

Univerzitet u Beogradu
Tehnološko-metalurški fakultet

OSNOVI TEHNOLOGIJE PRIPREME VODE

Dr Dragan Povrenović, dipl.inž

Beograd 2011.

Klasifikacija prirodnih voda

Sve vode u Srbiji prema svome stepenu zagađenosti i nameni izuzimajući mineralne i termalne vode, podeljene su u četiri klase (Uredba o klasifikaciji voda, Sl.glasnik SRS, broj 5, 3 februar 1968.)

Klasa I - vode koje se u prirodnom stanju ili posle dezinfekcije mogu upotrebljavati ili iskorišćavati za snabdevanje naselja vodom za piće, u prehrambenoj industriji i za gajenje plemenitih vrsta riba (salmonida)

Klasa II - vode koje su podesne za kupanje, rekreaciju, i sportove na vodi, za gajenje manje plemenitih vrsta riba (ciprinida), kao i vode koje se uz normalne metode obrade (koagulacija, flokulacija, filtracija i dezinfekcija) mogu upotrebljavati za snabdevanje naselja vodom za piće i u prehrambenoj industriji.

Klasa III - vode koje se mogu upotrebljavati ili iskorišćavati za navodnjavanje i u industriji, osim prehrambene

Klasa IV - vode koje se mogu upotrebljavati ili iskorišćavati samo posle posebne obrade

Vode klase II, van graničnih tokova i tokova presečenih granicom Srbije dele se na potklase i to: potklasa IIa i potklasa IIb.

Ova podela voda u klase i potklase vrši se na osnovu relevantnih parametara kvaliteta i njihovih graničnih vrednosti koji su prikazani u sledećoj Tabeli, gde su date granične vrednosti relevantnih parametara kvaliteta prirodnih voda.

Parametar	Klasa I	Klasa II	Klasa IIa	Klasa IIb	Klasa III	Klasa IV
Suspendovane mat. pri suvom vremenu u mg/l do	10	30	30	40	80	-
Ukupni suvi ostat. pri suvom vremenu u mg/l do						
za površinske vode i jezera	350	1000	1000	1000	1500	-
za podzemne vode	800	1000	1000	1000	1500	-
pH vrednost	6.8-8.5	6.8-8.5	6.8-8.5	6.5-8.5	6.0-9.0	-
Rastvoreni O ₂ (ne primenjuje se na podzemne vode i prirodna jezera)	8	6	6	5	4	0.5
BPK ₅	2	4	4	6	7	-
Stepen saprobnosti po Libmanu (ne primenjuje se na podzemne vode i prirodna jezera)	oligo-saprobni	betamezo-saprobni	betamezo-saprobni	beta-alfa-mezo-saprobni	alfa-mezo-saprobni	-
Stepen biološke produktivnosti (samo za jezera)	oligotrofni	eutrofni	eutrofni	-	-	-
Najverovatniji broj koliformnih klica u 1000 ml vode maksimum do	200	6000	6000	10000	-	-
Vidljive otpadne materije	bez	bez	bez	bez	bez	bez
Primetna boja	bez	bez	bez	bez	-	-
Primetan miris	bez	bez	bez	bez	-	-

Prilikom zagadjenja vodo tokova, što zbog same prirode zagadjenja što zbog prirode samih vodotokova, ne postoji jedan opšti model koji bi sve definisao, ali je prihvaćeno da se u jako zagadjenim vodotocima mogu uočiti sledeće zone koje predstavljaju kombinaciju nekoliko predloženih šema.

Zona neposrednog zagadjenja - Prisutno mnogo organskih materija u početnoj fazi njihove razgradnje. Sadržaj rastvorenog kiseonika obično visok, uz prisustvo zelenih biljaka i riba u većoj količini.

Polisaprobna zona - zona aktivne razgradnje ili septička zona, u kojoj se odvija najveći deo oksidacionih procesa, uz moguć potpuni utrošak rastvorenog kiseonika, odnosno prelazak u anaerobno stanje. Prisutne velike količine CO₂ i H₂S a redukciono biokemijski procesi se odvijaju. Obilje bakterija, bez zelenog bilja, eventualno prisutne plavozelene alge i mnoge vrste protozoa i bičastih larvi Tubifera. Razgradnjom organskih materija nizvodno od ove zone formira se

Alfamezosaprobna zona - jako zagadjena zona, prisutne zelene alge uz veliki broj bakterija, sadržaj rastvorenog kiseonika nizak, posebno tokom noći, a sastav faune je raznovrsniji i prisutan u većem broju vrsta nego u prethodnoj zoni. Biokemijski procesi imaju redukcionooksidacioni karakter.

Betamezosaprobna zona - blago zagadjena zona, uobičajno prisustvo zelenih algi i viših biljaka, sadržaj rastvorenog kiseonika obično iznad 5 mg/l, a smanjena je i oksidacija organskih materija. U ovoj zoni se mogu naći i ribe kao jegulja, šaran i klen. Biokemijski procesi imaju oksidacioni karakter.

Oligosaprobna zona - zona praktično čiste vode, mada se u njemu još uvek odvija proces razgradnje organskih materija. Sadržaj rastvorenog kiseonika je po pravilu iznad 5 mg/l, čak i noću. Obilje zelenih biljaka i prisutna životinjska populacija je generalno tipična za zdrave vode. Biokemijski procesi imaju oksidacioni karakter.

KONCIPIRANJE SISTEMA ZA PRIPREMU VODE

Svi sistemi za pripremu vode mogu se podeliti u tri osnovne grupe:

- Sistemi za pripremu vode za piće
- Sistemi za pripremu kotlovske napojne vode i
- Sistemi za pripremu procesne vode za pojedine industrijske procese

Pored ovih treba pomenuti i sisteme za održavanje potrebnog kvaliteta vode u bazenima za plivanje, u zatvorenim rashladnim sistemima i za pripremu vode za neke posebne namene (farmaceutski kvalitet, voda za infuzione rastvore, hemodijaliza....)

Sistem za pripremu vode za piće isključivo kao sirovinu koristi prirodnu vodu, dok drugi sistemi obično samo doradjuju vodu za piće do željenog kvaliteta u skladu sa zahtevanim uslovima.

Osnovni zadatak sistema za pripremu vode za piće je da obezbedi pitku vodu koja je hemijski i bakteriološki bezbedna za humanu upotrebu.

U isto vreme taj kvalitet mora biti zadovoljavajući i za većinu industrijskih korisnika. Voda za piće ne sme imati neprijatan miris ili ukus, a često se određenim dodacima u toku procesa kvalitet vode može popraviti u smislu povoljnog delovanja na ljudsko zdravlje, na primer dodatkom fluorida.

Kvalitet vode za piće se mora nalaziti u okviru propisanih standarda, koji pak sa druge strane ne zadovoljavaju potreban kvalitet za kotlovsku napojnu vodu ili pak kao procesna voda u prehrambenoj, papirnoj ili tekstilnoj industriji pa se mora podvrgnuti dodatnoj preradi od strane samih tih industrija.

Pre pristupanja izrade samog tehnološkog koncepta jednog sistema za pripremu vode, često se moraju preduzeti određene mere u cilju stalne obezbedjenosti potrebne količine vode i poboljšanja kvaliteta sirove vode, pre nego ona udje u sam sistem.

Tako se izradom akumulacija u blizini izvorišta i kontrolisanim ispuštanjem vode iz akumulacije u izvorište, može obezbediti potrebna količina vode ili se može ta akumulacija koristiti za prethodno prirodno prečišćavanje vode sa izvorišta. Često se u takvim slučajevima vodi dodaje CuSO_4 kao algicidno sredstvo, koje sprečava preterani razvoj algi koje ometaju dalje procese prečišćavanja ili pak dovode do pojave ukusa i mirisa vode što zahteva i dodatne obrade vode, a time i poskupljuju čitav proces pripreme.

Priprema vode za piće od sirove prirodne vode zahteva temeljno poznavanje:

1. karakteristika sirove vode
2. jasnu predstavu o kvalitetu prečišćene vode

Na osnovu polaznih kriterijuma i ekonomskih uslova postavlja se tehnološki koncept. Postavljanjem tehnološkog koncepta donekle se uslovljava stepen pouzdanosti koji sistem treba da ima i određuje nivo automatske kontrole koji se u njemu želi ostvariti.

Izabrani način prerade treba da bude ekonomičan, kako u pogledu početnog investiranja, tako i u pogledu eksploatacionih troškova.

Prvi zadatak koji je potrebno rešiti u čitavom lancu je izbor porekla vode:

- podzemna voda sa veće ili manje dubine
- površinska voda iz reke, jezera ili eventualno mora

Ako uopšte postoji mogućnost izbora, glavni faktori koje treba razmotriti su:

- * kvalitet vode kojim se raspolaže
- * količina potrebne vode i ujednačenost izdašnosti izvorišta
- * cena ispitivanja vode, snabdevanja, prerade i distribucije
- * mineralni polutanti
- * organski polutanti
- * biološki polutanti
- * mikroelementi

Kao primer kvantitativnog uporedjenja kvaliteta vode iz površinskih i podzemnih izvora u jednom regionu (u ovom slučaju je to država Texas u SAD), dati su podaci u sledećoj tabeli:

Komponenta	Koncentracija, mg/L			
	Površinski izvor		Podzemni izvor	
	Reka Colorado	Reka Neches	Grad Stephenfille	Grad Houston
Kalcijum, Ca ²⁺	51	11	90	9.2
Magnezijum, Mg ²⁺	17	3.5	38	2.6
Natrijum, Na ⁺	21	22	9.7	202
Kalijum, K ⁺	4	3.3	5.2	5
Gvoždje, Fe ²⁺	0.08	0.12	0.10	0.02
Bikarbonat, HCO ₃ ⁻	181	22	383	410
Sulfati, SO ₄ ²⁻	30	19	39	2
Hloridi, Cl ⁻	48	38	36	98
Fluoridi, F ⁻	0.2	0.6	0.2	1.4
Nitrati, NO ₃ ⁻	0.2	0.2	2.2	0
Silikati, SiO ₂	8.8	16	16	16
Ukup. rastvor.mat	271	142	432	538
Tvrdoća kao CaCO ₃	197	42	380	34
pH	7.1	6.7	7	7.6

FIZIČKE, FIZIČKO-HEMIJSKE I HEMIJSKE OSOBINE VODE ZA PIĆE KOJE MOGU IZAZVATI PRIMEDBE POTROŠAČA

Redni broj	Parametri	Maksimalno dopuštene vrednosti ili koncentracije
1.	Boja	5 stepeni Co-Pt skale
2.	Miris i ukus	bez
3.	Mutnoća	do 1 NTU*
4.	Koncentracija jona vodonika (pH)	6,8 – 8,5
5.	Oksidabilnost (mg KMnO ₄ /l)	do 8 **
6.	Provodljivost (μScm, na 20 °C)	do 1000
7.	Temperatura	Temperatura izvorišta illi niže
8.	Rastvoreni kiseonik (% saturacije)	50***
9.	Sulfati	250****
10.	Vodonik sulfid	bez*****
11.	Ukupni organski ugljenik	

* Za vodovode do 5000 stanovnika dozvoljena je mutnoća do 5 NTU (nefelometrijska jedinica mutnoće)

** Smatra se da je voda ispravna u slučaju da oko 20% merenja koja nisu uzastopna u toku godine, vrednost ovog parametra dostigne do 12 mg KMnO₄/l. Frekvencija merenja po važećem Pravilniku.

*** Ne odnosi se na podzemne vode

**** Ne sme se osetiti miris

PRINCIPI PRERADE VODE ZA PIĆE

Prerada vode na osnovu ispitanoj porekla, fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika, kao i njene mikrozagadjenosti može biti više ili manje kompletna. Ponekad je potrebno primeniti mnogobrojne postupke i njih treba tako kombinovati da se nedostaci vode eliminišu na najbolji mogući način a da u isto vreme najbolje odgovaraju mogućnostima koje uređaj pruža. Izabrani način prerade treba da bude ekonomičan u pogledu početnog investiranja i eksploatacionih troškova.

Prerada vode se vrši već na zahvatu vode ili kod crpki. Kod podzemnih voda potrebno je obezbediti takvu kaptazu ili potiskivanje da se tom prilikom zhvati što manje zemlje i peska. Zahvat površinske vode treba prilagodjavati nanosu koji ona sadrži.

Dobro zahvatanje vode predstavlja prvi stadijum prerade vode.

Koncepcija zahvata vode

U jezeru sa ustaljenim nivoom, kotu zahvata treba tako izabrati da tokom čitave godine sadržaj suspendovanih i koloidnih materija u vodi, kao i sadržaj planktona bude što manji, a temperatura vode što niža.

Ako je jezero dovoljno duboko, zahvatanje vode se vrši na dubini od 30-35 m, čime je uticaj osvetljenosti značajno smanjen a time i ograničen sadržaj planktona. U svakom slučaju zahvatanje vode treba da se vrši bar na 7 m od dna, kako bi se izbegao uticaj kretanja nataloženih čestica i vodenih struja na dnu, ako i posledice vertikalnog kretanja usled temperaturne razlike (prevrtanje jezera).

Zahvat vode iz jezera sa promenljivim nivoom se vrši uz poštovanje prethodnih kriterijuma, s tim što je potrebno obezbediti zahvatanje sa različitih dubina, zavisno od doba godine.

Na zahvatu vode iz reke treba se obezbediti od nanosa zemlje, peska, lišća, trave, površinske pene, ugljovodonika itd. Ne postoji model idealnog vodozahvata, tako da savisno

od slučaja voda može biti zahvaćena sa dna, bočno, putem sifona itd. Svaki od ovih načina zahteva posebnu studiju.



Slika Izvorište „Potkop“ - šaht



Slika. Vodozahvat na reci Brvenici

Prethodna prerada vode

U okviru prethodne prerade sirove vode, u savremenim sistemima za pripremu vode, primenjuju se sistemi sa rešetkama, taložnicima i sita, za uklanjanje inertnog materijala, kao i hemijska obrada i aeracija. Prvi način prerade po zahvatu je:

Cedjenje kroz rešetku

Vrši se kako bi se eliminisao krupniji materijal, koji može ometati dalje faze prerade. Efikasnost operacije zavisi od razmaka između šipki rešetke i razlikuju se:

grubo cedjenje	kroz rešetku sa otvorima 40-100 mm
finije cedjenje	kroz rešetku sa otvorima 10-40 mm
fino cedjenje	kroz rešetku sa otvorima 3-10 mm

Rešetke se mogu čistiti ručno ili automatski. Najčešće se za stanice većih razmera upotrebljavaju automatske rešetke (ili mehaničke rešetke), ali se one takodje mogu primeniti i kod manjih stanica kod kojih postoji opasnost od naglog nanošenja materijala biljnog porekla, koji ima tendenciju da obloži rešetku i tako izazove prekid doticaja vode.

Tipovi rešetki:

a) Rešetke za ručno čišćenje

Koriste se jednostavne čelične šipke vertikalne ili pod uglom 60-80o prema horizontali.

Na manjim i srednjim stanicama usisne korpe imaju ulogu rešetke, koje se mogu čistiti `kontramlazom` .

b) Mehaničke rešetke koje se čiste sa uzvodne strane:

- krive rešetke
- rešetke na zupčanicima
- rešetke sa grabuljama na užetu (za vodu sa malo nanosa)
- rešetka sa četkama na beskrajnoj traci (služi za fino cedjenje)

c) Mehaničke rešetke koje se čiste sa nizvodne strane:

- rešetka sa češljevima na beskrajnoj traci (koristi se i kod otpadnih voda jer ima veliki kapacitet)
- rešetka sa grabuljama na beskrajnoj traci (u stanju je da odstrani velike količine otpadaka iz vode)

Odstranjivanje peska

Zavisno od uslova zahvatanja, može se postaviti pre ili posle procedjivanja kako bi se u daljem postupku zaštitili ugrađeni aparati. Odstranjuju se šljunak, pesak i manje ili više fine čestice minerala. Dimenzije čestica koje se ovom prilikom odstranjuju su veće od 200 mikrona. Čestice nižeg granulometrijskog sastava odstranjuju se tokom procesa dekantacije ili odstranjivanja mulja. Odstranjivanje peska se vrši u taložnicima, a zavisno od uslova u taložniku i vrsti materijala projektuje se i odgovarajući taložnik, pri čemu se koriste formule Stoksa, za laminarno, Njutna, za turbulentno i Alena , za taloženje u prelaznoj oblasti.

U praktične svrhe, za pesak gustine 2.65 g/cm³, mogu se koristiti sledeći podaci:

d (mm)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10
V ₀	0.2	0.7	2.3	4.0	5.6	7.2	15	27	35	47	74
V _{cr}	0	0.5	1.7	3.0	4.0	5.0	11	21	26	33	
V _{0.3}	0	0	1.6	3.0	4.5	6.0	13	25	33	45	65
U _{cr}	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

gde su sve vrednosti izražene u cm/s i označavaju:

V₀ vrednosti za brzinu taloženja u fluidu čija je horizontalna brzina jednaka 0,

V_{cr} brzina taloženja u fluidu čija je horizontalna brzina jednaka U_{cr},

V_{0.3} brzina taloženja u fluidu čija je horizontalna brzina jednaka 0.3 m/s i

U_{cr} kritična horizontalna brzina za pokretanje istaložene čestice.

Pored standardnih taložnica ili taložnica kanalskog tipa koje se ispiraju hidrauličnim mlazom, u ovu svrhu se mogu upotrebiti i ciklonski separatori (hidrocikloni) koji su veoma efikasni ali se uvek javlja problem abrazije uređjaja.

Odstranjivanje ulja i masnoća

Pošto su ulja i masti uglavnom lakši od vode, oni teže da isplivaju na površinu, pa smanjenjem brzine proticanja celokupne tečnosti, dolazi do separacije, a celokupna tečnost postaje `prirodni separator`. Posebno konstruisanim obrtnim cevima na površini vode se vrši `skidanje` pene ulja i masti sa površine vode.

Procedjivanje

Primenjuje se u slučaju da je količina planktona ograničena i da u daljoj preradi nije predviđena nikakva dekantacija. Dejstvo ovih sita je ograničeno pa pri njihovoj primeni treba biti oprezan, posebno u kontekstu prethodnih procesa. Razlikujemo makro (otvori veći od 0.3 mm) i mikro procedjivanje (otvori manji od 0.1 mm) a koriste se rotaciona sita ili sita na beskrajnoj traci, specijalno ako se menja nivo vode koja se tretira.

Prethodna prerada hlorom

Vrši se u cilju zaštite cevi kroz koje prolazi nepreradjena voda. Ukoliko se ne izvrši prethodno hlorisanje, na cevovodima se taloži plankton koji smanjuje propusnu moć cevi pa do njihovog potpunog začepjenja. Gvoždjevite i sulfatoredukcione bakterije mogu da razaraju gvoždje metalnih cevi, pa se zapaža veći sadržaj gvoždja u vodi, naročito u toku privremenih prekida rada. Dejstvo hlorisanja ne smanjuje boju vode sem u slučajevima humusnih materija, ali se dobija bistrija i filtrabilnija voda kao posledica oksidacije raznih materija u vodi:

- jona gvoždja i mangana
- amonijaka, stvarajući hloramine ili izazivajući njegovo raspadanje (preko kritič.tačke)
- nitrita koji se prevode u nitrate
- organskih materija podložnih oksidaciji
- mikroorganizama (bakterija, algi, planktona)

Prethodno hlorisanje može biti *prосто, hlorisanje do kritične tačke ili superhlorisanje*.

Pri prethodnom hlorisanju uvek je bolje upotrebiti sadržaj hlora koji je malo veći od sadržaja u kritičnoj tački. Tako treba uvek postupiti kada je to moguće i kad takav postupak ne zahteva velike količine hlora. Pored uništenja patogenih klica i bakterija, planktona, bezopasnih klica i drugih, dobija se i najniža granica pojave ukusa vode. Kada je voda boljeg kvaliteta u pojedinim periodima godine moguće je vršiti *prосто* hlorisanje. Hlor deluje veoma brzo i to u prvim minutima nakon injektiranja u vodu, pri čemu u fazi prethodnog hlorisanja vreme nije tako važan faktor kao pri sterilizaciji, jer se traženi rezultati postižu veoma brzo.

Kada su u pitanju površinske vode u kojima se lako mogu naći virusi, praktikuje se superhlorisanje i to sa produženim trajanjem kontakta.

Aeracija

Vrši se u slučajevima kada sirova voda sadrži višak gasova:

- sumporvodonič- koji vodi daje neprijatan ukus
- kiseonik- kada je u stanju presićenosti jer njegovo izdvajanje izaziva negativne posledice u taložniku, jer se podiže mulj sa dna, kao i kod filtriranja kada nastaje lažno zaptivanje, izdvajanjem gasa.
- ugljen dioksid- koji vodu čini agresivnom

- ako u vodi nema dovoljno kiseonika da bi se obezbedila oksidacija jona gvoždja i mangana, nitrifikacija amonijaka i da bi se vodi dao prijatan ukus, kao i sprečavanje korozije metalnih cevi.

Osnovni procesi prerade vode

Koji će osnovni procesi i kojim redosledom biti ukomponovani u proces prerade vode, zavisi od kvaliteta sirove vode i kvaliteta preradjene vode koji se želi ostvariti. Osnovni kriterijumi, na osnovu kojih se vrši izbor hemikalija koje će se primenjivati u procesu, su njihova efikasnost u obavljanju željene reakcije i njihova cena. Tako, na primer za kontrolu ukusa i mirisa vode mogu se koristiti aktivni uglj, hlor, hlordioksid, ozon i kalijum permanganat. Obično je najjeftinije rešenje primena velike doze hlora (superhlorisanje), ali je aktivni uglj daleko efikasniji u pogledu uklanjanja jedinjenja koja utiču na ukus i miris vode.

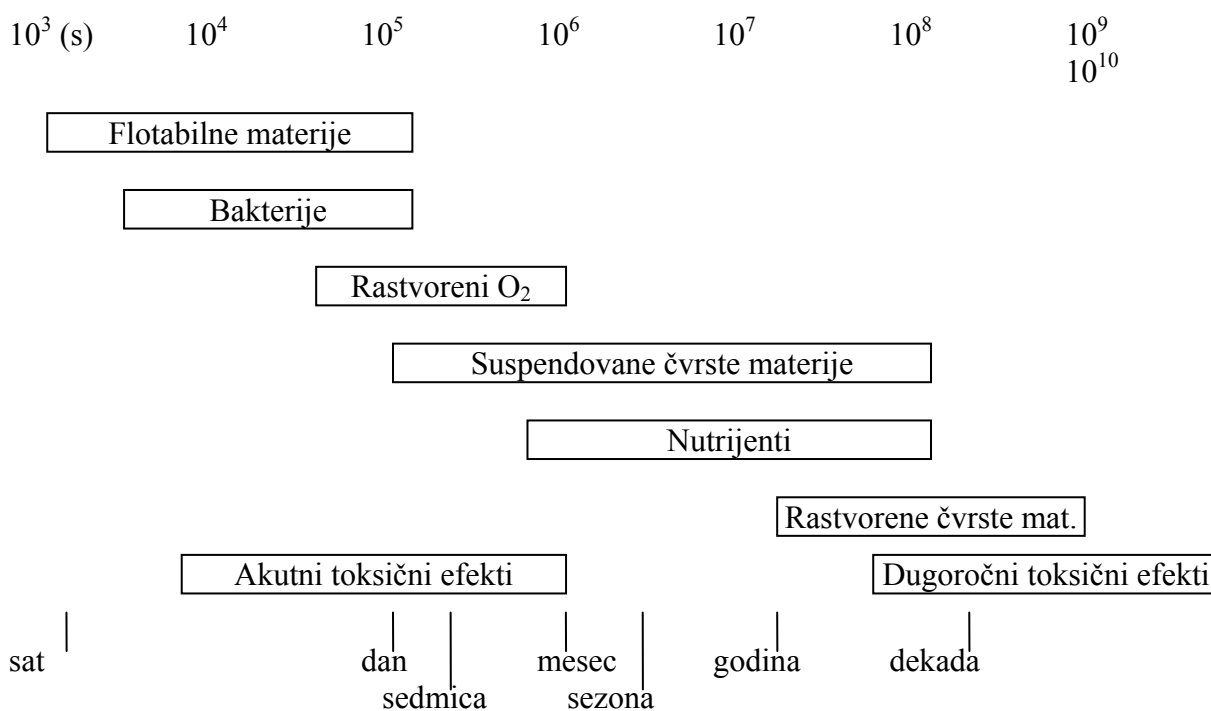
U sistemima za preradu površinskih voda često se praktikuje instaliranje dozirne opreme za dve ili čak tri od navedenih hemikalija, tako da se, zavisno od trenutnog kvaliteta sirove vode, može uvek primeniti najefikasnija i najekonomičnija varijanta.

U sledećoj tabeli dat je sažeti prikaz parametara kvaliteta prirodnih voda, njihov uticaj na kvalitet tih voda i uobičajeni načini njihovog korigovanja.

Parametar (primesa)	Posledica	Način prerade		Najčešća primena
		Manjak	Višak	
Nerastvorne primese Suspendovane i koloidne materije Žive primese Bakterije i virusi Plankton	Mutnoća Javno zdravlje Izgled i korozija		Bistrenje Dezinfekcija Dezinfekcija	Površinske vode Sve vode, površinske- patogeni organizmi podzemne-ferozne i manganozne bakterije
Rastvorne primese Organske materije	Boja Septičnost		Bistrenje i primena O ₃ i/ili aktivnog uglja	Sve vode
Mikrozagadivači (pesticidi, fenoli, detergenti...) Halo-forme (trihalometani...) Soli HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Toksičnost Ukus Miris Miris, Javno zdravlje Korozija	Remineralizacija	Cl ₂ +bistrenje+O ₃ +aktivni uglj (Cl ₂ po potrebi) Aeracija+aktivni ugalj Uklanjanje karbonata Reversna osmoza	Površinske i aluvijalne podzemne vode Podzemne vode Sve vode Morska i bočate vode
NO ₃ ⁻ PO ₄ ³⁻ SiO ₃	Methemoglobinemia Bioprodukcija Ometanje reversne osmoze		Denitrifikacija Bistrenje Jonska izmena	Podzemne vode Sve vode Podzemne vode
F ⁻ Ca ²⁺ , Mg ²⁺ Na ⁺ , K ⁺	Zubi, kosti, nervni sis Korozija, Kamenac Javno zdravlje	Fluoridizacija Remineralizacija	Defluoridizacija Omekšavanje Membranski i termički procesi	Podzemne vode Sve vode Morska i bočate vode
NH ₄ ⁺	Septičnost		Hlorisanje, nitrifikacija	Sve vode
Fe ²⁺ , Mn ²⁺	Obojenost, Korozija		Deferizacija,	Podzemne vode

Ukupan salinitet	Javno zdravlje, Korozija		demanganizacija Membranski i termički procesi	Sve vode
Rastvoreni O ₂	Gasovi, Ukus, Korozija	Aeracija	Deoksigenacija	Podzemne vode
CO ₂	Korozija		Aeracija, Neutralizacija	Podzemne vode
H ₂ S	Miris		Aeracija	Podzemne vode

Standardi kvaliteta, karakteristike vode prijemnika i namena vode koja se iz njega zahvata odredjuju potrebni stepen njene prerade. Uticaj pojedinih vrsta zagadjujućih supstancija ima svoju karakterističnu vremensku i prateću prostornu dimenziju, zavisno od procesa kojima se oni transformišu u svoj konačni oblik ili koji ga sprečavaju da dospe u vodu prijemnika.



Klasifikacija prirodnih voda prema kvalitetu (Prati et al. 1971)

Parametar kvaliteta	Kvalitet vode				
	odličan	prihvatljiv	blago zagadjena	zagadjena	jako zagadjena
pH	6.5-8.0	6.0-8.4	5.0-9.0	3.9-10.1	>10.1
Rastvor. O ₂ %	88-112	75-125	50-150	20-200	>200
BPK ₅ mg/l	1.5	3.0	6.0	12.0	>12.0
HPK mg/l	10	20	40	80	>80
Susp.mat. mg/l	20	40	100	278	>278
Amonijak mg/l	0.1	0.3	0.9	2.7	>2.7
Nitrati mg/l	4	12	36	108	>108
Hloridi mg/l	50	150	300	620	>620
Gvoždje mg/l	0.1	0.3	0.9	2.7	>2.7
Mangan mg/l	0.05	0.17	0.5	1.0	>1.0

Zbog svega do sada rečenog i vrednosti prikazanih u tabelama, izuzetno je značajno, pre nego se napravi krajnji izbor između površinske i podzemne vode, posedovati potpunu informaciju kako o karakteristikama sirove vode, tako i o veličini rizika od njenog incidentnog zagađenja. Uzvodno od zahvata sirove vode, locirani industrijski pogon, ne samo da može biti uzrok sezonskih varijacija njenog kvaliteta, već pri incidentnim situacijama može ozbiljno narušiti njen kvalitet, a kadkad može dovesti i do prekida rada postrojenja za pripremu vode. Koliko će taj prekid rada trajati, zavisi od stepena složenosti primenjenog sistema i što je sistem složeniji i sofisticiraniji to će i prekid rada sistema biti kraći (Slika 1)

Kriterijumi kvaliteta sirovih površinskih voda koje se koriste za javno snabdevanje vodom za piće (U.S. Federal Water Pollution Control Administration, 1968)

Supstancija	Kriterijumi za površinske vode	
	Dozvoljeni sadržaj	Poželjan sadržaj
Koliformni organizmi (NBO)	10000	100
Fekalni koliformi (NBO)	2000	20
Neorganske supstance, mg/l		
Amonijačni azot	0.5	0.01
Arsen*	0.05	odsutan
Barijum*	1.0	odsutan
Bor*	1.0	odsutan
Kadmijum*	0.01	odsutan
Hloridi*	250	250
Hrom (VI)*	0.05	odsutan
Bakar*	1.0	praktično odsutan
Rastvoreni O ₂	4	blizu zasićenja
Gvoždje	0.3	praktično odsutan
Olovo*	0.05	odsutno
Mangan*	0.05	odsutan
Nitratni azot *	10	praktično odsutan
Selen*	0.01	odsutan
Srebro*	0.05	odsutno
Sulfati*	250	50
URČM*	500	200
Uranil jon*	5	odsutan
Cink*	5	praktično odsutan
Organske supstance mg/l		
ABS	0.5	odsutan
Ugljentetrahlorid*	0.15	0.04
Cijanidi*	0.20	odsutni
Pesticidi *		
Adrian	0.017	odsutan
Flordan	0.003	odsutan
DDT	0.042	odsutan
Dieldrin	0.017	odsutan
Endrin	0.001	odsutan
Heptahlor	0.018	odsutan
Lindan	0.056	odsutan
Metoksihlor	0.035	odsutan

Toksafen	0.005	odsutan
Fenoli*	0.001	odsutni

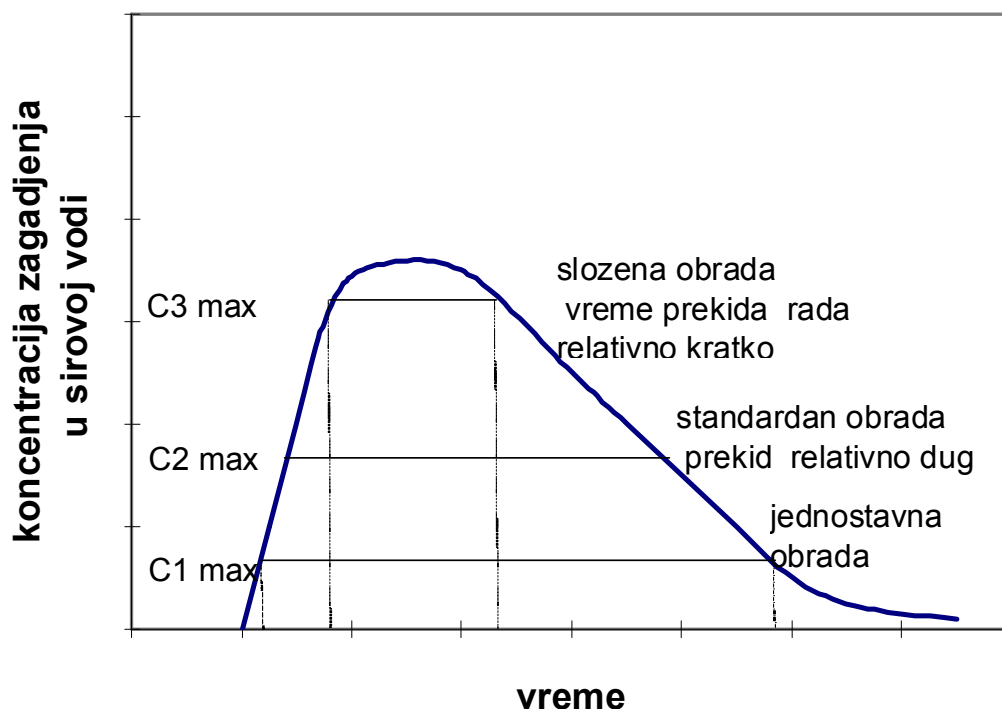
* Supstance na koje u značajnoj meri **ne utiču** sledeći osnovni procesi obrade:

koagulacija - manje od oko 50 mg/l $Al_2(SO_4)_3$, $Fe_2(SO_4)_3$ ili $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, uz dodatak alkalija prema potrebi, a bez pomoćnog koagulanta ili aktivnog uglja,

taloženje - 6 sati ili manje

brza peščana filtracija - brzina filtracije 7 m³/m²h ili manje

dezinfekcija hlorom - bez obzira na koncentraciju ili na oblik rezidualnog hlora



Uticaj zagađujućeg talasa na rad postrojenja za pripremu vode

Zbog svega navedenog pri projektovanju postrojenja za preradu vode neophodno je naći kompromis između cene složenijeg postrojenja (investicioni i operativni troškovi) i ekonomskih i drugih posledica koje može imati prekid proizvodnje vode za piće.

OSNOVNE LINIJE PRERADE

Nakon zahvatanja vode i obavljenog predtretmana vode, pristupa se tretmanu u osnovnim linijama prerade. One mogu biti alternativne i svaka mora da obezbedi vodu za piće čiji je kvalitet u skladu sa zakonskim propisima, ukoliko je njen izbor učinjen na osnovu karakteristika sirove vode koja se preradjuje.

Stepen složenosti osnovnih linija kreće se od veoma niskog (samo dezinfekcija) do veoma veoma visokog (kombinacije relativno velikog broja osnovnih procesa). Efikasnost adabrane linije može se povećati uključivanjem u nju dodatnih, specifičnih osnovnih procesa, koji su efikasni u smislu uklanjanja određene vrste zagađujuće materije.

Osnovne linije prerade se mogu predstaviti sledećom šemom:

1.		Dezinfekcija
2.	Filtracija	Dezinfekcija
3.	Koagulacija Flokulacija	Filtracija Dezinfekcija
4.	Koagulacija Taloženje	Filtracija Dezinfekcija
5.	Adsorpcija (PAK)	Adsorpcija (GAK)
6.	Oksidacija <i>hlor</i> <i>hlordioksid</i> <i>ozon</i> <i>kalijumpermanganat</i>	Oksidacija <i>hlor</i> <i>ozon</i>
7.	Biološki efekat	

Linija prerade 1.

Ova linija prerade primenjuje se kada je kvalitet sirove vode identičan kvalitetu vode za piće, koji zakon zahteva, odnosno kada nije potrebno nikakvo njeno prečišćavanje. Dezinfekcija se vrši isključivo iz preventivnih razloga, odnosno da kvalitet vode ne bi bio umanjen pri transportu kroz distribucionu mrežu. Ova linija prerade takodje se primenjuje i u onim slučajevima kada jedino mikrobiološki kvalitet sirove vode nije u skladu sa zakonskim propisima.

Kao novija tehnološka poboljšanja u okviru ove linije treba pomenuti

- proizvodnju hlora elektrohemijskim putem na mestu upotrebe i
- proizvodnju hlordioksida, ClO_2 delovanjem hlorovodonične kiseline na natrijumhlorit takodje na mestu upotrebe.

Primenom bilo koga od ova dva rešenja eliminiše se potreba za skladištenjem gasovitog hlora, a time i očigledna opasnost u gusto naseljenim sredinama.

Primeri primene: neke podzemne vode i vode nekih prirodnih ili veštačkih jezera.

Linija prerade 2.

Ovaj način prerade podoban je za vode zagađene isključivo suspendovanim materijama čija je priroda čestica takva da je dovoljna primena filtracije da bi se one iz vode izdvojile. To je slučaj sa nekim podzemnim vodama u krastnim područjima, koje su obično najveći deo vremena potpuno bistre, ali koje posle kišnih padavina postaju visoko opterećene suspendovanim materijama. Osim suspendovanih materija takve vode ne sadrže nijednu drugu vrstu zagađjenja. I u ovom slučaju naravno neophodna je takodje i dezinfekciona obrada, iz potpuno istih razloga kao i prethodnom slučaju.

Značajnije tehnološke inovacije u oblasti filtracije su:

- Dvomedijumna filtracija (filtri sa dve vrste ispune), koja je posebno korisna za preradu voda opterećenih suspendovanim materijama koje su heterogene, kako u pogledu veličine, tako i u pogledu prirode svojih čestica. Primeri primene dvomedijumne filtracije su direktna filtracija i in line koagulacija.
- Potpuna automatizacija i kontrola filtracionog ciklusa.

Linija prerade 3.

Ova linija koja sadrži *in line* koagulaciju, filtraciju i dezinfekciju se primenjuje kod prirodnih voda koje sadrže suspendovane materije koje se ne mogu izdvojiti samo filtracijom. To su uglavnom materije koloidne prirode i da bi se pretvorile u separabilni oblik, moraju se njene čestice prethodno destabilizovati a potom aglomerisati. Naime, koagulacijom prethodno destabilizovane koloidne čestice aglomerišu se oko flokula, koje se obrazuju unutar filtarske ispune. Kada je količina ovako obrazovanog floka relativno mala, u ispuni se stvaraju uslovi i za adsorpciju dela u vodi prisutnih organskih materija koji je adsorbilan, odnosno, osim uklanjanja suspendovanih materija, na ovaj način se ponekad u značajnoj meri smanjuje i ukupna organska zagađjenost vode.

Ovaj način prerade pogodan je za manje zagađene vode, kao što su vode nekih prirodnih jezera i akumulacija.

Neka od ovakvih postrojenja funkcionišu najveći deo godine samo sa direktnom filtracijom, a *in line* koagulacija se u proces uključuje samo tokom njenog manjeg dela.

Linija prerade 4.

U sebi ova linija sadrži bistrenje i dezinfekciju, naime, kada doza koagulantna potrebna da se ostvari prethodni način prerade, postane suviše velika, odnosno kada se previše poveća zapremina flokakoji se obrazuje tokom koagulaciono-flokulacione faze prerade dolazi do suviše brzog povećanja hidrauličkih otpora u filtarskoj ispuni i skraćanja filtracionog perioda. Ovo se donekle može prevazići pogodnim odabirom granulometrijskog sastava filterske ispune, međutim češće je potrebno u proces uključiti i taložnik u kome se onda pre filtracije uklanja najveći deo obrazovanog floka, odnosno otpadnog mulja. Primenu ove linije prerade zahtevaju mnoge površinske vode koje su visoko zagađjene organskim materijama.

Linija prerade 5.

Adsorpcija predstavlja dodatnu fazu prerade koja se može uključiti po potrebi u svaku od prethodnih linija prerade. Koristi se onda kada je adsorpcija organskih materija na floku obrazovanom tokom koagulaciono-flokulacione faze prerade nedovoljna da se njihova koncentracija u prečišćenoj vodi svede ispod zahtevane vrednosti. Adsorbent, aktivni ugalj u

praksi se koristi u dva oblika, kao aktivni ugalj u prahu (PAK) i kao granulirani aktivni ugalj (GAK).

Linija prerade 6.

Pored dezinfekcije, koja u suštini takodje predstavlja oksidacionu obradu (osim kada se vrši UV zračenjem), proširenje asortimana zagađujućih materija koje se pojavljuju u prirodnim vodama uslovalo je primenu oksidacionih sredstava i u drugim fazama procesa pripreme vode za piće. Najčešće tačke primene oksidacionog agensa duž linije prerade su sam početak linije, intermedijarna oksidacija neposredno pre GAK filtracije ili na samom kraju linije. Pred različita oksidaciona sredstva koja se za ovu svrhu mogu koristiti, postavljaju se vrlo specifični zahtevi.

TALOŽENJE

Termin taloženje se primenjuje za izdvajanje i neorganskog i organskog sastava u vodi, koji se može taložiti u kontinualnom procesu.

