

# Primjena adsorpcije u pročišćavanju otpadnih voda

---

**Apalović, Uršula**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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:115:401728>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2022-01-16**



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](#)



SVU ILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Uršula Apalovi

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2020.

SVU ILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Uršula Apalovi

Primjena adsorpcije u pro iš avanju otpadnih voda

ZAVRŠNI RAD

Voditelj:

izv.prof.dr.sc. Anita Štrkalj

lanovi ispitnog povjerenstva:

Predsjednik: prof.dr.sc. Damir Hršak

lan: izv.prof.dr.sc. Anita Štrkalj

lan: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Zamjenski lan: doc.dr.sc. Vesna Oceli Bulatovi

Sisak, rujan 2020.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: Uršula

PREZIME: Apalović

MATIČNI BROJ: BE – 3618/16

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj **završni** / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

Primjena adsorpcije u pročišćavanju otpadnih voda

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 24.8.2020.

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

\_\_\_\_\_  
*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

*Prvenstveno se zahvaljujem svojoj voditeljici završnog rada izv. prof. dr. sc. Aniti Štrkalj na strpljenju, uloženom vremenu i korekcijama koje sam primjenjivala prilikom izrade završnog rada.*

*Također, zahvaljujem se obitelji i prijateljima na razumijevanju i podršci tokom studiranja.*

# PRIMJENA ADSORPCIJE U PRO IŠ AVANJU OTPADNIH VODA

## SAŽETAK

Da bi se osigurala voda odgovarajuće kvalitete ili da bi se iz nje uklonila one štetne tvari primjenjuje se velik broj različitih metoda. Odabir metode za pročišćavanje otpadnih voda ovisi o vrsti one štetne tvari, ponovnoj primjeni pročišćene vode, ali i o ekonomskim mogućnostima. Danas se najčešće primjenjuje adsorpcija. Ovo je vrlo jednostavna i učinkovita metoda. Tom metodom moguće je ukloniti anorganske one štetne tvari poput iona teških metala, ali i organske one štetne tvari. U ovom završnom radu dan je pregled osnovnih pojmova vezanih za adsorpciju kao i pregled mogućnosti koje utječu na mogućnost odvijanja adsorpcije, odnosno njezinu primjenu. Literaturno su obrađene najčešće adsorpcijske izoterme i kinetika adsorpcije. Poseban naglasak je stavljen na mogućnost korištenja adsorpcije kao metode za pročišćavanje otpadnih voda.

**Ključne riječi:** adsorpcija, otpadne vode, pročišćavanje, one štetne tvari

## APPLICATION OF ADSORPTION IN PURIFICATION OF WASTE WATER

### ABSTRACT

A large number of different methods are applied to ensure proper quality of water or to remove contaminants from it. The choice of method for waste water treatment depends on the type of pollution, the reuse of the purified water, but also on economic factors. Today adsorption is most commonly used. It is a very simple and effective method. This method can eliminate inorganic contaminants, such as heavy metal ions, but also organic contaminants. This final paper provides an overview of the basic concepts related to adsorption, as well as an overview of the factors that influence the ability of adsorption to take place, i.e. its application. The most common adsorption isotherms and adsorption kinetics are processed. Particular emphasis is placed on the possibility of using adsorption as a method for purification of waste water.

**Keywords:** adsorption, waste water, purification, pollution

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b>	1
<b>2. OPŠTENITO O VODI</b>	2
<b>2.1 Struktura i fizikalno-kemijska svojstva vode</b>	2
<b>3. OTPADNE VODE</b>	4
<b>3.1 Sanitarne otpadne vode</b>	4
<b>3.2 Industrijske otpadne vode</b>	5
<b>3.3 Oborinske vode</b>	6
<b>4. PROJEKTOVANJE AVANJE OTPADNIH VODA</b>	7
<b>4.1 Primarno projektovanje otpadnih voda</b>	7
<b>4.2 Sekundarno projektovanje otpadnih voda</b>	9
<b>4.3 Tercijarno projektovanje otpadnih voda</b>	9
<b>4.4 Kombinirano projektovanje otpadnih voda</b>	10
<b>4.4.1 Adsorpcija</b>	11
<b>4.4.1.1 Adsorbensi</b>	17
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	20
<b>6. LITERATURA</b>	21
<b>ŽIVOTOPIS</b>	23

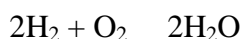
## 1. UVOD

Razvojem i rastom civilizacije povećala se potreba za pitkom vodom, ali se istovremeno povećala i količina otpadne vode. Ovisno o svom sastavu, otpadne vode mogu biti iznimno štetne, pa i opasne po razne žive organizme. Iako je već dugo poznato da je onečišćena voda uzročnik različitih bolesti, epidemija pa čak i smrti, tek je u 19. stoljeću uspostavljen adekvatan sustav pročišćavanja otpadnih voda. Pročišćavanje otpadnih voda je od iznimnog značaja jer se na taj način uklanjaju štetne tvari i omogućava daljnja upotreba vode ili ispuštanje vode u prirodne prijemnike. Upravo ova činjenica potaknula je interes za osiguravanjem odgovarajuće kvalitete vode. Tijekom godina, standardi za kvalitetu vode su se podizali. To je stvorilo potrebu za modernizacijom postojećih postrojenja za obradu voda, sve u cilju kontrolom, ali i novim istraživanjima u smislu što bolje pripreme i pročišćavanja voda. Tako danas postoji čitav niz postupaka i metoda kojima se može pročišćiti voda do odgovarajuće kvalitete. Koja od metoda će se primijeniti ne ovisi samo o vrsti metode i načinu rada već i o onečišćenosti vode, mogućnosti efikasnog uklanjanja onečišćenja, ali i ekonomičnosti samog procesa pročišćavanja. Stoga se ponekad koristi samo jedna metoda pročišćavanja, a ponekad se radi i kombinacija različitih metoda.



## 2. OPŠTENITO O VODI

Voda je izvor života, u njoj su se razvila prva živa bića, ona i danas čini 50-90 % udjela u stanicama i organizmima. Smatra se temeljnim uvjetom za svakog opstanak na Zemlji. Gubitkom 10-20 % vode iz ljudskog organizma dolazi do smrti. Za opstanak biljnoga svijeta voda je važna jer otapa hranjiva iz tla, putuje kapilarama od korijena do lista, te nakon toga isparavanjem odlazi u atmosferu. Upravo jedinstvena svojstva vode su razlog održavanja života na Zemlji. Prirodna voda je bezbojna tekućina bez boje i mirisa, koja može nastati izgaranjem organskih tvari koje sadrže vodik, metaboličkim reakcijama u organizmu, pirolizom hidrata, ali i izravnom reakcijom vodika s kisikom prema sljedećoj kemijskoj jednadžbi:



S obzirom da je prirodna voda smjesa molekula različitog izotopnoga sastava svojih elemenata, izotopi  $^{16}\text{O}$  i  $^1\text{H}$  prisutni su u više od 99,98 % [1]. U tablici 1 prikazan je udio pojedinih izotopa u vodi.

Tablica 1. Udio izotopa kisika i vodika u vodi [1]

IZOTOP VODIKA	UDIO	IZOTOP KISIKA	UDIO
$^1\text{H}$	99,964	$^{16}\text{O}$	99,759
$^2\text{H}$	0,016	$^{17}\text{O}$	0,037
$^3\text{H}$	-	$^{18}\text{O}$	0,204

### 2.1 Struktura i fizikalno-kemijska svojstva vode

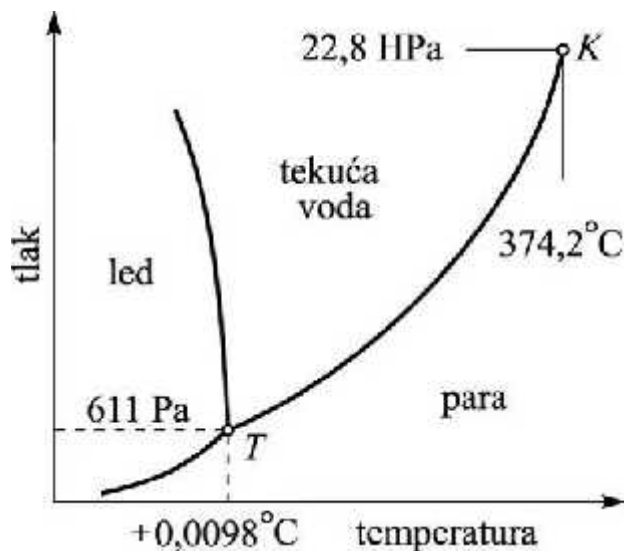
Općenito gledano, voda je oksid strukture tetraedra s kutom od  $104,5^\circ$  između dvije OH veze. Molekula vode je pozitivno naelektrizirana, na strani vodika i negativno naelektrizirana na strani kisika. Iz ovog razloga se molekulu vode može smatrati bipolarnom. Ovo svojstvo omogućava povezivanje molekula vode pri čemu vodik iz jedne molekule vode privlači i kisik iz druge molekule vode. Povezivanje se postiže vodikovom vezom. Prilikom povezivanja molekula vode posebno je izražena tetraedarska struktura molekula vode [2, 3].

Bitan značaj za strukturu vode ima njezino agregatno stanje, koje može biti tekuće u površinskim i podzemnim vodama, vrsto u ledom prekrivenim površinama i ledenjacima te plinovito kao vodena para.

Posljedica vodikove veze je i ta što molekule vode imaju visoku temperaturu taljenja i isparavanja. Zbog ove činjenice vodena para ima visok sadržaj energije. S druge strane, prilikom stvaranja leda voda otpušta velike količine topline. Zbog ovih činjenica voda predstavlja odličan medij za prijenos topline. Osim toga, ovo svojstvo vode osigurava stabilizaciju temperature toplokrvnih organizama.

