

# Uklanjanje Cu(II) iona iz vodenih otopina primjenom otpadne sačme

---

Gavranović, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:484127>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Ivana Gavranović

ZAVRŠNI RAD

Sisak, ožujak 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Ivana Gavranović

UKLANJANJE Cu(II) IONA IZ VODENIH OTOPINA PRIMJENOM  
OTPADNE SAČME

ZAVRŠNI RAD

Voditelj/suvoditelj:  
izv.prof.dr.sc. Anita Štrkalj

Članovi ispitnog povjerenstva:  
Predsjednik: prof.dr.sc. Damir Hršak  
Član: izv.prof.dr.sc. Anita Štrkalj  
Član: izv.prof.dr.sc. Tamara Holjevac Grgurić  
Zamjenski član: izv.prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Sisak, ožujak 2017.

# UKLANJANJE Cu (II) IONA IZ VODENIH OTOPINA PRIMJENOM OTPADNE SAČME

## Sažetak

U ovom radu istraživana je mogućnost uklanjanja Cu (II) iona iz vodene otopine koristeći metalurški otpad. Povećana koncentracija Cu (II) iona u vodi može imati negativne posljedice na čovjeka, životinje i biljke te se Cu (II) ioni moraju ukloniti iz otpadne vode prije puštanja u odvod ili prirodne recipijente. U ovom radu korištena je otpadna čelična sačma kao adsorbens za uklanjanje Cu (II) iona iz vodene otopine. Eksperimentalni podaci opisani su kinetičkim modelima reakcije pseudo prvog i pseudo drugog reda, kao i Freundlichovom i Langmuirovom izotermom. Dobiveni rezultati pokazali su da se kinetika adsorpcije Cu (II) iona na otpadnoj čeličnoj sačmi odvija prema kinetičkom modelu pseudo drugog reda. Adsorpcijski proces sustava otpadna čelična sačma/Cu (II) ioni može se odvijati i prema Freundlichovom, kao i prema Langmuirovom modelu. Izglednije je da se adsorpcija odvija prema Freundlichovom modelu, odnosno da je fizikalne prirode.

***Cljučne riječi:*** otpadna čelična sačma, Cu (II) ioni, adsorpcija, kinetika, izoterme

# REMOVAL OF Cu (II) IONS FROM AQUEOUS SOLUTION USING STEEL SHOT

## Abstract

The possibility of removal of Cu (II) ions from aqueous solution using metallurgical waste was researched in this paper. The increased concentration of Cu (II) ions in the water can have negative effects on humans, animals and plants. Therefore, they must be removed from waste water before discharge into drains or natural recipients. In this paper, waste steel shot was used as the adsorbent for removal of Cu (II) ions from an aqueous solution. The experimental data are described using the kinetic models of the reaction of the pseudo first and pseudo second order, as well as Freundlich and Langmuir isotherm. Obtained results showed that the kinetics of adsorption of Cu (II) ions on the waste steel shot takes place according to the kinetic model of the pseudo second order. Adsorption of Cu (II) ions on the waste steel shot can take place according to the Freundlich and Langmuir model. It seems more likely that the adsorption takes place according to Freundlich model, which indicates the physical nature of the process.

**Key words:** *waste steel shot, Cu (II) ions, adsorption, kinetics, isotherms*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b>	1
<b>2. TEORIJSKI DIO</b>	2
<b>2.1 Otpadne vode</b>	2
<b>2.1.1 Teški metali</b>	4
<b>2.1.1.1 Bakar</b>	5
<b>2.2 Pregled metoda za pročišćavanje otpadnih voda</b>	6
<b>2.2.1 Fizikalni postupci pročišćavanja</b>	6
<b>2.2.2 Biološki postupci pročišćavanja</b>	7
<b>2.2.3 Kemijski i fizikalno-kemijski postupci pročišćavanja</b>	7
<b>2.2.3.1 Adsorpcija</b>	8
<b>2.2.3.2 Metalurški otpad kao adsorbens</b>	12
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b>	15
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b>	17
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	22
<b>6. LITERATURA</b>	23
<b>Životopis</b>	25

# 1. UVOD

Voda čini 2/3 ljudskog organizma presudna je za žive organizme. Vodom se organizam opskrbljuje raznim mineralima i drugim hranjivim tvarima, regulira temperatura te izlučuju opasne tvari i toksini iz organizma. Međutim, voda u sebi krije brojne opasnosti za organizam kao što su teški metali i druge opasne tvari.

Voda pri racionalnom korištenju predstavlja praktično neiscrpan izvor, ali zbog porasta industrijske proizvodnje, poljoprivrede i ljudske aktivnosti općenito izvori se neprestano iscrpljuju tj. smanjuje. Voda ima sposobnost samopročišćavanja, ali taj proces nije dovoljno brz zbog velike količine otpadnih voda koje dospijevaju u okoliš stoga se moraju pronaći rješenja za vraćanje vode u prirodu u stanju u kakvom je iz prirode i uzeta.

Svakodnevnom aktivnošću čovjek generira otpad koji može nastajati u kućanstvima, tijekom rekreacije ili u radnom prostoru. Otpad nastao u radnom prostoru odnosi se na industriju, poljoprivredu, rudarstvo i dr. U metalurgiji nastaje otpad koji onečišćuje sve tri sastavnice okoliša (voda, zrak, tlo). Neprikladnim odlaganjem na tlo iz nekih vrsta metalurškog otpada (troske ili kalupne mješavine) onečišćujuće tvari mogu dospjeti u tlo te ga tako kontaminirati. Ispuštanjem onečišćene vode također dolazi do onečišćenja koja znatno mogu utjecati na floru, faunu, a na kraju i na samog čovjeka. S pitanjem održivog gospodarenja otpadom nastoji se pronaći način kako otpad oporabiti, a svakako se nastoji izbjeći skladištenje otpada.

Nadalje, kako je zakonska regulativa sve stroža, nastoji se pronaći način kako smanjiti onečišćenje okoliša, jer onečišćen okoliš ima izravne ili neizravne posljedice na čovjeka. Upravo to je vodilja mnogih istraživanja kojima se nastoji pronaći nove načine kojima bi se otpad mogao smanjiti, koristiti kao nusproizvod ili reciklirati.

U nekim slučajevima otpad koji nastaje u industrijskim procesima može služiti kao nusproizvod u nekoj drugoj industriji. Dosadašnja istraživanja su pokazala da neke vrste neopasnog metalurškog otpada (otpadna kalupna mješavina, visokopećni mulj, troska i sl.) mogu poslužiti kao dobri adsorbensi za uklanjanje teških metala, ali i nekih organskih zagađenja iz otpadnih voda.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1 Otpadne vode

Jedan od osnovnih uvjeta dobrog zdravlja je opskrba stanovništva zdravstveno ispravnom vodom za piće [1]. Vodom za piće podrazumijeva se sva voda, neovisno o njezinom porijeklu i načinu isporuke, koja je u svojem izvornom stanju ili nakon obrade namijenjena za piće, kuhanje, pripremu hranu ili druge kućanske namjene. Pod vodom za piće također se podrazumijeva i sva voda koja se upotrebljava za proizvodnju, preradu, konzerviranje ili prodaju proizvoda ili tvari namijenjenih za konzumaciju ljudi [2].

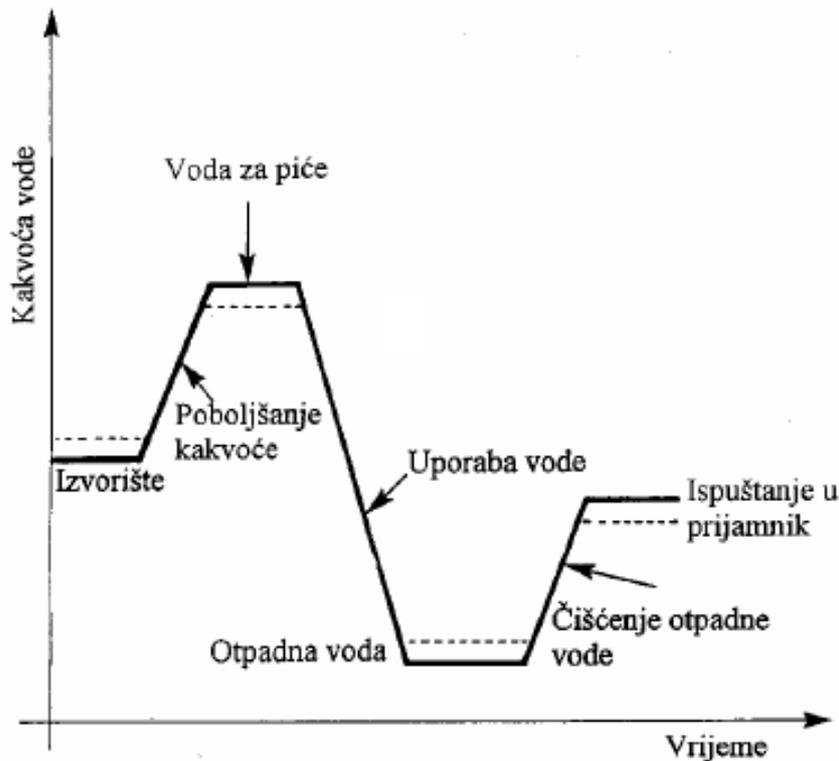
Kvaliteta vode za piće određena je parametrima ispravnosti koji podrazumijevaju mikrobiološka, fizička i kemijska svojstva vode prema zakonu, preporukama i smjericama o kvaliteti vode za piće.

