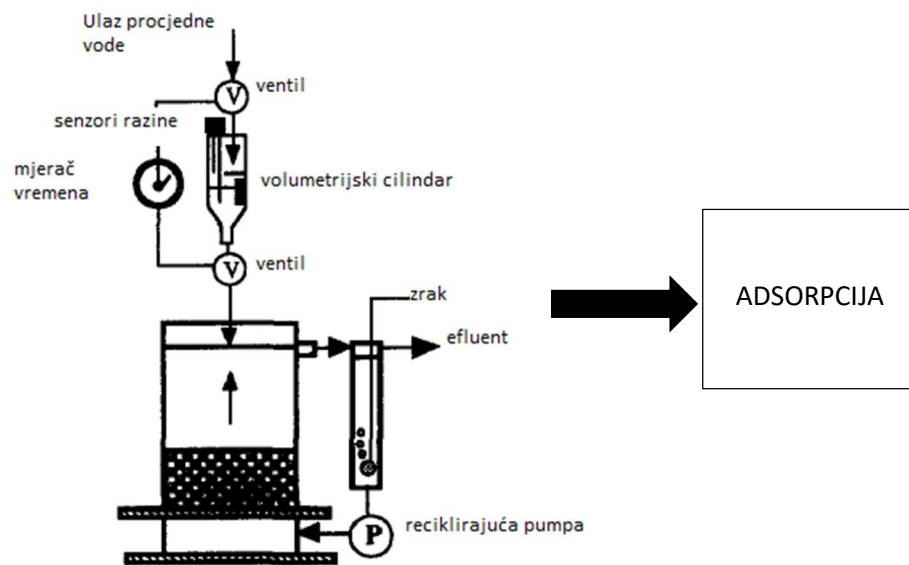
Slika 1.5. ilustrira učinak dodatka polisulfata i peroksimonosulfata na učinkovitost uklanjanja KPK. Kada se vrijeme reakcije povećalo s 2 na 8 h, uklanjanje KPK se polako povećalo s 52,6 na 63,8 i 62,5 na 72,6% za PS i PMS. Rezultat je također pokazao da nema značajnog poboljšanja učinkovitosti uklanjanja KPK nakon 3h reakcijskog vremena.

Predtretman koagulacije-flokulacije u kombinaciji s UV/SRAOP -om učinkovit je način uklanjanja KPK iz procjednih voda. Nakon koagulacije-flokulacije, 76,9% KPK uspješno je uklonjeno. Međutim, koncentracija KPK prethodno pročišćenih procjednih voda bila je i dalje veća od dopuštene razine. Sljedila je UV/PS i UV/PMS obrada. Rezultati su pokazali da je učinkovitost odabranog UV/SRAOP -a bila određena doziranjem PS i PMS. Konačna koncentracija KPK nakon obrade UV/SRAOP iznosi oko 90,9 do 91,5%. Međutim, nedostatak ove vrste obrade je mala koncentracija zaostalog sulfatnog iona što eventualno zahtjeva daljnju obradu reverznom osmozom.

1.4.4. Integracija biodegradacije i adsorpcije na aktivnom ugljenu

Ovaj proces integrira proces biodegradacije i adsorpcije na aktivnom ugljenu (*eng.* Biological activated carbon fluidized bed, BACFB). BACFB proces se provodi u

aerobnom reaktoru s fluidiziranim slojem. Fluidizacija aktivnog ugljena se postiže strujanjem otpadne vode od dna do vrha reaktora. Procjedna voda se dodaje polukontinuirano u reaktor uz kontrolu protoka kroz volumetrijski cilindar opremljen senzorom i elektroničkim mjerачem vremena. Približno 320 g (500 ml) granuliranog aktivnog ugljena (u obliku zrna, prosječnog promjera = 0,74 mm) se doda u reaktor te tako zauzima 1 L volumena sloja u fluidiziranom načinu (100% fluidizacija). BACFB reaktor radi na konstantnoj temperaturi 20° C. pH je održavan na 7 sa 0,5 M NaOH pomoću automatskog regulatora. Dovoljno zraka osigurano je kroz difuzor zraka.¹⁰



Slika 1.6. BACFB reaktor¹⁰

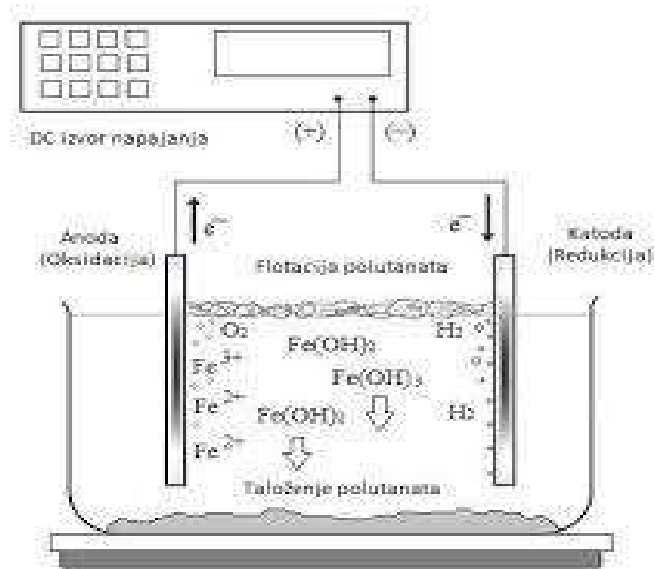
U BACFB procesu biološka degradacija kao predtretman prethodi adsorpciji. Na taj način je uspješno uklonjen preostali KPK. Uklanjanje KPK iz procjedne vode u BACFB procesu je funkcija hidrauličkog vremena zadržavanja (HRT). Uklanjanje KPK procjedne vode povećano je sa 42 na 58% kada je HRT povećan s 24 na 96 sati. Postupak BACFB uklanja oko 70% humusa s HRT-om od 24 sata; međutim, koncentracija humusa ostala je konstantna s povećanjem HRT-a. Danas se ispituje opcija uvođenja procesa ozonizacije u sustav BACFB-a kako bi uklanjanje bilo još bolje.

Iz navedenih primjera vidljivo je da se kombinacijom dva ili više pojedinačnih fizikalnih, kemijskih i/ili bioloških procesa postiže bolja efikasnost uklanjanja te je stoga danas veliki interes znanstvenika usmjeren upravo na istraživanje različitih integracija ili kombiniranih procesa.

U nastavku će se dati osvrt na elektrokoagulaciju te adsorpciju i ionsku izmjenu na prirodnom zeolitu.

1.5. Tehnologija elektrokoagulacije

Elektrokoagulacija je tehnologija pri kojoj se za postupak koagulacije i flotacije oslobađaju kationi iz žrtvujućih anoda pod utjecajem električnog polja. Uklanjaju se onečišćujuće tvari prisutne u procjednoj vodi. Nastale flokule uklanjaju onečišćujuće tvari. Cijeli proces se odvija u reaktoru u kojoj se istovremeno odvijaju katodne i anodne reakcije. Naime, na katodi se odvija redukcija vode gdje nastaje vodik i OH^- ioni koji kao produkt daju stabilne hidrokside. Anodnom reakcijom se stvaraju mjehurići plina na površini katode što stimulira elektroflotaciju (EF). Žrtvena anoda je jedina stavka koja razlikuje elektrokoagulaciju od svih ostalih tehnologija koje se baziraju na elektrolizi. Elektrode su najčešće građene od Al, Fe i/ili nehrđajućeg čelika jer su lako dostupni, relativno jeftini i lako se održavaju, nisu toksični i imaju visok stupanj učinkovitosti. Ponekad se upotrebljava i Mg.



Slika 1.7. Shematski prikaz procesa elektrokoagulacije

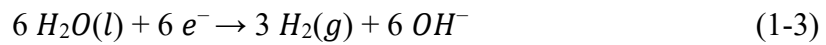
Reakcije koje se odvijaju u procesu elektrokoagulacije na Al i Fe elektrodama su prikazane u sljedećim jednadžbama:

Reakcijske faze na aluminijskoj elektrodi:

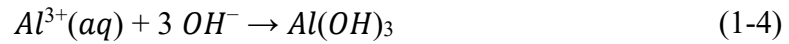
Na anodi:



Na katodi:

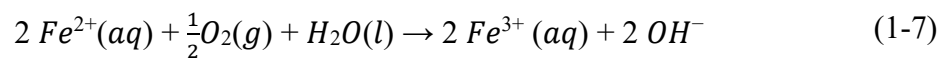
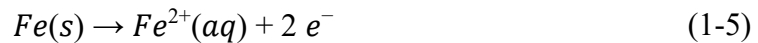


Percipitacija/taloženje:



Reakcijske faze na željezovoj elektrodi:

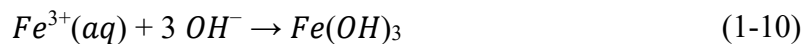
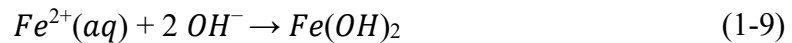
Na anodi:



Na katodi:



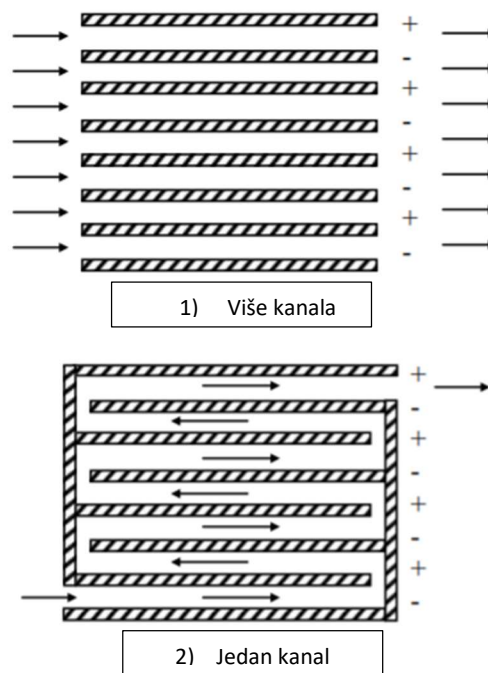
Percipitacija/taloženje:



Vrste elektroda

Različite vrste elektroda su često važan faktor koji utječe na samo izvođenje procesa elektrokoagulacije. Već je prije spomenuto kako su u upotrebi najčešći Al i Fe zbog svoje dostupnosti, no valja dodatno istaknuti kako oni upravo zbog svoje visoke valentnosti vrlo učinkovito uklanjaju onečišćujuće tvari. Kad se koristi anoda od aluminija, pri elektrolizi formiraju se trovalentni aluminijevi ioni. Primarna elektroliza popraćena je spontanom hidrolizom te se ovisno o pH otopine dobivaju različite čestice. 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. Tijekom elektrokoagulacije pomoću Al elektrode dolazi do neutralizacije pH otopine. Kada je početni pH kiseli, očekuje se da će pH porasti tijekom cijelog EK postupka, a kada je početni pH alkalni, očekuje se da će se pH smanjiti duž EK postupka. Stoga se EK pomoću aluminijske anode smatra neutralizatorom pH.¹⁰ U slučaju da se koristi željezna anoda, tijekom elektrolize se formiraju dvovalentni ili trovalentni ioni. Ovi kationi procesom hidrolize tvore

netopljive spojeve željeza. Tijekom EK, proizvodnjom OH^- iona, na katodi privremeno vrijednost pH raste, prije nego što ga Fe^{2+} koji je nastao na anodi potroši. Time se ubrzava proces oksidacije Fe^{2+} u Fe^{3+} , a pH se smanjuje proporcionalno potrošnji OH^- iona na anodi.¹¹ Kada se reakcija odvija u nižem pH području (6,5-7,5) brzina hidrolize i oksidacije Fe^{2+} iona je spora i zato najčešće dođe do povećanja pH u otopini i stvaranja topljivih iona Fe i netopljivog $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) / \text{FeOOH}(\text{s})$. Nakon što vrijednost pH postane alkalna (oko 8,5) te završi oksidacija željeznih iona, slijedi taloženje $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) / \text{FeOOH}(\text{s})$.¹¹