Fazni dijagram vode (slika 1) prikazuje ravnotežna stanja koja se uspostavljaju između tekuće, vrste i plinovite faze. Krivulje na faznom dijagramu vode prikazuju ravnotežna stanja između dviju faza, a sve tri krivulje sijeku se u trojnoj točki pri temperaturi 273,16 K ( $0^\circ\text{C}$ ) i tlaku 611 Pa. Krivulja isparavanja završava na temperaturi od 647,3 K ( $374,2^\circ\text{C}$ ) i tlaku 22,8 hPa, tj. u kritičnoj točki iznad koje se prekida jasna granica između plinovite i

tekuće faze. Kod većine faznih dijagrama se može uočiti pozitivan nagib koji je uzrok veće gustoće vrste faze, što uvjetuje povišenje temperature taljenja s porastom tlaka. Fazni dijagram vode za razliku od većine dijagrama ima negativan nagib, što pokazuje da je gustoća leda manja od gustoće vode i upravo se ta pojava naziva još i anomalija vode [1].



Slika 1. Fazni dijagram vode [4]

Kada se govori o fizikalnim svojstvima vode prije svega je važno istaknuti gustoću vode koja ovisi o stanju tlaka i temperature, te prvenstveno o njezinom agregatnom stanju, pa je tako gustoća vode  $1,0000 \text{ g/cm}^3$  prisutna u uvjetima od 101,325 kPa i 3,98 °C. Navedena gustoća vode je ujedno i njezina maksimalna vrijednost. Također, o tlaku i temperaturi ovisi i viskoznost vode. Kako se približava ledištu viskoznost vode se naglo povećava, a ne ravnomjerno kao kod nepolarnih tekućina. Kada je temperatura ispod 30 °C viskoznost se smanjuje porastom tlaka, a ako je iznad 30 °C onda raste s tlakom. Površinska napetost je također jedno od svojstava koje voda pokazuje i rezultat je djelovanja sila na površini i u unutrašnjosti molekula. Kapilarno svojstvo molekula vode je također jedno od svojstava koje omogućava opstanak živog svijeta. Odgovorno je za transport nutrijenata kroz korjenov sustav, ali i za pravilan rad srca.

Nije tvrdoća vode nije zanemariva, ona je pokazatelj vrste i koncentracije iona zemnoalkalijskih elemenata u prirodnoj vodi [5].

Za vodu se vrlo često kaže da je univerzalno otapalo. Kada je voda u kontaktu s kristalnom tvari, molekule vode se usmjeravaju na taj način da neutraliziraju ione u kristalnoj strukturi. Oslobođene ione vežu i sprečavaju njihovo spajanje i kristalizaciju. Sposobnost za otapanje je posljedica visoke dielektrične konstante vode.

Fenomen koji se javlja u vodenim otopinama je i osmotski tlak. Također bitno svojstvo za funkcioniranje i opstanak živog svijeta. Ako su dvije vodene otopine razdvojene membranom, voda će iz razrijeđenog dijela preći u koncentrirani. Ovaj proces kontrolira funkcioniranje svih živih stanica.

### 3. OTPADNE VODE

Ljudske zajednice se međusobno razlikuju po mnogo čemu, međutim svima im je zajednička težnja da pronađu vodu, obrade je (ako je potrebno) i koriste za različite namjene, obično za komercijalnu potrebu u domaćinstvu i za industriju. Komunalne vode, odnosno vode koje se koriste za određenu namjenu obično nakon primjene budu one istene. S obzirom na namjeru za koju se voda uzima, otpadne vode mogu se razvrstati na sljedeći način [5]:

- sanitarne otpadne vode,
- industrijske otpadne vode i
- oborinske vode.

#### 3.1 Sanitarne otpadne vode

Sanitarne otpadne vode najčešće su otpadne vode jer voda koja se pretvara u ovu vrstu otpadne vode prethodno je upotrijebljena da bi zadovoljila sve potrebe stanovništva. Sanitarne otpadne vode su svima poznate, te se lako mogu navesti područja u kojima nastaju. To su vode koje nastaju pri uporabi u kućanstvima, hotelima, uredima, kinima, ali također i u objektima gdje postoje građevinski sanitarni sustavi za radnike [4].

Osnovno svojstvo sanitarnih otpadnih voda je biorazgradivost što znači da se proces razgradnje odvija uz pomoć mikroorganizama razlagajući. Mikroorganizmi se u otpadnoj vodi služe razgradivim tvarima kao hranom, pri čemu se konzumacijom u isto vrijeme troši kisik. Kakav je sastav i koncentracija otpadnih voda koje proizlaze iz kućanstva najvećim dijelom ovisi o životnim navikama stanovništva, klimi, količini vode te o tehnološkoj razvijenosti sustava koji služi za napajanje kućanstva itd.

Kada se govori o sanitarnim otpadnim vodama tada one imaju neke svoje osobitosti. Sanitarne otpadne vode sastavljene su od značajne količine mikroorganizama, poglavito bakterija i virusa (uključujući i patogene). Količina prethodno nabrojanih elemenata koja se stvarati prvenstveno ovisi o sanitarnim uvjetima koji vladaju kod odvodnje. Također, osobitost koja se veže uz otpadne vode je i njezina temperatura, naime, zbog povišene temperature vode u kupaonicama, kuhinjama, te zbog procesa biorazgradnje, temperatura otpadnih voda je veća od vodovodne vode. Okvirna temperatura sanitarnih otpadnih voda je u intervalu od 11,6 °C do 20,5 °C. Proces biološke razgradnje pod utjecajem povišene temperature se ubrzava što posljedično dovodi do bržeg trošenja kisika i opasnosti od truljenja vode u kanalizacijama.

Najvažnija podjela sanitarnih otpadnih voda izvedena je s obzirom na to kakva je biološka razgradnja, prema tome razlikuju se [5]:

- Svježa voda – biorazgradnja u ovim otpadnim vodama nije pokrenuta, dok se količina otopljenog kisika ne razlikuje znatno od količine u vodi iz vodovoda,
- Odstajala voda – u kojoj nema kisika, razlog tome leži u činjenici da je biorazgradnjom kisik potrošen i
- Trula voda (septička) – biorazgradnja je napredovala i odvija se bez prisutnosti kisika.

Uz pojam sanitarnih otpadnih voda usko se veže i pojam fekalnih otpadnih voda koje su u današnje vrijeme rijetke, me utim, pojavljuju se na onim lokacijama koje su nedovoljno opremljene teku om vodom. Upravo je to razlog zašto su u nastajanju tzv. higijenski suhi zahodi ija je prvenstvena svrha zbrinjavanje urina i fekalija bez potrebe teku e vode.

## 3.2 Industrijske otpadne vode

Industrijska proizvodnja stvara otpadne vode razli itih sastava. Op enito je industrijske otpadne vode mogu e razvrstati u dvije temeljne grupe [4]:

- biološki razgradive i
- biološki nerazgradive vode.

Biološki razgradive vode su obi no otpadne vode prehrambene industrije. Ove vode nazivaju se još i kompatibilne budu i da su po sastavu vrlo sli ne sanitarnim otpadnim vodama, posebno vodama iz ku anstva. Mogu se zajedno s njima miješati i odvoditi zajedni kom kanalizacijom.

Biološki nerazgradive otpadne vode su naj eš e vode koje nisu sli nog sastava kao što su to sanitarne otpadne vode i ne mogu se direktno s njima miješati ve ih je prije miješanja treba predobraditi. U ovu skupinu voda obi no spadaju vode iz kemijske industrije. Biološki nerazgradive otpadne vode je prije puštanja u kanalizacijski sustav potrebno pro istiti zbog toga što u otpadnim vodama postoje toksi ne tvari koje sprje avaju biorazgradnju ili se nakupljaju u živim organizmima. Ponekad sadržavaju zapaljive, korozivne pa i eksplozivne tvari te ih treba ukloniti radi sigurnosnih razloga. Osim toga, nerijetko sadržavaju i inhibitore koji mogu djelovati tako da onemogu avaju rad ure aja za pro iš avanje.

Osim ve spomenute podjele, industrijske vode je mogu e podijeliti i na [6]:

- otpadne vode koje sadrže organska one iš enja i
- otpadne vode koje sadrže anorganska one iš enja.

Organskim one iš enjima su obi no optere ene vode industrije umjetnih organskih materijala, ali i industrije papira i petrokemijske industrije. Organska one iš enja su naj eš e ugljikovodici, pesticidi, herbicidi, plastika i deterdženti. Osim što znatno optere uju otpadnu vodu i zahtijevaju uklanjanje, izrazito su opasna ako dospiju u površinske vode jer e za svoju razgradnju koristiti kisik iz površinske vode. Smanjenje kisika u površinskim vodama narušava prirodnu ravnotežu.

Anorganska one iš enja su obi no kiseline, lužine, umjetna gnojiva i posebno opasne soli teških metala. Soli teških metala odnosno njihovi metalni ioni poput olova, žive, arsena, kroma, bakra, nikla itd. imaju mogu nost akumuliranja u prirodi, ali i živim organizmima što esto dovodi do oboljenja, mutacija pa i smrti.