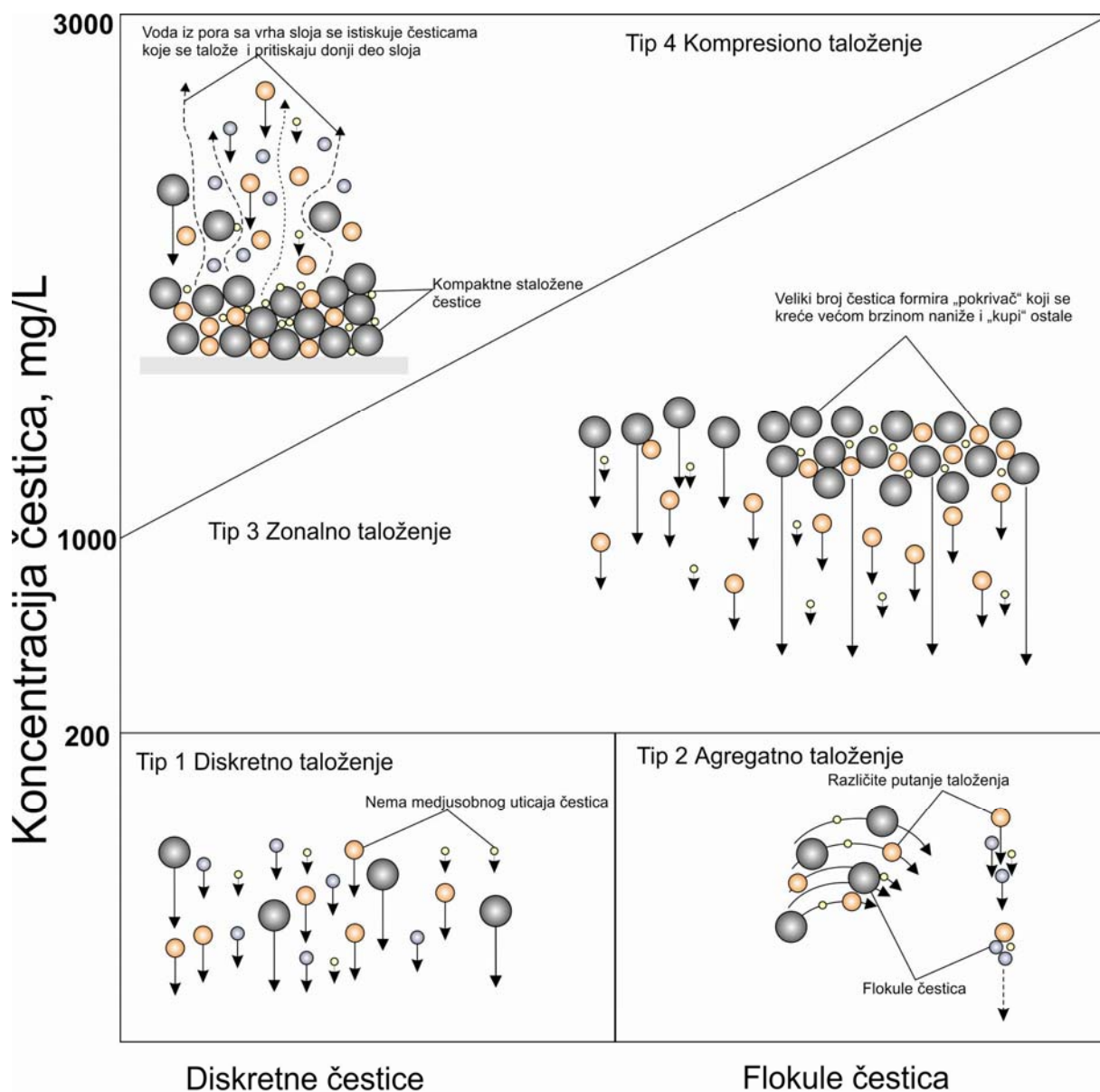
Klasičan teorijski pristup taloženju je podrazumevao da su čestice sferične u prirodi. Dobijeni rezultati su povezivani sa nesferičnim česticama, uz korišćenje različitih koeficijenata koji su se odnosili na uticaj oblika čestica.

Brzine taloženja suspendovanih čestica u vodi ($T=10^{\circ}\text{C}$, $\rho=2650\text{ g/cm}^3$, sferične čestice)

Prečnik čestica, μm	Približno potrebno vreme za taloženje na dubini od 1m	Tipični materijal
10.000	1.2 s	Šljunak
1.000	9 s	Pesak
100	2 min	Fini pesak
10	2 h	Mulj
1	6 d	Bakterije
0.1	800 d	Čestice gline
0.01	250godina	Pigmenti boja

Prema načinu taloženja čestica u otpadnoj vodi, razlikujemo četiri tipa taloženja: 1. diskretno (pojedinačno), 2. agregatno, 3. zonalno i 4. stešnjeno (kompresiono) taloženje.

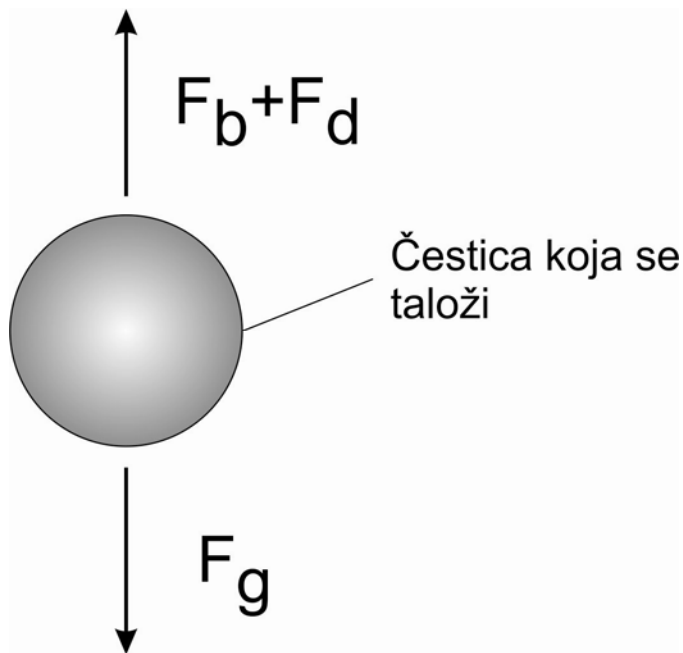
Na slici su šematski prikazani tipovi taloženja i morfološki oblik čestica pri taloženju.



Morfologija čestica

Bistrenje vode po mehanizmu diskretnog taloženja

Newton 1647. i Stokes 1845. godine su postavili jednačine koje mogu biti korišćene za određivanje brzine taloženja (terminalne brzine) diskretnih čestica u vodi. Sile koje deluju na česticu tokom taloženja u vodi su prikazane na sledećoj slici.



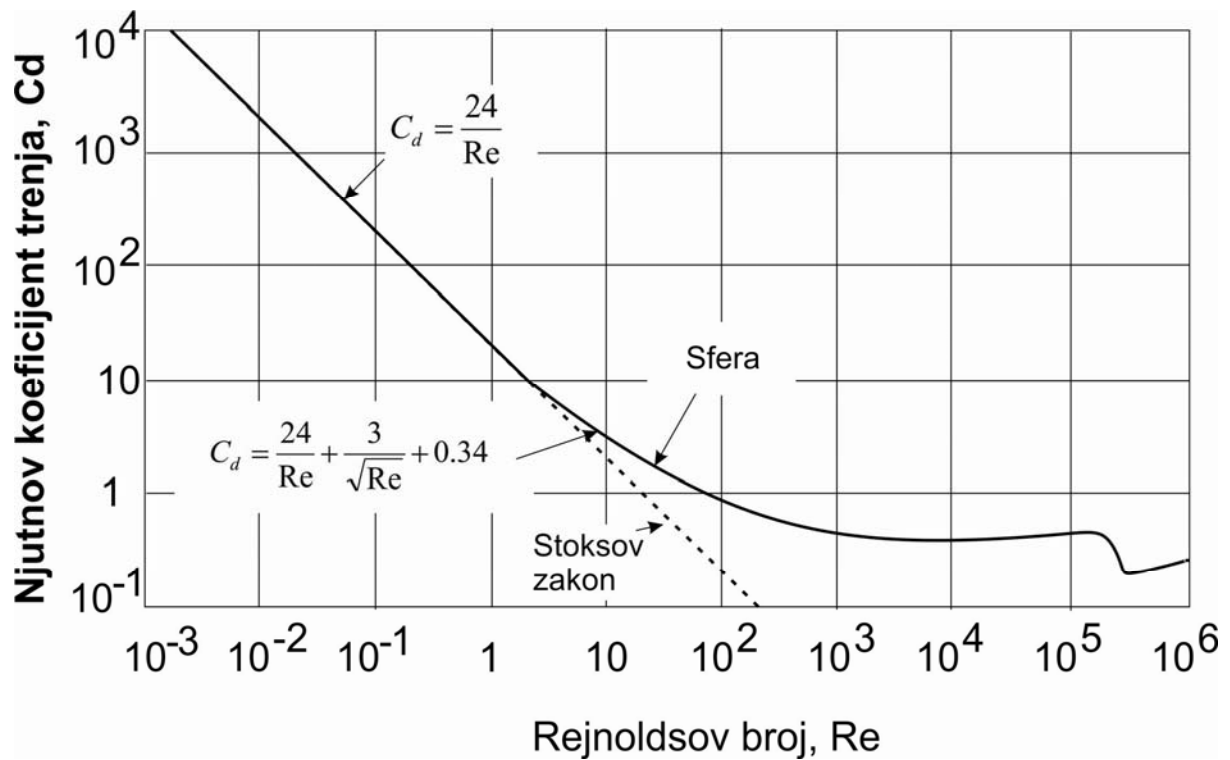
Bilans sila koje deluju na česticu pri kretanju kroz fluid naniže, može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$\frac{d(m_p u_s)}{dt} = \sum F = F_g - F_b - F_d = \rho_p V_p g - \rho V_p g - C_d \rho A_p \frac{u_s^2}{2}$$

gde su:

- m_p - masa čestica
- u_s - brzina taloženja (settling velocity) u bilo kom vremenu t, m/s
- t - vreme, s
- F_g - sila gravitacije, N
- F_b - sila potiska, N
- F_d - sila trenja izedju čestice i vode, N
- ρ_p - gustina čestica, kg/m^3
- V_p - zapremina čestica, m^3
- g - ubrzanje zemljine teže, m/s^2
- ρ - gustina vode (ili bilo kog drugog fluida), kg/m^3
- C_d - koeficijent trenja, bezdimenziona veličina
- A_p - projektovana površina čestice u pravcu taloženja čestica, m^2

Koeficijent trenja za sferične čestice zavisi od Rejnoldsovog broja i ta zavisnost je pokazana na sledećoj slici:



Za sferične čestice se zapremina, projektovana površina u pravcu taloženja, masa i Reynoldsov broj, mogu izraziti sledećim jednačinama:

$$V_p = \frac{\pi}{6} d_p^3$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2$$

$$m_p = V_p \rho_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p$$

$$Re = \frac{\rho d_p u_s}{\mu} = \frac{d_p u_s}{\nu}$$

gde je:

d_p - prečnik čestice, m

ρ_p - gustina čestice, kg/m^3

Re - Reynoldsov broj

μ - dinamički viskozitet, Ns/m^2

ν - kinematski viskozitet, m^2/s

$$C_d = \frac{24}{Re} \text{ za } Re \leq 1, \text{ (laminarno područije)}$$

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34, \text{ } 1 < Re \leq 10.000 \text{ (preobražajno područije)}$$

$$F_d = C_d A_p \rho \frac{u_s^2}{2} = \frac{24\mu}{\rho d_p u_s} \frac{\rho \pi d_p^2 u_s^2}{4 \times 2} = 3\pi\mu d_p u_s$$

$$m_p \frac{du_s}{dt} = \rho_p V_p g - \rho V_p g - 3\pi\mu d_p u_s$$

$$\frac{du_s}{dt} = \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) g - \frac{18\mu u_s}{d_p^2 \rho_p}$$

U stacionarnim uslovima je $du_s/dt=0$, pa samim tim je brzina taloženja u laminarnim uslovima, kada važi $C_D=24/Re$:

$$u_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d_p^2}{18\mu}$$

Ova jednačina reprezentuje Stoks-ov zakon.

U uslovima taloženja čestica u nelaminarnim uslovima, bilans sila se može opisati sledećom jednačinom:

$$\frac{d(m_p u_s)}{dt} = 0 = \sum \text{sila} = F_g - F_b - F_d = \rho_p V_p g - \rho V_p g - C_d \rho A_p \frac{u_s^2}{2}$$

U stacionarnom stanju, kada se čestica taloži konstantnom brzinom, bilans sila se može predstaviti jednačinom, koja je poznata i kao Njutnov zakon:

$$u_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)d_p}{3C_d \rho}}$$

Braunovo kretanje

Mnoge prirodne vode sadrže dovoljno sitne čestice koje se ne mogu taložiti same od sebe i koje se usled kolizije sa molekulima vode kreću tako da sila zemljine teže ne utiče na smer njihovog kretanja, pa samim tim i ne dolazi do njihovog taloženja. Takve čestice se nazivaju koloidne čestice, a njihovo kretanje kroz fluid je opisano Braunovim kretanjem.

Brzina kojom se kreću koloidne čestice u x smeru, može se opisati jednačinom koju je 1905 godine postavio Ajnštajn (Einstein):

$$u_B = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{2kT}{3\pi\mu d_p} \right)$$

gde je:

u_B - kretanje čestica u jednom smeru, m/s

- k - Boltzmanova konstanta, 1.38×10^{-23} Nm/K
 T - apsolutna temperatura, K($273 + ^\circ\text{C}$)
 Δx - neto distanca kretanja čestica u x pravcu tokom Braunovog kretanja, m

Kada je $u_B > u_s$ onda ne dolazi do taloženja čestica, pošto je kretanje čestica upravljeno kolizijom sa molekulima vode.

Diskretno taloženje u pravougaonom taložniku

U taložniku čija je dubina h_0 i površina A , potrebno je neko vreme, t , za koje će se određena diskretna čestica staložiti. Brzina taloženja koja se dobija deljenjem predjenog puta od vrha do dna taložnika, sa potrebnim vremenom taloženja, naziva se kritična brzina taloženja, za tu česticu, određenog prečnika i gustine.

$$u_{kr} = \frac{h_0}{\tau}$$

Vreme za koje će fluid protokom Q , proteći kroz određenu zapreminu V , dobija se iz izraza:

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

što, omogućava da se zamenom u prethodnu jednačinu dobije sledeća jednakost:

$$u_{kr} = \frac{h_0}{V/Q} = \frac{h_0 Q}{V}$$

Istovremeno zapremina taložnika je jednaka proizvodu površine i dubine taložnika, tj:

$$V = A \cdot h_0$$

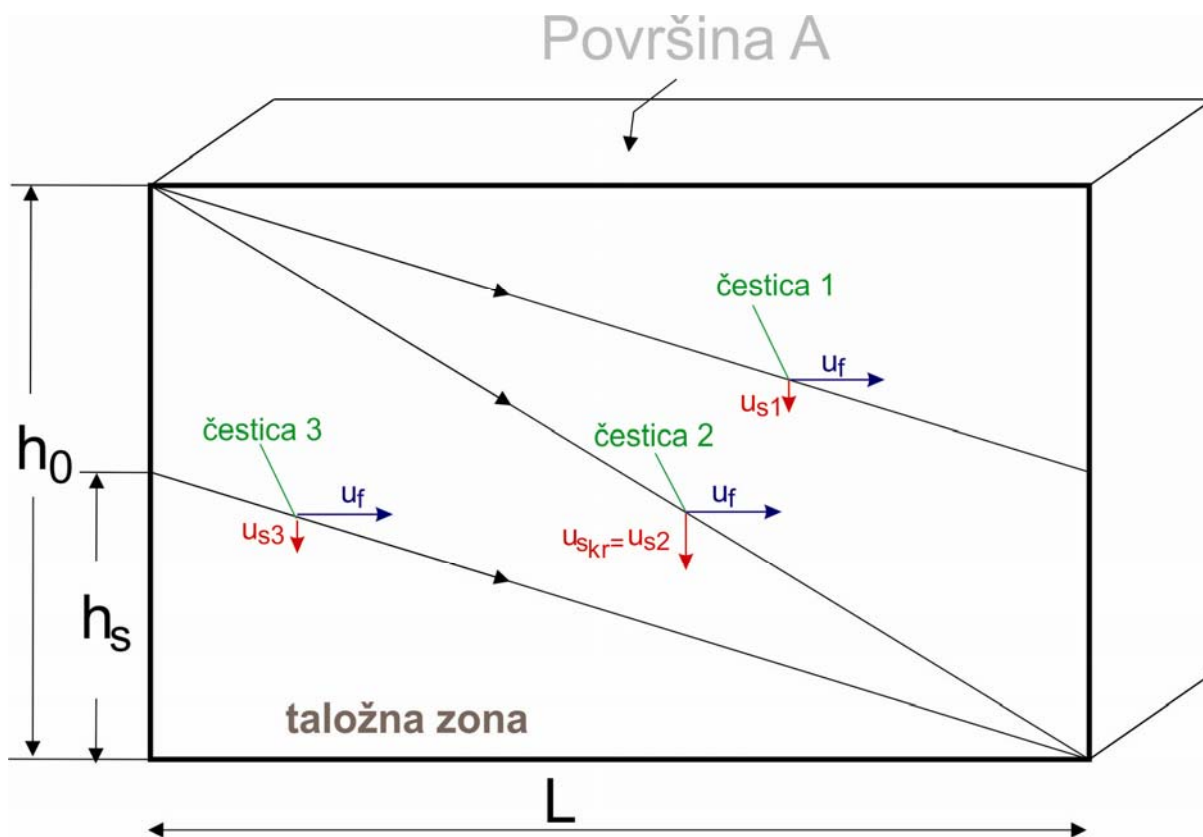
Nakon čega se može dobiti izraz za kritičnu brzinu taloženja, pri protoku fluida Q , u taložniku čija je površina A :

$$u_{kr} = \frac{h_0}{\tau} = \frac{h_0 Q}{h_0 A} = \frac{Q}{A}$$

Sve čestice koje imaju veću ili najmanje jednaku brzinu taloženja jednaku *kritičnoj brzini* taloženja će biti istaložene, dok čestice, koje imaju manju vrednost brzine taloženja, neće biti istaložene u razmatranom taložniku.

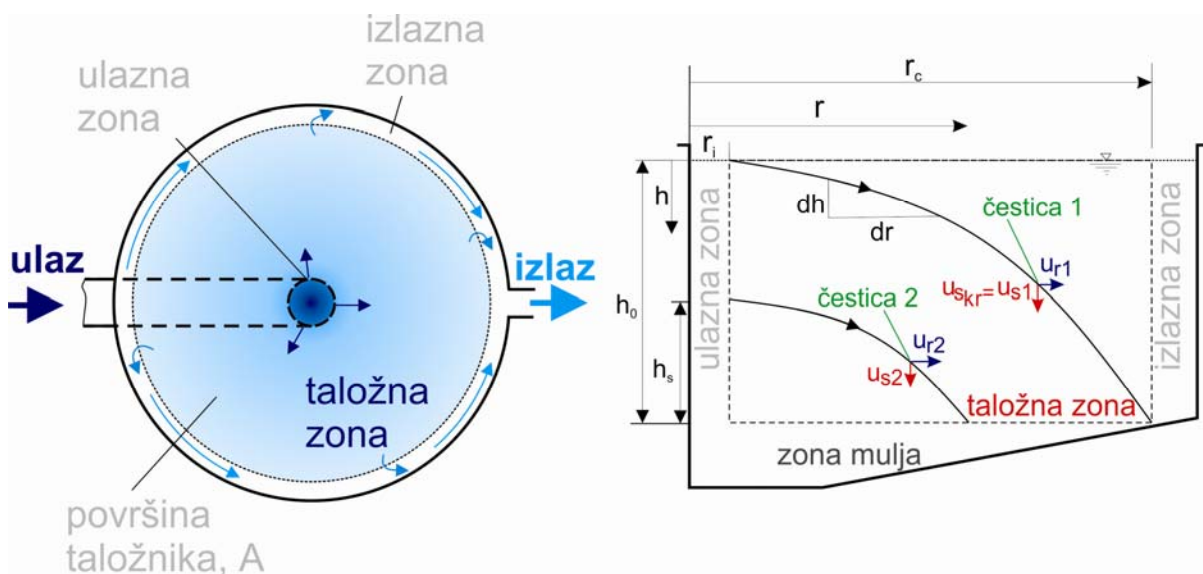
Udeo čestica koje će biti uklonjene:

$$Udeo = \frac{h_s}{h_0} = \frac{h_s/\tau}{h_0/\tau} = \frac{u_s}{u_{kr}}$$



Taloženje u kružnim taložnicima

Uvažavajući isti princip taloženja, kao i kod pravougljih taložnika i koristeći iste jednačine koje definišu vrednost kritične brzine taloženja i efikasnosti taloženja, na sledećoj slici je predstavljen mehanizam taloženja u kružnim taložnicima.



Krećući se od centra prema periferiji taložnika (izbistrivača), fluid menja svoju brzinu shodno sledećoj jednačini:

$$u_f = \frac{Q}{2\pi(r - r_i)h_0}$$

gde su:

- u_f - brzina fluida (vode), m/s
- Q - zapreminski protok fluida, m³/s
- r - rastojanje mereno od centra taložnika (izbistrivača), m
- r_i - poluprečnik ulazne centralne cevi (zone) u taložnik (izbistrivač), m
- h_0 - debljina taložne zone, m

Trajektorija čestice 1 na prethodnoj slici, koja polazi sa vrha taložnika i dospeva na sam kraj taložnika, pokazuje vrednosti kritične brzine čestice koja će biti istaložena tokom prolaska fluida kroz taložnik. Shodno tome, rastojanje na kojoj će ona biti istaložena zavisi od distance r na kojoj se nalazi u samom taložniku, pa je:

$$h = tu_{kr} = \frac{\pi(r^2 - r_i^2)h_0}{Q}u_{kr}$$

gde je:

- h - rastojanje čestice od površine vode u taložniku, m
- t - vreme taloženja, h
- u_{kr} - brzina taloženja čestica, Q/A, m/h

Saglasno ovome, trajektorija diskretnih čestica u kružnom taložniku ima paraboličan oblik. Sve čestice koje imaju brzinu taloženja veću ili najmanje jednaku kritičnoj brzini taloženja, istaložiće se.

$$u_{kr} = \frac{h_0}{\tau} = \frac{h_0 Q}{h_0 \pi (r_0^2 - r_i^2)} = \frac{Q}{\pi (r_0^2 - r_i^2)} = \frac{Q}{A}$$

Kao što se vidi vrednost kritične brzine taloženja kod kružnog taložnika, identično se izračunava kao i kod pravougaonog taloženja, stim samo što se mora voditi računa o izračunavanju vrednosti površine taložnika.

Sve prethodno definisano, važi za idealne uslove. U praksi se, naravno, sistemi ne ponašaju idealno. Pored toga što uvek postoji i međusobno dejstvo, iako mi usvajamo da je reč o diskretnom taloženju, u nekim slučajevima horizontalna brzina fluida počinje da podiže sa dna već istaložene čestice i jednodstavno ih spira i odnosi u izlaznoj struji. Time se smanjuje efikasnost taloženja čestica, koja se dobija prethodnom analizom.

Jasno je da se ista vrednost površine taložnika može dobiti za različite vrednosti dužine i širine taložnika, pa je stoga veoma važno definisati optimalan odnos dužine i širine koji će predupediti spiranje nataloženog materijala iz taložnika. Uobičajeni odnosi u praksi, kreću se u intervalu od 4:1 pa do 8:1.

Kritična brzina spiranja za pojedinačne čestice je definisana od strane Camp-a i ima sledeći oblik:

$$u_{kr_{\text{spiranja}}} = \sqrt{\frac{8k}{f} g \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) d_p}$$

gde su:

$u_{kr_{\text{spiranja}}}$ - kritična vrednost brzine fluida koja proizvodi spiranje, m/s

k - konstanta koja zavisi od tipa čestice koje se spiraju, za pesak je 0.04 a za lepljive čestice 0.06

f - *Darcy-Weisbach*-ov faktor trenja, koji se kreće u granicama 0.02 do 0.03, tipična vrednost je 0.03

U praksi se često, na početku pogona za pripreme vode ugradjuju predtaložnici koji imaju funkciju da odstrane lako taložne materije (na primer pesak i drugi krupniji materijal), a u cilju zaštite uređaja koji slede i olakšavanja izvodjenja procesa koji slede.

Tipične vrednosti za projektovanje taložnika za predtaloženje (peskolova) date su u sledećoj tabeli:

Parametar	Jedinice	Vrednosti
Minimalan broj tankova		2
Dubina automatskog odnošenja mulja	(bez m)	3.5-5
Dubina automatskim odnošenjem mulja	(sa m)	3-4
Minimalan odnos dužina:dubina		6:1
Minimalan odnos dužina:širina		4:1 - 8:1
Brzina napajanja taložnika	m^3/m^2 dan	200-400
Srednja brzina proticanja fluida	m/s	0.05
Vreme zadržavanja	min	6-15
Minimalna veličina čestice koja će biti iztaložena	mm	0.1
Nagib dna taložnika	m/m	Minimum 1:100 po dužini nagiba

Prihvatajući idealne kriterijume za projektovanje, zahtevana dužina taložnika se radi obezbedjenja sigurnosti računa po sledećoj jednačini:

$$L = K \left(\frac{h_0}{u_s} \right) u_f$$

Gde je:

K - sigurnosni faktor, u granicama 1.5-2, bezdimenziona veličina

u_f - srednja brzina vode pri maksimalnom dnevnom protoku vode u sistemu, m/s

Primer:

Predtaložnik, napravljen od betona i podeljen u dva dela, koristi se za uklanjanje peska prečnika od najmanje 0.08 mm i većih, za protok vode od 1.1 m³/s. Maksimalni protok je oko 1.6 puta veći od srednjeg, a temperatura vode je 10°C. Usvajajući da je dubina taložnika 3.5 m i da je faktor sigurnosti 1.5, odrediti dužinu i širinu svakog tanka i proveriti da li je površinska brzina i vreme zadržavanja u preporučenom opsegu. Brzine taloženja su date u sledećoj tabeli. Podaci o brzini taloženja za pesak gustine 2.65 g/cm³, koji se taloži u vodi temperature 10°C.

Prečnik čestice, mm	1	0.6	0.4	0.2	0.15	0.1	0.08	0.06
Brzina taloženja, m/s	0.1	0.063	0.042	0.023	0.015	0.008	0.006	0.0038

Resenje:

1. Preporučena horizontalna brzina vode pri maksimalnom protoku je 0.05 m/s. Površina poprečnog preseka svake komore u pravcu proticanja vode, računa se sa protokom koji je jednak polovini maksimalnog protoka, pa je:

$$A = \frac{0.5Q}{u_f} = \frac{0.5 \cdot 1.1 \cdot 1.6}{0.05} = 17.5 \text{ m}^2$$

Vrednost 0.5 se uzima jer kroz jednu komoru prolazi polovina protoka. Za dubinu vode od 3.5 m, širina taložnika će biti oko 5 m.

2. Za izračunavanje dužine taložnika, potrebno je da znamo brzinu taloženja za zrno peska od 0.08 mm i iz tabele se vidi da je to 6 mm/s. Horizontalna brzina pri srednjem protoku vode se računa po jednačini:

$$u_f = \frac{u_{f,\max}}{1.6} = \frac{0.05}{1.6} = 0.031 \text{ m/s}$$

Pa se dužina taložnika računa po jednačini:

$$L = K \left(\frac{h_0}{u_s} \right) u_f = 1.5 \cdot \frac{305}{0.006} \cdot 0.031 = 27 \text{ m}$$

3. Potrebno je proveriti da li odnosi dužine i dubine, kao i dužine i širine taložnika ulaze u preporučeni opseg.

Odnos dužine i dubine treba da bude minimalno 6:1.

$$\frac{L}{d} = \frac{27}{3.5} = \frac{7.7}{1} > \frac{6}{1} \text{ dakle ovaj odnos je prihvatljiv.}$$

Odnos dužine i širine bazena treba da bude minimalno 4:1.

$$\frac{L}{w} = \frac{27}{5} = \frac{5.4}{1} > \frac{4}{1}$$

4. Potrebno je proveriti i vreme zadržavanja vode u taložniku kao i površinsku brzinu vode.

Vreme boravka vode u taložniku se računa po jednačini:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{27 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}}{0.5 \times 1.1 \text{ m}^3 / \text{s} \times 60 \text{ s} / \text{min}} = 14.0 \text{ min}$$

Vrednost površinske brzine vode je:

$$u_{skr} = \frac{Q}{A} = \frac{1.1 \text{ m}^3 / \text{s} \times 3600 \text{ s} / \text{h} \times 24 \text{ h} / \text{dan}}{27 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2 \text{ komore}} = 352 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ d}$$

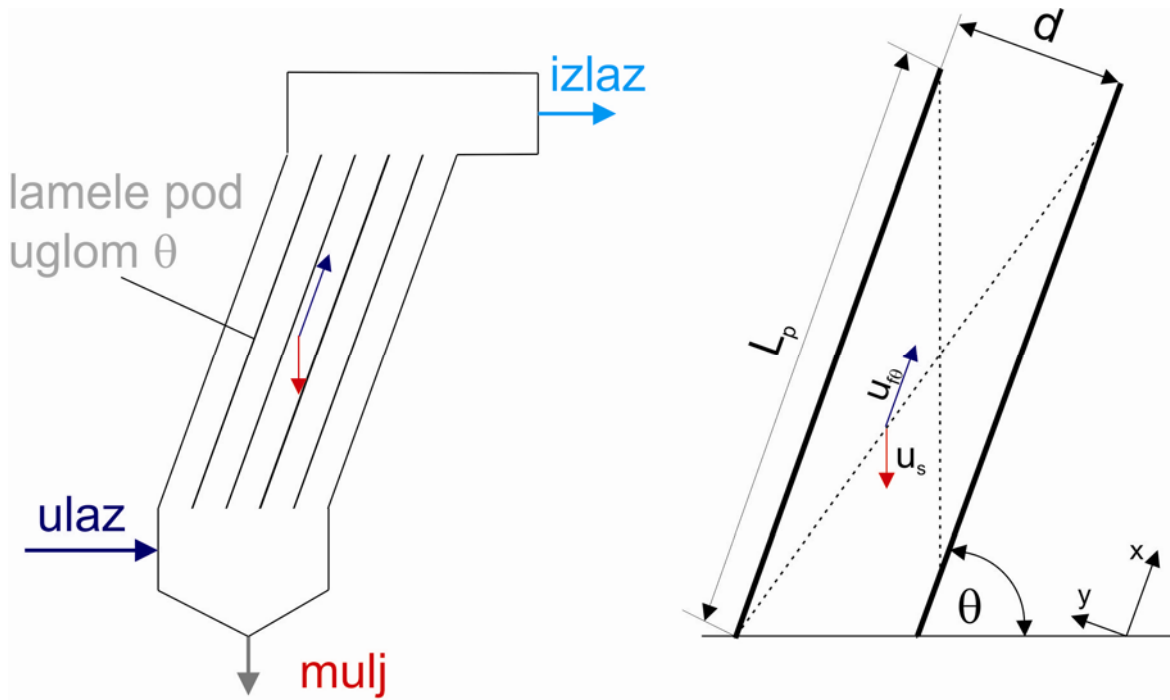
Površinska brzina je u preporučenom opsegu (između 200 i 400 m³/m²dan).

Preporučene mere i odnosi za pravougaone taložnike sa horizontalnim tokom:

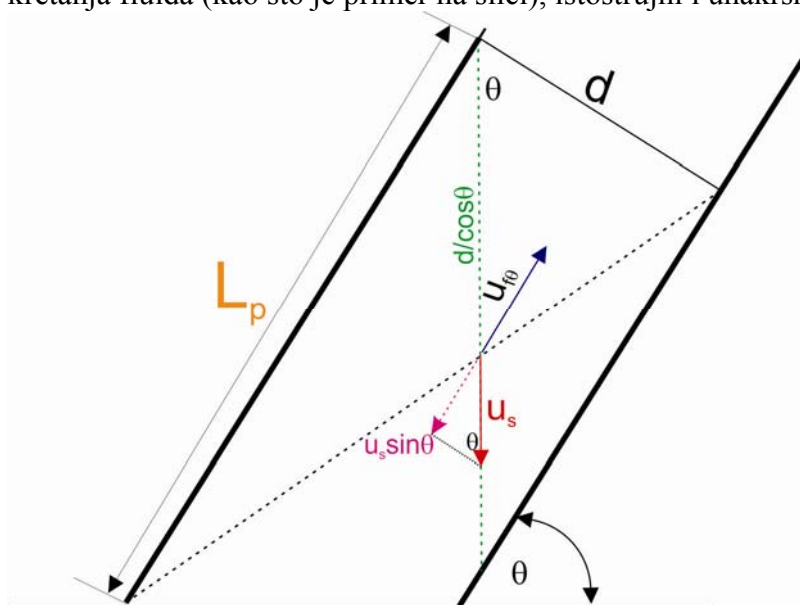
Parametar	Jedinice	Vrednosti
Minimalan broj tankova	broj	2
Dubina	m	3-5
Minimalan odnos dužina:dubina	odnos	15:1
Minimalan odnos širina:dubina	odnos	3:1 do 6:1
Minimalan odnos dužina:širina	odnos	4:1 - 5:1
Površinska brzina napajanja taložnika	brzina m/h	1.25-2.5
Srednja brzina proticanja fluida (pri maksimalnom dnevnom protoku)	brzina m/s	0.3-1.1
Vreme zadržavanja	min	1.5-4
Prelivni protok taložnika	iz m ³ /mh	9-13
Rejnoldsov broj		<20.000
Frudov broj		>10 ⁻⁵
	$Fr = \frac{u_f^2}{g(A_s / P_w)}$	
Nagib dna bazena bez i sa mehaničkim čišćenjem mulja	m/m	1:300 i 1:600
Brzina strugača mulja	m/min	0.3-0.9
Brzina strugača mulja u povratnom toku	m/min	1.5-3

Taložnici sa ugradjenim lamelama

U cilju poboljšanja karakteristika i efikasnosti taloženja, u postojeće taložnike se mogu ugradjivati segmenti sa paralelnim lamelama između kojih struji fluid sa česticama. Kako je rastojanje između lamela dovoljno malo, to omogućava da se čestice za kraće vreme stalože na lamelu, a time da se znatno pospeši izdvajanje i sitnijih frakcija. Šematski prikaz lamelnog taložnika je dat na sledećoj slici:



Lamelasti taložnik može biti suprotno strujni, kada se čestice talože suprotno od smjera kretanja fluida (kao što je primer na slici), istostrujni i unakrsni.



Vreme, potrebno za taloženje pojedinačne čestice izmedju paralelnih lamela, može se izračunati po jednačini:

$$t = \frac{d}{u_s \cos \theta}$$

gde je:

- d - rastojanje izmedju dva paralelna panela, m
- θ - ugao panela u odnosu na horizontalu, $^{\circ}$

Ukoliko se usvoji da je brzina fluida između dva panela uniformna, onda je vreme potrebno da čestica prođe između dva panela, pri kome će doći do njenog taloženja, dato jednačinom:

$$t_p = \frac{L_p}{u_{f\theta} - u_s \sin \theta}$$

gde je:

- t_p - vreme potrebno da čestica prođe između dva panela, s
- L_p - dužina panela, m
- $u_{f\theta}$ - brzina fluida između panela, m/s

Ukoliko je vreme potrebno da čestica prođe u taložniku, t_p , jednako vremenu potrebnom za taloženje, onda će sve čestice biti istaložene ukoliko im je brzina taloženja:

$$u_s \geq \frac{u_{f\theta}}{L_p \cos \theta + d \sin \theta}$$

Brzina fluida između panela, $u_{f\theta}$, zavisi od broja ugrađenih panela, N i određuje se po jednačini:

$$u_{f\theta} = \frac{Q}{Ndw}$$

Gde je:

- w - širina kanala između panela

Na isti način, može se koristiti i ukupan protok fluida u odnosu na površinu taložnika (vodeno ogledalo), ukoliko se zanemari površina čela panela koji su potopljeni u vodu, u odnosu na ukupnu površinu taložnika, pa je:

$$u_{f\theta} = \frac{Q}{Ndw} = \frac{Q}{A \sin \theta}$$

Na sličan način se mogu analizirati i drugi načini korišćenja panela u taložnicima.

U realnim sistemima, na proces taloženja utiču i fizički parametri, kao što su:

Gustina vode- pri ulazu u taložnik, voda može imati različitu gustinu u odnosu na ostatak vode u taložniku, što omogućava pojavu prirodne konvekcije i kruženje vode u samom taložniku, a što se svakako negativno odražava na proces taloženja i efikasnost rada uređaja.

Temperatura vode- izaziva negativne efekte pošto dolazi do razvoja mikrostrujanja, kao i težnje da topla voda izlazi na površinu, što opet dovodi do negativnih efekata.

Koncentracija čestica- ukoliko je različita tokom vremena u napojnoj struji može izazvati negativne efekte.

Vetar – deluje na površinu vode u taložniku koja može izazvati negativno kretanje vode u čitavom taložniku i na taj način može dovesti do smanjenja efikasnosti taložnika.

FILTRACIONI PROCESI U PRERADI VODE

Filtracija je razdvajanje ili separacija čvrste i tečne faze pod dejstvom pritiska ili vakuuma. Postupak se izvodi tako što voda prolazi kroz jedan pregradni sloj, koji zadržava čvrste čestice na ili unutar sebe. Izlazna tečnost iz filtra naziva se filtrat, a pregradni sloj filtracioni medijum ili ispuna, ukoliko je u zrnastom obliku. Za izdvojeni čvrsti materijal, koji se akumulira u količinama koje vidljivo prekrivaju filtracioni medijum, pa i same vrše filtraciju koristi se naziv pogača. Skup opreme, kućište, ventili, prostor za ispunu i dovod i odvod vode naziva se filter.

Filtracija je najstariji i najšire rasprostranjen postupak za uklanjanje čvrstih čestica u postupcima pripreme vode. Gotovo sva postrojenja koja tretiraju vodu iz površinskih izvorišta, kao i većina onih koji tretiraju vodu iz podzemnih izvorišta imaju filtraciju u liniji obrade vode.

Površinske vode uglavnom sadrže alge, sedimente, glinu i druge organske i neorganske materije, koje mogu biti uklonjene filtracijom. Međutim, ono što je još važnije, u površinskim vodama se javljaju i mikroorganizmi, od kojih su neki i patogeni i izazivaju različite bolesti, pa je postupak filtracije, zajedno sa dezinfekcionim procesima neophodan radi njihovog efikasnog uklanjanja.

Podzemna izvorišta imaju daleko manje bakteriološko zagađenje, kao i koncentraciju suspendovanih ili koloidnih materija, međutim, često je potrebno u procesima uklanjanja pojedinih elemenata primeniti oksidacione procese, čije je produkte neophodno ukloniti filtracijom, pa je i u ovom slučaju, ovo gotovo neophodan postupak.

Postupak filtriranja vode se koristi već hiljadama godina, a prvi pisani tragovi o tome se nalaze još u medicinskim zapisima u Indiji 2000 god. pre nove ere. Hipokrat je filtrirao vodu kroz tkaninu u 4 veku pre nove ere, dok su Rimljani prikupljali kišnicu kao vodu za piće, propuštajući je kroz pesak.

Komercijalizacija i prvo patentirano rešenje je ponudjeno u Francuskoj 1750, pri čemu su se koristili različiti filterski mediji od sundjera, drvenog uglja, vune, peska, lomljenog kamena i šljunka.

Prvi uređaji koji su se primenili za tretman vode za piće u gradskim sistemima za vodosnabdevanje se javljaju u Engleskoj i Škotskoj oko 1800-te godine. Moderni, takozvani *spori* peščani filter konstruisan od strane James Simpson-a za Shelse sistem vodosnabdevanja u Londonu 1829. godine, kao peščano-šljunkoviti filter sa brzinom filtracije od 0.12 m/h. Ovakvo rešenje je zastupljeno i do današnjih dana.

Koliko je važna primena postupka filtracije u sprečavanju širenja bolesti preko vode, pokazuje primer dva bliska grada u Nemačkoj, Altone i Hamburga, koji su bili suočeni sa epidemijom kolere 1892. godine. Oba grada su se snabdevala vodom za piće iz reke Elbe i dok je Altona koristila spore peščane filtre za prečišćavanje vode i uspešno suzbila epidemiju, u Hamburgu, gde nisu bili ugrađeni takvi filtracioni uređaji, to nije bio slučaj.

Brza filtracija je razvijena kao postupak 1880. godine u SAD i sredinom dvadesetog veka zauzima dominantno mesto u postrojenjima za pripremu vode za piće i spori filteri se sve redje koriste.

