

Bioremedijacija otpadne vode koksne industrije

Coban, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:655349>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
PREDDIPLOMSKI STUDIJ EKOINŽENJERSTVO

Ana Coban

**BIOREMEDIJACIJA OTPADNE VODE KOKSNE
INDUSTRIJE**

Završni rad

Zagreb, travanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Ana Coban

Predala je izrađen završni rad dana: 24. travnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Dajana Kučić Grgić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Lidija Furač, viša predavačica, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Martina Miloloža, asistentica, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Matija Cvetnić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 29. travnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
PREDDIPLOMSKI STUDIJ EKOINŽENJERSTVO

Ana Coban

**BIOREMEDIJACIJA OTPADNE VODE KOKSNE
INDUSTRIJE**

Završni rad

Mentor: izv.prof.dr.sc. Dajana Kučić Grgić

Članovi komisije:

izv.prof.dr.sc. Dajana Kučić Grgić

dr.sc. Lidiya Furač

dr.sc. Martina Miloloža

Zamjena: doc.dr.sc. Matija Cvetnić

Zagreb, travanj 2024.

SAŽETAK

Kokсна industrija pripada u skupinu industrija koje u velikim razmjerima onečišćuju okoliš. Zbog svog izrazito složenog sastava i širokog raspona varijacija komponenata, obrada otpadnih koksnih voda nije jednostavna. Niti jedan proces obrade ne može se provesti samostalno, a da rezultira zadovoljavajućim stupnjem pročišćenosti. Zbog toga se uvijek koriste kombinirani postupci, započevši od fizikalno-kemijske obrade, do biološke, na koju se danas sve više istraživanja okreće zbog svog velikog stupnja isplativosti. Bioremedijacija temeljena na mikroorganizmima je održiva obrada s dobrom izvedbom, niskim troškovima održavanja i izvrsnom selektivnošću. Odabir odgovarajućih sojeva mikroorganizama ključan je u bioremedijaciji, te s dostupnim širokim rasponom algi, gljiva i bakterija proces se može prilagoditi koksnim vodama različitih svojstava. U ovom radu biti će dan način nastanka otpadnih koksnih voda, popis njihovih svojstava, kao i glavnih onečišćujućih tvari koje su u njima prisutne. Opisati će se načini obrade koksnih voda s naglaskom na biološki način obrade, pri čemu će biti poseban osvrt na bioremedijaciju gljivama, bakterijama i algama.

Ključne riječi: Kokсна industrija; Otpadne vode; Bioremedijacija

ABSTRACT

The coke industry belongs to the group of industries that pollute the environment on a large scale. Due to its extremely complex composition and wide range of component variations, the treatment of waste coke water is not simple. No treatment process can be carried out independently without resulting in a satisfactory degree of purification. For this reason, combined procedures are always used, starting from physio-chemical processing, to biological, to which more and more research is turning today due to its high degree of profitability. Microorganism-based bioremediation is a sustainable treatment with good performance, low maintenance costs and excellent selectivity. The selection of appropriate strains of microorganisms is crucial in bioremediation, and with a wide range of algae, fungi and bacteria available, the process can be adapted to coking waters of different properties.

This paper will present the method of generation of waste coke water, a list of their properties, as well as the main pollutants present in them. Methods of coke water treatment will be described with an emphasis on biological treatment method, with a special focus on bioremediation with fungi, bacteria and algae.

Keywords: Coke industry; Wastewater; Bioremediation

SADRŽAJ

1	UVOD.....	6
2	VODA.....	7
2.1	Prirodne vode	7
2.2	Otpadne vode	7
2.3	Industrijske otpadne vode	8
3	KOKSNE OTPADNE VODE	11
3.1	Dobivanje koksnih otpadnih voda	12
3.2	Svojstva koksnih otpadnih voda	13
3.2.1	Fenoli	15
3.2.2	Cijanidi	16
3.2.3	Amonijak.....	16
3.2.4	Tiocijanat.....	17
3.3	Utjecaj na okoliš.....	18
3.4	Pročišćavanje koksnih voda	19
3.4.1	Fizikalno – kemijska obrada	22
3.4.2	Napredni procesi obrade	23
3.4.3	Biološka obrada	25
3.4.4	Kombinacijski / hibrid procesi	26
3.5	BIOREMEDIJACIJA	27
3.5.1	Bioremedijacija gljivama	27
3.5.2	Bioremedijacija bakterijama.....	29
3.5.3	Bioremedijacija algama.....	31
3.5.4	Zajednica algi i bakterija za pročišćavanje otpadnih voda.....	32
4	ZAKLJUČAK	34
5	LITERATURA.....	35

1 UVOD

Voda je osnova života na Zemlji. Trenutno vlada velika zabrinutost za kakvoću i dostupnost vode, kao posljedica onečišćujućih tvari ispuštenih u okoliš, prekomjerne potrošnje vode i nepravilnog zbrinjavanja onečišćene vode, primarno i većinski posljedično ljudskom djelatnosti.¹ Primjer takvih onečišćenih otpadnih voda su industrijske koksne otpadne vode, koje svojim izravnim ili neizravnim unošenjem u okoliš predstavljaju rizik za kvalitetu života, ljudsko zdravlje, kakvoću vodenih ekosustava ili kopnenih ekosustava te poremećuju značajke okoliša, stoga ih je potrebno pravilno zbrinuti i pročistiti prije ispuštanja u okoliš.² Vodama je potrebno upravljati prema načelu održivog razvoja kojim se zadovoljavaju potrebe sadašnjice, a također osigurava pravo i mogućnost budućih generacija na isto.³ Otpadne vode koksne industrije nastaju tijekom procesa povrata topline gašenja koksa, pročišćavanja plina iz koksne peći i uporabe derivata ugljena. Toksični spojevi prisutni u takvim vodama skloni su bioakumulaciji u ekosustavu, zbog čega je izrazito važno pravovremeno i prikladno zbrinjavanje.

U ovom radu će se pobliže opisati svojstva prisutnih toksičnih komponenta (poput policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH), fenolnih spojeva, heterocikličkih spojeva, tiocijanata, amonijaka i cijanida) u koksni vodama te postupci koji se primjenjuju za uklanjanje navedenih onečišćujućih tvari, s naglaskom na biološke načine obrade. Jedan od postupaka koji se sve više istražuje u današnje vrijeme je bioremedijacija, u kojoj se koriste organizmi, poput alga, gljiva i bakterija, za razgradnju opasnih vrsta u manje toksične ili neotrovne tvari.⁴ Temelj uspješnosti bioremedijacije otpadnih koksni voda jest sposobnost preživljavanja i napredovanja prisutnih mikroorganizama namijenjenih za razgradnju prisutnih onečišćujućih tvari. Bioremedijacija bit će učinkovitija s dobrim poznavanjem karakteristika otpadne koksne vode i radnim parametrima, poput temperature, pH, količine otopljenog kisika, toksičnosti i dostupnosti kisika, zbog čega odabrani mikroorganizmi moraju biti u stanju izdržati procesne uvjete. Svaka kultura mikroorganizama ima svojih prednosti i nedostataka u razgradnji toksičnih spojeva, no zbog složenog sastava tih otpadnih voda najučinkovitije se pokazuju zajednice različitih gljiva, bakterija ili algi.⁵

2 VODA

2.1 PRIRODNE VODE

Hidrosfera ili vodeni omotač Zemlje obuhvaća 71% ukupne Zemljine površine. Ona uključuje podzemnu i površinsku tekuću vodu, ledenjake na površini i vodenu paru u atmosferi. Oceani sačinjavaju 98 % hidrosfere. Kemijski sastav prirodne vode može proizaći iz mnogo različitih izvora otopljenih tvari, poput plinova i aerosola iz atmosfere, erozije stijena i tla, reakcija koje se odvijaju ispod površine zemlje i kao posljedica ljudskih aktivnosti. Temeljni podaci koji se koriste u određivanju kakvoće vode dobivaju se kemijskom analizom uzoraka vode u laboratoriju ili uzorkovanjem kemijskih svojstava na licu mjesta na terenu.⁶

Voda u prirodi neprestano cirkulira, kreće se s jednog mjesta na drugo te mijenja agregatna stanja iz jedno u drugo. Voda u atmosferi otapa prisutne plinove te u sebe unosi suspendirane čestice, poput prašine i dima, nakon čega takva voda promijenjenog sastava i svojstava u obliku oborina ili kondenzacijom dopijeva na tlo, bilo u površinske ili u podzemne vode.⁷ Optjecanjem u sebi sakuplja čestice stijena, otopljene minerale i mikroorganizme. Pod utjecajem Sunčevog zračenja isparava nazad u atmosferu i tako zatvara ciklus kruženja vode, nazvan još i hidrološki ciklus.⁸

2.2 OTPADNE VODE

Dolaskom onečišćujuće tvari u hidrološki ciklus vode, narušava se prirodna ravnoteža i zdravlje okoliša.⁹ Otpadne vode nastaju korištenjem slatkovodne ili slanovodne vode te sirove ili pitke vode u raznovrsnim procesima u industriji ili kućanstvu.¹⁰ Sastoje se od tekućeg otpada otopljenog u vodi ili suspenziji čvrstog otpada u vodi, a sadrže različite tvari u ovisnosti o načinu njihovog nastanka. Neke prisutne onečišćujuće tvari su teški metali, patogeni mikroorganizmi, ulja i masti, fenolni spojevi, cijanidi, tiocijanati, benzen i njegovi derivati, policiklički aromatski ugljikovodici (PAH) i dr. Najveći rizik predstavljaju upravo prisutni organski spojevi. Njihova prisutnost prikazuje se preko kemijske potrošnje kisika (KPK) i biokemijske potrošnje kisika (BPK). KPK je mjera kisikovog ekvivalenta sadržaja organskih tvari u uzorku koje su podložne oksidaciji jakim kemijskim oksidansima (pr. permanganatom). Izražava se u mg O₂/L vode. BPK jest količina kisika potrebna za biološku razgradnju organskih tvari djelovanjem mikroorganizama pri 20 °C, a izražava se isto kao i KPK, u mg O₂/L vode. Najčešće se koristi BPK₅, što znači da se analiza vode provodi tijekom pet dana.⁹ Još jedna važna karakteristika otpadnih voda jest pH otpadnih voda iz objekata i postrojenja, koji se kreće u intervalu 6,5 – 9,0 za površinske vode i 6,5 – 9,5 za sustav javne odvodnje.¹⁰

Općenito se otpadne vode mogu podijeliti na sanitarne, oborinske, industrijske i druge vode. Komunalne otpadne vode su otpadne vode sustava javne odvodnje, koje čine sanitarne otpadne vode ili otpadne vode koje su mješavina otpadnih voda iz institucija, kanalizacijskih otpadnih voda, procjednih voda te otpadnih voda iz septičke jame.¹¹ Otpadne vode nastale unutar industrijskih postrojenja su sve otpadne vode koje se ispuštaju iz prostora korištenih za obavljanje trgovine ili industrijske djelatnosti¹² Obuhvaćaju supernatante zgušnjivača i digestora, vodu od odvodnjavanja mulja, drenažnu vodu iz slojeva za sušenje mulja, filtracijsku vodu za pranje i vodu za čišćenje opreme.¹⁰ Neke vrste otpadnih voda ili potencijalno onečišćenih voda pobliže su opisane u nastavku:

- Industrijske ili tehnološke otpadne vode – vode koje nastaju u raznim industrijskim procesima, proizvodnim pogonima, ekskavaciji minerala, proizvodnji električne energije i obradi otpadnih voda¹³
- Rashladne vode – industrijske otpadne vode koje se koriste za odvođenje topline iz uređaja ili procesa te su potencijalni izvor toplinskog onečišćenja,¹⁴
- Procjedne vode – vode koje prodiraju kroz rude, sirovine, proizvode ili čisti otpad te na sebe navlače onečišćujuće tvari¹⁵
- Površinske optočne vode – vode koje se mogu onečistiti toksičnim tvarima prisutnima na površini tla kada višak kišnice, oborinskih voda ili drugih izvora ne može dovoljno brzo infiltrirati u tlo¹⁶
- Voda prisutna u urbanom optjecanju – voda koja se koristi za organizirana i propisana čišćenja vanjskih površina te navodnjavanje krajolika u gusto naseljenim područjima nastalim urbanizacijom¹⁷
- Poljoprivredne otpadne vode – vode nastale pri organiziranom obavljanju djelatnosti hortikulture, avakulture, stočarstva i dr.¹⁸

2.3 INDUSTRIJSKE OTPADNE VODE

Gospodarski i tehnološki razvoj značajno su utjecali na količinu nastalog otpada.¹⁹ Povećanjem proizvodnje i potražnje, povećava se potreba zadovoljavanja sve većih zahtjeva potrošača, što neizbježno vodi proizvodnji nepoželjnih produkata i otpada.^{1,20,21} Velika većina postproizvodnog otpada jest industrijski otpad, a samim time nastaju i industrijske otpadne vode.²²

Industrijske otpadne vode su sve otpadne vode, osim sanitarnih otpadnih voda i oborinskih voda, koje se ispuštaju iz prostora korištenih za obavljanje trgovine ili industrijske djelatnosti.^{8,9,12} Na njihov nastanak iznimno utječu proizvodni postupci i procesi.^{23,24} Svaki industrijski sektor proizvodi specifične onečišćujuće tvari, koje se mogu značajno razlikovati u svojim svojstvima i učinku na okoliš pri ispuštanju, stoga se obrada takvih voda mora temeljiti na karakteristikama odnosno vrsti proizvedenih onečišćujućih tvari.²⁵



Slika 1. Industrijska otpadna voda²⁶

Neke industrije koje su glavni proizvođači otpadnih voda su:

1) Industrije obrade metala²⁷

➤ Otpad proizveden od postupaka dorade metala obično je mulj koji sadrži metale otopljene u tekućini po općenitoj reakciji:

Metal + Hidroksidi (od kaustičnih elemenata) → Precipitati metalnih hidroksida (krutine).