Problem s otpadnim vodama, to nije sastavom otpadnih voda veliki je izazov koji se teško rješava. Kada se govori o sastavu industrijskih otpadnih voda tada veliki problem stvara injenica da odre ene industrije u svojim otpadnim vodama plasiraju vrlo otrovne, teško razgradive tvari koje se teško ili gotovo nemogu e sjedinjavaju sa okolišnim sustavom u koji se vra aju. Postoji itav niz tvari koje se mogu na i u industrijskim otpadnim vodama,

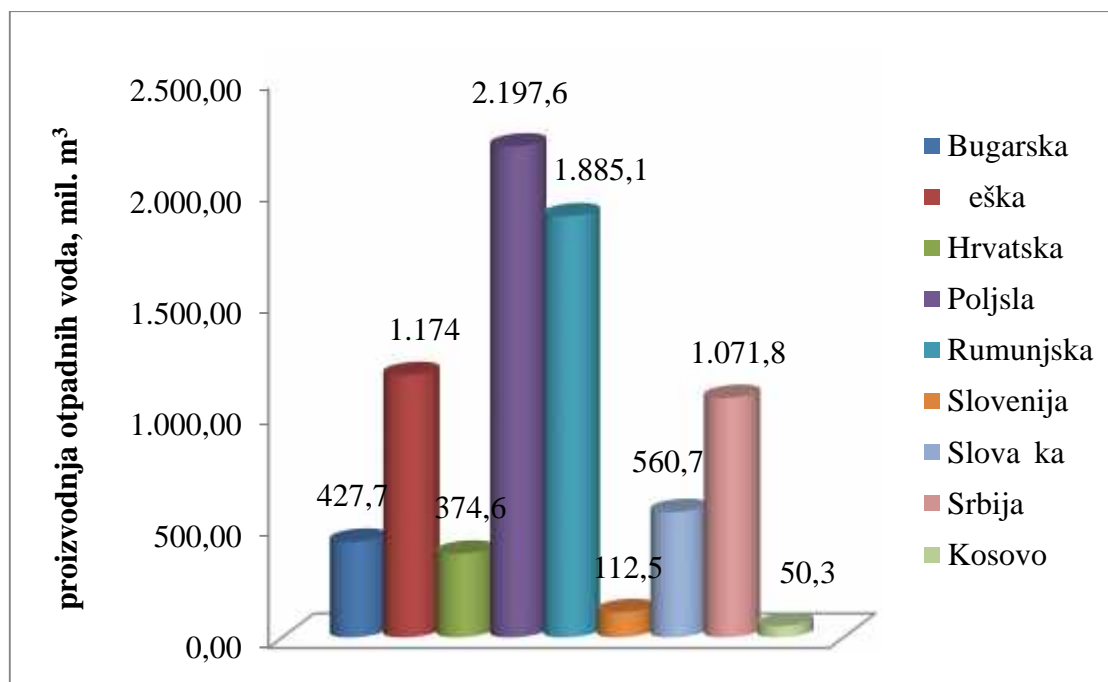
a koje odgovaraju prethodno navedenom, neke od tih tvari su: kiseline, lužine, nafta, naftni derivati, radioaktivni izotopi itd. [5].

### 3.3 Oborinske vode

Kao jedna od posljedica nekontroliranog ispuštanja raznih oneišenja u atmosferu nastaju otpadne oborinske vode. Sakupljanje kišnice te upotreba u daljnje svrhe pod pretpostavkom da je to ista voda, neutemeljena je i neto na, iako je to i dalje vrlo rasprostranjena praksa. Meutim, injenice povezane s time su malo drugačije i nepovoljnije. Naime, oborinske vode na zemlju donose sva oneišenja koja su sa određeni podruja otišla u atmosferu. Jednako tako, vjetrovi svojim strujanjem donose štetne tvari iz raznih krajeva svijeta. Najbolji primjeri za to su dobro poznate kisele kiše, te crvene i žute kiše. Koja količina oborinskih voda dospjeti u kanalizaciju najviše ovisi o intenzivnosti i vrsti prometa, utjecaju industrije, trajanju kiše odnosno njezinoj jakosti, godišnjem dobu itd. Do sada je pokazano kako je s prvim dotokom padalina sastav netopljive tvari i do nekoliko puta veći nego u finalnim fazama otjecanja. Ta razlika može biti daleko veća ukoliko tako diktiraju vremenske nepogode, odnosno prilikom jakih i dugotrajnih kišnih perioda.

Kada je riječ o oborinskim vodama tada se uz sve navedeno mogu dodati i one vode koje se generiraju u zimskim uvjetima, odnosno topljenjem snijega. Takve vode također se mogu svrstati u kategoriju vrlo oneišenih voda. Najkritičniji dotoci su oni koji nastaju prilikom iznenadnih promjena vremena ili kada se snijeg iznenada topi odnosno u krajnjem periodu topljenja snijega [5].

injenica je da sve zemlje svijeta ne proizvode jednake količine otpadnih voda. To prvenstveno ovisi o broju stanovnika, ali i o razvijenosti pojedine zemlje. Na slici 2 prikazana je proizvodnja otpadnih voda u nekim zemljama svijeta u 2017. godini.

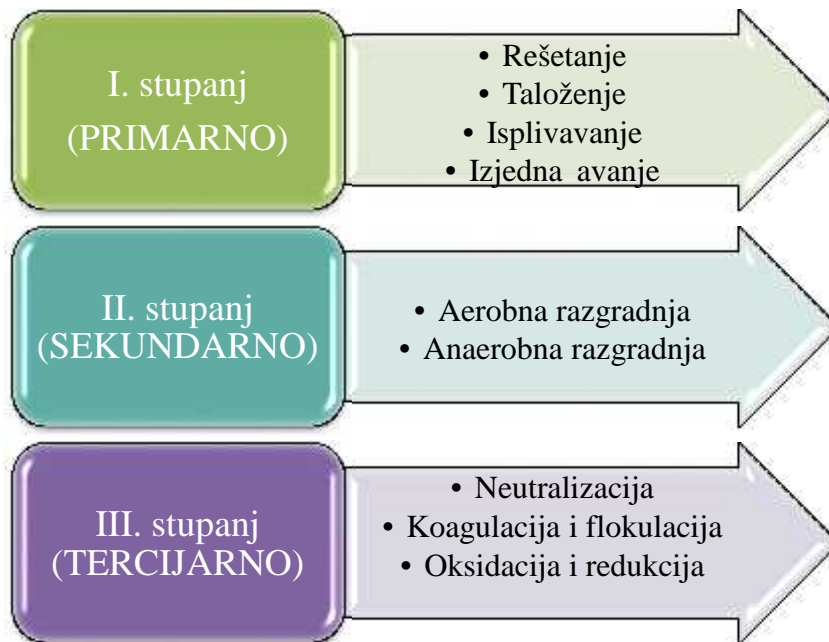


Slika 2. Proizvodnja otpadnih voda u 2017. godini [7]

## 4. PRO IŠ AVANJE OTPADNIH VODA

Pro iš avanje otpadnih voda podrazumijeva smanjenje one iš enja do te mjere da pro iš ena otpadna voda koja se ispušta u prijemnik ne predstavlja nikakvu opasnost za okoliš i život u njemu.

Ovisno o svojstvima otpadne vode i potrebnom stupnju pro iš avanja, postoji nekoliko na ina (stupnjeva) pro iš avanja [6], kao što je to pokazano na slici 3.



Slika 3. Stupnjevi pro iš avanja otpadne vode

### 4.1 Primarno pro iš avanje otpadnih voda

Primarno pro iš avanje otpadne vode predstavlja prvi stupanj pro iš avanja. Provođi se s ciljem uklanjanja ili smanjenja grubih primjesa u otpadnoj vodi. Ovaj stupanj pro iš avanja esto se naziva i mehani ki budu i da se mehani kim putem uklanjaju primjese iz otpadne vode. Na ovaj na in mogu e je ukloniti od 40 do 60 % grubih i/ili suspendiranih tvari. Primarno pro iš avanje je ujedno i pripremna faza za ostala dva stupnja pro iš avanja, a radi se u svrhu osiguravanja uvjeta za biološko pro iš avanje (uklanjanje toksi nih tvari koje bi smetale biološkom pro iš avanju, postizanje odgovaraju e temperature i pH i sl.). Osim toga, primarno, odnosno mehani ko pro iš avanje otpadnih voda može se primijeniti za djelomi no pro iš avanje kišnice, ali i za prethodno pro iš avanje nekih industrijskih voda prije ispuštanja u gradsku kanalizaciju [6].

Mehani ko pro iš avanje obavlja se pomo u rešetki, sita, taložnika za pijesak, hvata a masti i ulja (mastolovi), bazena za izjedna avanje protoka i sl..

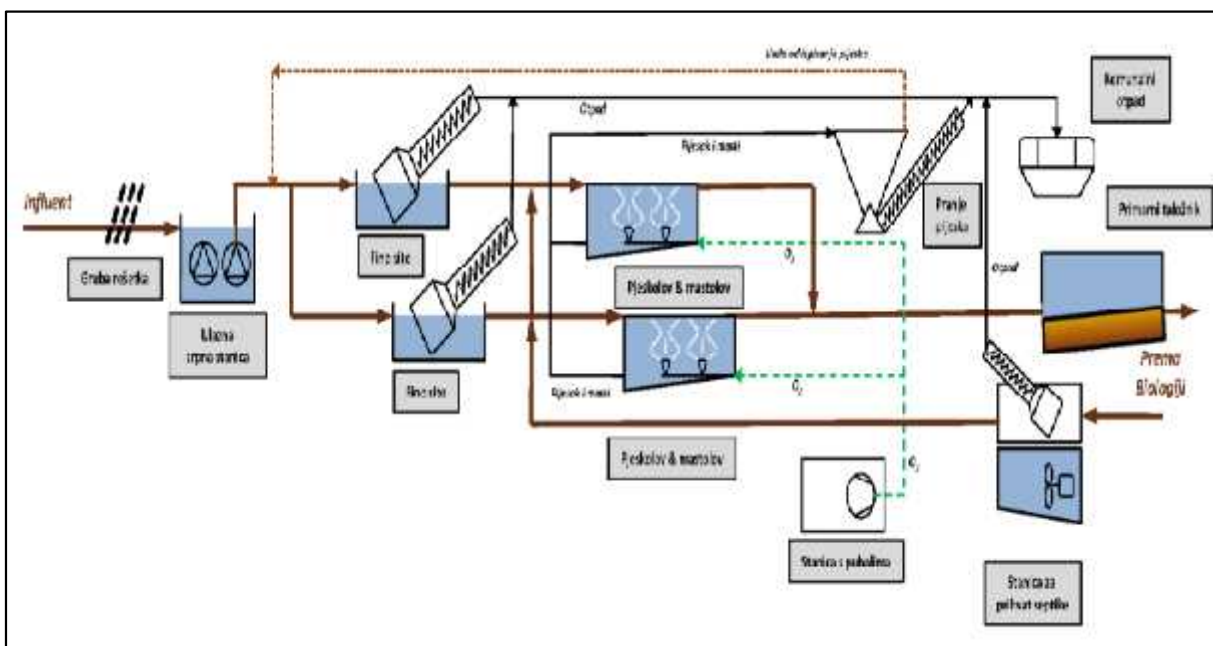
Rešetanje je jedna od operacija koja se smatra najjednostavnijom. Ovom operacijom se uklanjaju krupnije plivaju e tvari u vodi kao što je liš e, granje, komadi i plastike itd.