Klasifikacija filtara

Klasifikacija filtara se vrši prema:

1. **Pogonskoj sili koja uzrokuje filtraciju.** Filtrat protiče kroz pregradni sloj usled hidrostatičkog pritiska, nad pritiska pred pregradnim slojem, podpritiska iza sloja (vakuum) ili usled centrifugalne sile kroz sloj. Centrifugalna filtracija se prvo povezuje sa centrifugalnim taloženjem, pa tek onda sa filtracijom.
2. **Filtraciomom mehanizmu.** Postoje dva modela filtracionog procesa. Prema prvom se filtrirane čvrste čestice zaustavljaju na površini medijuma i nagomilavaju se jedna preko druge. Tako se formira pogača čija se debljina povećava. Ovaj model daje jednačine filtracije kroz pogaču. Ako je čvrst materijal zarobljen u porama tela filtracionog medijuma, onda je to drugi model koji daje jednačinu filtracije kroz filtracioni medijum.
3. **Funkciji.** Proizvodi filtracije mogu biti suvi čvrsti materijali, tečnost-filtrat ili oba. Tečnost se može dobiti i filtracijom kroz medijum i kroz pogaču, dok se čvrst proizvod dobija samo filtracijom kroz pogaču.
4. **Načinu rada.** Filtri mogu biti diskontinualni (šaržni) i kontinualni. Šaržni rade pri konstantnom pritisku i pri konstantnoj brzini filtracije, ili sa promenljivim vrednostima pritiska i protoka u toku ciklusa.
5. **Prirodi čvrstog materijala.** Čestice koje formiraju pogaču mogu da budu kompresibilne ili krute, što odgovara filtraciji kroz filtracioni medijum. Na čestice reda veličine, 1-10 μ m (isti red veličine kao i minimalna veličina pora filtarskih medijuma), primenjuje se najveći broj postupaka. Na čestice reda veličine 1 μ m-do dimenzija velikih molekula, primenjuje se ultrafiltracija, ako one nisu prethodno agregacijom prevedene na veći red veličine.

Filtriranje preko cediljki

Obavlja se na situ sa rupicama, na debeloj cediljki i na umetku.

Kod *filtriranja preko sita* razlikuju se:

Mikroprocedjivanje sa slobodnom površinom, (rotirajući doboši), sa ciljem odstranjivanja planktona iz površinskih slojeva vode, kao i krupnijih čestica različitog porekla koje se mogu naći u vodi. Platna na kojima se vrši mikroprocedjivanje, bilo da su metalna ili plastična, imaju otvore od 20-40 mikrona, a izuzetno 10 mikrona. Brzina filtriranja na potopljenom platnu se kreće oko 50m/h (m^3/hm^2). Ako je potrebno izvršiti odvajanje veće količine planktona neophodno je prethodno izvršiti hlorisanje i dekantaciju vode.

Mikroprocedjivanje pod pritiskom, se najčešće vrše pomoću paralelnih filtarskih diskova, sa zazorom između diskova manjim od 35 mikrona, pri čemu su ovi filtri veoma osetljivi na vlaknastu strukturu i plankton, i sa protokom od 10-100 m^3/h ; pločastim filtrima, čiji su zazori od 2 do 40 mikrona, pri protoku vode od 100 l/h do 150 m^3/h ; filtrima u obliku fišeka, najčešće papirnim filtrima od vlakana celuloze, koji služe za fino finalno filtriranje materija preostalih iz prethodnih procesa, a koji se po začepljenju bacaju i menjaju novim.

Filtriranje kroz debele filtre se odlikuje time da se materijal ne zadržava samo na površini, već i na izvesnoj dubini, koja je uvek relativno mala. Za obrazovanje ovakvih filtara se koriste vlaknaste strukture lana ili celuloze, pamučnih, staklenih ili polipropilenskih vlakana, pomoću keramičkih, porculanskih, plastičnih, metalnih i drugih elemenata. Pore su različite od 5 do 40 mikrona, a proticanje iznosi od nekoliko l/h do 400 m³/h kod filtara sa 40 mikrona.

Filtriranje preko umetka, koriste se za filtriranje velike količine vode, a da se delovi filtra sačuvaju od nepopravljivog blokiranja, jer se elementi filtra stavljaju u aparat na početku svakog ciklusa rada. Najčešće se sreću filtri sa svećama (kao vrećasti filter kod gasova) i filtri sa diskovima ili pločama.

Filtriranje kroz filtarski sloj

Primenjuje se kada je potrebno izdvojiti veće količine materijala iz vode i kada su čestice tog materijala relativno sitne. Da bi to filtriranje bilo efikasno čestice se ne zadržavaju na površini već prodiru dublje u filtarski sloj. Materijal filtarskog sloja s toga mora biti veoma pažljivo odabran kako u pogledu granulometrijskog sastava tako i u pogledu debljine pojedinih slojeva. Pri ovom procesu ceo filter se kolmira (prekrije talogom) srazmerno količini izdvojenog materijala.

Razlikuju se dva osnovna tipa:

spori filtri i
brzi filtri.

Spori filtri su namenjeni prečišćavanju površinskih voda bez prethodne koagulacije i dekantacije. Koagulacija koloidnih materija se obavlja dijastazama nastalim lučenjem algi i mikroorganizama koji se nalaze na zrcima peska (biološka membrana). Da bi se dobili dobri rezultati vrše se tri stepena filtriranja:

- grubo filtriranje, 20-30 m³/24 h m² filtra
- prethodno filtriranje, 10-20 m³/24h m² filtra i
- filtriranje sa protokom 3-7 m³/24 h m² filtra.

Posle pranja ovakvih filtara, voda se ispušta kao neupotrebljiva, sve dok se ne formira biološka membrana, za šta je potrebno nekoliko dana.

Ovi filtri su pouzdani sve dok u sirovoj vodi nema mnogo materijala u obliku suspendovanih materija, u protivnom filtri za grubo i prethodno filtriranje se brzo zasite i postaju beskorisni. Pored toga osetljivi su na razmnožavanje planktona koji ih mogu blokirati, tako da se kao zaključak može reći da spori filtri nisu dovoljni za potpuno prerčišćavanje vode.

Brzi filtri, kod brzih filtara voda prolazi kroz filtarski sloj brzinama od 4-50 m/h, a biološkog dejstva praktično nema, osim u slučajevima kada je brzina smanjena i ima dovoljno kiseonika za razvoj nitrifikacionih bakterija koje uklanjaju amonijak i njegove soli.

Brzo filtriranje se odvija kao:

- direktno filtriranje, bez dodatka vodi ikakvih reagenasa, kvalitet efluenta zavisi od početnog sastava i kvaliteta sirove vode, brzine su od 4-20 m/h, a mogu ići i do 50 m/h,
- filtriranje sa koagulacijom, pri čemu se vodi dodaje koagulant Al₂(SO₄)₃ (2-10 g/m³ maksimum 15 g/m³) i katalizator aktivni Si ili sintetički polielektroliti, brzina filtriranja je 4-10 m/h, s tim što u slučaju čistih voda ide i do 40-50 m/h kao kod bazena za kupanje, uz korišćenje malih doza koagulanta. U slučaju promenljivog kvaliteta vode neophodno je

predvideti taložnicu pre filtra kako bi se izbegao eventualni prekid rada filtra kada je to najpotrebnije.

- filtriranje koagulirane i istaložene vode, koristi se kao završna i sigurnosna obrada, brzine se kreću od 5-15 m/h.

Porozni deo filtra

Karakterišu ga:

Fizičke karakteristike:

granulometrijski sastav,

efektivna veličina ili efektivni prečnik d_e ili d_{10} , što odgovara veličini od 10% na krivoj granulacije,

koeficijent ravnornosti granulacije,

oblik zrna,

mehanička postojanost,

gubitak usled kiselosti (voda može sadržati ugljenu kiselinu koja rastvara filtarske materijale),

prividna gustina na vazduhu

Priroda poroznog dela filtra

kvarcni pesak,

antracit ili mermer, (kada je iz vode potrebno odstraniti silicijum)

granulisani aktivni ugalj

Izbor granulometrijskog sastava filtarskog sloja

0.3-0.5 mm, koristi se za brzo filtriranje pod pritiskom, za bazene za kupanje, sa brzinom proticanja od 50 m/h, pad pritiska može pasti i nekoliko bara, a do zaptivanja dolazi relativno brzo; može se primeniti i koagulacija na filtru ukoliko je silicijumska mutnoća vode ispod 100 mg/l

0.6-0.8 mm, filtriranje bez prethodne dekantacije, sa ili bez koagulacije uz uslov da je silicijumska mutnoća ispod 50 mg/l, pad pritiska do 0.6 bara a brzine proticanja su oko 7m/h kod otvorenih i veće kod zatvorenih sistema,

0.9-1.2 mm, najčešće korišćeni sastav u centralnoj Evropi, za sisteme sa ili bez koagulacije; gubici su ograničeni na 0.3 bara, omogućava dobro pranje filtra vodom i vazduhom, a brzine se kreću od 15-20 m/h,

1.3-1.5 mm, odstranjivanje krupnijeg materijala direktnom filtracijom, gubici ne prelaze 0.15 bara, a služe i kao noseći sloj za granulacije od 0.4-0.8 mm

1.5-2.5 mm, koristi se klasično grubo filtriranje vode namenjene industriji bez koagulacije,

3-25 mm, isključivo u nosećim filtarskim slojevima.

Debljina filtarskog sloja

Smanjivanjem dimenzija zrna smanjuje se debljina filtarskog sloja ali se u isto vreme povećavaju prosečni i maksimalni padovi pritiska.

Ako se radi o otvorenom filtru sa slojem peska, može se grafički predstaviti pad pritiska u funkciji debljine filtarskog sloja, kao posledice režima rada filtra.

Na slici je krivom 1, označena kriva pritiska u čistom pesku, krivom 2 u vreme zaptivanja i krivom 3 kriva pritiska zamorenog filtra.

Filtriranje se može obaviti kroz homogeni ili heterogeni sastav filtra, u smeru odozgo naniže, u smeru odozdo naviše, kao i filtriranje u inverznim tokovima.

Filtri pod pritiskom

Vertikalni filtri koji se peru samo vodom,
 Vertikalni filtri koji se peru vodom i vazduhom,
 Filtarski stubovi (kolone) sa dve ili tri ćelije,
 Horizontalni filtri koji se peru vodom i vazduhom,
 Dvostruki filtri sa inverznim tokovima,
 Filtri sa cirkulacijom peska tipa F.C.S.
 Filtar sa dva sloja
 Filtri koji se peru pomoću automatskog sifona

Otvoreni brzi filtri

Filtri tipa Aquazur,
 Otvoreni filtri sa dva sloja,
 Otvoreni dvostruki filtri sa inverznim tokovima,
 Suvi filtri

U praksi se najčešće sreću uređaji koji rade po principu spore, brze i filtracije sa obloženim slojem.

Radni parametri pojedinih od ovih sistema su dati u sledećoj tabeli:

Procesne karakteristike	Spora peščana filtracija	Brza peščana filtracija	Filtracija kroz tanki sloj
Brzina filtracije	0.05-0.2 m/h	5-15 m/h	1.3-5 m/h
Prečnik čestica punjenja	0.3-0.45 mm	0.5-1.2 mm	4-30 µm
Debljina sloja	0.9-1.5 m	0.6-1.8 m	2-5 mm
Zahtevana visina	0.9-1.5 m	1.8-3.0 m	6-30 m
Trajanje procesa	1-6 meseci	1-4 dana	6h - 30 dana
Period sazrevanja filtra (dovodjenja u radne uslove)	nekoliko dana	15 min – 2 h	nema
Predtretman vode	nije potreban	koagulacija	nije potreban
Dominantni filtracioni mehanizam	cedjenje, biološka aktivnost	dubinska filtracija	cedjenje
Postupak regeneracije	grabuljanje sloja	suprotnostrujno ispiranje	zamena sloja
Maksimalna zamućenost napojne vode	10-50 NTU	Nema ograničenja ukoliko je predtretman zadovoljavajući	10 NTU

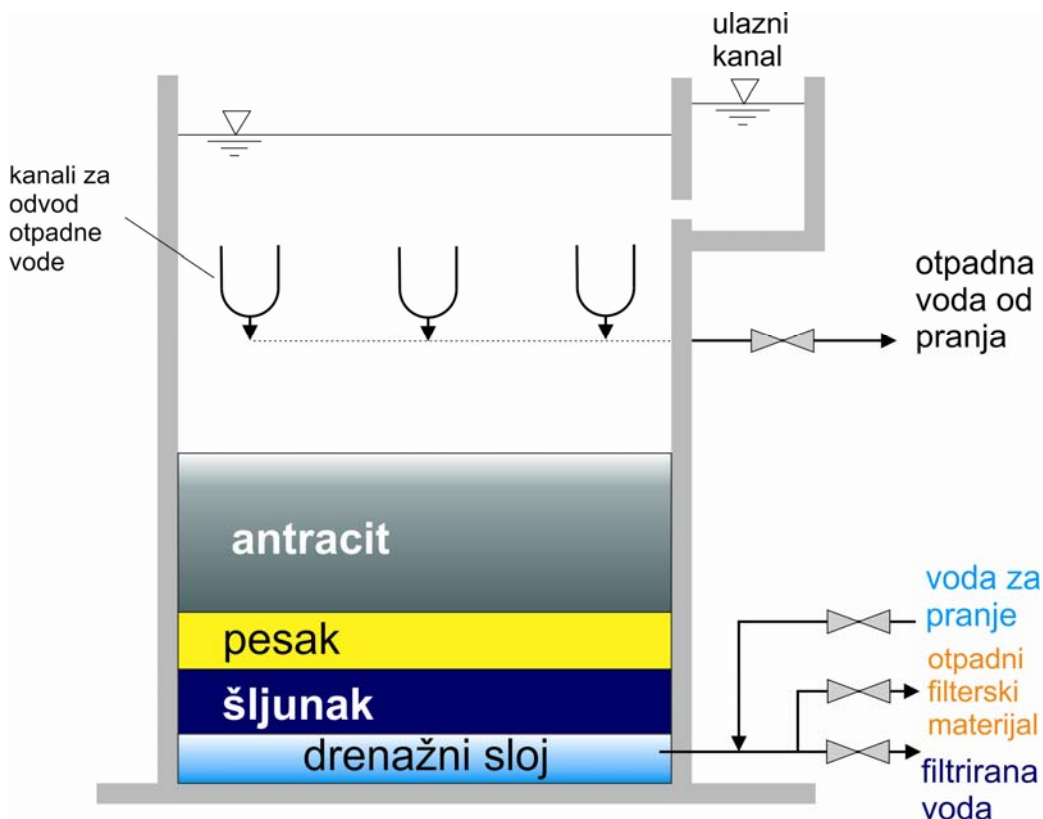
Brza filtracija

Brza filtracija je široko zamenila sporu peščanu filtraciju, zbog mnogih prednosti koje ima u odnosu na nju, a pre svega u činjenici da je radna brzina proticanja vode i 100 puta veća nego što je to u sporom filteru. To omogućava da se: a) naprave filterski slojevi sa debljim uniformnim slojem čestica, b) koriste koagulaciona sredstva da se poboljša proces filtracije i c) da se mehanički ili hidraulički efikasno čiste filterske ispune tokom rada i obezbedi kontinualnost rada.

Filterska ispuna kod filtera sa brzom filtracijom je uniformnog prečnika. Ovo omogućava da se u filter uvodi veća napojna količina vode, a da se istovremeno značajno ne povećava pad pritiska u sloju tokom filtracije. Stoga, izdvajanje čestica iz vode se ne odvija mehanizmom cedjenja, već dolazi do adhezije čestica iz vode na površini čestice ispune filtera. Čestice se izdvajaju prolazeći kroz dubinu sloja filtera, pa se zato ovaj tip filtracije naziva i dubinska filtracija. Ovaj mehanizam obezbeđuje veći kapacitet uređaja.

Predtretman vode je neophodan pre uvođenja u filter sa brzom filtracijom, kako bi se značajno povećala efikasnost izdvajanja čestica. Prirodno su čestice u vodi elektronegativne, pa ih je pre uvođenja u filter potrebno destabilizovati, kako bi se lakše odvijala njihova adhezija za ispunu filtera, a to se vrši dodatkom određenih hemijskih sredstava, koagulanata.

Šematski prikaz rada filtera sa brzom filtracijom je dat na sledećoj šemi:



Brza filtracija se izvodi u dva koraka, a) proces filtracije i b) proces pranja filtra, povratnim tokom, kojim se nataložene čestice s filterske ispune odnose iz filtra. Proces filtracije uobičajeno traje od 1 do 4 dana, dok proces ispiranja filtra traje uobičajeno od 15 do 30 min. Tokom postupka filtracije, voda sa vrha prolazi ka dnu filtra, tu se prikuplja i izlaznim tokom se odvodi u dalju fazu obrade. Posle određenog vremena, kada se određena količina čestica zadrži u filtru, dovodni ventil se zatvara, a otvara dovod povratnog toka vode (i vazduha u pojedinim slučajevima) i suprotnostrujno, sa većim protokom se vrši ispiranje filterske ispune i ta voda se odvodi odvodnim kanalima, pokazanim na slici. Nakon završetka procesa ispiranja, ponovo se otvara dovod napojne vode, zatvara dovod vode za ispiranje i proces se nastavlja. Da bi sistem kontinualno radio, uvek se u sistem ugrađuje najmanje dva paralelna filtra, kako bi jedan mogao da se ispira, a da se ne narušava kapacitet postrojenja.

Klasifikacija brzih filtera se vrši prema stepenu neophodnog predtretmana koji predhodi uvodjenju vode u brzi filter. U sledećoj tabeli, dat je pregled različitih brzih filtera:

Tip filtracije	Opis
Konvencionalna filtracija	Predtretman obuhvata dodavanje koagulanta, flokulaciju i bistrenje. U ovakav sistem se može dovoditi napojna voda koja ima zamućenost i preko 1000 NTU.
Direktna filtracija	Dodaje se koagulant i vrši se flokulacija, ali se ne vrši prethodno bistrenje, tako da se zahteva ulazna zamućenost manja od 15 NTU
In-line ili kontaktna filtracija	Uključuje samo dodavanje koagulanta, sa malom agregacijom čestica, tako da se primenjuje pri zamućenosti napojne vode manje od 10 NTU
Dvostepena filtracija	Koristi se pre svega kod malih i kompaktnih instalacija. Dodaje se koagulant i nakon toga se odvodi voda u filter sa tokom naviše i grubom ispunom (najčešće polipropilenska) gde dolazi do flokulacije i izdavanja dela čestica, pa se naziva grubi filter, da bi se nakon toga voda odvodila u drugi stepen, klasičan brzi filter. Pogodan je za tretman površinskih voda sa zamućenošću ispod 100 NTU

Klasifikacija brzih filtera se može vršiti i prema tipu ispune filtra:

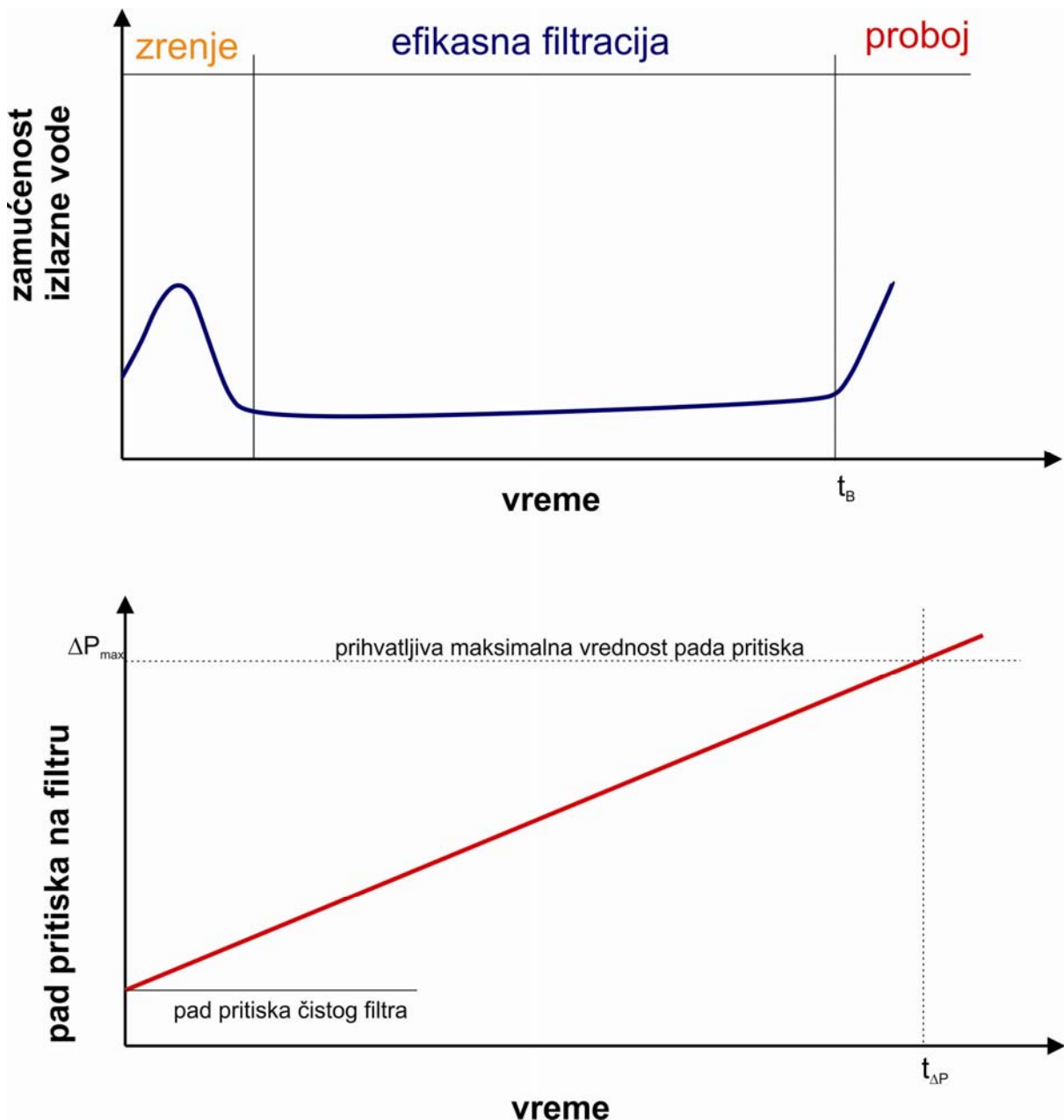
Tip ispune filtra	Opis
Monomedijski	Obično se koristi jedan sloj peska, visine 0.60-0.75m i danas vrlo retko primenjuje jer su se drugi pokazali efikasnijim
Duboki monomedijski	Usled potrebe da se ne poveća pad pritiska na filtru, koriste se materijali kao što su antracit ili granulirani aktivni uglj. Visina ispune se kreće od 1.5-1.8m i primenjuje se kada je kvalitet napojne vode nepromenljiv
Dvoslojni	Tradicionalno rešenje sadrži sloj antracita visine 0.45-0.60m a potom sloj peska 0.23-0.30m, kada je reč o filtraciji sa tokom vode kroz filter naniže. Duboki

dvoslojni filtri ponekad imaju visinu i od 1.5-1.8m, ali se u tom slučaju koriste antracit i GAK (granulisani aktivni ugalj). Dvoslojni filtri su uobičajeno većih gabarita od jednoslojnih

Troslojni ili mešani

Troslojni filtri najčešće imaju sloj antracita, pa peska i na dnu sloj granita. Sloj antracita je obično visok 0.45-0.60m, sloj peska 0.23-0.30m i sloj granita 0.10-0.15m.

Vreme rada i promena pada pritiska u filtru su prikazane na sledećoj slici:



Efikasnost uklanjanja čestica iz vode se reflektuje na zamućenost izlazne struje vode, kao i na pad pritiska koji se javlja na filtru pre i nakon prolaska vode kroz filter. Pri praćenju

zamućenosti vode mogu se uočiti tri faze. Na početku filtracije, dolazi do ispiranja filterske ispune od sitnih čestica, što dovodi do kratkotrajnog povećanja zamućenosti u izlaznoj struji, da bi se nakon toga zamućenost smanjila do željenog nivoa, kada započinje faza filtracije. Tokom filtracije dolazi do blagog povećanja zamućenosti izlazne struje sa vremenom, ali još uvek u granicama željene zamućenosti. Kada je kapacitet filterskog medijuma ispunjen, čestice iz vode se ne mogu više odvajati na filteru i dolazi do njihovog prolaska kroz filter i samim tim povećanja zamućenosti vode na izlazu. Ta tačka kada se zamućenost »probija« kroz filtersku ispunu, naziva se tačka proboja i nakon nje je neophodno prekinuti proces filtracije i započeti fazu ispiranja filtra.

U tom momentu se uključuje tok za protivstrujno pranje kojim se nahvatane čestice odnose iz filtra i time se filterska ispuna sprema za novu fazu filtracije.

Kada je reč o padu pritiska kroz filter, želja je da on u procesu uvek bude što manji. Tokom procesa filtracije, kako se povećava količina nahvatanih čestica u filterskoj ispuni, tako dolazi i do povećanja vrednosti pada pritiska. Vrednost maksimalnog pada pritiska u filterskoj ispuni koji se može tolerisati, može biti povezana sa vrednostima zamućenja vode u izlaznoj struji pri tački proboja, a najčešće se od strane proizvođača daje eksperimentalno određena vrednost, tako da se do tačke proboja i ne dodje.

Spori peščani filtri

Spori peščani filtri su instalirani u preko 50% postrojenja za tretman vode u SAD i radni vek im je bio i preko 50 godina. Zbog svoje jednostavnosti i u konstrukciji i u radu, nisu iziskivali česte remonte, pa su stoga i bili vrlo često primenjivani postupci, posebno na mestima gde broj stanovnika, korisnika vodovoda nije prelazio 10.000. Ovaj postupak se koristio i u Evropi, a posebno u gradovima London i Amsterdam.



Najčešće, konstrukcija je betonska, koja u sebi sadrži kanale za drenažu profiltrirane vode, noseći sloj šljunka od 0.3-0.6m iznad koje se nasipa pesak veličine 0.30-0.45 mm u visini od 0.9-1.5m. Spori peščani filtri se ne ispiraju! Kada pad pritiska kroz sloj dostigne maksimalnu dozvoljenu vrednost (obično od 0.9-1.5m vodenog stuba), površinski sloj peska 1-2 cm se skida i pere van filtra, kako bi se ponovo koristio. Sa površine filtra se skida sloj po sloj sve dok se ne dostigne visina peščanog sloja od 0.4-0.5m, kada se dosipa nova količina peska do prvobitne dubine. Tada sledi period zrenja filtra od nekoliko dana,

nakon čega se uspostavlja normalan rad filtra. Nakon nekoliko ciklusa rada jedne peščane ispune, mikrobiološko zagadjenje samog filtra se može povećati i proširiti duboko u filter, pa se tada pribegava kompletnoj zameni filterske ispune.

Spori peščani filtri se mogu primeniti kod vode koja nema predtretman ali čije zamućenje ne prelazi 50 NTU, odnosno 30 jedinica za obojenost, premda većina njih radi u situacijama kada ulazna voda ima manje od 10 NTU, pri čemu neki istraživači preporučuju i korišćenje kod vode koja ne prelazi 5 NTU.



Filtracija kroz tanki sloj

Ovaj način filtracije je potpuno suprotan u odnosu na sporu ili brzu filtraciju. Umesto da voda prolazi kroz dubok sloj, u ovom slučaju voda prolazi kroz tanki sloj debljine 2-3cm, materijala konzistencije od 4 do 30 μ m. Vreme trajanja filtracije kroz ovakav filter se kreće od 10 min do 30 dana, u zavisnosti od procesa za koji se filter primenjuje. Najčešći materijal koji se koristi za formiranje ovakvog filtra je diatomejska zemlja.

Proces filtracije se izvodi u 3 koraka. Prvo se na određeni nosač nanosi sloj diatomejske zemlje, oko 0.5-1.0kg/m². Nakon toga se otpočinje sa filtracijom. U vodu koja se filtrira, dodaje se isti materijal kojim je obrazovan tanki sloj i on se tokom filtracije polako nanosi na vrh sloja i time omogućava dalju filtraciju, jer se obezbeđuje određena poroznost sloja. U slučaju da se novi materijal ne dodaje na ovaj način, filter bi se brzo zapušio i proces filtracije bi bio brzo zaustavljen. Kada pad pritiska na filtru dostigne maksimalnu vrednost, počinje treća faza, povratno ispiranje. Povratnim tokom vode, tanki sloj se odnosi u struji vode sa nosača i na površinu nosača je moguće ponovo nanositi novi sloj diatomejske zemlje i proces se nastavlja novim ciklusima.

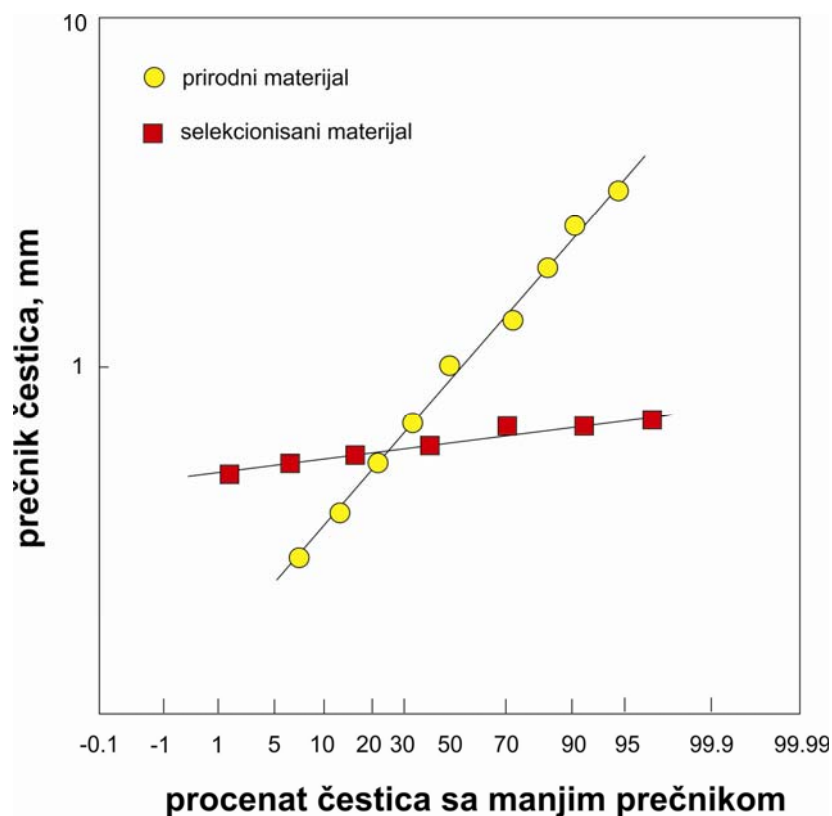
Filterska ispuna

U procesima brze filtracije najčešće se koriste kvarcni pesak, antracit, šljunak i drobljeni granit. Antracit je tvrdji i sadrži manje isparljivih organskih materija nego drugi ugljevi. Granit, kao čvrsti materijal se koristi za formiranje dna filtra. Takođe materijali koji su u osnovi oksidi gvoždja i titanijuma se takođe mogu koristiti za istu namenu. Pored njih se i GAK može koristiti, ukoliko se želi dvojaki efekat filtracije i adsorpcije čestica i jedinjenja iz vode.

Osnovne karakteristike filterske ispune čine: efektivna veličina i koeficijent uniformnosti, oblik zrna, gustina materijala, tvrdoća materijala, poroznost sloja i specifična površina sloja.

Efektivna veličina i koeficijent uniformnosti

Prirodni materijal je obično izdrobljen i odstupa od željene veličine koju bismo ugradili u ispunu filtera. Raspodela veličina izdrobljenih zrna približno podleže logaritamskoj raspodeli. Stoga se pre ugradnje filterska ispuna mora tretirati i odstarniti najkrupnija i najsitnija frakcija kako bi se dobila što ujednačenija veličina zrna ispune.



Efektivna veličina (efective size, ES ili d_{10}) je ona veličina prečnika zrna pri kojoj 10% zrna može biti manje od prečnika koji je određen prosejavanjem, analizirano po težini čestice.

Koeficijent uniformnosti je odnos prečnika zrna od koga je 60 % drugih zrna manje po prečniku, prema prema efektivnoj veličini (prečniku):

$$UC = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Gde je:

UC koeficijent uniformnosti,

d_{10} prečnik od koga je 10% drugih čestica sa manjim prečnikom

d_{60} prečnik veći od 60% prečnika drugih čestica

Pri formiranju ispune brzog filtra poželjna je mala vrednost koeficijenta uniformnosti i ona se kod većine materijala kreće u opsegu od 1.3 do 1.7. Neuniformnost raspodele veličine čestica može imati negativne posledice jer se sitnije čestice mogu nakon protivstrujnog pranja grupisati na površini filtra i izazvati veći pad pritiska, a sa druge strane krupnije čestice je teže fluidizovati pri povratnom pranu, pa i to može imati negativne efekte.

Oblik zrna je takodje bitan faktor koji utiče na otpore pri strujanju vode kroz filter. Određuje se veličinom koju nazivamo sferičnost a definiše se kao:

$$\psi = \frac{\text{povrsina ekvivalentne sfere}}{\text{povrsina aktuelnog zrna}}$$

Takodje, poznata je i veličina koju označavamo kao faktor oblika, a izračunavamo je po jednačini:

$$\zeta = \frac{6}{\psi}$$

Za sfere je $\psi = 1$ i $\xi = 6$, pa je za sve druge čestice nepravilnog oblika $\psi < 1$ i $\xi > 6$.

Tvrdoća materijala je od posebne važnosti za formiranje filterske ispune i jedinica za određivanje tvrdoće je Meš (Moh), kao relativan odnos, pri čemu se tvrdoća talka uzima kao 1 a dijamanta kao 10 Moh. Pesak, šljunak i granit imaju tvrdoću koja je dovoljna da predupredi abraziju i kreće se u redu veličina od 5-7 Moh, dok antracit ima tvrdoću u granicama 2-3 Moh.

Poroznost sloja ispune

Poroznost sloja ispune ima esencijalnu važnost u radu filtra i njegove efikasnosti. Ona predstavlja odnos praznog prostora unutar sloja, prema ukupnom prostoru koji filtarska ispuna zauzima.

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T} = \frac{V_T - V_M}{V_T}$$

Gde je:

- ε poroznost
- V_V zapremina šupljina u sloju
- V_T zapremina celog sloja
- V_M zapremina svih čestica ispune

Specifična površina ispune filtra

Specifična površina filtarske ispune se određuje kao odnos površine svih zrna koji sloj formiraju, u odnosu na zapreminu sloja čestica.

$$S = \frac{(\text{broj zrna})(\text{površina pojedinacnog zrna})}{\text{zapremina celog sloja}}, \quad \text{m}^{-1}$$

Za uniformni, monodisperzni sloj, specifična površina se izračunava po jednačini:

$$S = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d}$$

Gde je d , prečnik zrna ispune, izražen u m.

Za nesferične čestice, koje imaju ekvivalentni prečnik d , specifična površina se računa po jednačioni:

$$S = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\psi d} = \frac{\xi(1 - \varepsilon)}{d}$$

Ova jednačina se može koristiti samo kada je poznat ekvivalentan prečnik zrna ispune.

Za ispunu sporih filtera se koriste sitnije frakcije peska od 0.3-0.45m, sa koeficijentom uniformnosti od oko 2.5.

Za ispunu brzih filtera se koriste materijali sledećih karakteristika:

Karakteristika	Jedinica	Šljunak	Ilmenit	Pesak	Antracit	GAK
Efektivna veličina	mm	0.2-0.4	0.2-0.4	0.4-0.8	0.8-2.0	0.8-2.0
Koeficijent uniformnosti	UC	1.3-1.7	1.3-1.7	1.3-1.7	1.3-1.7	1.3-2.4
Gustina	g/ml	3.6-4.2	4.5-5.0	2.65	1.4-1.8	1.3-1.7
Poroznost	%	45-58	-	40-43	47-52	-
Tvrdoća	Moh	6.5-7.5	5-6	7	2-3	mala

Hidraulična razmatranja proticanja kroz granulisani medijum

Pored efikasnosti izdvajanja čestica iz vode, drugi važan parametar je pad pritiska koji se javlja u filtru tokom njegovog rada ali i procesa ispiranja filtra. Pad pritiska je bitna veličina kako bi se mogla predvideti pomoćna oprema koja će omogućiti filtraciju i proces pranja filtra.

Najvažniji aspekt hidrodinamičkog razmatranja procesa filtracije je svakako režim proticanja u filtru, koji se određuje na osnovu Rejnoldsovog broja..

Pri proticanju vode oko granulisanog medijuma, Re broj se može računati po jednačini:

$$Re = \frac{\rho_w u d}{\mu}$$

Gde je:

- Re Rejnoldsov broj proticanja vode oko sfere
- u brzina filtracije, površinska brzina, m/s
- ρ_w gustina vode, kg/m³
- d prečnik lestice, m
- μ viskozitet, kg/ms

Pri proticanju kroz granulisani sloj ne mogu se postaviti granice između laminarnog i turbulentnog toka kao kod strujanja kroz cev, već se razlikuju četiri režima strujanja:

- Prvi i najslabiji režim se definiše Darcy-ovo proticanje ili puzeće strujanje, za koje je $Re < 1$ i karakteriše ga veliki uticaj viskoziteta fluida na samo proticanje.
- Drugi režim je takozvano Forcheimer-ovo strujanje u opsegu od $1 < Re < 100$, kod koga pored viskoziteta na režim strujanja utiču i inercione sile, posebno u uslovima gde se pri prolasku fluida kroz porozni sloj, fluid i ubrzava i usporava, usled promene veličina šupljina kroz koji mora da prodje, pri proticanju. Pad pritiska pri proticanju fluida na koji dominantno utiče viskozitet je proporcionalan brzini proticanja u , dok je u situaciji gde utiču i inercione sile, on proporcionalan u^2 .
- Treći režim je prelazni režim čija gornja vrednost Rejnoldsovog broja iznosi od 600 do 800, dok je iznad ovih vrednosti,

- Četvrti turbulentni režim, koji se javlja pri većim vrednostima Rejnoldsovog broja.

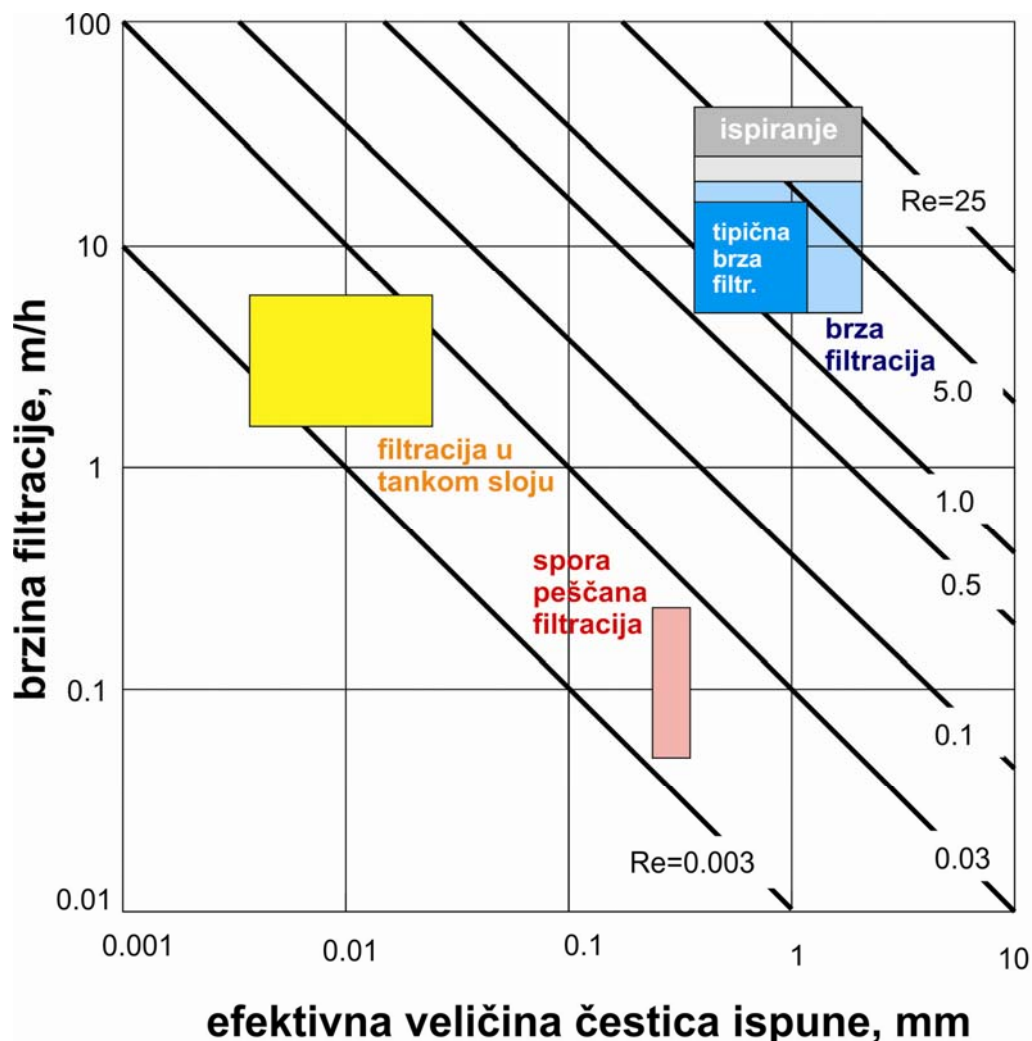
Veza izmedju režima proticanja, efektivne veličine granulisanog medija za filtraciju i brzine filtracije je data na sledećoj slici.

Spora filtracija se odvija pri vrednostima Re od 0.003 do 0.03. Tipična brza filtracija se odvija za Re broj od 0.5 do 5, na prelazu izmedju Darcy-evog i Forcheimer-ovog strujanja, dok se intenzivna filtracija odvija pribrizinama proticanja od oko 33 m/h i vrednostima Re broja oko 18. Ispiranje filtera se vrši pri vrednostima Re broja od 3 do 25 i u kompletu je u uslovima Forcheimer-ovog strujanja.