Postupci obrade metala, dorade metala i proizvodnje tiskanih ploča (PCB) proizvode mnogo mulja koji sadrži metalne hidrokside kao što su željezni hidroksidi, magnezijevi hidroksidi, nikalni hidroksidi, cinkovi hidroksidi, bakreni hidroksidi i aluminijevi hidroksidi.^{28,29} Otpadne vode dorade metala moraju se pročišćavati u skladu sa svim važećim propisima budući da one predstavljaju rizik za okoliš i ljude/životinje.⁵⁴

2) Industrijske praonice³⁰

➤ Otpadna voda industrija komercijalnih tekstilnih usluga nastaje iz uniformi, ručnika, podnih prostirača i sličnog, a ispunjena je uljem i mastima, vlaknima, pijeskom, teškim metalima i hlapljivim organskim spojevima, koji moraju biti prikladno obrađene prije nego što se mogu pustiti.³¹

3) Kemijska proizvodnja

➤ Otpadne vode koje se ispuštaju u rafinerijama nafte i petrokemijskim postrojenjima uključuju konvencionalne onečišćujuće tvari poput ulja i masti, suspendirane čvrste

tvari, amonijak, krom, fenole i sulfide, kao i ostale potencijalno toksične tvari koje svojim dolaskom u okoliš nanose ogromne štete na zdravlje sveukupnog ekosustava.^{32,33,34,54}

4) Rudarstvo³⁵

➤ Produkt rudarenja mješavina je vode i fino mljevenog kamena koji je zaostao nakon rudarskih operacija nakon što se ukloni mineralni koncentrat – poput zlata ili srebra. Učinkovito postupanje s rudničkom produktom ključni je izazov s kojim se rudarske tvrtke suočavaju. Odgovarajuća rješenja za obradu mogu u eliminirati potrebu za jalovištima i tako dati priliku za smanjenje troškova transporta i odlaganja.^{36,54} Ogroman rizik za okoliš predstavljaju i teški metali. Postojani su u okolišu i sklone bioakumulaciji. Štetu čine na samom početku hranjivog lanca, jer ometaju fiziološke aktivnosti biljaka poput fotosinteze, izmjene plinova i apsorpcije hranjivih tvari, što posljedično uzrokuje smanjenje rasta biljaka, nakupljanja suhe tvari i prinosa. Također, unošenjem teških metala u ljudski organizam putem konzumacije biljaka ima dugoročne štetne učinke na ljudsko zdravlje.³⁷

5) Proizvodnja čelika/željeza³⁸

➤ Voda koja se koristi u proizvodnji željeza i čelika služi za hlađenje i odvajanje nusproizvoda, koja je u proizvodnom procesu onečišćena teškim metalima te sadrži nezadovoljavajuće količine cinka, mangana i bakra, kao i premale vrijednosti kisika za kemijsku oksidaciju svih onečišćujućih tvari u vodi (KPK) i ukupno suspendiranih čvrstih tvari.³⁹ Tokovi otpada uključuju benzen, naftalen, antracen, fenole i krezole. Oblikovanje željeza i čelika u limove, žice ili šipke zahtijeva vodu kao osnovno mazivo i rashladno sredstvo, zajedno s hidrauličkim uljima, lojem i čvrstim česticama. Voda koja se koristi za pocinčavanje čelika zahtijeva klorovodičnu i sumpornu kiselinu.⁴⁰ Otpadne vode uključuju kisele vode za ispiranje skupa s otpadnom kiselinom. Mnoge otpadne vode industrije čelika onečišćene su hidrauličkim uljem poznatim i kao topivim uljem.^{41,54}

6) Fracking nafte i plina

➤ Otpadne vode nastale frackingom ili hidrauličkim lomljenjem plina iz stijene škriljevca smatraju se opasnim otpadom.⁴² Posjeduje veliki udio soli, s 32,300 mg po litri natrija.⁴³ Također, voda pomiješana s industrijskim kemikalijama ubrizganim u bušotinu, kako bi se olakšalo bušenje, sadrži visoke koncentracije natrija, magnezija, željeza, barija, stroncija, mangana, metanola, klorida, sulfata i drugih tvari. Radioaktivni materijali koji se javljaju u prirodi mogu se vratiti s vodom na površinu tijekom bušenja.⁴⁴ Voda koja

se koristi u frackingu također može sadržavati ugljikovodike, uključujući otrovne tvari poput benzena, toluena, etilbenzena i ksilena koje se mogu osloboditi tijekom bušenja.^{45,54}

7) Elektrane

➤ Elektrane na konvencionalna neobnovljiva fosilna goriva, posebice elektrane na ugljen, glavni su izvor industrijskih otpadnih voda. Mnoga od tih postrojenja ispuštaju otpadnu vodu sa značajnim količinama metala kao što su olovo, živa, kadmij i krom, kao i arsen, selen i dušikove spojeve (nitrati i nitriti). Postrojenja koja sadrže filmove za uklanjanje onečišćujućih tvari iz otpadnih plinova, kao što su mokri skruberi, obično prenose onečišćujuće tvari u tok otpadne vode.⁴⁶

8) Postrojenja za pročišćavanje vode/otpadnih voda^{47,54}

➤ Nusproizvod postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda proizvodi otpad koji sadrži mnogo potencijalnih onečišćujućih tvari. Čak i obnovljena voda dezinficirana klorom može sadržavati nusproizvode dezinfekcije kao što su trihalometani i haloctene kiseline⁴⁸ Čvrsti ostaci iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, poznati kao biokrutine, sadrže uobičajena gnojiva, ali također mogu sadržavati teške metale i sintetičke organske spojeve koji se nalaze u kućanskim proizvodima.⁵⁴

9) Prerada hrane

➤ Otpadne vode iz hrane i poljoprivrede sadrže koncentracije pesticida, insekticida, životinjskog otpada i gnojiva kojima treba upravljati.⁴⁹ Prerada hrane od sirovina rezultira vodom ispunjenom visokim sadržajem čestica i topivih organskih tvari ili kemikalija.⁵⁰ Organski otpad od klanja i prerade životinja, tjelesne tekućine, crijevna tvar i krv izvori su onečišćivala vode koje je potrebno tretirati.⁵¹

3 KOKSNE OTPADNE VODE

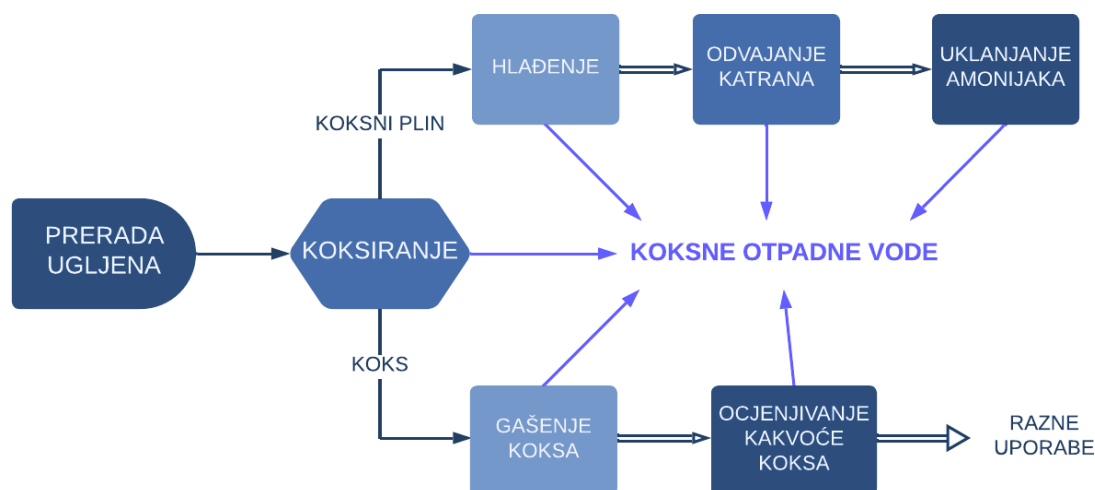
Posebna vrsta industrijskih otpadnih voda su koksne vode, koje nastaju tijekom procesa povrata topline gašenja koksa, pročišćavanja plina iz koksne peći i uporabe derivata ugljena. Sadrže široki raspon onečišćujućih tvari, koje su prisutne u visokim koncentracijama i/ili se ne uklanjaju konvencionalnim procesima obrade otpadnih voda.⁵² Složena i toksična priroda otpadne vode sadrži tvari slabe biorazgradljivosti, kao što su policiklički aromatski ugljikovodici (PAH), fenolni spojevi, heterociklički spojevi, tiocijanat, amonijak i cijanidi.⁵³ Organske onečišćujuće tvari u otpadnoj koksnoj vodi su kancerogene, neurotoksične, imunotoksične i mutagene po prirodi.⁵⁴ Epidemiološkim istraživanjima na radnicima u industriji aluminija, čelika, grafita, elektrotehnici i građevinarstvu, dokazano je da mogu

uzrokovati konjunktivitis, respiratorne probleme, imunotoksičnost, reproduktivnu toksičnost i genotoksičnost.⁵⁵

Prisutni toksični spojevi skloni su bioakumulaciji u ekosustavu, zbog čega je izrazito važno pravovremeno i prikladno zbrinjavanje otpadne koksne vode, kako bi se spriječila moguća ireverzibilna šteta na okoliš. Temeljeno na tim istraživanjima posljedica koksne vode smatraju jednom od najotrovnijih industrijskih otpadnih voda.⁵⁶

3.1 DOBIVANJE KOKSNIH OTPADNIH VODA

Koks je tvrda porozna tvar, proizvedena grijanjem ugljena do visoke temperature bez pristupa zraka (Slika 2).



Slika 2. Proces dobivanja koksni voda⁵⁸

Postupnim zagrijavanjem usitnjenog kamenog ugljena ili lignita u baterijama koksni peći, kod temperatura viših od 200 °C dolazi do razgradnje ugljena, uz stvaranje raznih plinova. Kod suhe destilacije u koksarama, na visokim temperaturama (od 1000 °C do 1200 °C) ostaje metalurški koks, a kod suhe destilacije na nižim temperaturama (od 450 °C do 550 °C) ostaje polukoks.⁵⁷ Najčešće se koksara sastoji od procesa pripreme ugljena, koksiranja i uporabe nusprodukta (koksni plin). Procesi gašenja koksa i ispiranja NH₃ destilatora zahtijeva velike količine vode za ispiranje, što rezultira nastajanjem otpadne vode pune toksičnih spojeva - koksni voda.⁵⁸ Za svaku tonu proizvedenog koksa koristi se otprilike 4 m³ slatke vode, od čega se 1 m³ ispušta iz sustava kao otpadna voda.^{59,60}

3.2 SVOJSTVA KOKSNIH OTPADNIH VODA

Otpadne vode od koksiranja vrlo su složenog sastava, a sastoje se od organskih i anorganskih komponenata.^{61,62} Količina i kvaliteta nastale otpadne vode ovisi o vrsti ugljena koji se koristi i uvjetima rada u procesu koksiranja. Otpadne vode koksne industrije najčešće sadrže netopljive (suspendirane i koloidne) čestice i otopljene organske (hidrofobne i hidrofilne) tvari.⁶³ Čak i nakon uklanjanja baznih tvari poput ulja, katrana i amonijaka, koksna otpadna voda vrlo je onečišćena otrovnim tvarima poput fenolnih spojeva, PAH-ova, cijanida, tiocijanata, benzena i njegovim derivatima (toluen, ksilen, naftalen, antracen, fenantren, benzopiren), naftnim tvarima, masnim kiselinama itd. Razgradnjom fenola nastaje niz intenzivno obojenih aromatskih spojeva koji otpadnoj vodi daju tamnosmeđu boju.⁶⁴

Koncentracija policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) obično je niska u usporedbi s drugim organskim onečišćujućim tvarima, no ipak se smatraju jednim od najopasnijih sastojaka otpadnih koksni voda.⁶⁵ Dušikovi heterociklički spojevi (NHC), kao što su piridin, kinolin, izokinolin, indol i njihovi derivati čine 30 – 50 % ukupnog organskog opterećenja.⁶⁶

Koksne vode također karakteriziraju visoke koncentracije anorganskih soli, uglavnom sulfata, sulfida, klorida, tiocijanata, cijanida, ferocijanida i amonijačnog dušika.⁶⁷ Najznačajniji anorganski spojevi su spojevi koji sadrže cijanid, tiocijanat, amonijak, i sulfati. Glavni nusprodukt procesa proizvodnje koksa je katran, koji se posljedično nalazi u otpadnim vodama koksiranja kao emulgirani katran.⁶⁸ Udio katrana je obično 2 – 5 %.⁶⁹ Naravno prisutnost određenih onečišćujućih tvari ovisi o procesu proizvodnje i kvaliteti koksa te postupcima njegovog ispiranja, zbog čega posljedično koksne vode imaju širok raspon onečišćenosti i više mogućnosti zbrinjavanja.⁷⁰

Glavne onečišćujuće tvari koje su razlog za zabrinutost su fenolni spojevi, cijanidi, tiocijanati i amonijak. Fenoli ometaju biorazgradnju tiocijanata, utječu na nitrifikaciju i inhibiraju denitrifikaciju. Cijanidi koče aerobno disanje, biorazgradnju fenola i enzimsku aktivnost mikroorganizama u aktivnom mulju. Amonijak se zbog dobre topljivosti u vodi može asimilirati u biološki proces amonifikacijom ili hidrolizom tiocijanata. Tiocijanati su toksični, otporni na mikrobiološku razgradnju te doprinose inhibiciji biorazgradnja ostalih komponenti otpadnih koksni voda.

U nastavku su u Tablici 1. navedena svojstva koksne otpadne vode, u kojoj se vide široki rasponi mogućih prisutnih onečišćujućih tvari, kao i njihova maksimalna dozvoljena koncentracija.

Tablica 1. Karakterizacija koksne otpadne vode ⁷¹

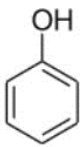
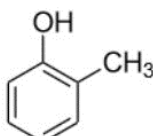
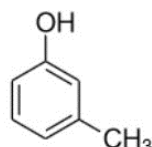
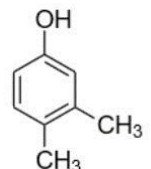
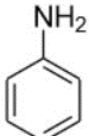
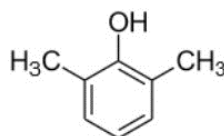
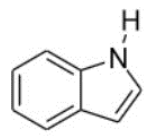
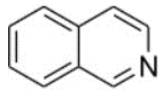
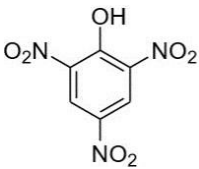
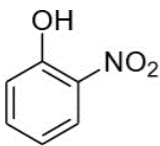
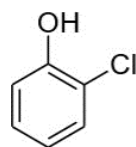
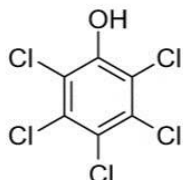
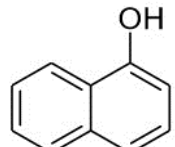
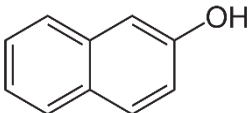
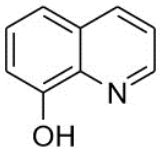
Parametri	Mjerna jedinica	Raspon	Granica tolerancije
Katran	mg l ⁻¹	5-150	-
Ukupne suspendirane tvari	mg l ⁻¹	2-712	35
Vodljivost	μS cm ⁻¹	5000-12500	-
pH	-	6,5-11,5	6,5-9,0
Boja	-	Crna	-
KPK	mgO ₂ l ⁻¹	81-16000	125
BPK₅	mgO ₂ l ⁻¹	60-5450	25
Fenoli	mg l ⁻¹	50-2000	0,1
Masti i ulja	mg l ⁻¹	4,7-1250	20
Cijanidi	mg l ⁻¹	0,1-210	0,1
Tiocijanati	mg l ⁻¹	50-640	0,1
Amonijak	mg l ⁻¹	49,790	10
Ukupni dušik	mg l ⁻¹	215-270	15
Kloridi	mg l ⁻¹	2500-3500	-
Sulfati	mg l ⁻¹	900-1200	250
Sulfidi	mg l ⁻¹	1,4-50	0,1
Ekotoksikološki indikator, EC₅₀	mg l ⁻¹	34,4	-

Za usporedbu koksne otpadne vode i vode koja ima prihvatljive koncentracije onečišćujućih tvari, prikazane su razlike u rasponu parametara ili prisutnih tvari i graničnih vrijednosti koncentracija prisutnih onečišćujućih tvari u otpadnim vodama, propisanih općim standardima za ispuštanje onečišćujućih tvari u okoliš (Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, NN 26/2020).

