



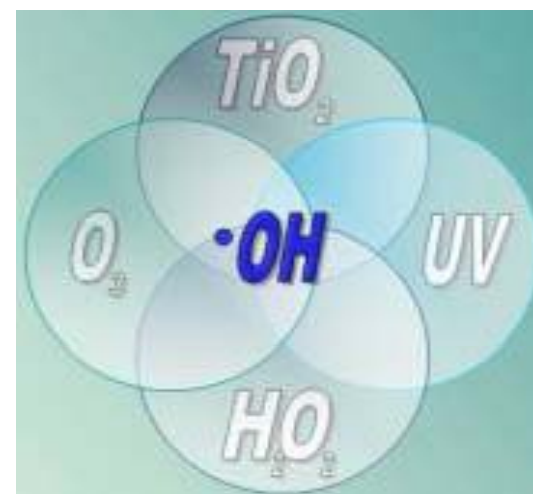
UNAPREĐENI PROCESI OKSIDACIJE U TRETMANU VODE

Dr Jasmina Agbaba



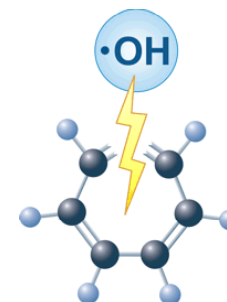
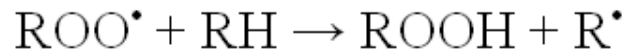
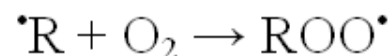
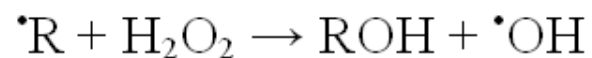
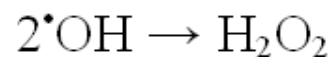
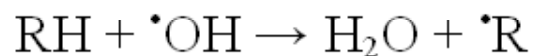
AOPs - *tretmani 21. veka*

- **Princip:** generisanje visoko reaktivnih intermedijera kao što su $\cdot\text{OH}$ radikali.
- **Primena:** u tretmanu otpadnih voda, u tretmanu vode za piće.
- U tretmanu vode za piće AOPs se najčešće primenjuju za degradaciju:
 - *prirodnih komponenti koje vodi daju miris (geosmin, 2-metil izoborneol i dr.)*
 - *fenola*
 - *hlorovanih ugljovodonika (trihloreten i tetrahloreten i dr.)*
 - *prirodnih organskih materija (POM)*



Mehanizam

- U zavisnosti od prirode organske komponente postoje dva tipa inicijalnog napada:
 - *hidroksil radikal može da preuzme atom vodonika (npr. alkani ili alkoholi)*
 - *može se adirati na molekul kontaminanta (npr. olefine ili aromatična jedinjenja).*
- Uobičajena reakcija podrazumeva preuzimanje vodonikovog atoma, čime se inicira reakcija oksidacije radikalskim mehanizmom:





Najviše ispitivani unapređeni procesi oksidacije za tretman vode

Ne-fotohemijski procesi	Fotohemijski procesi
Ozonizacija u baznoj sredini ($\text{pH} > 8,5$)	Procesi oksidacije na bazi UV zračenja
$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ($\lambda \leq 300 \text{ nm}$)
Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$)	O_3/UV ($\lambda \leq 320 \text{ nm}$)
Fenton-slični procesi („Fenton-like“)	$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ($\lambda \leq 320 \text{ nm}$)
Ultrazvuk (US)	Foto-Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) ($\lambda \leq 550 \text{ nm}$)
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$	Fotoelektro-Fenton ($\lambda \leq 550 \text{ nm}$)
O_3/US	Heterogena fotokataliza (TiO_2/UV)
Fenton/US	Sonofotokataliza
Elektrohemijska oksidacija	Fotoliza vode u ultravakuumu (VUV)
Oksidacija u superkritičnoj vodi	($\lambda \leq 190 \text{ nm}$)
Jonizacija	Mikrotalasi
Oksidacija vlažnim vazduhom	



Ne-fotohemijski unapređeni procesi oksidacije

- Za generisanje hidroksil radikala bez upotrebe svetlosne energije u tretmanu vode za piće najčešće primenjivane metode su:
 - *Ozonizacija u baznoj sredini (pH>8,5),*
 - *Kombinacija ozona i vodonik peroksida*
 - *Fentonov sistem*

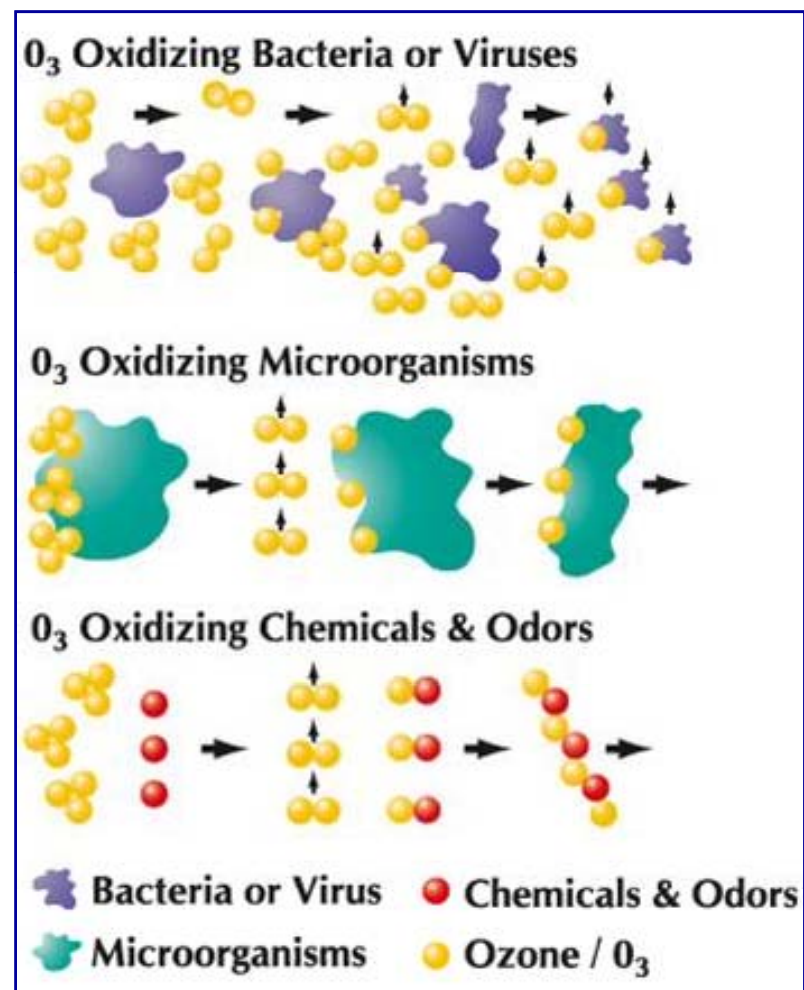




Ozonizacija u baznoj sredini ($\text{pH} > 8,5$)