Zdravstveno ispravnom vodom za piće smatra se voda koja [2]:

- a) ne sadrži mikroorganizme, parazite i njihove razvojne oblike u broju koji predstavljaju opasnost za zdravlje ljudi,
- b) ne sadrži tvari u koncentracijama koje same ili zajedno s drugim tvarima predstavljaju opasnost za zdravlje ljudi,
- c) ne prelazi vrijednosti propisane Pravilnikom o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće [3].

Izvori iz kojih se voda crpi i priprema za distribuciju potrošačima mogu biti zagađeni na različite načine: izlučivanje poljoprivrednih površina i stijena u podzemne ili površinske vode, kvarovi pri proizvodnji i nesavjesno ispuštanje industrijskih otpadnih voda u prirodne vodotoke, otpadne vode iz domaćinstava, ispiranje industrijskog i gradskog otpada s deponija i dr. [1].

Otpadne vode su sve one vode čije su prvobitne kemijske, fizikalne, biološke i radioaktivne karakteristike promijenjene, koje nastaju primjenom u kućanstvima i industriji, te vode koje nastaju od atmosferskih padalina koje ispiru ceste i ostale površine [4]. One predstavljaju mješavinu vode koja nosi razna onečišćenja, stoga svojstva tih voda ovise o njihovom podrijetlu, a mogu biti kućanske, industrijske i oborinske vode. Na slici 1. prikazana je promjena kakvoće vode uporabom.



Slika 1. Promjena kakvoće vode uporabom [5]

Otpadna voda može sadržavati sljedeće tvari [6]:

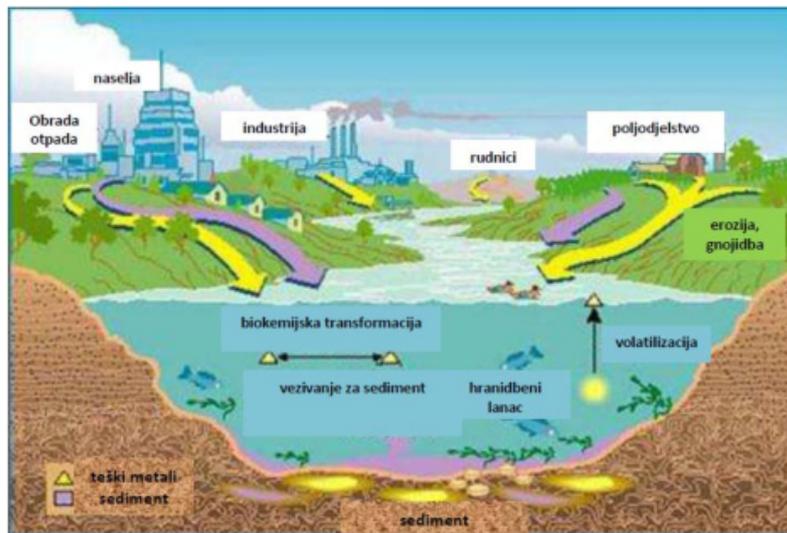
- krupni (površinski) otpad,
- krutine,
- mikroorganizme,
- hranjive soli,
- postojeane tvari,
- otrovne tvari,
- radioaktivne tvari,
- otopljene plinove i sl.

Krupni otpaci su obično kora od voća ili povrća, papir, krpe. Zatim slijede krutine koje se pojavljuju u otopljenom, koloidnom ili lebdećem stanju. Uglavnom uzrokuju promjenu boje i mutnoću. Mikroorganizmi su jednostanični ili višestanični organizmi koji se nalaze u svim vodama (mikroorganizmi razlagači i mikroorganizmi iz probavnog traka ljudi i životinja). Hranjive soli nastaju razgradnjom organske tvari iz otpadne vode, pri čemu mogu imati i negativne i pozitivne učinke. Postojane tvari su organske i umjetne biološki nerazgradive ili teško razgradive tvari. Tvari koje se tu nalaze su mineralna ulja i njihovi derivati, pesticidi, detergentske i plastične mase. Otrovnne tvari su tvari koje svojom količinom ili svojim svojstvima mogu uzrokovati bolesti, kancerogene i genetičke promjene te fizikalne promjene. U otrovne tvari se ubrajaju teški metali i otrovni spojevi. Radioaktivne tvari mogu se pojaviti iz prirodnih kao i antropogenih izvora [6].

### 2.1.1. Teški metali

Teški metali su metali čija je gustoća veća od  $5 \text{ g/cm}^3$ . Neki teški metali prisutni u niskim koncentracijama neophodni su za normalno funkcioniranje ljudskog organizma budući da sudjeluju u gotovo svim metaboličkim procesima [7]. Međutim, povećana koncentracija teških metala u ljudskom organizmu može dovesti do ozbiljnih zdravstvenih problema, otrovanja pa čak i smrti [8, 9].

Postoje razni utjecaji i načini unošenja teških metala u organizam. Čovjek je izložen teškim metalima putem zraka, vode, tla, te hrane. Teški metali akumuliraju se u organizmu što može izazvati oštećenja organizma. Nadalje do oštećenja može doći i bioakumulacijom u organizmu. Unošenje u organizam moguće je u elementnom stanju, u obliku soli ili organometalnih spojeva i o tome ovisi način apsorpcije, raspodjele i izlučivanja iz organizma. Teški metali u okoliš dospijevaju iz prirodnih i antropogenih izvora. Prirodni izvori su matične stijene koje se troše, dok su antropogeni izvori oni koji su nastali ljudskom djelatnošću [10]. Na slici 2 su prikazani izvori onečišćenja teškim metalima. Glavni izvor teških metala iz antropogenih izvora je industrija proizvodnje i prerade metala. Vrlo značajan izvor su i prometnice [10]. U tablici 1 dan je pregled nekih izvora nastanka teških metala.



Slika 2. Izvori onečišćenja teškim metalima [10]

Tablica 1. Izvor nastanka nekih teških metala [11, 12]

Teški metali	Izvori teških metala
Arsen	Drvena industrija, poljoprivreda (fungicid, insekticid)
Kadmij	Rudarstvo, metalurgija, odlagalište otpada, proizvodnja baterija, pigmenata
Krom	Obrada metala, proizvodnja pigmenata, proizvodnja vatrootalnih metala, kemijska industrija, galvanizacijski proces
Živa	Električna industrija (baterije), sredstva za obradu drveta, farmaceutska industrija, metalurgija
Olovo	Proizvodnja akumulatora, metalurgija, vodovodne cijevi, proizvodnja pigmenata,
Nikal	Metalurgija, rudarstvo, galvanizacija, izgaranje fosilnih goriva, spalionice otpada

### 2.1.1.1 Bakar

Bakar predstavlja esencijalni element za čovjeka. U ljudskom organizmu najčešće se nalazi u mišićima, kostima i jetri. Nedostatak bakra u organizmu može prouzročiti brojne posljedice kao što su slabokrvnost i smanjenje bijelih krvnih stanica čime organizam gubi imunitet [13]. Međutim, prekomjerno unošenje bakra u organizam može izazvati brojne posljedice kao što su povraćanje, pospanost, povišeni krvni tlak, oštećenje bubrega, jetre i mozga. U krajnjim slučajevima može doći do kome, ali i smrti [14]. Nadalje, ljudi i svinje mogu podnijeti relativno veliku koncentraciju bakra, dok su krave i ovce jako osjetljive na trovanje tim elementom. Kod biljaka granica između toksičnosti i esencijalnosti je vrlo mala. Bakar se ne razgrađuje u prirodi, već se akumulira u biljkama i životinjama. Na tlima koji su obogaćeni bakrom uspijevaju samo neke određene biljke, stoga na područjima koja su onečišćena bakrom ne postoji veliki broj biljnih vrsti. Iako su posljedice poznate, bakar se i dalje koristi u pesticidima [15].