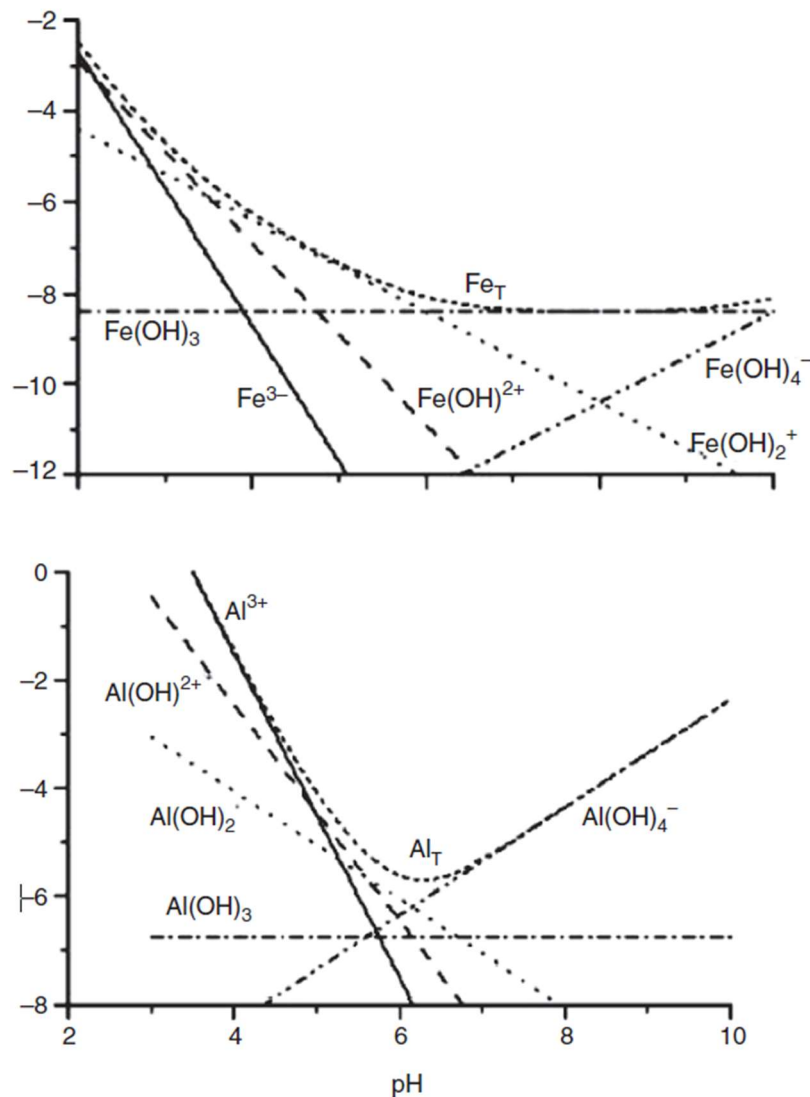
Slika 1.8. Prikaz načina protoka vode između elektroda¹¹

Na slici 1.8. dan je prikaz različitog protoka vode između elektroda. Kad su elektrode međusobno odvojene tada je istosmjernan tok vode, dok kod međusobno povezanih elektroda voda struji protusmjerno.

pH vrijednost otopine

Početna vrijednost pH efluenta značajno utječe na učinak same obrade. Kada je početna pH vrijednost manja od 4 (kisela), pH efluenta se povećava, a kada je početna pH vrijednost viša od 8 (bazična) pH se smanjuje. U slučaju kada je početna pH vrijednost u neutralnom području (oko 6–8), pH efluenta se neznatno mijenja.¹² Zbog uravnotežene proizvodnje i potrošnje OH^- iona tijekom elektrokoagulacije postoji takav puferirajući pH

kapacitet. Nastanak spoja $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ je glavni razlog za smanjenje pH u alkalnim uvjetima. pH ima snažan utjecaj na elektrokoagulaciju, adsorpciju i koagulaciju.¹²



Slika 1.9. Specije Al i Fe^{13}

Najčešće korišteni koagulansi u pročišćavanju otpadnih voda su aluminijske i željezne soli. Oba metala mogu formirati polivalentne ione, Al^{3+} , Fe^{2+} i Fe^{3+} . Fe^{2+} je loš koagulant jer oksidira do Fe^{3+} tijekom elektrokoagulacije.

Gustoća električne struje i vodljivost

Prema Faradayevu zakonu disocijacija metalnih iona je izravno proporcionalna primijenjenoj gustoći struje pri čemu se smanjuje otpornost elektrolitičkoj vodljivosti te samim time povećava učinkovitost gustoće struje. Ovim zakonom je definirano očuvanje struje između anode i katode. Gustoća mjehurića direktno utječe na interakciju onečišćene

tvari i koagulanta te samim tim na stvaranje flokula. Vrijednosti raspona gustoće struje mogu u velikoj mjeri varirati ovisno o značajkama i količini onečišćujućih tvari koje se uklanjaju iz procjedne vode / otpadnih voda (od $0,01 \text{ Am}^{-2}$ do 880 Am^{-2}). Optimalnu gustoću struje treba odrediti s obzirom na druge radne parametre.¹⁴ Visoka struja također povećava napon i omski pad između anode i katode, izraženo Ohmovim zakonom:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1 - 11)$$

gdje je:

I – struja, A

U – napon, V

R – otpor, Ω

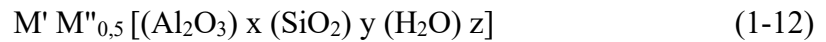
Kada se koristi prevelika struja, postoji velika vjerojatnost rasipanja električne energije u zagrijavanju vode, pa čak i smanjenja učinkovitosti struje izražene kao omjer potrošene struje za proizvodnju određenog elementa s obzirom na ukupnu potrošnju struje. Na odabir optimalne vrijednosti gustoće struje utječu i drugi parametri kao što su pH, temperatura i protok vode.

1.6. Zeoliti

Zeoliti imaju ogroman utjecaj na svakodnevni život, izravno i neizravno. Zeoliti su prirodni ili sintetički hidratizirani alumosilikati s karakterističnom strukturom šupljina i kanala. Primarne strukturne jedinice zeolita su SiO_4 i AlO_4 - tetraedri ($(\text{Si}^{4+}, \text{Al}^{3+}) \text{O}_4^-$). Ti tetraedri su zajedničkim kisikovim atomima povezani u veće, sekundarne jedinice.¹⁴ Povezivanjem sekundarnih jedinica nastaju poliedri, a povezivanjem poliedara nastaje prostorna struktura zeolita s kanalima različitih ali točno određenih dimenzija. Zeoliti se međusobno razlikuju po kanalima, tj. po njihovoj geometriji. U centru zeolita se nalazi Al centar (Al^{3+} ion) koji je koordinativno nezasićen s ukupnim nabojem -1. Taj negativni naboj je neutraliziran alkalijским ili zemnoalkalijским kationima (ako ga neutralizira Na, tada je Na-zeolit). Broj kationa koji neutralizira višak negativnog naboja odgovara broju Al tetraedara u kosturu zeolita. Upravo ovi kationi omogućuju primjenu zeolita kao ionski izmjenjivači.¹⁵

Otvori, odnosno ulazi u kanale se nazivaju porama. Promjer pora je reda veličine 0,3-1,2 nm. Pore su formirane kao prstenovi (6, 8, 10 ili 12 prstenova).

Opća formula zeolita je:



gdje su:

M' i M'' alkalijski i zemnoalkalijski metali, x i y oksidna varijabla, z broj molekula vode.

Prirodni zeoliti nalaze primjenu kao ionski izmjenjivači, adsorbensi i molekulska sita. Pokazuju izrazitu selektivnost uklanjanja iona teških metala, amonijaka i radioaktivnih iona iz vodenih otopina.

U poljoprivredi, klinoptilolit (prirodni zeolit) koristi se u obradi tla. On pruža ujednačen i polagan izvor kalija. Zeoliti mogu djelovati i kao vodeni moderatori, u kojima će apsorbirati vode do 55% svoje težine i polagano ga pustiti na zahtjev biljke. Ovo svojstvo može spriječiti opadanje korijena i umjerene cikluse suše. Zeoliti se najviše primjenjuju za čišćenje prirodnog plina, za sušenje nafte i naftnih destilata, u demineralizaciji vode, kao katalizatori petrokemijskih procesa, kao punilo za papir, u proizvodnji izolacijskog i lakoga građevnog materijala i dr.¹⁶



Slika 1.10. Prirodni zeolit ¹⁷

2. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu provedena je analiza procjedne vode koja je nastala procesom kompostiranja biootpada. Ispitivan je utjecaj broja okretaja miješala procesom elektrokoagulacije sa i bez dodatka zeolita i elektrolita na učinkovitost obrade procjedne vode iz kompostiranja biootpada.

2.1. Priprema uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada

Simulirana je procjedna voda iz kompostiranja biootpada. Kako bi se moglo provesti ispitivanje, najprije je bilo potrebno simulirati procjednu vodu nastalu iz kompostiranja biootpada. Uzorak procjedne vode je pripremljen u velikoj otvorenoj posudi. U 7 L destilirane vode je dodano 100 g mase uzorka komposta čije su karakteristike navedene u tablici 2. Nakon miješanja je ostavljeno 2 h da se uzorak istaloži. Po završetku taloženja, gornji dio je odekantiran.

Tablica 2.1. Karakteristike komposta¹⁸

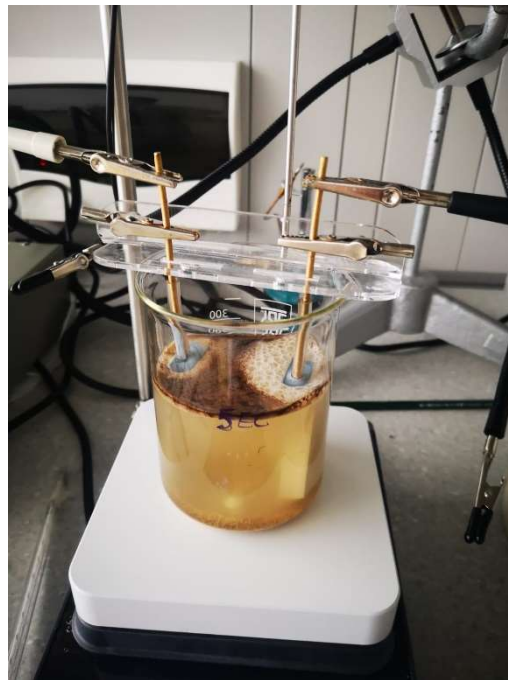
Karakteristike	Udio / %
Sadržaj vlage, %	69,08
Sadržaj suhe tvari, %	30,92
Sadržaj hlapljive tvari, %	88,02
pH	7,54
Električna vodljivost, $\mu\text{S cm}^{-1}$	671,00
Udio dušika, %	0,47

Nakon pripreme uzorka simulirana procjedna voda analizirana je preko parametara: pH vrijednost, električna vodljivost, kemijska potrošnja kisika, dušik po Kjeldahlu, mutnoća i ukupne krutine. Provedena su određena mjerenja kako bi se odredile njezine glavne značajke. Glavne značajke simulirane procjedne vode od procesa kompostiranja biootpada su prikazane u tablici 3.1.

2.2. Provedba integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu

Proces elektrokoagulacije je proveden u staklenoj čaši u koju je dodano 250 mL uzorka simulirane procjedne vode. U čašu su uronjene elektrode od aluminijeve legure koje će predstavljati žrtvovanu anodu. Dimenzije elektroda su sljedeće: visina= 5,3 cm, širina= 2,4 cm i debljina= 1,2 cm. Ukupna površina elektroda je 83,63 cm². Elektrokoagulacija je provedena pri uvjetima: I= 0,3 A (bez elektrolita) i I= 0,1 A (sa elektrolitom), U= 8,3-29,2 V, uz kontaktno vrijeme t = 40 min. Razmak između elektroda je postavljen na 4,5 cm. Ispitivan je utjecaj brzine miješanja od 70, 200 i 400 rpm. Tijekom eksperimenta podešavana je različita brzina miješanja uz pomoć magnetske miješalice. U eksperimentima sa zeolitom, u prvom slučaju masa dodanog zeolita iznosila je 0,25 g na 250 mL efluenta, a u drugom 5 g na 250 mL. Masa svake elektrode je vagana na analitičkoj vagi prije i poslije svakog uranjanja. Dobivene mase elektroda su prikazane u tablici 3.2. Da bi se uklonile eventualne nečistoće, svaka se elektroda između eksperimenata isprala destiliranom vodom i uronila u etanol.

Na slici 2.1 je prikaz procesa elektrokoagulacije u eksperimentu 5.