Ozon se primenjuje za:

1. *dezinfekciju,*
2. *oksidaciju gvožđa i mangana,*
3. *oksidaciju sulfida,*
4. *oksidaciju jedinjenja koja daju miris i ukus,*
5. *oksidaciju mikropolutanata,*
6. *uklanjanje boje, primarno kroz oksidaciju,*
7. *kontrolu dezinfekcionih nusproizvoda,*
8. *redukciju potrebe za hlorom kroz oksidaciju i dr.*



Reakcije ozona sa materijama prisutnim u vodi:

- *reakcije selektivne oksidacije*
- *reakcije radikalskog tipa - neselektivne.*

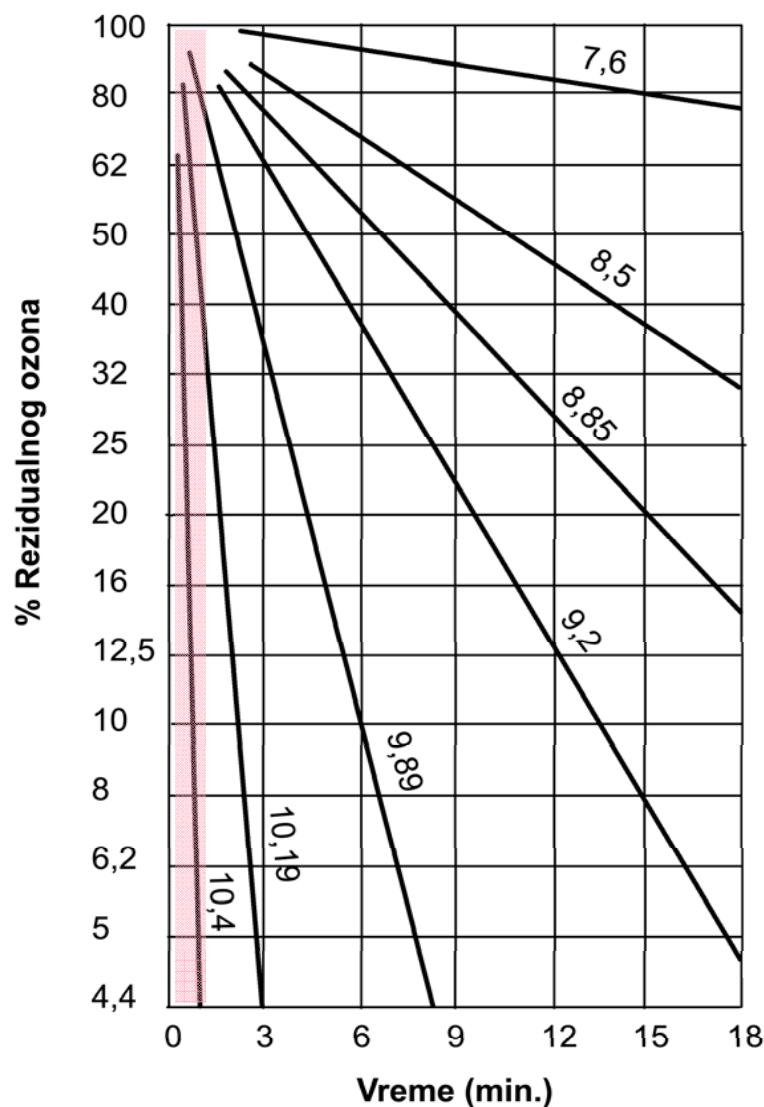
Uticaj matriksa na dekompoziciju ozona:

- *pH*
- *alkaliteta,*
- *ukupnog organskog ugljenika*
- *Inicijatora - hidroksidni joni, POM*
- *Inhibitora – bikarbonati, karbonati*

Cikličan proces dekompozicije ozona u čistoj vodi mora biti **iniciran reakcijom ozona i hidroksidnih anjona**:



Proces dekompozicije ozona ubrzava se pri višim pH vrednostima vode, jer sa porastom pH vrednosti raste i formiranje hidroksidnih anjona.



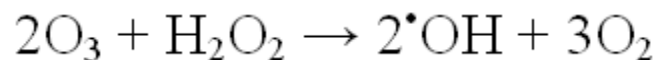
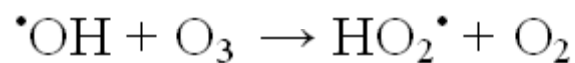
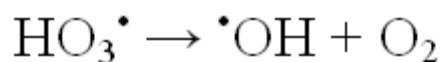
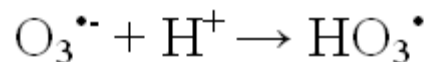
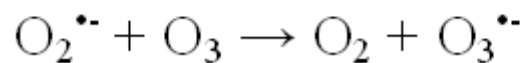
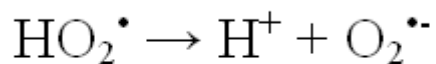
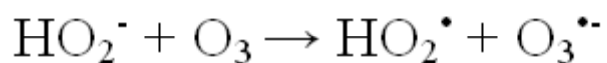
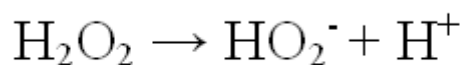
Uticaj pH na dekompoziciju ozona
($T=15^{\circ}\text{C}$)

- **pH>10**, vreme poluraspada ozona u vodi može biti **manje od 1 min.**
- Drugi inicijatori: gvožđe, POM, vodonik-peroksid i dr.
- Brzina oksidativnog napada OH radikala najčešće 10^6 - 10^9 puta > od brzine reakcije molekulskim O_3 .
- **Kontinuitet ciklusa zavisi od:**
 - reakcije $\cdot\text{OH}$ sa rezidualnim O_3 ,
 - inhibitora radikalskog procesa "skavendžera" slobodnih radikala (HCO_3^- , CO_3^{2-}) - bez regeneracije anjona superoksida $\text{O}_2^{\cdot-}$.