3.2.1 FENOLI

Fenoli su toksične organske molekule koje se sastoje od aromatskog ugljikovodika na koji je vezana hidroksilna skupina. Izrazito su topljivi u vodi te, kako je već prije navedeno, otežavaju biorazgradnju.⁷¹ Na tonu proizvedenog koksa nastaju iznimne količine fenola, čak 0,2 – 12 kg fenola.⁷² Prisutnost fenola ($\geq 200 \text{ mg l}^{-1}$) u otpadnoj vodi ometa biorazgradnju tiocijanata, ozbiljno utječe na nitrifikaciju i inhibira denitrifikaciju.⁵⁸

Više je načina uklanjanja fenola iz otpadnih voda. Postupak se može provesti s bakterijama (poput *Pseudomonas* i *Acinetobacter*), kvascima i plijesnima (primarno gljivica bijele truleži), a najčešće se uklanja oksidacijom.^{68,73} Kao oksidansi se mogu koristiti ozon, napredni oksidansi (pr. hidroksilni radikal) i alternativni oksidansi poput klora, klorova dioksida te kalijeva permanganata.⁷⁴ Napredni oksidansi koriste se u Fentonovom procesu, kojim je moguće ukloniti 74 % fenola u optimalnim uvjetima. On se koristi u kombinaciji s biološkom obradom, nakon koje se preostali fenol smanjuje za 98,8 %.^{75,76}

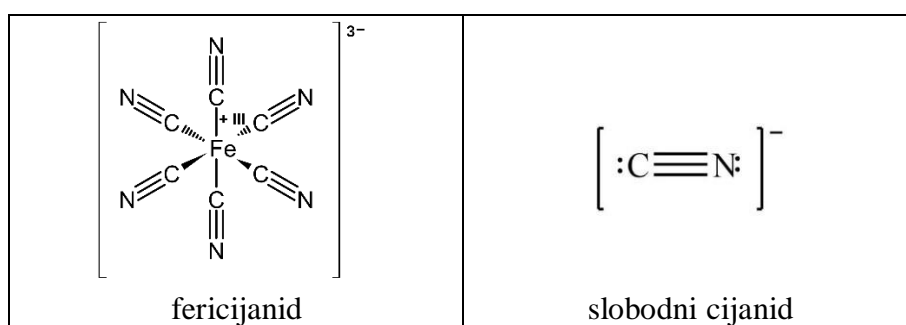
 fenol	 2-metilfenol	 3-metilfenol	 3,4-dimetilfenol
 anilin	 2,6-dimetilfenol	 indol	 izokinolin
 2,4,6-trinitrofenol	 2-nitrofenol	 2-klorfenol	 pentaklorfenol
 1-naftol	 2-naftol	 8-hidroksikinolin	

Slika 3. Fenoli prisutni u koksним otpadnim vodama ^{71,77}

3.2.2 CIJANIDI

Cijanidi su svi kemijski spojevi koji sadrže $C\equiv N$ funkcionalnu skupinu. Ta skupina, poznata kao cijano skupina, sastoji se od atoma ugljika trostruko vezanog za atom dušika. U otpadnim vodama može se naći u dva osnovna oblika: manje toksični cijanidni kompleks i izrazito toksični slobodni cijanid, koji je prisutan u većini prirodnih voda, te blokira aerobno disanje, biorazgradnju fenola i enzimsku aktivnost mikroorganizama u aktivnom mulju.^{78,79} Slobodni cijanid uključuje vodikov cijanid (HCN) i cijanidne ione (CN^-), čija prisutnost ovisi o pH (HCN je prisutan pri $pH < 7,5$, dok je CN^- uglavnom prisutan pri $pH > 9,5$).^{67,80}

Pri uklanjanju cijanida potrebno je obratiti pažnju na sva tri oblika prisutna u otpadnim vodama.⁸¹ Najčešće se uklanjaju kemijskim taloženjem željeza. Uklanjanje je povezano sa smanjenjem KPK-a, suspendiranih čvrstih tvari, masti i ulja ako su prisutni, te istovremenim stvaranjem amonijaka koji se naknadno oksidira u nitrat u aerobnim uvjetima.^{62,69,80} Vrlo se dobro uklanjaju oksidacijom s pomoću bakterija, koje u optimalnim uvjetima razgrađuju cijanid unutar 25 h.⁸² Bakterije uništavaju $C\equiv N$ vezu, a za svoj metabolizam koriste ugljik ili dušik. Koncentracija slobodnog cijanida ne smije biti prevelika, jer u tom slučaju inhibira rast bakterija te time i biorazgradnju preostalih cijanida (pri 80 mg l^{-1} se čak 95 % cijanida uklanja bakterijama, no granica tolerancije se javlja već pri 100 mg l^{-1}).⁹¹

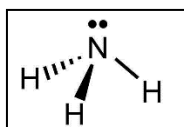


Slika 4. Cijanidi prisutni u otpadnim koksanim vodama⁸³

3.2.3 AMONIJAK

Otpadne vode koje ispuštaju koksare u visokim su koncentracijama opterećene amonijakom. Budući da je dobro topiv u vodi, može imati štetne učinke na prihvatne tokove ako se ne ukloni prije ispuštanja otpadnih voda. Dostupne tehnike za uklanjanje amonijaka uključuju obnavljanje amonijaka njegovim koncentriranjem (ionska izmjena, reverzna osmoza ili kemijsko taloženje), uklanjanje plinovitog amonijaka (odvajanje zrakom ili parom) i njegovu pretvorbu u dušik (kloriranje prijelomne točke ili biološka nitrifikacija-

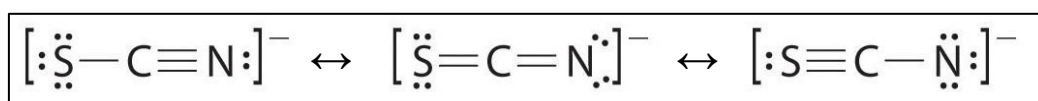
denitrifikacija).⁸⁴ Amonijak se može asimilirati u biološki proces amonifikacijom ili hidrolizom tiocijanata. Veliki nedostatak biološkog uklanjanja amonijaka je inhibicija nitrifikacije fenolima i tiocijanatima.⁶¹ Uklanjanje amonijaka ključni je proces u obradi otpadnih voda od koksiranja.¹⁵⁵ Moguće ga je ukloniti i s pomoću bakterija poput *Proteobacteria pusillimonas* i *Proteobacteria ralstonia* te algama *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum vitiosum*, *Chroococcus turgidus*, *Desmococcus olivaceus*, *Scenedesmus acutus*, *Scenedesmus dimorphus* i *Oocystis solitaria*.



Slika 5. Struktura amonijaka

3.2.4 TIOCIJANAT

Tiocijanat (SCN^-) je opasna i kemijski stabilna onečišćujuća tvar koja nastaje u reakciji cijanida i sumpora u procesu proizvodnje koksa, pod visokim temperaturama.⁸⁵ U otpadnim koksnim vodama tiocijanat čini približno 15 % ukupnog KPK.¹⁵⁶ Razgradnja tiocijanata je definirana je specifičnim brzinama njegovog uklanjanja i stopama unosa kisika. Tiocijanat efikasno se uklanja rastom mikroba koristeći tiocijanat kao supstrat. Istraživanja pokazuju da spojevi kao amonijak, fenol, PAH i metali u tragovima inhibiraju uklanjanje tiocijanata, dok nasuprot tome, utvrđeno je da cijanid ima značajan inhibitorski učinak na razgradnju tiocijanata.⁸⁶ U usporedbi s uklanjanjem fenola i cijanida, razgradnja tiocijanata je najsporiji i najosjetljiviji proces. Može se postići i pod aerobnim i anoksičnim uvjetima, te pri mezofilnoj temperaturi. Autotrofne bakterije kao izvor ugljika koriste anorganski ugljik iz tiocijanata, dok heterotrofni mikroorganizmi kao izvor energije koriste dušik iz tiocijanata i organski ugljik.⁸⁶ Nažalost, biološka razgradnja tiocijanata povećava sadržaj amonijaka i sulfata u otpadnoj vodi. Zbog svoje toksičnosti, ne samo da su ti spojevi otporni na mikrobiološku razgradnju, već također doprinose inhibiciji biorazgradnje ostalih komponenti otpadnih koksnih voda.⁸⁷



Slika 6. Struktura tiocijanata

3.3 UTJECAJ NA OKOLIŠ

Kokсна industrija pripada u skupinu velikih onečišćujućih industrija. Više činjenica ju svrstava u tu grupaciju, poput nastanak štetnih ispušnih plinova tijekom procesa kokiranja (Tablica 2.). Nastaju suspendirane čestice aerodinamičkog promjera manjeg ili jednakog 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$), sumporov dioksid (SO_2), dušikovi oksidi (NO_x), hlapljivi organski spojevi (HOS) i policiklički aromatski ugljikovodici (PAH).⁸⁸ Također značajno pridonosi emisiji stakleničkih plinova ugljikova monoksida (CO) i metana (CH_4).⁸⁹

Tablica 2. Usporedba emisija onečišćivala zraka iz različitih industrija⁹¹

Onečišćujuće tvari	Elektrane	Proizvodnja cementa	Proizvodnja čelika i željeza	Proizvodnja koksa
TSP* / kt	1433	3866	1886	368,36
$\text{PM}_{2,5}$ / kt	622	1700	555	23,28
SO_2 / kt	7251	815	2222	402,54
NO_x / kt	8067	2042	937	174,43
HOS / kt	260		254	1325,42
PAH / kt				28,24
CO / kt		4843		2036,43
CH_4 / kt				71,68
Bazna godina	2011	2012	2012	2015

* TSP – trinatrijfosfat

Dugotrajna izloženost emisijama koksa iz pećnica rezultira upalom kože i unutarnje vjeđe, kao i lezijama na plućima i želucu. Zaštita okoliša Sjedinjenih Država Agencija za zaštitu (US EPA) klasificira emisije iz koksnih peći kao kancerogene skupine A i povezuje ih s rakom pluća (SAD EPA, 1999).⁹¹

U pogledu otpadnih voda onečišćenih navedenim tvarima iz koksne industrije također je važno odrediti stupanj štetnosti na okoliš i ljudsko zdravlje. Najčešće i najjednostavnije promatrani parametri su indeksi bioloških učinaka, npr. akutne toksičnosti.⁹⁰ Testovi akutne toksičnosti brza su, jednostavna i isplativa metoda za procjenu bioloških učinaka. Mogu poslužiti kao referenca za daljnja ispitivanja toksičnosti. Korištenje luminiscentnih bakterija pokazalo su se učinkovito za pregled i procjenu akutne toksičnosti. Smanjenje bioluminiscencije ukazuje na smanjenje staničnog disanja, tj. promjenu cjelokupnog metaboličkog stanja stanice koje se očituje u promjeni razine emisije luminiscencije. Najčešća

primjena takvog oblika ispitivanja toksičnosti vezana je za određivanje letalne koncentracije (LC₅₀) i efektivne koncentracije (EC₅₀).⁹¹ LC₅₀ jest koncentracija spoja koja uzrokuje smrt kod 50 % testiranih organizama, dok je EC₅₀ koncentracija koja uzrokuje štetne učinke kod 50 % populacije. Za standardizaciju rezultata i uspostavu korelacije s fizikalno-kemijskim parametrima, jedinice toksičnosti (TU₅₀) mogu se povezati s EC₅₀ i izračunati prema sljedećoj formuli:

$$TU = \frac{100}{EC_{50}(15\text{min})}$$

Na taj se način toksičnost može klasificirati kao: vrlo toksično (EC₅₀ < 60 %), umjereno toksično (60 % < EC₅₀ < 82 %) i nije toksično (EC₅₀ > 82 % ili kada nije vidljivo smanjenje osvjetljenja). Primjeri vrijednosti EC₅₀ toksičnih spojeva i organizama korištenih prilikom biološke i fizikalno-kemijske obrade prikazani su u Tablici 3.⁹²

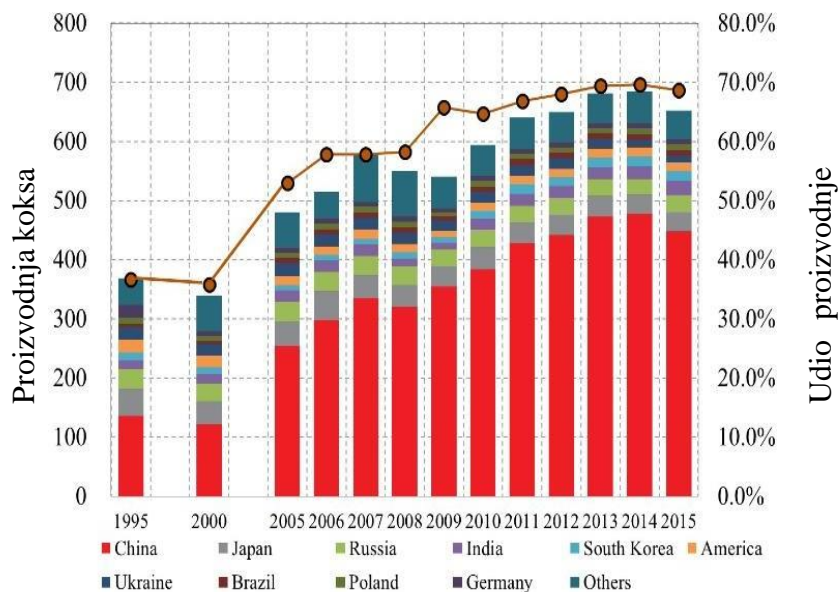
Tablica 3. Vrijednosti EC₅₀ i klasifikacija nekih toksičnih spojeva⁹²

Spojevi	EC ₅₀ / ml L ⁻¹	Testirana vrsta	Klasifikacija
Naftalen	4,48	<i>Oithona davisae</i>	Toksično
Fenol	7,99	Bioluminiscentne bakterije	Toksično
3-metilfenol	28,97	<i>Daphnia magna</i>	Štetno
4-metilfenol	1-7,7	Fotobakterije	Toksično
Indol	11,77	Bioluminiscentne bakterije	Štetno
2-naftol	0,07	Ribe	Vrlo toksično
1-naftol	11,87	<i>Chlorella vulgaris</i>	Toksično
8-hidroksikinolin	0,88	Bioluminiscentne bakterije	Vrlo toksično

3.4 PROČIŠĆAVANJE KOKSNIH VODA

Zbog svog izrazito složenog sastava i širokog raspona varijacija komponenata, proces prerade otpadnih koksniha voda nije jednostavan. Poteškoće u uklanjanju organskih spojeva i inhibicijski učinci toksičnih spojeva glavna su ograničenja u uspješnom pročišćavanju koksniha voda, čineći konvencionalne tehnologije neučinkovitim. Niti jedna se vrsta postupaka ne može provesti sama, a da se dobi zadovoljavajući stupanj pročišćenosti. Zbog toga se uvijek koriste

kombinirani postupci.^{58,59,92} Izdvojeni podaci u Tablici 4. te Slici 7. korišteni su za analizu doprinosa zemalja u području istraživanja pročišćavanja otpadnih voda od koksiranja.



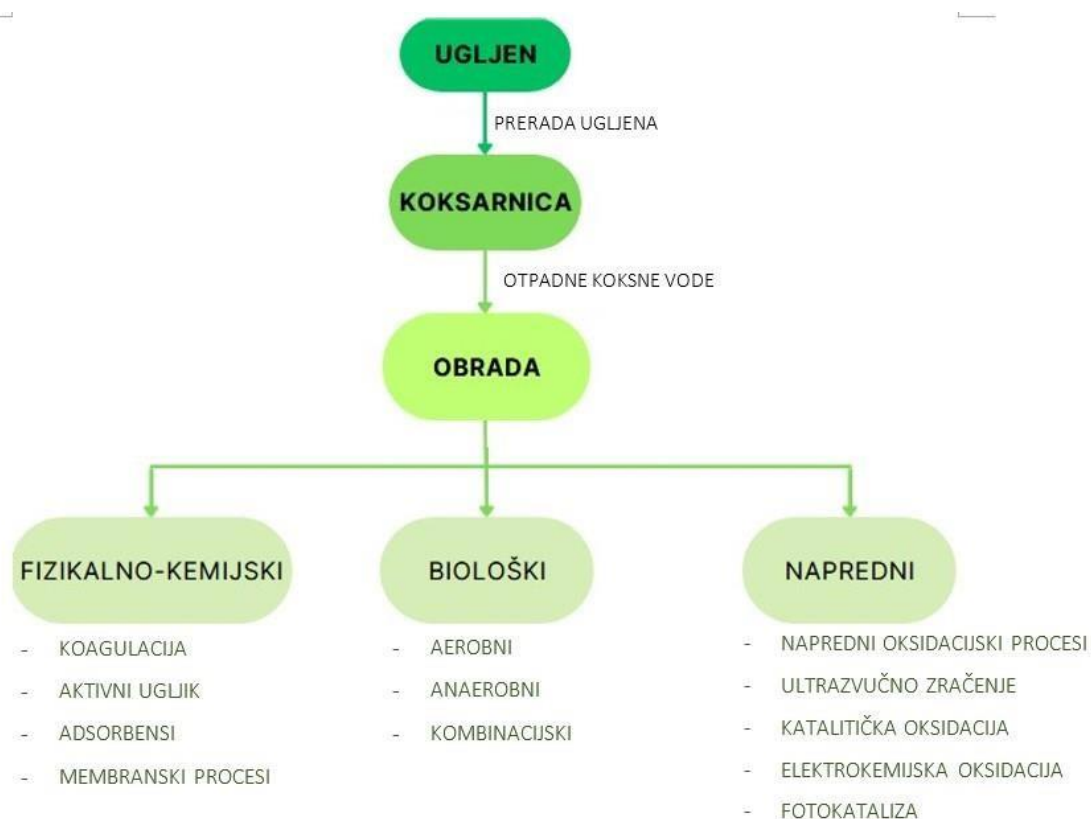
Slika 7. Povijesni pregled proizvodnje koks u većim zemljama svijeta⁵⁸

Tablica 4. Doprinos publikacijama 11 zemalja najboljih u području istraživanja pročišćavanja otpadnih koksni voda⁵⁸

Zemlje	Ukupno publikacija	% doprinosa	Ukupno citiranja	Prosječni citati po dokumentu	h-indeks
Kina	419	65,88	8,267	19,73	46
Indija	59	9,27	714	12,1	14
Poljska	29	4,55	260	8,97	9
Južna Koreja	23	3,61	825	35,87	13
Španjolska	22	3,45	506	23	11
SAD	22	3,45	378	17,18	12
Japan	15	2,35	281	18,73	10
Engleska	14	2,20	171	12,21	8
Australija	12	1,88	264	22	6
Singapur	11	1,72	327	29,73	9
Iran	10	1,57	344	34,4	

Kina je očito vodeća zemlja s najvećim brojem publikacija, s udjelom od 65,88 % od ukupnog broja publikacija s visokim h-indeksom (46). Međutim, u pogledu prosječnih citata po radu Južna Koreja je na prvom mjestu, a slijede je Iran (rang 2.), Singapur (rang 3.) i Kina (rang 4.). Velik broj publikacija iz Kine o otpadnim vodama od koksiranja može se povezati s time da je Kina prva zemlja u svijetu u proizvodnji čelika. Posljedično zbog njene brze industrijalizacije nadodani su amandmani na razne zakone i propise kako bi kontrolirala zagađenje okoliša. Ti su zakoni izravno utjecali na količinu i rezultate akademskog istraživanja u pročišćavanju industrijskih otpadnih voda.