Darcy-ev režim proticanja

Prvu studiju o proticanju fluida kroz poroznu sredinu je objavio Henry Darcy još 1856 godine, uspostavljajući vezu izmedju brzine proticanja fluida kroz sloj, pada pritiska i debljine sloja, kroz koji se fluid kreće u puzajućem toku:

$$v = k_p \frac{h_L}{L}$$



Gde su:

- u površinska brzina fluida, m/s
- k_p koeficijent, poznat kao hidraulička permeabilnost, m/s
- h_L pad pritiska u sloju izražen u metrima, m
- L debljina sloja kroz koji prolazi fluid, m

Darcy-eva jednačina ne sadrži matematički opis poroznog materijala, pa stoga ne može biti korišćena za izračunavanje neophodnih veličina pri projektovanju filtra. Tek je Kozeny 1927 postavio jednačinu koja povezuje karakteristike poroznog medija i njegovo hidrauličko ponašanje. Kozeny je postavio analogiju između granulisanog sloja i paralelnih cilindričnih cevi, koje je opisao još 1841. Poiseuille, što se može dobiti iz Navier-Stokes jednačine, u obliku:

$$\frac{h_L}{L} = \frac{32\mu v}{\rho_w g d^2}$$

Gde je:

- g ubrzanje zemljine teže, 9.81 m/s²
- d prečnik cevi, m

Oslanjajući se na ovu jednačinu, Kozeny je postavio jednačinu:

$$\frac{h_L}{L} = \frac{k_k \mu S^2 v}{\rho_w g \varepsilon^3}$$

Gde je:

- k_k Kozeny-ev koeficijent, bezdimenzioni
- S specifična površina čestica, m⁻¹
- ε poroznost sloja, bezdimenzioni

Kozeny-ev koeficijent je empirijska veličina i za sferične čestice ima vrednost oko 5 (Carman 1937). Korekcije ovog koeficijenta se vrše u odnosu na njegovu sferičnost ili na factor oblika, shodno istraživanjima Carman-a, kao i Fair-a i Hatch-a (1933)

Forcheimer-ovo strujanje

Sa povećanjem vrednosti Re broja iznad 1, pad pritiska se povećava u odnosu na vrednosti koje se dobijaju primenom Darcy-evog modela. Forcheimer je 1901. godine, postavio nelinearnu jednačinu, koja opisuje pad pritiska pri većim vrednostima brzina proticanja:

$$\frac{h_L}{L} = k_1 v + k_2 v^2$$

Gde su:

- k_1 koeficijent permeabilnosti za linearni član, s/m
- k_2 koeficijent permeabilnosti za kvadratni član, s²/m²

I ova jednačina je zasnovana na empirijskim postavkama, ali je nju moguće dobiti i iz Navier-Stokes jednačine, uz određene uslove kojise odnose na konzistenciju fluida i termodinamičke karakteristike sistema.

Tek je Ergun 1952. godine, postavio jednačinu koja se i danas može primeniti radi opisivanja proticanja fluida kroz porozan sloj:

$$h_L = k_V \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu L v}{\rho_w g d^2} + k_I \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{L v^2}{g d}$$

Gde su:

k_V koeficijent pada pritiska usled dejstva viskoznih sila, bezdimenzioni
 k_I koeficijent pada pritiska usled dejstva inercionih sila, bezdimenzioni

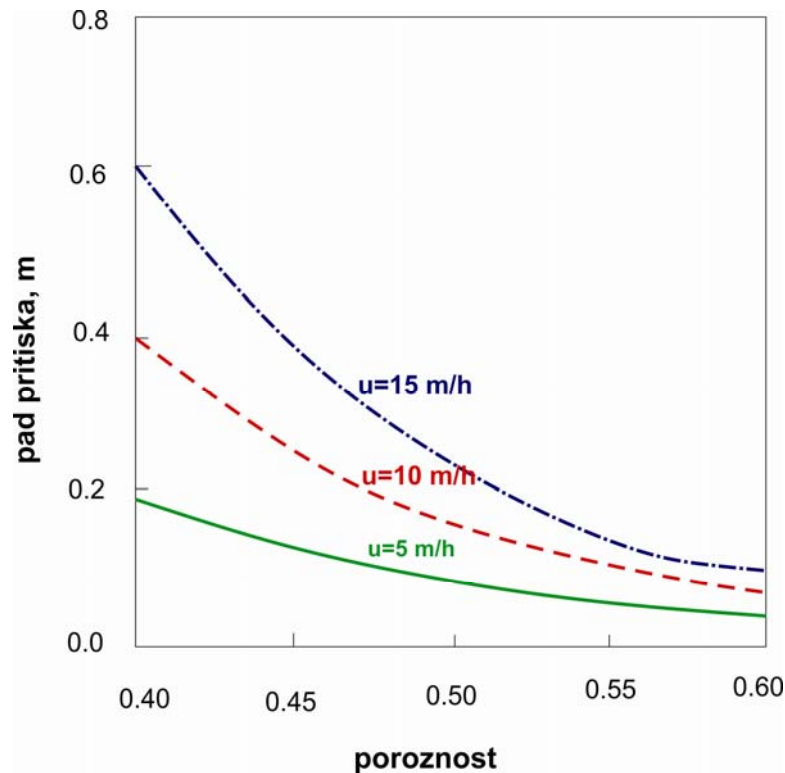
Ergunova jednačina je izvedena na osnovu oko 640 eksperimentalnih vrednosti, koje su pokrivala opseg Re broja od 1 do 2000.

Na osnovu tih podataka određeno je da je: $k_V = 150$ i $k_I = 1.75$

Pad pritiska pri ispiranju filtra

Koeficijente predložene u Ergunovoj jednačini bazirane na efektivnom prečniku nije lako meriti, ali vrednosti u jednačini se mogu primeniti za sferične čestice. Za pesak i antracit predložene su druge vrednosti, predstavljene u tabeli:

Medijum	k_V	k_I	$\varepsilon, \%$
Pesak	110-115	2.0-2.5	40-43
Antracit	210-245	3.5-5.3	47-52



Primer 11-2 str 893

Izračunati pad pritiska pri pranju filtra sa dvoslojnom ispunom od 1.5m antracita, efektivne veličine ES=1.1mm, ispod koga je pesak visine 0.3m, efektivne veličine ES=0.5mm, pri brzini proticanja od 15m/h i temperature 15°C.

Rešenje:

Pad pritiska kroz dvoslojni filter je jednak zbiru pada pritiska kroz svaki sloj posebno. Pad pritiska kroz sloj antracita će se računati po jednačini:

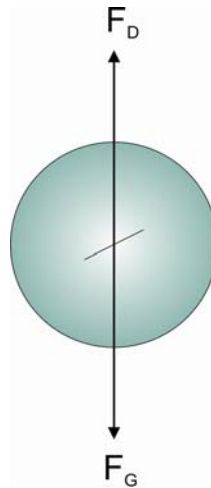
$$h_L = k_v \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu L v}{\rho_w g d^2} + k_f \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{L v^2}{g d}$$

- Pošto nisu priložene vrednosti eksperimentalnih ispitivanja ili neki drugi podaci, onda se za vrednosti koeficijenata permeabilnosti uzimaju srednje vrednosti date u tabeli, pa je: $k_v=228$, a $k_f=4.4$ i $\varepsilon=0.50$. Pošto je temperature vode 15°C, onda su vrednosti za vodu: $\rho_w=999 \text{ kg/m}^3$, a $\mu=1.14 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$.
- Zamenom vrednosti za prvi član u jednačini dobija se vrednost od 0.27m
- Zamenom vrednosti u drugom članu jednačine, dobija se 0.04m
- Sabiranjem ove dve vrednosti dobija se $h_{L \text{ antracit}} = 0.27 + 0.04 = 0.31 \text{ m}$
- Ponavlja se proračun za pesak, čije su vrednosti koeficijenata i poroznosti $k_v=112$, a $k_f=2.2$ i $\varepsilon=0.42$, pri čemu se dobijaju vrednosti: $h_{L \text{ pesak}} = 0.30 + 0.02 = 0.32 \text{ m}$
- Ukupni pad pritiska kroz čisti sloj antracita i peska je jednak zbiru obe vrednosti pada pritiska pa je: $h_L = 0.31 \text{ m} + 0.32 \text{ m} = 0.63 \text{ m}$

Protivstrujno pranje filtra

Na kraju ciklusa rada, brzi filtri se ispiraju upumpavanjem filtrirane vode naviše, kroz sloj ispune filtra. Strujni tok za ispiranje filtra mora biti dovoljno jak da ispere nahvatane čestice unutar ispune i da ih iznese napolje. Da bi se sprečilo odnošenje ispune izvan filtra, u samom telu filtra je potrebno obezbediti prostor iznad sloja filtra, koji će biti dovoljan za ekspanziju ispune sloja pri njegovoj fluidizaciji, tokom ispiranja.

Sile koje deluju na česticu ispune, pokazane su na sledećoj slici.



Ukoliko je sila koja vuče naniže veća, doći će do taloženja čestica, dok u slučaju da je sila koja vuče naviše dominantna, dolazi do fluidizacije čestica i ispiranja sloja. Sila koja vuče naniže je ekvivalentna težini čestice i izračunava se po jednačini:

$$F_G = mg = (\rho_p - \rho_w) \left(\frac{\pi}{6} d^3 \right) g$$

Sila koja vuče naviše, sila trenja, uzrokovana suprotnostrujnim tokom vode, zavisi od režima toka i može se računati po jednačini:

$$F_D = \begin{cases} 3\pi\mu v d & \text{for } Re < 2 \\ \frac{2.31}{Re^{0.6}} \pi \rho_w v^2 d^2 & \text{for } 2 \leq Re \leq 500 \end{cases}$$

Ispiranje čestica se javlja u Forcheimer-ovom režimu toka, koje odgovara opsegu $2 \leq Re \leq 500$.

Brzina fluida koja je potrebna za održavanje čestica u suspendovanom stanju, može se izračunati iz jednakosti F_G i F_D i izraziti po jednačini:

$$v = \left[\frac{g(\rho_p - \rho_w) d^{1.6}}{13.9 \rho_w^{0.4} \mu^{0.6}} \right]^{0.714}$$

Bilans sila pri ispiranju filtra je dat u sledećem primeru.

Primer

Filter je ispiran brzinom od 40 m/h pri temperature vode od 15°C. Odrediti da li će čestica peska prečnika 0.1mm biti isprana iz filtra.

Rešenje:

1. Potrebno je prvo izračunati gravitacionu silu koja deluje na česticu. Gustina čestica peska $\rho_p=2650 \text{ kg/m}^3$, dok je gustina vode na 15 °C, $\rho_w=999 \text{ kg/m}^3$.

$$F_G = (2650 - 999) \left(\frac{\pi}{6} (0.0001)^3 \right) 9.81 = 8.48 \times 10^{-9} \text{ kgm/s}^2 = 8.48 \times 10^{-9} \text{ N}$$

2. Izračunati Rejnoldsov broj da bi se odredio režim toka.

$$Re = \frac{\rho_w v d}{\mu} = \frac{999 \cdot 40 \cdot 0.1}{1.139 \times 10^{-3} \cdot 3600 \cdot 10^3} = 0.97$$

3. Pošto je $Re < 2$, onda se sila koja vuče naviše, računa po jednačini:

$$F_D = \frac{3\pi \cdot 1.139 \times 10^{-3} \cdot 40 \cdot 0.1}{3600 \cdot 10^3} = 1.19 \times 10^{-8} \text{ N}$$

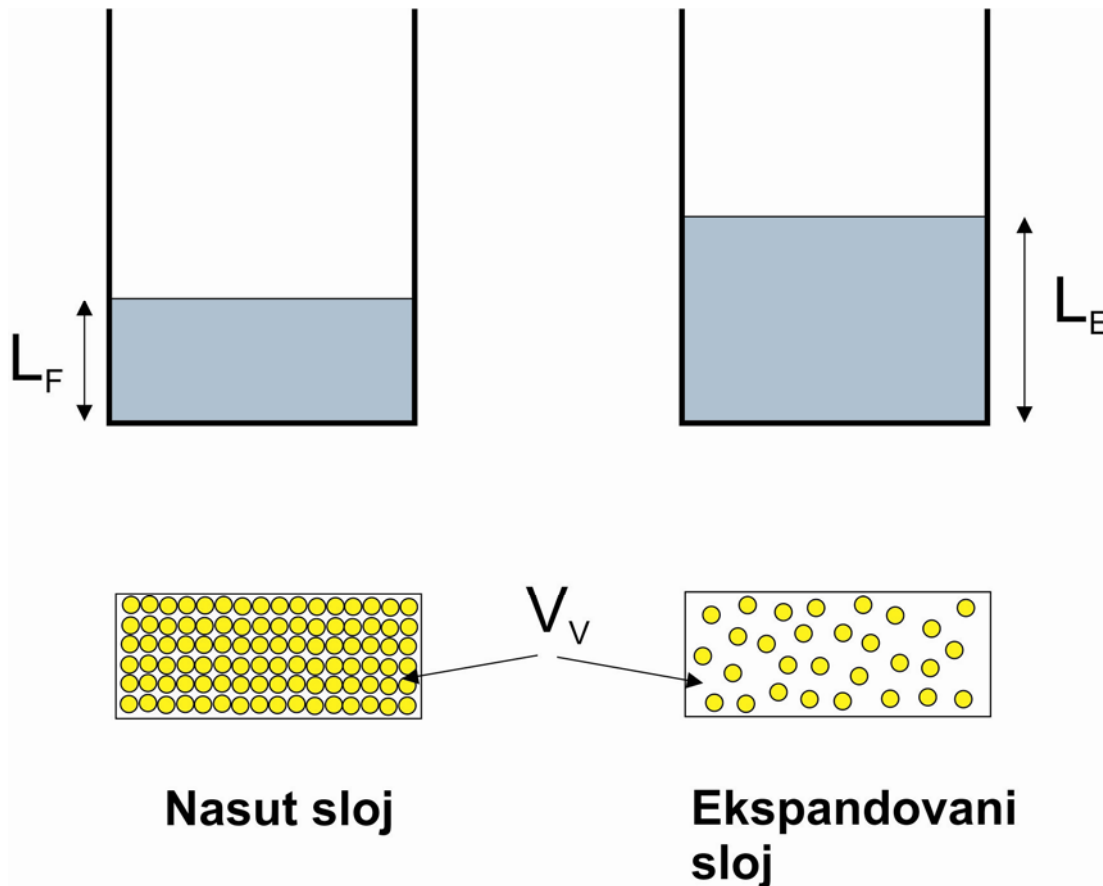
4. Poredeći ove dve sile, dobija se odnos:

$$F_D = 1.19 \times 10^{-8} \text{ N} > F_G = 8.48 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Pošto je sila koja vuče naviše, veća od gravitacione sile, čestica peska će biti izneta iz filtra.

Ekspanzija sloja i poroznost

Tokom filtracije, u sloju se uspostavlja ravnoteža između gravitacione sile i sile trenja. Tokom ispiranja filtra, brzina fluida unutar sloja je veća nego što je njena brzina iznad sloja i koja bi delovala na izolovanu i pojedinačnu česticu u vodi. Iz tog razloga je i sila trenja koja se javlja u nasutom sloju veća, pa samim tim dolazi do podizanja čitavog sloja. Kako se sloj podiže (širi) tako dolazi do povećanja poroznosti unutar sloja, a samim tim i do istovremenog smanjenja brzine kojom voda prolazi između čestica, sve dok se ponovo ne uspostavi ravnoteža između gravitacione i sile trenja.



Veza izmedju ekspanzije sloja i njegove poroznosti je data sledećom jednaćinom:

$$\frac{L_E}{L_F} = \frac{1 - \varepsilon_F}{1 - \varepsilon_E}$$

Gde je:

- L_E debljina (visina) ekspanovanog sloja ispune filtra, m
- L_F debljina (visina) nasutog (statićnog) sloja, m
- ε_E poroznost ekspanovanog sloja
- ε_F poroznost nasutog sloja

U novijim radovima, (Akgiray i Saatci 2001) su pokazali da Ergunova jednaćina jednako važi i za nasuti i za ekspanovani sloj čestica. Sila trenja, kod svih zrnastih medija je jednaka onoj koja deluje i na vodu i ona se manifestuje kao pad pritiska. Pad pritiska kroz fluidizovani sloj je računat kao gravitaciona sila (fluidizovana težina) na ulazu u sloj, kao što je predstavljeno jednaćinom:

$$F_G = mg = (\rho_p - \rho_w)(1 - \varepsilon)aLg$$

Gde je:

- a površina poprečnog preseka filtarskog sloja, m²

Težina sloja mora biti podeljena sa površinom filtra, a , kako bi se težina soja prevela u jedinice kojim se izražava pritisak, a nakon toga podeliti sa $\rho_w g$, kako bi se jedinice za pritisak prevlele u jedinice za pad pritiska u metrima, m , shodno jednačini:

$$h_L = \frac{F_G}{a\rho_w g} = \frac{(\rho_p - \rho_w)(1 - \varepsilon)L}{\rho_w}$$

U fluidizovanom sloju, pad pritiska izazvan težinom čestica se može izračunati korišćenjem Ergunove jednačine:

$$k_V \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu L v}{\rho_w g d^2} + k_I \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{L v^2}{g d} = \frac{(\rho_p - \rho_w)(1 - \varepsilon)L}{\rho_w}$$

Analitičko rešenje prethodne jednačine po brzini fluida v , daje vrednost brzine ispiranja za bilo koji set filterskih uslova. Prethodnu jednačinu je potrebno preurediti i rešavati kao kvadratnu jednačinu po Re broju, u kom figuriše brzina fluida v , po sledećoj jednačini:

$$k_I Re^2 + k_V (1 - \varepsilon) Re - \beta = 0$$

$$\beta = \frac{g \rho_w (\rho_p - \rho_w) d^3 \varepsilon^3}{\mu^2}$$

Pošto kvadratna jednačina ima dva rešenja, prihvatljivo rešenje je:

$$Re = \frac{-k_V (1 - \varepsilon)}{2k_I} + \frac{1}{2k_I} \sqrt{k_V^2 (1 - \varepsilon)^2 + 4k_I \beta}$$

Brzina ispiranja filtra mora biti veća od minimalne brzine fluidizacije većih čestica ispune, odnosno one čija je efektivna veličina d_{90} .

Izračunavanje brzine ispiranja je dato u sledećem primeru:

Primer

Odrediti brzinu ispiranja sloja filterske ispune antracita koja ekspanduje 30%, koristeći sledeće podatke, $L_F = 2m$, $d = 1.3mm$, $\rho_p = 1700kg/m^3$, $\varepsilon = 0.52$ i temperature vode je $15^\circ C$.

Rešenje:

1. Izračunati L_E , koja odgovara ekspanziji od 30%.

$$L_E = L_F + 0.3L_F = 2 + 0.3 \cdot 2 = 2.6 m$$

2. Izračunati poroznost ekspanzovanog sloja, ε_E , na osnovu jednačine.

$$\frac{L_E}{L_F} = \frac{1 - \varepsilon_F}{1 - \varepsilon_E}$$

$$\varepsilon_E = 1 - \left[\frac{L_F}{L_E} (1 - \varepsilon) \right] = 1 - \left[\left(\frac{2}{2.6} \right) (1 - 0.52) \right] = 0.63$$

3. Izračunati vrednost β , sa vrednostima koje odgovaraju vodi na temperaturi od 15°C

$$\beta = \frac{g \rho_w (\rho_p - \rho_w) d^3 \varepsilon^3}{\mu^2} = \frac{9.81 \cdot 999 (1700 - 999) (0.0013)^3 (0.63)^3}{(1.139 \times 10^{-3})^2} = 2910$$

4. Izračunati vrednost Re, uzimajući srednje vrednosti za konstante k_V i k_I , koje su date u ranije prezentovanoj tabeli, tako da je $k_V=228$ i $k_I=4.4$

$$\text{Re} = \frac{-k_V(1 - \varepsilon)}{2k_I} + \frac{1}{2k_I} \sqrt{k_V^2(1 - \varepsilon)^2 + 4k_I\beta} = \frac{-228(1 - 0.63)}{2 \cdot 4.4} + \frac{1}{2 \cdot 4.4} \sqrt{228^2(1 - 0.63)^2 + 4 \cdot 4.4 \cdot 2910}$$

$$= 17.9$$

5. Na osnovu ove vrednosti za Re broj, brzina ispiranja se računa iz jednačine:

$$v = \frac{\mu \text{Re}}{\rho_w d} = 56.5 \text{ m/h}$$

Često je potrebno odrediti ekspanziju sloja koja se javlja za određenu brzinu ispiranja. U Ergunovoj jednačini, poroznost je na trećem stepenu, pa je analitičko rešenje dato kao rešenje kubne jednačine, (Akgiray i Saarci 2001) od kojih su dva kompleksni brojevi, a validno rešenje ima oblik:

$$\varepsilon = \sqrt[3]{X + (X^2 + Y^3)^{1/2}} + \sqrt[3]{X - (X^2 + Y^3)^{1/2}}$$

Gde su X i Y računski parametri, predstavljeni jednačinama:

$$X = \frac{\mu v}{2g(\rho_p - \rho_w)d^2} \left(k_V + \frac{k_I \rho_w v d}{\mu} \right)$$

$$Y = \frac{k_V \mu v}{3g(\rho_p - \rho_w)d^2}$$

Ciljana ekspanzija sloja kod antracita se kreće u granicama do 25%, a oko 37% za pesak. Procedura za izračunavanje ekspanzije sloja tokom ispiranja je dato u sledećem primeru:

Primer

Izračunati debljinu ekspandovanog sloja peščanog filtra, pri brzini ispiranja od 40m/h, sa sledećim karakteristikama, $L_F=0.9\text{m}$, $d=0.5\text{mm}$, $\rho_p=2650\text{kg/m}^3$ i $T=15^\circ\text{C}$.

Rešenje:

1. Izračunati parameter X. Gustina i viskozitet vode se uzimaju za temperature od 15°C . Posto vrednosti za k_V i k_I nisu date, uzimaju se srednje vrednosti, koje su date u ranije prezentovanoj tabeli, tako da je $k_V=112$ i $k_I=2.25$

$$X = \frac{\mu v}{2g(\rho_p - \rho_w)d^2} \left(k_V + \frac{k_I \rho_w v d}{\mu} \right) = 0.1921$$

2. Izračunati vrednost Y.

$$Y = \frac{k_V \mu v}{3g(\rho_p - \rho_w)d^2} = 0.1168$$

3. Poroznost ekspandovanog sloja se računa po jednačini

$$\varepsilon = \sqrt[3]{X + (X^2 + Y^3)^{1/2}} + \sqrt[3]{X - (X^2 + Y^3)^{1/2}} = 0.57$$

4. Kako poroznost nasutog sloja nije data u podacima, uzima se tablična vrednost $\varepsilon_F=0.42$ i zamenom vrednosti, dobija se debljina ekspandovanog sloja:

$$L_E = L_F \frac{1 - \varepsilon_F}{1 - \varepsilon_E} = 0.9 \frac{1 - 0.42}{1 - 0.57} = 1.21$$

5. Procentualno povećanje debljine sloja računa se po jednačini

$$\left(\frac{L_E}{L_F} - 1 \right) \times 100 = \left(\frac{1.21}{0.9} - 1 \right) \times 100 = 34\%$$

Kako je uobičajena ekspanzija sloja peska oko 37%, dobijena vrednost od 34%, se može uzeti kao prihvatljiva.

Projektovanje brzih filtera

Pri filtriranju vode brzim filtrima neophodno je ispiranje, čistom vodom koja je već prethodno filtrirana i taj deo vode se gubi kao otpadna voda. Da bi se izračunala količina vode koja se dobija nakon filtracije, potrebno je definisati sledeće veličine:

Jedinična količina vode koja se filtrira (unit filter run volume):

$$UFRV = \frac{V_F}{a} = v_F t_F \quad \text{m}^3/\text{m}^2$$

Gde je:

- V_F zapremina vode koja se profiltrira tokom procesa filtracije, m^3
 a površina poprečnog preseka filtra, m^2
 v_F brzina filtracije, m/h
 t_F vreme filtracije, h

Jedinična zapremina toka za ispiranje (unit backwash volume)

$$UBWV = \frac{V_{BW}}{a} = v_{BW} t_{BW} \quad m^3/m^2$$

Gde je:

- V_{BW} zapremina vode potrebna za ispiranje jednog filtra
 v_{BW} brzina ispiranja, m/h
 t_{BW} vreme ispiranja, h

Zapremina vode koja se potroši kao otpadna voda

$$UFWV = \frac{V_{FTW}}{a} = v_F t_{FTW}$$

Gde je:

- V_{FTW} zapremina otpadne vode koja se ispušta iz filtra, m^3
 t_{FTW} vreme ispuštanja otpadne vode iz filtra, h

Odnos neto prema ukupnoj količini vode daje procentualni iznos količine vode koja se iskoristi i može biti upućena u mrežu:

$$r = \frac{V_F - V_{BW} - V_{FTW}}{V_F} = \frac{UFRV - UBWV - UFWV}{UFRV}$$

Gde je:

- r udeo iskorišćene vode nakon filtracije

Efektivna brzina filtracije je zapremina vode proizvedena tokom filtracije, tokom ukupnog vremena filtracije.

$$v_{EFF} = \frac{UFRV - UBWV}{t_F + t_B}$$

Primer

Filter radi sa brzinom filtracije od 10 m/h, tokom 37.5h, od kojih je 15 min utrošeno na ispuštanje otpadne vode iz filtra. Nakon filtracije, ispiranje je vršeno sa brzinom od 40m/h u trajanju od 15 min. Izračunati efektivnu brzinu filtracije i udeo iskorišćene vode.

Rešenje:

1. Izračunati veličine

$$UFRV = v_F t_F = 10 \cdot 37.5 = 375 m = 375 m^3/m^2$$

$$UBWV = v_{BW} t_{BW} = 40 \cdot 0.25 = 10 \text{ m} = 10 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$UFWV = v_F t_{FTW} = \frac{10 \cdot 15}{60} = 2.5 \text{ m} = 2.5 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

2. Efektivno vreme filtracije

$$v_{EFF} = \frac{UFRV - UBWV}{t_F + t_B} = \frac{375 - 10}{37.5 + 0.25} = 9.67 \text{ m/h}$$

3. Udeo iskorišćene vode

$$r = \frac{UFRV - UBWV - UFWV}{UFRV} = \frac{375 - 10 - 2.5}{375} = 0.967 = 96.7\%$$

Parametri za projektovanje

Parametar	Jedinice	Vrednosti
Tip filtra		Konvencionalni dvoslojni
Kontrola protoka vode		Konstantan nivo
Površina medijuma za filtraciju u jednom filtru	m ²	100
Maksimalni pad pritiska	m	2.5
Brzina filtracije	m/h	15
Filterska ispuna		
<i>Gornji sloj</i>		
Tip ispune		antracit
Debljina	m	1.5
Efektivna veličina zrna	mm	1.0
Koeficijent uniformnosti		<1.4
Specifična težina		1.5-1.6
<i>Donji sloj</i>		
Tip ispune		pesak
Debljina	m	0.3
Efektivna veličina zrna	mm	0.5
Koeficijent uniformnosti		<1.4
Specifična težina		2.65
Kriterijumi za ispiranje		
Maksimalna brzina	m/h	56
Normalna brzina	m/h	45
Vreme trajanja	min	15

Primer:

Postrojenje za pripremu vode za vodosnabdevanje grada Raške, ima kapacitet od 110 l/s tj 396 m³/h. U projektovanju završne filtracije se može usvojiti filter sa brzom filtracijom i brzinom protoka od 50 m/h, pošto se radi sa filtratom koji je već oslobođen većine čvrstih čestica i čija mutnoća ne prelazi 1,2 NTU. Na osnovu usvojene brzine proticanja vode i kapaciteta postrojenja, izračunava se da je neophodna površina filtra u ovom slučaju, 8 m², tj. prečnik kružnog filtra je 3,2 m, a visina do 3,5 m.

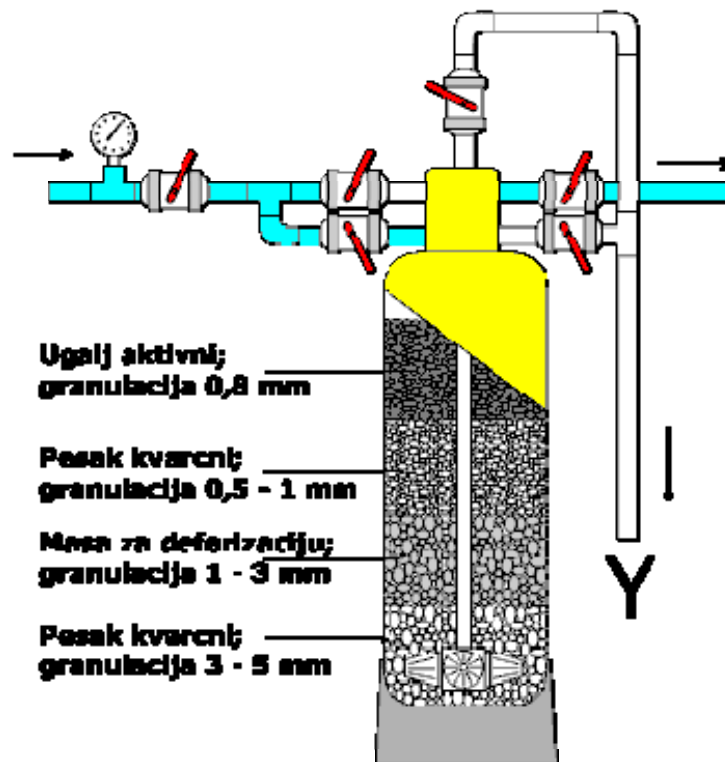
Kako se ukazala potreba za korišćenjem i GAK kao preventive u slučaju organskog zagađenja na površinskom izvoru, debljina sloja sa granulovanim aktivnim ugljem za ovu

vrstu filtera se kreće od 0,8 –1,2 m. Usvojena je visina ispune od 1 m, što znači da je ukupna potrebna količina aktivnog uglja od 8 m³.

Cena jedne ovakve kompletne filterske jedinice (filter-adsorber) bez ispune se kreće od 35 000 € do 50 000 €. Ispuna granulovanog aktivnog uglja koja je potrebna za ovaj filter u količini od 8 m³ ima cenu od 2,5 €/dm³, tako da bi ukupna cena ispune iznosila 20 000 €.

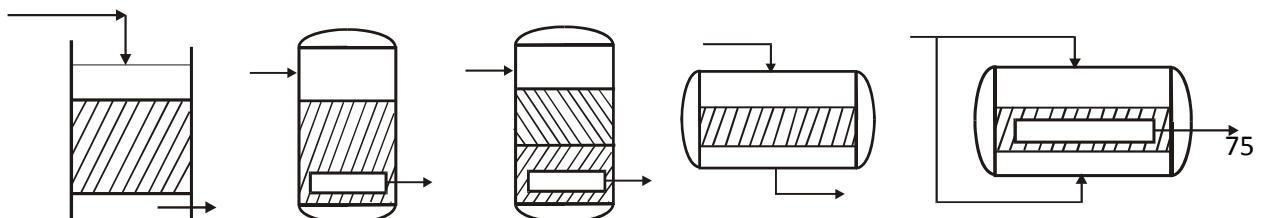
Dakle, troškovi kompletne nabavke i ugradnje jedne nove GAU filterske jedinice bi iznosili oko 70 000 – 100 000 €.

Ukoliko se vratimo na kapacitet postrojenja od 110 l/s računica kaže da je za potrebe završne filtracije predvideti investiciju od približno 1000 Evra/(l/s), što treba uzeti kao grubu meru reda veličine, a u praksi napraviti rigorozni proračun svakog tehnološkog postupka i potrebne troškove svesti na najmanju moguću meru.



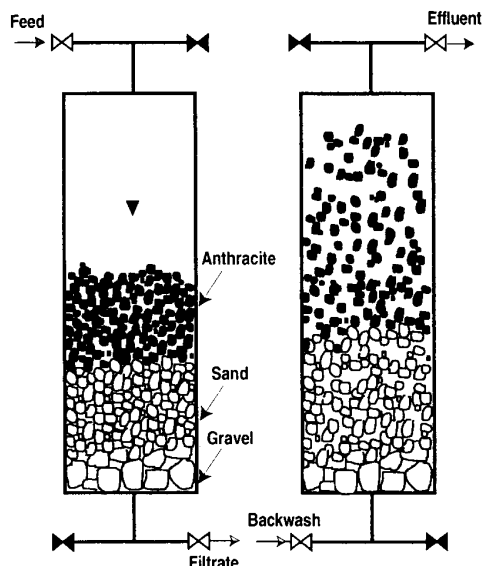
Slika . Multimedijalni filter.

Multimedijalni (mešani) filteri koji u sebi sadrže više različitih ispuna, raspoređenih po visini filter kolone su bolji u pogledu manjeg investicionog ulaganja i manjeg zauzeća radnog prostora, ali su skuplji za održavanje pošto nije moguće promeniti samo jednu ispunu, već se kompletan sadržaj filter kolone menja, a takođe imaju i slabije separacione karakteristike jer voda prolazi kroz manji sloj pojedinačne ispune nego kada je reč o zasebnim filterskim kolonama.



a) b) c)
d) e)

Slika *Principijelne sheme filtera*. a - otvoreni vertikalni jednoslojni, b - zatvoreni vertikalni jednoslojni, c - zatvoreni vertikalni višeslojni, d - zatvoreni horizontalni jeduprotočni, e - zatvoreni horizontalni dvoprotočni.



Slika . *Multimedijalni filter i njegovo ispiranje*

Kompaktni uređaji za mehaničku filtraciju, deferizaciju i dehlorinaciju

U zavisnosti od prirode napojne vode i zaštita bi ona trebala na kraju da se koristi postoje različiti filtarski sistemi.

Kompaktni istemi koji mehanički prečišćavaju vodu, vrše njenu mehaničku filtraciju, deferizaciju (smanjenje nivo gvožđa u vodi) i dehlorinaciju (uklanjanje hlora iz vodovodske vode), i mogu se proizvoditi u automatskoj i manuelnoj verziji.

Takođe u ove svrhe se mogu koristiti i gore pomenuti multimedijalni filteri.

Mehanički (peščani) filter

Filtracija vode je osnovna operacija čiji je cilj da iz vode ukloni sve mehaničke čestice dispergovane u njoj. Način filtracije se bira prema vrsti i veličini dispergovanih čestica. Uglavnom se koriste različita kućišta filtera sa odgovarajućim filter ulošcima raznih poroziteta, a postoji čitava paleta poluautomatskih i automatskih filtera, koji se mogu ispirati tokom rada, te nema diskontinuiteta u radu zbog zamene ili čišćenja filter uložaka. Kod jače zaprljanih voda mogu se koristiti klasični peščani filtri sa višeslojnom silikatnom ispunom različite granulacije.

Uklanjanje se vrši filtracijom kroz kvarcni pesak granulometrijskog sastava od 0,8 do 3,0 mm. Prečišćena voda protiče kroz centralnu cev i preko razvodne glave se izvodi iz kolone. Povratno ispiranje se reguliše automatski, pomoću automatske ventilske glave, u toku 12 dana.

Deferizator

U mnogim slučajevima kod voda sa većim sadržajem gvožđa postoji potreba da se njegova količina svede na minimum. Kod vode za piće povećani sadržaj gvožđa daje vrlo neprijatan ukus vodi, a takođe se u njoj stvara smeđi talog istaloženog fero-hidroksida, koji u cevovodima može stvoriti i ozbiljne mikrobiološke probleme. U mnogim proizvodnim procesima, naročito u tekstilnoj, papirnoj i prehrambenoj industriji sadržaj gvožđa se takođe mora svesti na minimum.

Deferizatori su uređaji koji se sastoje od kolone punjene specijalnom katalitičkom-filtarskom masom, koja katalitički prevodi gvožđe iz rastvorne forme u nerastvornu i taloži ga na sebi. Istaloženo gvožđe se povremeno izbacuju iz uređaja jednostavnim protivstrujnim pranjem, što uz visoku efikasnost rezultuje niskim eksploatacionim troškovima.

Gvožđe, rastvoreno u vodi, nalazi se najčešće u obliku ferobikarbonata, zahvaljujući slobodnom ugljendioksidu. Kiseonik rastvoren u kišnici ili vezan za vodu u zemlji, ostaje u višku u vodi. Fero jon, u obliku $\text{Fe}(\text{HCO}_3)$, u prisustvu slobodnog CO_2 ima manju aktivnost i ne reaguje sa kiseonikom, gradeći taložne hidrokside, već ostaje u rastvoru kao bikarbonat i pri vrednostima pH većim od 7.

Uklanjanje gvožđa i mangana predstavlja važan zadatak u prečišćavanju vode jer oni mogu graditi nerastvorne hidrokside koji mogu ugroziti vitalne delove sistema za prečišćavanje. Separacija se ostvaruje pomoću katalizatora koji uz pomoć rastvorenog kiseonika prevodi gvožđe u oblik taložnog ferihidroksida.

Periodičnim povratnim ispiranjem ovaj flokulantni talog se izbacuje iz sloja katalizatora.

U toku rada filter ne koristi pomoćne hemikalije. Katalitički materijal MnO_2 ima ekstremno dug vek trajanja i može se dezinfikovati aktivnim hlorom koncentracije do 2 %.

Povratno ispiranje katalizatora se reguliše automatski, pomoću automatske ventilske glave, u toku 12 dana.

Uslovi, koje voda na ulazu u uređaj za uklanjanje gvožđa i mangana mora da zadovoljava su:

- bez prisustva H_2S ,
- sadržaj organskih materija ne sme preći 5 ppm, što se određuje preko vrednosti utrošenog kiseonika (12,34 ppm je ekvivalent za utrošak KMnO_4),
- bez prisustva ulja,
- da rastvorenog kiseonika ima najmanje 15% više od rastvorenog gvožđa,
- pH vrednost, najmanje 6,5.

Dehlorinator

Radi održavanja mikrobiološke ispravnosti vode za piće, voda se pre distribucije u gradsku vodovodnu instalaciju obavezno hlorige i to određenim viškom hlora (rezidualni hlor), kako bi joj se održala naknadna sterilnost. Upravo ovaj višak hlora može vrlo neugodno delovati na organoleptičke osobine vode za piće (miris i ukus), a u kontaktu sa organskim supstancama može graditi za ljude veoma opasna jedinjenja (neka od njih su i kancerogena). Za dehlorisanje vode danas se isključivo koriste filteri sa aktivnim ugljem. Pod dezodoracijom vode podrazumeva se popravka kvaliteta vode, tj. uklanjanje iz vode supstanci koje joj mogu davati loš ukus, miris, a u nekim slučajevima i boju.

U ovakvim slučajevima se takođe koriste filteri sa aktivnim ugljem, koji kao veoma jak adsorbens, vezuje na sebe ove materije. Nakon iscrpljivanja adsorpcionih sposobnosti aktivnog uglja on se zamenjuje novim. Najčešće se koriste *za dehlorisanje i dezodoraciju vode za piće, kao i u prehrambenim tehnologijama koje koriste vodu iz vodovodne mreže.*

Filtar sa aktivnim ugljem apsorbira organske materije male molekulske mase, aktivni hlor, hloramine i delimično pirogene materije iz vode i doprinosi poboljšanju njenog mirisa i ukusa. Filtarski materijal, kojim je ispunjena kolona, sastoji se od visoko kvalitetnih čestica aktivnog uglja. Povratno ispiranje aktivnog uglja se reguliše automatski, pomoću automatske ventilske glave, u toku 12 dana.

U liniji predtretmana vode za obradu reverznom osmozom, filtarski sa aktivnim ugljem je pre svega namenjen dehlorinaciji vode budući da aktivni hlor degradira poliamidnu membranu od koje je načinjen RO modul. Vek trajanja aktivnog uglja za ove namene iznosi do 2 godine.

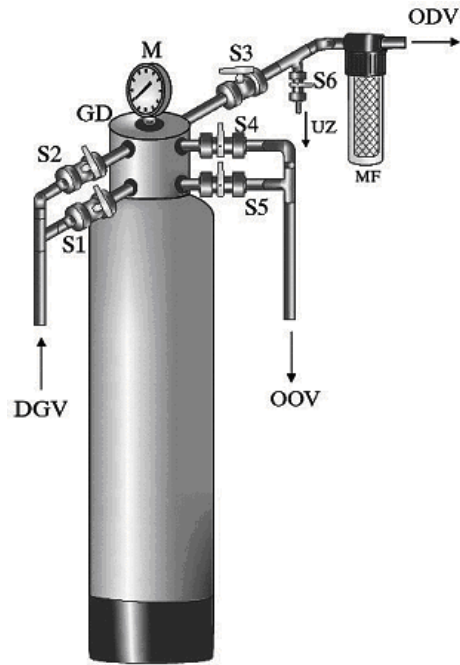
Na sledećoj slici predstavljen je izgled automatskog i manuelnog kompaktnog uređaja za mehaničku filtraciju, deferizaciju i dehlorizaciju.