Ovaj postupak se izvodi uz primjenu grubih, srednjih i finih rešetaka, a ponekad i sita. Provodi se radi zaštite uređaja koji se koriste u daljnjim postupcima obrade otpadne vode. Taloženje se kod mehaničkog pročišćavanja provodi radi izdvajanja pijeska u tzv. pjeskolovima. Pjeskolovi se izvode kao taložnici u kojima se podešava brzina protoka vode tako da se osigura taloženje pijeska, ali onemogući i istovremeno taloženje čestica organskih tvari.

Isplivavanje je proces uklanjanja čestica koja je gustoća manja od gustoće vode. Ovaj proces se uglavnom koristi za uklanjanje masti i ulja. Može biti prirodno i stimulirano. Prirodno se odvija spontano kod čestica koja je gustoća manja od gustoće vode dok se stimulirano provodi obično aeracijom pomoću sitnih mjehurića zraka. Iako je ovaj postupak vrlo učinkovit budući da se prirodnim isplivavanjem ukloni 80 do 90 % masti i ulja, a stimuliranim 98 %, njegova uspješnost ovisi o vremenu zadržavanja vode, gustoći, protoku vode, veličini čestica koje se uklanjaju, temperaturi itd. Isplivavanje se provodi u jedno ili višekomornim bazenima sličnim taložnicima.

Ovisno o aktivnostima značajno stanovništva te radu industrijskih pogona, otpadne vode tijekom jednog dana mijenjaju količinu. Protok voda je u ovom smislu važan i zbog koncentracije organskih tvari, stoga se može zaključiti kako se koncentracija organskih tvari također mijenja tijekom dana. Kako bi se podigao intenzitet rada uređaja uključuje se proces izjednačavanja (egalizacije) i to se najčešće primjenjuje kada se pročišćavaju industrijske otpadne vode. Egalizacija je prvenstveno osmišljena kako bi pripomogla uređaju za pročišćavanje otpadnih voda na način da trenutna ni raspoloživi kapaciteti uređaja odrade potrebni posao na višoj razini uspješnosti [8].

Na slici 4 prikazana je shema uobičajenog mehaničkog pročišćavanja otpadnih voda.



Slika 4. Shema uobičajenog mehaničkog pročišćavanja otpadnih voda [9]

## 4.2 Sekundarno pro iš avanje otpadnih voda

Sekundarno pro iš avanje otpadne vode provodi se na in da se oponaša pro iš avanje vode u prirodi tzv. samopro iš avanje. Na ovaj na in mikroorganizmi razgra uju organske tvari (one iš enja u vodi) na anorganske, odnosno na ugljikov dioksid i vodu. Budu i da se radi o aktivnostima mikroorganizama ovaj postupak se naziva i biološko pro iš avanje. Za razliku od procesa koji se odvija u prirodi, biološkim pro iš avanjem se proces razgradnje organskih tvari ubrzava, ali i kontrolira.

Uspješnost biološkog procesa pro iš avanja uvelike ovisi o itavom nizu imbenika. Da bi proces bio uspješan svakako treba primijeniti selektivne kulture mikroorganizama, osigurati aerobne ili anaerobne uvjete razgradnje, osigurati dovoljnu koli inu organskih tvari, kontrolirati temperaturu i pH procesa.

Kulture mikroorganizama mogu biti aerobne, anaerobne i fakultativne. Anaerobne kulture se obi no najviše koriste. Anaerobne kulture se koriste za obradu otpadnih voda kod kojih je organsko one iš enje veliko (npr. otpadna voda prehrambene industrije), a fakultativne kulture za pro iš avanje komunalnih voda i nekih manje optere enih industrijskih voda [2].

Da bi se uop e moglo odabrati odre ene mikroorganizme i posti i dobro pro iš avanje otpadne vode potrebno je poznavati i razumjeti ponašanje mikroorganizama za vrijeme njihovog rasta. Kada se osigura adekvatno snabdijevanje hranom osigurava se eksponencijalna brzina razmnožavanja mikroorganizama, organske tvari se razgra uju na ugljikov dioksid i vodu. U periodu kada mikroorganizmi cvjetaju opskrba hranjivim tvarima ograni ava njihov rast što dovodi do promjene u populaciji mikroba. Daljnjim rastom broja mikroorganizama hrane (organske tvari) je sve manje što dovodi do odumiranja mikroorganizama.

Osim navedenog svakako treba obratiti pažnju na temperaturu. Treba izbjegavati velike oscilacije u promjenama temperature posebno u situacijama kada se to može predvidjeti (dnevne i sezonske promjene temperature). Tako er su u cjelokupnoj kulturi mikroorganizama prisutne bakterije koje se razli ito ponašaju u odre enim temperaturnim uvjetima (psihofilni, mezofilni, termofilni organizmi) te je potrebno osigurati odgovaraju e temperature uvjete za svaku vrstu mikroorganizama. Uz navedene uvjete potrebno je obratiti pozornost i na promjene pH vrijednosti. Istraživanja su pokazala da je optimalni pH od 5 do 9. U slu aju da pH padne ispod 5 ili naraste iznad 10 aktivnost mikroorganizama može biti znatno ugrožena [2].

## 4.3 Tercijarno pro iš avanje otpadnih voda

Tercijarno pro iš avanje otpadne vode provodi se kada se primarnim i sekundarnim postupcima ne postigne zadovoljavaju a kvaliteta vode. Obi no se koristi kada nakon prethodnih postupaka obrade u otpadnoj vodi ostanu ioni teških metala, pesticidi, deterdženti, radioaktivne tvari ili neke lebde e estice. Voda koja se dobiva nakon tercijarnog postupka pro iš avanja uglavnom se ne ispušta u prirodne prijemnike ve se može koristiti za neku drugu namjenu. Tercijarna obrada se sastoji od koagulacije i flotacije, neutralizacije, taloženja, flokulacije i sl. Ovi postupci se mogu koristiti kao samostalni postupci ili kao kombinacija nekoliko njih. Obi no se na kraju tercijarnog pro iš avanja provodi i dezinfekcija [6].

Neutralizacija je tipi an proces koji se primjenjuje u obra ivanju otpadnih voda i to u onom segmentu kada je potrebno utjecati na smanjivanje kiselosti „sirovih voda“. Tako er