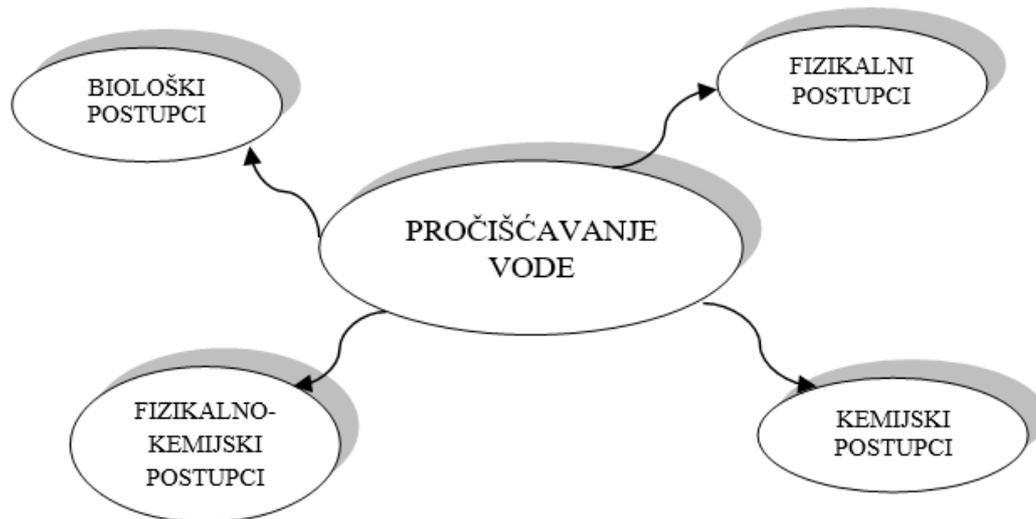
Prirodni izvori bakra su šumski požari, propadanje vegetacije, raspršivanje sitnih čestica mora i dr. Čovjek svojom aktivnošću u rudarstvu, proizvodnji metala, proizvodnji drveta, te proizvodnjom i primjenom fosfatnih gnojiva u poljoprivredi ispušta znatne količine bakra u okoliš. Ispuštanjem vode koja je onečišćena bakrom dolazi do nakupljanja mulja u rijekama koji sadrži povišenu koncentraciju bakra. Bakar također nastaje izgaranjem fosilnih goriva te se na taj način emitira u zrak. Tijekom atmosfere deponicije bakar završava u tlu. Onečišćenje bakrom je najčešće uz rudnike, industrijska postrojenja, na poljoprivrednim zemljištima i na odlagalištima otpada [16].

Bakar će se najčešće vezati za vodu ili čestice tla. Topljivi dio bakra je najopasniji za ljudsko zdravlje, a najčešće nastaje tretiranjem poljoprivrednih zemljišta. Kada bakar jednom završi u tlu, veže se za tlo tj. za organske čestice ili minerale. Tako vezan bakar ne putuje duboko, pa tako rijetko kada završi u podzemnim vodama. Međutim, tako vezan bakar može preći veliku udaljenost u površinskim vodama [16].

Obzirom na navedeno potrebno je stalno praćenje, a ukoliko se bakar ipak nađe u pitkim ili otpadnim vodama neophodno je njegovo uklanjanje.

## 2.2 Pregled metoda za pročišćavanje otpadnih voda

Obrada otpadnih voda započinje odmah nakon upotrebe vode. U tu svrhu se otpadna voda prikuplja i podvrgava fizikalnim, kemijskim, fizikalno - kemijskim i biološkim postupcima obrade (slika 3) prije nego što se vrati u okoliš. Vrsta procesa koji će biti primijenjen za obradu otpadne vode ovisi o načinu upotrebe vode i mjestu gdje će obrađena otpadna voda biti ispuštena [17].



Slika 3. Postupci pročišćavanja otpadne vode

### 2.2.1 Fizikalni postupci pročišćavanja

Fizikalni postupci pročišćavanja su [18]:

- izdvajanje na rešetkama (rešetanje),
- usitnjavanje,
- izjednačivanje ,
- miješanje,
- taloženje (sedimentacija),
- flotacija,
- filtriranje.

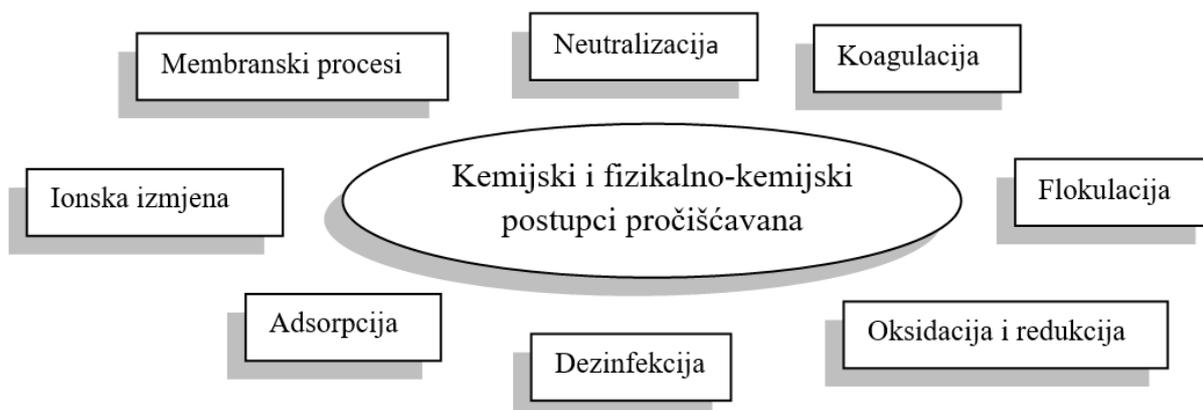
Rešetanjem se odvajaju plutajuće tvari kao što je papir, lišće, granje i razni drugi materijali. Kod usitnjavanja, usitnjene i isječene tvar odvode se na daljnje čišćenje. Kod ovog postupka postoje usitnjivači sa slobodnim prolazom vode i usitnjivači u obliku crpki. Ovi se postupci ponekad nazivaju i mehanički postupci pročišćavanja otpadne vode. Kod postupka izjednačivanja voda se zadržava u spremniku kako bi se izjednačile osnovna svojstva kao što su pH, boja, mutnoća i dr. Ovaj se postupak primjenjuje kod industrijskih voda. U postupku miješanja otpadne vode se izmiješaju s dodatnom kemikalijom kako bi čestice koje nastaju kemijskom reakcijom ostale u suspenziji. Taloženje ili sedimentacija je postupak kojim se gravitacijom uklanjaju krutine iz tekućina. Nadalje, flotacija nastaje zbog razlike u gustoći čestica i vode u kojoj se nalazi. U ovom slučaju kretanje čestica je obrnuto za razliku od taloženja. Ovaj postupak služi za pročišćavanje rafinerijskih, petrokemijskih i dr. otpadnih voda iz industrije. Filtriranjem vode pomoću različitih filtara, uklanjaju se krupnije čestice [17].

## 2.2.2 Biološki postupci pročišćavanja

Biološki postupci pročišćavanja podrazumijevaju uklanjanje organskog ugljika, te uklanjanje ili smanjivanje količine fosfora i dušika (nitrifikacija i denitrifikacija) u otpadnim vodama. Budući da se prilikom biološkog pročišćavanja koriste mikroorganizmi (najčešće bakterije) koji organska onečišćenja i hranjive soli koje su raspršene u otpadnoj vodi koriste za svoj rast, ovaj postupak moguće je primijeniti samo u onim slučajevima gdje su onečišćenja biološki razgradiva i ne sadrže otrovne tvari u kritičnim količinama. Ovakav proces pročišćavanja identičan je procesu koji se odvija i u prirodnom okolišu [18].

## 2.2.3 Kemijski i fizikalno-kemijski postupci pročišćavanja

Kemijski i fizikalno - kemijski postupci pročišćavanja provode se membranskim procesom, neutralizacijom, koagulacijom, flokulacijom, oksidacijom i redukcijom, dezinfekcijom, adsorpcijom, te ionskom izmjenom [17], kako je to prikazano na slici 4.



Slika 4. Kemijski i fizikalno-kemijski postupci pročišćavanja

U procesu neutralizacije nastoji se korigirati pH vrijednost tako da se dodaje kiselina ili lužina. Proces koagulacije odvija se u taložnicama, pri čemu se prati ravnoteža koloidnih otopina nastalih ionizacijom. Proces flokulacije se obavlja tako da se otpadna voda sporo miješa. U vodi se nalaze raspršene čestice te se miješanjem spajaju u veće pahuljice. Oksidacija i redukcija odvija se u procesu oksidacijsko-redukcijskih procesa. Dezinfekcija podrazumijeva uklanjanje mikroorganizama iz vode. Dezinfekcija se češće koristi kod pripreme vode za piće iako se može primjenjivati i prije nego što se otpadna voda ispusti u recipijent. Ionska izmjena se koristi bez vidljivih fizičkih promjena tako da se koristi ionski izmjenjivač koji može otpustiti svoje ione i istovremeno primiti ione iz otpadne vode. Kod membranskih procesa tvar se izdvaja pomoću selektivne propusnosti membrane [17].

### 2.2.3.1 Adsorpcija

Adsorpcija predstavlja najekonomičniji, najefikasniji i jedan od najjednostavnijih fizikalno - kemijskih postupaka pročišćavanja otpadnih voda [19].

Općenito se može reći da se pri postupku adsorpcije tvari iz tekuće faze vežu na čvrstu. Sam proces uključuje povećanje koncentracije određene komponente (adsorbata) na površini čvrste faze (adsorbens) (slika 5). Do adsorpcije dolazi zbog privlačnih sila koje se nalaze između čvrste površine i molekula fluida. Adsorbens je čvrsta tvar koja ima svojstvo vezanja molekula plina ili molekula iz otopine na svojoj površini [20].



Slika 5. Princip adsorpcije [21]

Primjena adsorpcije za pročišćavanje vode ima vrlo dugu povijest. Već 450. godine prije Krista filtri ispunjeni ugljenom i pijeskom koristili se su svrhu pročišćavanja vode. Švedski kemičar Karl Wilhelm Scheele je 1773. g. proučavao adsorpciju plinova pomoću ugljena. Već nekoliko godina kasnije aktivni ugljen se koristio u industriji šećera za uklanjanje boje. Primjena adsorbensa za industrijske svrhe počela je nakon drugog svjetskog rata [22].