Filtarske kolone su napravljene na bazi polimera, spolja ojačane unakrsno motanim staklenim vlaknima zatopljenim u epoksidu, koji zadovoljavaju propise za primenu tretmana vode u farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Kolone su otporne na dejstvo pritiska, najčešće do 10 bara, kao i na koroziju i u zavisnosti od potrebnog kapaciteta sistema rade se u zapremini od 25 do 170 litara.

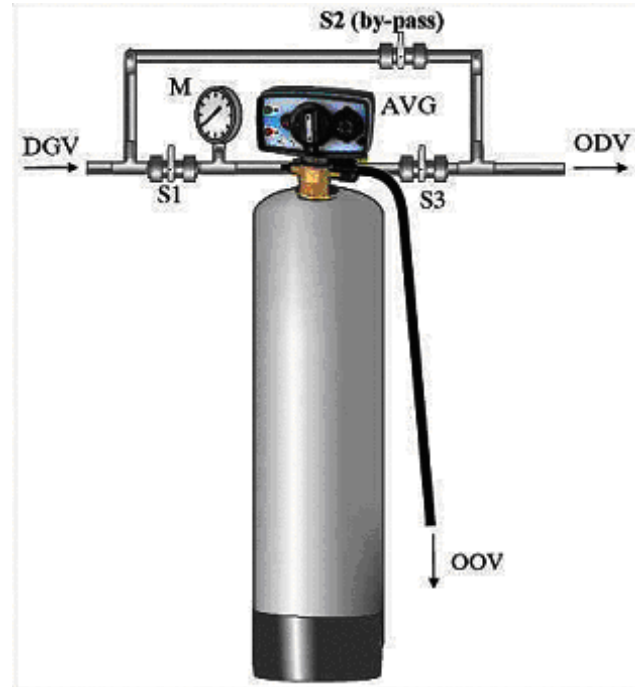


Slika - Izgled montiranog automatskog sistema, sa automatskim ventilskim glavama

Cevni razvod (u zavisnosti od veličine sisteme može biti R1/2", R3/4" ili R1") je urađen od tvrdog PVC-a sa kuglastim slavinama.



a)



b)

a):

DGV - dovod gradske vode

S - slavina kuglasta

M - manometar

GD - glava distribuciona

MF - mikrofiltrar

ODV - odvod vode

OOV - dvod otpadne vode

REŽIM FILTRACIJE: Otvorene slavine: S1, S3

ISTOSTRUJNO ISPIRANJE: Otvorene slavine : S1, S4

PROTIVSTRUJNO ISPIRANJE: Otvorene slavine: S2, S5

b):

DGV - dovod gradske vode

S - slavina kuglasta

M - manometar

AVG - automatska ventilska glava

ODV - odvod vode

OOV - odvod otpadne vode

Slika Izgled a) manuelne i b)automatske, verzije sistema za mehaničku filtraciju, deferizaciju i dechlorinaciju vode

Primer vodovod Raška:

Filtriranje u fabrici vode u Raški se obavlja preko brzih pešćanih gravitacionih filtera tipa "Aquazur", čija je glavna karakteristika da im se pranje obavlja bez prekida dovoda vode na filtere, uz kombinaciju vode i vazduha koji se upuštaju pomoću duvaljki i pumpi za pranje u suprotnom smeru od smera filtriranja.

Pešćana ispuna u ovim filterima je kvarcni pesak granulacije od 0,8 – 1 i koeficijenta uniformnosti 1,5. Voda u filter dolazi preko prelivnog kanala i ravnomerno se raspoređuje po filteru, a dovodni kanal za vodu i kanal kojim se odvodi voda su potopljeni u radu filtra.



Slika Filterska ispuna



Slika Dizne u podu filtra

Voda prolazi kroz pesak i dizne koje su montirane u ploče poda filtera i sakuplja ispod poda odakle se odvodi preko regulacionog ventila u rezervoar vode za pranje.

Pod sa cediljkama nalazi se iznad poda filtera. Montažne ploče se zasebno izrađuju u određenim dimenzijama na taj način što se u mrežu armature ubacuju klasične čaure sa unutrašnjim navojima. Nakon montaže ploča u taj navoj se uvrću dizne.

Kod "Aquazur" filtera zbog usvojene granulacije ispune, njene homogenosti po dubini i načina pranja dolazi do ravnomernog opterećenja filterske ispune po celoj masi.

Prilikom filtriranja vode dolazi do stvaranja izvesne membrane na površini filtera kroz koji prolazi voda. Tokom rada membrana se širi, stvara otpore i smanjuje kapacitet filtera. Kada kapacitet filtera opadne na 50% pristupa se njegovom pranju. Ciklus pranja zavisi od kvaliteta dolazne vode i kreće se u proseku 24 – 48 sati.

Pranje filtera odvija se kombinovanim upuštanjem vode i vazduha u suprotnom smeru od toka filtriranja.

Pranje traje 10-20 min zavisno od zaprljanosti i odvija se na taj način što se prvo spusti nivo vode u filtru, zatim se vrši kratkotrajno rastresanje mase filtera pomoću vazduha, potom se zajedno sa vazduhom upušta voda sve dok voda ne dođe do prelivne ivice za odvod u kanalizaciju, nakon čega se prekida dovod vazduha, a pranje nastavlja samo s vodom. Pri ovome se ne prekida dovod vode na filtre, već se ona koristi za površinsko spiranje.



Slike Pranja filtera



Slika Duvaljke za vazduh i pumpe za pranje filtera

Kako se tokom rada filtera deo ispune gubi zbog usitnjavanja i ispiranja, to je nužno vršiti njeno dopunjavanje. Na postrojenju u Raški vršena je dopuna filterske ispune 2001.g. peskom granulacije 1-1,2. Razlog za korišćenje nešto krupnije ispune je taj što su granulometrijske krive postojeće peščane ispune pokazale da ima više sitnije granulacije te je bilo potrebno dodati krupniji pesak i time oformiti adekvatnu

ispunu uz optimiziranje procesa filtracije. Visina peska u filtrima je 1,2 m.

U slučajevima kontaminacije ispuna se mora zameniti novom, a svaka se nova ispuna na početku eksploatacije mora i dezinfikovati.

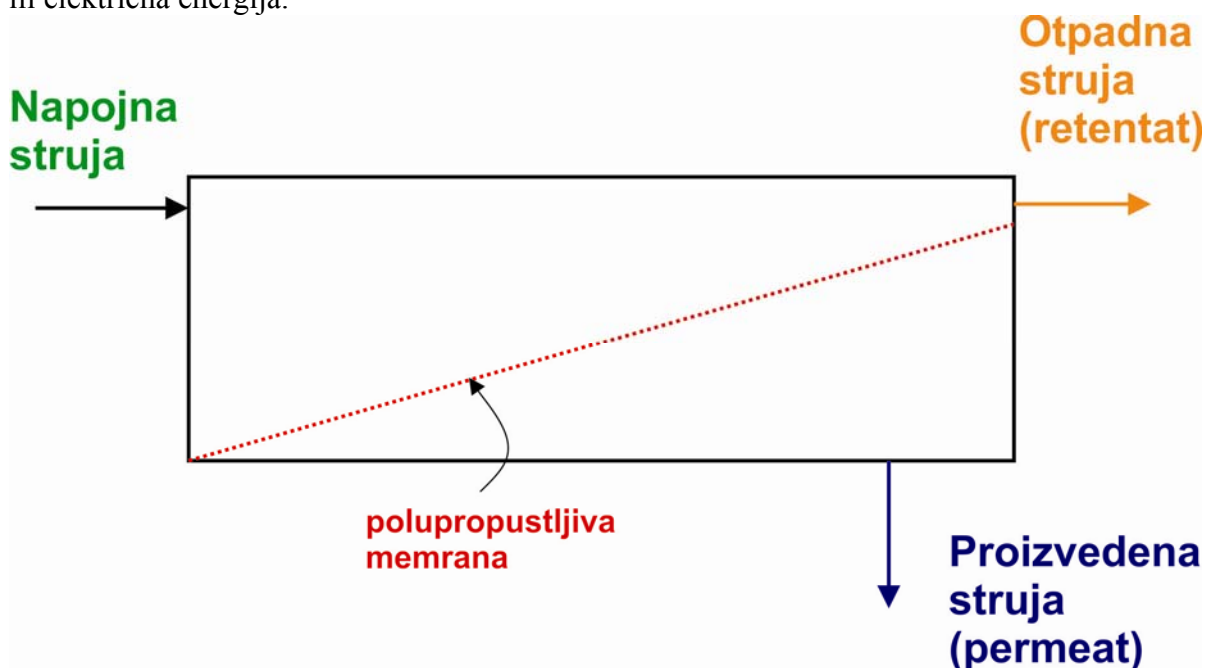
Stepen prečišćenosti vode , kao merilo adekvatnog rada postrojenja, ali i kao polazni osnov za usmeravanje tehnološkog procesa prerade, proverava se analiziranjem uzoraka sirove vode, vode na izlazu iz taložnika (pulzatora), vode na izlazu iz filtera, kao i konačne dezinfikovane vode iz rezervoara, a na svakih sat vremena, u redovnim uslovima.

U slučajevima vanrednih prilika, kao što je poremećaj u režimu rada pumpi, poplava i sl., uzorci se uzimaju i češće.

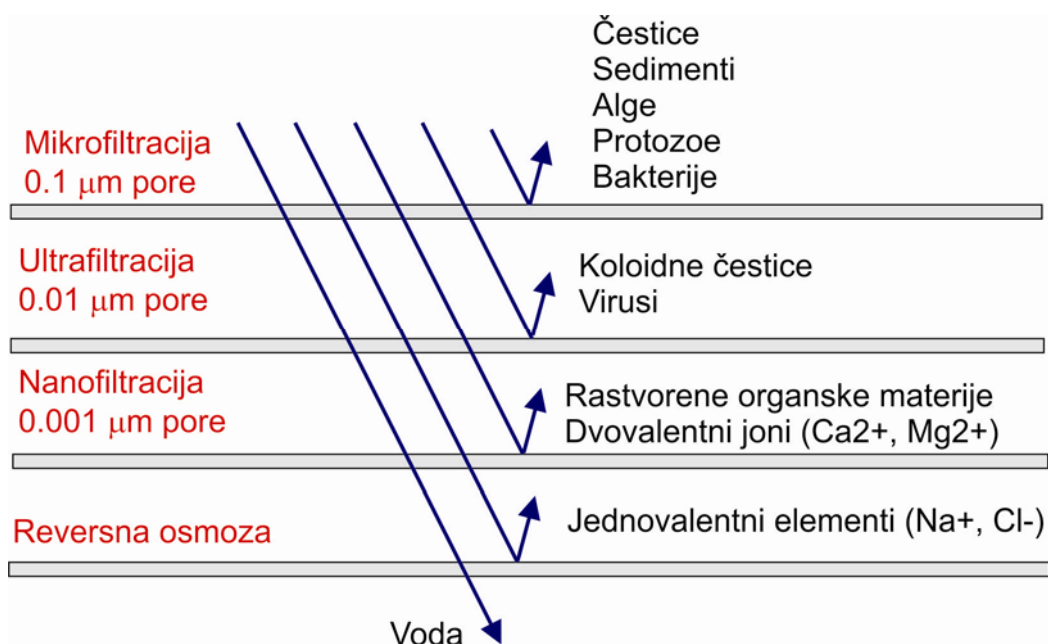
MEMBRANSKE SEPARACIJE

Membranski procesi su svi oni procesi koji se odvijaju na membrani ili posredstvom membrane. To su procesi zasnovani na selektivnoj propustljivosti membrane, biološki procesi uz pomoć mikroorganizama ili enzima koji su zadržani ili imobilisani na membrani, adsorpciji na adsorbentu koji je zadržan na membrani ili od strane same membrane. U najvećem obimu su zastupljeni membranski procesi separacije. Ovi procesi se koriste u pripremi manjih količina kvalitetne vode, i oni su skuplji od konvencionalnih procesa tretmana vode.

U membranskim separacionim procesima dolazi do razdvajanja suspenzija i rastvora kroz polupropustljivu (semipermeabilnu) membranu. Pogonska sila kod ovih procesa je ili pritisak ili električna energija.



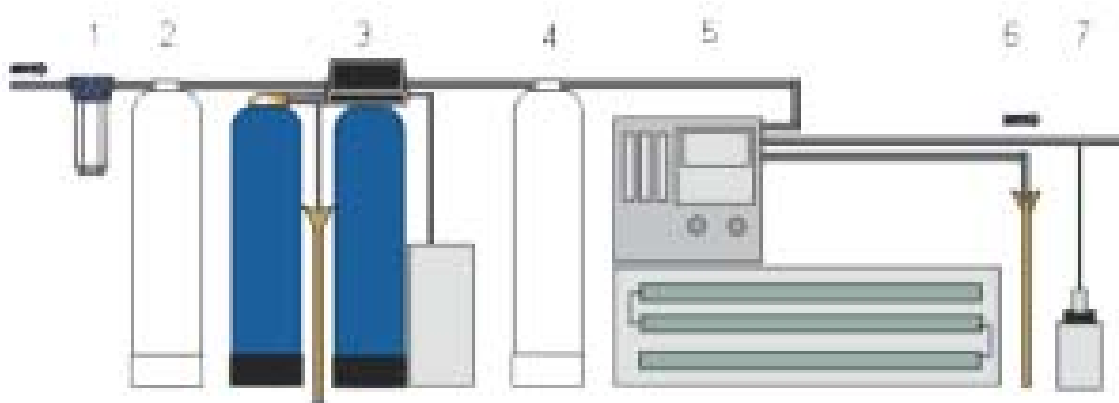
Kod korišćenja pritiska, a u zavisnosti od selektivne propustljivosti membrane, razlikuje se *mikrofiltracija* (MF) gde membrana zadržava suspendovane i koloidno dispergovane čestice i *ultrafiltracija* (UF) gde membrana zadržava veće molekule rastvorenih materija i *reversna osmoza* (RO) gde membrana propušta samo rastvarač. Samim tim, uz pomoć mikrofiltracije uklanjaju se čestice veće od 0,1 μm , ultrafiltracijom čestice veće od 1 nm a reversnom osmozom čestice manje od 1 nm. Kod pripreme vode sa mikrofiltracijom se vrši bistrenje i dezinfekcija vode, sa ultrafiltracijom uklanjanje organskih materija i sterilizacija vode, a sa reversnom osmozom se vrši demineralizacija vode.



Membranski filtri se koriste kada su potrebne male količine vode visokog kvaliteta. Korišćenjem membrana malog otvora pora iz vode se odstranjuju bakterije u najvećem obimu. U praksi se koriste membrane za *mikrofiltraciju* prečnika pora 0,2-0,4 µm i membrane za *ultrafiltraciju* malih otvora pora koje odstranjuju bakterije i do 99,99 %. Membrane se proizvode od derivata celuloze, polisulfona, polipropilena, najlona, teflona, keramike idr. Membrane su u obliku tankog lista ili folije na nekom mehaničkom nosaču. Pranje membrana se vrši protivstrujnim kretanjem vode.

Princip rada membranskog postrojenja

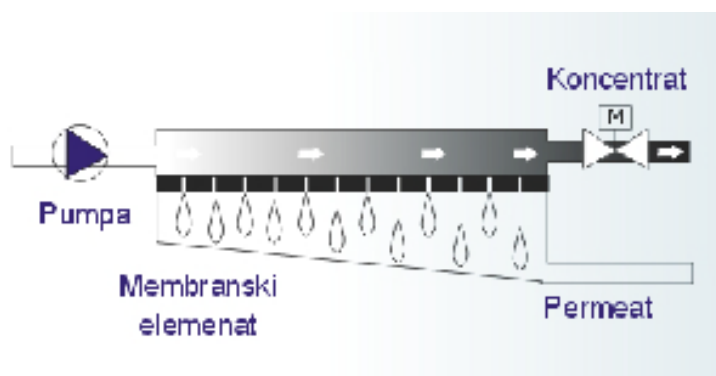
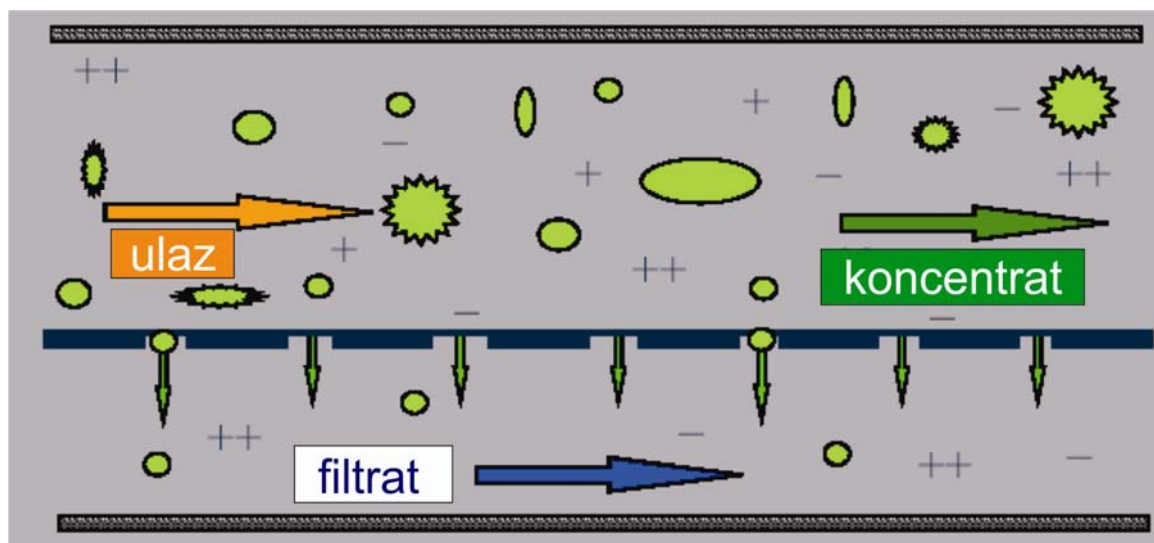
Princip funkcionisanja membrana je sledeći : sirova voda se nakon predtretmana centrifugalnom pumpom dovodi u membransko kućište u kome se nalaze specijalno namotane ploče polupropusnih membrana.



Slika . Principijelna shema predtretmana vode koja će se dalje obrađivati membranski

- | | |
|---------------------|-----------------------------------|
| 1. Mehanički filter | 5. Membranski uređaj |
| 2. Dechlorizacija | 6. Kanalizacija |
| 3. Omekšavanje | 7. Doziranje potrebnih hemikalija |
| 4. Dechlorisanje | |

Sirova voda se na membranama razdvaja na dva dela: - prvi, koji prolazi kroz otvore membrana - permeat - prečišćena voda koja je nakon prolaska kroz membranski sistem izgubila pritisak i slobodnim spiralnim oticanjem se odvodi do potrošača : -drugi, pod nazivom koncentrat - koji se na površini membrana odstranjuje u pravcu oticanja, sa kontinualno povećanom gustinom i pritiskom koji je približno jednak ulaznom.



Slika - Princip rada membranske filtracije.



Slika . Izgled uređaja za ultra i mikrofiltraciju

Proces separacije primenom reverzne osmoze

Membranski procesi, ultrafiltracija i reverzna osmoza, sve više se primenjuje za separaciju i frakcionisanje organskih i neorganskih supstanci iz vodenih rastvora. Njena oblast primene, uglavnom, je bila na *desalinaciji morske vode* za potrebe naselja i gradova, ali se sve više proširuje i tretman vode u *medicinske i farmaceutske svrhe*. Princip procesa je jednostavan. Osnovna komponenta u tom procesu je *polupropustljiva membrana* na čijoj površini se dešavaju sve promene. Pod dejstvom pritiska kroz nju prolazi produkt, čista voda, a koncentrovani rastvor komponenata smeše ostaje. Od kvaliteta membrane i radnog pritiska postrojenja zavisi stepen prečišćavanja vode, kapacitet, ekonomičnost i namena postrojenja. Osnovni problemi koji se javljaju pri projektovanju i konstrukciji reverzno-osmotskih postrojenja jesu obezbeđenje membrana koje treba da izdrže visoke razlike pritisaka i zadrže odgovarajuću permeabilnost, kao i odgovarajući kvalitet reverzno-osmotskog modula u pogledu hermetičnosti i dugotrajnosti u radu. Glavna *prednost* reverzno-osmotskog postrojenja nad postrojenjima sa adsorpcionim i jonoizmenjivačkim materijalima je njegova *trajnost u radu, bez regeneracije ili zamene modula sa membranama*. Međutim, za efikasan rad postrojenja potrebno je obezbediti relativno visoke radne pritiske (do 16 bara).

Karakteristično je i za reverznu osmozu i za ultrafiltraciju da se voda mora prethodno izbistriti korišćenjem konvencionalnih postupaka koagulacije, taloženja i filtriranja.

Reverzno-osmotske membrane (RO moduli) rade se od celuloznog acetata, poliamida i drugih materijala, po specijalnim postupcima i recepturama.

Blok za rezervnu osmozu koristi polupropustljive membrane, permeatore i jaku razliku u pritisku za potiskivanje vode kroz membranu, da bi se postiglo poboljšanje u hemijskom, mikrobiološkom i endotoksinskom kvalitetu vode. Reverzna osmoza se primenjuje u

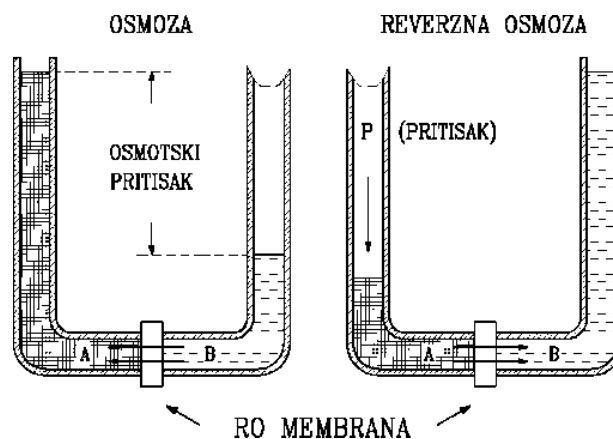
predtretmanu polazne vode, u sistemima kod kojih se voda u finalnom postupku dobija procesom destilacije, ali se može primeniti i u finalnom postupku za *dobijanje vode za infuzione rastvore*.

Primena reverzne osmoze u finalnom postupku za dobijanje vode za *hemodijalizu* zahteva dobro poznavanje karakteristika aparata. Na kvalitet vode dobijen postupkom reverzne osmoze utiče pre svega vrsta materijala od koga su izrađene membrane u pogledu osetljivosti na prisustvo bakterija i kompatibilnost sa sredstvima za sterilizaciju, onečišćenje membrane mehaničkim i organskim materijalom, kapacitet i očuvanje integriteta membrane, kao i volumen otpadne vode. Pucanje ili zapušenje permeatora imaju za posledicu kontaminaciju vode.

Nagloj ekspanziji reverzne osmoze posebno su doprineli sledeći momenti:

- proces je kontinualan
- odvija se izotermno
- nema faznih promena fluida koji se tretira
- poseduje izvanrednu selektivnost za pojedine rastvore
- energetski bilans je, posebno u odnosu na postupak destilacije, vrlo povoljan
- ne zagađuje okolinu
- troškovi održavanja su dosta niski
- izgradnja uređaja je modularna što omogućava jednostavno proširenje postrojenja.

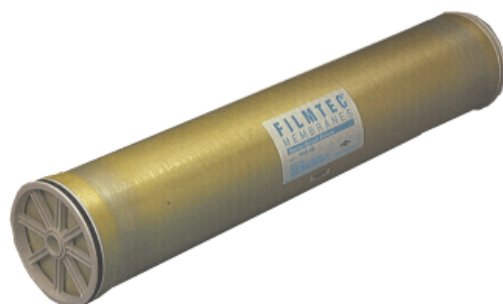
Pod pojmom reverzne osmoze, danas se u praksi, uglavnom podrazumevaju oni procesi separacije rastvora kod kojih pod dejstvom spoljnog hidrostatičkog pritiska, većeg od ravnotežnog osmotskog pritiska rastvora, dolazi do iznuđenog proticanja rastvarača u pravcu rastvor (A) -> čist rastvarač (B), kroz polupropustljivu membranu, kojom su rastvor i čist rastvarač fizički razdvojeni. Smer ovog proticanja suprotan je (tj. reverzan) smeru proticanja rastvarača koji bi se pod istim uslovima, samo bez spoljašnjeg hidrostatičkog pritiska, tj. spontano, ostvario kod klasične osmoze: sa mesta višeg ka mestu nižeg hemijskog potencijala, tj. u pravcu rastvarač (B) -> rastvor (A), te je na osnovu ove izrazito uočljive razlike i izveden, danas, već odomaćen, naziv ovog procesa separacije - "REVERSNA OSMOZA".



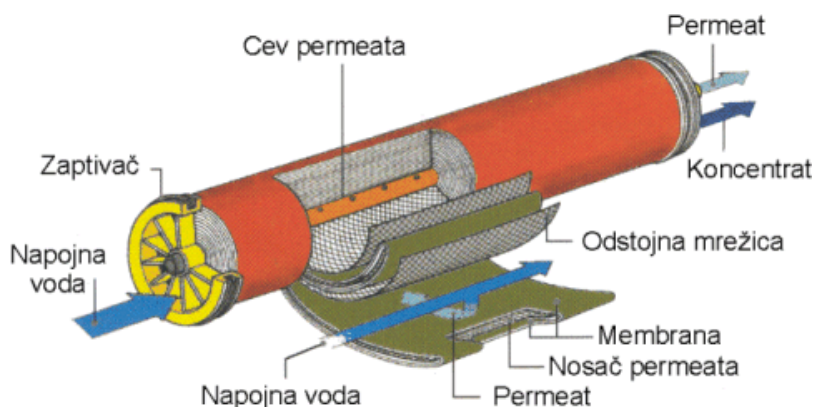
Slika Shematski prikaz procesa osmoze i reverzne osmoze

U praktično izvedenom RO modulu realizacija ovog procesa se, ostvaruje tako što se voda pod nad pritiskom dovodi na membranu, koja propušta molekule vode i mali procenat soli (permeat), a zadržava rastvorene soli odakle se sa delom toka ulazne vode spiraju sa

membrane i kao tok sa povećanom koncentracijom soli (koncentrat) odvodi u centralni kanalizacioni odvod.



Slika Reversno-osmotski modul



Slika Shema tokova vode u RO modulu sa tangencijalnim (cross-flow) protokom vode

Procesom reverzne osmoze se, sa potpunim predtretmanom u procesu prečišćavanja vode, prosečno otklanja:

- monovalentni joni (npr. Na^+ , K^+ , Cl^- , NH_3^-), 97%
- viševalentni joni (npr. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-}), 98%
- nerastvorene čestice: 5×10^{-4} mm, 99%
- pirogene materije, 99%
- organske materije (molekulske mase > 200), 99%

Separacija suspenzije ili rastvora kroz membranu zasniva se na selektivnoj propustljivosti membrane. Mikrofiltracija se objašnjava teorijom pora ili membranskog sita. Po ovoj teoriji pore membrane su cilindrične i pružaju se kroz membranu, normalno na njenu površinu. Ona deluje kao sito na kome se zadržavaju čestice većeg promera od promera pora sita, a manje prolaze. U slučaju ultrafiltracije ili reverzne osmoze membrana deluje kao membransko sito: molekuli veći od pora se zadržavaju na membrani a rastvarač prolazi.

Materijal od koga se izrađuju membrane je različit. Prve korišćene membrane su bile od acetatne celuloze. Zbog određenih nedostataka ovih materijala danas se koriste sintetički polimeri (polivinilhlorid, poliakrilonitril, polisulfoni i poliamidi). Treću grupu čine mineralne membrane, najčešće keramičke koje se koriste u mikrofiltraciji. Ove membrane se grade od cikronijum oksida, aluminijuma, ugljenika na keramici ili grafitu kao nosaču. Ove membrane pokazuju najbolje karakteristike prečišćavanja, ali su i najskuplje..

Membranski filtri se koriste za uklanjanje mikroorganizama, uklanjanje organskih materija, demineralizaciju, uklanjanje nitrata, deaeraciju vode i dr.

Mikrofiltracija se koristi za uklanjanje mikroorganizama iz vode, dok se sa ultrafiltracijom voda može sterilisati.

Reversna osmoza je metoda koja je alternativa jonskoj izmeni kod pripreme vode za piće odnosno za dekarbonizaciju i demineralizaciju vode.



Slika *Izgled postrojenja za reversnu osmozu*

RO Stanice

Proces separacije putem reverzne osmoze spada u završnu fazu obrade vode gde se zahteva visoka čistoća vode (ultra čista voda). Preduzeće CST d.o.o. nudi projektovanje, izvođenje i montažu RO Stanica za tretman vode, kapaciteta od 30 l/h do 3000 l/h.

Ove stanice po svojim mogućnostima i cenama spadaju u kategoriju komercijalnih (industrijskih) RO stanica koje se primenjuju u galenskim laboratorijama (spravljanje rastvora), farmaceutskim preduzećima i bolnicama (za dobijanje vode za hemodijalizu).

Blok reverzne osmoze se može isporučiti kao samostalna celina, ali tada garanciju na njihov pouzdan i ispravan rad preuzima sam kupac koji mora da obezbedi odgovarajući predtretman vode (mehanička filtracija, omekšavanje i mikrofiltracija). Tako da se na tržištu uglavnom uglavnom pojavljuju RO blokove zajedno predtretmanom vode, tzv. RO Stanice koje u sebi sadrže sve neophodne elemente za ispravan rad RO modula i naknadne elemente (npr. UV sterilizator i mikrobiološki filter) koji omogućavaju dobijanje kvaliteta vode po specifičnom zahtevu kupca.



Slika RO Stanica, kapaciteta 400 l/h i RO Blok, kapaciteta 1200 l/h (4 RO Modula)



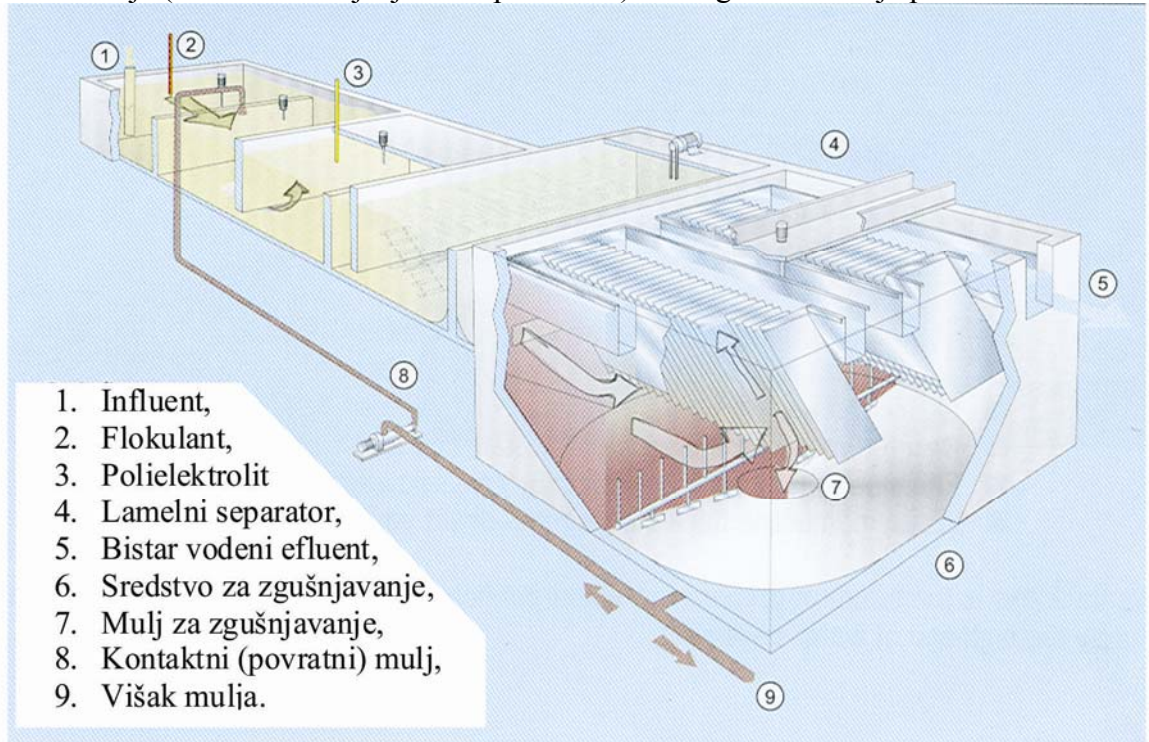
Slika RO Stanica, kapaciteta 80 l/h i RO Blok, kapaciteta 400 l/h (2 RO Modula)

RO Blok reverzne osmoze isporučuju se kako kompaktne, standardizovane jedinice za montažu na zid za količine permeata do 300 l/h, odnosno kao blok na zajedničkom postolju za količine permeate do 3000 l/h. Većina stanica se planiraju i izvede prema zahtevu kupca. Upotrebene membrane imaju veliku moć zadržavanja soli i istovremeno imaju velku izdržljivost. One garantuju dug radni vek postrojenja u velikim rasponima pH vrednosti napojne vode kao i otpornosti na visok sadržaj hlora (koncentracija do 0.1 mg/l).

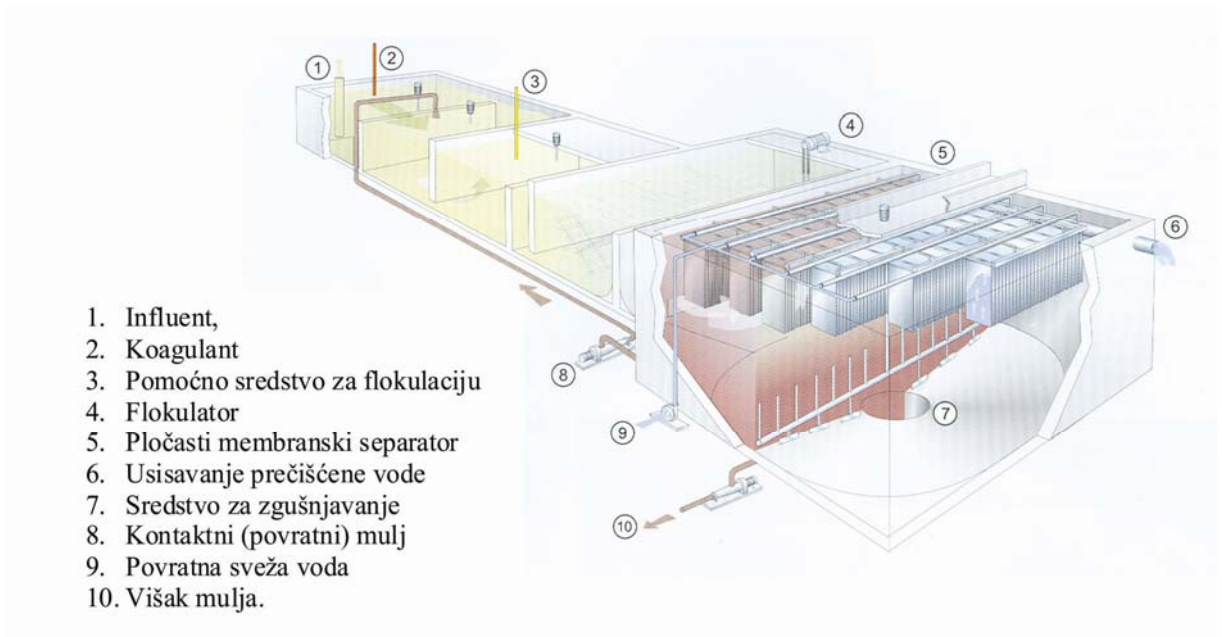
Integrirani klarifikacioni procesi

Turbo-LME proces, firme Passavant Roediger, dobro poznati klarifikacioni proces širom sveta, među četvrtom generacijom integriranih sistema. On uključuje visoku energiju koagulacije, ubrzani (Turbo) kontakt flokulacionog mulja, lamela klarifikatora (LM) i integriranog zgušnuća (E).

Proces je korišćen za uklanjanje čvrstih suspenzija i zamućenja (< 1 NTU), uklanjanje organskih materija (90 - 99 % obojenja/UV apsorbtentu) ili drugih zamućenja prisutnih u vodi



Slika - Turbo-LME procesna shema - integriranog klarifikacionog uređaja (IV generacije) za pripremu vode (flokulacija, koagulacija, lamelna separacija, zgušnjavanje mulja...).



Slika - Procesna shema integrisanog klarifikacionog uređaja (V generacije) koji koristi ultrafiltraciju za pripremu vode (flokulacija, koagulacija, pločasta membranska filtracija, integrisano zgušnjavanje mulja...).

Patentirani specijalni uređaji od nekoliko purifikacionih mehanizama, kao i patentirana hidrodinamička kontrola toka ima mnoge *prednosti unutar primarnog tretmana sirove vode*:

- Kompletno zamućenje je uklonjeno bez nizvodne filtracije
- Totalna separacija mikroorganizama (fizička barijera)
- Grupa membranskih operacija prikladna je za visoku efikasnost kontaktne flokulacije
- Pomoćne membranske operacije za glavnu flokulaciju - sedimentaciju

In-situ membransko povratno osveženje i direktno neometano zgušnjavanje

KOAGULACIJA I FLOKULACIJA

Uvod

Veličina čestica dispergovanih u vodama, varira u širokom opsegu od nekoliko angstrema (rastvorene čestice) do nekoliko stotina mikrometara (suspendovane čestice). Najveći deo ovih materijala može se ukloniti taloženjem. Zbog veličina čestica ta brzina taloženja je jako mala i ona se povećava ukрупnjavanjem čestica.

Osnovne faze procesa ukрупnjavanja koloidnih čestica su:

1. faza destabilizacije, olakšavanje dodira čestica u cilju njihovog konačnog spajanja – **koagulacija**
2. faza transporta kojim se povećava učestanost dodira destabilizovanih čestica - **flokulacija**

Osnovne primene koagulacije i flokulacije u preradi vode su:

1. bistrenje mutnih i obojenih površinskih voda
2. uklanjanje algi
3. obrada voda sa visokim sadržajem koloidno dispergovanih zagadjivača

Koagulacija je fizičko-hemijski proces prevodjenja kvazi-jednofaznog u pravi dvofazni sistem što se postiže destabilizacijom koloidnih čestica hemijskim sredstvima i tako ostvaruje preduslov za njihovu agregaciju.

Flokulacija je samo fizički proces formiranja mase krupnih flokula od sitnih destabilizovanih koloidnih čestica povećavanjem gradijenta brzine.

Stabilnost svih koloidnih sistema nije podjednaka i upravo se prema nivou stabilnosti dele na:

1. povratne, koji su termodinamički stabilni sistemi (sapunske, deterdžentske, skrobne i belančevinaste disperzije u vodi) i
2. nepovratne, koji su znatno manje stabilni (disperzije glina, mikroorganizama, metalnih oksida u vodi...)

Koagulacijom se zapravo povratni koloidni sistem, prevodi u nepovratan!

Odbojne i privlačne sile

Naelektrisanje u većoj i solvatacioni efekti u manjoj meri određuju stabilnost koloidnih sistema.

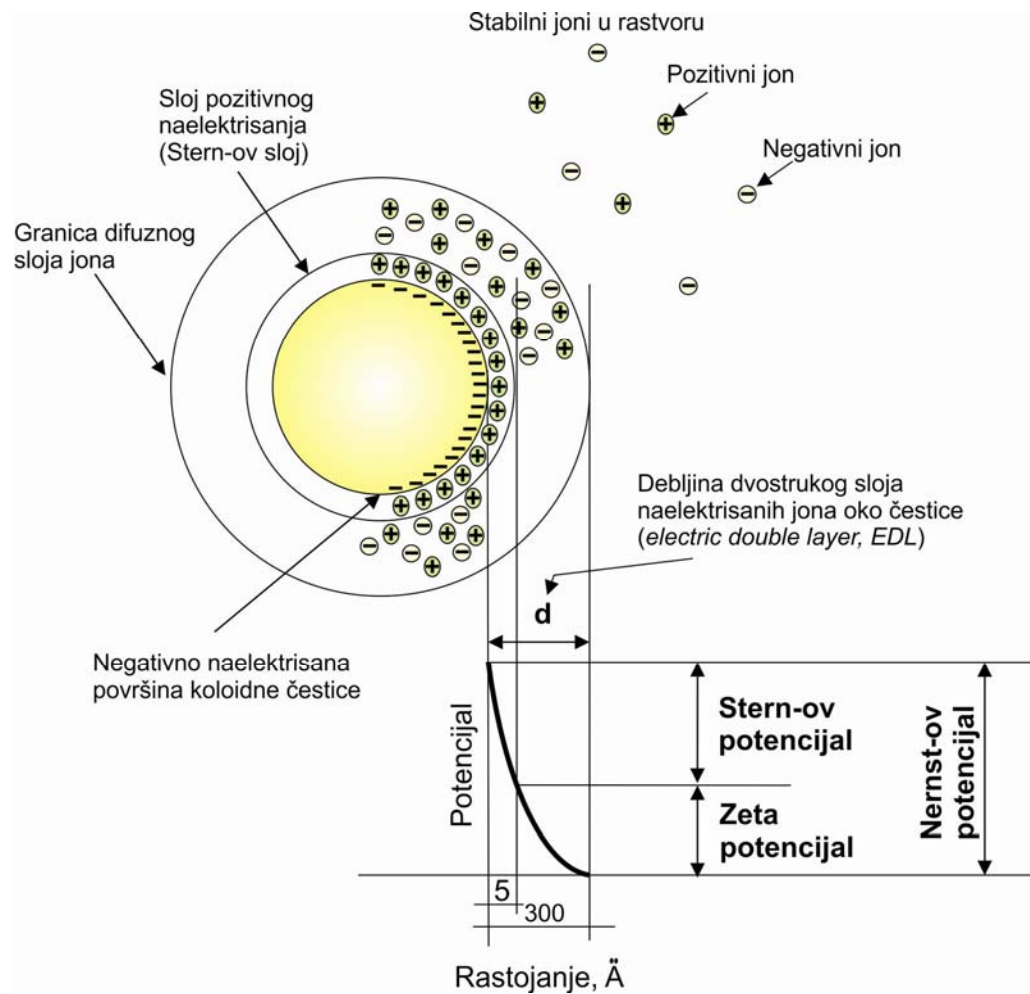
Čvrste koloidne čestice u vodenoj disperziji nose određeno naelektrisanje, koje može nastati na više načina i može biti pozitivno ili negativno. Većinu koloida u prirodnim (kao i u otpadnim vodama) karakteriše negativno primarno naelektrisanje, na čiju jačinu značajno utiču pH i jonska jačina rastvora. Ono potiče od disocijacije funkcionalnih grupa koje ulaze u strukturu čestice, adsorpcije jona iz disperzione sredine ili kombinovanja oba ova efekta.