Većina postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda pročišćava otpadne vode od koksiranja sljedećim redoslijedom: 1. fizikalno-kemijska predobrada, 2. biološka obrada i 3. napredna obrada (Slika 8.), a vrši se do granice kada koncentracija onečišćenje postaje neopasno za život i zdravlje ljudi te ne uzrokuje nepoželjne promjene u okolišu.



Slika 8. Procesi obrade koksnih voda ⁵⁸

3.4.1 FIZIKALNO – KEMIJSKA OBRADA

Prerada započinje s mehaničkim odstranjivanjem krupnijih, raspršenih ili plivajućih tvari prisutnih u koksnim vodama, poput komada plastike, tekstila ili lišća. Čvrsti komadi prolaze kroz rešetke i sita za izdvajanje iz otpadne vode, a u konačnosti se dalje prevoze ili na usitnjavanje ili prikladnu preradu. Osim takvog fizikalnog tretiranja voda, ona se prerađuje i kemijski, a neki procesi su navedeni u nastavku.

➤ Koagulacija / flokulacija

Većina suspendiranih čestica prisutnih u otpadnoj vodi moguće je povezati u veće nakupine (pahulje ili flokule) kako bi se ubrzalo njihovo taloženje, procesom koji se naziva flokulacija. Dodavanjem sredstva za koagulaciju može se dodatno ubrzati taloženje.⁹³

➤ Aktivni ugljik

Adsorpcija aktivnim ugljenom u obradi koksnih otpadnih voda, najčešće se koristi nakon fizikalnih postupaka kao što su koagulacija/flotacija i filtracija, kao priprema za daljnju biološku obradu. Skupine organskih tvari koje su općenito podložne adsorpciji na aktivni ugljik uključuju pesticide, herbicide, aromatska otapala, polinuklearne arome, klorirane arome, fenole, klorirana otapala, alifatske kiseline i kiseline velike molekularne težine, aromatske amine, goriva, estere, etere, alkohole, površinski aktivne tvari i topiva organska bojila.^{94,95}

➤ Adsorbensi / hidrogelovi

Postoji veliki broj adsorbensa koji se koriste za pročišćavanje otpadnih voda. Utvrđeno je da su vrlo učinkoviti u uklanjanju onečišćujućih tvari iz vode. Veličina prisutnih čestica je od najveće važnosti. Da bi se čestica mogla izdvojiti adsorbensima, mora biti unutar raspona veličine od 1-100 nm.^{96,97} To definira svestranost i sposobnost adsorpcije adsorbensa. Ne može se napraviti izravna usporedba kapaciteta različitih adsorbensa, jer postoji ovisnost o različitim aspektima, uključujući već navedenu veličinu i oblik čestica, radne uvjete (kao što su pH, temperatura, vrijeme reakcije) ili eksperimentalni oblik (provodi li se studija putem grupnih eksperimenata ili radi kolona).⁹⁸

➤ Membranski procesi

Membranski procesi smatraju se ključnim elementima naprednih shema za ponovnu upotrebu otpadnih voda i uključeni su u brojne istaknute sheme diljem svijeta.⁹⁹ Membrane za pročišćavanje vode i otpadnih voda obično se klasificiraju prema opadajućoj veličini pora kao mikrofiltracija (MF), ultrafiltracija (UF), nanofiltracija (NF) i reverzna osmoza (RO).¹⁰⁰ MF je prikladan za uklanjanje suspendiranih čvrstih tvari, uključujući veće mikroorganizme poput protozoa i bakterija. UF je potreban za uklanjanje virusa i organskih makromolekula sve do

veliĉine od oko 20 nm. Manji organski i viševalentni ioni mogu se ukloniti NF-om dok je RO pogodan za uklanjanje svih otopljenih vrsta. Membranski procesi koriste se i u dezinfekciji, oporavljajući visokokvalitetni konaĉni efluent s razliĉitim mogućim upotrebama.^{101,102} Vodljivost i sadržaj otopljenog kisika ostaju nepromijenjeni ni MF ni UF tretmanom. Zajedno s aktivnim ugljenom u prahu, UF se moţe koristiti za obradu vode oneĉišćene otopljenim organskim tvarima i mikrooneĉišćivaĉima. Oneĉišćujuće tvari adsorbiraju se na ĉestice aktivnog ugljena, koje se zatim odvajaju od njih vode s pomoću UF ili MF.^{103,104}

3.4.2 NAPREDNI PROCESI OBRADE

➤ Napredni oksidacijski procesi

Napredni oksidacijski procesi (AOP), definirani kao procesi koje koriste hidroksilni radikal ($\cdot\text{OH}$) za oksidaciju, vjerojatno su jedna od najučinkovitijih metoda za proĉišćavanje otpadnih voda koje sadrţe organske tvari.¹⁰⁵ Konvencionalnije tehnike ne mogu se koristiti za obradu takvih spojeva zbog njihove visoke kemijske stabilnosti i/ili niske biorazgradljivosti.¹⁰⁶ Ovi su procesi uspješno primijenjeni za uklanjanje ili razgradnju toksiĉnih tvari ili korišteni kao predobrada za pretvaranje otpornih oneĉišćivala u biorazgradive spojeve koji se zatim mogu tretirati konvencionalnim biološkim metodama.¹⁰⁷ Uĉinkovitost AOP-a ovisi o stvaranju reaktivnih slobodnih radikala, od kojih je najvaţniji hidroksilni radikal ($\cdot\text{OH}$). Primjenjivo je šest tipa naprednih oksidacijskih procesa, ukljuĉujući zraĉenje, fotolizu i fotokatalizu, sonolizu, tehnologije elektrokemijske oksidacije, reakcije temeljene na Fentonu i procese temeljene na ozonu.¹⁰⁸ Ovim procesima moguće je ukloniti razliĉite vrste toksiĉnih tvari iz otpadnih voda, ukljuĉujući aromatske spojeve, boje, farmaceutske spojeve i pesticide.¹⁰⁹

➤ Ultrazvuĉno zraĉenje

Ovaj proces djeluje kao napredni proces oksidacije. Primjenom ovog postupka razgrađuju se mnogi sloţeni organski spojevi na puno jednostavnije spojeve tijekom procesa kavitacije.¹¹⁰ Stvaranje, rast i kolaps mjehurića (kavitacija), popraćeno je stvaranjem lokalne visoke temperature (do 5000 K), tlaka (do 1000 atm) i reaktivnih radikalnih vrsta ($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{OOH}$) toplinskom disocijacijom vode i kisika.¹¹¹ Ovi radikali prodiru u vodu i oksidiraju otopljene organske spojeve.¹¹² Vodikov peroksid (H_2O_2) nastaje kao posljedica rekombinacije radikala $\cdot\text{OH}$ i $\cdot\text{OOH}$ na vanjskoj strani kavitacijskog mjehurića.¹¹³ Osnova za primjenu ultrazvuĉnog zraĉenja je da akustična kavitacija moţe stvoriti brojne mehaniĉki, akustički, kemijski i biološki promjene u tekućini.¹¹⁴

➤ Katalitička oksidacija

Katalizator se primjenjuje kako bi se povećala brzina oksidacije i poboljšala ekonomičnost procesa.¹¹⁵ Brojni katalizatori, uključujući aktivni ugljen, metalni ioni, metalni oksidi i drugi materijali primijenjeni su za oksidaciju raznih opasnih i organskih tvari.^{116,117} Nadalje, željezo i njegovi oksidi su optimalan izbor jer je željezo široko dostupan i netoksičan element.¹¹⁸ Klasični Fentonov proces oksidacije koristi reakciju Fe^{2+} i H_2O_2 za proizvodnju hidroksilnih radikala.¹¹⁹

➤ Elektrokemijska oksidacija

Elektrokemijske tehnologije nude alternativno rješenje za mnoge ekološke probleme vezanih za industrijski otpad, jer elektroni daju svestran, učinkovit, isplativ, lako automatiziv i čist reagens.¹²⁰ Elektrokemijska oksidacija organskih tvari za pročišćavanje otpadnih voda može se postići na dva glavna načina: izravna oksidacija gdje se prijenos elektrona događa na površini elektrode bez sudjelovanja drugih tvari te neizravna, gdje se organski onečišćivači oksidiraju posredstvom određenih elektroaktivnih vrsta koje se stvaraju na površini anode, a koje djeluju kao posrednici za elektrone koji se kreću između elektrode i organskih spojeva.^{121,122} U neizravnoj elektrolizi, redoks reagens može biti elektro generiran anodnim ili katodnim postupkom.¹²³

➤ Fotokataliza

Kataliza je proces koji uključuje sintezu, modifikaciju i mehanizam tvari koja može povećati ili ubrzati brzinu kemijske reakcije zbog sudjelovanja tvari koja se zove katalizator, a koja ostaje nepromijenjena na kraju reakcije. Reakcija će se odvijati brže s katalizatorom jer oni zahtijevaju manje aktivacijske energije od normalne reakcije.¹²⁴ Proces fotokatalize zahtijeva svjetlosnu energiju za aktiviranje fotokatalizatora.¹²⁵ Provođi se kronološki slijed naprednih oksidacijskih procesa, koji poboljšavaju nedostatke procesa kao što su visoka cijena, nepotpuna mineralizacija i potreba velikih količina hidroksilnih radikala.¹²⁶ Količina katalizatora, pH onečišćujuće tvari, intenzitet zračenja, temperatura onečišćujuće tvari, početna koncentracija te utjecaj veličine i oblik fotokatalizatora značajno utječu na brzinu razgradnje organskih onečišćujućih tvari.^{122,124}

3.4.3 BIOLOŠKA OBRADA

Biološka obrada otpadnih voda jedna je od najvažnijih biotehnoških primjena i, kao pokretači ključnih procesa, mikroorganizmi su ključni za njezin uspjeh.¹²⁷ Poznavanje strukture mikrobne zajednice i veza s promjenjivim uvjetima okoliša presudno je za razvoj i optimizaciju bioloških sustava.¹²⁸ Jedinstvena sposobnosti mikroba jest da razgrade organsku tvar, uklone hranjive tvari i pretvore otrovne spojeve u bezopasne proizvode.

Biološka obrada slijedi fizikalno – kemijsku, a svrha joj je smanjiti primarno KPK, zatim fenole, cijanide, tiocijanate, amonijak i nitrata kroz aerobne ili anaerobne procese biotransformacije.^{58,69,129} Općenito, biorazgradivost koksinih otpadnih voda izrazito je niska ($BPK_5/KPK < 0,1$), pa se stoga one moraju prilagoditi biološkoj obradi.^{67,130} Najjednostavniji je način razrjeđivanje otpadne vode tehničkom vodom ili djelomična recirkulacija otpadne vode, ali su te metode upitne s obzirom na potrošnju vode i operativne troškove.^{71,131}

➤ Aerobni i anaerobni procesi

Aerobna biorazgradnja organskih tvari je oksidacija mikroorganizama uz prisutnost zraka, gdje su krajnji proizvodi ugljikov dioksid i voda, uz nešto stabilnog organskog ostatka (biomase) i uz oslobađanje energije. Prednosti su joj brza stopa biorazgradnje, niska proizvodnja mulja i vrlo dobra stabilnost.^{132,133} S druge strane, anaerobna obrada koristi se za obradu visokih koncentracija biorazgradivih onečišćujućih tvari u otpadnim vodama.^{134,135} Proces stabilizira vodu uz malu proizvodnju biomase.¹³⁶ Anaerobni proces uključuje hidrolizu (pretvorba složenih organskih spojeva posredovana enzimima u jednostavne proizvode kao što su aminokiseline i šećeri), acidogenezu (pretvorba jednostavnih proizvoda u jednostavne organske kiseline kao što su octena kiselina i propionska kiselina) i metanogenezu (pretvaranje organskih kiselina u bioplin (metan i ugljikov dioksid)).¹³⁷

Nekoliko prednosti i nedostataka primjene aerobnih i anaerobnih metoda u pročišćavanju otpadnih voda može se promatrati u pogledu zahtjeva za kisikom i energijom, učinkovitosti uklanjanja, proizvodnje mulja, operativnih troškova i troškova održavanja, kvalitete efluenta, prostornih i kemijskih zahtjeva, mirisa, uklanjanja hranjivih tvari, vremena provođenja procesa, fleksibilnosti, začepljenja i koncentracije mikroorganizama. Aerobni biološki sustav vrlo je koristan za pročišćavanje otpadnih voda s KPK manjim od 1000 mg/L i kada proces pročišćavanja zahtijeva prisutnost kisika.¹³⁸ Proizvodi visokokvalitetni efluent zbog efikasnog uklanjanja topljivog organskog materijala i proizvodi dobro flokuliranu biomasu.¹³⁹ Međutim, prisutnost kisika tijekom aerobnog tretmana povećava tendenciju

stvaranja vatrostalnih organskih spojeva iz biorazgradivih spojeva. Anaerobni biološki tretman pruža više prednosti u odnosu na aerobni sustav. Anaerobni sustav proizvodi vrlo malo mulja iz kojeg se može ukloniti voda i koji je potpuno stabiliziran za odlaganje.¹⁴⁰ Nadalje, jeftiniji je, jednostavniji i fleksibilniji u usporedbi s aerobnim sustavom koji zahtijeva visoke investicije, operativne troškove i troškove održavanja, kao i složenu infrastrukturu i velik prostor.^{136,141} Druge prednosti anaerobnog sustava su niska potrošnja energije, mala potreba za hranjivim tvarima i kemikalijama te odlično uklanjanje onečišćenja.¹³⁷ Samostalne aerobne ili anaerobne tehnologije ne mogu postići standarde ispuštanja, ali kombinacija ova dva procesa značajno smanjuje koncentraciju onečišćujućih tvari.⁶⁹