Ovisno o vrsti interakcije između adsorbensa i adsorbata postoje dva osnovna tipa adsorpcije [22]:

- fizikalna (van der Waalsova) i
- kemijska (kemisorpcija).

Fizikalna adsorpcija bazira se na slabim privlačnim silama (van der Waalsovima) između adsorbensa i adsorbata, dok privlačne sile kod kemisorpcije podrazumijevaju interakcije elektronskih oblaka uz preraspodjelu naboja i uspostavljanje kemijskih veza. U tablici 2 prikazane su osnovne razlike između fizikalne i kemijske adsorpcije.

Tablica 2. Osnovne razlike između fizikalne i kemijske adsorpcije [23]

<b>Fizikalna adsorpcija</b>	<b>Kemijska adsorpcija</b>
Niska toplina adsorpcije (u rasponu 20 – 40 kJ/mol)	Visoka toplina adsorpcije (u rasponu 50 – 500 kJ/mol)
Sila koja djeluje je Van der Waalsova sila	Sile privlačenja su sile kemijske veze
Reverzibilna	Ireverzibilna
Općenito se odvija pri niskim temperaturama te se adsorpcija smanjuje s povećanjem temperature	Odvija se pri visokim temperaturama
Nastaje multimolekulni sloj	Nastaje monomolekulni sloj
Nije potrebna energija aktivacije	Potrebna je visoka energija aktivacije
Visoki tlak je poželjan, jer smanjenjem tlaka dolazi do desorpcije	Tlak nema utjecaja na adsorpciju.
Povezuje se sa ukapljivanjem plina	Ne odnosi se na ukapljivanje plina
Vrlo je specifična	Nije specifična

Adsorpcija kao i vjerojatnost odvijanja određenog tipa adsorpcije ovisi o većem broju čimbenika poput prirode adsorbensa i adsorbata, koncentracije adsorbata, mase adsorbensa, vremenu kontakta adsorbens/adsorbat, temperature adsorpcijskog sustava i sl. [24].

Kontaktom otopine i čvrstih čestica, otopljene čestice iz otopine na početku adsorpcijskog procesa usmjerene su ka površini čvrste faze. Pri tome se neke čestice iz otopine odmah adsorbiraju, neke samo dolaze u kontakt s površinom čvrste faze, te nakon toga difundiraju u otopinu. Porastom vremena kontakta adsorbensa i adsorbata povećava se koncentracija čestica iz otopine na površini čvrste faze (adsorbensa). U slučaju da se radi o fizikalnoj adsorpciji, paralelno s vezanjem dio čestica iz otopine koje su se vezale na površinu čvrste tvari otpušta se s nje i vraća ponovo u otopinu. Ova pojava naziva se desorpcija i intenzivnija je u fazi kada je vezanje adsorbata već dostiglo značajne razmjere. U određenom trenutku postiže se termodinamička ravnoteža kada se brzine adsorpcije i desorpcije izjednačavaju. U slučaju da je temperatura sustava konstantna, ravnoteža se opisuje adsorpcijskim izotermama i predstavlja najčešće korišteni pristup za opisivanje stanja pri adsorpciji jer daje značajne informacije o adsorbensu, adsorbatu i samom mehanizmu procesa.

Najpoznatije izoterme koje se vrlo često koriste u ravnotežnoj adsorpcijskoj analizi su Langmuirova, Freundlichova, Temkinova, Brunauer-Emmett-Tellerova (BET) i Dubininova izoterma. Prve tri se koriste za interpretaciju fizikalne i kemijske adsorpcije, dok se BET i Dubininova izoterma koriste pri opisivanju adsorpcije plinova i para na čvrstim materijalima. Iako su Langmuirova i Freundlichova izoterma uvedene prije približno 90 godina, one i dalje ostaju dvije najčešće korištene adsorpcijske izoterme uslijed sposobnosti korištenja velikog broja podataka, jednostavne jednadžbe kao i jednostavnost procjene parametara ovih izotermi. Obje jednadžbe izotermi mogu biti transformirane u linearni oblik što daje mogućnost relativno jednostavne obrade podataka grafički, odnosno linearnom regresijom. Za mnoge izoterme, uključujući i one s tri ili više parametara to više nije moguće jer grafička obrada i linearna regresija nisu pouzdani pa je potrebno koristiti nelinearnu regresiju [25].

Freundlichov model izoterme je empirijski i zasniva se na postojanju energetski heterogenih adsorpcijskih centara na površini adsorbensa. Ovaj model dobro opisuje

višeslojnu adsorpciju i adsorpciju na heterogenim površinama. Opći oblik jednadžbe Freundlichove izoterme je [26]:

$$q_e = K_F \cdot c_e^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

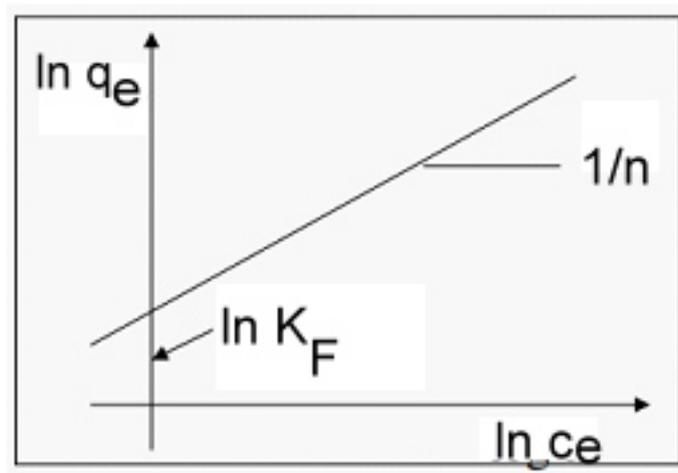
gdje je:

$q_e$  - ravnotežna količina adsorbirane tvari po masi adsorbensa, odnosno ravnotežni kapacitet adsorpcije, mg/g,

$c_e$  - ravnotežna masena koncentracija iona u otopini, mg/l,

$K$  i  $n$  – Freundlichove konstante.

Slika 6 daje grafički prikaz linearnog oblika Freundlichove izoterme.



Slika 6. Grafički prikaz linearnog oblika Freundlichove izoterme [27]

Irvin Langmuir je 1918. godine prvi postavio temelje proučavanja adsorpcijskih procesa. Njegova se proučavanja odnose prvenstveno na kemijsku adsorpciju pri kojoj adsorbirana tvar na površini adsorbensa tvori samo monomolekularni sloj. Opći oblik jednadžbe Langmuirove izoterme je [26]:

$$q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot c_e}{1 + K_L \cdot c_e} \quad (2)$$

gdje je:

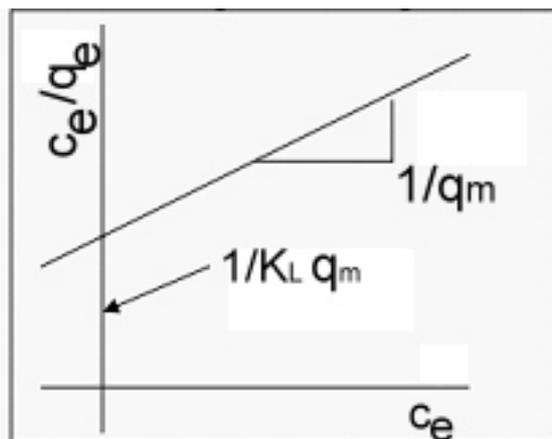
$q_e$  - ravnotežna količina adsorbirane tvari po masi adsorbensa, odnosno ravnotežni kapacitet adsorpcije, mg/g,

$c_e$  - ravnotežna masena koncentracija iona u otopini, mg/l,

$q_m$  - maksimalni adsorpcijski kapacitet, mg/g,

$K_L$  - Langmuirova konstanta povezana s entalpijom adsorpcije.

Slika 7 daje grafički prikaz linearnog oblika Langmuirove izoterme.



Slika 7. Grafički prikaz linearnog oblika Langmuirove izoterme [27]

Kinetika adsorpcije predstavlja jedan od najvažnijih parametara u definiranju efikasnosti adsorpcijskog procesa. Kinetika adsorpcije može se definirati preko kinetičkih modela koji analiziraju eksperimentalne podatke sa ciljem da se odredi mehanizam adsorpcije i korak koji određuje brzinu procesa. Do sada su poznati kinetički modeli Lagergenov ili model pseudo-prvog reda, Ho i Mc Keyev ili model pseudo-drugog reda koji su ujedno i najviše korišteni te Elovichev model i model međučestične difuzije [28].

Reakcija prvog reda općenito je prikazana formulom [26]:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad (3)$$

gdje je:

$q_e$  – ravnotežni kapacitet adsorpcije, mg/g,

$q_t$  – kapacitet adsorpcije u vremenu  $t$ , mg/g,

$k_1$  – konstanta brzine reakcije prvog reda, 1/min,

$t$  – vrijeme, min.

Reakcija drugog reda općenito je prikazana formulom [26]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

gdje je:

$q_e$  – ravnotežni kapacitet adsorpcije, mg/g,

$q_t$  – kapacitet adsorpcije u vremenu  $t$ , mg/g,

$k_2$  – konstanta brzine reakcije drugog reda, g/(mg min),

$t$  – vrijeme, min.