Ovo naelektrisanje mora biti kompenzovano nekim naelektrisanjem u vodenoj fazi, jer koloidna disperzija kao sistem nije naelektrisana. Zato se na graničnoj površini čvrsto-tečno javlja električni dvojni sloj koji se sastoji od:

1. primarno naelektrisane čestice
2. vezanog sloja-ekvivalentnog viška protivjona koji se akumuliraju u vodi u blizini površine čestice

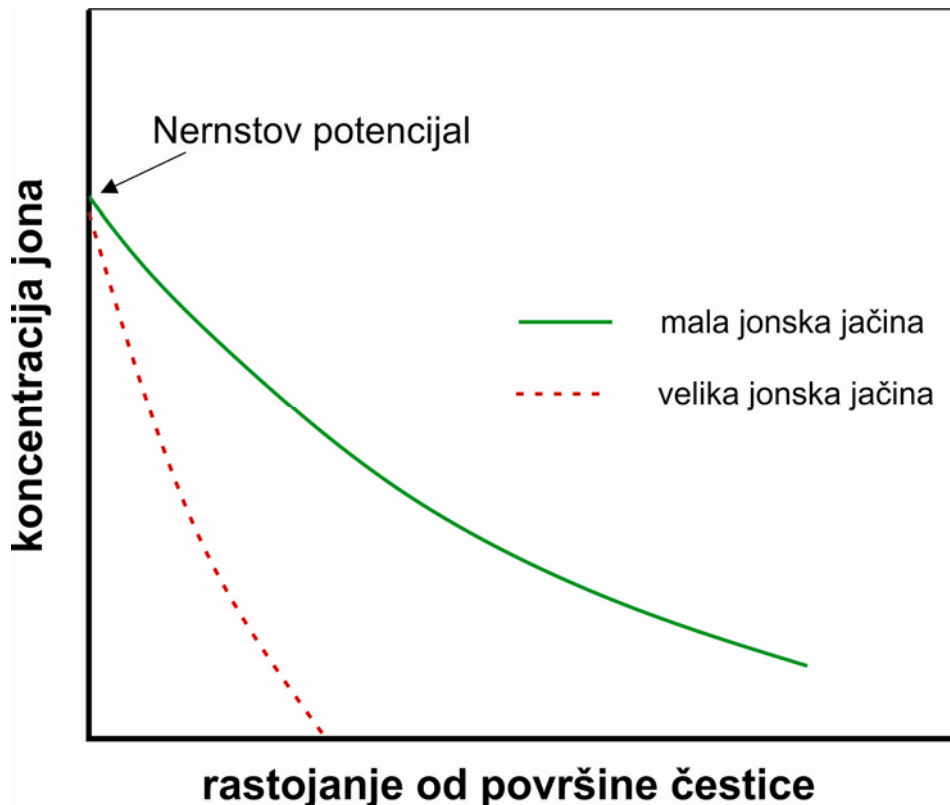
Akumuliranje protivjona dovodi do pojave koncentracionog gradijenta u pravcu mase rastvora i do njihove difuzije u tom pravcu.

Kao rezultat delovanja ova dva suprotna procesa (difuzije i elektrostatickog privlačenja), naelektrisanje se u vodi širi kroz difuzioni sloj, unutar koga je višak koncentracije protivjona najveći uz spoljnu površinu vezanog sloja i postepeno se smanjuje prema masi rastvora, Slika 1.



Slika 1. Struktura dvostrukog sloja naelektrisanja oko koloidne čestice

Kada je koncentracija jona u masi rastvora dovoljno velika, odnosno kada on ima dovoljno veliku jonsku jačinu dolazi do zbijanja, tj. pojave kompresije difuzionog sloja i on se ne proteže duboko u rastvor kao kod rastvora sa malom jonskom jačinom.



Slika 2. Promena elektropotencijala sa rastojanjem od površine čestice

Zahvaljujući postojanju primarnog naelektrisanja na koloidnoj čestici, između njene površine i mase rastvora postoji elektrostatički potencijal, napon. On se može zamisliti kao rad, koji se mora izvršiti da bi se jedinice punjenja istog znaka, kao i primarno naelektrisanje čestica dovela na dato rastojanje od površine čestice, Slika 2.

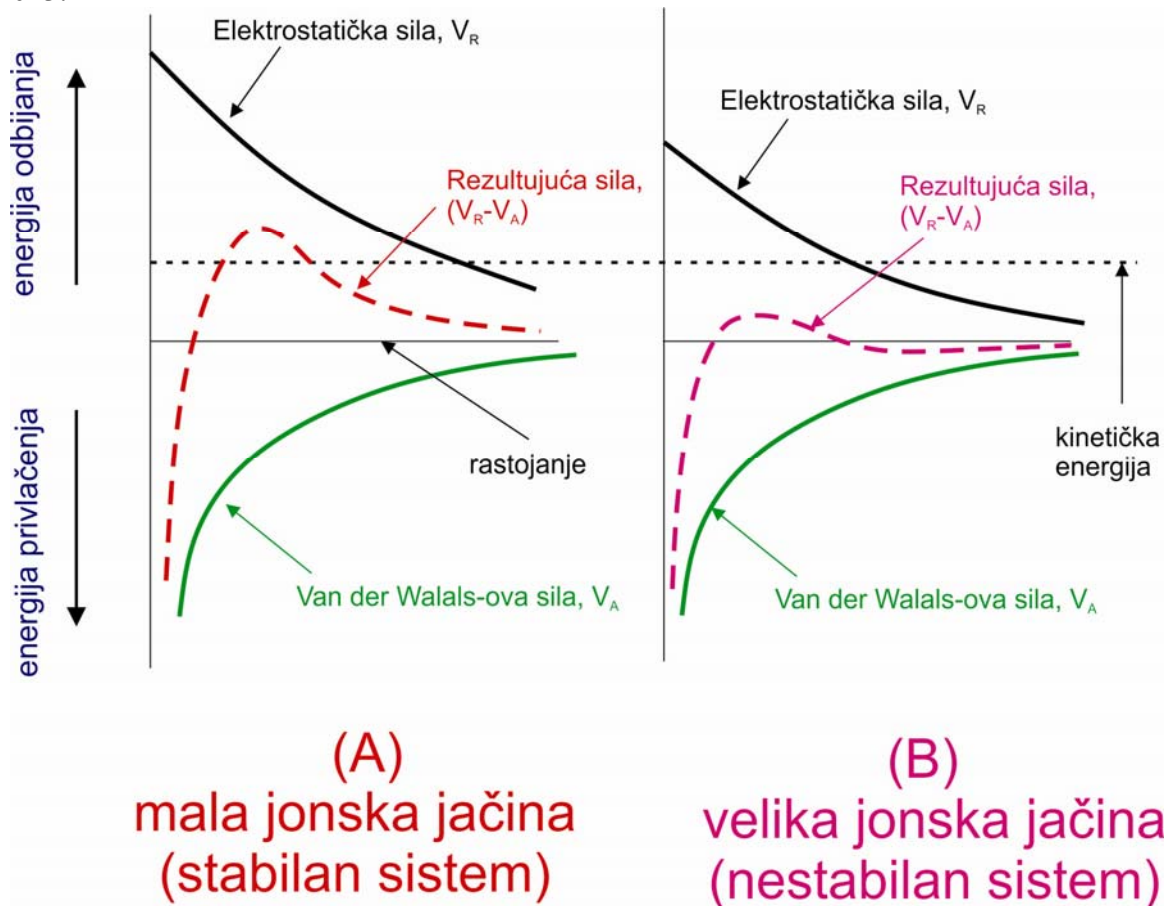
Ovaj potencijal ima maksimalnu vrednost na površini čestice (Nernstov potencijal) i smanjuje se sa rastojanjem od te površine. Ovo opadanje potencijala sa rastojanjem zavisi od karakteristika difuznog sloja, odnosno od broja i vrste jona u masi rastvora. Pri velikim jonskim jačinama potencijal opada na nulu na relativno kratkom rastojanju.

Pri međusobnom približavanju dve koloidne čestice dolazi do interakcije između njihovih difuzionih slojeva, pri čemu takva elektrostatička interakcija između čestica iste vrste primarnog naelektrisanja uvek proizvodi odbojnu silu. Odbojna potencijalna energija (V_R) raste sa smanjenjem rastojanja između čestica. Ova odbojna sila je utoliko manja ukoliko je veća jonska jačina rastvora.

Ipak, u vodenom sistemu, ne može se izuzeti ni delovanje privlačnih, tzv. Van der Waals-ovih sila, koje deluju između koloidnih čestica bez obzira na različitost njihovih hemijskih priroda. Veličina ovih sila zavisi od vrste atoma koji ulaze u sastav čestica i od gustine čestica.

Intenziteti i odbojne potencijalne energije (V_R) i privlačnih sila (V_A) rastu sa smanjenjem rastojanja između čestica, ali samo vrednost odbojne sile V_R zavisi od jonske jačine rastvora, i obrnuto joj je proporcionalna.

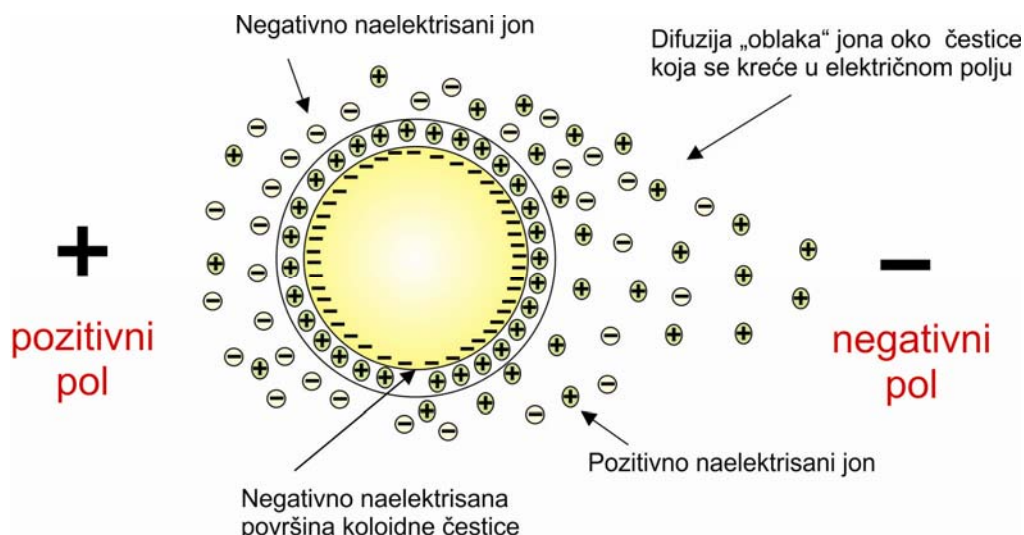
Potrebno je, međutim, uočiti da privlačne i odbojne sile ne opadaju podjednako brzo sa povećanjem rastojanja. Privlačne sile opadaju sa trećim stepenom rastojanja ($f(r^{-3})$), a odbojne sa kvadratom rastojanja ($f(r^{-2})$). Usled ove pojave, kod koloidnih sistema sa malim jonskim jačinama (npr. slatke vode), kao rezultanta prisutnih sila, javlja se sila odbijanja. Ona se može shvatiti kao aktivaciona energetska barijera koja se mora savladati da bi došlo do spajanja čestica i koja zavisi od naelektrisanja i jonskog sastava rastvora. Pri dovoljno velikim jonskim jačinama, ova barijera nestaje i tada je sila privlačenja rezultanta sila. Rezultanta energija interakcija ($V_R - V_A$) pri malim i velikim jonskim jačinama prikazana je na slici 3.



Slika 3. Zavisnost energije interakcije čestica od rastojanja izmedju njih i od jonske jačine rastvora

S obzirom na stalno konvekciono mešanje i na difuziju jona u rastvoru, kao i na kretanje same koloidne čestice, ponašanje koloidne čestice više je određeno elektrokinetičkim, nego elektrostatičkim fenomenima.

Pri kretanju čestice u rastvoru, usled dejstva smicajnih sila, dolazi do cepanja njenog difuzionog sloja po površini smicanja, pri čemu jedan deo ostaje uz česticu, a drugi u masi rastvora. Granična površina, po kojoj dolazi do cepanja difuznog sloja, naziva se površina smicanja.



Slika 4. Šematski prikaz elektroforeze pri kojoj se naelektrisane čestice kreću u električnom polju sa oblakom jona

Vrednost potencijala na površini smicanja naziva se ceta potencijal, Z , ona određuje pomenuto elektrokinetičko ponašanje i kreće se između 10 i 200 mV, a kod koloida koji se najčešće sreću u prirodnim vodama oko 70mV.

Vrednost **ceta potencijala** je direktno proporcionalna **pokretljivosti koloidnih čestica** u električnom polju. Ova pokretljivost se može direktno meriti, pa se ova veza i koristi za eksperimentalno određivanje vrednosti ceta, Z , potencijala.

Zeta potencijal je potencijal koji se javlja između rastvora i površine Sternovog sloja naelektrisanih čestica.

$$Z = \frac{u^0 k_z \mu}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad (1)$$

Gde je:

- Z zeta potencijal, mV
- u^0 elektroforezna pokretljivost, = \square_E/E , (\square m/s)/(V/cm)
- \square_E elektroforetska brzina kretanja čestice, \square m/s
- E električno polje oko čestice, V/cm
- k_z konstanta koja je jednaka $4\square$ ili $6\square$
- \square dinamički viskozitet vode, Ns/m², (za vodu na 25°C je $\square=0.890 \times 10^{-3}$ Ns/m²)
- \square provodljivost u odnosu na vakuum (za vodu je $\square=78.54$)
- \square_0 provodljivost u vakuumu, 8.854188×10^{-12} C²/Jm (N/V²)

Na primer, da bi se razumeo red veličina jedinica o kojima je reč, ukoliko je vrednost konstante $k_z=4\square$, i elektroforezna pokretljivost 0.5 (\square m/s)/(V/cm), onda je na 25°C vrednost zeta potencijala $Z=80.4$ mV.

$$Z = \frac{u^0 k_z \mu}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} = \frac{0.5 \cdot 4 \pi \cdot 0.890 \times 10^{-3}}{78.54 \cdot 8.8541 \times 10^{-12}} = 80.4 \text{ mV}$$

Na osnovu empirijskih istraživanja, utvrđeno je da pri smanjenju zeta potencijala ispod vrednosti od **20 mV**, počinje brza flokulacija čestica.

Vrednost zeta potencijala se menja sa promenom veličine i oblika čestica, vrednosti naelektrisanja, električnog polja, kao i od prirode jona u difuznom sloju.

U koloidnoj disperziji, čvrste čestice se nalaze u neprekidnom kretanju, te poseduju određenu kinetičku energiju. Raspodela kinetičke energije između koloidnih čestica je takva da se samo kod vrlo malog broja njih ona dovoljna da se može savladati aktivaciona energetska barijera. Na taj način, brzina koagulacije zavisi i od veličine energetske barijere i istovremeno i od kinetičke energije čestica.

Povratne koloidne sisteme karakteriše visoka energija aktivacije i/ili niska kinetička energija i oni koagulišu vrlo sporo, dok je kod nepovratnih sistema obrnuto, pošto su znatno manje stabilni i karakteriše ih niska energija aktivacije i visoka kinetička energija.

Destabilizacija koloida

Destabilizacija koloida koagulantima u zavisnosti od prirode koagulanata i uslova pod kojima se koriste može se ostvariti različitim hemijskim sredstvima-koagulantima i ostvaruje se na različite načine.

Četiri osnovna mehanizma koagulacije su:

1. kompresija difuzionog sloja
2. adsorpcija uz neutralizaciju naelektrisanja
3. inkorporiranje čestica u talog (koprecipitacija)
4. adsorpcija uz međučestično povezivanje

1. Mehanizam kompresije difuzionog sloja

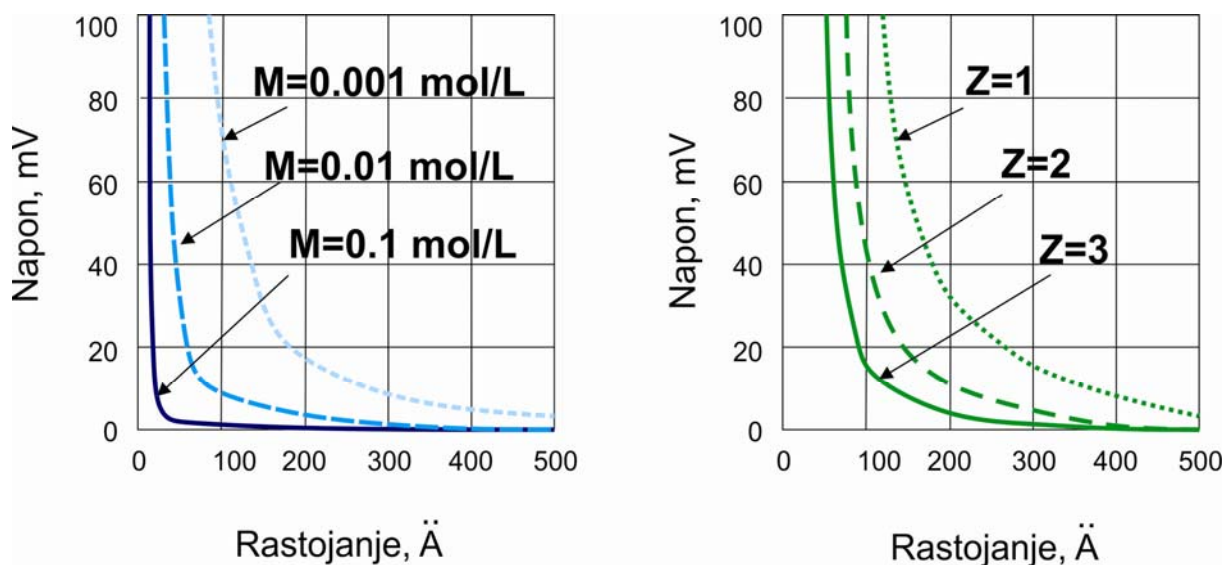
Ovaj način zasniva se na primeni koagulanata čije su interakcije sa koloidnim česticama elektrostatičke prirode. Takvi koagulanti su elektroliti čiji joni u zavisnosti od naelektrisanja bivaju ili privučeni ili odbijeni od strane koloidnih čestica, a nazivaju se indiferentni elektroliti.

Delovanje ovih koagulanata definiše se empirijskim SCHULZE-HARDY-evim pravilom i ono glasi:

'Destabilizacija koloida indiferentnim elektrolitom ostvaruje se onim njegovim jonima, čije je naelektrisanje suprotno od primarnog naelektrisanja koloida, pri čemu efikasnost koagulanta značajno raste sa naelektrisanjem ovih jona.'

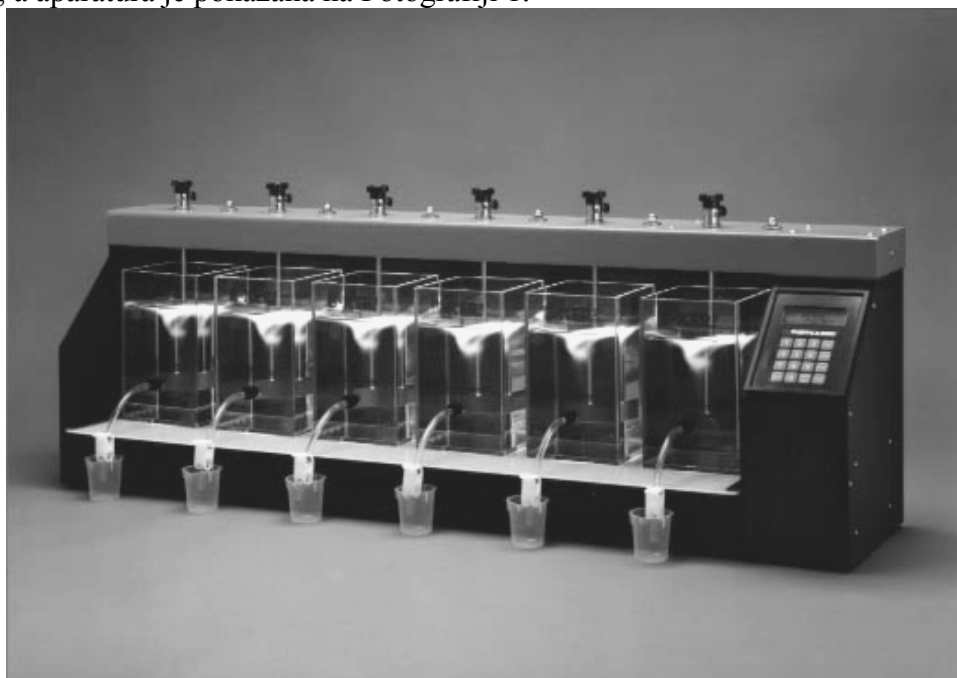
Sušтина ostvarivanja destabilizacije leži u kompresiji difuzionog sloja. Pošto dodavanjem koagulanta jonska jačina rastvora raste, dolazi do povećanja koncentracije protivjona u difuzionom sloju čime se njegova zapremina i debljina potrebne da se održi elektroneutralnost smanjuju. Vidi se da se tako smanjuje aktivaciona energetska barijera, a može doći i do njenog iščezavanja. Ovaj koagulacioni mehanizam nije univerzalan, već se za većinu prirodnih sistema ne može primeniti, jer koagulanti često nisu indiferentni elektroliti i stupaju u različite interakcije.

Primer: količine Na^+ , Ca^{2+} i Al^{3+} jona potrebne za ostvarivanje istog stepena destabilizacije negativno naelektrisanog koloida se odnose kao $1:10^{-2}:10^{-3}$. Smanjenje potencijala u funkciji koncentracije i naelektrisanja koagulanta, pokazano je na slici 5.



Slika 5. Uticaj koncentracije i naelektrisanja jona na debljinu dvostrukog sloja

Efikasnost koagulanta za određenu vodu određuje se eksperimentalno pomoću 'JAR' testa, koji se sastoji u variranju doza koagulanta i merenja preostale mutnoće, nakon mešanja i taloženja, a aparatura je pokazana na Fotografiji 1.



Slika . Aparatura za izvodjenje JAR testa

Na stabilnost koloidnih sistema, osim naelektrisanja, može značajno doprineti i hidratacija, pa je za što potpunije shvatanje i tretiranje fenomena koagulacije u većini prirodnih sistema neophodno razmotriti i druge koagulacione mehanizme.



Slika - Eksperimentalna oprema za utvrđivanje JAR testa, Vodovod Raška

2. Mehanizam adsorpcije uz neutralizaciju naelektrisanja

Elektrohemijska energija između koloidne čestice i jona koagulanta može se posmatrati kao energija kod modela dvojnog sloja i data je izrazom:

$$E = z \cdot F \cdot \Psi$$

Gde je:

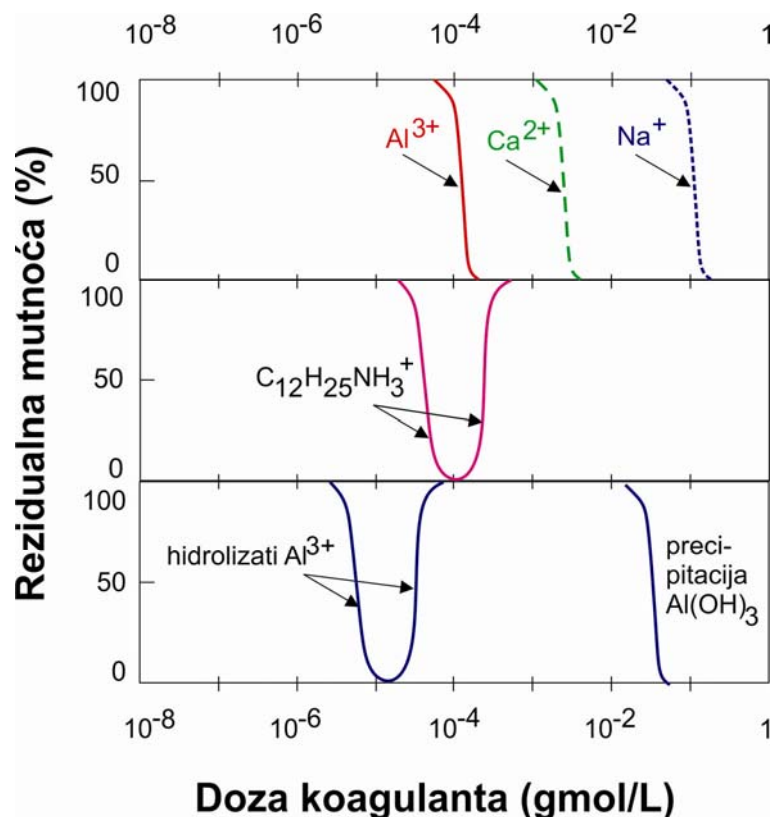
z - naelektrisanje jona koagulanta

F - 1 Faradej

Ψ - razlika potencijala na krajevima difuzionog sloja (potencijal na površini koloidne čestice)

Za jednovalentni protivjon (npr. Na^+) i za koloidnu česticu za koju je $\Psi=100$ mV, E je samo 2,3 kcal/mol. Međutim, za kovalentnu hemijsku vezu energija se kreće između 50 i 100 kcal/mol, a kod vodonične veze je oko 5 kcal/mol i iz toga se može zaključiti da pri destabilizaciji koloida elektrokinetički potencijal ima određenu ali ne i presudnu ulogu.

Dakle, sposobnost koagulanta zavisice od više interakcija: koagulant-koloid, koagulant-rastvarač i koloid-rastvarač i u zavisnosti od toga koja je interakcija dominirajuća, uticaće i na njegovu sposobnost. Na taj način koagulaciona efikasnost jednog koagulanta može biti znatno različita od one koju predviđa Schulze-Hardy-evo pravilo.



Slika Kriva rezidualne mutnoće za različite vrste i doze koagulanta

Primer 1: na slici 6. data je kriva preostale (rezidualne) mutnoće posle koagulacije i taloženja negativno naelektrisanog sola srebrojodida u funkciji od doze koagulanta – dodecilamonijum jona ($C_{12}H_{25}NH_3^{+}$). Može se napraviti poredjenje izmedju koagulacionih sposobnosti dodecilamonijum i Na^{+} jona koje bi po Schulze-Hardy-evom pravilu trebalo da budu slične i lako se uočavaju dve bitne razlike:

1. Na^{+} joni deluju kao efikasan koagulant samo pri koncentracijama iznad 10^{-1} gmol/l, a dodecilamonijum joni čak pri koncentraciji od 6×10^{-5} gmol/l;
2. Sa Na^{+} jonima je nemoguće predozirati koloidnu disperziju, dok sa $C_{12}H_{25}NH_3^{+}$ jonima, već pri dozama većim od 4×10^{-4} gmol/l, dolazi do polazne stabilizacije koloidne disperzije. Takva restabilizacija je praćena promenom vrste naelektrisanja koloidne čestice što se može objasniti jedino adsorpcijom viška protivjona i govori u prilog činjenici da elektrokinetička interakcija nije jedini uzrok destabilizacije.

Primer 2: na slici 6. prikazana je i kriva preostale mutnoće u funkciji od doze Al-soli pri konstantnom pH=5 i njenom analizom dolazi se do sledećih zaključaka:

1. koagulacija Al-solima može se ostvariti i sa malim dozama koagulanta, 6×10^{-6} gmol/l, odnosno 4 mg/l Al-sulfata;
2. pri većim dozama od 4×10^{-5} gmol/l, odnosno 25 mg/l Al-sulfata, dolazi do restabilizacije
3. pri još većim dozama dolazi ponovo do destabilizacije koloida

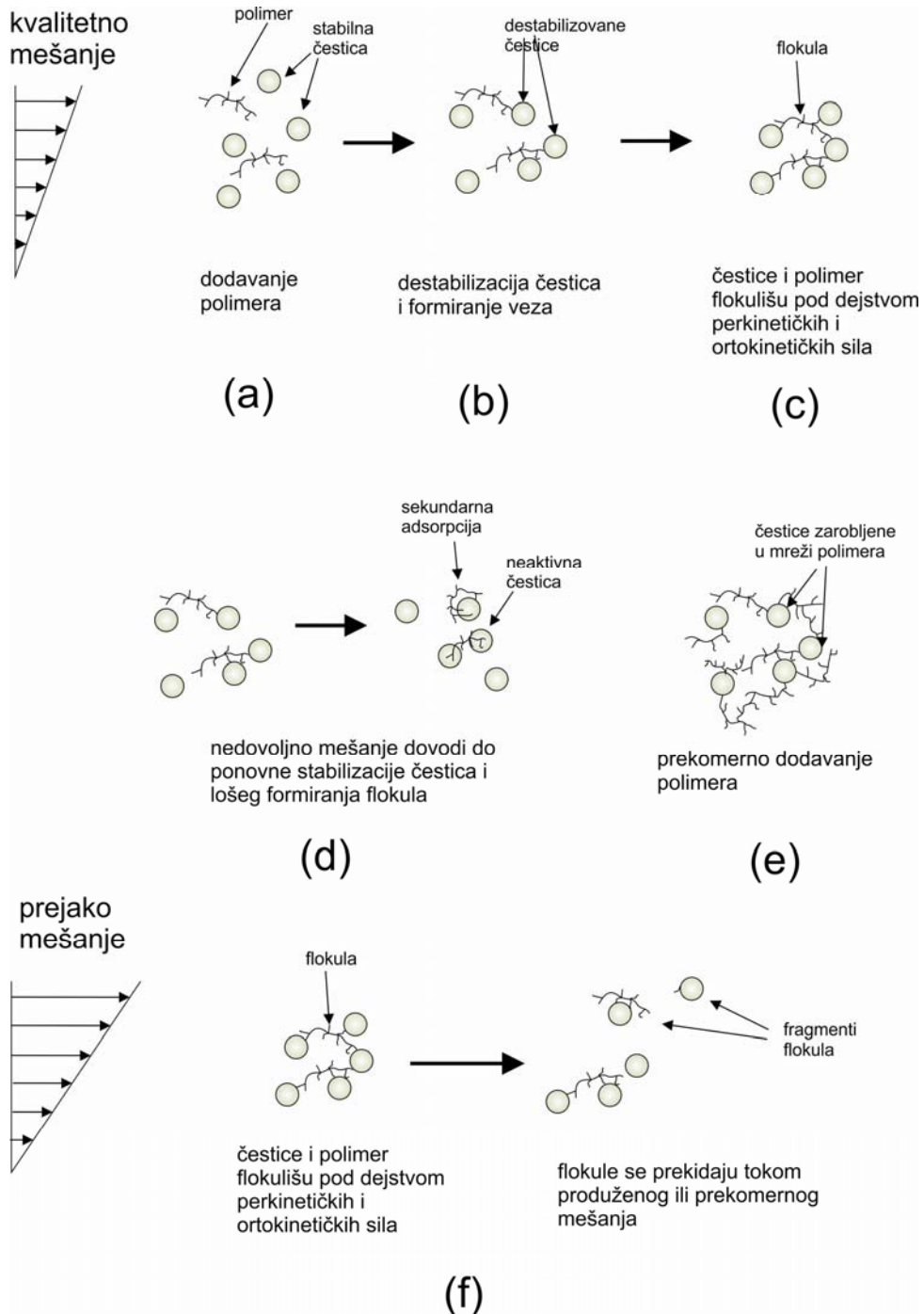
Prva destabilizacija i restabilizacija nastaju adsorpcijom Al jona tj. produkata njegove hidrolize iz rastvora, dok se druga koagulacija do koje dolazi pri visokim dozama koagulenta ostvaruje inkorporiranjem koloidnih čestica u talog $Al(OH)_3$.

3. Mehanizam inkorporiranja koloidnih čestica u talog (koprecipitacija)

Kada se metalna so, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ili FeCl_3 , ili metalni oksid ili hidroksid (npr. CaO i $\text{Ca}(\text{OH})_2$) koriste kao koagulanti u dovoljno velikim dozama da može doći do brze precipitacije (taloženja) metalnog hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$) ili metalnog karbonata (CaCO_3), može doći do koprecipitacije koloidnih čestica i čestica hidroksida (karbonata). Vidi se da dolazi do inkorporiranja koloidnih čestica u talog hidroksida tj. karbonata pri njihovom stvaranju i taloženju. Da bi do taloženja uopšte došlo, moraju postojati jezgra taloženja, a tu ulogu mogu preuzeti i same koloidne čestice, pa tada brzina taloženja raste sa porastom ukupne koncentracije koloidnih čestica koje se uklanjaju iz sistema. Izvodi se zanimljiv zaključak, *da što je već koncentracija koloida u vodi, potrebna je manja doza metalnog koagulanta!!!*.

4. Mehanizam adsorpcije i međučestičnog povezivanja

Sintetički organski polimeri nalaze sve češće svoju primenu pri koagulaciji prirodnih i otpadnih voda. Najbolji rezultati se ostvaruju sa tzv. **anjonskim negativno naelektrisanim polimerima**, uprkos činjenici *da su čestice zagadjivača takodje negativno naelektrisane* i jasno je da se ova pojava ne može objasniti elektrostatičkim modelom. Da bi došlo do destabilizacije, u molekulu organskog polimera moraju postojati funkcionalne grupe koje mogu reagovati na određenim lokacijama na površini čestice. Tada, pri dodiru molekula i čestice, dolazi do vezivanja ovih grupa za površinu čestice, dok se ostatak molekula proteže u rastvor (*reakcija a i b, slika 7.*). Kada više ovakvih struktura dodje u dodir može doći do njihovog povezivanja i stvaranja kompleksa čestica-polimer-čestica u kome polimer služi kao most (*reakcija c, slika 7.*). Ukoliko se ovakva vrsta dodira ne ostvari slobodni deo polimera može se vezati za neku drugu slobodnu lokaciju iste čestice što dovodi do njene restabilizacije (*reakcija d, slika 7.*). U ovom slučaju, restabilizacija se ne objašnjava adsorpcijom viška protivjona, jer polimer i koloid imaju istu vrstu naelektrisanja. Kada su doze polimera preterano velike, mogu se popuniti sve lokacije na površini čestica, pa se zbog nemogućnosti nastajanja mostova, dobija restabilizovani koloid zarobljen u meži polimera (*reakcija e, slika 7.*). Pod određenim uslovima, jednom već destabilizovan sistem može se restabilizovati produženom agitacijom (raskidanjem veza polimer-koloid i vezivanjem oslobođenih segmenata za površinu istih čestica); (*reakcija f, slika 7.*).



Slika *Mehanizam adsorpcije i međučestičnog povezivanja*
Destabilizacija koloida pri obradi prirodnih i otpadnih voda

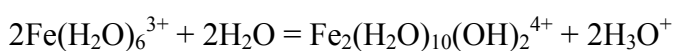
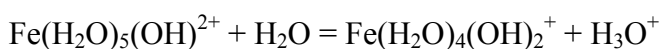
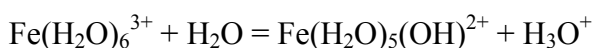
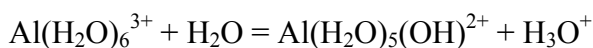
Koagulacija prirodnih i otpadnih voda uglavnom se obavlja:

1. adsorpcijom koagulant (obično polimerom, unetim ili formiranim u sistemu)
2. inkorporiranjem koloidnih čestica u talog (najčešće hidroksida)

Koagulacija sa solima aluminijuma i feri solima

Aluminijum, Al i gvoždje, Fe, kao metalni katjoni, ne postoje u rastvoru kao proste jonske vrste, već su uvek hidratizirani. U vodi formiraju komplekse tipa $\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$. Molekuli vode vezani za centralni metalni jon, nazivaju se **ligandi**.

Kompleksi ovog tipa ponašaju se kao kiseline tj. donori protona, pa se u vodenoj sredini, kada je koncentracija Al ili Fe soli manja od proizvoda rastvorljivosti njihovih hidroksida, obrazuju monomerni, dimerni ili čak polimerni hidrosometalni kompleksi, sa OH^- jonima kao ligandima. Neke od ovih hidrolitičkih reakcija su:



Medjutim, ukoliko je dodata količina koagulantna dovoljna da se premaši vrednost proizvoda rastvorljivosti metalnog hidroksida, pored hidrosometalnih kompleksa, obrazovaće se i talog metalnog hidroksida. Ovakav slučaj je u praksi najčešći, pa se destabilizacija obavlja adsorpcijom hidrosometalnih kompleksa koji predstavljaju intermedijere ka taloženju metalnog hidroksida. Pri pH vrednostima ispod izoelektrične tačke dominiraju pozitivno naelektrisani polimeri i oni destabilišu negativno naelektrisane koloide adsorpcijom uz neutralizaciju naelektrisanja. Ako su vrednosti pH iznad izoelektrične tačke dominiraju anjonski polimeri i oni deluju mehanizmom adsorpcije i međjučestičnog povezivanja.

Polielektroliti

Polielektroliti su organski polimeri čija monomerna jedinica sadrži disosujuće funkcionalne grupe. U zavisnosti od prirode ovih grupa dele se na: anjonske (negativno naelektrisane), katjonske (pozitivno naelektrisane), amfolitske (pozitivno ili negativno naelektrisane- kao što su proteini) i nejonske (bez naelektrisanja). Važno je pomenuti da se sve vrste polielektrolita u praksi ravnopravno koriste.



Slika Priprema polielektrolita



Slika Komora za brzo mešanje

Sposobnost da se veže za površinu koloidne čestice određuje koagulacionu efikasnost nekog polimera. Pored toga, na efikasnost utiču i njegova molekulska težina i stepen razgranatosti molekula. Vrednost pH takodje utiče, pošto određuje disocijaciju polielektrolita, a samim tim i njegovo naelektrisanje.

Anjonski polielektroliti, budući negativno naelektrisani, imaju isto naelektrisanje kao i većina koloida u prirodnim i otpadnim vodama. Dakle, da bi mogli delovati, njihovi molekuli moraju imati dovoljno veliku molekulsku težinu, da bi postigli kinetičku energiju dovoljnu za savladavanje energetske barijere. Ova minimalna molekulska težina zavisi od:

1. broja funkcionalnih grupa u molekulu i njegove razgranatosti
2. naelektrisanja koloidnih čestica
3. jonske jačine rastvora

Katjonski polielektroliti mogu delovati i mehanizmom adsorpcije uz međučestično povezivanje i zahvaljujući pozitivnom naelektrisanju, mehanizmom adsorpcije uz neutralizaciju naelektrisanja. Može se desiti i kombinovanje ova dva mehanizma.

Izbor vrste i doze koagulanta

Izbor se vrši na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih 'jar' testom.

Efikasnost i doza neorganskih koagulanata (soli Al i Fe(III)) zavise od: koncentracije koloida, pH vrednosti i alkaliteta.

Pri destabilizaciji negativnih koloida anjonskim polimerima potrebno je:

1. da budu prisutni joni dvovalentnih metala (izazivaju kompresiju difuzionih slojeva, neutrališu naelektrisanje anjonskog polimera, smanjuju odbijanje između adsorbovanih polimernih čestica...)
2. da imaju dovoljno veliku molekulsku težinu za savladavanje energetskih barijera
3. da se izbegava predoziranje i suviše intenzivno mešanje.

