

# Primjena elektrokoagulacije u cilju smanjenja koncentracije fosfata u vodama

---

Posavčić, Hana; Halkijević, Ivan; Lončar, Goran

Source / Izvornik: **Common Foundations 2018 - uniSTem: 6th Congress of Young Researchers in the Field of Civil Engineering and Related Sciences, 2018, 186 - 191**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/CO/ZT.2018.26>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:834596>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



## Primjena elektrokoagulacije u cilju smanjenja koncentracije fosfata u vodama

Hana Posavčić<sup>1</sup>, Ivan Halkijević<sup>1</sup>, Goran Lončar<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Rpublika Hrvatska, [hposavcic@grad.hr](mailto:hposavcic@grad.hr)

### Sažetak

Najčešći izvori fosfora u vodama uključuju industriju, poljoprivredu, stočarstvo i kućanske otpadne vode, a povećane količine fosfora u vodi izazivaju onečišćenje vode, smanjenje količine kisika i eutrofikaciju. Stoga je u ovom radu analizirana učinkovitost elektrokoagulacijskog uređaja sa željeznim elektrodama na smanjenje koncentracije fosfata u vodi. Na pilot uređaju provedeno je pet različitih eksperimenata u kojima su varirani različiti operativni parametri kao što su jakost struje, protok, vrijeme rada reaktora i dodatak elektrolita. Nakon 120 minuta rada reaktora, pri protoku od 0.05 l/s i jakosti struje od 5 A, koncentracija fosfata se smanjila sa 50 mg/l na 10 mg/l, a nakon 24 sata taloženja, na 2 mg/l. Pokazalo se da dodatak soli od 2 g/l ne utječe na učinkovitost uklanjanja, ali utječe na smanjenje potrošnje električne energije, a time i na smanjenje operativnih troškova procesa. *Ključne riječi: elektrokoagulacija, pilot uređaj, fosfat*

## Application of electrocoagulation to reduce phosphate concentration in water

### Abstract

The most common sources of phosphorus in water include industry, agriculture, livestock and domestic wastewaters, and the increased amount of phosphorus in water can cause eutrophication, water pollution and oxygen depletion. In this paper the efficiency of the electrocoagulation using iron electrodes was analysed in order to reduce the phosphate concentration in water. Five different experiments were conducted on a pilot device and different operation parameters were varied, such as current, flow rate, operation time and the addition of supporting electrolyte. After 120 minutes, with the flow rate of 0.05 l/s and current of 5 A, the phosphate concentration decreased from 50 mg/l to 10 mg/l, and after 24 hours of sedimentation to 2 mg/l. It was shown that the electrolyte addition does not affect the phosphate removal efficiency, but decreases electrical energy consumption, and thus, decreases operational costs of the process.

*Keywords: electrocoagulation, pilot device, phosphate*

## 1. Uvod

Industrije kao što su tvornice gnojiva, tovilišta, mesna, mliječna industrija i dr., pridonose visokim koncentracijama fosfora u okolišu [1]. Raspon koncentracije fosfora u kućanskim i industrijskim otpadnim vodama kreće se najčešće od 3 mg/l do 15 mg/l P [2]. Prema EU direktivi (91/271/EEC) [3], granična vrijednost ukupnog fosfora efluenta je u funkciji veličine uređaja za pročišćavanje i iznosi 2 mg/l P za 10 000 ES – 100 000 ES te 1 mg/l P za više od 100 000 ES.

Fosfor se u vodi nalazi u obliku soli i estera fosforne kiseline. Iz fosforne kiseline mogu nastati anorganski fosfati kao što su orto-fosfati koji potom koriste bakterije i mikroorganizme za stvaranje organskih fosfata [1].

Fosfor se iz otpadne vode može ukloniti kemijskom precipitacijom, biološkim tretmanom i/ili fizičkim tretmanom [1]. Međutim potreba za učinkovitijim postupcima dovela je do razvitka elektrokemijskih tehnologija kao što su elektrokoagulacija, elektrooksidacija i elektrodijaliza [4].