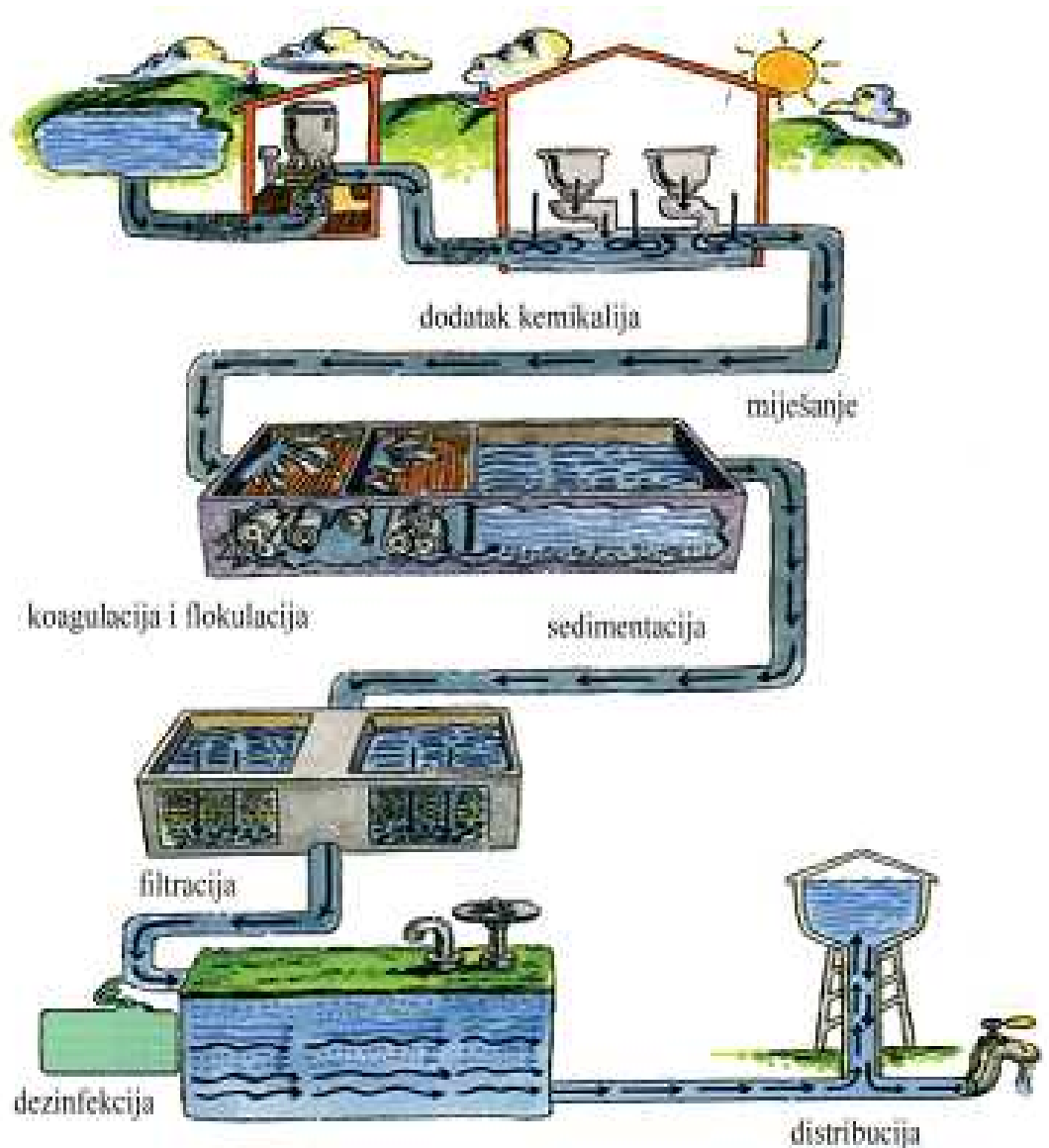
se neutralizacija primjenjuje i kod pro ištavanja industrijskih otpadnih voda kada se želi utjecati na popravljivanje kiselosti ili lužnatosti. Provođenje postupka neutralizacije usko je povezano sa zadovoljenjem nekoliko ključnih imbenika, a neki od njih su: sastav i količina otpadnih voda, prijemnik otpadnih voda, način ispuštanja i cijena sredstva za neutralizaciju. Zakonski je određeno da se postupak neutralizacije otpadnih voda mora provesti prije nego li se ispuste u prirodno stanište ili u kanalizaciju. U želji za pojednostavljivanjem samog postupka na raspolaganju stoje automatski neutralizatori [5]. Nakon neutralizacije, potrebno je sagledati proces koji je osmišljen za utvrđivanje ravnotežnog položaja koloidnih otopina koje su rezultat ionizacije. Navedeni proces se naziva zgrušavanje – koagulacija. Ovim postupkom se unošenjem u vodu kemijskog reagensa koji ioni reagiraju na električni nabijene koloide eliminira utjecaj naboja koloida. Navedeni kemijski proces dovodi do toga da se lakše stvaraju tvari koje se izdvajaju taloženjem, cijepanjem ili ispiranjem. Aluminijev sulfat ( $Al_2(SO_4)_3$ ), aluminijev klorid ( $AlCl_3$ ), željezov (III) klorid ( $FeCl_3$ ) samo su neke tvari koji se primjenjuju u koagulaciji. Pahuljenje (flokulacija) je proces koji se u većini slučajeva primjenjuje nakon zgrušavanja. U ovom procesu čestice raspršene u tekućini sporo miješaju i spajaju u veće pahuljice, koje se talože zbog veće gustoće. Proces se aktivira ulaganjem sredstva za pahuljenje (flokulanta): bentonita, gline, aktivnog ugljena u prahu, sintetičkih flokulanata. Prije nego se doda neko od navedenih sredstava potrebno je ispitati vodu i procese kako bi se znalo odrediti koje se sredstvo i u kojoj količini dodati [5]. Na brzinu kojom se stvaraju pahuljice kao i na njihovu veličinu utječe temperatura. Tako se smatra da je temperatura od 15 °C do 20 °C optimalna, odnosno da se pri toj temperaturi pahuljenje odvija povoljno, dok su na temperaturi manjoj od 10 °C pahuljice daleko manje. Brzini nastajanja pahuljica iznimno mogu pripomoci organski polimeri (tzv. polielektroliti). Oksidacija i redukcija se koriste za uklanjanje različitih onečišćenja poput uklanjanja boje i mirisa, pretvorbu cijanida u manje opasne spojeve. Važna uloga oksidacije i redukcije je uklanjanje iona teških metala iz vode. Najčešće se primjenjuje za uklanjanje željeza i mangana iz vode, ali je vrlo uspješna i za uklanjanje kromovih iona [5].

#### 4.4 Kombinirano pro ištavanje otpadnih voda

Vrlo često se uspješno pro ištavanje otpadne vode ne može provesti samo jednim od navedenih načina pro ištavanja. Stoga se radi kombinacija postupaka, najčešće kombinacija fizikalnih i kemijskih metoda (slika 5). U ovakve postupke ubrajaju se membranski procesi, ultrafiltracija, ionska izmjena i adsorpcija.

Membranski procesi baziraju se na primjeni polupropusnih membrana koje propuštaju vodu i neke otopljene tvari, ali ne propuštaju tvari koje je potrebno ukloniti iz otpadne vode. Membranski procesi su relativno novi postupci. Pro ištavanje se provodi na način da se djelovanjem tlaka voda propušta kroz membranu koja djeluje kao prepreka. Otvori membrana su obično 0,1 do 20 μm. Kada se promjeri membrane smanjuju ispod 0,1 μm radi se o ultrafiltraciji. Manji otvori koriste se za uklanjanje koloidnih čestica.

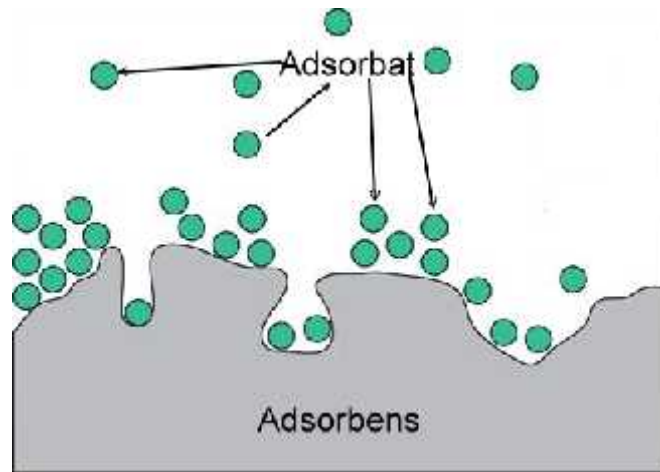
Ionska izmjena se najviše koristi za pripremu vode za ljudsku potrošnju iako se vrlo uspješno može koristiti za uklanjanje nekih onečišćenja iz otpadnih voda. Obično se to odnosi na uklanjanje iona teških metala. Sama ionska izmjena bazira se na izmjeni iona ionskog izmjenjivača i iona otopljenih u vodi. Ionski izmjenjivač na svoju strukturu veže ione iz otpadne vode i istovremeno otpušta jednak ekvivalent iona iz svoje strukture. Ovo je jedan od jednostavnijih i jeftinijih načina pro ištavanja [8].



Slika 5. Prikaz kombiniranog na ina pro iš avanja otpadnih voda [10]

#### 4.4.1 Adsorpcija

Adsorpcija je proces pri kojem se na površini krute tvari (adsorbensa) nakuplja neka plinovita ili tekuća tvar (adsorbat) (slika 6). Iako se ova pojava događa na granici površini krute i tekuće (ili plinovite) faze, njezini efekti izraženi su samo na tvarima koje su porozne.



Slika 6. Prikaz adsorpcije [11]

Adsorpcija je metoda koja se vrlo uspješno koristi za uklanjanje različitih onečišćenja iz otpadnih voda. Stoga je jedna od najčešće primjenjivanih i najekonomičnijih metoda za pročišćavanje otpadnih voda.

Neke prednosti adsorpcije nad ostalim metodama su [5]:

- mogu se ukloniti organska i anorganska onečišćenja iz vode do vrlo malih koncentracija,
- jednostavna i sigurna metoda,
- može se provoditi kontinuirano i diskontinuirano,
- nema nastanka mulja,
- postoji mogućnost regeneracije i ponovne upotrebe adsorbensa.

Uklanjanje onečišćenih tvari bazira se na tome da se molekule ili ioni koji čine onečišćenje vežu na površinu adsorbensa. Vežanje je moguće kemijskim ili van der Waalsovima silama.

Prema načinu vežanja razlikuju se [12]:

- fizikalna adsorpcija i
- kemijska ili kemisorpcija.

Pri fizikalnoj adsorpciji, adsorbat (tvar koja čini onečišćenje u otpadnoj vodi) se veže slabim međumolekulskim, van der Waalsovima silama na površinu adsorbensa. Budući da je vežanje slabim vezama, adsorbat se vrlo lako može desorbirati, odnosno otpustiti s površine adsorbensa. Tome u prilog ide činjenica da se prilikom fizikalne adsorpcije ne mijenja kemijska struktura adsorbata te da je vežanje obično u više slojeva. Tvari koje se vežu na površinu ne mijenjaju svoju strukturu [13]. Na fizikalnu adsorpciju upućuje relativno niska entalpija adsorpcije (20 do 40 kJ/mol) te joj pogoduju niže temperature [12].

Kod kemisorpcije se adsorbat veže za adsorbens jakim, obično kovalentnim vezama, stoga je desorpcija, odnosno otpuštanje adsorbensa nemoguće ili vrlo teško (u ekstremnim uvjetima). Kemisorpcija je karakterizirana velikom entalpijom (50 do 500 kJ/mol) i može se odvijati pri svim temperaturama. U tablici 2 prikazana je razlika između kemisorpcije i fizikalne adsorpcije.