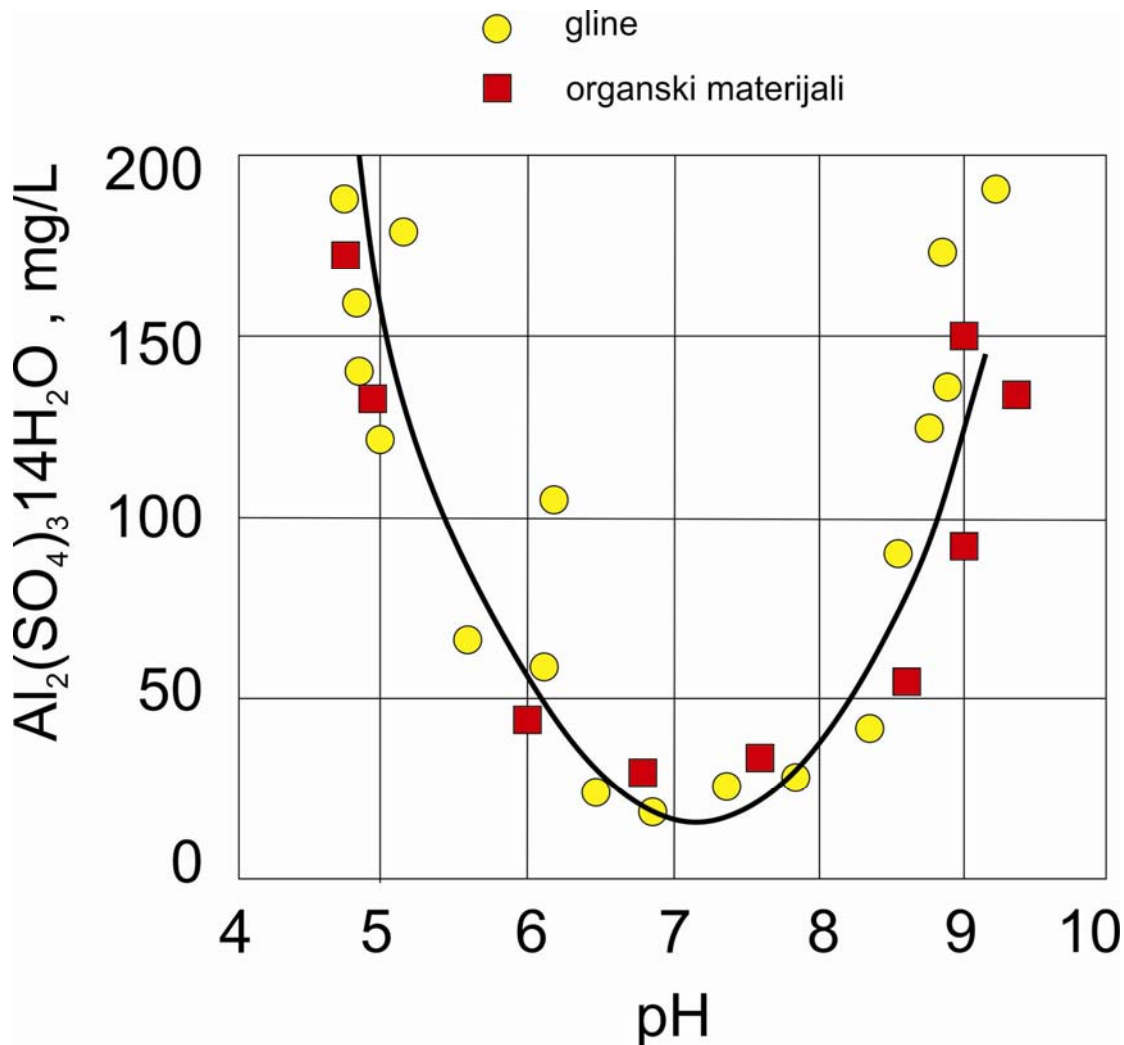
Nejonski polimeri se koriste za koagulaciju otpadnih muljeva, ali je njihova primena u koagulaciji voda manje uspešna.

Katjonski polimeri efikasno koagulišu negativne koloide u prirodnim i otpadnim vodama pošto neutrališu naelektrisanje čestica i nema potrebe za savladavanjem energetske barijere. Zbog nemogućnosti restabilizacije predoziranje neophodno je pri vršenju 'jar' testa varirati dozu koagulanta u širokom intervalu vrednosti, bar 4 reda veličine. Pri srednjim i visokim koncentracijama koloida koagulacija se, u određenom stepenu ostvaruje pri svim dozama unutar dosta širokog intervala vrednosti. Uska oblast povoljnih vrednosti doze koagulanta ukazuje na nisku koncentraciju koloida u sistemu.

Doziranje koagulanta

Prethodno pripremljeni vodeni rastvori koagulanata, ili sami, suvi koagulanti, doziraju se u vodu koja se obrađuje u komori za brzo mešanje relativno male zapremine gde dolazi do njihovog mešanja i reagovanja. Zapreminu komore i vreme zadržavanja određuje brzina hemijske reakcije koja se odvija. Adsorpcija u vodi obrazovanih (neorganskih) ili u direktno dodatih (organskih) polimera na površini čestica uglavnom se odvija brzo. Vreme potrebno za

obrazovanje monohidroksi kompleksa je vrlo kratko i reda veličine 10^{-10} s i oni se najbrže i adsorbuju na površini čestica. Obrazovanje polimera, naprotiv, traje znatno duže, ali ne više od 1 sekunde. Transport obrazovane polimerne čestice do granične površine ostvaruje se difuzijom, a vreme potrebno za difuziju i adsorpciju je isto jako malo. Sve ovo ne važi u radu sa česticama jako velike molekulske težine.



Slika Uticaj pH na potrebnu dozu koagulantata

Primer Vodovod Raška

Sirova voda koja se doprema na fabriku se često karakteriše povećanom mutnoćom i povećanim permanganatnim brojem, tako da je osnovni zadatak rada na postrojenju smanjenje ovih parametara, uz maksimalnu kontrolu i ograničavanje količine Al u izlaznoj vodi.

Korigovanje mutnoće (max izmereno do sada 830 NTU) vrši se doziranjem koagulanata i flokulanata. Pri određivanju optimalnih doza koagulantata i flokulanata treba voditi računa o vrsti i poreklu zamućenja vode koja se prerađuje. Kako se kod nas sirova voda uzima sa živog

vodotoka planinske reke, to se, zavisno od spoljašnjih uticaja, javljaju velike oscilacije u njenom kvalitetu, posebno sa aspekta mutnoće i količine organskih materija izraženih preko permanganatnog broja.

Za vodu u Raški optimalne doze su za mutnoće do 50 NTU od 20 – 40 mg/l Al-sulfata u kombinaciji sa 0,125 – 0,18 mg/l flokulanta, za mutnoće 50-200 NTU max količina dodatog Al-sulfata je 60 mg/l i polielektrolita oko 0,20 mg/l, za mutnoće preko 200 NTU max količina dodatog Al-sulfata je 100 mg/l i polielektrolita 0,25 mg/l, a da se pri tome količina Al u finalnoj vodi nije povećavala do dozvoljenih 0,2 mg/l.

Ovakvim doziranjem koagulanta i flokulanta postignuto je obaranje mutnoće u zoni bistrenja ispod 5 NTU, kao i permanganatnog broja ispod 10, da bi se posle prolaska kroz filtre ovi parametri sveli na vrednosti ispod MDK.

Količina Al je takođe održavana u dozvoljenim granicama. Odstupanja su zabeležena u zoni bistrenja, ali je količina Al u vodi nakon prolaska kroz filtre bila ispod MDK.

Treba naglasiti da se najveće poteškoće u procesu koagulacije javljaju pri mutnoćama od 5-30 NTU i sadržajem organskih materija do 20, kada se koagulisane čestice lako destabilizuju, ali smo ovaj problem prevazilazili nešto većom dozom flokulanta (do 0,20 mg/l), a optimalna doza koagulanta se kreće do 50 mg/l. U ovakvim slučajevima dobri rezultati su postizani i pri korišćenju tečnog "koafloka" kao pomoćnog sredstva za koagulaciju i flokulaciju.

Veći problem je obaranje organskih materija merenih preko permanganatnog broja u vodi čija je mutnoća ispod 5 NTU, a koju sa aspekta mutnoće ne bi bilo potrebno tretirati dodavanjem hemijskih sredstava, jer je za smanjenje ove mutnoće dovoljno filtriranje kroz peščane filtre. Ipak zbog povećanog permanganatnog broja u sirovoj vodi, koji je u nekim ovakvim slučajevima dostizao vrednost preko 20, tretman je rađen sa dozama Al-sulfata od 25 mg/l i polielektrolita 0,1-0,125 mg/l, a rezultati su pokazali smanjenje ovog parametra ispod MDK već na izlasku iz taložnice, a naročito nakon prolaska kroz filtre.

Pri ovakvom tretmanu poseban problem je količina Al koji se može povećati, a koji se u ovakvim slučajevima analizira 4 puta u toku 24 sata. Maksimalna količina Al u vodi nakon filtracije dostizala je kod 0,66% uzoraka merenih tokom 2004.g., vrednosti veće od MDK (do 0,25mg/l), što se nije negativno odrazilo na količinu Al u izlaznoj vodi, gde ga je u proseku bilo oko 0,07mg/l, a max vrednost Al u manjem broju uzoraka dostizala je do 0,15 mg/l.

Najbolji rezultati u procesu koagulacije postizani su korišćenjem polialuminijum-hlorida (PAC), posebno pri niskim temperaturama, ali je njegovo korišćenja za naše uslove bilo ekonomski neisplativo, pa se ovaj preparat koristi samo u ekstremnim slučajevima kao pomoćno sredstvo za koagulaciju uz već postojeći Al-sulfat i polielektrolit.



Slika Pulzator



Slika Sistem cevi za sakupljanje bistre vode

Svi ovi procesi započinju u komori za brzo mešanje, a završavaju se u dinamičkoj taložnici tipa pulzatora, gde se istovremeno odvijaju procesi koagulacije, flokulacije, taloženje i bistrenje.



Slika Kanal ispod zvona pulzatora

Istaložene čestice stvaraju tzv. muljnu zavesu u donjem sloju, koja dodatno pospešuje zadržavanje nečistoća delujući kao muljni filter. Izbistrena voda se sakuplja sistemom perforiranih cevi ravnomerno raspoređenih po površini zone bistrenja i sabirnim kanalom odvodi na dalji tretman filtriranjem.



Slika Pulzator - (koncentrator mulja)



Slika Zvono pulzatora (ventilator)

Pulzator je dinamička taložnica koja se sastoji od betonske posude sa ravnim dnom, zvonom u sredini ili sa strane i koncentratorima mulja duž čitave taložnice.

U gornjem delu postoji niz centralnih sakupljača vode u koje ulazi razgranat sistem perforiranih, najčešće azbest-cementnih cevi koje preko otvora sa gornje strane sakupljaju vodu po čitavoj površini.

U donjem delu smešten je razgranat sistem perforiranih cevi u koje se neprekidno dovodi voda iz glavnog razvodnog kolektora, koji je povezan sa zvonom pulzatora.

Koncentratori mulja koji su na sredini taložnice sakupljaju otežali flokulisani talog, koji se sleže u koncentratoru, gde deluju samo sile gravitacije, bez bilo kakve sile potiska. Talog se programirano ispušta iz koncentratora mulja.

Sirova voda koja se dovodi u zvono pulzatora odlazi u donji sistem perforiranih cevi. Jedan deo se uz pomoć vakuumpumpe – ventilatora podiže u zvono do unapred zadate visine i naglim uvođenjem atmosferskog vazduha u zvono voda se stropoštava do donjeg nivoa.

Spuštanje vode do donjeg nivoa je znatno brže nego njeno podizanje do gornje zadate visine. Obično se spuštanje odvija za 5 – 10 sekundi, a podizanje za 20 – 40 sekundi. Ovi parametri, kao i visine podizanja se zadaju na osnovu kvaliteta sirove vode i mogu se regulisati pomoću ventila.

Na ovaj način postiže se formiranje muljne zavese u donjem sloju taložnice, a intenzitet pulzacija utiče na koncentraciju mulja koja se drži u određenim granicama.

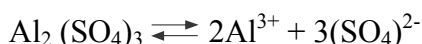
"Pulsiranjem" vodenog stuba različitim uzlaznim i silaznim brzinama postiže se efekat sabijanja muljne zavese, koja se ponaša i kao muljni filter, jer vezuje koagulisane čestice i zadržava ih da ne dođu u zonu bistrenja.

Višak mulja odlazi u koncentrator, koji se povremeno prazni, a njegovo pražnjenje ne može izazvati nikakvo smanjenje koncentracije mulja u muljnoj zavesi.

Prednost pulzatora je vrlo blago mešanje koje, uz postavljene umirivače po dnu, sprečava turbulenciju, ali se u praksi pokazali da je ova vrsta taložnice pogodna kod većih mutoća i kod manjih kolebanja u kvalitetu sirove vode.

Osnovni problem u radu pulzatora na postrojenju u Raški, a sa primenom standardnih koagulanata i flokulanata, je u slučajevima čestih oscilacija u pogledu mutnoće i sadržaja organskih materija u sirovoj vodi, a posebno kod manjih mutnoća (do 10 NTU), kada je formiranje muljne zavese otežano i usporeno.

Pri rastvaranju aluminijum sulfata (ili alumine) u vodi dolazi do sledeće reakcije:



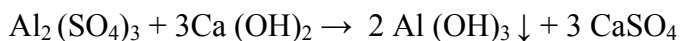
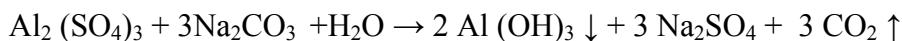
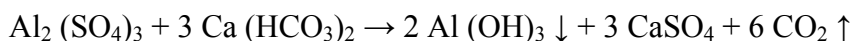
Hidroksilni jon postaje dostupan u rastvoru na osnovu jonizacije vodonikovog molekula:



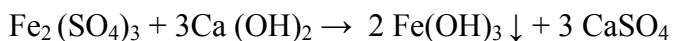
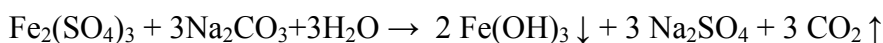
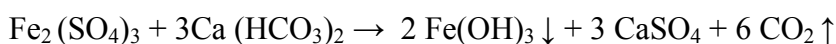
Aluminijumov jon reaguje sa hidroksilnim jonom, po reakciji:



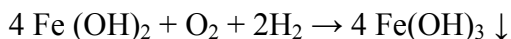
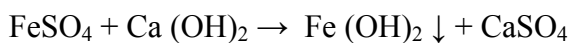
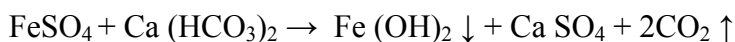
Potrošnja hidroksilnog jona dovodi do smanjenja alkalnosti rastvora. Ukoliko alkalnost vode nije dovoljna, da bi se zadovoljila prethodna jednačina, alkalnost se mora dovesti na željeni nivo, dodavanjem alkalija, najčešće kaustične sode ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), sode (Na_2CO_3) ili hidratisanog kreča ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).



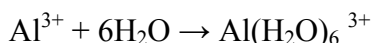
Na isti način pri dodavanju gvoždje sulfata, dolazi do sledećih reakcija:



Odnosno:

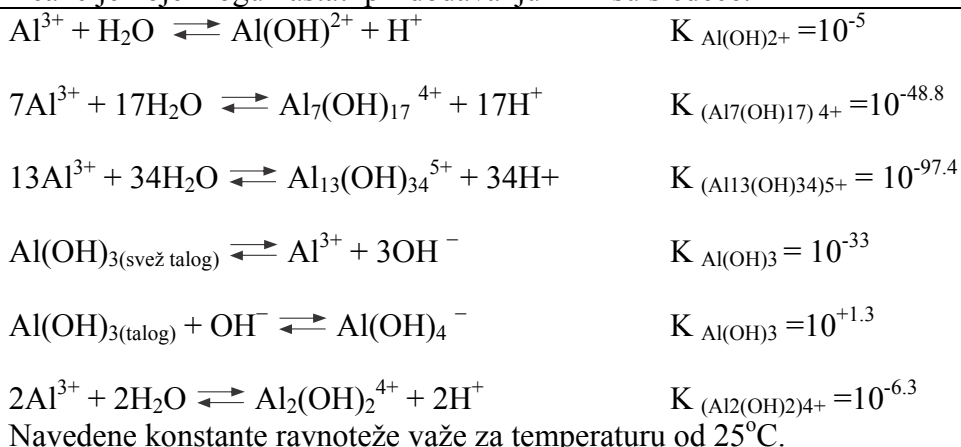


Pošto je molekul vode polaran, on privlači Al^{3+} formirajući kompleksni jon po reakciji:



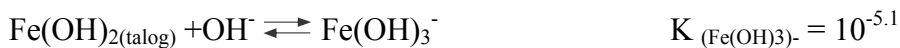
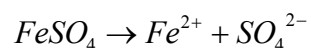
U ovom kompleksu, atom aluminijuma se često naziva i centralni atom, dok su molekuli vode ligandi. Zbog svog ukupnog oblika, ovakav kompleks se često naziva i *koordinatna sfera*.

Reakcije koje mogu nastati pri dodavanju Al^{3+} su sledeće:



U vodu se takodje može dodavati i **gvoždje hlorid** i to u obliku: FeCl_2 ferohlorid i FeCl_3 ferihlorid

Hemijske reakcije fero jona



Objašnjenje:**HEMIJSKA RAVNOTEŽA**

Povratna reakcija u kojoj reaktanti A i B daju produkte C i D se može napisati kao:



gde su a, b, c, d stehiometrijski koeficijenti tj. brojevi molova sastava A, B, C, D.

Kada se hemijski tip reakcije nalazi u stanju ravnoteže, odnos proizvoda molarnih koncentracija produkata i reaktanata predstavlja konstantu ravnoteže koja je data izrazom:

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

Za datu reakciju konstanta ravnoteže zavisi od temperature i od jonskih jačina komponenti. Korišćenje molarnih koncentracija je više od teoriskog značaja.

Kod realnih rastvora se često javljaju jon-jon interakcije, pa se zbog toga koristi aktivnost koja se definiše kao:

$$a_i = \gamma [c_i]$$

gde je: a_i - aktivnost i-tog jona, mol /L

$$\gamma - \text{koeficijent aktivnosti i-tog jona, koji se računa kao: } \log \gamma = -\frac{0.5(Z_i)^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}$$

(gde je: Z_i - jonska dužina i-te vrste a I - jonska jačina)

c_i - koncentracija i-tog jona, mol /L

Na osnovu ovoga K možemo predstaviti izrazom:

$$K = \frac{[a_C]^c [a_D]^d}{[a_A]^a [a_B]^b} = \frac{[\gamma_C C]^c [\gamma_D D]^d}{[\gamma_A A]^a [\gamma_B B]^b}$$

Ako se sa sp_{FeII} označe sve komponente koje sadrže Fe^{2+} u rastvoru, onda se on može izračunati kao zbir molskih koncentracija:

$$[sp_{FeII}] = [Fe^{2+}] + [FeOH^+] + [Fe(OH)_3^-]$$

Istovremeno, kao što se u realnim rastvorima daleko češće radi sa aktivnostima jona, koje ćemo obeležiti sa $\{Fe^{2+}\}$, respektivno, onda će važiti:

$$[Fe^{2+}] = \frac{\{Fe^{2+}\}}{\gamma_{FeII}} = \frac{K_{sp, Fe(OH)_2}}{\gamma_{FeII} \{OH^-\}^2} = \frac{K_{sp, Fe(OH)_2} \{H^+\}^2}{\gamma_{FeII} K_w^2} = \frac{K_{sp, Fe(OH)_2} \gamma_H^2 [H^+]^2}{\gamma_{FeII} K_w^2}$$

$$[FeOH^+] = \frac{\{FeOH^+\}}{\gamma_{FeOH^+}} = \frac{K_{FeOH^+}}{\gamma_{FeOH^+} \{OH^-\}} = \frac{K_{FeOH^+} \{H^+\}}{\gamma_{FeOH^+} K_w} = \frac{K_{FeOH^+} \gamma_H [H^+]}{\gamma_{FeOH^+} K_w}$$

$$[Fe(OH)_3^-] = \frac{\{Fe(OH)_3^-\}}{\gamma_{Fe(OH)_3^-}} = \frac{K_{Fe(OH)_3^-} \{OH^-\}}{\gamma_{Fe(OH)_3^-} \{H^+\}} = \frac{K_{Fe(OH)_3^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_3^-} \{H^+\}} = \frac{K_{Fe(OH)_3^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_3^-} \gamma_H [H^+]}$$

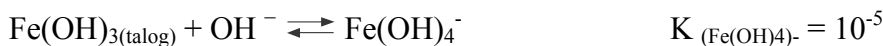
$$[sp_{FeII}] = \frac{K_{sp,Fe(OH)_2} \gamma_H^2 [H^+]^2}{\gamma_{FeII} K_w^2} + \frac{K_{FeOH^+} \gamma_H [H^+]}{\gamma_{FeOH^+} K_w} + \frac{K_{Fe(OH)_3^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_3^-} \gamma_H [H^+]}$$

Delenjem sa odgovarajućom vrednošću za $[H^+]$ jone i oduzimanjem potrebne koncentracije $[H^+]$ jona koja bi dovela do vrednosti $pH=0$ i preuredjenjem jednačine, uz promenu da je $[H^+]=[H^+]_{opt}$, koncentracija vodonikovih jona pri optimalnim uslovima je:

$$\left\{ \frac{2K_{sp,Fe(OH)_2} \gamma_H^2}{\gamma_{FeII} K_w^2} \right\} [H^+]_{opt}^3 + \left\{ \frac{K_{FeOH^+} \gamma_H}{\gamma_{FeOH^+} K_w} \right\} [H^+]_{opt}^2 = \frac{K_{(Fe(OH)_3^-)} K_w}{\gamma_{(Fe(OH)_3^-)} \gamma_H}$$

Vrednost $[H^+]$ se računa po metodi probe i greške.

Reakcije feri jona



$$[sp_{FeIII}] = [Fe^{3+}] + [FeOH^{2+}] + [Fe(OH)_2^+] + [Fe(OH)_4^-] + 2 [Fe_2(OH)_2^{4+}]$$

Odredjivanje optimalne vrednosti pH vrednosti za dodavanje koagulant

Sve koncentracije sa desne strane gornje jednačine će biti izražene kao koncentracija vodonikovog jona.

Koristeći prethodno napisane ravnotežne reakcije, dobijaju se sledeći odnosi:

$$[Fe^{3+}] = \frac{\{Fe^{3+}\}}{\gamma_{FeIII}} = \frac{K_{sp,Fe(OH)_3}}{\gamma_{FeIII} \{OH^{-}\}^3} = \frac{K_{sp,Fe(OH)_3} \{H^+\}^3}{\gamma_{FeIII} K_w^3} = \frac{K_{sp,Fe(OH)_3} \gamma_H^3 [H^+]^3}{\gamma_{FeIII} K_w^3}$$

$$[FeOH^{2+}] = \frac{\{FeOH^{2+}\}}{\gamma_{FeOH^{2+}}} = \frac{K_{FeOH^{2+}}}{\gamma_{FeOH^{2+}} \{OH^{-}\}^2} = \frac{K_{FeOH^{2+}} \{H^+\}^2}{\gamma_{FeOH^{2+}} K_w^2} = \frac{K_{FeOH^{2+}} \gamma_H^2 [H^+]^2}{\gamma_{FeOH^{2+}} K_w^2}$$

$$[Fe(OH)_2^+] = \frac{\{Fe(OH)_2^+\}}{\gamma_{Fe(OH)_2^+}} = \frac{K_{Fe(OH)_2^+}}{\gamma_{Fe(OH)_2^+} \{OH^{-}\}} = \frac{K_{Fe(OH)_2^+} \{H^+\}}{\gamma_{Fe(OH)_2^+} K_w} = \frac{K_{Fe(OH)_2^+} \gamma_H [H^+]}{\gamma_{Fe(OH)_2^+} K_w}$$

$$[Fe(OH)_4^-] = \frac{\{Fe(OH)_4^-\}}{\gamma_{Fe(OH)_4^-}} = \frac{K_{Fe(OH)_4^-} \{OH^{-}\}}{\gamma_{Fe(OH)_4^-}} = \frac{K_{Fe(OH)_4^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_4^-} \{H^+\}} = \frac{K_{Fe(OH)_4^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_4^-} \gamma_H [H^+]}$$

$$[Fe_2(OH)_2^{4+}] = \frac{\{Fe_2(OH)_2^{4+}\}}{\gamma_{Fe_2(OH)_2^{4+}}} = \frac{K_{Fe_2(OH)_2^{4+}}}{\gamma_{Fe_2(OH)_2^{4+}} \{OH^{-}\}^4} = \frac{K_{Fe_2(OH)_2^{4+}} \{H^+\}^4}{\gamma_{Fe_2(OH)_2^{4+}} K_w^4} = \frac{K_{Fe_2(OH)_2^{4+}} \gamma_H^4 [H^+]^4}{\gamma_{Fe_2(OH)_2^{4+}} K_w^4}$$

U navedenim jednačinama, kao γ je označen koeficijent aktivnosti pojedinih elemenata i kompleksnih ionova, respektivno, dok su K vrednosti proizvoda rastvorljivosti respektivno za pojedine elemente.

$$[sp_{FeIII}] = \frac{K_{sp,Fe(OH)_3} \gamma_H^3 [H^+]^3}{\gamma_{FeIII} K_w^3} + \frac{K_{FeOH^{2+}} \gamma_H^2 [H^+]^2}{\gamma_{FeOH^{2+}} K_w^2} + \frac{K_{Fe(OH)_2^+} \gamma_H [H^+]}{\gamma_{Fe(OH)_2^+} K_w} + \frac{K_{Fe(OH)_4^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_4^-} \gamma_H [H^+]} + \frac{K_{Fe_2(OH)_2^{4+}} \gamma_H^4 [H^+]^4}{\gamma_{Fe_2(OH)_2^{4+}} K_w^4}$$

Delenjem sa odgovarajućom vrednošću za $[H^+]$ jone i preuredjenjem jednačine, uz promenu da je $[H^+] = [H^+]_{opt}$, koncentracija vodonikovih jona pri optimalnim uslovima je:

$$\left\{ \frac{8K_{Fe_2(OH)_2^{4+}} \gamma_H^4}{\gamma_{Fe_2(OH)_2^{4+}} K_w^4} \right\} [H_{opt}^+]^5 + \left\{ \frac{3K_{Fe(OH)_3} \gamma_H^3}{\gamma_{Fe(OH)_3} K_w^3} \right\} [H_{opt}^+]^4 + \left\{ \frac{2K_{FeOH^{2+}} \gamma_H^2}{\gamma_{FeOH^{2+}} K_w^2} \right\} [H_{opt}^+]^3 + \left\{ \frac{K_{Fe(OH)_2^+} \gamma_H}{\gamma_{Fe(OH)_2^+} K_w} \right\} [H_{opt}^+]^2 = \frac{K_{Fe(OH)_4^-} K_w}{\gamma_{Fe(OH)_4^-} \gamma_H}$$

Vrednost $[H^+]$ se računa po metodi probe i greške.

Primer:

Izračunati optimalnu vrednost pH za dodavanje fero jona (ferosulfat na primer) pri temperaturi od 25°C, ako voda sadrži 140 mg/L rastvorenih čvrstih čestica.

Rešenje:

U gornju jednačinu zameniti sve poznate vrednosti i za njih odrediti vrednost $[H^+]_{opt}$.

Za svaki poseban član važi:

$$\left\{ \frac{2K_{sp,Fe(OH)_2} \gamma_H^2}{\gamma_{FeII} K_w^2} \right\}$$

$$K_{sp, Fe(OH)_2} = 10^{-14.5}, \alpha_H = 0.94, \gamma_{FeII} = 10^{\frac{0.5 \cdot 2^2 \sqrt{3.5 \cdot 10^{-3}}}{1 + 1.14 \sqrt{3.5 \cdot 10^{-3}}}} = 0.77, \text{ pa je:}$$

$$\left\{ \frac{2K_{sp,Fe(OH)_2} \gamma_H^2}{\gamma_{FeII} K_w^2} \right\} = \frac{2(10^{-14.5})(0.94)^2}{0.77(10^{-14})^2} = 7.26 \times 10^{13}$$

Na isti način je: $K_{FeOH^+} = 10^{-9.4}, \alpha_{FeOH^+} = \alpha_H = 0.94$, pa je:

$$\left\{ \frac{K_{FeOH^+} \gamma_H}{\gamma_{FeOH^+} K_w} \right\} = 3.98 \times 10^4$$

Kao i za treći član: $K_{Fe(OH)_3^-} = 10^{-5.1}, \alpha_{Fe(OH)_3^-} = \alpha_H = 0.94$, pa je:

$$\frac{K_{(Fe(OH)_3^-)} K_w}{\gamma_{(Fe(OH)_3^-)} \gamma_H} = 8.99 \times 10^{-20}$$

Zamenom je sada:

$$7.26 \times 10^{13} [H_{opt}^+]^3 + 3.98 \times 10^4 [H_{opt}^+]^2 = 8.99 \times 10^{-20}$$

Rešavanje metodom probe i greške se svodi na sledeće:

$$Y = 7.26 \times 10^{13} [H_{opt}^+]^3 + 3.98 \times 10^4 [H_{opt}^+]^2$$

Pretpostaviti vrednost za $[H^+]_{opt}$ i izračunavati vrednost Y

$[H^+]_{opt}$	Y
10^{-11}	4.05×10^{-18}
10^{-12}	3.99×10^{-20}

Ako se pretpostavi da je vrednost 10^{-11} , optimalna, za koju je vrednost $Y = 4.05 \times 10^{-18}$, onda je:

$$\frac{y - 10^{-12}}{10^{-12} - 10^{-11}} = \frac{8.99 \times 10^{-20} - 3.99 \times 10^{-20}}{3.99 \times 10^{-20} - 4.05 \times 10^{-18}}$$

$$y = 1.11 \times 10^{-12} \text{ tj } [H^+]_{opt} = 1.11 \times 10^{-12}$$

odakle je optimalna vrednost $pH = -\log_{10}[1.11 \times 10^{-12}] = 11.95$ za izvodjenje procesa koagulacije.

(Kada bi se radilo sa feri jonom, dobila bi se vrednost od $pH=8.2$, što govori da je lakše izvoditi koagulaciju sa feri jonom jer je znatno manja korekcija pH vrednosti potrebna)

Flokulacija

(transport koloidnih čestica)

Mnogi koloidni sistemi pokazuju izvesnu tendenciju ka agregaciji, bez obzira na svoju stabilnost.

Osnovni faktori koji određuju brzinu ove agregacije (koja je u principu mala) su:

- učestanost sudara koloidnih čestica (uslovljena transportom čestica) i
- efikasnost sudara u smislu povezivanja (uslovljena destabilizacijom čestica).

Povećanje učestanosti sudara postiže se flokulacijom.

Dodir između koloidnih čestica može se ostvariti na nekoliko načina:

1. konvekcionim (termičkim) kretanjem (Braunovo kretanje)- **perikinetičkom flokulacijom**
2. kretanje mase fluida – **ortokinetičkom flokulacijom**
3. sustizanjem čestica koje se sporije talože, česticama koje se brže talože- **diferencijalnim taloženjem**

Perikinetička flokulacija

Osnovni uzrok haotičnog kretanja koloidnih čestica koje izaziva perikinetičku flokulaciju je bombardovanje čestica molekulima vode. Promena ukupne koncentracije čestica u jedinici vremena usled perikinetičke flokulacije, odnosno brzina ovog procesa je:

$$I_{PK} = \frac{dN}{dt} = -\frac{4\eta k}{3\mu} N^2 \quad (2)$$

gde je:

- I_{pk} - brzina perikinetičke flokulacije
- N - koncentracija čestica u vremenu t
- η - faktor efikasnosti sudara, udeo od ukupnog broja čestica koji je efikasan u agregacionom smislu
- k - Bolcmanova konstanta
- T - apsolutna temperatura
- μ - viskozitet fluida

Brzina perikinetičke flokulacije, pokorava se kinetičkom zakonu II reda u odnosu na N_0 i nezavisna je od veličine čestica.

Integracijom jednačine (2) dobija se:

$$N = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{4\eta k T N_0}{3\mu} \right) t} \quad (3)$$

Granični ulov jednačine: koncentracija čestica jednaka je početnoj koncentraciji čestica $N = N_0$ u vremenu $t = 0$.

Ako se pretpostavi da će se za neko vreme broj čestica u rastvoru prepoloviti u odnosu na početni broj i ako se to vreme obeleži kao $t_{1/2}$, onda je:

$$\frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{4\eta k T N_0}{3\mu} \right) t_{1/2}} \quad (4)$$

Odakle je:

$$t_{1/2} = \frac{3\mu}{4\eta k T N_0} \quad (5)$$

Za vodu na 25°C:

$$t_{1/2} = \frac{1.6 \times 10^{11}}{\eta N_0} \quad (6)$$

gde je:

$t_{1/2}$ - vreme u sekundama,

N_0 - broj čestica u jednom mililitru,

η - bezdimenziona veličina koja predstavlja meru efikasnosti sudara.

Za malu početnu koncentraciju čestica i lošu destabilizaciju, vrednost $t_{1/2}$ može biti vrlo velika.

Primer: U vodi, koja sadrži 10 000 virusa na 1 mililitar i u kojoj nema drugih koloidnih čestica, potrebno je oko 200 dana da bi se koncentracija virusa, perikinetičkom flokulacijom svela na polovinu početne koncentracije, čak i kada su čestice virusa potpuno destabilizovane ($\eta = 1$). Rešenje je da se u ovakav koloidni sistem unese veća količina drugih koloidnih čestica ili da se u njemu obrazuje voluminozni talog metalnog hidroksida, čije flokule inkorporiraju virusne čestice.

Ortokinetička flokulacija

Agregacija koloidnih čestica ubrzava se agitacijom, pri čemu se brzina fluida menja prostorno i vremenski. Prostorna promena brzine fluida karakteriše se gradijentom brzine, G .

Prilikom kretanja fluida, prisutne koloidne čestice imaju različite brzine, pa i različite mogućnosti sudara sa drugim česticama. Ovakav način transporta čestica naziva se ortokinetička flokulacija.

Brzina ortokinetičke flokulacije I_{ok} , koloidne suspenzije čestica uniformne veličine, definiše se izrazom:

$$I_{ok} = \frac{dN}{dt} = \frac{2\eta G d^3 N^2}{3} \quad (7)$$

gde je:

d - prečnik koloidnih čestica.
G - gradijent brzine

Često se, za dati sistem, meri odnos brzina ortokinetičke i perikinetičke flokulacije:

$$\frac{I_{OK}}{I_{PK}} = \frac{-2\eta G d^3 \left(\frac{N^2}{3}\right)}{-4\eta k T \left(\frac{N^2}{3\mu}\right)} \quad (8)$$

Tako da je:

$$\frac{I_{OK}}{I_{PK}} = \frac{\mu G d^3}{2kT} \quad (9)$$

Da bi ovaj odnos bio jednak jedinici, odnosno da bi $I_{ok} = I_{pk}$, za vodu na 25°C, u zavisnosti od prečnika koloidnih čestica, gradijenti brzine imaju sledeće vrednosti:

d (μm)	G (s^{-1})
0,1	10000
1	10
10	0,01

U praksi se koriste srednji gradijenti brzine između 10 i 100 s^{-1} .

Iz ovoga sledi da se brzina agregacije sitnih koloidnih čestica, veličine ispod 1 μm , ne može povećati mešanjem. Tek pošto, perikinetičkom flokulacijom, veličina čestica dostigne 1 μm , može se primeniti agitacija (mešanje).

Zapreminski udeo koloidnih čestica, tj. zapremina flokula po određenoj zapremini tečnosti, Ω u jedinicama cm^3/L , odnosno $\text{cm}^3/10^3\text{cm}^3$, predstavlja zbir zapremina svih koloidnih čestica u jedinici zapremine suspenzije i definiše se izrazom:

$$\Omega = \frac{\pi d_0^3}{6} N \quad (10)$$

gde je d_0 prečnik čestica u vremenu $t = 0$, a N broj čestica u zapremini od jednog litra, sa jedinicama (L^{-1}). Zamenom jednačine (10) u (7), dobija se:

$$\frac{dN}{dt} = -kN = -\frac{4}{\pi} \eta G \Omega N \quad (11)$$

Integracijom jednačine (11) uz granične uslove: $N = N_0$ za $t = 0$ i $N = N$ za $t = t$, dobija se:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{4}{\pi} \eta G \Omega t \quad (12)$$

Iz jednačine (12) sledi da se brzina ortokinetičke fokolacije pokorava kinetičkom zakonu prvog reda u odnosu na koncentraciju čestica, gradijent brzine i zapreminski udeo koloidnih čestica.

Srednji gradijent brzine

Srednji gradijent brzine, u bilo kom sistemu, zavisi od snage koja se u njega unosi i može se definisati izrazom:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V \cdot \mu}} \quad (13)$$

Gde su:

P- snaga uneta u sistem

V- zapremina reaktora (flokulacionog bazena)

μ - viskozitet fluida

Kod flokulacionih bazena sa pregradama-kaskadama, učestanost dodira između čestica povećava se hidrauličkim mešanjem u masi fluida, koji protiče kroz komoru.

Prema Camp-u, potrebna snaga, odnosno energija, data je izrazom:

$$P = Q\rho gh_f \quad (14)$$

Q- protok fluida

ρ - gustina fluida

g- gravitaciona konstanta

h_f - pad pritiska u komori

Zamenom jednačine (14) u (13), dobija se:

$$G = \sqrt{\frac{Q\rho gh_f}{V\mu}} = \sqrt{\frac{gh_f}{t_{sr}v}} \quad (15)$$

t_{sr} - srednje vreme zadržavanja fluida u flokulacionom sistemu

v- kinematski viskozitet

Učestanost dodira između čestica, povećava se, najčešće mehaničkim mešanjem vode sporotirajućim mešalicama sa pedalama ili lopaticama. Sila trenja je, pri ovome, data izrazom:

$$F_d = C_D A \rho \frac{v_r^2}{2} \quad (16)$$

Gde su:

F_d - sila trenja koja se javlja između vode i rotirajuće lopatice

C_D - koeficijent trenja koji zavisi od oblika lopatice i od ulsova proticanja

A- površina poprečnog preseka lopatice, normalna na pravac kretanja

v_r - relativna brzina lopatice u odnosu na vodu

Kako je $P = F_d \cdot v_r$, zamenom (16) u (13), dobija se:

$$G = \sqrt{\frac{C_D A \rho v_r^3}{2 \mu v}} \quad (17)$$

Poseban problem predstavlja određivanje vrednosti v_r , tj. relativne brzine lopatica u odnosu na vodu i ta se vrednost, uobičajeno uzima kao 0.5-0.75 od brzine kretanja lopatica.

Primer:

Izračunati vreme potrebno da se smanji broj čestica za 50% u koloidnom rastvoru, pri laminarnim uslovima flokulacije, usvajajući da je kinetika flokulacije prvog reda, u uslovima kada nije dodat koagulant i u uslovima kada jeste dodat koagulant. Početna koncentracija čestica je 10.000 po ml, $G=60 \text{ s}^{-1}$, $\eta=1$. Prečnik čestice je 1mm. Nakon dodavanja 100 mg/L koagulanta, formirane flokule imaju gustinu od 1 g/ml.

Rešenje:

1. Odrediti vreme flokulacije bez dodavanja koagulanta.
 - a) Zapreminski udeo čestica koje su obrazovale flokule se računa po jednačini:

$$\Omega = \frac{\pi d_0^3}{6} N = \frac{\pi (10^{-4})^3}{6} 10000 = 5.2 \times 10^{-9}$$

- b) Za reakciju prvog reda, može se napisati

$$\frac{dN}{dt} = -kN = -\frac{4}{\pi} \eta G \Omega N \text{ gde je}$$

$$k = \frac{4}{\pi} \eta G \Omega$$

odnosno

$$N = N_0 e^{-kt}$$

- c) Sada se zamenom $t=t_{1/2}$ i logaritmovanjem gornjeg izraza dobija

$$t_{1/2} = \frac{\ln\left(\frac{0.5N_0}{N_0}\right)}{k} = \frac{-\pi \ln(0.5)}{4\eta\Omega G} = \frac{-\pi \ln(0.5)}{4 \cdot 1 \cdot 5.2 \times 10^9} = 20.2 \text{ dana}$$

2. Usvajajući iste početne uslove, potrebno je odrediti ovo vreme kada se doda 100 mg/L koagulanta sa specifičnom gustinom od 1 g/ml.

- a) Zapreminski udeo koagulanta se određuje na osnovu njegove specifične gustine i date količine:

$$\Omega = \frac{\text{dodata kolicina}}{\text{specifčna težina}} = \frac{0.1/1000}{1} = 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

- b) Sada je:

$$t_{1/2} = \frac{\ln\left(\frac{0.5N_0}{N_0}\right)}{k} = \frac{-\pi \ln(0.5)}{4\eta\Omega G} = \frac{-\pi \ln(0.5)}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-4}} = 91 \text{ s}$$

Flokulacioni bazeni

Osnovna uloga flokulacionog bazena je da se u njemu obezbede uslovi za kontakte izmedju čestica. Kontakti izmedju čestica ostvaruju se, uglavnom, ortokinetičkom flokulacijom. Koloidne čestice se medjusobno sudaraju, zahvaljujući gradijentima brzine, koji se hidraulički ili mehanički ostvaruju u masi tečnosti.

Projektovanje flokulacionih bazena uključuje izbor gradijenta brzine, oblika i dimenzija reaktora, i vremena zadržavanja, koje je dovoljno da se proizvedu aglomerati čestica. Veličina aglomerata čestica pogodna je za uklanjanje u narednoj jedinici za obradu (taložnik, vakuum filter, centrifuga, peščani filter ili sušno polje).