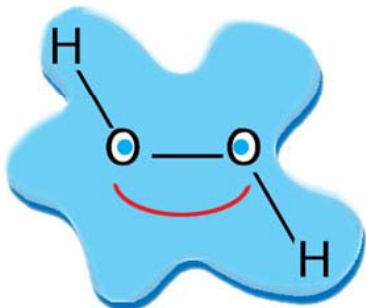
Ozon/vodonik peroksid (O_3/H_2O_2) - **PEROXONE®**

- Jedan od najčešće primenjivanih unapređenih procesa oksidacije u tretmanu vode za piće
- Transformacija ozona i formiranje hidroksil radikala je ubrzano dodatkom vodonik peroksida:





Vodonik peroksid može biti dodat
posle ozona, pre ozona i simultano.



- Praksa:

1. O_3 - relativno selektivan

2. H_2O_2 - stvaraju se OH radikali sposobni da reaguju sa teško oksidabilnim materijama.

- OH radikali mogu da reaguju sa skoro svim **organskim** (*masti, aromati, alifati*) i **neorganskim** (*anjoni i katjoni*) vrstama - O_3/H_2O_2 proces može imati višestruku ulogu u tretmanu vode:

- *uklanjanje komponenti koje daju miris i ukus vodi,*
- *različitih organskih polutanata,*
- *volatilnih organskih jedinjenja,*
- *prirodnih organskih materija,*
- *dezinfekcionih nusprodukata*
- *dezinfekcija vode.*



Efikasnost oksidacije organskih i neorganskih konstituenata vode primenom O_3/H_2O_2 procesa zavisi od:

O_3 je reaktivniji sa POM i neorganskim materijama nego H_2O_2 - primenjena doza ozona mora biti viša od one određene stehiometrijom.

Ozona radikalizuje organske materije. Višak inhibira reakcije. Izbor koncentracije ozona i vodonik peroksida, kao i njihov odnos kojim će se postići optimalna degradacija, zavisi kako od vrste i koncentracije polutanata, tako i od karakteristika vode, i mora se ustanoviti za svaki specifičan slučaj kroz primenu laboratorijskih eksperimenata.

- doze ozona,
- doze vodonik peroksida,
- njihovog međusobnog odnosa,
- pH vrednosti vode,
- vremena kontakta,
- alkaliteta vode,
- prisustva jona „skavendžera“ slobodnih radikala i
- početne koncentracije organskih kontaminanata.





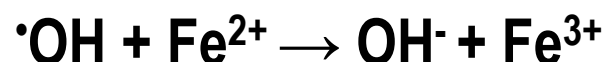
Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) i Fenton-slični procesi

- Oksidacioni proces koji podrazumeva aktiviranje vodonik peroksida solima gvožđa:

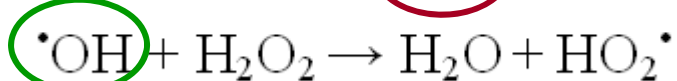
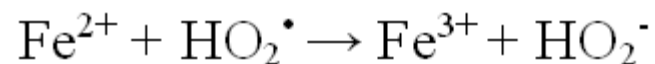
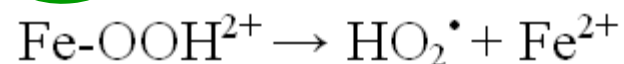
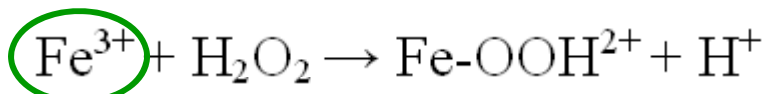
inicijacija lančane reakcije:



terminacija lančane reakcije:



Joni Fe^{2+} i različite radikalske vrste se ponovo generišu:



• Primena:

- tretman visoko zagađenih otpadnih voda,
- u procesu pripreme vode za piće, za tretman voda bogatih POM



Ključni faktori koji utiču na Fenton proces:

- **reagensi :**

- koncentracije i odnos $[\text{Fe}^{2+}]$, $[\text{Fe}^{3+}]$ i $[\text{H}_2\text{O}_2]$
 - *količina Fe^{2+} veća od $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow$ efekat hemijske koagulacije;*
 - *u slučaju viška H_2O_2 u odnosu na $\text{Fe}^{2+} \rightarrow$ efekat hemijske oksidacije*

- **reakcioni uslovi:**

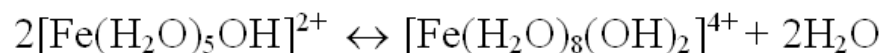
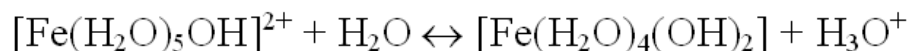
- pH vrednost (pH 2-4, *najefikasniji pri pH~2,8*),
- reakciono vreme,
- količina organskih i neorganskih konstituenata vode,
- prisustvo „skavendžera“ OH radikala.



Primena soli Fe^{2+} i Fe^{3+} obično je vezana za dva problema:

- Potrebno je uspostaviti uzak opseg pH vrednosti kako bi se izbeglo formiranje i dalja precipitacija gvožđe oksihidroksida i*
- Potrebno je regenerisati rastvorene jone gvožđa iz tretiranog rastvora, što zahteva dodatan korak obrade.*

- Dodatak organskih liganada - kompleksiranje Fe^{3+} , omogućava odvijanje Fentonovog procesa i pri višim pH vrednostima – kompleksiranjem se ograničava gubitak Fe^{3+} precipitacijom oksihidroksida.



- Povećanje koncentracije organskih komponenti → smanjenju brzine oksidacije kontaminanta.