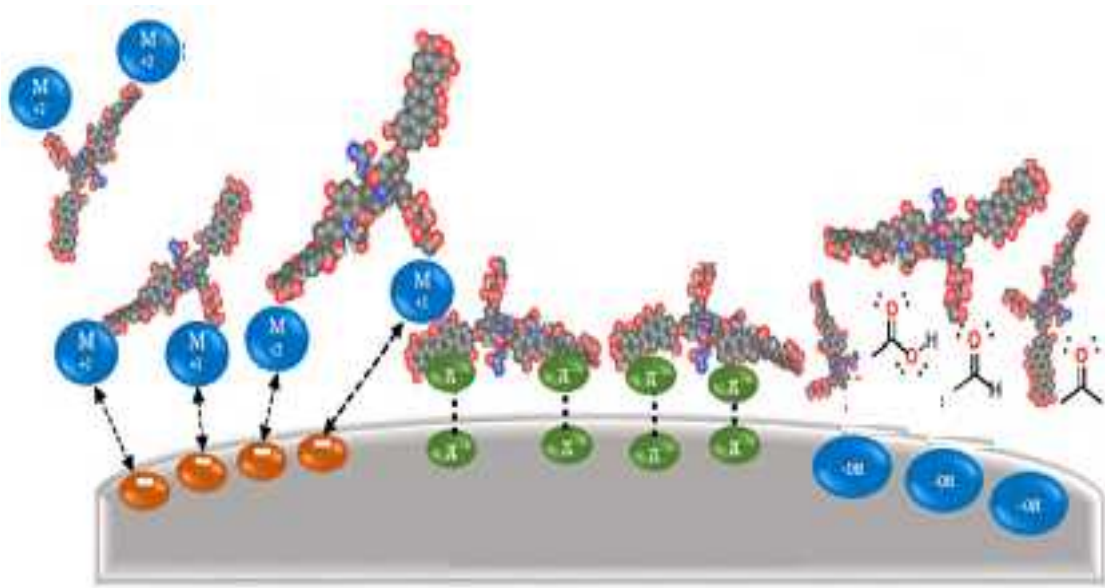
Tablica 2. Osnovne razlike između fizikalne i kemijske adsorpcije [14]

<b>FIZIKALNA ADSORPCIJA</b>	<b>KEMIJSKA ADSORPCIJA</b>
Niska entalpija adsorpcije (u rasponu 20 – 40 kJ/mol)	Visoka entalpija 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

Međutim, uspješnost adsorpcije ne ovisi samo o tome hoće li se adsorbat vezati fizikalno ili kemijski na adsorbens. Mogućnost adsorpcije ovisi o [12]:

- prirodi, površini i promjeru čestica adsorbensa,
- masi adsorbensa,
- volumenu adsorbata,
- koncentraciji adsorbata,
- temperaturi,
- pH vrijednosti,
- prisutnosti drugih iona u otpadnoj vodi.

Već je ranije spomenuto da je adsorpcija moguća samo na poroznim materijalima. To znači da veliku ulogu u procesu adsorpcije imaju specifična površina, promjer i veličina pora. Generalno se može reći da je kapacitet adsorpcije proporcionalan njegovoj specifičnoj površini. Osim poroznosti adsorbensa od izuzetne važnosti je i kemija površine adsorbensa. Na površini adsorbensa nalaze se tzv. funkcionalne (aktivne) grupe. To su obično organske grupe (karboksilne, ketonske, hidroksilne, aldehidne itd.) preko kojih se odvija adsorpcija (slika 7). Kao i kod površine i u ovom slučaju vrijedi isto pravilo: kapacitet adsorpcije je veći što je više aktivnih grupa.



Slika 7. Prikaz interakcije metalnih iona s funkcionalnim grupama [15]

Da bi adsorpcija bila uspješnija svakako pažnju treba obratiti i na promjer estica adsorbensa. Adsorpcija će biti bolja što su estice adsorbensa manjeg promjera. Isto tako i masa adsorbensa je značajna u procesu adsorpcije. Da bi se proces uspješno odvijao treba osigurati i dovoljnu masu adsorbensa. Kontaktom adsorbensa i adsorbata dolazi do vezanja adsorbata na površinu adsorbensa. Ako je adsorbensa količina dovoljno uz sve gore spomenuto osigurati će se dovoljno potencijalnih mjesta za vezanje adsorbata, odnosno tvari koje je potrebno ukloniti iz otpadne vode.

Međutim, nije dovoljno samo osigurati dobar adsorbens. Da bi proširavanje otpadne vode bilo dobro, odnosno da bi se osigurala uspješna adsorpcija svakako treba brinuti o koncentraciji one tvari u otpadnoj vodi kao i volumenu vode. Volumen, a samim time i koncentracija neželjenih tvari u otpadnoj vodi mora biti tolika da adsorbens može na svoju površinu adsorbirati neželjene tvari. Naime pri previsokim koncentracijama one tvari u jednom trenutku na adsorbensu se popune sva slobodna mjesta te adsorpcija prestaje ili se, ovisno o načinu vezanja adsorbens-adsorbat, događa desorpcija. Ova pojava je neželjena i može se izbjeći na način da se odredi kada nastupa ravnoteža ili da se nakon prestanka adsorpcije ili nastanka desorpcije „potrošeni“ adsorbens zamjeni novim.

Generalno se može reći da povećanje temperature povoljno utječe na veličinu broja kemijskih procesa. No ne mora uvijek biti tako. Kada se govori o adsorpcijskim procesima različita istraživanja su pokazala da u nekim slučajevima temperatura znatno ubrzava adsorpciju, dok kod nekih usporava ili uopće nema utjecaj [16]. Djelovanje temperature ne može se generalizirati samim time što utjecaj temperature ovisi i o adsorbensu i o adsorbatu, ali i o njihovom načinu vezanja.

Uinkovitost proširavanja otpadne vode adsorpcijom, kao i kod svih drugih adsorpcijskih procesa ovisi o pH. Promjenom pH mijenja se valencija iona u otpadnoj vodi (npr.  $\text{Cr}^{3+}$  i  $\text{Cr}^{6+}$  ili  $\text{As}^{3+}$  i  $\text{As}^{5+}$ ) što može različito utjecati na adsorpcijski kapacitet. Isto tako se mijenja i površina adsorbensa što također utječe na kapacitet adsorpcije. Optimalna pH vrijednost, odnosno pH vrijednost kod koje je najviši kapacitet adsorpcije ovisi o vrsti one tvari koje se uklanja, ali i o vrsti adsorbensa.

Poznato je da u otpadnoj vodi ne postoje samo one tvari koje je potrebno ukloniti već i ioni kalcija i magnezija, odnosno otopljene soli koje čine tvrdoću vode. Ovi ioni smatraju

se „stranim ionima“ te u procesu adsorpcije mogu imati značajnu ulogu. Vrlo često se mogu „natjecati“ s ionima one iše i umjesto njih adsorbirati na površinu adsorbensa. Na taj način u većoj ili manjoj mjeri popunjavaju slobodna mjesta na površini adsorbensa što onemogućuje dobro uklanjanje one iše iz otpadne vode [16].

Adsorpcija se može opisati kao proces koji se odvija u nekoliko koraka [16]:

- transport adsorbata kroz otopinu,
- difuzija adsorbata preko tekućeg filma koji okružuje česticu adsorbensa,
- difuzija adsorbata do pora i kroz pore adsorbensa (međustani difuzija) i
- adsorpcija i desorpcija adsorbata s površine adsorbensa.

Navedena četiri koraka se odvijaju do trenutka dok se ne uspostavi adsorpcijska ravnoteža. Stanje ravnoteže se koristi za istraživanja vezana uz proces adsorpcije. Za to obično služe ravnotežni, kinetički i termodinamički modeli. Upotrebom različitih modela i izražavanjem njihovih konstanti mogu se dobiti informacije o interakcijama između adsorbensa i adsorbata. Najčešći model koji se koristi je ravnotežni model, model adsorpcijskih izoterma. Adsorpcijska izoterma predstavlja odnos između adsorbirane količine adsorbensa na adsorbentu ( $q_e$ ) (kapacitet ravnoteže) i ravnotežne koncentracije  $c_e$  (koncentracije adsorbata koji ostane neadsorbiran nakon uspostavljanja ravnoteže). Kapacitet ravnoteže izražava se sljedećom jednačinom [16]:

$$q_e = \frac{c_0 - c_e}{m} \cdot V$$

gdje je:

$q_e$  – ravnotežni adsorpcijski kapacitet (mg/g),

$c_0$  – početna masena koncentracija metalnih kationa u otopini (mg/l),

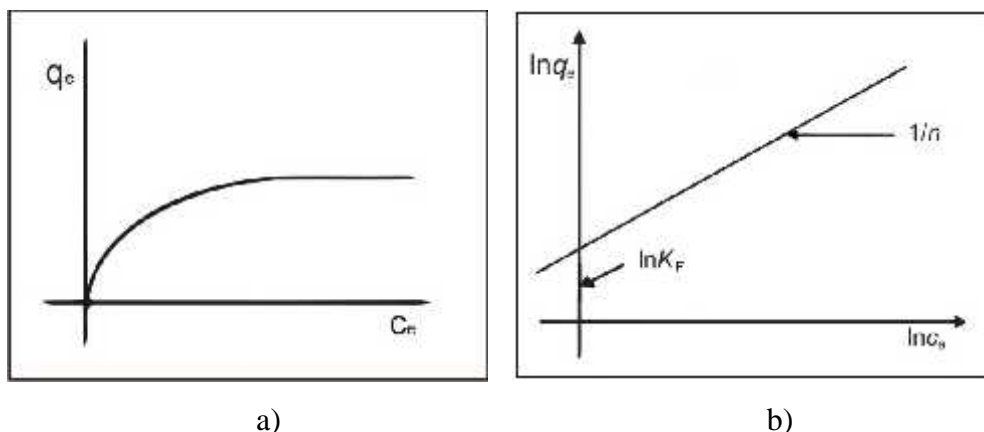
$c_e$  – ravnotežna koncentracija metalnih kationa u otopini (mg/l),

$m$  – masa adsorbensa (g),

$V$  – volumen otopine (l).

Za opis ravnotežnih adsorpcijskih podataka koristi se čitav niz adsorpcijskih izoterma poput Freundlichove, Langmuirove, Dubinin - Radushkevicheve, Temkinove, Hillove, Flory - Hugsonove, Redlich - Petersonove, Sipsove, Tothove, Koble - Corriganove, Khanove itd. Od svih navedenih izoterma najčešće se koriste Freundlichova i Langmuirova izoterma. Uostalom njihova primjena je između ostalog zbog mogućnosti korištenja velikog broja podataka, jednostavne jednačine kao i jednostavnost procjene parametara ovih izoterma. Vrlo lako se mogu transformirati u linearni oblik što daje mogućnost relativno jednostavne grafičke obrade podataka.