Najčešće korišteni adsorbens je aktivni ugljik. To je adsorbens koji ima vrlo veliku specifičnu površinu (500-2500 m<sup>2</sup>/g) pa samim time i veliku mogućnost uklanjanja otopljenih tvari iz otopine. Međutim cijena ovog adsorbensa je relativno viska. Upravo iz ekonomskih razloga nastoji se ovaj adsorbens zamijeniti manje skupim adsorbensima. Danas se kao adsorbensi sve više koriste otpadne tvari ili nus-produkti različitih grana industrije [29, 30].

### 2.2.3.2 Metalurški otpad kao adsorbens

Zakonom o održivom gospodarenju otpadom, otpad se definira kao svaka tvar ili predmet koju posjednik odbacuje, namjerava ili mora odbaciti [31]. Otpad nastaje u različitim djelatnostima. Brodogradnja, automobilska industrija, metalurgija, medicina, tekstilna industrija, naftna industrija i drvena industrija samo su neke od niza industrija u kojima nastaje otpad koji se mora odlagati.

Metalurška industrija znatno opterećuje okoliš zbog toga što u svojim proizvodnim procesima troši velike količine energenata i vode, stvara buku, ali i veliku količinu opasnog i/ili neopasnog otpada [32]. Otpad nastaje od samog početka metalurške aktivnosti. Kako bi se dobio konačni proizvod potrebno je prvo pronaći rudu u prirodi te ju eksploatirati. Osim eksploatacije, metalurške aktivnosti su taljenje, lijevanje, mehanička obrada kao i razvoj novih proizvoda. U svim ovim procesima nastaje otpad koji se po svojstvima može podijeliti na opasni, neopasni i inertni.

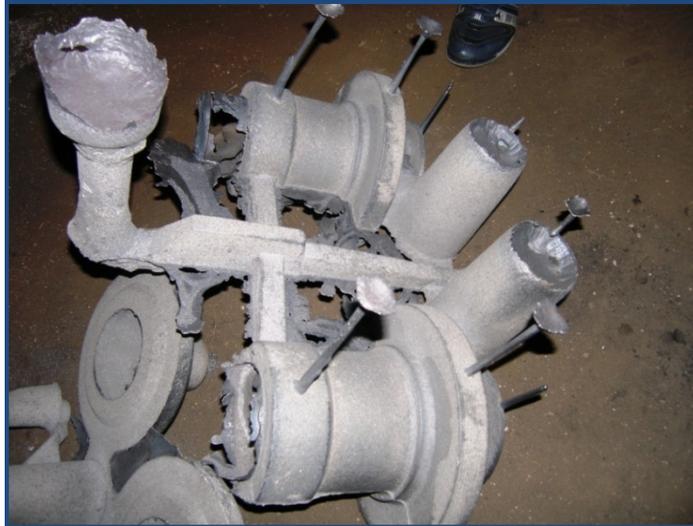
U procesu lijevanja odljevaka od željeznih, ali i neželjeznih legura (aluminij, bakar, cink i drugih metala) nastaje dosta onečišćujućih tvari, čime se može onečistiti voda, zrak i tlo. Onečišćujuće tvari koje nastaju u ljevaonicama su fenoli, cijanidi, razni oksidi ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), lebdeće čestice, dioksini i furani, hlapljive organske tvari, teški metali (Hg, Pb, Cr, Ni, Zn, Cd, Cu). Kruti otpad koji nastaje je otpadna kalupna mješavina, troska, prašina, otpadna čelična sačma. Prašina i lebdeće čestice nastaju u svakom koraku izrade odljevaka [33].

Proizvodnja odljevaka započinje izradom tekućeg metala, odnosno taline određenog kemijskog sastava. Dobivena talina najčešće se ulijeva u jednokratne kalupe. Jednokratni kalupi sastoje se od ljevaoničkog pijeska, veziva i različitih dodataka. Navedene komponente se miješaju i dobivena mješavina nanosi se na model odljevka čime se formira šupljina u kalupu koja odgovara obliku modela, odnosno odljevka. U ovako pripremljeni kalup ulijeva se talina kao što je to prikazano na slici 8.



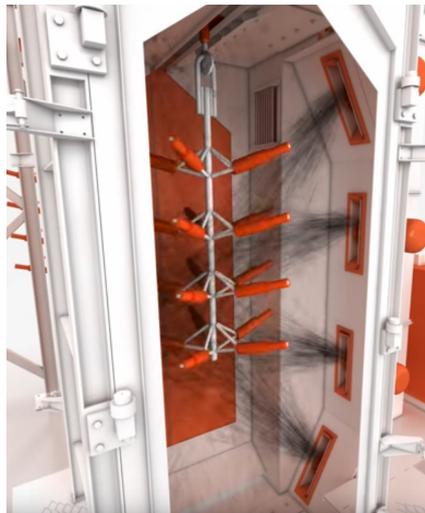
Slika 8. Ulijevanje taline u jednokratni kalup

Nakon što se završi postupak lijevanja i skrućivanja odljevka, kalup se razrušava da bi se mogao izvaditi odljevak. Ovako dobiveni odljevak (slika 9) treba očistiti budući da se na njegovoj površini nalaze razne nečistoće (npr. čestice kalupne mješavine, oksidi metala tj. odgor itd.).



Slika 9. Izgled odljevka nakon vađenja iz jednokratnog kalupa

Uklanjanje navedenih nečistoća provodi se tzv. postupkom sačmarenja. Sačmarenje se provodi u zatvorenim komorama (slika 10) u kojima se abrazivne čestice, tj. čelična sačma određene granulacije kreće velikom brzinom i udara u površinu odljevka, te pri tome mehanički uklanja nečistoće [34].



Slika 10. Komore za sačmarenje odljevaka [35]

Čelična sačma je abraziv velike čvrstoće i tvrdoće [36] koji može biti okruglog ili lomljenog oblika kao što je prikazano na slici 11. Svojstva čelične sačme prikazana su u tablici 3.



Slika 11. Sačma: a) lomljenog oblika i b) okruglog oblika [36]

Tablica 3. Svojstva čelične sačme [36]

Svojstva	Okrugla sačma	Lomljena sačma
Boja	Crna	Crna
Tvrdoća	43-48 HRc	Min 60 HRc
Težina	Od 7,5kg/dm <sup>3</sup>	Od 7,5kg/dm <sup>3</sup>
Opterećenje po 1 kg	420-448 HV	480-550 HV

Da bi čelična sačma bila dobro sredstvo za uklanjanje kalupne mješavine i odgora s površine odljevka mora imati odgovarajuću tvrdoću, najčešće 40-50 HRC, te odgovarajući oblik i veličinu čestica.

Čelična sačma može se koristiti u više ciklusa sačmarenja, odnosno sve dok ne izgubi određena granulacijska svojstva. Nakon toga čelična sačma postaje otpad.

Dosadašnjim istraživanjima pokazano je da se neke vrste neopasnog metalurškog otpada poput otpadne kalupne mješavine, elektropećne troske, visokopećnog mulja, ali i čelična sačma mogu koristiti kao dobri adsorbensi za uklanjanje teških metala iz vodenih otopina [32, 37].

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio proveden je na Metalurškom fakultetu u Laboratoriju za kemiju. Cilj rada bio je istražiti mogućnost korištenja otpadne čelične sačme kao jeftinog adsorbensa za uklanjanje bakar (II) iona iz vodene otopine.

Kao adsorbens u ovom radu korištena je otpadna čelična sačma koja se zbog neodgovarajućeg granulometrijskog sastava više ne može koristiti u procesu sačmarenja odljevaka u ljevaonici. Budući da su uzorci otpadni materijal, osim komadića sačme sadržavali su i čestice kalupne mješavine i odgora koji su otpali s odljevka u postupku sačmarenja (slika 12). Nakon uzorkovanja u ljevaonici uzorci su homogenizirani miješanjem i četvrtanjem. Na ovaj način je i masa uzoraka smanjena na masu potrebnu za provođenje eksperimenta.

Kemijski sastav uzorka određen je atomskom adsorpcijskom spektrometrijom i prikazan u tablici 4.



Slika 12. Otpadna čelična sačma

Tablica 4. Kemijski sastav čelična sačme

Komponente	Fe	C	Mn	Si	S	P
Maseni udio (%)	98,05	0,85	0,60	0,40	0,05	0,05

Kao adsorbat korištena je otopina Cu (II) iona. Radne otopine Cu (II) iona koncentracija 10, 30, 50 i 70 mg/l pripremljene su razrjeđivanjem iz standardne otopine Cu (II) iona koncentracije 1000 mg/l.

Adsorpcijski eksperiment se provodio statičkim, tzv. batch postupkom. U plastične posudice vagnut je po 1 g otpadne čelične sačme koja je stavljena u kontakt sa po 50 ml otopine Cu (II) iona koncentracija 10, 30, 50 i 70 mg/l (slika 13). Adsorpcijski sustav otpadna čelična sačma/Cu (II) ioni bio je u kontaktu 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 i 90 minuta. Nakon navedenih vremena provedena je filtracija, a u dobivenim filtratima atomskom adsorpcijskom spektrometrijom određivana je koncentracija Cu (II) iona (slika 14). Ispitivanja su provedena pri temperaturi od 22 °C i pH 5,69.