Značajno smanjenje koncentracije rastvorenog gvožđa u vodi može se postići

- primenom **heterogenog Fentonovog procesa** - gvožđe ostaje na čvrstoj fazi, kao mineral ili adsorbovani jon.
- Imobilizacija Fentonovog katalizatora na heterogenom matriksu omogućila bi njegovu jednostavanu regeneraciju iz tretiranog efluenta, a takođe i primenu ovog procesa pri pH vrednostima bliskim neutralnoj.
- Neki od ovih procesa su: *heterogeni Fenton procesi sa oksidima gvožđa, procesi sa jonima gvožđa imobilisanim na čvrstom medijumu (membrane, zeoliti, organski materijali, modifikovani poli-etilen film i dr), elektrohemijski Fenton procesi, kuplovani Fenton-mikrobiološki procesi i dr.*

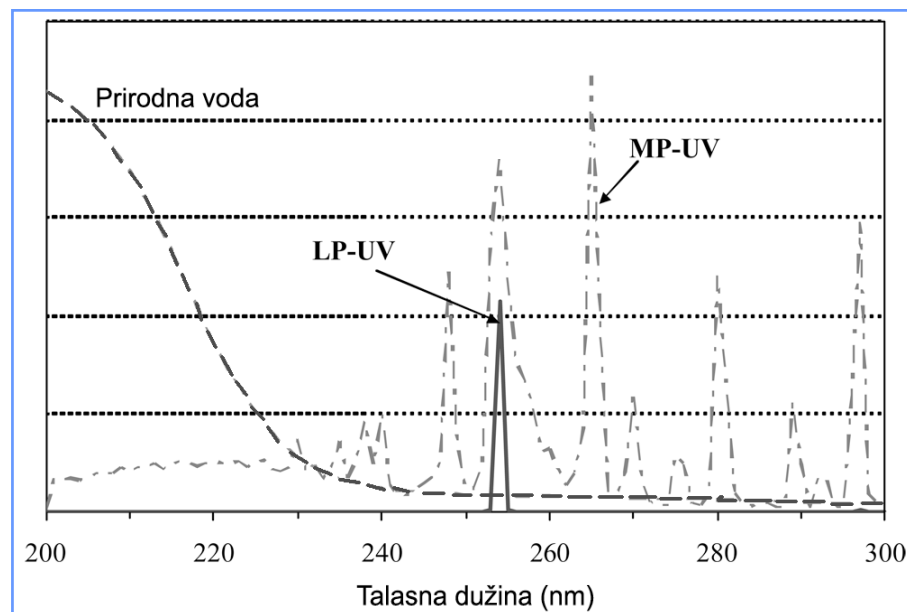


“Fenton –slični” procesi

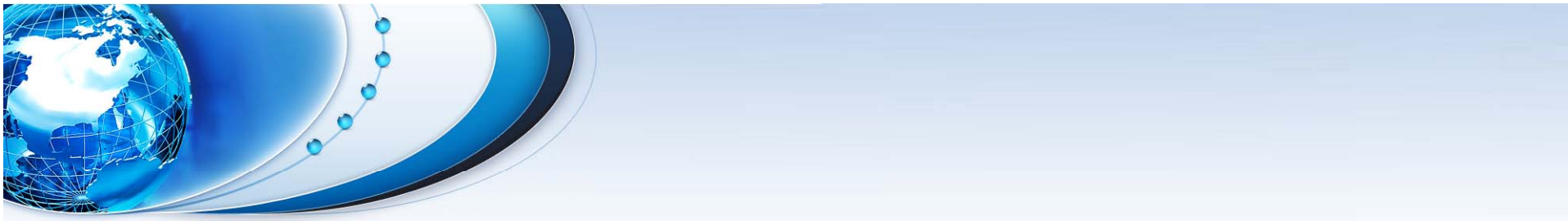
- Prelazni metali: Cu(I), Cr(II), Co(II) i Ti(III)) - imaju oksidativne karakteristike Fentonove reakcije - **Fenton-slični reagensi**
- **Fenton-slični procesi**
- **Fenton i Fenton-slični procesi** imaju širok opseg mogućnosti primene u tretmanu otpadnih voda, remedijaciji zemljišta i podzemnih voda, i delimičan u tretmanu vode za piće.
 - *U tretmanu vode za piće, gvožđe primenjeno u Fentonovom procesu može poslužiti kao zamena za deo doziranog gvožđa tokom procesa koagulacije.*
 - *Niža produkcija mulja u poređenju sa konvencionalnim procesima obrade vode - Fentonov proces može biti pogodan za tretman vode kontaminirane organskim komponentama, primenom postojećeg koagulaciono-flokulacionog postrojenja.*

Fotohemijski procesi

- Kompletna oksidacija / oksidativna destrukcija jedinjenja rezistentnih na oksidaciju ozonom ili H_2O_2 se može **poboljšati primenom UV zračenja**.
- UV zračenje - elektromagnetno zračenje talasne dužine 4-400 nm.
- Konvencionalni živini izvori UV zračenja za tretman vode su:
 - Hg lampa niskog pritiska (LP-UV) (predominantno emituje na 253,7 nm) i
 - Hg lampa srednjeg pritiska (MP-UV) (emisioni spektar 200-800 nm).



Emisioni spektar UV lampi niskog i srednjeg pritiska i apsorbancija prirodne vode



- Za generisanje hidroksil radikala uz upotrebu svetlosne energije u tretmanu vode najčešće primenjivane metode su:
 - *UV-VUV fotoliza,*
 - *Vodonik peroksid/UV zračenje*
 - *Ozon/UV zračenje*
 - *Ozon/vodonik-peroksid/UV*
 - *Foto-Fenton procesi*
 - *Fotokatalitička oksidacija (TiO_2/UV)*





UV i VUV fotoliza

- Opseg UV spektra koji je interesantan za primenu **UV fotolize u vodi je 200-280 nm (UV-C)**.
- U ovom delu spektra apsorbuju i organski polutanti i konstituenti vode (rastvorene organske i neorganske materije):
 - *dekompozicija direktnom fotolizom (usled raskidanja veza u molekulima)*
 - *ekscitacija i veća reaktivnosti prema hemijskom oksidantu.*
- Direktna UV fotoliza ima ograničenu primenu:
 - za oksidaciju samo onih komponenti koje imaju **visok molarni apsorpcioni koeficijent i kvantni prinos** (npr. POM, NO_3^- - prevashodno apsorbuju zračenje nižih talasnih dužina u opsegu UV-C).

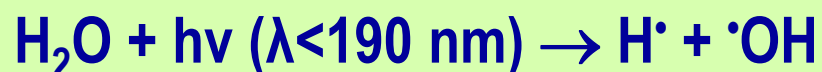


Primena UV / VUV zračenja

- Za dezinfekciju vode – najčešće UV doze u opsegu 20–40 mJ/cm² primenom UV lampi srednjeg pritiska (MP).
 - omogućava efikasnu inaktivaciju *Cryptosporidium parvum* oocysts.