3.4.4 KOMBINACIJSKI / HIBRID PROCESI

Kombinacija AOP-ova i biološke obrade (kao prethodna ili naknadna obrada) može dovesti do više razine smanjenja KPK od bilo kojeg jednostupanjskog tretmana pod istim radnim uvjetima. Također, mogućnost smanjenja troškova kombinirane obrade često je značajna kada se pravilno primjenjuju.¹⁴² Općenito, biološka obrada se provodi u početnoj fazi kako bi se uklonio biorazgradiva onečišćivala u otpadnim. U sljedećem koraku, AOP se primjenjuje kao korak biološkog poliranja kako bi se uklonila bionerazgradiva frakcija.¹⁴³ Učinkovitost obrade otpadne vode uvelike ovisi o odabranoj vrsti AOP-a, fizikalnim i kemijskim svojstvima ciljanih onečišćujućih tvari i radnim uvjetima.¹⁴⁴

Trenutne tehnologije pročišćavanja otpadnih voda imaju ograničenja, prvenstveno zbog svoje energetske i troškovne zahtjevnosti za postizanje cilja pretvorbe oporabe otpadnih koksniha voda.¹⁴⁵ Potrebno je razvijanje novih tehnologija i bioreaktora, a nova inovativna tehnologija koja se temelji na korištenju mikrobnih gorivih ćelija (MFC) pokazala se kao kritičan put za procese biokonverzije prema proizvodnji električne energije, zatim za rješavanje energetske i ekološke probleme. Tri posebne značajke uključujući uštedu energije, manju proizvodnju mulja i manju proizvodnju.¹⁴⁶ Međutim, niski učinak snage i visoki operativni troškovi MFC-a uvelike su ograničili njihovu primjenu na velikim razmjerima. No kao prije navedeno, integracija MFC-a s drugim procesima obrade uvelike poboljšava praktičnost i učinkovitost MFC-a u uklanjanju onečišćujućih tvari.¹⁴⁷

3.5 BIOREMEDIJACIJA

Bioremedijacija je proces koji koristi mikroorganizme, biljke ili njihove enzime za razgradnju onečišćujućih tvari u manje toksične ili neotrovne tvari, s ciljem poboljšanja obrade, posebice uklanjanja prioriternih onečišćivala.⁴ Svrha bioremedijacije je iskoristiti prirodne kemijske reakcije i metaboličke procese kroz koje organizmi razgrađuju spojeve kako bi osigurali hranjive tvari i energiju. Osnovni procesi bioremedijacije su oksidacija i redukcija, koji se mogu odvijati u aerobnim i anaerobnim uvjetima.¹⁵⁰ Proces bioremedijacije se može provoditi *in-situ* i *ex-situ*. *In-situ* bioremedijacija uključuje obradu onečišćenog tla/vode na licu mjesta uz minimalno iskopavanje, dok *ex-situ* uključuje obradu vode/tla o nakon što su uzorci transportirani na odgovarajuće mjesto pumpanjem ili iskopavanjem.¹⁴⁸

Raznovrsni niz mikroorganizama, uključujući alge, gljive i bakterije sposobni su razgraditi toksične vrste. Mikroorganizmi igraju ključnu ulogu i u bioremedijaciji teških metala.¹⁴⁹ Kombinirani aerobno-anaerobni proces pogoduje ukupnoj učinkovitosti biološke obrade otpadnih voda od koksiranja, jer ovisno o prisutnim otpadnim tvarima primjenjuju se određeni mikroorganizmi za njihovo odstranjivanje. U aerobnim se uvjetima provode oksidacija fenola i nitrifikacija, dok anaerobni uvjeti omogućuju denitrifikaciju.¹⁵⁰ Sastav mikroorganizama značajno se razlikuje od sustava do sustava, ovisno o radnim parametrima unutar bioreaktora i sastavu otpadne vode.⁶⁸ Prevladavajući tip u bioreaktorima mijenja se u skladu s promjenom omjera C/N.¹⁵¹

3.5.1 BIOREMEDIJACIJA GLJIVAMA

Pokazalo se da gljive igraju značajnu ulogu u bioremedijaciji raznih onečišćivala kao što su POPs, tekstilne boje, naftni ugljikovodici, otpadne vode industrije celuloze i papira, otpadne vode štavljenja kože, PAH-ova, pesticida i PPCP-ova (Tablica 6.). Nitaste gljive poput *Aspergillus*, *Curvularia*, *Acrimonium* i *Pithium* proučavane su zbog njihove prilagodbe na metale.¹⁵² Među različitim toksičnim onečišćivalima, PAH su složeni organski spojevi sa spojenim, vrlo stabilnim, polikondenziranim aromatskim prstenovima. Učinkovito ih razgrađuju gljive zbog visoke proizvodnje lipaze, što je uočeno u slučaju 21 gljivice koja razgrađuje PAH uključujući *Aspergillus*, *Curvularia*, *Drechslera*, *Fusarium*, *Lasiodiplodia*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus* i *Trichoderma*.^{153,154} U Tablici 6. prikazane su neke gljive koje mogu ukloniti određena organska onečišćivala.

Gljiva bijele truleži *Phanerochaete chrysosporium* korištena je za biorazgradnju fenolnih spojeva u otpadnim vodama od koksiranja.¹⁵⁵ Liofilizirana gljiva, zadržala je visoku

aktivnost čak i nakon 9 mjeseci čuvanja i neaktivnosti. Stope uklanjanja fenolnih spojeva i KPK imobiliziranim gljivama bile su 84 % i 80 % u 3 dana, a 87,05 % i 72,09 % u 6 dana.¹⁶⁰ Pogodni uvjeti za biorazgradnju fenolnih spojeva su pri pH rasponu 4,0-6,0 i temperaturnom rasponu 28-37 °C, a optimalni uvjeti su pri pH=5,0 i temperaturi od 35 °C. Biorazgradnja fenolnih spojeva slijedila je kinetiku prvog reda. To je učinkovita i prikladna metoda za pročišćavanje otpadnih voda od koksiranja.¹⁵⁶

Tablica 5. Pregled bioremedijacijskog potencijala gljiva¹⁵⁷

Ciljani spoj	Gljive	Reference	
Postojana organska onečišćivala	<i>Doratomyces nanus</i> , <i>D. purpureofuscus</i> , <i>D. verrucisporus</i> , <i>Myceliophthora thermophila</i> , <i>Phoma eupyrena</i> , <i>Thermoascus crustaceus</i>	158	
	<i>Aspergillus niger</i>	159	
	Poliklorirani dibenzofurani	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	160
		<i>Phanerochaete sordida</i>	161
Fenilurea herbicid diuron	<i>Mortierella</i>	162	
PAH	Difenil eter	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	167
		<i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Trametes versicolor</i>	163
	Antracen	<i>Armillaria sp.</i>	
	Naftalen	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	167
Fungicidi	Metalaxyl i Folpet	<i>Gongronella sp.</i> <i>R. stolonifer</i>	164
Pesticidi	Klorirani ugljikovodici: heptaklor	<i>P. ostreatus</i>	165
	Kloropirifos	<i>Aspergillus terreus</i>	166
Teški metali		<i>Aspergillus</i> , <i>Curvularia</i> , <i>Acrimonium</i> , <i>Pythime</i>	167
		<i>Aspergillus flavus</i>	168

Istraživanja koja se provode radi potpunog razumijevanja puteva bioremedijacije i napredak u genomskim istraživanjima pokazuju da inženjering i manipuliranje gljivičnim enzimima može pomoći u povećanju njihove aktivnosti i postizanju učinkovite bioremedijacije. Osim toga, učinkoviti biomarkeri za bioremedijaciju mogu proizaći iz studija ekspresije gena u gljivama, što može dodatno pomoći u studijama bioremedijacije koje koriste gljivične sustave.

3.5.2 BIOREMEDIJACIJA BAKTERIJAMA

Kokсна se otpadna voda smatra teškom za biološki tretman. Prema tome, bakterijska zajednica koja može obraditi ovu otpadnu vodu mora biti specijalizirana, lako prilagodljiva i relativno raznolika u slučaju potrebe za uklanjanjem raznolikih onečišćujućih tvari. Bioremedijacija otpadnih voda s pomoću bakterija može se provesti različitim procesima kao što su biosorpcija, biorazgradnja, biomineralizacija, bioaugmentacija i bioredukcija onečišćujućih tvari u manje toksične i bezopasne proizvode.¹⁶⁹ Općenito, biološka obrada otpadnih voda povezana je sa složenim biokemijskim metaboličkim procesima, koji se uglavnom odvijaju kroz interakciju između bakterija i različitih anorganskih i organskih onečišćivača.¹⁷⁰ Tablica 6. prikazuje najzastupljenije bakterije u biološkim postrojenjima za pročišćavanje otpadnih koksnih voda sa svojim ulogama.

Heterotrofne bakterije razgrađuju širok raspon biorazgradivih organskih komponenti koristeći ih kao terminalne donore elektrona. Pod aerobnim, anaerobnim ili anoksičnim uvjetima različiti supstrati poput kisika i različitih hranjivih tvari poput nitrita i sulfata prisutnih u otpadnoj vodi koriste se kao akceptori elektrona. Nekoliko respiratornih produkata, kao što su sulfid, dušik, ugljikov dioksid i biomasa, proizvode se ovisno o supstratu prisutnom u otpadnoj vodi.¹⁷¹ Autotrofne bakterije dobivaju energiju oksidacijom amonijaka u nitrat ili nitrit te također korištenjem organske tvari kao izvor ugljika. Fototrofi i kemotrofi koriste sunčevu ili kemijsku energiju te organske i anorganske tvari u prehrani. Ostale bitne hranjive tvari za rast uključene u otpadnu vodu uključuju dušik, magnezij, sumpor, fosfor, željezo, kaliji kalcij.¹⁷²

Tablica 6. Bakterijske vrste identificirane u otpadnoj koksnoj vodi ⁷¹

Ciljani spoj	Bakterijski rod	Bakterijska vrsta
Željezo, nitrati	<i>Proteobacteria</i>	<i>acidovorax</i>
Organski spojevi na bazi alkana	<i>Proteobacteria</i>	<i>acinobakter</i>
Tiocijanat	<i>Proteobacteria</i>	<i>afipija</i> <i>bosea</i> <i>halomonas</i> <i>thiobacillus</i>
	<i>Actinobacteria</i>	<i>leucobacter</i>
	<i>Proteobacteria</i>	<i>lysobacter</i>
Fenoli	<i>Proteobacteria</i>	<i>alcaligenes</i> <i>bordetella</i> <i>comamonas</i> <i>lysobacter</i>
	<i>Actinobacteria</i>	<i>leucobacter</i>
	<i>Proteobacteria</i>	<i>ochrobactrum</i> <i>pseudomonas</i>
PAH	<i>Proteobacteria</i>	<i>azoarcus</i> <i>hyphomicrobium</i> <i>thioalkalispira</i>
	<i>Chloroflexi</i>	<i>bellilinea</i>
Etilbenen	<i>Proteobacteria</i>	<i>azoarcus</i>
Klorfenoli	<i>Proteobacteria</i>	<i>bordetella</i> <i>defluviobacter</i> <i>ochrobactrum</i> <i>ralstonia</i>
Nitrofenoli	<i>Proteobacteria</i>	<i>ralstonia</i>
Kinolin	<i>Proteobacteria</i>	<i>brevundumonas</i>
	<i>Chloroflexi</i>	<i>bellilinea</i>
Fenolamid	<i>Proteobacteria</i>	<i>deftia</i>
Sulfid	<i>Proteobacteria</i>	<i>lysobacter</i> <i>thiobacillus</i>
	<i>Actinobacteria</i>	<i>leucobacter</i>
Indol	<i>Proteobacteria</i>	<i>pusillimonas</i>
Ugljikovi spojevi	<i>Proteobacteria</i>	<i>ralstonia</i>
Amonijak	<i>Proteobacteria</i>	<i>thiobacillus</i>
	<i>Thaumarchaeota</i>	<i>plantomycetaceae</i>

3.5.3 BIOREMEDIJACIJA ALGAMA

Alge su velika i raznolika polifiletska skupina koja se sastoji od pretežno vodenih i fotoautotrofnih organizama sa strukturama u rasponu od jednostaničnih do višestaničnih oblika poput divovske alge i morskih algi. Oni uključuju i prokariotske i eukariotske organizme.¹⁷³ Unatoč svim razlikama u osnovnoj staničnoj organizaciji, one mogu koristiti sunčevu energiju za asimilaciju anorganskih hranjivih tvari u organske tvari, stvarajući tako biomasu.

Stanice algi karakteriziraju sljedeća glavna svojstva: brza stopa rasta, lakoća rukovanja, zahtjev samo za svjetlom, CO₂ i mineralima za rast, sposobnost rasta u ekstremnim uvjetima okoliša, vrijedan biokemijski sastav (bogatstvo proteinima, lipidima i ugljikohidratima), nepotrebnost zemlje za uzgoj, uloga u vezivanju CO₂, veća stopa fiksacije ugljika od kopnenih biljaka, sposobnost razvijanja kisika kao nusproizvoda, sposobnost rasta u slatkim i slanim otpadnim vodama te sposobnost fiksacije dušika s pomoću odabranih vrsta algi.^{174,175} Osim toga, zbog vrlo raznolikih vrsta metabolizma algi, kao što su autotrofni, miksotrofni i heterotrofni, mogu se koristiti za obradu različitih vrsta otpadnih voda širokog intervala karakteristika dok istovremeno proizvode vrijednu biomasu.^{176,177} Alge također luče sekundarne metabolite koji inhibiraju daljnji rast patogenih organizama. One utječu na proces pročišćavanja otpadnih voda djelujući kao flokulanti, čime se povećava brzina sedimentacije.¹⁷⁸

U današnje se vrijeme uglavnom koriste dva različita procesa za bioremedijaciju otpadnih voda algama, aerobni i anaerobni. U aerobnim procesima alge se uzgajaju u otvorenim sustavima ili u jezercima, kao što su jezera s visokim udjelom algi, koja imaju nizak ugljični otisak i smanjene emisije stakleničkih plinova. Anaerobni proces provodi se u zatvorenom sustavu, koji uključuje cjevaste fotobioreaktore, fotobioreaktore s ravnim pločama i plastične vrećice u kojima se čimbenici okoliša mogu održavati za odgovarajući rast algi.¹⁷⁹ Alge mogu izdržati stres potencijalno toksičnih elemenata i zahtijevaju teške metale poput cinka, molibdena, mangana, željeza, kobalta, bakra i bora kao elemente u tragovima za svoj rast i metabolizam, međutim drugi potencijalno otrovni elementi poput kadmija, kroma, olova, arsena i žive su štetni za njih.¹⁸⁰ Toleriraju te potencijalno toksične elemente kroz različite mehanizme kao što su regulacija gena, imobilizacija teških metala, kelacija, isključivanje i proizvodnja različitih enzima koji smanjuju toksičnost tih tvari.¹⁸¹ Alge uklanjaju te štetne tvari iz otpadnih voda uglavnom putem biosorpcije i bioakumulacije. Biosorpcija je brz, reverzibilan, o metabolizmu neovisan, pasivni fizikalno-kemijski proces koji uključuje vezanje metalnih iona na mrtvu ili neaktivnu staničnu stijenu algi putem adsorpcije, elektrostatske interakcije, ionske izmjene, kelacije i mikroprecipitacije. Bioakumulacija živih stanica algi odvija se u

dvije faze. Početna faza je poput procesa pasivne biosorpcije, u kojoj se metalni ioni vežu na nekoliko veznih skupina kao što su hidroksil, fosforil, karboksil, amin, imidazol i sulfat prisutni na površini stanica algi. Tijekom druge faze, potencijalno toksični elementi mogu se aktivno transportirati unutar stanica algi po cijenu stanične energije.¹⁸²

Glavne alge koje se koriste za pročišćavanje koksinih otpadnih voda su *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum vitiosum*, *Chroococcus turgidus*, *Desmococcus olivaceus*, *Scenedesmus acutus*, *Scenedesmus dimorphus* i *Oocystis solitaria*, koje uklanjaju 42,7 % primarno NH_4^+N bez proizvodnje produkata ili koprodukata.¹⁸³ Među anorganskim izvorima dušika, alge preferirano preuzimaju amonijak zbog njegove energetski povoljne asimilacije i procesa izravne inkorporacije proteina.¹⁸⁴ Nitrat i nitrit se reduciraju u amonijak s pomoću nitrat-reduktaze, odnosno nitrit-reduktaze, za energetski zahtjevan unutarstanični unos. Uz anorganski dušik, alge također mogu asimilirati dušik iz širokog spektra organskih izvora kao što su aminokiseline, nukleozidi, purini i urea. Ugradnja organskog dušika unutar stanice algi može se dogoditi i u autotrofnim i u heterotrofnim uvjetima.¹⁸⁵ Stoga se sustav algi može vrlo učinkovito koristiti za uklanjanje hranjivih tvari iz izvora otpadnih voda u kojima se mogu uspješno ukloniti amonijevi ioni, nitrati, nitriti i ortofosfati.