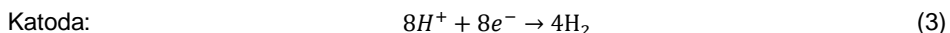
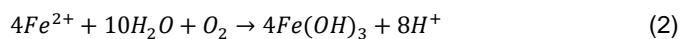
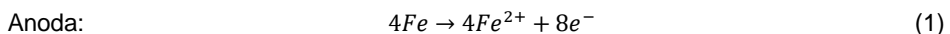
Cilj ovog rada je ispitati utjecaj operativnih parametara, kao što su protok, jakost struje i dodatak elektrolita (NaCl), na učinkovitost uklanjanja fosfata elektrokoagulacijskim procesom.

## 2. Teorija elektrokoagulacije

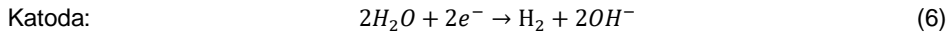
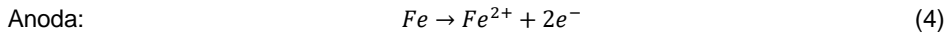
Elektrokoagulacija (EK) podrazumijeva stvaranje koagulantna upotrebom električnog polja i žrtvujućih elektroda u cilju izdvajanja, agregiranja i taloženja onečišćenja (suspendiranih čestica i otopljenih tvari) iz otpadne vode [5]. Neke od prednosti EK-a su: visoka učinkovitost uklanjanja onečišćenja, izostanak dodavanja kemikalija, prikladna je za različite vrste onečišćenja te, u usporedbi sa sličnim metodama pročišćavanja voda, proizvodi manje količine mulja i može imati manje operativne troškove [6].

Tri glavna koraka elektrokoagulacijskog procesa su: elektrolitska reakcija na površini elektrode, formiranje koagulanata u otopini i adsorpcija otopljenih i koloidnih čestica na koagulate te uklanjanje sedimentacijom ili flotacijom. S obzirom na to da su jeftine i lako dostupne, u procesu EK-a najčešće se koriste željezne (Fe) ili aluminijske (Al) elektrode [6]. Ako se željezo koristi kao anoda, njegovom oksidacijom nastaju željezni hidroksidi  $Fe(OH)_n$ ,  $n = 2$  ili  $3$ , za čiji opis postoje dva mehanizma (jednadžbe (1), (2), (4), (5)), dok na katodi dolazi do generiranja vodika (jednadžbe (3) i (6)) [7]:

Mehanizam 1



Mehanizam 2:



$Fe(OH)_n$  se u otopini nalazi kao želatinska suspenzija koja kompleksacijom ili elektrostatskim privlačenjem, koju slijedi koagulacija, zahvaća onečišćenja iz otpadne vode. Količina generiranih flokula primarno ovisi o materijalu elektroda, vremenu rada elektroda i gustoći jakosti struje [8]. Faradayevim zakonom je definiran odnos jakosti struje  $I$  i elektrolitski generirane mase  $m$  (jednadžba 7):

$$m = \varphi \frac{It}{zF} M \quad (7)$$

gdje je:  $m$  masa metala (g),  $t$  vrijeme rada elektrode (h),  $I$  jakost struje (A),  $M$  molekularna masa Fe (g/mol),  $z$  broj transferiranih elektrona (2 za  $Fe^{2+}$  ili 3 za  $Fe^{3+}$ ),  $F$  Faradayjeva konstanta (96 487 C/mol),  $\varphi$  korekcijski koeficijent učinkovitosti elektrolitske disocijacije. Napominje se da efikasnost disocijacije može biti veća od 100 %, tj. veća od one određene Faradayevim zakonom [9].