- Za direktnu fotolizu vode - **vakuum UV zračenje (VUV) u opsegu 100-200 nm.**

- nastaju OH i H radikali, koji su veoma efikasni za UV-oksidacioni proces:



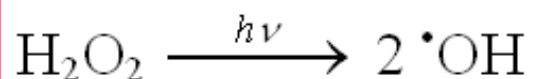
- UV (254 nm) i vakuum UV (185 nm + 254 nm) iradijacija - predtretman za biološki proces ili tretman za uklanjanje POM iz vode.
- Za sada, VUV ima ograničenu komercijalnu primenu za pripremu ultračiste vode.



Vodonik peroksid / UV zračenje (H_2O_2 / UV)

- Dva osnovna mehanizma:

- *apsorpcija UV fotona i ekscitacija molekula → rezultuje raskidanjem veza u molekulu i*
- *reakcija organskih polutanata sa OH radikalima formiranim u reakciji između H_2O_2 i UV fotona:*



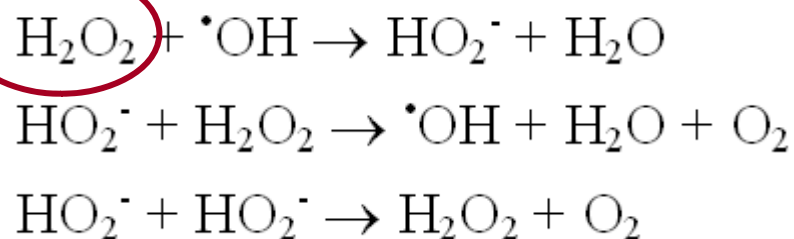
Primenjuje se za:

- *uklanjanje mikro- i makro-polutanata iz vode,*
- *uklanjanje DBP i njihovih prekursora,*
- *tretman toksičnih organskih komponenti prisutnih u podzemnoj vodi u niskim koncentracijama,*
- *kontrolu izlaznog gasa pri stripingu VOC,*
- *tretman otpadnih voda u cilju detoksikacije i povećanja razgradljivosti.*
- *u konjukciji sa drugim tehnologijama (tretman na GAC, biološka oksidacija na BAC i dr.).*



Molarni ekstinkcioni koeficijent H_2O_2 na 254 nm je nizak ($19,6 \text{ l mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$)

- Za formiranje dovoljno visokog sadržaja OH radikala u rastvoru neophodno je da koncentracija H_2O_2 bude visoka.
- Najčešći UV izvor je Hg lampa pri niskom pritisku (sa emisijom maksimumom na 254 nm) - **maksimum apsorpcije H_2O_2 na oko 220 nm**
 - neophodno je primeniti visoku koncentraciju H_2O_2
- Međutim, pri visokoj koncentraciji H_2O_2 može da deluje kao „skavendžer“ radikala:



↓
Oksidacija manje efikasna

- *Visoko-intenzivne UV lampe srednjeg pritiska.*
- *Visoko-intenzivne ksenon blic-lampe kod kojih se može podesiti izlazni spektar da se poklapa sa apsorpcionim karakteristikama H_2O_2 .*



H_2O_2 /UV proces se uspešno primenjuje za:

- destrukciju hlorfenola i drugih hlorovanih jedinjenja
- atrazina, simazina
- uklanjanje jakog mutagena MX i smanjivanje mutagenog potencijala
- smanjenje sadržaja DOC i UV absorbancije vode
- dezinfekciju vode

- Mnogi organski mikro polutanti

- podležu reakciji direktne fotolize,
- snažno reaguju sa *in-situ* formiranim hidroksi radikalima

Osnovna razlika između dezinfekcije UV zračenjem i H_2O_2 /UV oksidacije je u primenjenoj dozi UV zračenja.

- H_2O_2 /UV: 500–750 mJ/cm^2 ,
- UV dezinfekcija: 20–70 mJ/cm^2

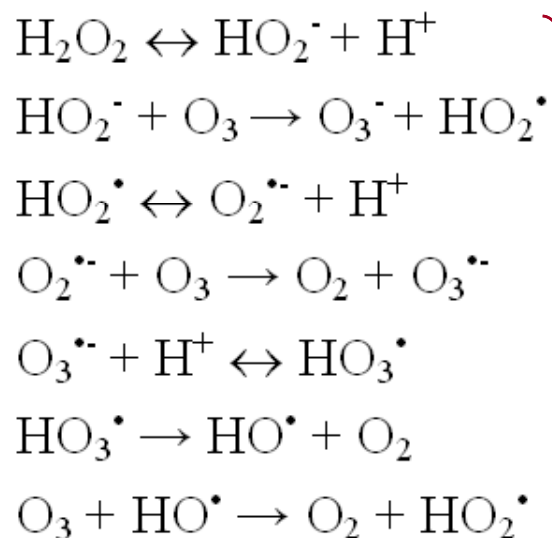
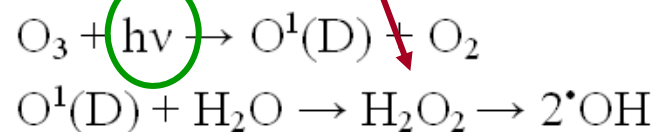
Visok nivo formiranih degradacionih / oksidacionih nusprodukata (visoke biodegradabilnosti)

Zadovoljavajuća kontrola sadržaja formiranih nusprodukata?



Ozon / UV zračenje (O_3 / UV)

- Princip: Voda prethodno zasićena ozonom izlaže se UV zračenju (254 nm).
- U reakciji, kao intermedijer, nastaje H_2O_2 koji se zatim razlaže do OH radikala:

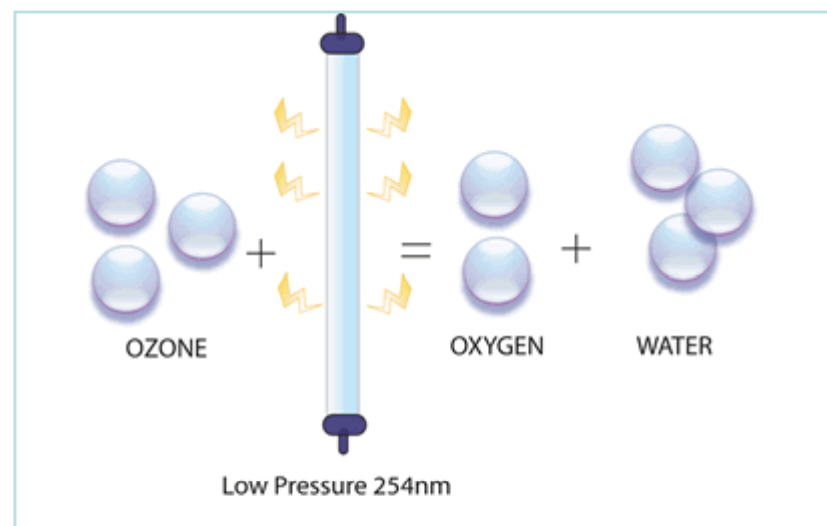


Lančana
reakcija
dekompozicije
ozona



UV lampe pod niskim pritiskom generišu preko 80% svoje UV energije na 254 nm.

