

Vladimir Lukačević, Marijana Kraljić Roković

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Marulićev trg 19, Zagreb

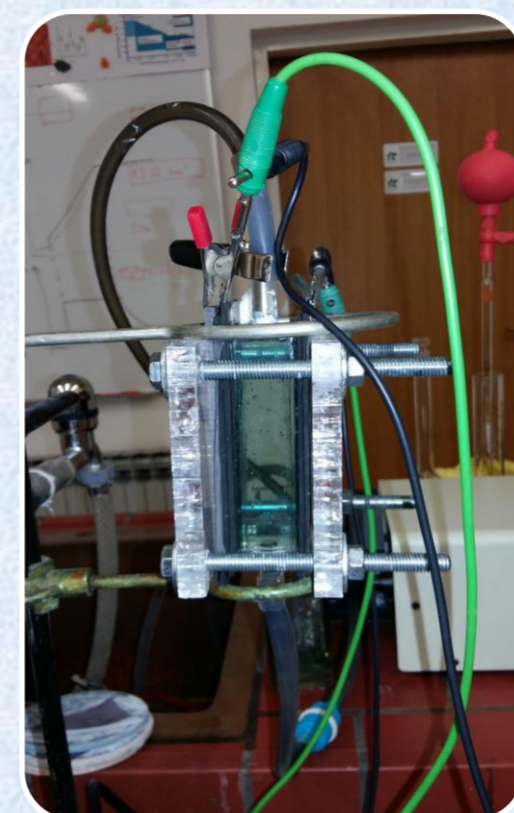
### UVOD

Posljednjih nekoliko godina razvila se posebna briga za uklanjanje bakra iz različitih vrsta otpadnih voda, bilo da su to vode s niskom ili visokom koncentracijom bakra. Uklanjanje bakra iz otpadnih voda postiže se neelektrokemijskim metodama kao što su precipitacija, isparavanje, adsorpcija ionsko-izmjenjivačkim smolama, ekstrakcija otapalom ili elektrokemijskim metodama kao što su elektrodijaliza, katodna elektrodepozicija ili čak kombinacijom kemijsko-elektrokemijskih procesa. Svrha ovog rada bila je ukloniti ione bakra iz modelne otopine bakar(II)-sulfata elektrokemijskim putem. Bakar je uklonjen pomoću elektrokemijskog protočnog reaktora. Elektroliza je provedena pri konstantnom naponu uz sedam različitih brzina protoka. Također, određena je djelotvornost uklanjanja bakra i specifična potrošnja energije, kao i uvjeti prijenosa mase u reaktoru. Određene su bezdimenzijske veličine, te korelacijska jednadžba za korišteni reaktor.

### KATODNA ELEKTRODEPOZICIJA BAKRA



Slika 1. Modelna otopina  $\text{CuSO}_4$



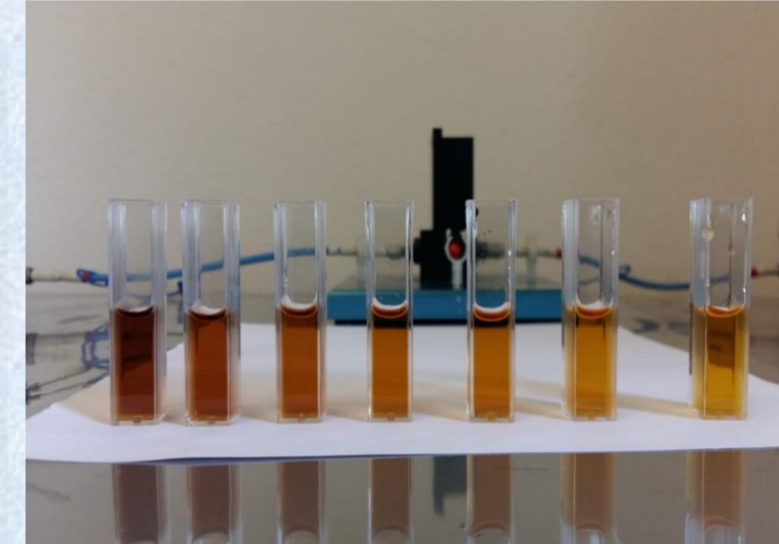
Slika 2. Elektrokemijski protočni reaktor