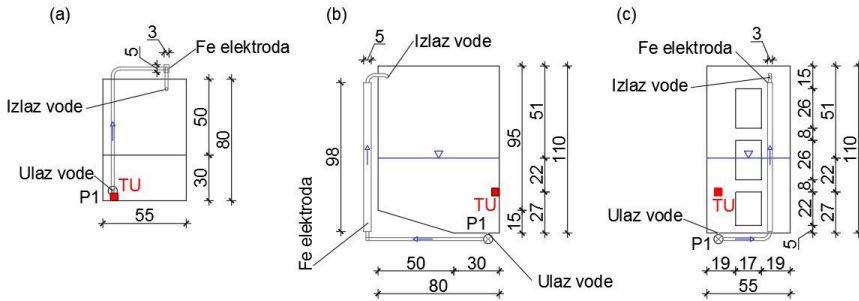
### 3. Materijali i metode

Na Slici 1 je prikazan inovativni elektrokoagulacijski uređaj hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Geometrija komore i reaktora, uključujući pozicije ponora (usisa) i izvora (unosa), prikazana je na Slici 2.



**Slika 1.** Pilot EK-a uređaja instaliran u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Cjelokupni proces pročišćavanja vode podijeljen je u nekoliko faza. Primarna komora se puni vodom iz vodoopskrbnog sustava grada Zagreba do dubine  $h = 0.49$  m (što odgovara volumenu od 180 l, Slika 2). U komoru se unosi 11.5 ml 85 %-tne fosforne kiseline  $H_3PO_4$  koja se miješa do postizanja homogene inicijalne koncentracije fosfata  $PO_4\text{-P}$  (koncentracija fosfora iskazana preko izmjerene koncentracije fosfata;  $PO_4^{3-}$  [mg/l] =  $PO_4\text{-P}$  [mg/l] x 3.06) od 50 mg/l. Za potrebe eksperimenata varirana je inicijalna koncentracija elektrolita. U eksperimentima 1, 2, 3 i 4, u otopinu se kontinuirano unosi odgovarajuća količina NaCl kako bi se postigla koncentracija od 2 g/l, dok se eksperimentom 5 ne predviđa dodatak NaCl (rezidualna koncentracija 0.2 g/l). Zatim se pokreće crpka P1 (Slika 2) kojom se ostvaruje usis vode u pridnenom sloju i njezino provođenje kroz Fe elektrode. Nakon prolaska vode kroz elektrodu s protokom 0.05 l/s i 0.3 l/s, voda se vraća na površinski sloj vode u komori na poziciji naznačenoj na Slici 2. Vrijeme rada reaktora je 30 min do 240 min, ovisno o eksperimentu. Nakon prekida rada reaktora i uzimanja uzorka, voda se ostavlja u mirovanju 24 sata (taloženje). Nakon 24 sata taloženja uzimaju se uzorci, aktivira se crpka P2 s kojom se voda prebacuje u drugu komoru i uređaj se prazni.



**Slika 2.** Shematski prikaz EK-a uređaja s naznačenom pozicijom uzorkovanja vode za mjerenje parametara kvalitete vode (TU); (a) tlocrt, (b) pogled s boka, (c) prednja strana

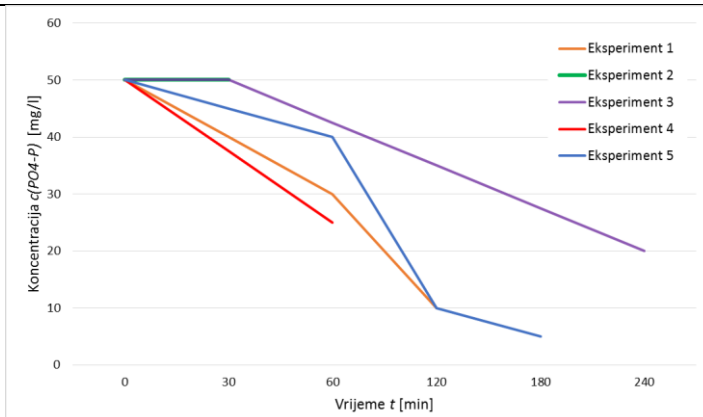
Uzorci vode za mjerenje koncentracija uzimaju se neposredno prije aktivacije reaktora (početno stanje), svakih 30 minuta, nakon prekida rada reaktora te nakon 24 sata taloženja. Uzorci se uzimaju na poziciji TU (točka uzorkovanja) (Slika 2). Koncentracije fosfata  $PO_4\text{-P}$  procijenjene su indikator listićima Quantofix Phosphate u rasponu od 0 do 100 mg/l  $PO_4\text{-P}$  proizvođača Macherey-Nagel. Ultrazvučni mjerač FLEXUS F601 (proizvođač Flexim) korišten je za mjerenje protoka. Jakost struje kontrolirana je laboratorijskim ispravljačem snage 900 W (MC Power LBN 1990) s rasponom jakosti struje od 0 do 60 A.