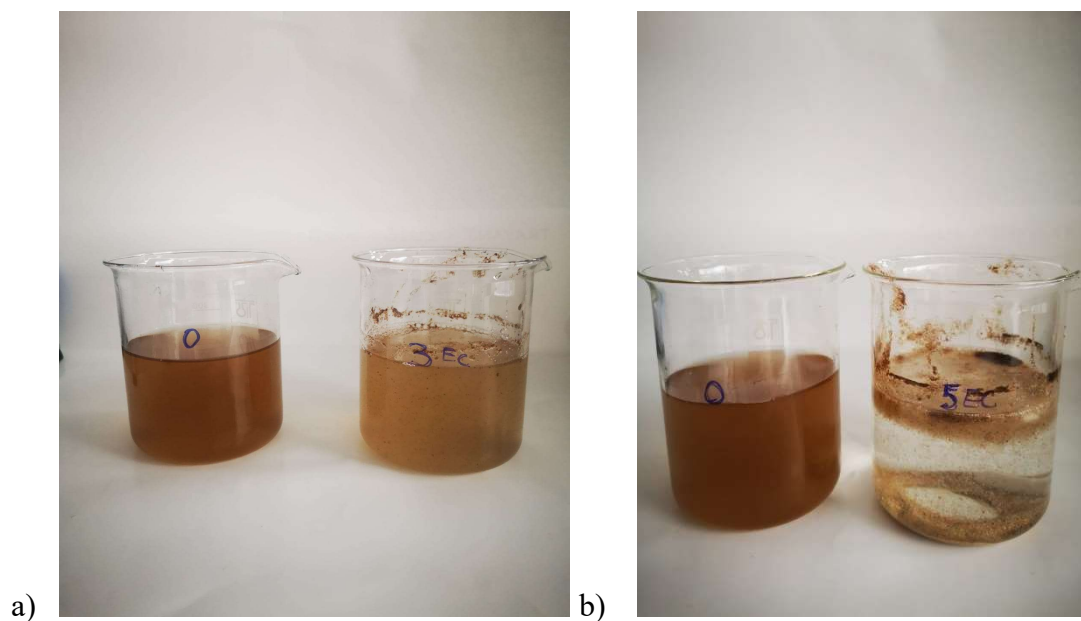


Slika 2.1. Prikaz elektrokoagulacije

Ukupno je provedeno 8 eksperimenata sa različitim brzinama miješanja, sa i bez dodatka zeolita i elektrolita, a pregled provedbe eksperimenata je dan u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Prikaz eksperimenata

OZNAKA EKSPERIMEN TA	BROJ EKSPERIMEN TA	BRZINA OKRETAJ A	DODATAK ELEKTROLI TA	DODATAK ZEOLITA
EC 70 RPM + EL	1	70	DA	-
EC 200 RPM + EL	2	200	DA	-
EC 400 RPM + EL	3	400	DA	-
EC 70 RPM	4	70	-	-
ECZ 70 RPM + EL	5	70	DA	DA
ECZ 200 RPM + EL	6	200	DA	DA
ECZ 400 RPM + EL	7	400	DA	DA
ECZ 70 RPM	8	70	-	DA



Slika 2.2. Prikaz početnog uzorka i uzorka nakon provedene elektrokoagulacije a) bez zeolita b) sa dodatkom zeolita

Tijekom cijelog procesa elektrokoagulacije praćene su vrijednosti pH, električne vodljivosti i temperatura, a nakon provedbe određeni su kemijska potrošnja kisika (KPK), mutnoća, ukupne isparni ostatak (*eng.* Total solids) i dušik po Kjeldahlu.

2.2. Analize parametara

2.2.1. Određivanje pH vrijednosti

pH vrijednost (*eng.* pH scale) je mjera kiselosti ili lužnatosti vodenih otopina. Ispitivanje pH vrijednosti provedeno je laboratorijskim pH metrom koji je prikazan na slici 2.3. Elektroda pH- metra se ispiru destiliranom vodom, osuši papirnatim ubrusom te se uroni u uzorak. Kad se mjerni podaci ustale, očitava se vrijednost pH.



Slika 2.3. pH metar tipa Mettler Toledo

Rezultati određivanja pH vrijednosti suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.3.

2.2.2. Određivanje električne vodljivosti

Električna vodljivost (*eng.* electrical conductivity) je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo neke tvari da propušta električnu struju. Mjerna jedinica je $\mu\text{S}/\text{cm}$. Po Ohmovom zakonu jakost struje je proporcionalna naponu između krajeva žice kroz koju teče struja. Vodljivost u kapljevinu ovisi o prisutnosti iona, njihovoj ukupnoj koncentraciji i temperaturi mjerenja. Električna vodljivost vode je vrlo niska no ukoliko ona sadrži ione otopljene soli koji provode struju, vodljivost je bitno veća. Zato se uz pomoć električne vodljivosti može odrediti ukupna koncentracija soli u vodi. Određivanje električne vodljivosti se provodilo oko 25°C budući da se pri toj temperaturi dobivaju najtočniji

rezultati. Na slici 2.4. je prikazan konduktometar korišten u mjerenjima u ovom eksperimentu.



Slika 2.4. Konduktometar tipa Mettler Toledo

Rezultati određivanja električne vodljivosti suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.4.

2.2.3. Određivanje temperature

Temperatura je jedna od osnovnih fizikalnih veličina u Međunarodnom sustavu jedinica, koja opisuje toplinsko stanje i sposobnost tijela ili tvari da izmjenjuju toplinu s okolinom. Mjerna jedinica za temperaturu je kelvin, [K]. Za mjerenje temperaturnih intervala može se koristiti mjerna jedinica Celzijev stupanj ($^{\circ}\text{C}$) pri čemu je Celzijeva temperatura: $t = (T - 273,15 \text{ K})$.



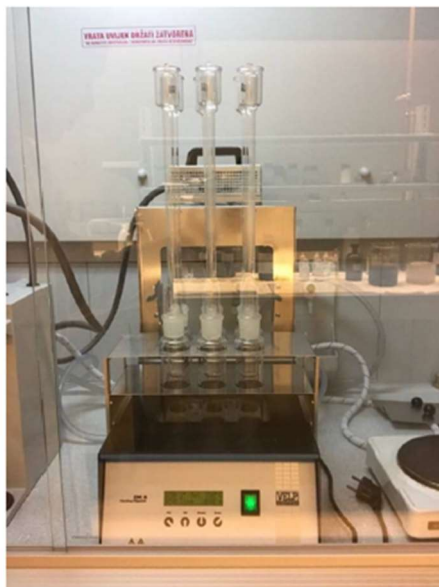
Slika 2.5. Termometar

Rezultati određivanja temperature suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.5.

2.2.4. Određivanje kemijske potrošnje kisika (KPK)

Kemijska potrošnja kisika (KPK) jedan je od osnovnih parametara kojima se mjeri onečišćenje ili stupanj opterećenja otpadnih voda. Kemijska potrošnja kisika je mjera kisikovog ekvivalenta sadržaja razgradljivih i nerazgradljivih organskih tvari, te anorganskih tvari u uzorku otpadne vode koje se mogu oksidirati jakim oksidacijskim sredstvom (bikromat ili permanganat). Izražava se kao masa potrošenog kisika (mg) po litri uzorka. U ovom eksperimentu se koristila bikromatna metoda određivanja KPK.

U eksperimentu se 10 mL uzorka razrijedilo u odmjerne tikvici od 100 mL. Potom je razrijeđeni uzorak redom raspoređen u epruvete po 5 mL. U svaku od epruveta je dodano 3 mL otopine $K_2Cr_2O_7$, nekoliko zrnaca $HgSO_4$, te lagano uz stijenku 7 mL H_2SO_4 s Ag_2SO_4 . Za pripremu slijepe probe je umjesto uzorka dodana destilirana voda. Nakon što je na epruvete namješteno povratno hladilo, sve je stavljeno u digestor na kuhanje 1,5 h na temperaturu od 120 °C. Nakon završetka kuhanja, smjesa se isprala destiliranom vodom, hladila do sobne temperature i titrirala s Mohrovom soli uz ferroin kao indikator do promjene boje iz žute u crvenu.



Slika 2.6. Kuhanje smjese u digestoru uz povrat

Izračunavanje KPK:

Kemijska potrošnja kisika izračunava se prema navedenoj formuli:

$$KPK_{Cr} = \frac{(b - a) \cdot c_{Fe(II)} \cdot f_{Fe(II)} \cdot \frac{1}{4} \cdot M(O_2) \cdot R \cdot 1000}{V_{uzorka}} \quad (1 - 13)$$

gdje je:

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

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

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

$f_{Fe(II)}$ – faktor otopine Fe(II),

$M(O_2)$ – 32 g/mol

R – faktor razrijeđenja

V_{uzorka} – volumen uzorka, 5 mL.

Rezultati određivanja KPK suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.6.

2.2.5. Određivanje dušika po Kjeldahlu

Dušik po Kjeldahlu predstavlja organski i amonijakalni dušik. Određuje se metodom po Kjeldahl-u koja se temelji na mineralizaciji uzorka sa jakim oksidansom pri temperaturi od 420°C. Reakcija se odvija u kiselom mediju uz prisutnost katalizatora bakrovim sulfatom pentahidratom i kalijevim sulfatom pri čemu kao produkt nastaje amonijev sulfat iz kojeg se destilacijom oslobađa amonijak. Oslobodeni amonijak se određuje volumetrijski titracijom viška klorovodične kiseline sa otopinom natrijeva hidroksida do prijelaza boje iz ružičaste u žutu.

Postupak razgradnje

U dvije staklene epruvete uliveno je po 25 mL destilirane vode, a u ostale 4 po 25 mL ispitivanog uzorka. Zatim je dodan katalizator u omjeru 1:9 i po 10 mL koncentrirane sulfatne kiseline. Staklene kivete su prebačene u uređaj za digestiju na zagrijavanje 20

minuta na 150 °C, 30 minuta na 250 °C i 1 sat na 420 °C. Nakon mineralizacije, kapljevina u epruветama je zelene boje, a nakon hlađenja sadržaj poprima svijetlo plavu boju. Nakon što je otopina poprimila svijetlo plavu boju, u svaku epruветu je dodano po 75 mL destilirane vode. Na slici 14. prikazan je uređaj za digestiju uzorka.



Slika 2.7. Uređaj za digestiju uzorka

Postupak destilacije:

Ohlađena epruвета s ispitivanim uzorkom je stavljena u uređaj za destilaciju po Kjeldahlu. U prihvatnu Erlenmayerovu tikvicu koja služi za sakupljanje amonijaka, otpipetirano je 20 mL 0,1 mol/L kloridne kiseline i stavljeno par kapi indikatora metilcrveno. Uređaj za destilaciju je podešen da vrijeme trajanja destilacije iznosi 5 minuta, a zadani volumen 40% - tne NaOH 50 mL. Nakon destilacije je napravljena titracija neizreagirane HCl s 0,1 mol/L NaOH do promjene boje iz ružičaste u žutu. Na slici 15 prikazan je uređaj za destilaciju.



Slika 2.8. Uređaj za destilaciju

Izračunavanje dušika po Kjeldahlu:

$$\gamma(\text{N, mg/L}) = \frac{(V_{\text{NaOH,SP}} - V_{\text{NaOH,uzorak}}) \cdot c(\text{NaOH}) \cdot f(\text{NaOH}) \cdot M(\text{N}) \cdot R \cdot 1000}{V_{\text{uzorka}}} \quad (1-14)$$

gdje je:

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

Rezultati određivanja TKN suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.7.

2.2.6. Mutnoća

Mutnoća (*engl.* turbidity) je mjera zamućenosti kapljevina, te je osnovni jednostavan pokazatelj kvalitete vode. Predstavlja mjeru koncentracije raspršenih (suspendiranih) organskih i anorganskih tvari, posebice koloidnih čestica, zatim mikroorganizama,

mjehurića plina, itd. Utječe na mogućnost prodiranja svjetlosti u stupcu vode. Naprave za mjerenje mutnoće nazivaju se turbidimetri, slika 12. Oni zapravo mjere relativnu prozirnost tekućine mjerenjem količine svjetlosti raspršene na česticama suspendiranim u uzorku. Turbidimetar čine izvor svjetlosti, fokusne leće za usmjeravanje snopa svjetlosti kroz uzorak, fotoelektrični detektor postavljen pod kutom od 90° u odnosu na upadni snop za mjerenje količine raspršene svjetlosti.



Slika 2.9. Turbidimetar

Rezultati određivanja mutnoće suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.8.

2.2.7. Određivanje ukupnog isparnog ostatka

Ukupni isparni ostatak određuje se sušenjem određenog volumena uzorka na temperaturi od $105 \pm 3^\circ\text{C}$ do konstantne mase. Uzet je uzorak suspenzije do 50 mL.

Rezultati određivanja ukupnih krutina suspenzije tijekom elektrokoagulacije, bez i sa prisustvom zeolita i elektrolita, prikazani su u tablici 3.9.

2.3. Određivanje brzine taloženja

Taloženje ili sedimentacija je proces stvaranja taloga u uvjetima kad je umnožak koncentracija kationa i aniona veći od konstante produkta topljivosti. Najpoznatiji uređaji za taloženje kod obrade otpadnih voda su taložnici.

Ispitivani uzorak se nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu ulije u menzuru, te se prati taloženje u trajanju od pola sata. Rezultati su prikazani u tablici 3.10. Poslije 30 minuta, uslijedila je filtracija. Mase dobivenih taloga su prikazane u tablici 3.12.