Slika 13. Provođenje adsorpcijskog eksperimenta



Slika 14. Atomski apsorpcijski spektrometar

Iz podataka za početnu koncentraciju Cu (II) iona, koncentracije Cu (II) iona nakon adsorpcije (u filtratu), mase adsorbensa i volumena adsorbata određen je kapacitet adsorpcije  $q_e$  prema sljedećoj jednadžbi:

$$q_e = \frac{c_0 - c_e}{m} \cdot V \quad (5)$$

gdje je:

$c_0$  - početna masena koncentracija metalnih kationa u otopini, mg/l,

$c_e$  - ravnotežna masena koncentracija metalnih kationa u otopini, mg/l,

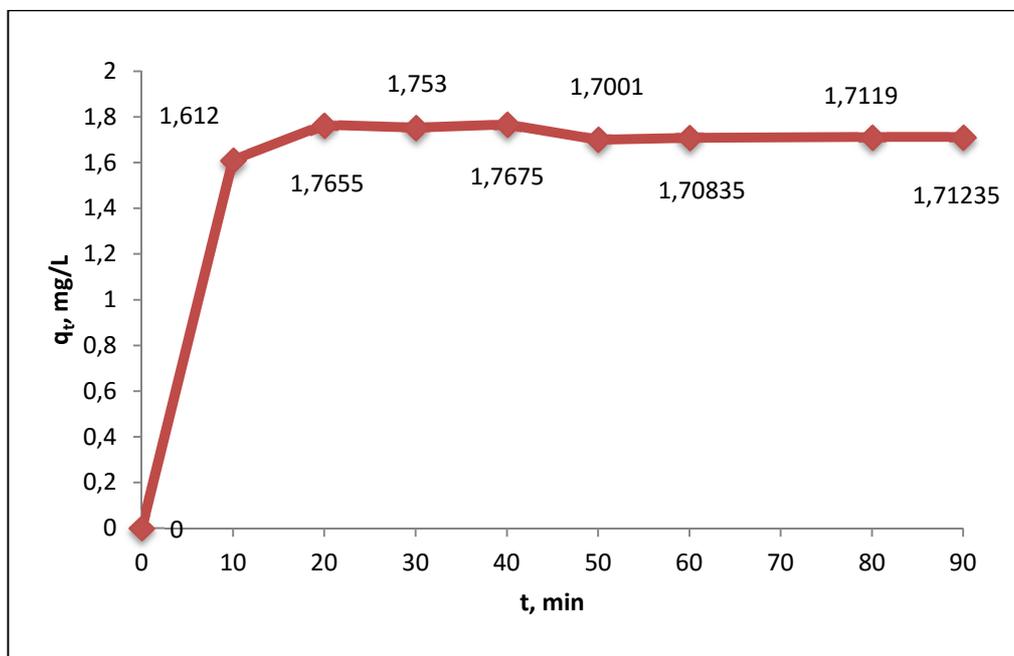
$m$  - masa adsorbensa, g,

$V$  - volumen otopine, l.

Za obradu eksperimentalnih podataka korištene su jednadžbe (1) i (2) za Freundlichovu i Langmuirovu izotermu kao i jednadžbe kinetičkih modela (3) i (4).

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

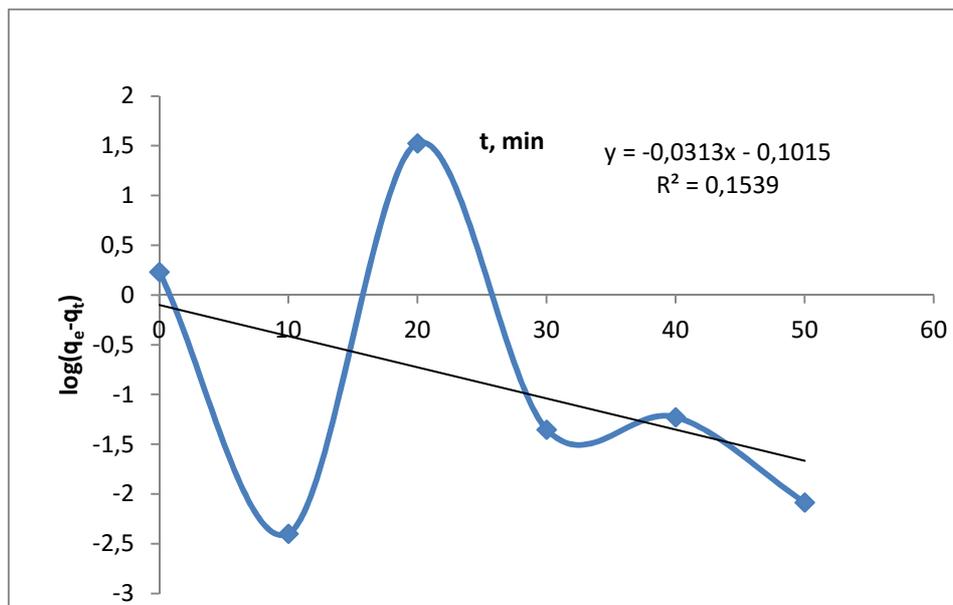
Na slici 15 prikazan je dijagram ovisnosti kapaciteta adsorpcije o vremenu kontakta otpadna čelična sačma/Cu (II) ioni.



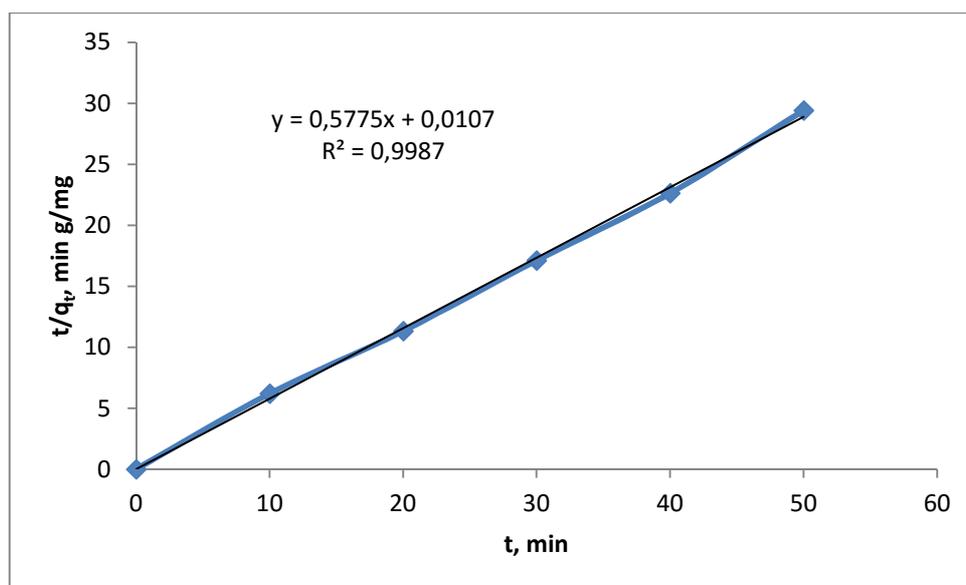
Slika 15. Ovisnost kapaciteta adsorpcije o vremenu kontakta otpadne čelične sačme/Cu (II) iona

Iz slike 15 je vidljivo kako se uklanjanje Cu iona pomoću otpadne čelične sačme odvija u dvije faze. U prvoj fazi (prvih 20 min) kapacitet adsorpcije naglo raste što ukazuje na relativno brz adsorpcijski proces. Može se pretpostaviti da se ovako brza adsorpcija odvija zbog većeg broja dostupnih slobodnih mjesta na površini otpadne čelične sačme. Nakon 20 minuta, adsorpcijski proces se i dalje odvija, ali vrlo sporo, s malim porastom kapaciteta adsorpcije. Moguće da se u ovoj drugoj fazi veći dio mjesta na adsorbensu popunjen, ali isto tako postoji mogućnost da dolazi do istovremene adsorpcije i desorpcije. Nakon 60 minuta adsorpcijski kapacitet stagnira što je pokazatelj da je nastupila dinamička ravnoteža. Uvidom u navedenu sliku vidljivo je da kapacitet adsorpcije nakon uspostavljanja dinamičke ravnoteže iznosi 1,71 mg/g. Prema ovom podatku može se zaključiti da je otpadna čelična sačma relativno dobar adsorbens budući da je kapacitet adsorpcije otpadne čelične sačme prema Cu (II) ionima sličan kao i kod ostalih jeftinih adsorbensa [30, 37].

Provedena je statistička obrada eksperimentalnih podataka linearnom regresijskom analizom, a dobiveni podaci prikazani su na slikama 16 i 17 i tablici 5.