- Fotoliza O_3 skup način za proizvodnju H_2O_2 koji bi dalje fotolizovao do OH radikala.
- Međutim
 - fotoliza samog H_2O_2 (najjednostavniji metod za proizvodnju OH radikala)
 - izuzetno mala moć apsorpcije UV zračenja na 254 nm od strane ovih molekula ograničava proizvodnju $\bullet OH$ u rastvoru.
 - u praksi se za fotolizu ozona primenjuju UV lampe manje jačine, u odnosu na lampe koje se primenjuju za fotolizu H_2O_2 .



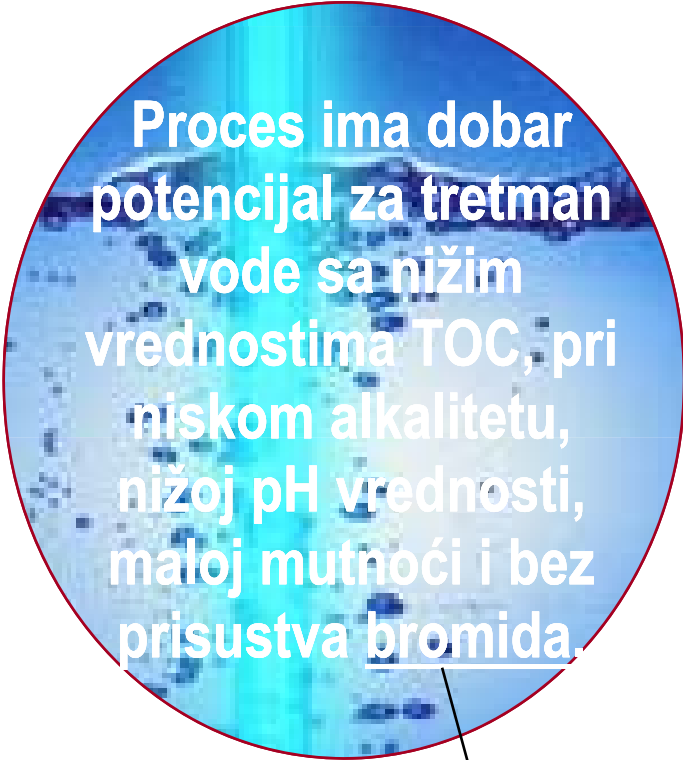


Neki značajniji faktori koji utiču na efikasnost O_3 /UV procesa

Faktor	Komentar
Doza ozona	Povećanjem doze ozona raste i stepen degradacije organskih polutanata.
Temperatura	Tokom O_3 /UV procesa tokom vremena dolazi do povećanja temperature medijuma. Povećava kinetičku konstantu brzine za hemijsku reakciju, ali u isto vreme smanjuje rastvorljivost ozona i time smanjuje njegovu dostupnost za formiranje hidrokisl radikala. Ovo se može izbeći primenom odgovarajućeg programa hlađenja reakcione smeše.
pH vrednost	Tokom istraživanja mogućnosti degradacije dinitrotoluena, <i>Beltran i sar. (1998)</i> su ispitali efikasnost O_3 /UV procesa pri različitim pH vrednostima (pH 2-12). Pri tome su utvrdili da se 100% uklanjanja ove komponente postiže na pH 7, dok je pri pH 2 ono iznosilo 84%. Smanjenje stepena degradacije dinitrotoluena na pH 12 ovi autori su objasnili manjim stepenom formiranja hidroksil radikala i slabijom rastvorljivosti ozona pri datim uslovima.
Prisustvo „skavendžera“ radikala	Do inhibicije procesa oksidacije organskih komponenti primenom O_3 /UV sistema dolazi samo u slučaju prisustva veće koncentracije karbonatnih jona u rastvoru ($> 50 \text{ mmol/l}$), što je značajno više u odnosu na koncentraciju u kojoj se ovi joni obično nalaze u prirodnim vodama. Međutim, uticaj drugih „skavendžera“ radikala (kao što su huminske kiseline, t-butanol, bikarbonatni) na efikasnost O_3 /UV procesa mora se tek ispitati za mnoga jedinjenja.



O₃/UV proces je veoma efikasan za:



Proces ima dobar potencijal za tretman vode sa nižim vrednostima TOC, pri niskom alkalitetu, nižoj pH vrednosti, maloj mutnoći i bez prisustva bromida.

Bromati

- potpunu mineralizaciju organskih jedinjenja malih molekulskih masa (*npr. glioksala, glioksalne kiseline, oksalne kiseline i mravlje kiseline*).
- za uklanjanje komponenti koje vodi daju miris i drastično utiču na njen organoleptički kvalitet (*geosmin, 2-metilizoborneol*).
- oksidaciju prirodnih organskih materija i smanjenje potencijala formiranja trihalometana (*redukcija PFH za 80%*) i halosirćetnih kiselina (*redukcija PFHAA za 70%*).