3.5.4 ZAJEDNICA ALGI I BAKTERIJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

Zajednice algi i bakterija pokazuju bolju obradu otpadnih voda i učinkovitiji oporavak hranjivih tvari od pojedinačnih kultura.¹⁸⁶ Postupak se provodi izravnim i neizravnim ekološkim interakcijama između mikroalgi i bakterija otpadnih voda, uz detaljno poznavanje ekoloških interakcija između istih, koje mogu varirati od uzajamnosti ili komenzalizma do kompeticije ili amenzalizma.⁵ U odgovarajućim uvjetima, formiranje udruge algi i bakterija događa se tijekom nekoliko dana.

Alge i bakterije prisutne u udruzi moraju biti kompatibilne i promicati međusobni rast kroz složenu interakciju i razmjenu supstrata.¹⁹⁰ Mikroalge fiksiraju anorganske elemente u organske makromolekule putem fotosinteze, opskrbljujući bakterije kisikom i organskim spojevima potrebnim za njihov metabolizam. Bakterije potom razgrađuju organsku tvar i proizvode CO_2 iz aerobnog disanja, koji ulazi u fotosintetski put algi. I alge i bakterije proizvode tvari koje mogu potaknuti ili inhibirati međusobni rast, razmijeniti gene ili promijeniti ekspresiju gena. Kisik se koristi kao akceptor elektrona za metabolizam bakterija pri oksidaciji organske tvari i amonijaka. Ta međuovisnost potiče snažan rast algi i bakterija,

pomaže stabilizirati ekosustav protiv kontinuiranih oscilacija abiotičkih uvjeta te smanjuje vjerojatnost invazije drugih patogenih bakterija. Uzajamnost se također može pronaći u bakterijskoj opskrbi određenim vrstama algi vitaminom B12. Komenzalizam je vidljiv i u činjenici da samo alge imaju koristi od navedene interakcije, koristeći vitamin B12 proizveden bakterijskim metabolizmom. Nadalje, može se pojaviti parazitizam, u kojem mnoge bakterije liziraju stanice algi i koriste njihove hranjive tvari za rast.

Klasičan primjer zajednica algi i bakterija je međuodnos mikroalgi i bakterija koje oksidiraju amonijak, koji može biti povoljan i nepovoljan za partnera ovisno o uvjetima. Ako su uvjeti visokog pH, temperature i amonijskog dušika potražuju, sprječava se rast mikroalgi inhibiranjem njihovog metabolizma.¹⁸⁷ Natjecanje za amonijski dušik također može postojati pod različitim intenzitetom svjetla, a nakon nekoliko generacija bolji konkurent može nadživjeti drugoga i uspostaviti stabilnu zajednicu.¹⁸⁸

4 ZAKLJUČAK

Koksne vode su industrijske otpadne vode složene i toksične prirode koje sadrže mnogo sastojaka slabe biorazgradljivosti, kao što su policiklički aromatski ugljikovodici (PAH), fenolni spojevi, heterociklički spojevi, tiocijanat, amonijak i cijanid. Prisutni toksični spojevi skloni su bioakumulaciji u ekosustavu, što može uzrokovati štetu na okoliš i ljudsko zdravlje, zbog čega je izrazito važno pravovremeno i prikladno zbrinjavanje otpadne koksne vode. Glavni kontaminanti koji su razlog za zabrinutost su amonijak, fenolni spojevi koji su visoko topljivi u vodi, tiocijanati i cijanidni spojevi koji razgrađuju mikroorganizme te predstavljaju najveći problem biorazgradnji. Biološka obrada otpadnih voda jedna je od najvažnijih biotehnoloških primjena i, kao pokretači ključnih procesa, mikroorganizmi su ključni za njezin uspjeh. Jedinstvena sposobnosti mikroba jest da razgrade organsku tvar, uklone hranjive tvari i pretvore otrovne spojeve u bezopasne proizvode. Raznovrsni niz mikroorganizama, uključujući alge, gljive i bakterije, sposobni su provesti bioremedijaciju. Potrebno je više istraživanja da se razumiju funkcionalne sposobnosti mikrobnih zajednica u pročišćavanju otpadnih voda i koji se geni izražavaju pod kojim okolnostima, kako bi se bolje razumio odnos između strukture i funkcije u ovim procesima posredovanim mikroorganizmima.

5 LITERATURA

- 1 Vakula D., Kolli Y. K., Waste water management for smart cities. Proceedings of the International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS 2017), (2017) 275-279
- 2 Tušar B., Ispuštanje i pročišćavanje otpadne vode, CROATIA KNJIGA, Zagreb, 2004., str. 13-27, 38-40, 41-47
- 3 Zakon o vodama; NN 66/19, 84/21 (pristup 28.7.2023.)
- 4 Raper E., Stephenson T., Anderson D. R., Fisher R., Soares A., Industrial wastewater treatment through bioaugmentation, Process Safety and Environmental Protection, 118 (2018) 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.035>
- 5 Wang J., Wang X., Yu Z., Huang S., Yao D., Xiao J., Chen W., Wang Z., Zan F., Using algae bacteria consortia to effectively treat coking wastewater: Performance, microbial community, and mechanism, Journal of Cleaner Production, 334 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130269>
- 6 Hem J. D., Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, Reston, VA, 1959. http://pubs.usgs.gov/publication/wsp1473_ed1
- 7 Bengtsson L., The global atmospheric water cycle, Environmental Research Letters, 5 (2) (2010), <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025002>
- 8 Tomić, H., Obrada otpadnih voda: diplomski rad, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2019. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:451928>
- 9 Allan R. P., Barlow M., Byrne M. P., Cherchi A., Douville H., Fowler H. J., Gan T. Y., Pendergrass A. G., Rosenfeld D., Swann A. L. S., Wilcox L. J., Zolina O., Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1472(2020) 49-75. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>
- ¹⁰ Mark C. M. van Loosdrecht, Ekama G. A., Brdjanovic D., Biological Wastewater Treatment, IWA Publishing, 2008, Chapter 1., str. 33-46
- 9 Perić J., Vukojević Medvidović N., Nuić I., Inženjerstvo otpadnih voda – Priručnik za laboratorijske vježbe, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2012 (58-62)
- 10 Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, NN 26/2020 (pristup 28.8.2023.)
- 11 Ramalho R. S., CHAPTER 2 - Characterization of Domestic and Industrial Wastewaters, Introduction to Wastewater Treatment Processes, Academic Press, 2 (1983) 25-77
- 12 Zakon o vodama, NN 66/19, 84/21, 47/23 (pristup 24.3.2024.)

-
- 13 Lur'e, Yu Yu, Analytical chemistry of industrial waste water, Izdatel'stvo Khimiya, Moscow, USSR, 1984, Chapter 3
- 14 Denman, W. L., Maximum use of cooling water, *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, 53 (10) (1961) 817-822
- 15 Becker V., Schulz H. D., Hamer K., Reactive solute transport for seepage water prognosis - Seeper: a model for practical application, *GROUNDWASSER*; 12 (4) (2007) 282-291
- 16 Patil M., Saha A., Pingale S. M., Rathore D. S., Goyal V. C., Identification of potential zones on the estimation of direct runoff and soil erosion for an ungauged watershed based on remote sensing and GIS techniques, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8 (3) (2023) 224-238
- 17 Choe J.S., Bang K.W., Lee J.H., Characterization of surface runoff in urban areas, *Water Sci Technol*, 45 (9) (2002) 249–254. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0251>
- 18 E. Tilley; L. Ulrich, C. Lüthi; Ph. Reymond, C. Zurbrügg; *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*; 2nd Revised ed., Duebendorf, Switzerland, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2014
- 19 Qadir M., Wichelns D., Raschid-Sally L., McCornick P.G., Drechsel P., Bahri A., Minhas P.S., The challenges of wastewater irrigation in developing countries, *Agricultural Water Management*, 97 (4) (2010) 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>
- 20 Bedbabis S., Rouina B. B., Boukhris M., Ferrara G., Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate, *Journal of Environmental Management*, 133 (201) , 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.007>
- 21 Ahmed J. , Thakur A., Goyal A., *Industrial Wastewater and Its Toxic Effects*, The Royal Society of Chemistry, *Chemistry in the Environment*, 2021 ebook collection. <https://doi.org/10.1039/9781839165399-00001>
- 22 Trubetskaya A., Horan W., Conheady P., Stockil K., Merritt S., Moore S., A methodology for assessing and monitoring risk in the industrial wastewater sector, *Water Resources and Industry*, 25 (2021). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371721000093>
- 23 Zheng M., Zhu H., Han Y., Xu C., Zhang Z., Han H., Comparative investigation on carbon-based moving bed biofilm reactor (MBBR) for synchronous removal of phenols and ammonia in treating coal pyrolysis wastewater at pilot-scale. *Bioresour Technol.*, 288 (2019): 121590. doi:10.1016/j.biortech.2019.121590
- 24 Wang J., Ji Y., Zhang F., Wang D , He X., Wang C., Treatment of coking wastewater using oxic-anoxic-oxic process followed by coagulation and ozonation, *Carbon Resources Conversion*, 2 (2) (2019) 151-156. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2019.06.001>

-
- 25 Tchobanoglous G., Burton, F. L., Stensel Metcalf & Eddy, H. D., Wastewater engineering : treatment and reuse; 4th ed., McGraw-Hill; 2003
- 26 Jovičić, S., Sistemi za obradu otpadnih voda, Časopis Industrija, 2016
- 27 Sultan I. A., Treating metal finishing wastewater, Environmental Technology, 2011. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:40542417>
- 28 Heller M., Garlapati S., Aithala K., Expert membrane system design and selection for metal finishing waste water treatment, Expert Systems with Applications, 14 (3) (1998) 341-353. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(97\)00087-0](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(97)00087-0)
- 29 Carter V. E., Corrosion Testing for Metal Finishing: Institute of Metal Finishing, Elsevier, 2013.
- 30 Peitz S., Gräler M., Henke C., Hessel-von Molo M., Dellnitz M., Trächtler A., Multiobjective Model Predictive Control of an Industrial Laundry, Procedia Technology, 26 (2016) 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.061>
- 31 Procházková M., Máša V., 2022, Sustainable Wastewater Management in Industrial Laundries, Chemical Engineering Transactions, 94 (2022) 577-582
- 32 Wake H., Oil refineries: a review of their ecological impacts on the aquatic environment, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 62 (1–2) (2005) 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.08.013>
- 33 Jafarinejad S., Jiang S. C., Current technologies and future directions for treating petroleum refineries and petrochemical plants (PRPP) wastewaters, Journal of Environmental Chemical Engineering, 7 (5) (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103326>
- 34 Shu L., Mukherjee M., Pecht M., Crespi N., Han S. N., Challenges and Research Issues of Data Management in IoT for Large-Scale Petrochemical Plants, *IEEE Systems Journal*, 12 (3) (2018) 2509-2523. doi: 10.1109/JSYST.2017.2700268
- 35 Aznar-Sánchez J. A., García-Gómez J. J., Velasco-Muñoz J. F., Carretero-Gómez A., Mining Waste and Its Sustainable Management: Advances in Worldwide Research, *Minerals*, 8 (7) (2018) 284. <https://doi.org/10.3390/min8070284>
- 36 Yu H., Zahidi I., Fai C. M., Reclaiming abandoned mine tailings ponds for agricultural use: Opportunities and challenges, Environmental Research, 232 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116336>
- 37 Sharma R. K., Agrawal M., Biological effects of heavy metals: an overview. *Journal of environmental Biology*, 2005 (26) (2) 301-313. http://www.geocities.com/Lenviron_biol/

-
- 38 Gao C.-k., Zhang M.-h., Wei Y.-x., Na H.-m., Fang K.-j., Construction and analysis of “water carrier” and “water value” in the iron and steel production, *Journal of Cleaner Production*, 139 (2016) 540-547. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.076>
- 39 Beh C. L., Chuah T. G., Nourouzi M. N., Choong T. S. Y., Removal of Heavy Metals from Steel Making Waste Water by Using Electric Arc Furnace Slag, *E-Journal of Chemistry*, 9 (4) (2012) 2557-2564. <http://www.ejchem.net>
- 40 Staley, H.F., THE THEORY OF PICKLING OF SHEET IRON AND STEEL FOR ENAMELING PURPOSES. *Journal of the American Ceramic Society*, 9 (1926) 787-796. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1926.tb17958.x>
- 41 Gao C., Wang D., Dong H., Cai J., Zhu W., Du T., Optimization and evaluation of steel industry’s water-use system, *Journal of Cleaner Production*, 19 (1) (2011) 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.013>
- 42 Lopez A., RADIOLOGICAL ISSUES ASSOCIATED WITH THE RECENT BOOM IN OIL AND GAS HYDRAULIC FRACTURING, ASME 2013 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL REMEDIATION AND RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 1 (2013). <https://doi.org/10.1115/ICEM2013-96119>
- 43 Hill E., The fracking concern with water quality, *Science*, 373 (2021) 853-854. DOI:10.1126/science.abk3433
- 44 Warner N. R., Darrah T. H., Jackson R. B., Millot R., Kloppmann W., Vengosh A., New Tracers Identify Hydraulic Fracturing Fluids and Accidental Releases from Oil and Gas Operations, *Environmental Science & Technology* 2014 48 (21), 12552-12560. DOI: 10.1021/es5032135
- 45 Essien A. E., White K., Mohammadi M., Interrelationship study of the impacts of hydraulic fracturing on the environment and socioeconomic activities: a novel approach to finding sustainable solutions, *Environmental Science: Advances*, 1 (3) (2022) 305-319. <https://doi.org/10.1039/D2VA00023G>
- 46 Rosen M. A., Bulucea C. A., Mastorakis N. E., Bulucea C. A., Jeles A. C, Brindusa C. C, Evaluating the Thermal Pollution Caused by Wastewaters Discharged from a Chain of Coal-Fired Power Plants along a River, *SUSTAINABILITY*, 7 (5) (2015) 5920-5943. DOI: 10.3390/su7055920
- 47 Newhart K. B., Holloway R. W., Hering A. S., Cath T. Y., Data-driven performance analyses of wastewater treatment plants: A review, *Water Research*, 157 (2019) 498-513. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.030>

-
- 48 Wei L. L., Wang K., Zhao Q. L., Xie C. M., Characterization and transformation of dissolved organic matter in a full-scale wastewater treatment plant in Harbin, China, *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 46 (1-3) (2012) 295-303. DOI 10.1080/19443994.2012.677557
- 49 Cristian, O., “Characteristics of the untreated wastewater produced by food industry.” (2010). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127493944>
- 50 Nayyar D., Nawaz T., Noore S., Singh A. P., Food Processing Wastewater Treatment: Current Practices and Future Challenges. In: Singh, S.P., Rathinam, K., Gupta, T., Agarwal, A.K. (eds) *Pollution Control Technologies. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-16-0858-2_9
- 51 <https://www.micronicsinc.com/filtration-news/what-is-industrial-wastewater/> (pristup 30.12.2022.)
- 52 Jiang, W.-x., Zhang, W., Li, B.-j., Duan, J., Lv, Y., Liu, W.-d., & Ying, W.-c.; Combined Fenton oxidation and biological activated carbon process for recycling of coking plant effluent, *Journal of Hazardous Materials*, 189 (2011) 308-314
- 53 Zheng, M., Han, Y., Han, H., Xu, C., Zhang, Z., & Ma, W., Synergistic degradation on phenolic compounds of coal pyrolysis wastewater (CPW) by lignite activated coke-active sludge (LAC-AS) process: Insights into succession of microbial community under selective pressure, *Bioresource Technology*, 281 (2019) 126-134
- 54 Karri R. R., Ravindran G., Dehghani M. H., *Wastewater—Sources, Toxicity, and Their Consequences to Human Health*, Elsevier, (2021) 8-10. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00001-X>
- 55 F.F. Farris, Wexler P.(ed), *Encyclopedia of Toxicology*. Third ed., Academic Press, London, England, (2014) 1003-1006
- 56 Tamang M., Paul K. K., Advances in treatment of coking wastewater – a state of art review, *Water Sci. Technol.*, 85 (1) (2022) 449–473. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.497>
- 57 Zhang L., Wang G., Xue Q., Zuo H., She X., Wang J., Effect of preheating on coking coal and metallurgical coke properties: A review, *Fuel Processing Technology*, 221 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106942>
- 58 Pathak, U., Kumari, S., Das, P., Kumar, T. & Mandal, T., Role of advanced oxidation process in treatment of coke oven wastewater—a review., *Waste Water Recycling and Management*, Springer, Singapore, (2019) 37–51
- 59 Mishra L., Paul K. K., Jena S., Coke wastewater treatment methods: Mini review, *J. Indian Chem. Soc.*, 98 (2021) 100133. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100133>