## 4. Rezultati mjerenja

Na pilot uređaju provedeno je 5 različitih eksperimenata u cilju utvrđivanja učinkovitosti smanjenja fosfata s obzirom na različite vrijednosti procesnih parametara (protok, jakost struje, trajanje elektrolize i dodatak elektrolita, Tablica 1). Na Slici 3 su prikazane izmjerene vrijednosti koncentracije  $PO_4\text{-P}$  na poziciji TU ( $X = 8$  cm,  $Y = 0$  cm,  $Z = -22$  cm (22 cm ispod površine vodnog lica)) u uvjetima provedenih eksperimenata (Tablica 1).

**Tablica 4.** Nomenklatura provedenih eksperimenata s rezultatima smanjenja inicijalne koncentracije  $\text{PO}_4\text{-P} = 50 \text{ mg/l}$  ( $Q$  – protok kroz reaktor,  $I$  – jakost struje,  $t$  – vrijeme rada reaktora,  $S$  – koncentracija soli,  $C_0$  – inicijalna konc.  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $C_t$  – konc.  $\text{PO}_4\text{-P}$  nakon vremena  $t$ ,  $\Delta C_t$  – smanjenje inicijalne konc.  $\text{PO}_4\text{-P}$  nakon vremena  $t$ )

Eksperiment	$Q$ [l/s]	$I$ [A]	$t$ [min]	$S_{\text{NaCl}}$ [g/l]	smanjenje $\text{PO}_4\text{-P}$ [%] ( $C_0 \rightarrow C_t$ ; $\Delta C_t$ [mg/l])
1	0.05	5	120	2	80 (50 $\rightarrow$ 10.0 ; 40.0 [mg/l])
2	0.3	16	30	2	0 (50 $\rightarrow$ 50.0 ; 0.0 [mg/l])
3	0.05	2.5	240	2	60 (50 $\rightarrow$ 20.0 ; 30.0 [mg/l])
4	0.05	10	60	2	50 (50 $\rightarrow$ 25.0 ; 25.0 [mg/l])
5	0.05	5	180	0.2	90 (50 $\rightarrow$ 5.0 ; 45.0 [mg/l])



**Slika 3.** Izmjerene vrijednosti koncentracije  $\text{PO}_4\text{-P}$  na poziciji TU u uvjetima provedenih eksperimenata 1 – 5

Eksperimentom 1 ostvareno je smanjenje koncentracije fosfata od 80 % nakon 120 minuta rada reaktora (Tablica 1 i Slika 3). S druge strane, eksperimentom 2, pokazano je da povećanje jakosti struje (16 A) i povećanje protoka (0.3 l/s) te skraćivanje trajanja protjecanja kroz elektrode (30 min) ne utječe na povećanje učinkovitosti. Iz navedenog se može zaključiti da je za stvaranje flokula potreban duži rad elektroda. Eksperimentom 3 pokazalo se da smanjenje jakosti struje (2.5 A) i produljenje trajanja elektrolize (240 min) rezultira sporijim stvaranjem flokula, ali bržom adsorpcijom i taloženjem. Međutim pokazalo se da je nastalo premalo flokula te da učinak nakon 240 minuta iznosi 60 %. Eksperimentom 4, kada je jakost struje bila 10 A, dobivena je slična učinkovitost uklanjanja kao i u eksperimentu 1 kada je jakost struje bila 5 A. Interesantno je uočiti da je nakon 120 minuta, eksperimentom 5 (bez dodatka soli), dobivena ista učinkovitost (80 %) kao i eksperimentom 1. Međutim nedostatak elektrolita smanjuje provodljivost te je potreban veći napon (17 V u usporedbi s prijašnjih 5 V) kako bi jakost struje ostala ista (5 A). Ovakvo povećanje napona utječe na potrošnju električne energije, a time i na povećanje operativnih troškova procesa. Također, pokazalo se da taloženje nakon elektrolize ima značajan utjecaj na smanjenje koncentracije