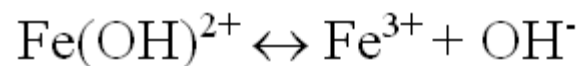
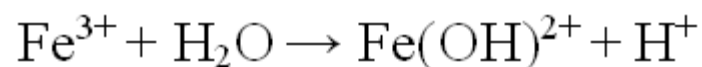
Ozon/vodonik peroksid/UV zračenje (O_3 / H_2O_2 / UV)

- Dodatak H_2O_2 u O_3 /UV proces ubrzava dekompoziciju ozona → porast brzine formiranja OH radikala.
- Ekonomski je isplativija primena O_3/H_2O_2 /UV procesa samo za tretman vode koja sadrži polutante koji slabo apsorbuju UV zračenje
 - u suprotnom preporuka je O_3/H_2O_2 proces.
- O_3/H_2O_2 /UV proces ima najznačajniju primenu u tretmanu:
 - *otpadnih voda i efluenata,*
 - *podzemne vode kontaminirane organskim mikro polutantima (benzen, aceton, dihlloreten, tetrahloreten i dr.)*

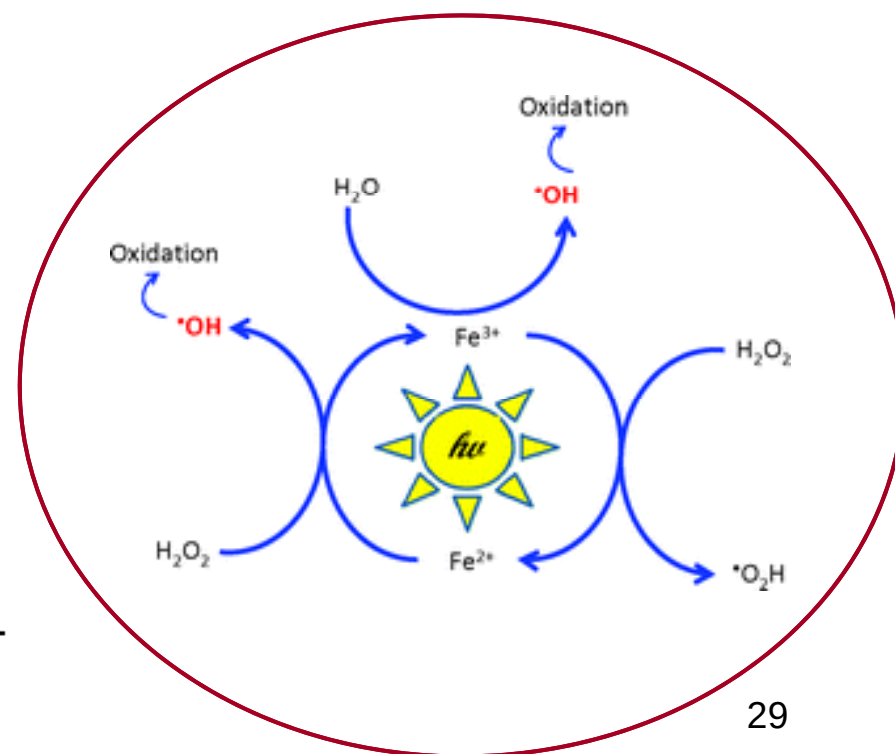
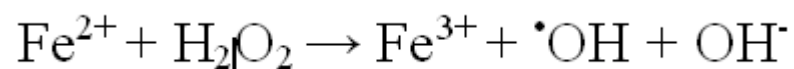
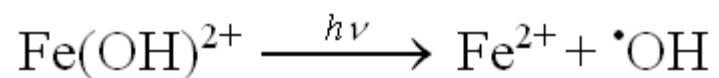


Foto-Fenton procesi

- Brzina degradacije organskih polutanata sa Fenton/Fenton-„like“ reagensima se može povećati UV-VIS iradijacijom.
- Pri pH=3 dolazi do formiranja kompleksa $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$:



- UV zračenje ($\lambda > 300 \text{ nm}$) – fotoliza kompleksa i regeneracije Fe^{2+} i OH radikala:



Povećanje efikasnosti Fenton/Fenton-sličnih sistema UV/VIS iradijacijom zavisi od:

- *foto-redukcije jona gvožđa*: iradijacija jona gvožđa (i/ili gvožđe-hidroksida) produkuje Fe^{2+} koji dalje reaguje sa H_2O_2 generišući drugi OH radikal i Fe^{3+} , i ciklus se nastavlja;
- *efikasnog iskorišćavanje kvanta svetlosti*: apsorpcioni spektar H_2O_2 se ne pruža niže od 300 nm i vodonik peroksida ima nizak koeficijent ekstinkcije na talasnim dužinama nižim od 250 nm.

Efektivnost Foto-Fentona:

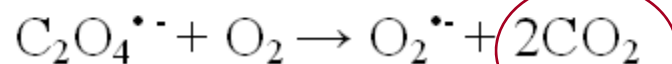
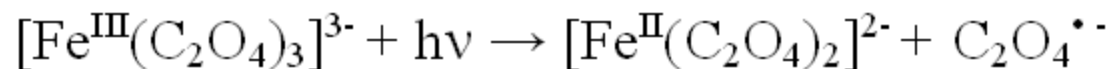
- *organski polutanti (herbicidi, pesticidi, hlорfenoli) mogu se u potpunosti mineralizovati.*
- *sadržaj POM se brzo smanjuje (89% DOC i 94% UV_{254}).*





Modifikacija foto-Fentona : *UV / Fe(III)-oksalat / H₂O₂ proces*

- Primena **feri-oksalata** kao fotoaktivnog katalizatora:



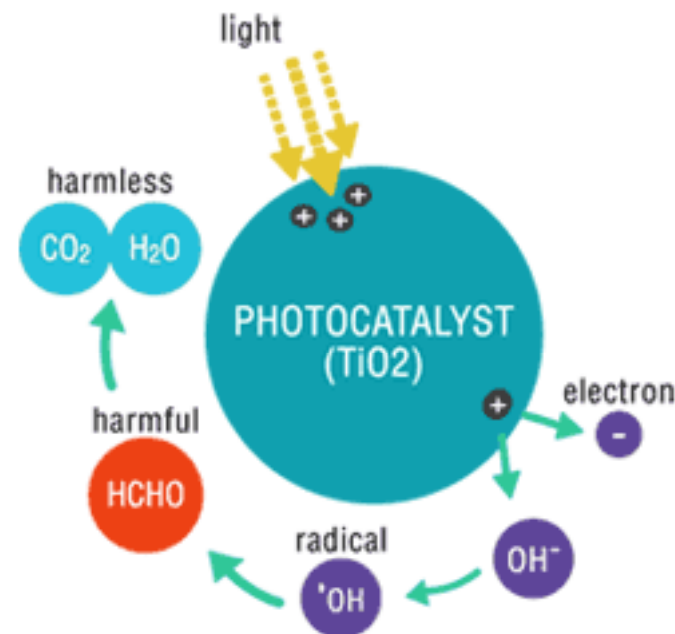
- Prednosti ovog procesa:
 - feri-oksalat apsorbuje zračenje u širokom spektru talasnih dužina (200-400 nm), čime se efikasnije koristi UV zračenje*
 - visoku efikasnost oksidacije organskih polutanata.*