Slika 2.10. Prikaz taloženja početnog uzorka (procjedna voda) u menzuri

3. REZULTATI

3.1. Rezultati karakterizacije uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada

Dobiveni rezultati nakon postupka pripreme uzorka simulirane procjedne vode iz kompostiranja biootpada prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Karakteristike uzorka simulirane procjedne vode¹⁷

Karakteristike	Udio / %
pH	7,95
Električna vodljivost, $\mu\text{S cm}^{-1}$	205,00
Kemijska potrošnja kisika, mg O ₂ /L	278,32
Dušik po Kjeldahlu, mg N/L	30,82
Mutnoća, NTU	87,20
Ukupni isparni ostatak, g/L	0,275

3.2. Rezultati vaganja elektroda tijekom procesa elektrokoagulacije

Rezultati vaganja elektroda te izračunate mase katode i anode su prikazani u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Mase elektroda korištenih u procesu elektrokoagulacije

Oznaka eksperimenta		Masa m, g					
		Prije uranjanja		Nakon uranjanja		Razlika	
		Anoda	Katoda	Anoda	Katoda	Anoda	Katoda
1	EC 70 rpm + EL	51,28	50,81	51,21	50,78	0,06	0,03
2	EC 200 rpm + EL	50,02	51,69	49,96	51,61	0,06	0,04
3	EC 400 rpm + EL	50,69	50,47	50,63	50,44	0,06	0,03
4	EC 70 rpm	49,81	51,49	49,80	51,48	0,01	0,01
5	ECZ 70 rpm + EL	50,48	50,24	50,42	50,21	0,05	0,03
6	ECZ 200 rpm + EL	49,62	51,30	49,56	51,27	0,06	0,03
7	ECZ 400 rpm + EL	50,28	50,08	50,22	50,05	0,06	0,03
8	ECZ 70 rpm	49,44	51,11	49,43	51,10	0,01	0,07

3.3. Rezultati praćenja pH, električne vodljivosti i temperatura tijekom elektrokoagulacije

Rezultati mjerenja pH vrijednosti tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije, bez i s prisustvom zeolita i elektrolita uz različitu brzinu vrtnje miješala prikazani su u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Rezultati određivanja pH vrijednosti tijekom procesa elektrokoagulacije, bez zeolita (uzorci 1, 2, 3, 4) i sa zeolitom (uzorci 5, 6, 7, 8), uz promjene brzine vrtnje miješala (70, 200, 400 rpm) i dodatka elektrolita

Oznaka eksperimenta		pH tijekom vremena						
		0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min
1	EC 70 rpm + EL	7,66	8,20	8,85	9,10	9,19	9,20	9,29
2	EC 200 rpm + EL	7,66	8,93	8,98	9,09	9,16	9,25	9,30
3	EC 400 rpm + EL	7,66	8,74	8,87	8,97	9,03	9,14	9,21
4	EC 70 rpm	7,95	8,43	8,77	8,94	8,99	9,24	9,32
5	ECZ 70 rpm + EL	7,98	8,75	8,85	8,92	8,97	9,09	9,16
6	ECZ 200 rpm + EL	7,99	8,55	8,7	8,76	8,84	8,95	9,00
7	ECZ 400 rpm + EL	7,99	8,04	8,2	8,33	8,42	8,56	8,67
8	ECZ 70 rpm	7,95	8,17	8,48	8,64	8,69	8,81	8,95

Rezultati mjerenja električne vodljivosti tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije, bez i s prisustvom zeolita i elektrolita, uz različitu brzinu vrtnje miješala prikazani su u tablici 3.4. Mjerna jedinica za električnu vodljivost je $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Tablica 3.4. Rezultati određivanja električne vodljivosti tijekom procesa elektrokoagulacije, bez zeolita (uzorci 1, 2, 3, 4) i sa zeolitom (uzorci 5, 6, 7, 8), uz promjene brzine vrtnje miješala (70, 200, 400 rpm) i dodatka elektrolita

Oznaka eksperimenta		Električna vodljivost tijekom vremena						
		0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min
1	EC 70 rpm + EL	2130	2140	2210	2240	2230	2150	2050
2	EC 200 rpm + EL	2290	2280	2230	2270	2250	2230	2210
3	EC 400 rpm + EL	2290	2300	2320	2210	2290	2260	2230
4	EC 70 rpm	205	198,4	190	187,9	191,5	189,7	184
5	ECZ 70 rpm + EL	2260	2160	2150	2260	2200	2220	2230
6	ECZ 200 rpm + EL	2170	2140	2130	2140	2120	2020	2050
7	ECZ 400 rpm + EL	2310	2310	2300	2310	2300	2240	2220
8	ECZ 70 rpm	205	220	228	230	239	236	230

Rezultati mjerenja temperatura tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije, bez i s prisustvom zeolita i elektrolita, uz različitu brzinu vrtnje miješala prikazani su u tablici 3.5. Mjerna jedinica u kojoj je mjerena temperatura je °C.

Tablica 3.5. Rezultati mjerenja temperature tijekom procesa elektrokoagulacije, bez zeolita (uzorci 1, 2, 3, 4) i sa zeolitom (uzorci 5, 6, 7, 8), uz promjene brzine vrtnje miješala (70, 200, 400 rpm) i dodatka elektrolita

Oznaka eksperimenta		Temperatura tijekom vremena						
		0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min
1	EC 70 rpm + EL	21,0	27,5	28,0	28,5	29,0	30,0	31,5
2	EC 200 rpm + EL	21,0	28,0	29,0	29,5	30,0	31,0	32,0
3	EC 400 rpm + EL	21,0	29,0	30,0	30,1	30,1	32,0	33,0
4	EC 70 rpm	21,0	28,5	29,0	29,0	29,0	29,5	29,5
5	ECZ 70 rpm + EL	21,0	28,5	29,5	30,0	30,5	32,0	33,0
6	ECZ 200 rpm + EL	21,0	28,0	29,0	29,0	30,0	31,0	33,0
7	ECZ 400 rpm + EL	21,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,0	32,0
8	ECZ 70 rpm	21,0	26,0	27,0	27,0	27,5	28,0	28,0

3.4. Rezultati karakterističnih parametara kakvoće vode prije i nakon procesa elektrokoagulacije (KPK, mutnoća, TS, TKN)

Rezultati određivanja kemijske potrošnje kisika (KPK) početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu, prikazani su u tablici 3.6.

Tablica 3.6. Rezultati određivanja KPK vrijednosti početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

		KPK, mg O ₂ / L	% uklanjanja
Početni uzorak		278,32	-
1	EC 70 rpm + EL	88,47	67,55
2	EC 200 rpm + EL	62,66	76,82
3	EC 400 rpm + EL	25,80	90,07
4	EC 70 rpm	51,60	80,79
5	ECZ 70 rpm + EL	47,92	82,12
6	ECZ 200 rpm + EL	22,11	91,39
7	ECZ 400 rpm + EL	22,11	91,39
8	ECZ 70 rpm	7,37	96,69

Rezultati određivanja dušika po Kjeldahlu početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu, prikazani su u tablici 3.7.

Tablica 3.7. Rezultati određivanja dušika po Kjeldahlu početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

		Dušik po Kjeldahlu, mg L ⁻¹	% uklanjanja
Početni uzorak		30,81	-
1	EC 70 rpm + EL	14,00	54,55
2	EC 200 rpm + EL	0,56	98,18
3	EC 400 rpm + EL	5,60	81,82
4	EC 70 rpm	14,00	54,55
5	ECZ 70 rpm + EL	30,81	0,00
6	ECZ 200 rpm + EL	8,40	72,73
7	ECZ 400 rpm + EL	11,20	63,64
8	ECZ 70 rpm	8,40	72,73

Rezultati određivanja mutnoće početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu, prikazani su u tablici 3.8.

Tablica 3.8. Rezultati mjerenja mutnoće početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

		NTU	% uklanjanja
Početni uzorak		87,20	-
1	EC 70 rpm + EL	3,38	96,12
2	EC 200 rpm + EL	2,29	97,37
3	EC 400 rpm + EL	0,77	99,12
4	EC 70 rpm	3,26	96,27
5	ECZ 70 rpm + EL	0,88	99,00
6	ECZ 200 rpm + EL	0,99	98,86
7	ECZ 400 rpm + EL	1,43	98,37
8	ECZ 70 rpm	2,78	96,82

Rezultati određivanja ukupnog isparnog ostatka početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu, prikazani su u tablici 3.9.

Tablica 3.9. Rezultati određivanja ukupnog isparnog ostatka početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na zeolitu

		Masa prazne posudice	Masa nakon sušenja	Ukupni isparni ostatak, g L ⁻¹
Početni uzorak		74,576	74,5815	0,275
1	EC 70 rpm + EL	76,395	76,4183	1,165
2	EC 200 rpm + EL	78,6935	78,717	1,175
3	EC 400 rpm + EL	68,1027	68,126	1,165
4	EC 70 rpm	74,8244	74,8276	0,16
5	ECZ 70 rpm + EL	102,6038	102,6247	1,045
6	ECZ 200 rpm + EL	103,8521	103,8717	0,98
7	ECZ 400 rpm + EL	105,5031	105,5247	1,08
8	ECZ 70 rpm	106,4671	106,4677	0,03

Rezultati određivanja brzina taloženja početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon procesa elektrokoagulacije, prikazani su u tablici 3.10. Bilješke tijekom procesa taloženja su prikazane u tablici 3.11 Rezultati vaganja filtriranih taloga su prikazani u tablici 3.12.

Tablica 3.10. Rezultati određivanja brzina taloženja uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu

Oznaka eksperimenta	Vrijeme / min	Brzina taloženja, cm						
		0	5	10	15	20	30	40
1	EC 70 rpm + EL	22,60	8,45	5,62	4,61	4,32	3,95	3,63
2	EC 200 rpm + EL	22,75	22,40	20,1	18,36	13,42	13,12	12,60
3	EC 400 rpm + EL	22,8	22,75	22,7	22,69	22,65	22,25	22,25
4	EC 70 rpm	/	/	/	/	/	/	/
5	ECZ 70 rpm + EL	22,80	7,46	5,65	4,14	4,05	3,98	3,85
6	ECZ 200 rpm + EL	22,80	10,46	8,48	7,22	7,22	5,68	5,66
7	ECZ 400 rpm + EL	22,80	11,46	7,44	6,52	5,31	5,91	5,35
8	ECZ 70 rpm	/	/	/	/	/	/	/

Tablica 3.11. Zabilješke

		Zabilješke tijekom taloženja
1	EC 70 rpm + EL	taloženje neujednačeno, vidljivo raslojavanje
2	EC 200 rpm + EL	taloženje sporije, sitnije čestice
3	EC 400 rpm + EL	taloženje sporije, sitnije čestice
4	EC 70 rpm	mutno, raslojavanje na vrhu i na dnu
5	ECZ 70 rpm + EL	brže taloženje i razdvajanje
6	ECZ 200 rpm + EL	brže taloženje
7	ECZ 400 rpm + EL	brže taloženje
8	ECZ 70 rpm	mutno, raslojavanje na vrhu i na dnu

Tablica 3.12 Mase filtriranih taloga

Oznaka eksperimenta		Mase filter papira, g	Filter papir + talog, g	Masa taloga, g
1	EC 70 rpm + EL	0,84	1,07	0,22
2	EC 200 rpm + EL	0,83	1,08	0,25
3	EC 400 rpm + EL	0,84	1,10	0,25
4	EC 70 rpm	0,85	0,92	0,07
5	ECZ 70 rpm + EL	0,84	1,27	0,43
6	ECZ 200 rpm + EL	0,84	1,95	1,10
7	ECZ 400 rpm + EL	0,85	2,16	1,31
8	ECZ 70 rpm	0,83	0,93	0,10

4. RASPRAVA

4.1. Karakterizacija uzorka procjedne vode od kompostiranja biootpada

U tablici 4.1. uspoređene su karakteristike uzorka procjedne vode sa Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda²⁰. Karakteristike simulirane procjedne vode iznose: pH vrijednost 7,95, električna vodljivost iznosi 205,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a mutnoća 87,20 NTU. Kemijska potrošnja kisika simulirane procjedne vode iznosi 278,32 mg O₂/L, ukupni isparni ostatak 0,275 g/L, a dušik po Kjeldahlu 30,82 mg N / L.