Slika 3. Reducirani bakar odvojen od elektrode



Slika 4. Izgled olovne elektrode a) prije i b) poslije polarizacije, izgled čelične elektrode c) prije i d) poslije elektrokatodne depozicije



Slika 5. Priprema uzoraka za određivanje nepoznate koncentracije bakra metodom UV/VIS spektrometrije

### EKSPERIMENTALNI DIO

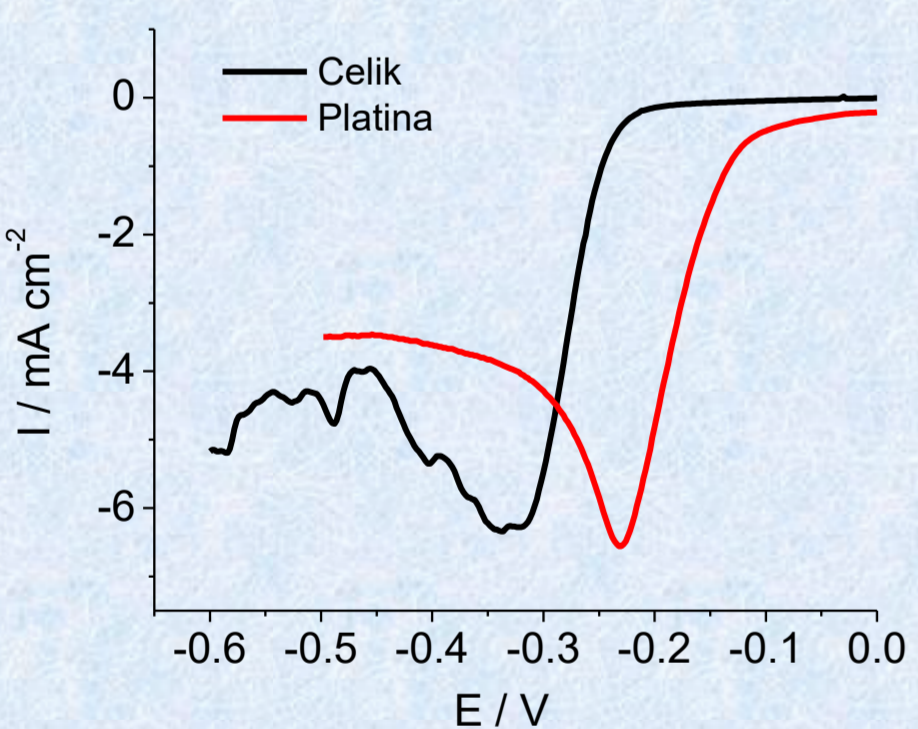
Korišteni reaktor (slika 2) ima oblik kvadra čije su stranice napravljene od pleksiglasa. Na kraćim stranicama okvira nalazi se kružni otvor iz kojega izlaze cijevi za dovod odnosno odvod otopine. Korištene elektrode stavljaju se na otvor reaktora na način da su preklapljene pločama pleksiglasa i zategnute vijcima.

Otopina koja je korištena kao modelna otopina otpadne vode je otopina bakar(II)-sulfata u  $0,5 \text{ mol dm}^{-3}$  sulfatne kiseline. Molna koncentracija  $\text{CuSO}_4$  iznosi  $0,04 \text{ mol dm}^{-3}$ . (slika 1).