Slika 16. Kinetika adsorpcije pseudo prvog reda sustava otpadna čelična sačma/Cu (II) ioni



Slika 17. Kinetika adsorpcije pseudo drugog reda sustava otpadna čelična sačma/Cu (II) ioni

Tablica 5. Kinetički parametri ispitivanog sustava

Kinetika pseudo I. reda			Kinetika pseudo II. Reda		
$k_1$ , 1/min	$q_e$ , mg/g	$R^2$	$k_2$ , g/(mg·min)	$q_e$ , mg/g	$R^2$
-0,031	0,793	0,153	0,577	1,733	0,998

Vrijednost koeficijenta korelacije,  $R^2$  za pojedini model uvjetuje njegovu ocjenu prema sljedećim kriterijima:

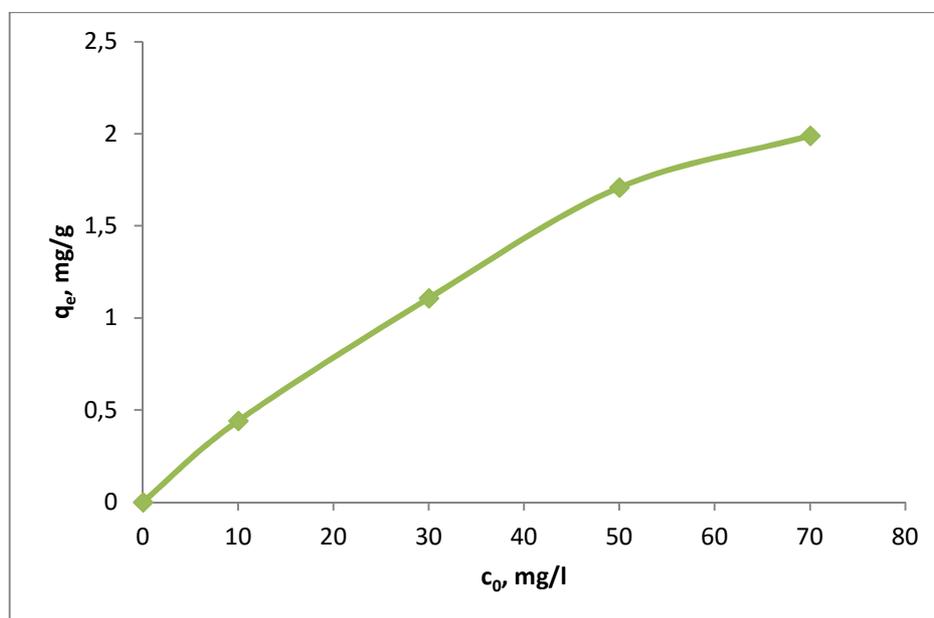
Tablica 6. Kriterij za ocjenu modela koji opisuju eksperimentalne podatke [38]

$R^2$	Tumačenje
0	Odsutnost korelacije
0-0,25	Slaba korelacija
0,25-0,64	Korelacija srednje jačine
0,64-1	Čvrsta korelacija
1	Potpuna korelacija

Opisom eksperimentalnih podataka jednadžbom kinetike reakcije pseudo prvog reda dobiven je korelacijski koeficijent 0,153 dok je korištenjem jednadžbe za kinetiku reakcija pseudo drugog reda korelacijski koeficijent iznosio 0,998. Usporedbom podataka iz tablice 5 i kriterija za ocjenu modela (tablica 6) vidljivo je da se kinetika reakcije ispitivanog sustava otpadna čelična sačma odvija prema reakcijama pseudo drugog reda, odnosno da ovaj kinetički model jako dobro opisuje eksperimentalne podatke.

Većina adsorpcijskih procesa odvija se prema reakcijama pseudo drugog reda [39]. Isto tako konstanta ravnoteže  $k_2$  je veća od  $k_1$  što ukazuje na heterogenost površine što bi se također moglo reći da vrijedi za ovaj ispitivani sustav [40].

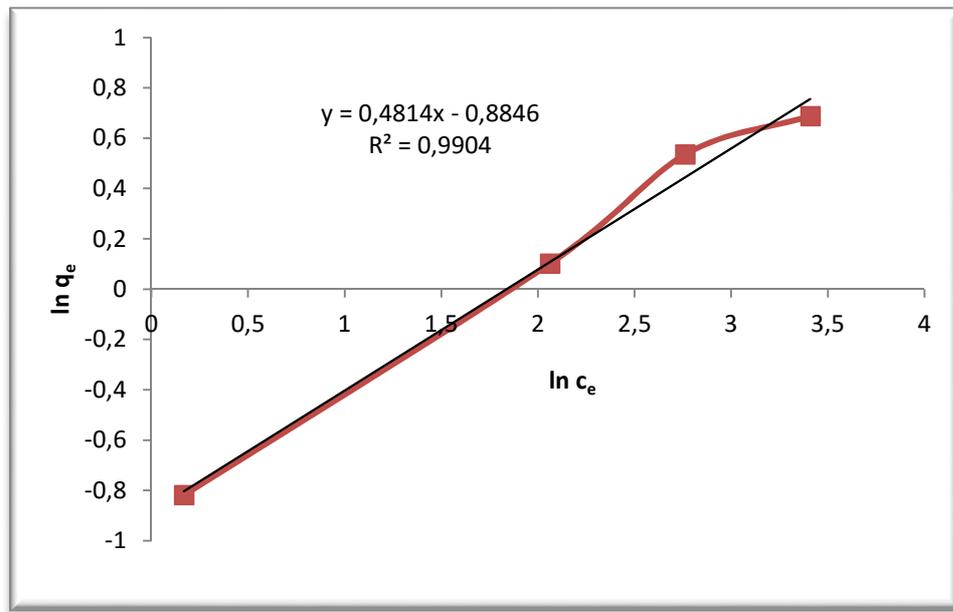
U ovom radu praćena je i ovisnost kapaciteta adsorpcije o početnim koncentracijama Cu (II) iona što je prikazano na slici 18.



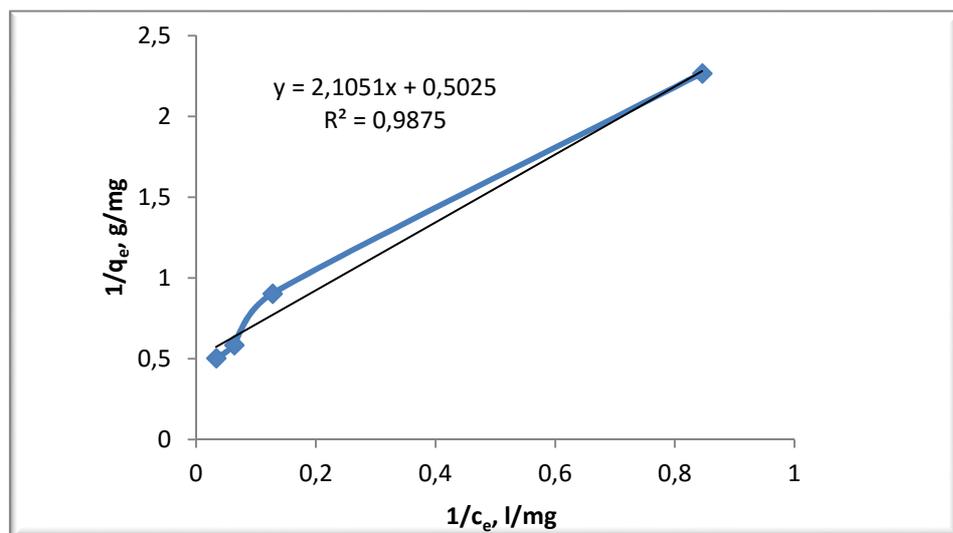
Slika 18. Ovisnost kapaciteta adsorpcije otpadne čelične sačme o početnoj koncentraciji Cu (II) iona

Iz dijagrama je vidljivo da porastom početne koncentracije raste i kapacitet adsorpcije. Ova pojava se može objasniti na dva načina. Na porast kapaciteta adsorpcije utječe veliki broj slobodnih mjesta na adsorbensu. Čak i pri relativno visokoj koncentraciji od 70 mg/l kapacitet

i dalje raste što znači da sva mjesta na adsorbensu nisu popunjena. Druga mogućnost je pojava tzv. fizikalne adsorpcije pri čemu se dio Cu (II) iona veže na površini otpada nakon sačmarenja, ali se istovremeno i dio vezanih iona otpušta. Za detaljnije pojašnjenje interakcije sustava adsorbens/adsorbat korištene su adsorpcijske izoterme. U ovom radu korišteni su Freundlichov i Langmuirov adsorpcijski model za ispitivani sustav koji su prikazani na slikama 19 i 20. Linearni oblik izoterme je korišten u svrhu određivanja karakterističnih parametara matematičkom obradom podataka. Iz nagiba pravca i odsječaka na ordinati određeni su karakteristični parametri ( $K_L$ ,  $q_m$ ,  $K_F$ , i  $n$ ) koji su prikazani u tablici 7.



Slika 19. Freundlichov adsorpcijski model za ispitivani sustav otpadna čelična sačma /Cu (II) ioni



Slika 20. Langmuirov adsorpcijski model za ispitivani sustav otpadna čelična sačma /Cu (II) ioni

Tablica 7. Adsorpcijske konstante ispitivanog sustava

Freundlichova izotetma			Langmuirova izoterma		
$K_F$	$n$	$R^2$	$K_L$	$q_m$	$R^2$
0,413	2,079	0,990	0,238	1,992	0,987

Prema korelacijskim koeficijentima (tablica 6 i tablica 7) može se zaključiti da se prikazani eksperimentalni podaci mogu opisati i Freundlichovim i Langmuirovim modelom. Langmuirov model pretpostavlja da se adsorpcija dešava na homogenoj površini adsorbensa i da se kod zasićenja formira monosloj, dok je Freundlichov izraz empirijska jednadžba bazirana na adsorpciji koja se zbiva na heterogenoj površini [20]. Budući da je korelacijski koeficijent nešto viši kod Freundlichovog modela, a i s obzirom na činjenice da kapacitet adsorpcije raste s porastom početne koncentracije, te na to da je površina adsorbensa heterogena (sadrži sačmu, nešto pijeska i odgora) može se reći da se adsorpcijski proces odvija prema Freundlichovom modelu.