Tablica 4.1. Usporedba karakteristika uzorka procjedne vode s graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda²⁰

	Uzorak	Površinske vode	Sustav javne odvodnje
pH	7,95	6,5-9,0	6,5-9,5
Električna vodljivost, $\mu\text{S}/\text{cm}$	205,00	-	-
Kemijska potrošnja kisika, mg O₂/L	278,32	125	700
Dušik po Kjeldahlu, mg N/L	30,82	15*	50*
Mutnoća, NTU	87,20	-	-
Ukupni isparni ostatak, mg/L	275,00	35	-

*vrijednosti predstavljaju ukupni dušik jer dušik po Kjeldahlu nije propisan Pravilnikom

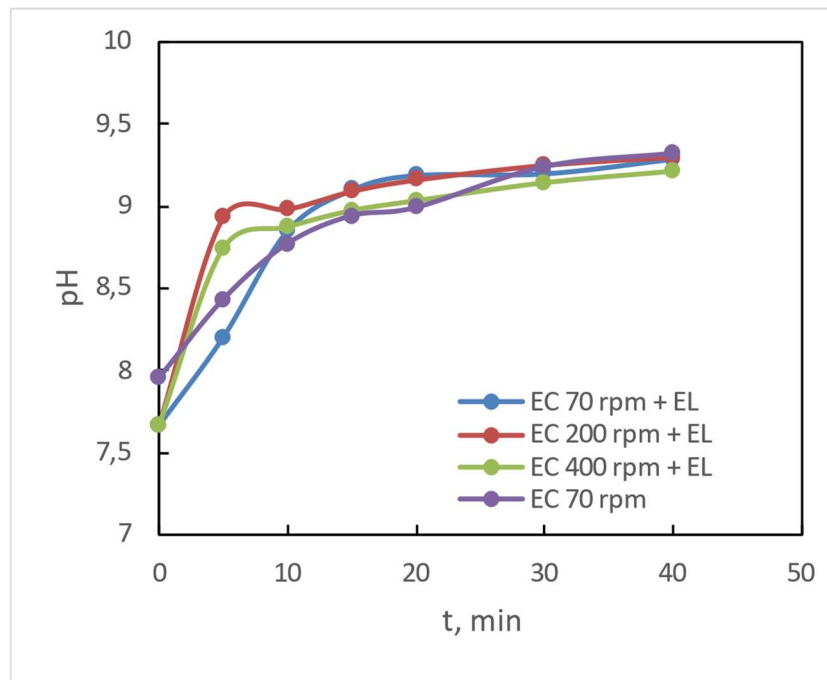
Granične vrijednosti pokazatelja kakvoće otpadne vode definirane su u Pravilniku²⁰. Granične vrijednosti za električnu vodljivost i mutnoću nisu definirane Pravilnikom kao ni vrijednost za dušik po Kjeldahlu, ali su zato za dušik po Kjeldahlu uzete vrijednosti za ukupni dušik.

pH vrijednost u iznosu od 7,95 je unutar intervala dozvoljenih vrijednosti za ispušt u površinske vode (6,5-9,0) i u sustav javne odvodnje (6,5-9,5). Vrijednost električne vodljivosti koja iznosi 205 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i vrijednost ukupnog isparnog ostatka koji iznosi 275 mg/L su umjerene. Ovakve vrijednosti ukazuju na manju prisutnost aniona i kationa i stoga će eksperimenti biti provedeni uz dodatak elektrolita da se smanji otpor i poboljša vodljivost. Vrlo visoka mutnoća koja iznosi 87,20 NTU ukazuje na prisustvo otopljenih i raspršenih tvari u procjednoj vodi. Iako mutnoća nije propisana Pravilnikom, ispuštanjem vode koja ima visoku mutnoću u prirodni recipijent može utjecati na procese fotosinteze te dostupnost otopljenog kisika. Dušik po Kjeldahlu nije propisan Pravilnikom i vrijednosti u tablici 4.1. predstavljaju ukupni dušik.

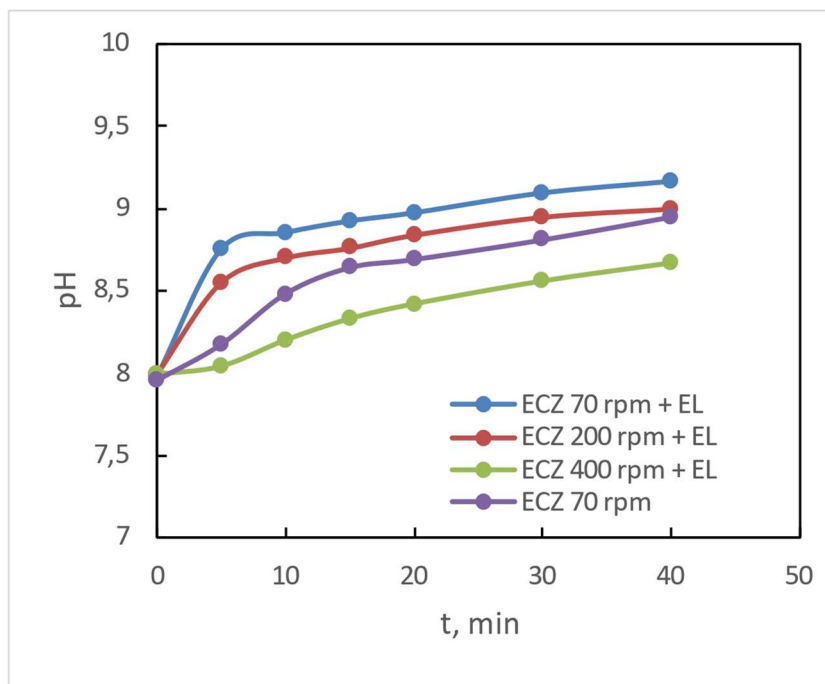
4.2. Analiza rezultata parametara praćenih tijekom procesa elektrokoagulacije

4.2.1. Analiza pH vrijednosti

Rezultati pH vrijednosti tijekom trajanja integriranog procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje miješala su prikazane u tablici 3.3. i grafički prikazi su na slikama 4.1. i 4.2.



Slika 4.1. Promjena pH vrijednosti u ovisnosti o vremenu t za uzorke bez dodatka zeolita pri različitim brzinama vrtnje miješala



Slika 4.2. Promjena pH vrijednosti u ovisnosti o vremenu t za uzorke sa dodatkom zeolita pri različitim brzinama vrtnje miješala

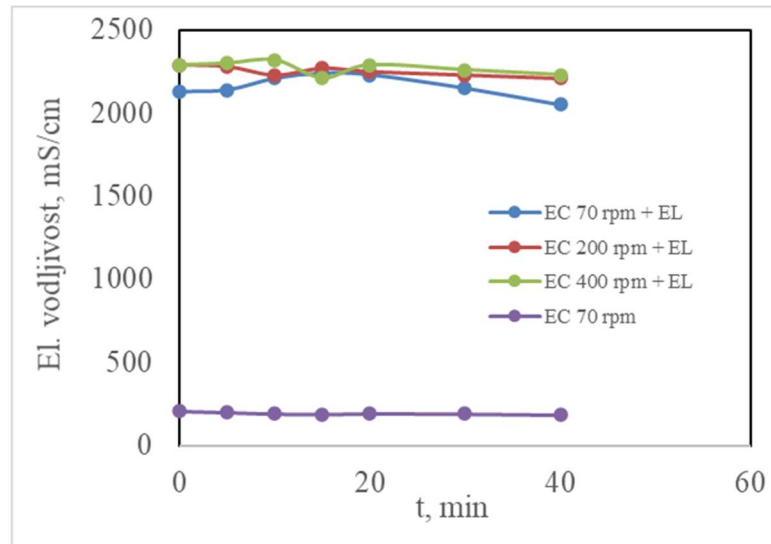
Tijekom svih eksperimenata, pH vrijednost pokazuje nagli porast u prvih 10 minuta, nakon čega je taj porast blaži. Porast se pripisuje reakciji hidrolize vode pri čemu dolazi do nastajanja vodika i OH^- iona. S porastom broja okretaja prije dolazi do porasta pH kao što je vidljivo na grafu, već u prvih 5 minuta. Kasnije je taj porast neznatan. Konačni pH je u rasponu 9,21-9,31.

Vrijednosti eksperimenata s dodatkom zeolita pokazuju da dodatak zeolita ublažava porast pH, a razlog tome je sposobnost zeolita da neutralizira otopinu. Najveći je porast pH vrijednosti vidljiv kod najmanjeg broja okretaja od 70 rpm, dok s povećanjem broja okretaja sa 200 na 400 rpm, porast pH je manji.

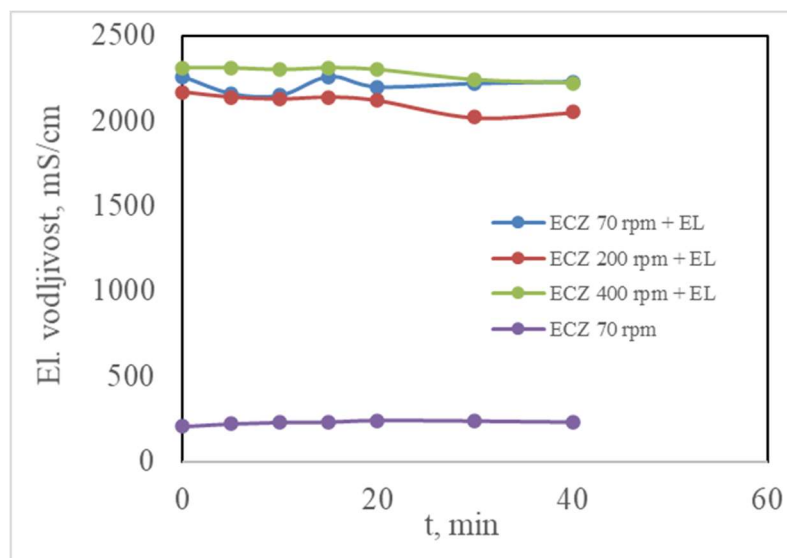
U eksperimentima bez zeolita, dodatak elektrolita nema značajnog utjecaja na porast pH. Uz dodatak zeolita, i uz isti broj okretaja od 70 rpm, dodatak elektrolita utječe da je porast pH nešto veći u odnosu na eksperiment bez dodatka elektrolita.

4.2.2. Analiza rezultata električne vodljivosti

Rezultati električne vodljivosti tijekom trajanja integriranog procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje miješala su prikazane u tablici 3.4. i grafički prikazi su na slikama 4.3. i 4.4.



Slika 4.3. Promjena električne vodljivosti u ovisnosti o vremenu t za uzorke bez dodatka zeolita pri različitim brzinama vrtnje miješala



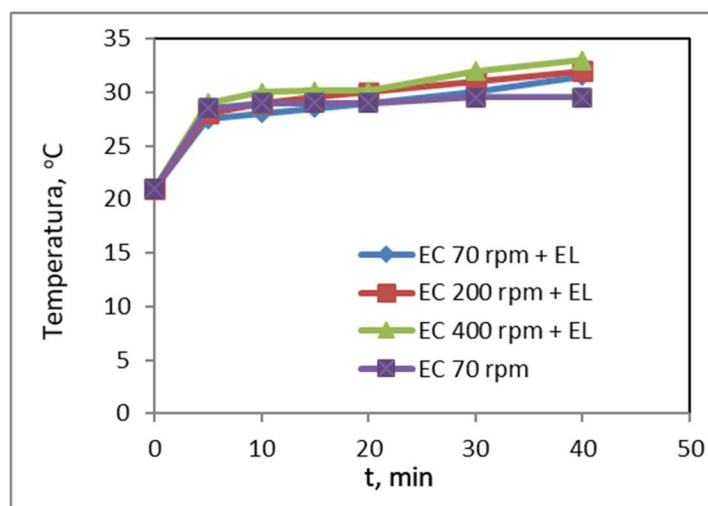
Slika 4. 4. Promjena električne vodljivosti u ovisnosti o vremenu t za uzorke sa dodatkom zeolita pri različitim brzinama vrtnje miješala

Vidljivo je da tijekom eksperimenata vrijednosti električne vodljivosti osciliraju blagim trendom pada, a što se pripisuje vezanju štetnih tvari na flokule nastale tijekom elektrokoagulacije. Dodatak zeolita nema značajan utjecaj na pad električne vodljivosti, ali u eksperimentima bez dodatka elektrolita, vodljivost je značajno smanjena.

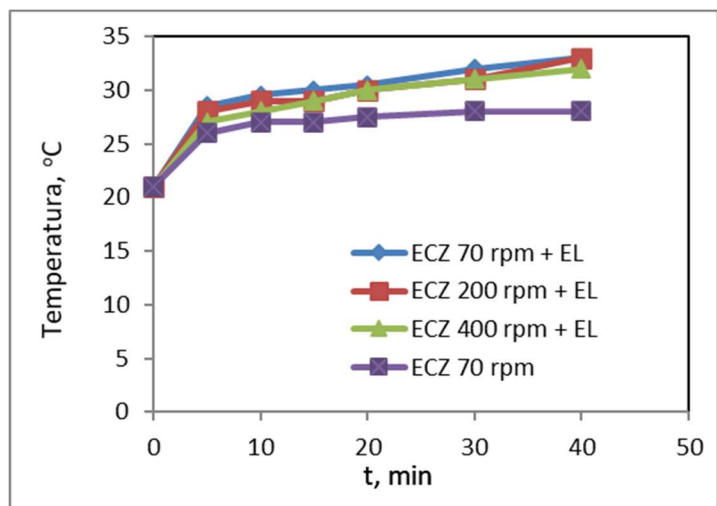
Porast broja okretaja mješala s 70 rpm na 200 rpm i 400 rpm ne pokazuje značajan utjecaj na promjenu električne vodljivosti tijekom procesa.