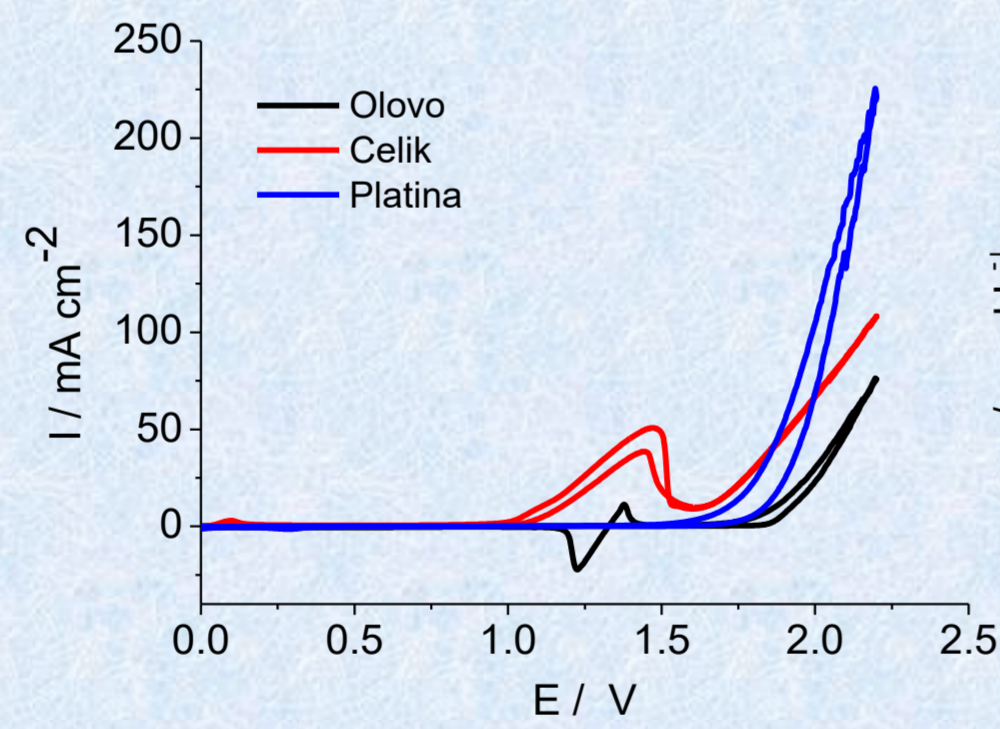
Nakon sastavljanja elektrokemijskog reaktora i elektroda, krajevi cijevi za dovod i odvod otopine uranjaju se zajedno u posudu u kojoj se nalazi 200 ml modelne otopine. Tako sastavljeni reaktor spaja se na pumpu s podesivom brzinom protoka elektrolita. Brzine protoka su se kretale u granicama od  $3,89\text{--}15,80 \text{ ml s}^{-1}$  što je te su označene brojevima od 2-7. Mjerenja su provedena pri konstantnom naponu koji je iznosio 2,5 V, te pri različitim brzinama strujanja elektrolita. Vrijeme mjerenja iznosilo je 2 sata, prilikom čega se održavao napon konstantnim. Svakih 10 minuta očitavala se i zapisivala struja, te svakih 20 minuta skupljala frakcija od 1 ml modelne otopine, koje su naknadno podvrgnute metodi ispitivanja UV/VIS spektrometrijom (slika 5).

Izgled čelične elektrode nakon redukcije bakra, te olovne elektrode nakon polarizacije kod pozitivnih potencijala, oksidacije prikazano je na slici 4. Čelična elektroda stavlja se u vakuum sušionik kako bi se uklonili mogući zaostaci vode. Nakon sušenja bakar dobiven na elektrodi skida se špatulom i važe (slika 3).