-
- 60 Maiti D., Ansari I., Rather M. A., Deepa A., Comprehensive review on wastewater discharged from the coal-related industries – characteristics and treatment strategies, *Water Sci. Technol.*, 79 (11) (2019) 2023–2035. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.195>
- 61 Felföldi T., Nagymáté Z., Székely A. J., Jurecska L., Márialigeti K., Biological treatment of coke plant effluents: from a microbiological perspective, *Biol. Futura* 71 (2020) 359–370. <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00028-2>
- 62 Gao L., Li S., Wang Y., Sun H., Organic pollution removal from coke plant wastewater using coking coal. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 72 (1) (2015) 158–163. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.197>
- 63 Wang J., Chang F., Zheng M., Advanced Treatment of Coking Wastewater by Polyaluminum Silicate Sulfate for Organic Compounds Removal, *Int J Environ Res Public Health*, 20(14) (2023) 6342. <https://doi.org/10.3390/ijerph20146342>
- 64 Mondal A., Sarkar S., Nair U. G., Comparative characterization of cyanide-containing steel industrial wastewater, *Water Sci. Technol.*, 83 (2021) 322–330. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.563>
- 65 Li H., Cao H., Li Y., Zhang Y., Liu H., Innovative Biological, Process for Treatment of Coking Wastewater, *Environ. Eng. Sci.* 27 (2010) 313–322. <https://doi.org/10.1089/ees.2009.0281>
- 66 Fan L., Yao H., Deng S., Jia F., Cai W., Hu Z., Guo J., Li H., Performance and microbial community dynamics relationship within a step-feed anoxic/oxic/anoxic/oxic process (SF-A/O/A/O) for coking wastewater treatment, *Sci. Total Environ.* 792 (2021) 148263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148263>
- 67 Ji Q., Tabassum S., Hena S., Silva C. G., Yu G., Zhang Z., A review on the coal gasification wastewater treatment technologies: past, present and future outlook, *J. Cleaner Prod.*, 126 (2016) 38–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.147>
- 68 Gai H. J., Zhang X. W., Chen S., Wang C., Xiao M., Huang T. T., Wang J., Song H. B., An improved tar-water separation process of low-rank coal conversion wastewater for increasing the tar yield and reducing the oil content in wastewater, *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 383 (2020). DOI 10.1016/j.cej.2019.123229
- 69 Tučić A. et al., An Overview of Coking Wastewater Characteristics and Treatment Technologies, *Kem. Ind.*, 72 (5-6) (2023) 349–358
- 70 Dehua M., Cong L., Xiaobiao Z., Rui L., Lujun C., Acute toxicity and chemical evaluation of coking wastewater under biological and advanced physicochemical treatment processes.

-
- Environmental science and pollution research international, 23 (18) (2016) 18343–18352.
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-6882-z>
- 71 Duraisamy P., Sekar J., Arunkumar A. D., Ramalingam P. V., Kinetics of phenol biodegradation by heavy metal tolerant Rhizobacteria *Glutamicibacter Nicotianae* MMSRFPD35 from distillery effluent contaminated soils, *Front. Microbiol.* 11 (2020) 1573.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01573>
- 72 Hussain A., Dubey S. K., Kumar V., Kinetic study for aerobic treatment of phenolic wastewater, *Water Resour. Ind.* 11 (2015) 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.05.002>
- 73 Phalgune U. D., Rajamohan P. R., Gaikwad B. G., Varma R. J., George S., Biodegradation of phenol by the yeast *Candida tropicalis*: An investigation by NMR Spectroscopy, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 169 (2013) 2029–2037.
<https://doi.org/10.1007/s12010-013-0119-0>
- 74 Bodzek M., Bohdziewicz J., Kowalska M., Immobilized enzyme membranes for phenol and cyanide decomposition, *JOURNAL OF MEMBRANE SCIENCE*, 113 (2) (1996) 373–384.
DOI 10.1016/0376-7388(95)00299-5
- 75 Gümüş D., Akbal F., Comparison of Fenton and electro-Fenton processes for oxidation of phenol, *Process Safety and Environmental Protection*, 103 (Part A) 2016) 252–258.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.07.008>
- 76 Villegas L. G. C., Mashhadi N., Chen M. et al., A Short Review of Techniques for Phenol Removal from Wastewater. *Curr Pollution Rep* 2, 157–167 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s40726-016-0035-3>
- 77 Joshi D. R., Zhang Y., Tian Z., Performance and microbial community composition in a long-term sequential anaerobic-aerobic bioreactor operation treating coking wastewater. *Appl Microbiol Biotechnol* 100 (2016) 8191–8202. <https://doi.org/10.1007>
- 78 Yu X., Xu R., Wei C., Wu H., Removal of cyanide compounds from coking wastewater by ferrous sulfate: Improvement of biodegradability, *J. Hazard. Mater.*, 302 (2016) 468–474.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.013>
- 79 Kwiecinska A., Lajnert R., Bigda R., Coke oven wastewater – formation, treatment and utilization methods – a review, *Proceedings of ECOpole. Vol 11, Towarzystwo Chemii i Inżynierii Ekologicznej, Opole*, (2017) 19–28
- 80 Verma V., Chaudhari P. K., Optimization of multiple parameters for treatment of coking wastewater using Fenton oxidation, *Arabian J. Chem.* (2020) 5084–5095,
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.02.008>

-
- 81 Dash R. R., Gaur A., Balomajumder C., Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment, *Journal of Hazardous Materials*, 163 (1) (2009) 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.051>
- 82 Razanamahandry L. C., Andrianisa H. A., Karoui H., Kouakou K. M., Yacouba H., Biodegradation of free cyanide by bacterial species isolated from cyanide-contaminated artisanal gold mining catchment area in Burkina Faso, *Chemosphere*, 157 (2016) 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.020>
- 83 Park D., Kim Y. M., Lee D. S., Park J. M., Chemical treatment for treating cyanides-containing effluent from biological cokes wastewater treatment process, *Chemical Engineering Journal*, 143 (1–3) (2008) 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.12.034>
- 84 Prasad B., Singh G., Ammonia Removal From Wastewater With Special Emphasis on Coke-Oven Effluents. *Environ. Prot. Eng.*, 16 (3-4) (1991a) 39
- 85 Kim J., Cho K., Han G., Lee C., Hwang S., Effects of temperature and pH on the biokinetic properties of thiocyanate biodegradation under autotrophic conditions, *Water*, 47 (2013) 251–258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.003>
- 86 Raper E., Stephenson T., Fisher R., Anderson D. R., Soares A., Characterisation of thiocyanate degradation in a mixed culture activated sludge process treating coke wastewater, *Bioresour. Technol.*, 288 (2019) 121524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121524>
- 87 Staib C., Lant P., Thiocyanate degradation during activated sludge treatment of coke-ovens wastewater, *Biochemical Engineering Journal*, 34 (2) (2007) 122-130
- 88 Zhu X. L., Wang Y. Q., Liu W.L., Zhu T., Study on the characteristics of PAHs source profile of coke plant. *China Environ. Sci.*, 21 (2001) 266–269
- 89 Wang, Y., Cheng, K., Tian, H.-Z., Yi, P., & Xue, Z.-G., Analysis of Reduction Potential of Primary Air Pollutant Emissions from Coking Industry in China, *Taiwan Association for Aerosol Research*; 18 (2018) 533-541
- 90 Dehua M., Cong L., Xiaobiao Z., Rui L.,Lujun C., Acute toxicity and chemical evaluation of coking wastewater under biological and advanced physicochemical treatment processes, *Environmental science and pollution research international*, 23(18) (2016) 18343–18352. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6882-z>
- 91 Rodríguez-Loaiza D. C., Ramírez-Henao O., Peñuela-Mesa G. A., Assessment of toxicity in industrial wastewater treated by biological processes using luminescent bacteria, *Actual Biol* 38 (105): (2016) 211-216. DOI: 10.17533/udea.acbi.v38n105a08

-
- 92 Felföldi T., Nagymáté Z., Székely A. J., Jurecska L., Márialigeti K., Biological treatment of coke plant effluents: from a microbiological perspective, *Biol. Futura* 71 (2020) 359–370, <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00028-2>
- 93 Teh C. Y., Budiman P. M., Shak K. P. Y., Wu T. Y., Recent Advancement of Coagulation–Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55 (16) (2016) 4363-4389. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04703>
- 94 Cecen F., Aktas O., *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment: Integration of Adsorption and Biological Treatment*, John Wiley & Sons, (2011)
- 95 Wong S., Ngadi N., Inuwa I. M., Hassan O., Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review, *Journal of Cleaner Production*, 175 (2018) 361-375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.059>
- 96 Fathima N. N., Aravindhan R., Rao J. R., Nair B. U., Dye house wastewater treatment through advanced oxidation process using Cu-exchanged Y zeolite: A heterogeneous catalytic approach, 70 (6) (2008) 1146 – 1151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.033>
- 97 Salavati-Niasari M., Mohandes F., Davar F., Preparation of PbO nanocrystals via decomposition of lead oxalate, *Polyhedron*, 28 (11) (2009) 2263-2267. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2009.04.009>
- 98 Kumari P., Alam M., Siddiqi W. A., Usage of nanoparticles as adsorbents for waste water treatment: An emerging trend, *Sustainable Materials and Technologies*, 22 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00128>
- 99 Bixio D., De heyder B., Chikurel H., Muston M., Miska V., Joksimovic D., Schäfer A.I., Ravazzini A., Aharoni A., Savic D. and C. Thoeye. In: Proc. 4th IWA World Congress; 19-24 September 2004, Marrakech, Morocco
- 100 Metcalf L., Eddy H. P., Tchobanoglous G., *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3rd edition, Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill, Inc., (1991)
- 101 Adin A., Asano T., The role of physical-chemical treatment in wastewater reclamation and reuse, *Wat. Sci. Tech*, 37 (10) (1998) 79-90. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00306-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00306-0)
- 102 Alonso, E., Santos, A., Solis, G. J., and Riesco, P., 2001, ‘On the feasibility of urban wastewater tertiary treatment by membranes: A comparative assessment’, *Desalination*, 141 (1) 39– 51. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00387-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00387-3)
- 103 Zhou H., Smith D. W., *Advanced technologies in water and wastewater treatment*. *Canadian Journal of Civil Engineering.*, 28 (1) (2011) 49-66. <https://doi.org/10.1139/100-091>

-
- 104 Wintgens T., Melin T., Schäfer A., Khan S., Muston M., Bixio D., Thoeye C., The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse, *Desalination*, 178 (1–3) (2005) 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.014>
- 105 Poyatos J. M., Muñio M.M., Almecija M. C. et al., Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art. *Water Air Soil Pollut*, 205 (2010) 187–204. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1>
- 106 Adewuyi Y. G., *Sonochemistry: Environmental science and engineering applications*. Ind. Eng. Chem. Res., 40 (2001) 4681–4715
- 107 Wang J. W., Xu L. J., Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (3) (2011) 251-325. DOI: 10.1080/10643389.2010.507698
- 108 Gogate P. R., Pandit, A. B., A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Adv. Environ. Res.*, 8 (2004) 501–551
- 109 Ameta S. C., Ameta R., *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*, Academic Press, (2018)
- 110 Mahwi A. H., Application of Ultrasonic Technology for Water and Wastewater Treatment, *Iranian J Publ Health*, 38 (2) (2009) 1-17
- 111 Jiang Y, Petrier C. H., Waite T. D., Effect of pH on the ultrasonic degradation of ionic aromatic compounds in aqueous solution, *Ultrason Sonochem*, 9 (2002) 163-68
- 112 Laughrey Z., Bear E., Jones R., Tarr M. A., Aqueous sonolytic decomposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of additional dissolved species, *Ultrason Sonochem*, 8 (2001) 353-57
- 113 Visscher A. D., Langenhove H. V., Sonochemistry of organic compounds in homogeneous aqueous oxidizing system, *Ultrason Sonochem*, 5 (1998) 87-92
- 114 Laborde J. L., Acoustic cavitation field prediction at low and high frequency ultrasounds, *Ultrason Sonochem*, 36 (1998) 581-7
- 115 Santos A., Yustos P., Quintanilla A., et al., Route of the catalytic oxidation of phenol in aqueous phase. *Appl Catal B: Environ*, 39 (2002) 97–113
- 116 Moussavi G., Khavanin A., Alizadeh R., The investigation of catalytic ozonation and integrated catalytic ozonation/biological processes for the removal of phenol from saline wastewaters. *J Hazard Mater*, 171 (2009) 175–181
- 117 Liou R. M., Chen S. H., CuO impregnated activated carbon for catalytic wet peroxide oxidation of phenol. *J Hazard Mater*, 172 (2009) 498–506

-
- 118 Zazo J. A., Casas J. A., Mohedano A. F., et al., Catalytic wet peroxide oxidation of phenol with a Fe/active carbon catalyst. *Appl Catal B: Environ*, 65 (2006) 261–268
- 119 Herney-Ramirez J., Lampinen M., Vicente M. A., et al., Experimental design to optimize the oxidation of orange II dye solution using a clay-based Fenton-like catalyst. *Ind Eng Chem Res*, 47 (2008) 284–294
- 120 Brillas E., Martínez-Huitle C. A., Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review, *Applied Catalysis B: Environmental*, 166–167 (2015) 603–643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>
- 121 Ganiyu S. O., Zhou M., Martínez-Huitle C. A., Heterogeneous electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes: A critical review of fundamental principles and application for water/wastewater treatment, *Applied Catalysis B: Environmental*, 235 (2018) 103–129. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.04.044>
- 122 Ma P., Ma H., Sabatino S., Galia G., Scialdone O., Electrochemical treatment of real wastewater. Part 1: Effluents with low conductivity, *Chemical Engineering Journal*, 336 (2018) 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.046>
- 123 Martínez-Huitle C. A., Panizza M., Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment, *Current Opinion in Electrochemistry*, 11 (2018) 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.07.010>
- 124 Fujishima A., Honda K., Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature* 238 (1972) 37–38
- 125 Ameta R., Solanki M. S., Benjamin S., Ameta S. C., Chapter 6 - Photocatalysis, *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*, Academic Press, (2018) 135–175. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>
- 126 Ong C. B., Ng L. Y., Mohammad A. W., A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81 (2018) 536–551
- 127 Ferrera I., Sánchez O., Insights into microbial diversity in wastewater treatment systems: How far have we come?, *Biotechnology Advances*, 34 (5) (2016) 790–802. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.04.003>
- 128 Daims H., Taylor M. W., Wagner M., Wastewater treatment: a model system for microbial ecology, *Trends in Biotechnology*, 24 (11) (2006) 483–489. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2006.09.002>
- 129 Li Z., Wei C., Chen Y., Chen B., Qiu G., Wan J., Wu H., Zhu S., Zhao H., Achieving nitrification in an aerobic fluidized reactor for coking wastewater treatment: Operation stability,

mechanisms and model analysis, *Chem. Eng. J.*, 406 (2021) 126816, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126816>