4.2.3. Analiza rezultata temperature

Rezultati temperature tijekom trajanja integriranog procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje mješala su prikazane u tablici 3.5. grafički prikazi su na slikama 4.5. i 4.6.



Slika 4. 5. Promjena temperature u ovisnosti o vremenu t za uzorke bez dodatka zeolita pri različitim brzinama vrtnje mješala



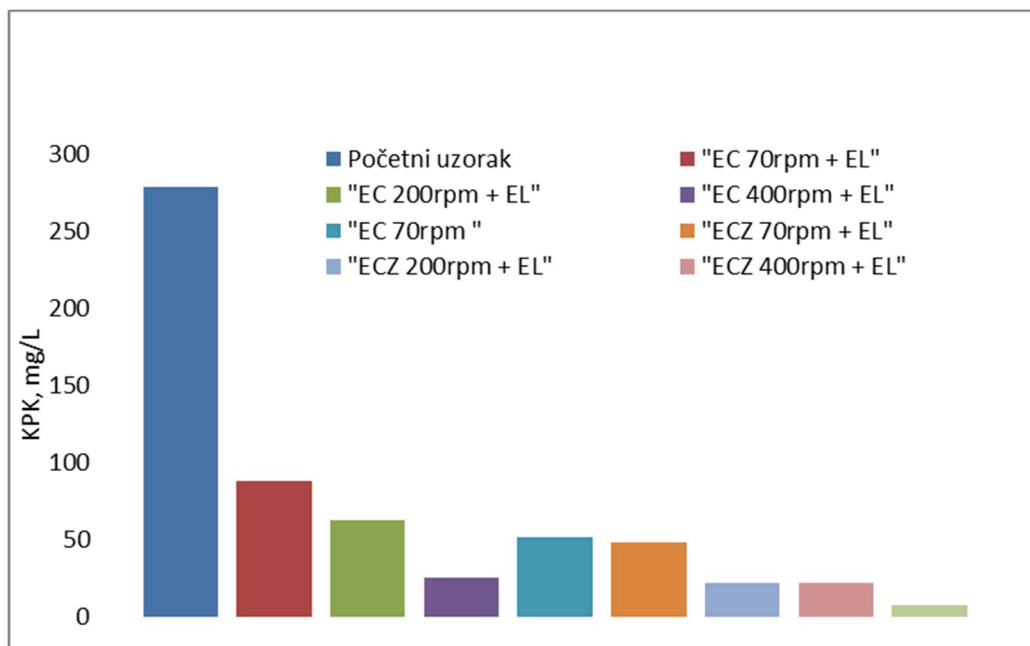
Slika 4. 6. Promjena temperature u ovisnosti o vremenu t za uzorke sa dodatkom zeolita pri različitim brzinama vrtnje miješala

Blagi porast temperature je vidljiv kod svih eksperimenata, najviše u intervalu 5-10 min gdje je porast od 21°C do 27,5°C. Porast temperature je nešto veći pri povećanju broja okretaja i kod eksperimenata sa dodatkom zeolita. Porast je manji u eksperimentima bez dodatka elektrolita. Ukoliko se otpadne vode s povišenom temperaturom ispuste u okoliš dolazi do termalnog onečišćenja. U primjeni ovog procesa taj porast temperature se može kontrolirati sa omjerom površine elektrode/volumen otopine.

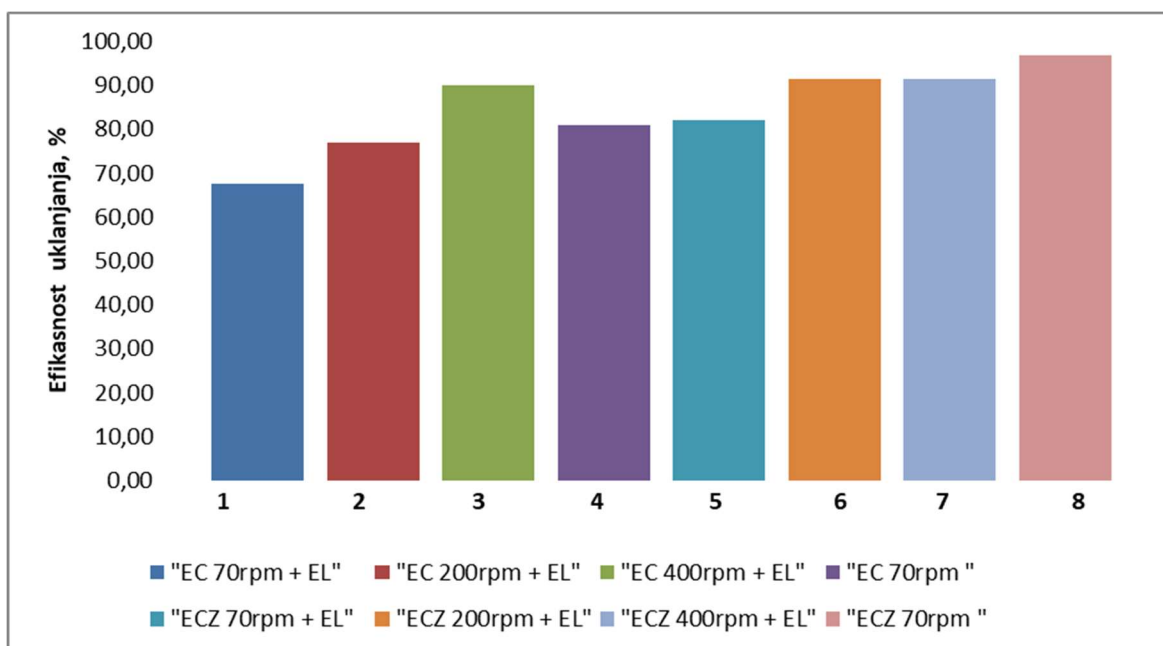
4.3. Analiza rezultata parametara nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu

4.3.1. Analiza vrijednosti kemijske potrošnje kisika (KPK)

Rezultati KPK tijekom trajanja procesa elektrokoagulacije, sa i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje miješala su prikazane u tablici 3.6. Slika 4.7 je prikaz usporedbe vrijednosti KPK početnog eksperimenta i ostalih eksperimenata, a slika 4.8. prikazuje efikasnost uklanjanja KPK.



Slika 4.7. Usporedba vrijednosti KPK za početni uzorak i ostale uzorke nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu



Slika 4.8. Prikaz efikasnosti uklanjanja KPK

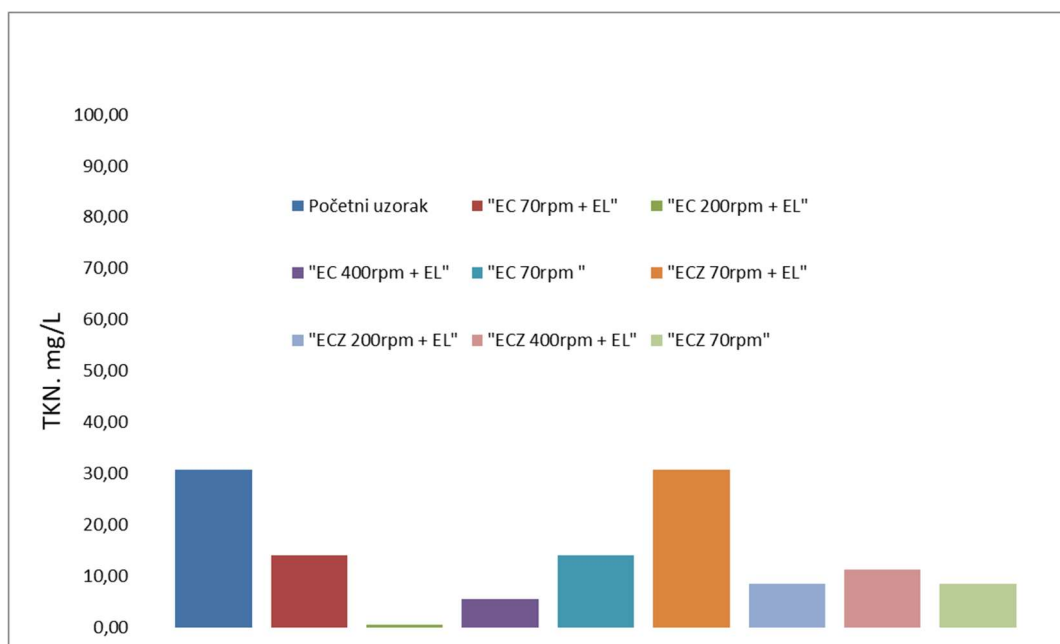
Tijekom eksperimenata s porastom brzine okretaja sa 70 rpm na 200 i 400 rpm, sadržaj organskih i anorganskih tvari izraženih preko KPK se smanjuje, odnosno stupanj uklanjanja izražen preko KPK raste.

Najveća efikasnost uklanjanja KPK postignuta je u eksperimentu 8, sa dodatkom zeolita pri 70 rpm, dok je najmanja efikasnost uklanjanja KPK u eksperimentu 1, bez dodatka zeolita pri 70 rpm.

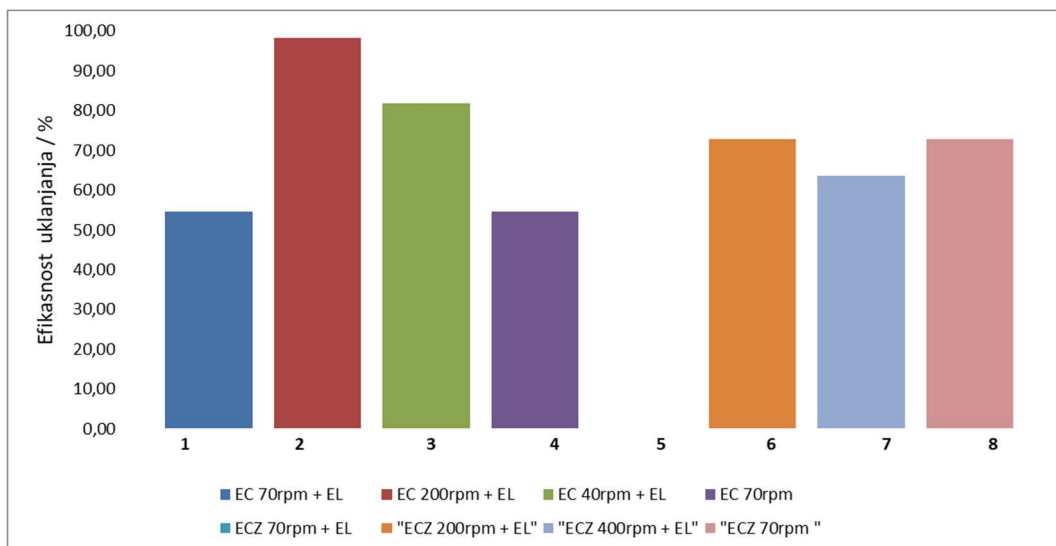
Bez dodatka elektrolita, stupanj uklanjanja izražen preko KPK je vrlo visok. Uz dodatak zeolita još i viši (96,69 %). Vrijednosti KPK u svim eksperimentima su ispod maksimalne dopuštene koncentracije što znači da se mogu ispustiti u površinske vode bez dodatne obrade.

4.3.2. Analiza vrijednosti dušika po Kjeldahlu

Rezultati dušika po Kjeldahlu tijekom trajanja integriranog procesa elektrokoagulacije, sa i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje miješala su prikazane u tablici 3.7. Slika 4.9. je prikaz usporedbe vrijednosti dušika po Kjeldahlu početnog eksperimenta i ostalih eksperimenata, a slika 4.10. prikazuje efikasnost uklanjanja dušika po Kjeldahlu.