Freundlichova adsorpcijska izoterma (slika 8) obično dobro opisuje sustav adsorbens-adsorbat u kojem se odvija fizikalna adsorpcija, odnosno adsorpcija u više slojeva. Ovaj tip izoterme također bolje opisuje ravnotežno stanje sustava u kojima adsorbens ima heterogenu površinu.



Slika 8. Grafi ki prikaz Freundlichove adsorpcijske izoterme:  
a) op i oblik, b) linearni oblik [17]

Linearni oblik Freundlichove adsorpcijske izoterme koristi se za grafi ki prikaz iz kojeg se ra unaju vrijednosti konstanti ( $K_F$  i  $n$ ) koje ukazuju na kapacitet i intenzitet adsorpcije i heterogenost površine [17]:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \cdot \ln c_e$$

$q_e$  - ravnotežni adsorpcijski kapacitet (mg/g),

$K_F$  - konstanta koja ukazuje na adsorpcijski kapacitet (mg/g),

$1/n$  – konstanta koja ukazuje na heterogenost površine i intenzitet adsorpcije,

$c_e$  - ravnotežna koncentracija metalnih kationa u otopini (mg/l).

Langmuirova adsorpcijska izoterma opisuje kemijsku adsorpciju, tj. adsorpciju na monomolekularnom sloju. Temelji se na dvjema pretpostavkama. Smatra se da se adsorbat može adsorbirati na površinu adsorbensa samo kada postoji prazno mjesto na adsorbensu, te da je ravnoteža uspostavljena kada se stvori monomolekularni sloj, odnosno kada je pokrivenost površine potpuna [17].

Linearno se Langmuirova izoterma može prikazati pomo u sljede e jednadžbe [17]:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L \cdot q_m \cdot c_e} + \frac{1}{q_m}$$

gdje je:

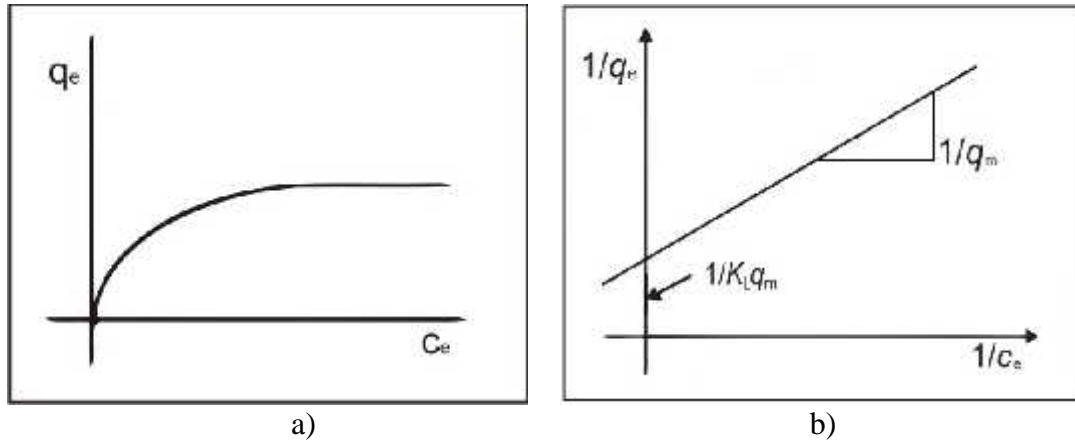
$q_e$  - ravnotežni adsorpcijski kapacitet (mg/g),

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

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

$K_L$  - Langmuirova konstanta.

Slika 9 prikazuje op i i linearni oblik Langmirove izoterme.



Slika 9. Grafi ki prikaz Langmuirove adsorpcijske izoterme:  
a) op i oblik, b) linearni oblik [17]

Kinetika adsorpcijskog procesa prikazuje se preko dva kineti ka modela od kojih se jedan difuzijski, a drugi reakcijski. Prema difuzijskom modelu adsorpcija se odvija u tri koraka: difuzijom preko teku eg filma, difuzijom u pore i kroz pore, tzv. me ustani na difuzija i adsorpcija i desorpcija izme u adsorbata i aktivnih mjesta.

Adsorpcijski reakcijski modeli su nešto jednostavniji i ne uzimaju u obzir pojedina ne korake. Kinetika se u ovom slu aju prikazuju preko modela pseudo-prvog reda (Lagergrenov model), pseudo-drugog reda (Hoov model) i preko Elovicheve jednadžbe [18].

Model pseudo-prvog reda opisuje brzinu adsorpcije koja je proporcionalna broju slobodnih mjesta za vezanje adorbata na površini adsorbensa. Model pseudo-drugog reda je zasnovan na pretpostavci da se adsorpcija temelji na kemisorpciji drugog reda. Navedeni modeli su prikazani sljede im jednadžbama [18]:

I red: 
$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t$$

II red: 
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

gdje je:

$q_e$  – ravnotežni adsorpcijski kapacitet (mg/g),

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

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

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

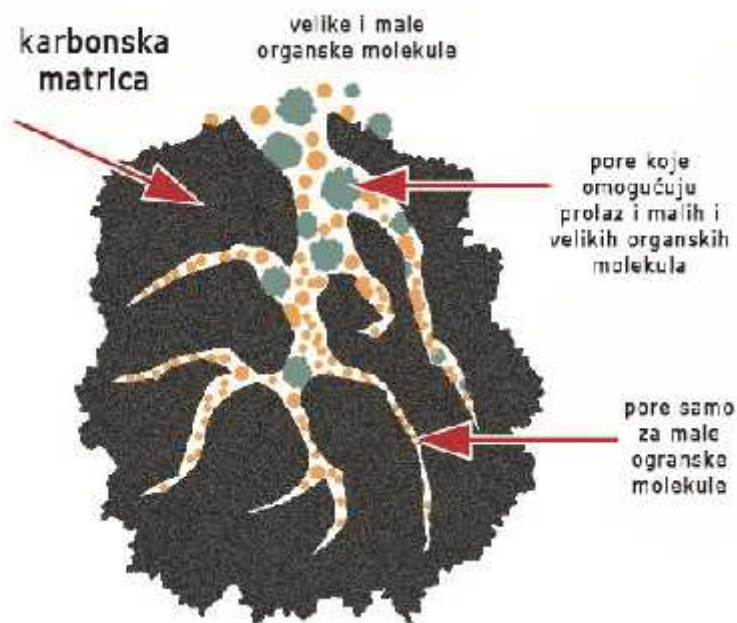
t – vrijeme (min).

#### 4.4.1.1 Adsorbensi

Ve je ranije spomenuto da su adsorbensi vrste tvari na kojima se odvija adsorpcija. Najpoznatiji adsorbens koji je u komercijalnoj upotrebi je *aktivni ugljen*. To je jedan od naj eš e korištenih adsorbensa zbog svog velikog kapaciteta adsorpcije koji je rezultat velike specifi ne površine. Obi no se površina aktivnog ugljena kre e i do 1500 m<sup>2</sup>/g.



Osim velike specifične površine aktivni ugljen karakterizira i veliki broj funkcionalnih grupa na njegovoj površini kao i velika unutarnja mikroporoznost. Aktivni ugljen nije tvar koja se može pronaći u prirodi već se dobiva postupkom aktivacije. Kao sirovina za proizvodnju aktivnog ugljena obično se koriste materijali na bazi ugljika. Ovisno o polaznoj sirovini postupkom aktivacije dobiva se porozna struktura koja se sastoji od mikro, mezo i makropora. Aktivni ugljen obično sadrži i do 95 % mikropora (promjer < 2 nm). Kroz njih se odvija adsorpcija bez kapilarne kondenzacije. Mezoporama (promjer 2 do 50 nm) se odvija adsorpcija kapilarnom kondenzacijom i služe adsorbatu kao transportni put prema mikroporama. Makropore (promjer > 50 nm) služe kao transportni put prema mikro i mezoporama (slika 10).

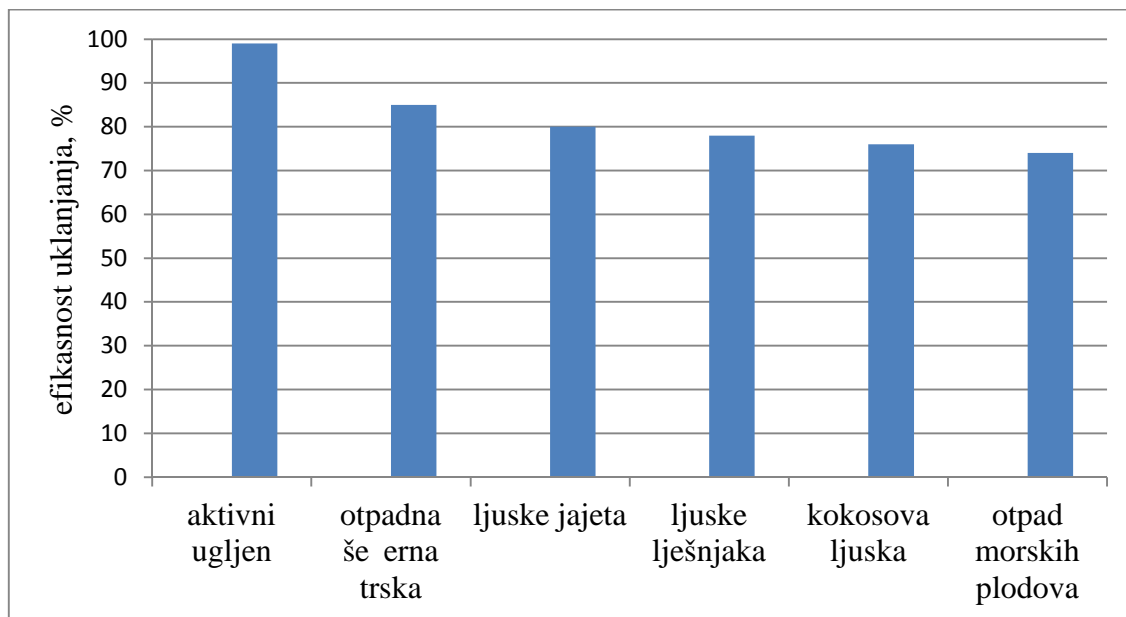


Slika 10. Prikaz pora na aktivnom ugljenu [15]

Postupak aktivacije je značajan i zbog funkcionalnih grupa. Naime tijekom aktivacije heteroatomi poput kisika, dušika, sumpora, fosfora, vodika i sl. reagiraju sa ugljikovim atomima na krajevima aromatskog prstena stvarajući različite funkcionalne grupe. Struktura površine aktivnog ugljena ovisi o postupku aktivacije, ali i o vrsti i sastavu polazne sirovine. Sam postupak aktivacije je dosta skup stoga je i cijena aktivnog ugljena visoka. Unatož tome to je i dalje jedan od najčešće korištenih adsorbensa za pročišćavanje otpadnih voda zbog svog velikog kapaciteta adsorpcije prema različitim onečišćujućima [19].