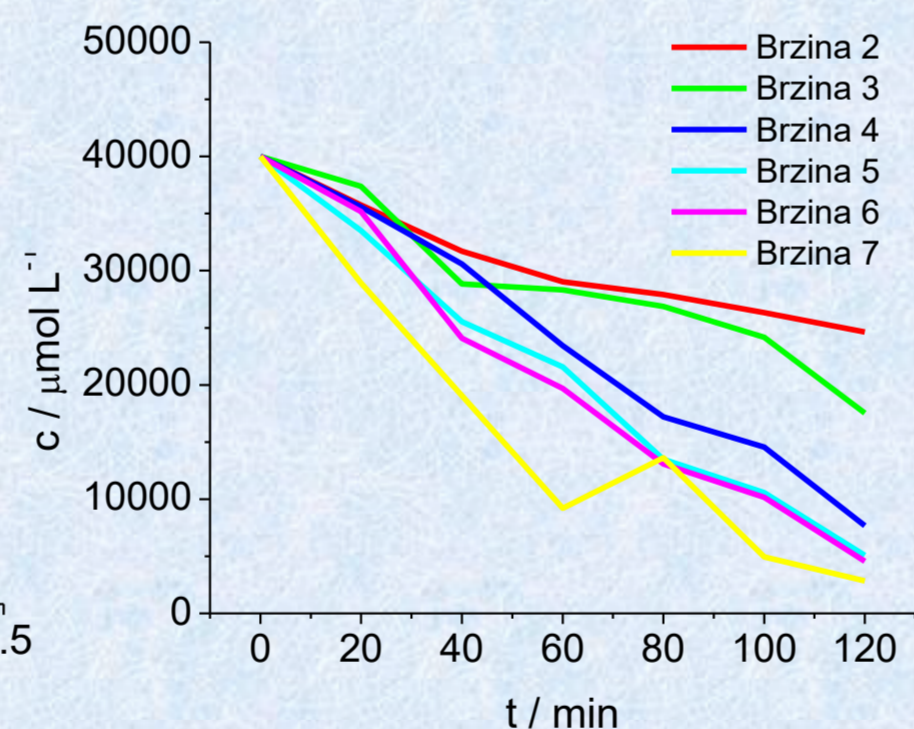
### REZULTATI



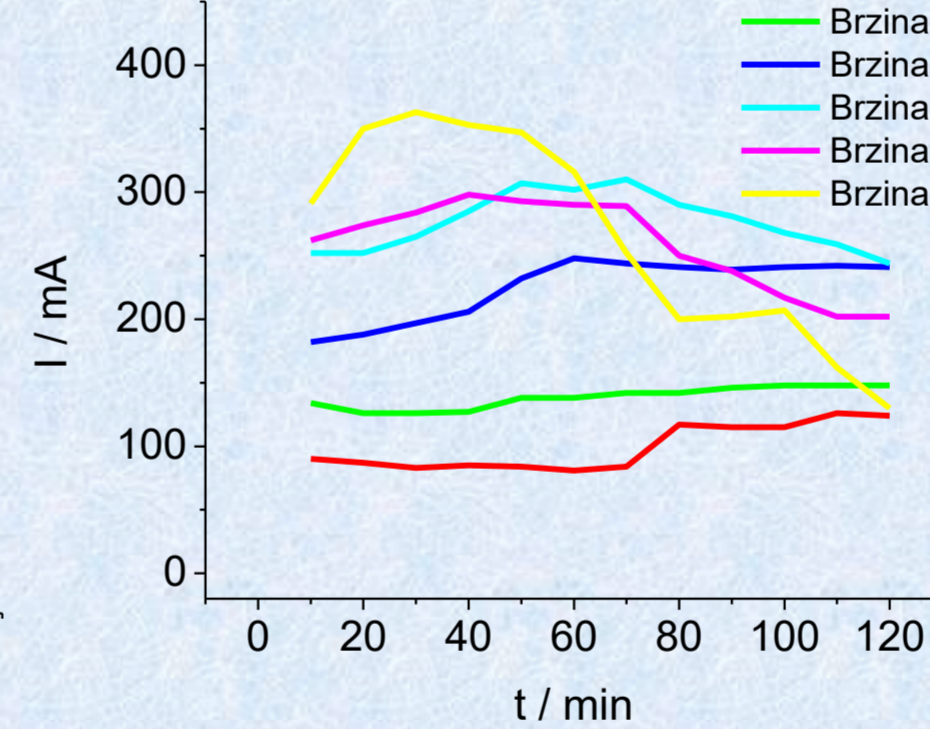
Slika 6. Usporedba linearnih voltamograma dobivenih tijekom polarizacije platinske čelične elektrode zabilježenih u modelnoj otopini  $\text{CuSO}_4$