Slika 4.9. Usporedba vrijednosti dušika po Kjeldahlu za početni uzorak i ostale uzorke nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu

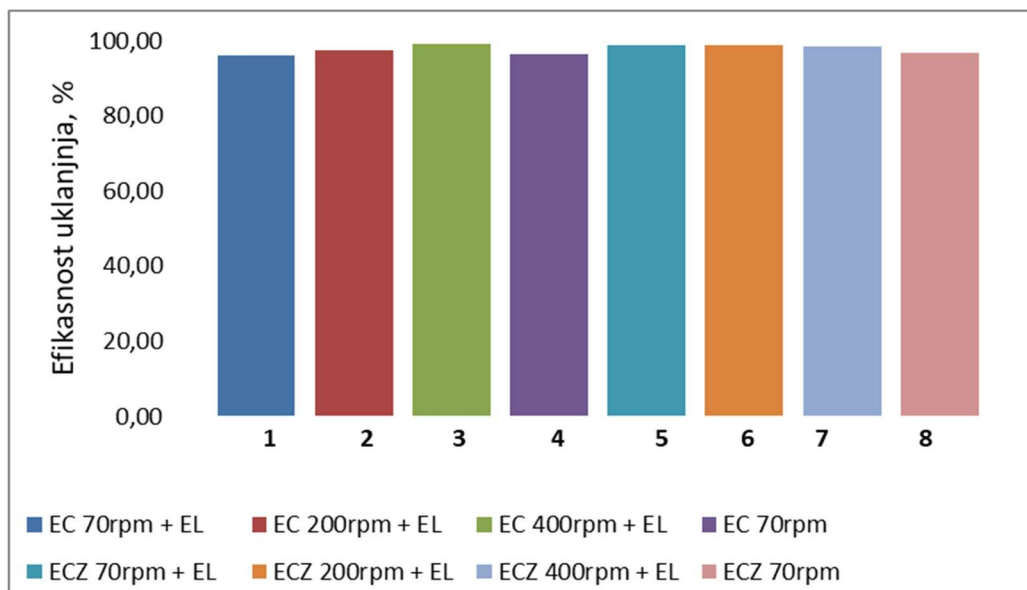


Slika 4.10. Prikaz efikasnosti uklanjanja dušika po Kjeldahlu

Sa porastom brzine okretaja kod eksperimenata od 1, 2 i 3 uklanjanje dušika po Kjeldahlu raste pa opada te je najveće je kod 200 rpm. Dodatak zeolita djeluje negativno na uklanjanje dušika po Kjeldahlu. U eksperimentima bez elektrolita 4 i 8, rezultat pokazuje da je bolje uklanjanje dušika po Kjeldahlu uz dodatak zeolita. Vidljivo je da na uklanjanje dušika značajan utjecaj ima brzina vrtnje miješala te dodatak zeolita i elektrolita.

4.3.3. Analiza rezultata mutnoće

Rezultati mutnoće tijekom trajanja integriranog procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje miješala su prikazane u tablici 3.8. Slika 4.11. je prikaz efikasnosti uklanjanja mutnoće.

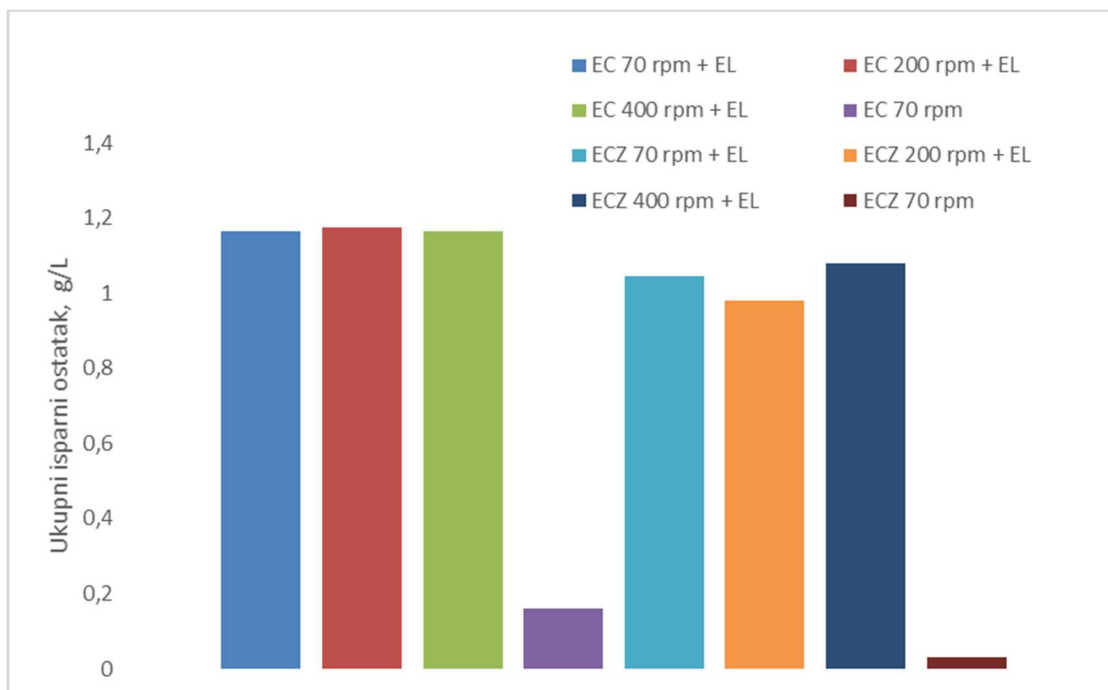


Slika 4.11. Prikaz efikasnosti uklanjanja mutnoće

Nakon provedbe procesa elektrokoagulacije u svim eksperimentima primjećuje se vrlo visoko uklanjanje mutnoće neovisno o dodatku zeolita i elektrolita te o broju okretaja miješala. Najbolje postignuto uklanjanje mutnoće od 99,12% je vidljivo kod eksperimenta 3 (400 rpm, dodatak elektrolita). Najlošije uklanjanje je vidljivo kod eksperimenta 1 u iznosu od 96,12 % (70 rpm, dodatak elektrolita).

4.3.4. Analiza rezultata ukupnog isparnog ostatka

Rezultati ukupnog isparnog ostatka tijekom trajanja integriranog procesa elektrokoagulacije, s i bez dodatka zeolita i elektrolita su prikazane u tablici 3.9. Slika 4.12 je prikaz ukupnog isparnog ostatka za sve eksperimente.

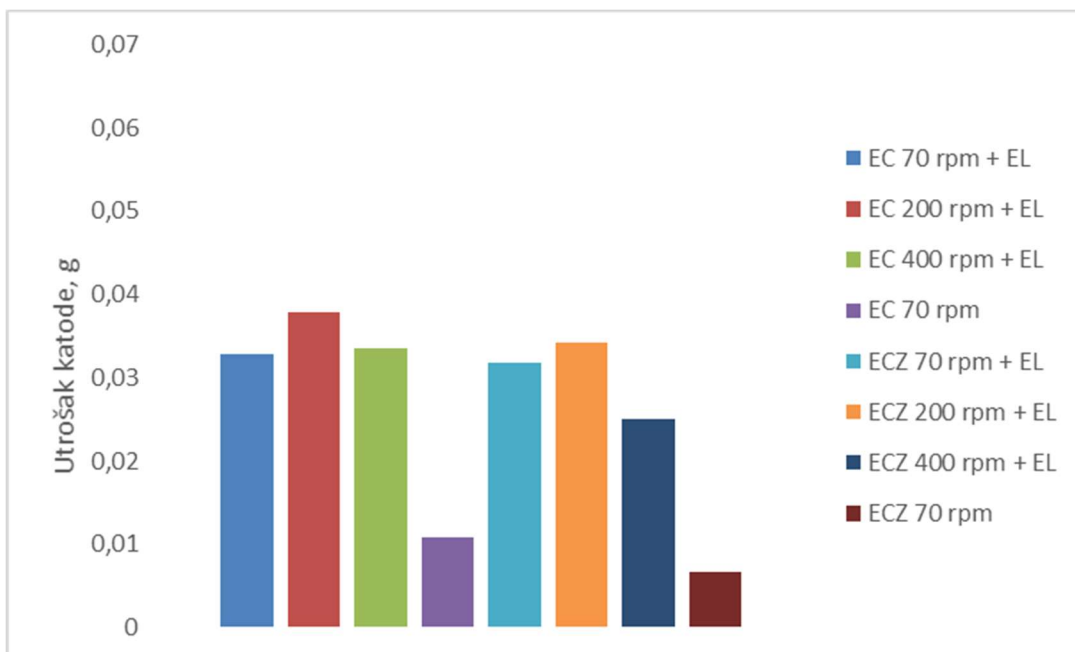


Slika 4.12. Prikaz vrijednosti ukupnog isparnog ostatka

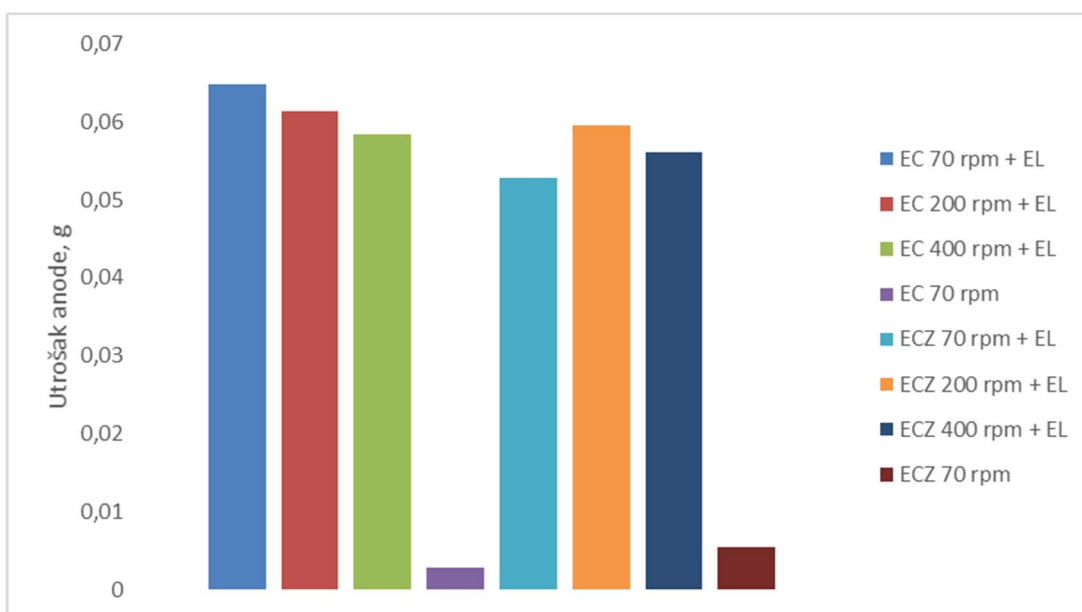
Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da porast brzine miješanja nema značajnog utjecaja na ukupni isparni ostatak. U eksperimentima sa dodatkom zeolita vidljive su manje vrijednosti ukupnog isparnog ostatka, a što se može pripisati zeolitu koji na sebe veže onečišćenja. Međutim, u eksperimentima sa dodatkom elektrolita može se uočiti da dodatak elektrolita uvelike podiže ukupni isparni ostatak.

4.3.5. Analiza rezultata masa elektroda

Dobiveni rezultati masa elektroda početnog uzorka procjedne vode i uzorka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu, prikazani su u tablici 3.2. Na slici 4.13 je prikaz vrijednosti utroška katode, a na slici 4.14. je prikaz vrijednosti utroška anode.



Slika 4.13. Prikaz vrijednosti utroška katode

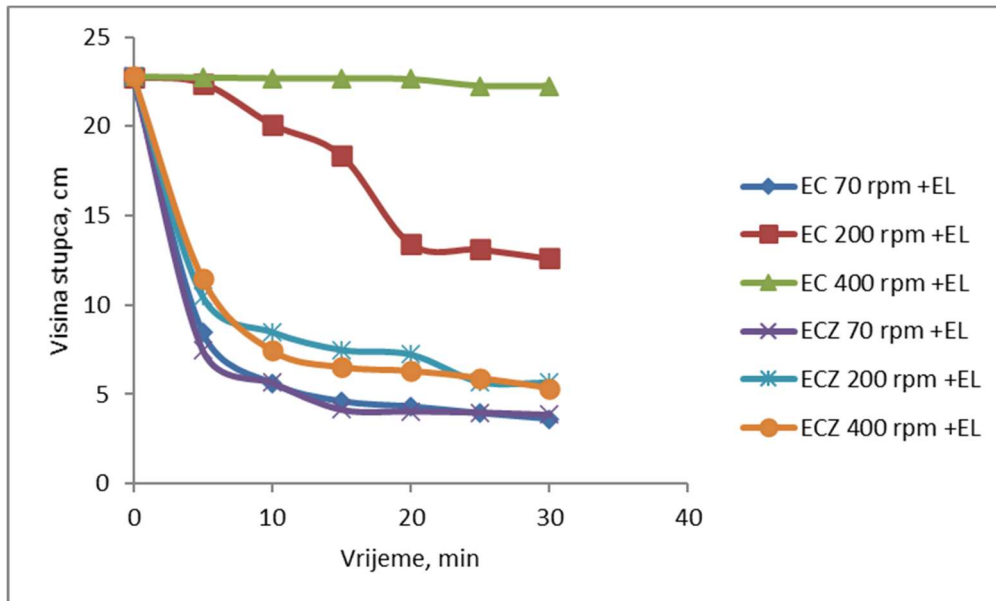


Slika 4.14. Prikaz vrijednosti utroška anode

U eksperimentima bez dodatka elektrolita, potrošnja elektroda je značajno smanjena. Porast broja okretaja miješala ne dovodi do povećanog trošenja elektroda. Najveća potrošnja je vidljiva kod eksperimenta 2 sa 200 rpm sa elektrolitom. Utrošak anode je očekivan ali utrošak katode potvrđuje drugačiji mehanizam, a što je u suglasnosti sa referencom¹⁹. Katoda se otapa zbog OH- iona koji nastaju u reakciji evolucije vodika.¹⁹

4.3.6. Analiza brzina taloženja

Dobiveni rezultati brzina taloženja početnog uzorka procjedne vode i uzoraka nakon integriranog procesa elektrokoagulacije i obrade na prirodnom zeolitu, prikazani su u tablici 3.10. Na slici 4.15. je prikaz promjene brzine taloženja u ovisnosti o vremenu t za sve provedene eksperimente.