## 5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih eksperimenata mogućnosti uklanjanja Cu (II) iona iz vodene otopine koristeći metalurški otpad i dobivenih rezultata zaključeno je sljedeće:

- Otpadna čelična sačma može se koristiti kao potencijalni jeftini adsorbens za uklanjanje Cu (II) iona iz vodeni otopina.
- U ispitivanom adsorpcijskom sustavu otpadna čelična sačma/Cu (II) ioni ravnoteža je uspostavljena nakon 60 min.
- Kinetika adsorpcijskog procesa odvija se prema kinetičkom modelu pseudo drugog reda.
- Eksperimentalni podaci se mogu opisati i prema Langmuirovom, ali i prema Freundlichovom modelu. Međutim, izglednija je adsorpcija prema Freundlichovom modelu s obzirom na nešto viši koeficijent korelacije.

## 6. LITERATURA

- [1] M. Z. Momčilović, Kinetički i ravnotežni parametri adsorpcionih procesa pri uklanjanju pojedinih štetnih katjonskih sastojaka iz vodenih rastvora aktivnim ugljivima dobijenih hemijsko-termičkom obradom srži ploda divljeg kestena i šišarke crnog bora, doktorski rad, Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, Niš, 2012.
- [2] <http://www.zzjzdnz.hr/hr/sluzbe/zdravstvena-ekologija/odjel-za-vode> (10.01.2017.)
- [3] Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće, NN 47/2008.
- [4] M. Perušina, Značajke i obrada industrijskih otpadnih voda, završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [5] A. Štrkalj, Onečišćenje i zaštita voda, nastavni tekst predavanja, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2014.
- [6] T. Markanović, Obrada otpadnih voda kemijske industrije, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2015.
- [7] G. F. Nordberg, B. A. Fowler, M. Nordberg, L. Friberg, Handbook of Toxicology of Metals, European Environment Agency, Copenhagen, 2005.
- [8] J. Y. Uriu-Adams, C. L. Keen, Copper, oxidative stress, and human health, *Molecular Aspects of Medicine* 26 (2005)268–298
- [9] G. J. Brewer, Risks of Copper and Iron Toxicity during Aging in Humans, *American Chemical Society, Chemical Research in Toxicology*, 23, 319–326, 2010
- [10] T. Sofilić, Ekotoksikologija, nastavni tekst predavanja, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2014.
- [11] P. B. Tchounwou, D. G. Yedjou, A. B. Patolla, D. J. Sutton, Heavy Metals Toxicity and the Environment, *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, 101 (2012), 133-164.
- [12] R. A. Wuana, F. E. Okieimen, Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation, *International Scholarly Research Network*, Volume 2011, Article ID 402647, 20
- [13] [http://metalionline.com/vise\\_o\\_bakru.html](http://metalionline.com/vise_o_bakru.html) (14.01.2017.)
- [14] B. Šarkanj, D. Klipčić, Đ. Vasić-Rački, F. Delaš, K. Galić, M. Katalenić, N. Dimitrov, T. Klapac, Kemijske i fizikalne opasnosti u hrani, Osijek, Hrvatska agencija za hranu, 2010.
- [15] Z. Bajsić, I. Dobrotić, Uklanjanje teških metala iz tla fitoremedijacijom uz pomoć samoniklih biljaka na području grada Varaždina, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin, 2014.
- [16] <http://www.lenntech.com/periodic/elements/cu.htm> (14.01.2017)
- [17] B. Tušar, Pročišćavanje otpadnih voda, Kigen d.o.o., Zagreb 2009.
- [18] N. F. Gray, *Biology of Wastewater Treatment*, Imperial College Press, London, 2004.
- [19] A. Rađenović, J. Malina, A. Štrkalj, Adsorpcija organskih kiselina na različitim ugljičnim materijalima, *Zbornik radova međunarodne konferencije MATRIB 2007*, K. Grilec, (ur.). Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2007, 185-189.
- [20] F. B. Aarden, *Adsorption onto Heterogeneous Porous Materials, Equilibrium and Kinetics*, Technische Universiteit, Eindhoven 2001.
- [21] [http://www.lehmbausysteme.de/Tonputz\\_und\\_VOC](http://www.lehmbausysteme.de/Tonputz_und_VOC) (22.01.2017)
- [22] F. Cecen, O. Aktas, *Water and Wastewater Treatment: Historical Perspective of Activated Carbon Adsorption and its Integration with Biological Processes*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.

- [23] <http://www.emedicalprep.com/study-material/chemistry/comparision-phsorption-chemisorption.html> (8.02.2017.)
- [24] I. A. W. Tan, A. L. Ahmad, B. H Hameed, Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *Journal of Hazardous Materials*, 154 2008, 337-346.
- [25] D. G. Kinniburgh, General Purpose Adsorption Isotherms, *Environmental Science Technology*, 1986, 895-904.
- [26] M. Ergović Ravančić, Određivanje brzine i mehanizama adsorpcije fluorida iz vode aktivnim ugljenom pomoću ravnotežnih i kinetičkih modela, doktorska disertacija, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2014.
- [27] [www.emedicalprep.com/study-material/chemistry/surface-chemistry/freundlich-adsorption-isotherm.html](http://www.emedicalprep.com/study-material/chemistry/surface-chemistry/freundlich-adsorption-isotherm.html) (8.02.2017.)
- [28] Y. S. Ho, Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions, *Scirntometrics*, 59(2004), 171-177.
- [29] Y. Hannachi, Characterization of the Biosorption of Lead and Cadmium with the Red Alga (*Ceramium Virgatum*), *The Holistic Approach to Environment*, 2(2012), 93-109.
- [30] A. Štrkalj, Z. Glavaš, G. Matijašević, Adsorption of hexavalent chromium from an aqueous solution of steel-making slag, *Materials and technology*, 48(2015)5, 619-622.
- [31] Zakon o održivom gospodarenju otpadom, NN 94/2013.
- [32] A. Štrkalj, Z. Glavaš, K. Maldini, D. Hršak, I. Šipuš, Modeliranje statičkog adsorpcijskog sustava metalurški otpad/ $\text{Cu}^{2+}$  ion, Zbornik radova međunarodne konferencije MATRIB 2015, (ur. D. Ćorić, I. Žmak), Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 146-150.
- [33] D. Cirtina, N. Ionescu, L. M. Cirtina, Environmental Impact Assessment Related to Metallurgical Industry Activities, *Metalurgija* 55(2016) 3, 481-484.
- [34] Z. Glavaš, Osnove lijevanja metala, nastavni tekst predavanja, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2014.
- [35] [https://www.youtube.com/watch?v=7t\\_yHEOjGpM](https://www.youtube.com/watch?v=7t_yHEOjGpM) (10.02.2017)
- [36] D. Novosel, Trošenje mlaznice za pjeskarenje, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [37] A. Štrkalj, Z. Glavaš, K. Maldini, Statičko i dinamičko uklanjanje bakrovih (II) iona pomoću ljevaoničkog otpada, *Inženjerstvo okoliša*, 2(2014), 77-79.
- [38] I. Šošić, V. Serdar, Uvod u statistiku, Školska knjiga, Zagreb, 2002.
- [39] Y.S. Ho, G. McKay, Pseudo-second order model for sorption processes, *Process Biochemistry* 34 (1999) 451–465
- [40] A. P. Uzoiye, P. C. Njoku, i. J. Okolie, U. Enwereuzo, Adsorption of Cupper (II) ion on heterogeneous surfaces of selected low-cost precursors; an application of isotherm, thermodynamic and kinetic models, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology* 2(2015)1, 20-29.

# ŽIVOTOPIS

## OSOBNI PODACI

Ime i prezime: Ivana Gavranović

Datum i mjesto rođenja: 11.08.1993. Šurkovac, BiH

Adresa: Slovinci 96, 44210 SUNJA

E-mail: ivanagavranovic04@gmail.com

## OBRAZOVANJE

2008.-2012. Ekonomska škola Sisak, Ekonomist

## VJEŠTINE

Rad na računalu: Dobro poznavanje operativnog sustava Windows i korištenje paketnog programa MS Office.

Strani jezik: Engleski jezik

## STRUČNI RADOVI

I. Gavranović, Z. Zovko Brodarac, Solarni električni automobil, 15. Međunarodno savjetovanje ljevača – Temelj konkurentne proizvodnje odljevaka, Studentska poster sekcija, Ljerka Slokar, ur., Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sveučilište Sjever, Univerza v Ljubljani Naravoslovnotehniška fakulteta, Elkem AS, Opatija, 11.-13. svibnja 2016.

I. Gavranović, Solarni električni automobil, Tehnologijada 2016, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Rovinj 2.-8. svibanj 2016.

I. Gavranović, Sačma više od streljiva, Tehnologijada 2015, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Makarska, 4.-10. svibnja 2015.