fosfata. Nakon 4 sata taloženja, učinkovitost smanjenja u svim pokusima iznosila je između 80 % i 90 %, a nakon 24 sata taloženja koncentracija fosfata dodatno se smanjila na 2 mg/l (96 %), 8 mg/l (84 %), 5 mg/l (90 %), 5 mg/l (90 %) i 3 mg/l PO<sub>4</sub>-P (94 %) za eksperimente 1, 2, 3, 4, 5.

## **5. Zaključak**

U radu je ispitan utjecaj protoka, jakosti struje, početne koncentracije elektrolita i trajanja rada reaktora na učinkovitost uklanjanja fosfata PO<sub>4</sub>-P metodom elektrokoagulacije. Prema rezultatima, pri protoku od 0.05 l/s i jakosti struje od 5 A (eksperimenti 1 i 5), učinkovitost uklanjanja fosfata je iznosila 80 % nakon 120 min rada elektroda, a nakon 24 sata taloženja 96 % i 94 %. Pokazalo se da dodatak soli od 2 g/l (eksperiment 1) ne utječe na povećanje učinkovitosti uklanjanja, ali utječe na smanjenje potrošnje električne energije, a time i na smanjenje operativnih troškova procesa. Istraživanje je pokazalo kako taloženje značajno utječe na učinkovitost EK-a procesa te se zbog nedovoljno istraženog područja, preporučuje daljnja istraživanja usmjeriti na proučavanje mehanizma taloženja u cilju postizanja protočnosti cijelog procesa.

## **Literatura**

- [1] Sumi, Y.: High-level Phosphorus Removal in a Small Municipal Wastewater Treatment Plant (WWTP), Diplomski rad, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, SAD, 1999.
- [2] Sincero, G.A.: Physical-chemical Treatment of Water and Wastewater, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003.
- [3] European Commission: Council directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment, Off. J. Eur. Union L135, pp. 40–52, 1991, doi:10.3002/1977058.
- [4] Feng, Y., Yang, L., Liu, J., Logan, B.E.: Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation, Environ Sci Water Res Technol, 2 (5), pp. 800-831, 2016, doi: 10.1039/c5ew00289c.
- [5] Gardić, V.: Primena elektrohemijskih metoda za prečišćavanje otpadnih voda. Deo I - elektrodepozicija i elektrokoagulacija, Zaštita materijala, 48 (1), pp. 49-58, 2007.
- [6] Ozyonar, F.: Treatment of Train Industry Oily Wastewater by Electrocoagulation with Hybrid Electrode Pairs and Different Electrode Connection Modes, Int. J. Electrochem. Sci., 11 (2), pp. 1456-1471, 2016.
- [7] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L.: Electrocoagulation (EC) - science and application, J. Hazard. Mater. B, 84 (1), pp. 29–41, 2001, doi: 10.1016/S0304-3894(01)00176-5.
- [8] Irdemez, S., Yildiz, Y.S., Tosunoglu, V.: Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes, Separation and Purification Technology, 52 (2), pp. 394–401, 2006, doi: 10.1016/j.seppur.2006.05.020.
- [9] Sillanpää, M., Särkkä, H., Vepsäläinen, M.: NOM Removal by Electrochemical Methods, Natural organic matter in water : characterization and treatment methods, 1st Edition, Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 81-111, doi: 10.1016/B978-0-12-801503-2.00004-5.