130 Yang W., Wang J., Hua M., Zhang Y., Shi X., Characterization of effluent organic matter from different coking wastewater treatment plants, *Chemosphere*, 203 (2018) 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.167>

131 Yu X., Xu R., Wei C., Wu H., Removal of cyanide compounds from coking wastewater by ferrous sulfate: Improvement of biodegradability, *J. Hazard. Mater.*, 302 (2016) 468–474. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.013>

132 Lapara T. M., Alleman J. E., Thermophilic aerobic biological wastewater treatment, *Water Research* 33 (4) (1999) 895-908

133 Suvilampi J., Rintala J., Thermophilic aerobic wastewater treatment, process performance, biomass characteristics, and effluent quality, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2 (1) (2003) 35–51

134 Seghezzi L., Zeeman G., van Lier J. B., Hamelers H. V. M., Lettinga G., A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *BioresourTechnol*, 65 (3) (1998) 175-190

135 Fleck L., Tavares M. H. F., Eyng E., de M. de Andrade M. A., Frare L. M., Optimization of anaerobic treatment of cassava processing wastewater, *Eng. Agríc.* 37 (2017) 3

136 Gasparikova E., Kapusta S., Bodík I., Derco J., Kratochvil K., Evaluation of anaerobic-aerobic wastewater treatment plant operations. *Polish Journal of Environmental Studies* 14 (1) (2005) 29-34

137 Anijifor S. C., Jamil N. A. M., Jabbar S., Sakyat S., Gomes C., Aerobic and Anaerobic Sewage Biodegradable Processes: The Gap Analysis, *International Journal of Research in Environmental Science*, 3 (3) (2017) 9-19. <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9444.0303002>

138 Lapara T. M., Alleman J. E., Thermophilic aerobic biological wastewater treatment, *Water Research* 33 (4) (1999) 895-908

139 Suvilampi J., Rintala J., Thermophilic aerobic wastewater treatment, process performance, biomass characteristics, and effluent quality, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2 (1) (2003) 35–51

140 Aiyuk S. E., Forrez I., De Lieven K., Van Haandel A., Verstraete W., Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates- A review. *BioresourTechnol* 97 (2006) 2225-2241

-
- 141 Mahmoud N., Zeeman G., Gijzen H., Lettinga G., Anaerobic sewage treatment in a one stage UASB reactor and a combined UASB digester system, *Water Research*, 38 (9) (2004) 2347-2357
- 142 Amor C., Marchão L., Lucas M. S., Peres J. A., Application of Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Recalcitrant Agro-Industrial Wastewater: A Review, *Water*, 11 (2019) 205. <https://doi.org/10.3390/w11020205>
- 143 Oller I., Malato S., Sánchez-Pérez J. A., Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review, *Sci. Total Environ*, 409 (2011) 4141–4166
- 144 Deng Y., Zhao R., Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment, *Curr Pollution Rep*, 1 (2015) 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- 145 He L., Du P., Chen Y., Lu H., Cheng X., Chang B., Wang Z., Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71 (2017) 388-403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.069>
- 146 Isobe K., Ohte N., Ecological perspectives on microbes involved in N-cycling, *Microbes and Environments*, 29 (1) (2014) 4 – 16. DOI: 10.1264/jsme2.ME13159
- 147 Kong Y., Xia Y., Nielsen J. L., Nielsen P. H., Structure and function of the microbial community in a full-scale enhanced biological phosphorus removal plant, 153 (12) (2007) 4061 – 4073, DOI: 10.1099/mic.0.2007/007245-0
- 150 Brim H. et al., Engineering *Deinococcus radiodurans* for metal remediation in radioactive mixed waste environments. *Nature Biotechnology*, 18 (1) (2000) 85-90
- 148 Sharma P., Pandey A. K., Kim S. H., Singh S. P., Chaturvedi P., Varjani S., Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater, *Environmental Technology and Innovation*, 24 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101826>
- 149 Saeed M. U., Hussain N., Sumrin A., Shahbaz A., Noor S., Bilal M., Aleya L., Iqbal H. M. N., Microbial bioremediation strategies with wastewater treatment potentialities – A review, *Science of The Total Environment*, 818 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151754>
- 150 Wu D., Yi X., Tang R., Feng C., Wei C., Single microbial fuel cell reactor for coking wastewater treatment: Simultaneous carbon and nitrogen removal with zero alkaline consumption, *Sci. Total Environ*, 621 (2018) 497–506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.262>

-
- 151 Zhu S., Wu H., Wu C., Qiu G., Feng C., Wei C., Structure and microbial community involved in a novel full-scale prefix oxidic coking wastewater treatment O/H/O system, *Water Res.* 164 (2019) 114963, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114963>
- 152 Akhtar S., Mahmood-ul-Hassan M., Ahmad R., Suthor V., Yasin M., Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluent. *Soil Environ*, 32 (2013) 55–62
- 153 Llado´ S., Covino S., Solanas A. M., Vinas M., Petruccioli M., Dannibale A., Comparative assessment of bioremediation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil. *J Hazard Mater*, 248–249 (2013) 407–414. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.01.020
- 154 Chang Y. T., Lee J. F., Liu K. H., Liao Y. F., Yang V., Immobilization of fungal laccase onto a nonionic surfactant-modified clay material: application to PAH degradation. *Environ Sci Pollut Res.* (2015) doi:10.1007/s11356-015-4248-6
- 155 Godjevargova T., Ivanova D., Aleksieva Z., Burdelova G., Biodegradation of phenol by immobilized *Trichosporon cutaneum* R57 on modified polymer membranes, *Process Biochemistry*, 41 (11) (2006) 2342-2346. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.05.012>
- 156 Lu Y., Yan L., Wang Y., Zhou S., Fu J., Zhang J., Biodegradation of phenolic compounds from coking wastewater by immobilized white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*, *Journal of Hazardous Materials*, 165 (1–3) (2009) 1091-1097. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.091>
- 157 Deshmukh R., Khardenavis A. A., Purohit H. J., Diverse Metabolic Capacities of Fungi for Bioremediation. *Indian J Microbiol*, 56 (3) (2016) 247-64, doi: 10.1007/s12088-016-0584-6
- 158 Mouhamadou B., Faure M., Sage L., Marc,ais J., Souard F., Geremia R. A., Potential of autochthonous fungal strains isolated from contaminated soils for degradation of polychlorinated biphenyls. *Fungal Biol* 117 (2013) 268–274. doi:10.1016/j.funbio.2013.02.004
- 159 Marco-Urrea E., Garcí'a-Romera I., Aranda E., Potential of non-ligninolytic fungi in bioremediation of chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons. *New Biotechnol.* (2015) doi:10.1016/j.nbt.2015.01.005
- 160 Wu J., Zhao Y., Liu L., Fan B., Li M., Remediation of soil contaminated with decarbrominated diphenyl ether using white rot fungi. *J Environ Eng Landsc Manag* 21 (2013)

-
- 161 Turlo J., The biotechnology of higher fungi-current state and perspectives. *Folia Biol Oecol*, 10 (2014) 49–65. doi:10.2478/fobio-2014-0010
- 162 Ellegaard-Jensen L., Aamand J., Kragelund B. B., Johnsen A. H., Rosendahl S., Strains of the soil fungus *Mortierella* show different degradation potentials for the phenylurea herbicide diuron. *Biodegradation* 24 (2013) 765–774. doi:10.1007/s10532-013-9624-7
- 163 Rosales E., Pazos M., A´ngeles Sanroma´n M., Feasibility of solid-state fermentation using spent fungi-substrate in the biodegradation of PAHs. *CLEAN Soil Air Water* 41 (2013) 610–615. doi:10.1002/clen.201100305
- 164 Martins M. R., Pereira P., Lima N., Cruz-Morais J., Degradation of Metalaxyl and Folpet by filamentous fungi isolated from Portuguese (Alentejo) vineyard soils. *Arch Environ Contam Toxicol* 65 (2013) 67–77. doi:10.1007/s00244-013-9877-5
- 165 Purnomo A. S., Mori T., Putra S. R., Kondo R., Biotransformation of heptachlor and heptachlor epoxide by white-rot fungus *Pleurotus ostreatus*. *Int Biodeterior Biodegradation*, 82 (2013) 40–44. doi:10.1016/j.ibiod.2013.02.013
- 166 Silambarasan S., Abraham J., Ecofriendly method for bioremediation of chlorpyrifos from agricultural soil by novel fungus *Aspergillus terreus* JAS1. *Water Air Soil Pollut*, 224 (2013) 1369. doi:10.1007/s11270-012-1369-0
- 167 Akhtar S., Mahmood-ul-Hassan M., Ahmad R., Suthor V., Yasin M., Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluent. *Soil Environ*, 32 (2013) 55–62
- 168 Kurniati E., Arfarita N., Imai T., Higuchi T., Kanno A., Yamamoto K., Sekine M., Potential bioremediation of mercury-contaminated substrate using filamentous fungi isolated from forest soil. *J Environ Sci*, 26 (2014) 1223–1231. doi:10.1016/S1001-0742(13)60592-6
- 169 Bolan N. S., Choppala G., Kunhikrishnan A., Park J., Naidu R., Microbial transformation of trace elements in soils in relation to bioavailability and remediation. In: D Whitacre, (Eds), *Reviews of environmental contamination and toxicology. reviews of environmental contamination and toxicology*, 225 (2013) 156. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6470-9_1
- 170 Bouabidi Z. B., El-Naas M. H., Zhang Z., Immobilization of microbial cells for the biotreatment of wastewater: a review. *Environ Chem Lett*, 17(1) (2019) 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0795-7>
- 171 Gao J., Ellis L. B., Wackett L. P., The University of Minnesota biocatalysis/biodegradation database: improving public access. *Nucl Acids Res*, 38 (2010) 488–491. <https://doi.org/10.1093/nar/gkp771>

-
- 172 Ziemińska-Buczyńska A., Ciesielski S., Żabczyński S. et al., Bacterial community structure in rotating biological contactor treating coke wastewater in relation to medium composition, *Environ Sci Pollut Res* 26, (2019) 19171–19179. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05087-0>
- 173 Saber A. A., El-Refaey A. A., Saber H., Singh P., van Vuuren S. J., Cantonati M., Cyanoprokaryotes and algae: classification and habitats. In: *Handbook of Algal Biofuels*. Elsevier, (2022) 1–38. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823764-9.00024-8>
- 174 Pacheco D., Rocha A. C., Pereira L., Verdelhos T., Microalgae water bioremediation: trends and hot topics. *Appl Sci* 10(5) (2020) 1886. <https://doi.org/10.3390/app10051886>
- 175 Iglina T., Iglina P., Pashchenko D., Industrial CO₂ capture by algae: a review and recent advances. *Sustainability* 14(7) (2022) 3801. <https://doi.org/10.3390/su14073801>
- 176 Matamoros V., Gutiérrez R., Ferrer I., García J., Bayona J. M., Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: a pilot-scale study. *J Hazard Mater* 288 (2015) 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.002>
- 177 Udaiyappan A. F. M., Hasan H. A., Takriff M. S., Abdullah S. R. S., A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. *J Water Process Eng* 20 (2017) 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.09.006>
- 178 Pieterse A. J. H., Cloot A., Algal cells and coagulation, flocculation and sedimentation processes. *Water Sci Technol* 36(4) (1997) 111–118. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00427-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00427-7)
- 179 Kaloudas D., Pavlova N., Penchovsky R., Phycoremediation of wastewater by microalgae: a review. *Environ Chem Lett* 19(4) (2021) 2905–2920. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01203-0>
- 180 Monteiro C. M., Castro P. M., Malcata F. X., Metal uptake by microalgae: underlying mechanisms and practical applications. *Biotechnol Prog* 28(2) (2012) 299–311. <https://doi.org/10.1002/btpr.1504>
- 181 Manikandan A., Suresh Babu P., Shyamalagowri S., Kamaraj M., Muthukumaran P., Aravind J., Emerging role of microalgae in heavy metal bioremediation. *J Basic Microbiol* 62(3–4) (2022) 330–347. <https://doi.org/10.1002/jobm.202100363>
- 182 Bolan N. S., Choppala G., Kunhikrishnan A., Park J., Naidu R., Microbial transformation of trace elements in soils in relation to bioavailability and remediation. In: D Whitacre, (Eds), *Reviews of environmental contamination and toxicology*. reviews of environmental

-
- contamination and toxicology, 225 (2013). Springer, New York, NY.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6470-9_1
- 183 Nagi G., Chetry R., Singh N., Sinha A., Shinde O. A., Bioremediation of coke plant wastewater from steel industry with mixed activated sludge–microalgal consortium in lab-scale semi-continuous mode. *J Chem Technol Biotechnol* 96(8) (2021) 2249–2256.
<https://doi.org/10.1002/jctb.6749>
- 184 Bolan N. S., Saggiar S., Luo J. F., Bhandral R., Singh J., Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures, Processes, measurements and modelling, environmental implications, and mitigation, *Advances in Agronomy*, 84. Elsevier academic pressinc, (2004).
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)84002-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)84002-1)
- 185 Feng W., Zhu Y., Wu F., He Z., Zhang C., Giesy J. P., Forms and lability of phosphorus in algae and aquatic macrophytes characterized by solution ³¹P NMR coupled with enzymatic hydrolysis. *Sci Rep* 6 (2016) 37164. <https://doi.org/10.1038/srep37164>
- 186 Wang J., Wang X., Yu Z., Huang S., Yao D., Xiao J., Chen W., Wang Z., Zan F., Using algae bacteria consortia to effectively treat coking wastewater: Performance, microbial community, and mechanism, *Journal of Cleaner Production*, 334 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130269>
- 190 Liu J., Wu Y., Wu C., Muylaert K., Vyverman W., Yu H. Q., Munoz R., Rittmann B., Advanced nutrient removal from surface water by a consortium of attached microalgae and bacteria: a review. *Bioresour Technol*, 241 (2017) 1127-e1137.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.054>
- 187 Rossi S., Díez-Montero R., Rueda E., Castillo Cascino F., Parati K., García J., Ficara E., Free ammonia inhibition in microalgae and cyanobacteria grown in wastewaters: photo-respirometric evaluation and modelling. *Bioresour Technol*, 305 (2020) 123046.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123046>
- 188 González-Camejo J., Jiménez-Benítez A., Ruano M. V., Robles A., Barat R., Ferrer J., Optimising an outdoor membrane photobioreactor for tertiary sewage treatment. *J Environ Manage*, 245 (2019) 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.010>

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI

IME I PREZIME: Ana Coban

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

RADNO ISKUSTVO

2023. – trenutno, PLIVA Hrvatska d.o.o.

- Rad u proizvodnji

2021. – 2023. Desigual, Jankomir 33, CCW

- Prodajni savjetnik

2019. – 2022. Kaleo Edoceo, Palinovečka ulica 19, Zagreb

- Pomoć pri učenju, održavanje privatnih i grupnih instrukcija

OBRAZOVANJE

2020. –

- Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Ekoinženjerstvo, Zagreb, Hrvatska

2018. – 2020.

- Prirodoslovno matematički fakultet, smjer Kemija, Zagreb, Hrvatska

2014. – 2018.

- Gimnazija Lucijana Vranjanina, Zagreb, Hrvatska
- Umjetnička plesna škola Silvije Hercigonje, Zagreb, Hrvatska

2006. – 2014.

- Osnovna škola Malešnica, Zagreb, Hrvatska
- Osnovna škola za balet i ritmiku, Zagreb, Hrvatska

KVALIFIKACIJE

- STRANI JEZICI

Engleski jezik, znanje odlično (govor, čitanje, pisanje)

Njemački jezik, znanje dobro (govor, čitanje, pisanje)

- ORGANIZACIJSKE VJEŠTINE

Izvršno upravljanje vremenom i prilagodba na nove situacije usavršeno pohađanjem dvije škole istovremeno.

Spremnost na timski rad.

Iskustvo u komunikaciji s ljudima.

- VOZAČKA DOZVOLA

Vozačka dozvola B kategorije