Uz aktivni ugljen danas se kao adsorbensi vrlo često koriste i *zeoliti*. To su hidratizirani alumosilikati koje karakterizira trodimenzionalna struktura. Karakterizira ih umrežena struktura sa šupljinama koje su međusobno povezane kanalima. Pokazali su se jako dobrim adsorbensima za pročišćavanje otpadnih voda budući da imaju površinski negativni naboj alumosilikatne strukture koji nastaje zbog izomorfne zamjene  $\text{Si}^{4+}$  sa  $\text{Al}^{3+}$ , a kompenziran je alkalijskim i zemnoalkalijskim kationima koji se mogu izmijeniti sa ionima koji su u kontaktu sa zeolitima [20]. Jedan od najrasprostranjenijih prirodnih zeolita koji je intenzivno ispitivan i primjenjivan je klinoptilolit [21]. Prema literaturnim podacima [22] zeoliti se dosta istražuju, ali njihova primjena u praksi nije velika.

Obzirom na gore navedeno, sve više se istražuju druge tvari koje bi se mogle pokazati kao dobri adsorbensi. Obično su to otpadi ili nusprodukti različitih industrija. Tako se u posljednje vrijeme istražuje agrikulturni otpad (ljuske kokosa, lješnjaka, oraha, badema, rižine ljuske, kore agruma i sl.), otpad drvne industrije (kora, lišće, piljevina i sl.). Kora drveta je bogata taninom koji predstavlja aktivnu grupu koja sudjeluje u procesu adsorpcije. Navedena vrsta otpada pokazala se kao dobar adsorbens za uklanjanje teških metala iz otpadnih voda [23]. Na slici 11 prikazana je efikasnost nekih agrikulturnih adsorbensa.



Slika 11. Efikasnost nekih agrikulturnih adsorbensa [24]

esto se kao adsorbens koristi i mrtva biomasa bakterija i/ili plijesni. Ovim adsorbensima je moguće ukloniti i organska i anorganska onečišćenja [25, 26].

Osim navedenog, istraživanja idu u smjeru primjene metalurškog otpada kao potencijalnog adsorbensa. Istraživanja su pokazala da je moguće uklanjanje iona teških metala poput kroma i nikla pomoću anodne prašine, troske, otpadne kalupne mješavine i sl. [27, 28].

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovi obrađene literature moguće je zaključiti sljedeće:

- Pročišćavanje otpadne vode provodi se s ciljem smanjenja onečišćenja do te mjere da pročišćena otpadna voda koja se ispušta u prijemnik ne predstavlja nikakvu opasnost za okoliš i život u njemu.
- Obrada otpadne vode provodi se primarnim, sekundarnim i tercijarnim načinom pročišćavanja, a ponekad i kombinacijom ovih načina.
- Jedna od najučinkovitijih metoda pročišćavanja otpadne vode je adsorpcija.
- Adsorpcija predstavlja uklanjanje otpadnih tvari njihovim fizikalnim ili kemijskim vezanjem na površinu adsorbensa.
- Najefikasniji i najučinkovitije korišteni adsorbens za pročišćavanje otpadnih voda je aktivni ugljen.
- Osim aktivnog ugljena moguće je korištenje drugih komercijalnih adsorbensa poput zeolita, ali i nekih otpadnih materijala iz različitih grana industrije.

## 6. LITEATURA

- [1] P. A. Cox, Inorganic Chemistry, BIOS Scientific Publishers, New York, 2004.
- [2] F. N. Kemmer, Nalkov priručnik za vodu, Jugoslavenska istraživačka akademija, Beograd, 2005.
- [3] I. Filipović, S. Lipanović, Opća i anorganska kemija, Školska knjiga Zagreb, 1995.
- [4] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=46567>, 16. 4. 2020.
- [5] B. Tušar, Pročišćavanje otpadnih voda, Kigen d.o.o., Zagreb 2009.
- [6] A. Višekruna, Tehnologija vode i obrada otpadnih voda, Agronomski i prehrambeno tehnološki fakultet, Mostar, 2017.
- [7] <http://ec.europa.eu/eurostat/>, 30. 3. 2020.
- [8] D. L. Russell, Practical wastewater treatment, Wiley-Interscience, New Jersey, 2006.
- [9] G. Pašalić, M. Mužinić, S. Novak Mujanović, K. Čović, I. Fornažar, D. Ananić, Studija o utjecaju na okoliš, Rekonstrukcija/dogradnja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Velika Gorica s pripadajućim sustavom odvodnje, IPZ Uniprojekt MCF, Zagreb, 2015.
- [10] [https://www.pinterest.com/chrissy\\_mcgaughey/waste-water/](https://www.pinterest.com/chrissy_mcgaughey/waste-water/), 30. 3. 2020.
- [11] <https://www.liberaldictionary.com/adsorption/adsorption-definition-causes-examples-chemistry-study-material/>, 2.4.2020.
- [12] B. Crittenden, W. J. Thomas, Adsorption Technology and Design, Butterworth – Heineman, Oxford, 1998.
- [13] S. Rozgaj, A. Glasnović, Tehnološke operacije, Profil, Zagreb, 2007.
- [14] <http://www.emedicalprep.com/study-material/chemistry/comparison-physisorption-chemisorption.html>, 8. 3. 2020.
- [15] <http://sarah2012uiudb.changeip.com/content?query=Activated+carbon+adsorption+mechanism+of+labor>, 1. 4. 2020.
- [16] F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. Sing, Adsorption by Powders and Porous Solids, Academic Press, London, 1999.
- [17] B. Volesky, Sorption and Biosorption, BV-sorbex, Inc, St Lambert, Quebec, 2004.
- [18] D. Do. Duond, Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics, Imperial College Press, London, 1998.
- [19] R. C. Bansal, M. Goyal, Activated Carbon Adsorption, Taylor&Francis Group, London, 2005.
- [20] B. Vojnović, K. Margeta, M. Šiljeg, Š. Cerjan Stefanović, Lj. Bokić, Primjena prirodnih zeolita u zaštiti okoliša, Sigurnost, 55(2013)3, 209-218.
- [21] S. D. Matijašević, A. S. Daković, D. A. Ileš, S. Z. Milićević, Adsorpcija uranil-jona na modificiranim klinoptilolitima, Hemijska industrija, 63(2009)5, 407–414.
- [22] M. Rožić, Z. Bolančić, Š. Cerjan-Stefanović, Prirodni zeoliti i mogućnost njihove primjene u kontroli polutanata grafičke industrije, Kemija u industriji, 53 (2004)10, 449-458.
- [23] A. Višekruna, A. Štrkalj, Lj. Marinić-Pajc, The use of Low Cost Adsorbents for Purification Wastewater, The Holistic Approach to Environment, 1(2011)1, 29-37.
- [24] G. Islamuddin, M. A. Khalid, S. A. Ahmad, Study of eco-friendly agricultural wastes as non-conventional low cost adsorbents: A review, Ukrainian Journal of Ecology, 9 (2019)1, 68-75.
- [25] R. K. Mohapatra, P. K. Parhi, S. Pandey, B. K. Bindhani, H. Thatoi, C. R. Panda, Active and passive biosorption of Pb(II) using live and dead biomass of marine bacterium *Bacillus xiamenensis* PbRPSD202: Kinetics and isotherm studies, Journal of Ecology Management, 247(2019)1, 121-134.

- [26] A. N. Salvi, S. Chattopadhyay, Biosorption of Azo dyes by spent *Rhizopus arrhizus* biomass, *Applied Water Science*, 7(2017), 3041–3054.
- [27] I. Šipuš, A. Štrkalj, Z. Glavaš, Removal of Cr (VI) ions from aqueous solution using foundry waste material: Kinetic and equilibrium studies, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(2012)4, 413-418.
- [28] Z. Glavaš, A. Štrkalj, Waste metallurgical materials – potential adsorbents for removal Cr<sup>6+</sup>, *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 6(2013)1, 81-84.

# ŽIVOTOPIS

## OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Uršula Apalovi

Datum i mjesto rođenja: 16. lipnja 1996., Sisak

Telefon: 0981317550

E-mail: [apalovicursula@gmail.com](mailto:apalovicursula@gmail.com)

## OBRAZOVANJE:

Osnovna škola: Osnovna škola „Braća Ribar“, Sisak

Srednja škola: Ekonomska škola, Sisak,

Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

## VJEŠTINE:

Rad na računaru: Microsoft Office, AutoCAD

Strani jezik: Engleski

Vozački ispit – B kategorija