Slika 7. Usporedba cikličkih voltamograma dobivenih tijekom polarizacije elektroda od raznih materijala u modelnoj otopini  $\text{CuSO}_4$



Slika 8. Grafički prikaz promjena koncentracija  $\text{Cu}^{2+}$  iona u vremenu pri naponu od 2,5 V



Slika 9. Grafički prikaz promjena struje u vremenu pri naponu od 2,5 V

Tablica 1. Vrijednosti koeficijenta prijenosa mase pri naponu od 2,5 V

OZNAKA BRZINE PUMPE	$k_m \cdot 10^3 / \text{cm s}^{-1}$
2	0,458
3	0,713
4	1,528
5	1,908
6	2,008
7	2,466

Tablica 2. Potrošnja energije pri naponu od 2,5 V

OZNAKA BRZINE PUMPE	W / Wh	W / Wh $\text{kg}^{-1}$	W / Wh $\text{L}^{-1}$
2	0,452	4804,964	2,258
3	0,634	3919,082	3,171
4	1,037	2865,447	5,187
5	1,278	3006,863	6,390
6	1,195	2596,920	5,973
7	1,234	3809,799	6,172

Tablica 3. Djelotvornost procesa pri naponu od 2,5 V

OZNAKA BRZINE PUMPE	$\eta / \%$
2	38,42
3	56,15
4	80,81
5	87,29
6	88,62
7	92,92

Kod napona od 2,5 V dobivena je korelacijska jednadžba koja omogućuje procjenu vrijednosti struje u reaktoru u ovisnosti o hidrodinamičkim uvjetima:

$$Sh=0,0859Re^{1,147} * Sc^{1/3}$$

### ZAKLJUČAK

- U radu je korišten protočni elektrokemijski reaktor pomoću kojeg je iz modelne otopine bakar(II)-sulfata elektrokemijskim putem uklonjen bakar
- Prije sastavljanja reaktora ispitan je niz materijala pogodnih za izradu elektroda u modelnoj otopini metodom cikličke voltametrije.
- Ispitivanja su pokazala da najmanje prenapone za depoziciju bakra i razvijanje kisika ima: platina, ali zbog ekonomskih razloga kao anodni materijal odabrano je olovo, a kao katodni materijal čelik. Kod njih su zabilježene nešto veće vrijednosti prenapona.
- Elektroliza je uspješno provedena pri konstantnom naponu od 2,5 V i pri sedam različitih brzina protoka elektrolita
- Dobiveni postotak uklonjenih bakrenih iona iz modelne otopine kretao se u rasponu od 38,42 % do 92,92 % i ovisio je o brzini protoka. Djelotvornost uklanjanja bakra pri naponu od 2,5 V raste kako raste brzina protoka.
- Specifična potrošnja energije izražena po volumenu tretirane otopine raste s porastom brzine protoka i to u rasponu od  $2,3 \text{ Wh L}^{-1}$  do  $6,5 \text{ Wh L}^{-1}$  dok specifična potrošnja energije izražena po masi uklonjenog bakra pada s porastom brzine protoka i to u rasponu od  $4804,96 \text{ Wh kg}^{-1}$  do  $2596,92 \text{ Wh kg}^{-1}$ .
- Određen je koeficijent prijenosa mase za sedam brzina protoka, a vrijednosti su se kretale u rasponu od  $0,458 \cdot 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  do  $2,466 \cdot 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ . Porastom brzine protoka raste i koeficijent prijenosa mase
- Izračunate su bezdimenzijske značajke pomoću kojih je određena korelacijska jednadžba:  $Sh = aRe^b Sc^{1/3}$