Slika 4.15.. Promjena brzine taloženja u ovisnosti o vremenu t za sve uzorke s i bez dodatka zeolita i elektrolita pri različitim brzinama vrtnje miješala

Mase dobivenih taloga prikazane su u tablici 3.12. Iz grafičkog prikaza vidljivo je da kod uzoraka koji nisu sadržavali elektrolit taloženje vrlo sporo, odnosno kroz period od 30 minuta nije došlo do izdvajanja taloga. Za uzorke koji ne sadrže zeolit, utjecaj promjene brzine miješanja je vrlo izražen. Porastom brzine miješanja sa 70 rpm na 200 rpm i zatim na 400 rpm dolazi do pada brzine taloženja. Najmanju brzinu taloženja ima uzorak kod kojeg je proces proveden uz miješanje čija je brzina bila 400 rpm. Dodatkom zeolita utjecaj miješanja je manje izražen ali je prisutan. Također porastom brzine miješanja dolazi do smanjenja brzine taloženja. Brzina taloženja je najveća za uzorke kod kojih je elektrokoagulacija provedena pri brzini miješanja 70 rpm. Do ovakvog ponašanja uzorka dolazi zbog razbijanja flokula pri velikim brzinama miješanja.

4.3.7. Analiza operativnih troškova

Izrazi korišteni za izračunavanje operativnih troškova preuzeti su iz literature¹⁶ sagledavanje ukupnih troškova procesa u obzir je potrebno uzeti: troškove električne energije utrošene u procesu, troškove utroška mase elektroda te troškove nabave dodanog zeolita.

Izraz koji se koristi za izračun ukupnih troškova procesa glasi:

$$\text{Operativni troškovi} = a C_{\text{energija}} + b C_{\text{elektroda}} + c C_{\text{zeolit}} \quad (1-15)$$

gdje je:

C_{energija} – troškovi električne energije, kWh/m³

$C_{\text{elektroda}}$ – troškovi potrošenog materijala elektroda, kg Al/m³

C_{zeolit} – troškovi potrošenog zeolita, kg /m³

a – pretpostavljeni prosječni iznos cijene električne energije (0,95 kn kWh)¹⁶

b – prosječna tržišna cijena aluminija (11,6 kn/kg)¹⁶

c – prosječna cijena prirodnog zeolita (0,5 kn/kg)¹⁷

Napomena: svi troškovi su izraženi po 1 m³ volumena reaktora

Troškovi potrošnje električne energije izračunati su prema izrazu:

$$C_{\text{energija}} = \frac{U \cdot I \cdot t_{\text{EC}}}{V} \quad (1 - 16)$$

gdje je:

U – napon izvora struje, V

I – jakost struje, A

t_{EC} – trajanje procesa, h

V – efektivni volumen reaktora, m³

Teorijski troškovi koji su posljedica trošenja elektroda izračunati su prema Faradayevom zakonu:

$$= \frac{I \cdot t \cdot M_w}{z \cdot F \cdot v} \cdot C_{\text{elektroda}} \quad (1)$$

– 17)

gdje je:

M_w – molekularna masa aluminija (26,98 g/mol)

z – broj prenesenih elektrona ($z = 3$)

F – Faradayeva konstanta (96 487 C/mol)

Stvarni troškovi koji su posljedica trošenja elektroda izračunati su iz razlike masa elektroda prije i nakon procesa elektrokoagulacije. Rezultati analize operativnih troškova prikazani su u tablicama 4.16.-4.19. U izračune nisu uzeti u obzir troškovi dodatka elektrolita NaCl.

Tablica 4.16. Troškovi procesa elektrokoagulacije za uzorke bez dodatka zeolita izračunati preko Faraday-evog zakona

	$C_{\text{energija} \times a}$, kwh/m ³	$C_{\text{elektroda} \times b}$, kn/kg	Ukupno, kn/m ³	Prosječni trošak, kn/m ³
EC _{70RPM} ⁺ EL	12,11	3,11	15,23	13,56
EC _{200RPM} ⁺ EL	12,11	3,11	15,23	
EC _{400RPM} ⁺ EL	12,11	3,11	1,23	
EC _{70RPM}	7,52	1,04	8,56	

Tablica 4.17. Troškovi procesa elektrokoagulacije za uzorke s dodatkom zeolita izračunati preko Faraday-evog zakona

	$C_{\text{energija} \times a}$, kwh/m ³	$C_{\text{elektroda} \times b}$, kn/kg	$C_{\text{zeolit} \times c}$, kn/kg	Ukupno, kn/m ³	Prosječni trošak, kn/m ³
ECZ _{70rpm} ⁺ EL	12,11	3,11	10,00	25,23	23,83
ECZ _{200rpm} ⁺ EL	13,39	3,11	10,00	26,51	
ECZ _{400rpm} ⁺ EL	12,11	3,11	10,00	25,23	
ECZ _{70rpm}	7,32	1,03	10,00	18,36	

Tablica 4.18. Troškovi procesa elektrokoagulacije za uzorke bez dodatka zeolita izračunati preko utroška masa elektroda

	C _{energija} ^a , kWh/m ³	C _{elektroda} ^b , kn/kg	C _{elektroda} ^b , kn/kg	Ukupno. kn/m ³	Prosječni trošak, kn/m ³
		anoda	katoda		
EC _{70rpm} + EL	12,11	3,01	1,53	16,15	14,47
EC _{200rpm} + EL	12,11	2,84	1,76	16,71	
EC _{400rpm} + EL	12,11	2,71	1,55	16,38	
EC _{70rpm}	7,52	0,14	0,51	8,16	

Tablica 4.19. Troškovi procesa elektrokoagulacije za uzorke s dodatkom zeolita izračunati preko utroška masa elektroda

	C _{energija} ^a , 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			
ECZ _{70rpm} + EL	12,11	2,45	1,48	10	26,04	24,39
ECZ _{200rpm} + EL	13,39	2,76	1,59	10	27,74	
ECZ _{400rpm} + EL	12,11	2,60	1,16	10	25,88	
ECZ _{70rpm}	7,32	0,25	0,31	10	17,89	

Iz podataka prikazanih u tablici je vidljivo da su troškovi provođenja procesa elektrokoagulacije znatno manji ukoliko se ne koristi zeolit. Troškovi procesa za uzorke kod kojih je proces proveden bez dodatka zeolita iznose između 8,16 kn/m³ i 16,72 kn/m³. Troškovi za provođenje procesa s dodatkom zeolita su upravo veći za troškove nabave korištenog zeolita i iznose između 17,89 kn/m³ i 27,74 kn/m³.

,

4. ZAKLJUČAK

- > Karakteristike simulirane procjedne vode iz kompostiranja biootpada su sljedeće: pH vrijednost iznosi 7,95, KPK iznosi 278,32 mg O₂/L , TKN iznosi 30,82 mgN/L. Dobivene vrijednosti u usporedbi sa graničnim vrijednostima prema Pravilniku o graničnim emisijama otpadnih voda ukazuju da je dobiveni uzorak podoban za ispušt u sustav javne odvodnje, dok je za ispušt u površinske vode nužna prethodna obrada. Električna vodljivost iznosi 205 μS / cm, a mutnoća iznosi 87,20 NTU. Njihove granične vrijednosti nisu definirane Pravilnikom.
- > S porastom broja okretaja dolazi do porasta pH. Konačni pH je u rasponu od 9.21-9.31. Dodatak zeolita ublažava porast pH, dok dodatak elektrolita nema značajan utjecaj na pH. Kod električne vodljivosti bez dodatka elektrolita, vodljivost je značajno smanjena, a dodatak zeolita nema utjecaja.
- > Porast temperature je vidljiv tijekom integriranog procesa elektrokoagulacije, iako je nešto brži prilikom povećanja broja okretaja kod uzoraka sa zeolitom. Porast temperature uzrokuje termalno onečišćenje koje se može kontrolirati sa omjerom površine elektrode/volumen otopine.
- > Stupanj uklanjanja KPK raste prilikom povećanja broja okretaja miješala sa 70 rpm na 200 rpm i 400 rpm. Dodatak elektrolita nema značajan utjecaj na učinkovitost uklanjanja, budući da je učinkovitost bez njega vrlo visoka. Uz zeolit, još i više. Usporedbom simuliranog i ispitivanog uzorka vidljivo je izrazito smanjenje KPK.
- > Uklanjanje dušika po Kjeldahlu je bolje uz dodatak zeolita i veću brzinu vrtnje miješala. Visoko uklanjanje mutnoće je neovisno o dodatku zeolita i elektrolita te brzini vrtnje miješala. Vrijednosti ukupnog isparnog ostatka su manje jer zeoliti na sebe vežu onečišćenja tijekom procesa. Dodatak elektrolita povećava vrijednosti ukupnog isparnog ostatka.
- > Za uzorke bez zeolita, utjecaj promjene brzine miješanja je vrlo izražen. Porastom brzine vrtnje miješala sa 70 rpm na 200 rpm i 400 rpm dolazi do pada brzine taloženja zbog razbijanja flokula.
- > Troškovi provođenja procesa elektrokoagulacije su osjetno manji ukoliko se ne koristi zeolit. Troškovi procesa bez dodatka zeolita iznose 8,16 kn/m³ i 16,71

kn/m³. Troškovi procesa uz uporabu zeolita su veći za troškove nabave zeolita, a najmanje troškove zahtijevaju procesi bez dodatka elektrolita, i to u oba slučaja.

5. LITERATURA

1. Hrvatska agencija za okoliš i prirodu., (2018). *Upute za određivanje količina odloženog biorazgradivog komunalnog otpada na odlagališta*, 1-3.
2. Smoljko I., *Recikliranje krutog otpada*, interna skripta (2019), 4-8.
3. Eurostat. (23. 09 2019). *Statistički podaci o otpadu*. Dohvaćeno iz https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Waste_statistics/hr
4. Zakon. (14/2019). Zakon o održivom gospodarenju otpadom, NN 94/2013.
5. <https://ktd-cabar.hr/wp-content/uploads/2018/04/Upute-za-kompostiranje.pdf>
6. Chatterjee N., Flury M., Hinman C., G. Cogger C., (2013). Chemical and Physical Characteristics of Compost Leachates. str. 27-38.
7. Oreščanin, V. (2014). Procjedne vode odlagališta otpada. 5-7.
8. Kayleigh Brown, Avik J. Ghoshdastidar, Jillian Hanmore, James Frazee, Anthony Z. Tong. (2013). Membrane bioreactor technology: A novel approach to the treatment. *Waste Management*, 3-7.
9. Lafrance C., Lessard P., Buelna G., (1996). Évaluation de la filtration sur tourbe et compost pour le traitement de l'effluent d'une usine de compostage de résidus verts. *Can. J. Civ. Eng.*, str. 1041-1050.
10. Amani, T., Veysi, K., Elyasi, S., Dastyar, W., (2014). A precise experimental study of various affecting operational parameters in electrocoagulation-flotation process of highload compost leachate in a batch reactor. *Water Science Technology*, str. 1314-1321.
11. Guohua C. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification*, str. 11-41.
12. I. Kabdaşlı, I. Arslan-Alaton, T. Ölmez-Hancı & O. Tünay. (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewaters; a critical review. *Environmental Technology Reviews*, str. 2-45.
13. Naje A.S., Chelliapan S., Zakaria Z., Ajeel M.A., (2016) *A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater*, str.4.

14. Barrera-Díaz C., Morales Rea G., Avila Cordoba L., Pavon-Silva, T., Bilyeu, B., Electrochemical treatment applied to food-processing industrial wastewater. *Ind. Eng. Chem. Res*, str. 34-38.
15. Andričić B., Kovačić T. (2010). Zeoliti. *Kataliza*, interna skripta str. 120-130.
16. Lončar, G., Halkijević, I., Posavčić, H., Ban, I., *Primjena elektrokoagulacijskog uređaja s ciljem smanjenja koncentracije amonijaka*, *Hrvatske vode* 27 (2019) 108, 129-142.
17. Edith M. Flanigen, Robert W. Broach and Stephen T. Wilson, *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis*, Wiley Online Library, Chapter 1, 2010.
18. Šunjić A., Analiza procesa kompostiranja biotpada, diplomski rad (2020)
19. Ghernaouta, D., Ghernaoutb, B., Boucherita, A., Naceura, M.W., Khelifaa, A., Kelli, A., *Study on mechanism of electrocoagulation with iron electrodes in idealised conditions and electrocoagulation of humic acids solution in batch using aluminium electrodes*, *Desalination and Water treatment* 8 (2009) 91-99.
20. Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda NN 26/20, Tablica 1, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_26_622.html