Fotokatalitička oksidacija

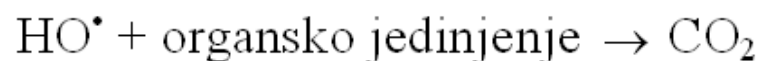
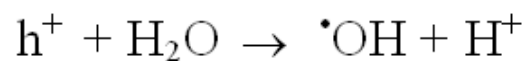
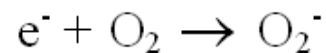
- Osnova heterogenih fotokatalitičkih reakcija je foto ekscitacija čvrstog poluprovodnika usled apsorpcije elektromagnetne radijacije (najčešće u bliskoj UV oblasti).
- Poluprovodnici se koriste u fotokatalizi zbog pogodne kombinacije elektronske strukture, karakteristika apsorpcije zračenja, karakteristika transporta naelektrisanja i trajanja ekscitovanog stanja.
- **TiO₂**, α-Fe₂O₃, ZnO, ZrO₂, CdS, WO₃, SnO₂ i dr.
- Fotoaktivacija TiO₂ zahteva radijaciju talasnih dužina manjih ili jednakim **384 nm**, sa apsorpcionim maksimumom na oko **340 nm**.
- Javlja u tri kristalne forme *anataze*, *rutil* i *brukit* koje se značajno razlikuju u fotokatalitičkoj aktivnosti.
- Najbolji: **TiO₂ Degussa P25** sadrži 75% anataze i 25% rutil-oblika.

- Ozračivanjem čestica TiO_2 (energijom koja je $\geq$ od energije energetskeg procepa), dolazi do prelaska elektrona (e^-) iz valentne zone u provodnu zonu.
- U valentnoj zoni se formira pozitivna šupljina (h^+) odnosno, dolazi do nastanka parova elektron-šupljina (e^-h^+) - početna faza u procesu fotokatalize:



- Nastali parovi e^-h^+ unutar čestice poluprovodnika mogu da se razdvoje, difunduju na površinu poluprovodnika i na taj način učestvuju u reakcijama oksidacije i redukcije organskih i neorganskih jedinjenja.

- **Šupljine** - oksiduju polutante direktno ili pak oksiduju vodu formirajući HO radikale
- **Elektroni** - redukuju kiseonik adsorbovan na poluprovodniku (TiO₂).



Najznačajniji faktori za uspešan fotokatalitički sistem su:

- *izbor odgovarajućeg poluprovodničkog materijala*
- *izbor izvora svetlosti*
- *konfiguracija reaktora*
- *promena pH vrednosti,*
- *priroda i količina polutanata prisutnih u vodi,*
- *prisustvo „skavendžera“ radikala.*

Fotokatalitičkom oksidacijom se praktično sve toksične supstance mogu uspešno degradirati.

- **Oksidacija organskih komponenti**

- Halogenovani ugljovodonici primenom TiO_2/UV - primena u tretmanu vode za piće za uklanjanje DBP hlorisanja.
- Aromatični molekuli se kvantitativno oksiduju.
- Hlorovani fenoli, bifenoli, pa čak i dioksini se kompletno oksiduju, pri čemu kao krajnji proizvodi nastaju CO_2 i HCl .

?
formiranje
toksičnih
nusproizvoda

- **Oksidacija neorganskih vrsta:** NO_2^- , SO_3^{2-} , CN^- , uklanjanje bromata (do ppb nivoa)

- **TiO_2/UV fotokatalitička oksidacija:**

- predtretman procesu mikrofiltracije (MF) i ultrafiltracije (UF), u cilju smanjenja sadržaja POM u vodi.
- fotodezinfekcija rezistentnih bakterija ili algi u vodi.



Još neki AOPs

- ***Elektrohemijska oksidacija***
- ***Sonohemijski i sonofotokatalitički procesi***
- ***Vlažna oksidacija vazduhom***
- ***Mikrotalasi***

Mogućnost zagrevanja na molekulskom nivou, što rezultuje homogenim i brzim termalnim reakcijama. Za sada mikropotalasi uglavnom nalaze svoju primenu u obradi otpadnih voda, ali se intenzivno ispituje i mogućnost njihove primene za dezinfekciju vode za piće u kombinaciji sa UV zračenjem.

Elektrohemijska oksidacija na anodi (grafit, Pt, TiO_2 , PbO_2 i dr.), u prisustvu odgovarajućeg elektrolita (obično NaCl) – za uklanjanje različitih organskih kontaminanata iz vode, uključujući i farmaceutske proizvode.

Sonoliza - primena US talasa u cilju generisanja hidroksil radikala u vodenom sistemu.

Sonokataliza - primena fotokatalizatora (npr. TiO_2) u prisustvu US talasa.

Sonofotoliza - simultana primena US talasa i UV zračenja.

Sonofotokataliza - primena fotokatalizatora (npr. TiO_2) u prisustvu US talasa i UV zračenja.

Oksidacija organskih i neorganskih jedinjenja u vodenom rastvoru posredstvom kiseonika ili vazduha pri povišenim temperaturama (100-372°C) i pritiscima. Uspešno se primenjuje za tretman otpadnih tokova. U tretmanu vode za piće još uvek nema primenu.



AOPs - poređenje i modeliranje

- Odabir odgovarajućeg oksidacionog sistema:
 - detaljna ispitivanja različitih AOPs pri različitim uslovima i
 - uporediti njihovu efikasnost, uzimajući u obzir i tehno-ekonomski aspekt pripreme vode za piće.
- Matematički modeli - simuliranje tretmana određene komponente odabranim AOP

- ***Neophodno je njihovo dalje ispitivanje sa ciljem:***

- *boljeg razumevanja mehanizama reakcija pojedinih AOPs,*
- *određivanja efikasnosti odabranog procesa pod određenim uslovima za specifičan kvalitet ispitivane vode,*
- *realne procene troškova,*
- *određivanja nusproizvoda oksidacije sa AOPs i njihove toksičnosti i*
- *određivanja pouzdanosti odabranog AOPs.*

A high-speed photograph of a water droplet hitting a surface, creating concentric ripples. The droplet is captured mid-fall, with a small splash at the point of impact. The background is a solid, deep blue color.

HVALA NA PAŽNJI !