Brzina ortokinetičke flokulacije definisana je izrazom (12), gde η izražava efikasnost procesa destabilizacije, Ω koncentraciju čestica (zapreminski udeo) u vodi koja se obradjuje, uključujući i koncentraciju koagulant, a G količinu mešanja koja se ostvaruje hidraulički ili mehanički.

Ovaj izraz samo približno odgovara reakciji flokulacije heterogenih disperzija, kao što su prirodni sistemi. Merenje parametara Ω i η je praktično nemoguće, a čak se i srednji gradijent brzine G , može izmeriti samo uz velike teskoće.

TABELA 1. VREDNOSTI FAKTORA EFIKASNOSTI SUDARA

Vrsta koloida	Koagulant	Vrsta flokulacije	$G(\text{sec}^{-1})$	η	Referenca
Polistirol lateks	NaCl	ortokinetička	11	0,448	Barkner i Morgan 1968.
Polistirol lateks	NaCl	ortokinetička	45	0,344	Barkner i Morgan 1968.
Polistirol lateks	NaCl	ortokinetička	11	0,217	Barkner i Morgan 1968.
Polistirol lateks	NaCl	ortokinetička	45	0,063	Barkner i Morgan 1968.
Silicijum dioksid	Al(3+)	perikinetička	-	0,010	Hahn i Stumm 1968.
Silicijum dioksid	Al(3+)	ortokinetička	10	0,011	Hahn i Stumm 1968.
Nafta	Ca(NO ₃) ₂	perikinetička	-	0,355	Swift i Friedlander 1969.
Polistirol lateks	NaCl	perikinetička	-	0,375	Swift i Friedlander 1969.
Polistirol lateks	NaCl	ortokinetička	1,80	0,364	Swift i Friedlander 1969.

Podaci iz ove tabele moraju se prihvatiti sa određenom rezervom.

Faktor efikasnosti sudara zavise od vrste koloida, koagulanta i drugih hemijskih karakteristika sistema. Vrednost varira u vrlo širokim granicama, od 0,010 do 0,448. Dok je u jednom sistemu uspešan samo 1% od ukupnog broja sudara, u smislu agregacije, u drugom sistemu taj procenat iznosi skoro 50. Ovo može dovesti do velike razlike u vremenu zadržavanja u ova dva sistema, koje je potrebno da bi se ostvario određeni stepen agregacije. Potrebno vreme zadržavanja, je obrnuto srazmerno zapreminskom udelu čestica Ω . Muljevi, nastali u postrojenjima za obradu otpadnih voda (Ω je reda veličine 10^{-2}) zahtevaju za dva reda veličine kraće vreme zadržavanja, nego, na primer, muljevi nastali pri klasičnoj koagulaciji prirodnih voda (Ω je reda veličine 10^{-4} ili manje), 0,3min odnosno 30min.

Pri obradi otpadnih voda, kada se kao koagulanti koriste Al i Fe soli, srednji gradijenti brzina se kreću između 10 i 100 s^{-1} .

Potrebno vreme zadržavanja u flokulacionom sistemu, zavisi od stepena agregacije, koji se želi ostvariti, a obrnuto je proporcionalno faktoru efikasnosti sudara η .

Efikasnost flokulacionih uređaja, srazmerna je bezdimenzionom proizvodu gradijenta brzine G i vremena zadržavanja t, ($G \cdot t$).

Pri praktičnoj obradi prirodnih voda, vrednosti ovog proizvoda su u intarvalu od $G \cdot t = 10^4 - 10^5$.

Pri projektovanju uređaja za obradu otpadnih voda i muljeva, preporučuje se korišćenje jednačine 12.

U sistemima za obradu prirodnih voda, pod uslovom da je izvršena dovoljno uspešna koagulacija, vrednost proizvoda $\eta \cdot \Omega \cdot G \cdot t$ je reda veličine 0,1 ($G = 10 sec^{-1}$, $t = 10^3 sec$, $\Omega = 10^{-4}$ i $\eta = 10^{-1}$) pod uslovom da je prethodno izvršena dovoljno efikasna koagulacija.

„AIR STRIPPING“ i AERACIJA

Tehnološki postupci koji se u inženjerstvu nazivaju „air stripping“ i aeracija koriste se u tehnologiji pripreme vode, a zasnovani su na principu prenosa mase između tečne i gasovite faze, sa ciljem obezbedjenja potrebnog kvaliteta vode. U srpskom jeziku ne postoji termin koji bi jednoznačno objasnio „air stripping“ (*engl. air-strip* - poletnosletna pista), kao postupak u kome se voda dovodi u kontakt sa vazduhom koji struji oko nje, pri čemu se isparljive (gasovite) komponente izdvajaju iz vode i odnose se strujom vazduha. Pojam aeracije je već odomaćen u našem jeziku i označava uvođenje vazduha u vodu, pri čemu dolazi pre svega do prenosa mase kiseonika u vodu i njegovog rastvaranja.

Zajedničko za oba procesa je da se vazduh i voda dovode u kontakt i osnovni inženjerski zadatak je da se obezbedi što veća dodirna površina između ove dve faze.

Proces prenosa mase pri kome dolazi do uklanjanja isparljivih (volatilnih) supstanci iz vode u vazduh naziva se i *desorpcija*. Upravo je „air stripping“ proces najčešće korišćen desorpcioni postupak u tehnologiji vode.

Proces prenosa mase pri kome se vrši dodavanje gasova iz vazduha u vodu naziva se *apsorpcija*. Aeracija, kao rastvaranje kiseonika u vodi, najčešće je korišćen apsorpcioni proces u tehnologiji vode.

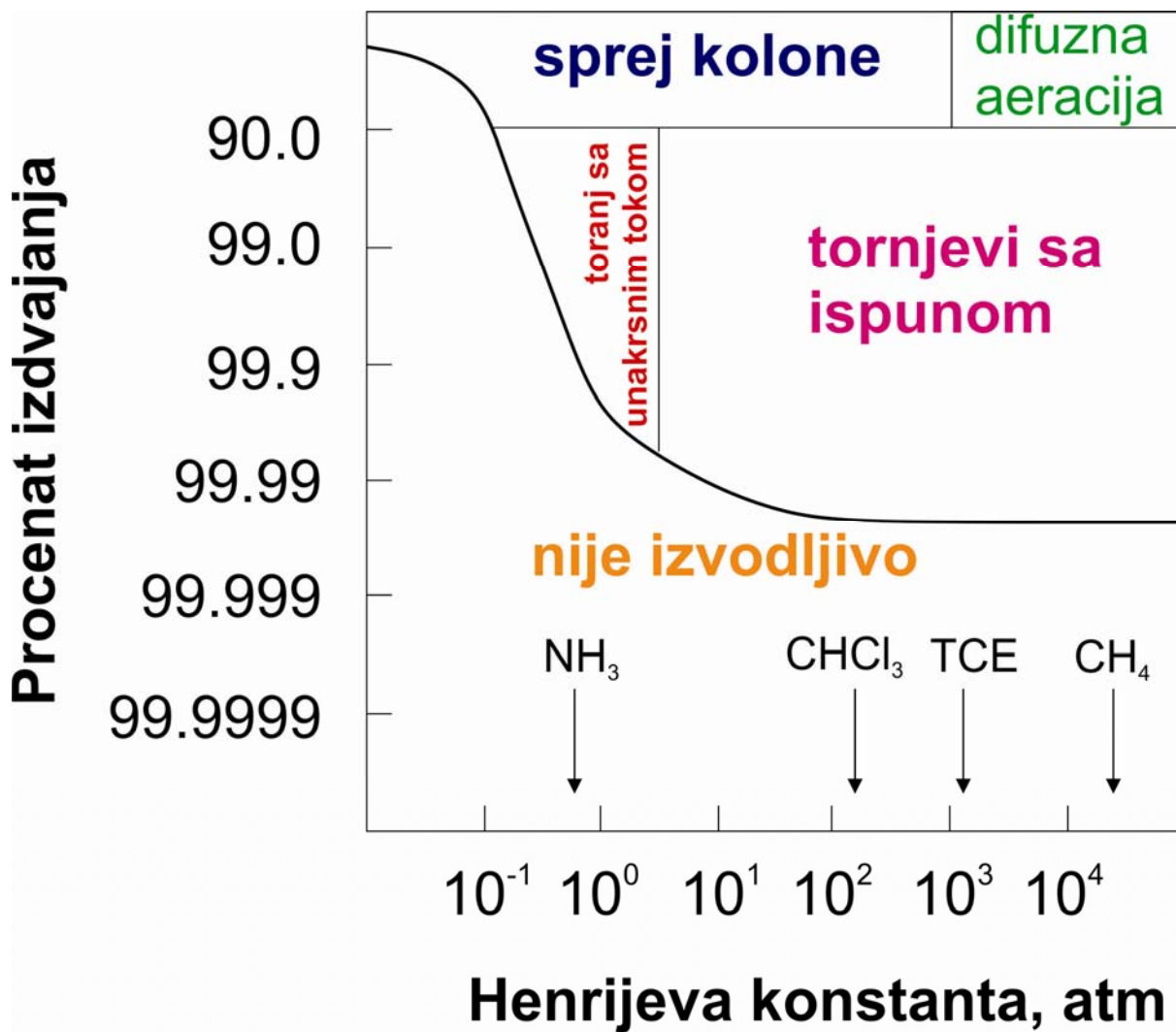
Za razumevanje oba procesa, od esencijalne važnosti je poznavanje teorije operacije prenosa mase i poznavanje određivanja, bilo eksperimentalno bilo računski, koeficijenta prenosa mase, kao preduslova za kvalitetno projektovanje ova dva procesa.

U tabeli je dat zbirni prikaz komponenti koje se tretiraju na ovaj način, kao i željeni cilj koji se time može postići.

Tabela Primena postupaka prenosa mase u tehnologiji vode

Komponenta	Cilj u tretmanu vode
Adsorpcija	
O ₂	Oksidacija Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , S ²⁻
O ₃	Dezinfekcija, uklanjanje boje, oksidacija određenih organskih komponenti
Cl ₂	Dezinfekcija, oksidacija Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , H ₂ S
ClO ₂	Dezinfekcija
CO ₂	Kontrola pH
SO ₂	Dehlorinacija
NH ₃	Formiranje hloramina pri dezinfekciji
Desorpcija	
CO ₂	Kontrola korozije
O ₂	Kontrola korozije
H ₂ S	Uklanjanje neprijatnih mirisa
NH ₃	Uklanjanje nutrijenata za razvoj mikroorganizama
Isparljive (volatilne) organske materije	Kontrola ukusa i mirisa, uklanjanje potencijalno kancerogenih materija

Dva najvažnija kontaktora vazduh-voda koja se koriste za „air stripping“ su tornjevi i aeratori. Najvažniji principi za odabir tipa reaktora su: a) željeni stepen uklanjanja komponenti iz vode i b) Henrijeva konstanta komponente. Tornjevi se češće koriste kada je potrebno ostvariti veći stepen uklanjanja ili kada komponenta ima veći afinitet prema vodi (nije lako isparljiva i ima malu Henrijevu konstantu, kao što je to pokazano na sledećoj slici.



Aeratori se koriste u slučajevima kada nije potreban visok stepen uklanjanja ili kada je gas vrlo lako isparljiv, tj ima visoku Henrijevu konstantu.

Kada je potreban nivo uklanjanja ispod 90%, oba tipa uređaja, kao i mehanički aeratori mogu biti primenjeni.

Ravnoteža gas-tečnost

Kada se voda, prethodno oslobodjena gasova, rasprši u slobodan vazdušni prostor azot i kiseonik će se iz vazduha prelaziti u tečnost, sve dok se ne uspostavi ravnotežna

koncentracija. Nasuprot tome, kada se voda iz podzemnog izvorišta, koja obično sadrži povećanu koncentraciju metana i ugljen dioksida, rasprši u vazduh doći će do njihovog prelaza u vazduh, pošto njihova koncentracija u vodi obično prevazilazi ravnotežnu koncentraciju sa vazduhom. U svim slučajevima je pokretačka sila za ove procese razlika postojeće i ravnotežne koncentracije.

Na osnovu Henrijevog zakona, važi da je:

$$\frac{[A_{gas}]}{[A_{tecnost}]} = K_{eq} = H$$

Gde je:

$[A_{gas}]$ - aktivnost gasa u vazduhu, mol/L vazduha

$[A_{tecnost}]$ - aktivnost gasa u tečnosti, mol/L vazduha

K_{eq} - konstanta ravnoteže definisana kao Henrijeva konstanta, bez dimenzija

H - Henrijeva konstanta, bez dimenzija

Odnosno, kada se aktivnost gasa u vazduhu zameni sa parcijalnim pritiskom gasa, dobija se izraz:

$$p_A = H_A \gamma_A [A]$$

Gde je:

p_A - parcijalni pritisak komponente A, atm

H_A' - Henrijeva konstanta, atm/(mol/L)

γ_A - koeficijent aktivnosti komponente A,

$[A]$ - koncentracija komponente A u tečnoj fazi, mol/L

U mnogim slučajevima, ravnotežna konstanta ne zavisi od koncentracije. Medjutim, pri visokim koncentracijama, ravnotežna konstanta, data u prethodnim jednačinama, nije konstantna i zavisi od koncentracije rastvorene komponente. Tako, prethodna jednačina generalno važi pri koncentracijama manjim od 0.01 mol/L, premda neki rezultati kažu da može važiti i pri koncentracijama od 0.1 mol/L. Prisustvo vazduha nema uticaja na Henrijevu konstantu za isparljive (volatilne, VOCs) komponente ili gasove u vodi zato što komponente o kojima je reč imaju malu koncentraciju u vazduhu. Važno je naglasiti da je za većinu prirodnih voda (jonska jačina manja od 0.01M) vrednost koeficijenta aktivnosti jednaka 1.0 pa se prethodna jednačina može napisati u obliku:

$$p_A = H_A [A]$$

Henrijev zakon se može pisati i u drugom obliku, pa je čest oblik koji se sreće:

$$p_A = H_A^x x_A$$

Gde je:

p_A - parcijalni pritisak komponente A, atm

H_A^x - Henrijeva konstanta zasnovana na molskom udelu, atm

x_A - molski udeo komponente A u vodi (ili mol A/(mol A+mol H₂O))

Henrijeva konstanta za različite organske komponente (pri različitim temperaturama) i gasova (na 20°C) data je u sledećoj tabeli:

Tabela – Podaci o bezdimenzionoj Henrijevoj konstanti na 20°C za različite komponente u vodi

Komponenta	$\Delta H^{\circ}_{\text{rastvor}}$ Kcal/kmol x 10 ³	K_c	H
Amonijak	8.53	1526	0.0006
Ugljen dioksid	4.77	4013	1.1
Hlor	4.01	420	0.43
Hlor dioksid	6.75	4300	0.04
Vodonik sulfid	4.26	567	0.38
Metan	3.55	12402	28.41
Kiseonik	3.34	9627	32.15
Ozon	5.80	83848	3.74
Sumpor dioksid	5.53	358	0.03
Ugljen tetrahlorid	9.32	8580096	0.96
Tetrahloretlen	9.88	17926362	0.82
Trihloretlen	7.85	290732	0.41
Benzen	8.47	357678	0.18
Hloroform	9.21	940789	0.13

Usvajajući da je promena standardne entalpije ($\Delta H_{\text{rastvor}}^{\circ}$) za rastvorene komponente u vodi, konstantna u temperaturnom opsegu koji je interesantan za tematiku tehnologije vode, promena vrednosti Henrijeve konstante sa temperaturom, može biti računata primenom van't Hoff-ove jednačine:

$$H_{T_2} = H_{T_1} \exp \left[\frac{-\Delta H_{\text{rastv}}^{\circ}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]$$

Gde je

- $\Delta H^{\circ}_{\text{rastvor}}$ - promena standardne entalpije rastvaranja u vodi, kcal/kmol
- R - univerzalna gasna konstanta, 1.987 kcal/kmol K
- H_{T_1}, H_{T_2} - bezdimenzione Henrijeve konstante pri temperaturama T1 i T2
- T_1, T_2 - apsolutne temperature, K

Prethodna jednačina može biti uprošćena, gde su K_c i $\Delta H^{\circ}_{\text{rastvor}}$, date u prethodnoj tabeli:

$$H = K_c \exp \left(- \frac{\Delta H_{\text{rastv}}^{\circ}}{RT} \right)$$

Primer:

Izračunati Henrijevu konstantu pri temperaturi od 5°C i 20°C za trihloretilen (TCE), koristeći prethodnu jednačinu i podatke iz tabele.

Rešenje:

1. Na 5 oC: Koristeći podatke iz tabele $K_c=290732$, a $\Delta H^0_{\text{rastvor}}=7.85 \times 10^3$ kcal/mol, pa je:

$$H = K_c \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{rastv}}^0}{RT}\right) = 290732 \exp\left[\frac{7.85 \times 10^3}{1.987 \cdot (273 + 5)}\right] = 0.20$$

2. Na 20°C: Uzimaju se isti podaci stim što je zbir (273+20), pa je $H=0.41$

Iz prethodnog primera se vidi na koji način temperatura ima efekat na vrednost Henrijeve konstante.

Uticaj površinski aktivnih materija

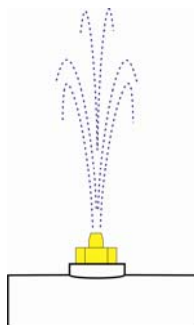
U prirodnim vodama prisustvo površinski aktivnih materija je relativno malo, pa samim tim i nema njihovog uticaja na vrednost Henrijeve konstante. Medjutim, ukoliko se oni jave u relativno velikim koncentracijama, isparljivost drugih komponenti može biti smanjena usled različitih mehanizama koji se mogu javiti u vodi. Najčešći mehanizam je sakupljanje površinski aktivnih materija na graničnoj površini vazduh-voda, čime se smanjuje molska frakcija isparljivih komponenti na toj granici. Kao primer rastvorljivost kiseonika u vodi koja sadrži površinski aktivne materije se smanjuje od 30 do 50%.

Uticaj pH

Ph vrednost nema direktan uticaj na Henrijevu konstantu, ali pH ima uticaj na pojavu jonizovanih i nejonizovanih formi, a kako su samo nejonizovane forme isparljive (volatilne), to na posredan način pH vrednost može imati uticaj na raspodelu komponenti na granici faza gas-tečnost. Ovo je posebno slučaj kada se u vodi javi amonijak u povećanoj koncentraciji, koi bi trebalo ukloniti, medjutim usled njegove disocijacije, neophodno je znatno pomeriti vrednost pH ka baznoj sredini (iznad pH=11), kako bi se javio nejonizovani oblik koji je isparljiv i tek tada bi bilo moguće primeniti „air stripping“. Medjutim, dodavanje baze, a potom kiseline radi neutralizacije, u konkretnom slučaju pripreme vode za piće, ovaj postupak čini neisplativim, tako da je neophodno koristiti druge postupke uklanjanja amonijaka iz vode.

Primenjeni sistemi za „air stripping“

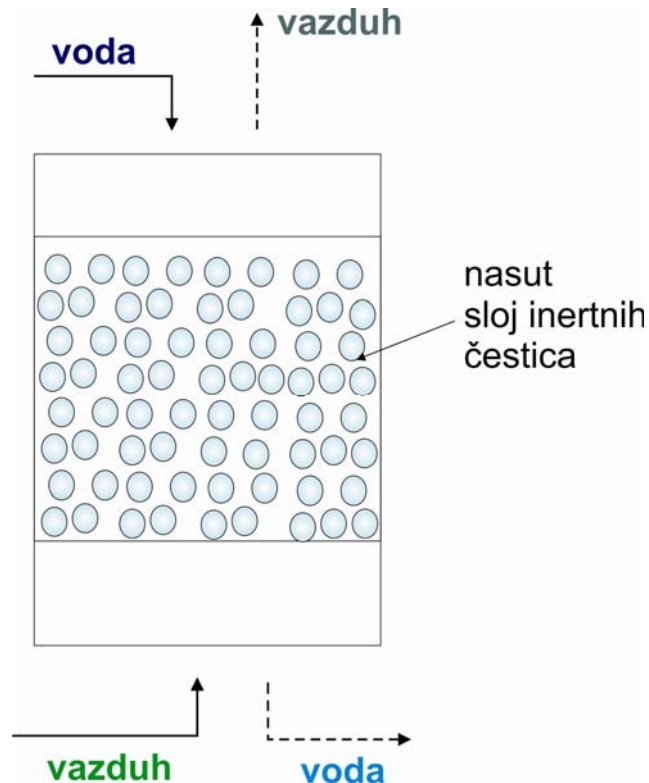
Raspršivači:



Slika Raspršivač vode

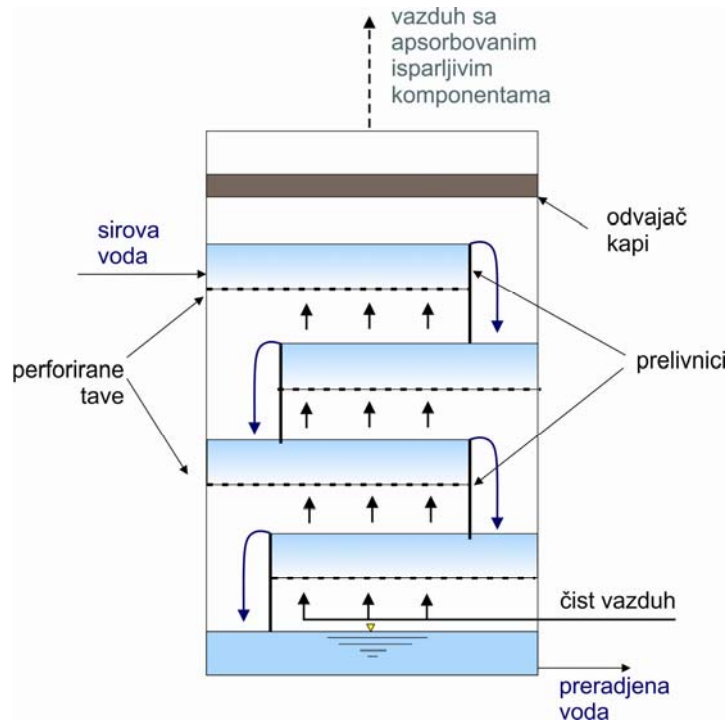
Kontaktori sa tankim filmom:

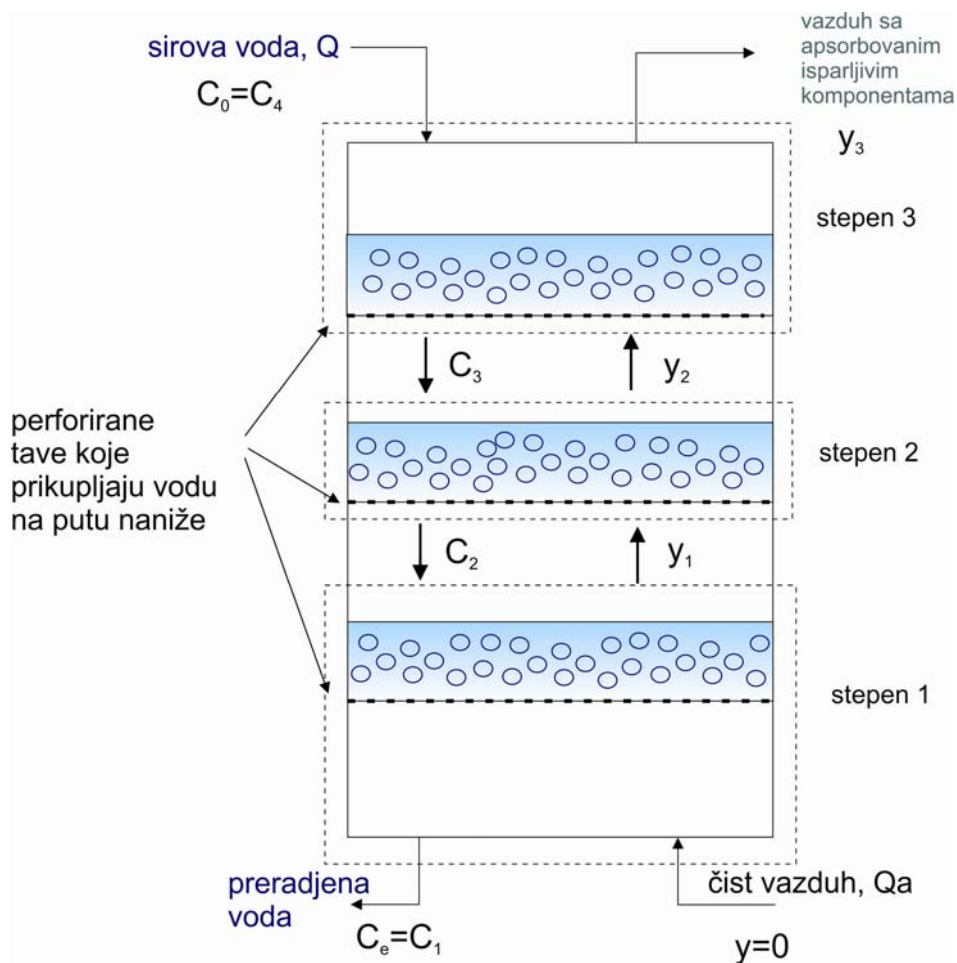
- Kaskadni aeratori
- Višestepeni aeratori
- Tornjevi sa nasutim slojem inertnih čestica



Difuzni aeratori:

Uvodjenje vazduha pod pritiskom i provodjenje kroz vodu





Aeratori sa dispergovanjem vazduha:

Aeratori koji mehaničkom mešalicom razbijaju mehurove i pomažu aeraciju.

Minimalni odnos vazduh-voda potreban za „air stripping“

Ovaj odnos se računa po jednačini:

$$\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\min} = \frac{C_0 - C_e}{HC_0}$$

Gde je:

- (Q_a/Q) - minimalni odnos potrebnog vazduha i vode
- C_0 - ulazna koncentracija u tečnoj fazi
- C_e - željena koncentracija nakon tretmana

Primer:

Izračunati minimalan odnos voda-vazduh za benzen i tetrahloretilen (PERC) sa željenim uklanjanjem od 90% na temperaturi od 15°C u suprotnostrujnom tornju sa nasutom ispunom.

Rešenje

1. Odrediti Henrijevu konstantu za svaku komponentu na temperaturi od 15°C.

Za benzen:

$$K_c = 357.678$$

$$\Delta H_{\text{rastvor}}^{\circ} = 8.47 \times 10^3 \text{ kcal/kmol}$$

$$H = K_c \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{rastv}}^{\circ}}{RT}\right) = 357.678 \exp\left[\frac{8.47 \times 10^3}{1.987 \cdot (273 + 15)}\right] = 0.133$$

Za tetrahloretilen:

$$K_c = 17.926.362$$

$$\Delta H_{\text{rastvor}}^{\circ} = 9.88 \times 10^3 \text{ kcal/kmol}$$

$$H = K_c \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{rastv}}^{\circ}}{RT}\right) = 17926362 \exp\left[\frac{9.88 \times 10^3}{1.987 \cdot (273 + 15)}\right] = 0.569$$

2. Odrediti sada minimalni odnos vazduh-voda za svaku komponentu

Za benzen:

$$\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\text{min,benzen}} = \frac{C_0 - C_e}{H_{\text{benzen}} C_0} = \frac{C_0 - 0.1C_0}{0.133C_0} = 6.74$$

Za tetrahloretilen:

$$\left(\frac{Q_a}{Q}\right)_{\text{min,tetrahl.etilen}} = \frac{C_0 - C_e}{H_{\text{tetrahl.et.}} C_0} = \frac{C_0 - 0.1C_0}{0.569C_0} = 1.58$$

Komponente sa manjom vrednošću Henrijeve konstante, kao što je to benzen u ovom slučaju, zahtevaju značajno veću količinu vazduha tj. odnos vazduh-voda, da bi se dostigla željeno uklanjanje isparljivih komponenti iz vode. Na taj način ove komponente je i teže ukloniti „air strippingom“ iz vodene fazu u vazдушnu fazu.

Analiza sprej aeratora

Voda pod pritiskom se raspršava kroz mlaznicu i u sitnim kapima pada kroz vazduh. Pri tome, iz kapljice vode, tokom njenog pada kroz vazduh isparljive komponente prelaze u vazduh i na taj način se njihova koncentracija u vodi smanjuje. Nakon pada kapljice na dno i prikupljanja raspršene vode, ona se odvodi na dalji tretman.

Bilans mase u kapljicama vode uniformne veličine i odgovarajuće količine vazduha se može izraziti sledećom jednačinom:

Masa koja napusti kapljicu vode po vremenu = Masa prosla kroz granicu vazduh - voda po vremenu

Ili u obliku jednačinom:

$$V_d \frac{dC}{dt} = K_L a [C(t) - C_s(t)] V_d$$

V_d - zapremina kapljice, m^3

K_L - ukupni koeficijent prenosa mase, m/s

a - specifična površina između tečne i gasovite faze, m^2/m^3

$C(t)$ - koncentracija isparljive komponente u kapi vode u vremenu t , mg/L

$C_s(t)$ - koncentracija na granici voda-vazduh u vremenu t , mg/L

Finalna koncentracija isparljivih materija posle izlaganja vazduhu može biti određena po jednačini:

$$C_e = C_0 e^{-K_L a \theta}$$

Gde je:

C_e - finalna koncentracija isparljivih materija u kapljici vode posle prolaza kroz vazduh, mg/L

C_0 - početna koncentracija isparljive materije u vodi, mg/L

θ - vreme koje kapljica provede u vazduhu, s

Vreme kontakta se računa po jednačini:

$$\theta = \frac{2u_d \sin \alpha}{g}$$

Gde je:

α - ugao pod kojim se voda raspršava, meren u odnosu na horizontalu, $^\circ$

u_d - brzina kojom voda napušta mlaznicu, m/s

Ova brzina se računa po jednačini:

$$u_d = C_u \sqrt{2gh}$$

Gde je:

C_u - koeficijent brzine na suženju (prigušnica), nema dimenziju

h - gubitak pritiska na mlaznici, m

Protok vode kroz mlaznicu se računa po jednačini:

$$Q_n = C_d A_n \sqrt{2gh}$$

Gde je:

Q_n - protok kroz mlaznicu, m^3/s

A_n - površina otvora mlaznice, m^2

C_d - koeficijent isticanja, koji daju proizvođači mlaznice, bezdimenziona

Ukupni koeficijent prenosa mase se računa po jednačini:

$$K_L = \begin{cases} 2\left(\frac{D_1}{\pi\theta}\right)^{1/2} & \text{za } \frac{2(D_1\theta)^{1/2}}{d_d} < 0.22 \\ \frac{10D_1}{d_d} & \text{za } \frac{2(D_1\theta)^{1/2}}{d_d} > 0.22 \end{cases}$$

Gde je:

K_L - ukupni koeficijent prenosa mase, m/s

d_d - srednji prečnik kapljice vode, jednak ukupnoj zapremini raspršene vode podeljen sa površinom, m

D_1 - difuzivnost isparljive komponente, m²/s

θ - vreme koje kapljica provede u vazduhu, s

Površina na kapljicama vode na kojoj se vrši prenos mase, (m²/m³) je:

$$a = \frac{6}{d_d}$$

Primer:

Potrebno je iz podzemne vode odstraniti CO₂ u sistemu sa reaspršivanjem. Podzemna voda je bila na temperaturi od 25°C, a koncentracija rastvorenog CO₂ je 100 mg/L. Voda je pumpama iz izvorišta isumpavana protokom od 0.050 m³/s sa nadpritiskom od 30 m. Na osnovu podataka koje je dao proizvođač mlaznica, karakteristike mlaznica su:

$d_d=0.0010$ m, $\alpha=90^\circ$, $C_u=0.45$, $C_d=0.25$, prečnik mlaznice je 0.0125m, a vrednost difuzivnosti za CO₂ je 2.0×10^{-9} m²/s.

Odrediti broj mlaznica potrebnih za uklanjanje CO₂ i efikasnost njegovog izdvajanja iz vode.

Rešenje:

1. Odrediti broj potrebnih mlaznica

Odrediti površinu jedne mlaznice:

$$A_n = \frac{1}{4} \pi \cdot 0.0125^2 = 1.2 \times 10^{-4}$$

Odrediti protok kroz jednu mlaznicu:

$$Q_n = C_d A_n \sqrt{2gh} = 0.25 \cdot 1.2 \times 10^{-4} \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 30} = 7.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Broj mlaznica se dobija iz ukupnog protoka:

$$n = \frac{Q}{Q_n} = \frac{0.050}{7.3 \times 10^{-4}} = 68$$

2. Odrediti efikasnost uklanjanja CO₂

a) Izračunati brzinu izlaska vode iz dizne:

$$u_d = C_u \sqrt{2gh} = 0.45 \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 30} = 11 \text{ m/s}$$

b) Odrediti vreme kontakta kapljice vode sa vazduhom:

$$\theta = \frac{2u_d \sin \alpha}{g} = \frac{2 \cdot 11 \cdot \sin 90}{9.81} = 2.2 \text{ s}$$

c) Izračunati ukupni koeficijent prenosa mase, K_L .

Prvo je potrebno izračunati član $\frac{2(D_1\theta)^{1/2}}{d_d}$:

$$\frac{2(D_1\theta)^{1/2}}{d_d} = \frac{2 \cdot 2 \times 10^{-9} \cdot 2.2}{0.0010} = 0.13 < 0.22$$

Sada se K_L računa po jednačini:

$$K_L = 2 \left(\frac{D_1}{\pi\theta} \right)^{1/2} = 2 \left[\frac{2 \times 10^{-9}}{\pi \cdot 2.2} \right]^{0.5} = 3.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

d) Izračunati specifičnu površinu za prenos mase:

$$a = \frac{6}{d_d} = \frac{6}{0.0010} = 6 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$$

e) Sada je moguće izračunati zapreminski koeficijent prenosa mase:

$$K_L a = 3.4 \times 10^{-5} \cdot 6 \times 10^3 = 0.20 \text{ s}^{-1}$$

f) Na osnovu izračunatih vrednosti može se izračunati izlazna koncentracija CO₂ u vodi, tj nakon pada kapljice kroz vazduh:

$$C_e = C_0 e^{-K_L a \theta} = 100 \exp^{-0.20 \cdot 2.2} = 64 \text{ mg/l}$$

g) Pošto nam je poznata i ulazna i izlazna koncentracija CO₂ u vodi, može se izračunati efikasnost uklanjanja tokom procesa „air stripping-a“:

$$Efikasnost = \frac{C_0 - C_e}{C_0} = \frac{100 - 64}{100} = 0.36 = 36\%$$

Drugi načini odstranjivanja rastvorenih gasova iz vode (degazacija)

Kada je potrebno ukloniti gasove iz vode koja se koristi za specifične namene, a ne kao voda za piće, moguće je primeniti i termičke i hemijske postupke.

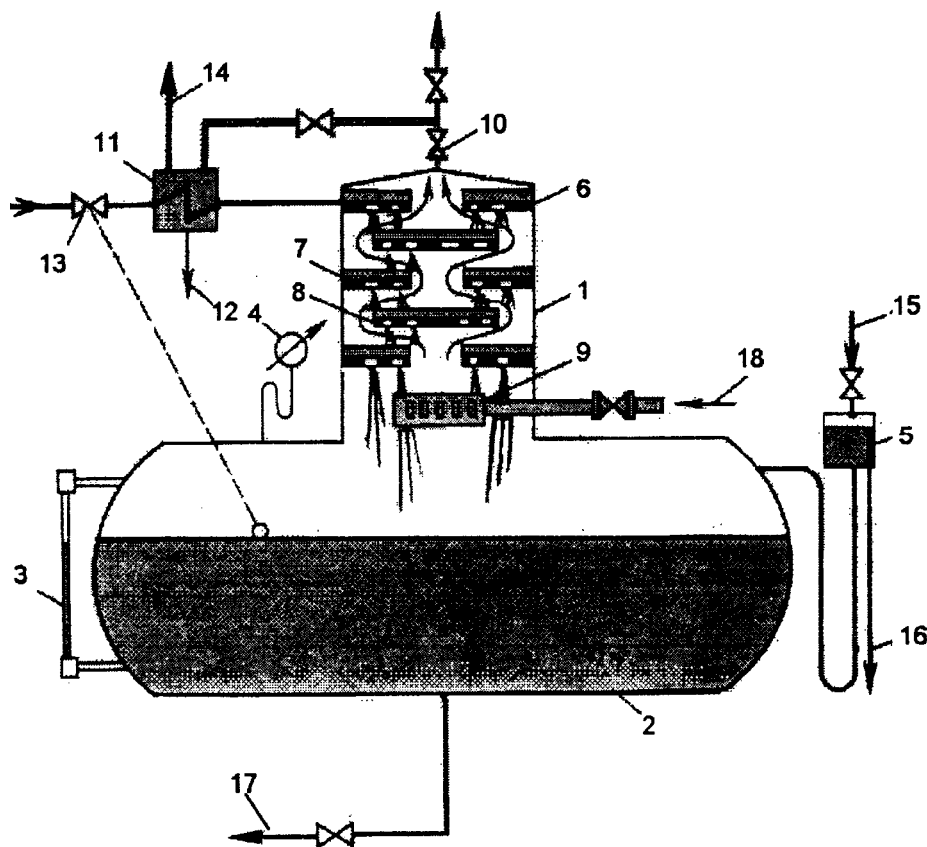
Termički postupci

Termički postupci izvode se kao:

- grubo odstranjivanje gasova (kaskadna postrojenja),
- odstranjivanje gasova na sniženom pritisku,
- odstranjivanje gasova na povišenom pritisku.

Uređaji za udaljavanje gasova na povišenim i sniženim pritiscima zasnivaju se na desorpciji gasova i to pri povišenom pritisku sa jako povišenom temperaturom, a pri sniženom pritisku sa sniženom temperaturom. Kod prvih su uslovi izvršenja procesa u opsegu pritiska od 0,3 - 1,0 MPa i temperaturama višim od 130 °C, kod drugih - u vakuumu i na temperaturama od 50 - 80 °C.

Na slici je data shema uređaja termomehaničkog tipa za udaljavanje gasova iz vode (deaeratora), koji radi na pritisku 0,105-1,15 MPa. Vodena para dolazi kroz cev (18) i kreće se u uređaju naviše mešajući se sa vodom raspršenom (u razdelniku 6) u fine kapi. Para se pri tom kondenzuje, a oslobođeni gasovi idu u atmosferu kroz otvor (10), hladnjak (11) i odvod (14).

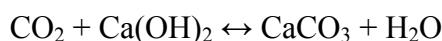


Slika - Shema uređaja za odstranjivanje gasova iz vode (deaeratora) kombinovanog tipa: 1-deaeraciona kolona; 2-sabirni sud prečišćene vode; 3-pokazivač nivoa; 4-manometar; 5-hidraulički zaptivač; 6-razdelnik vode; 7,8-perforirane posude (tanjiri); 9-razdelnici pare; 10,12-oduška; 11-hladnjak; 13,18-dovod napojne vode i pare za grejanje; 14-izlaz nekondezovanih gasova; 15-punjenje hidrozatvarača; 16-preliv hidrozatvarača; 17-preliv prečišćene vode.

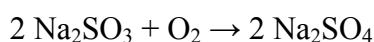
Hemijski postupci

Hemijski postupci za udaljavanje gasova iz vode odnose se uglavnom na štetne gasove CO₂ i O₂.

Ugljendioksid se odstranjuje obično taložnim hemijskim procesima delovanjem kreča u uslovima brze dekarbonizacije:



Odstranjivanje kiseonika hemijskim putem vrši se natrijum-sulfitom i hidrazinom. Princip se zasniva na dodavanju vodi natrijum-sulfita, soli sumporaste kiseline, pri čemu nastaje reakcija:

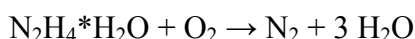


Najbolji rezultati postižu se na temperaturi višoj od 80 °C za vreme od 0,5-1 h, kod voda čiji je pH oko 7.

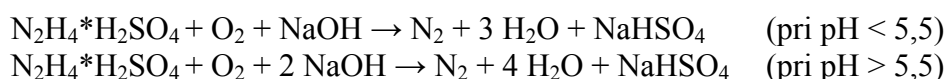
Reakcija vezivanja kiseonika sulfitom je relativno dugotrajna. Potpuno odstranjivanje kiseonika iz vode i u uslovima povišenih temperatura i pri višku sulfita (u odnosu na teorijski potrebnu) traje više od 30 minuta. Vezivanje kiseonika sa Na₂SO₃ je u odnosu 1:8, odnosno 1 kg O₂ zahteva 8 kg Na₂SO₃ (iz stehiometrijske jednačine), što povećava koncentraciju soli u vodi. Takođe, iznad temperature od 275 °C dolazi do izdvajanja SO₂ pa se pH vrednost smanjuje, a mogućnost korodivnog delovanja raste.

Najviše korišćeni reagensi za odstranjivanje kiseonika iz vode su na bazi hidrazina: hidrazin-hidrat (N₂H₄*H₂O) (0,5 %) i hidrazin-sulfat (N₂H₄*H₂SO₄).

Reakcija između hidrazin-hidrat (N₂H₄*H₂O) i kiseonika se odvija prema jednačini:



a između hidrazin-sulfata (N₂H₄*H₂SO₄) i kiseonika prema:



Brzina ovih reakcija zavisi od viška hidrazina, početne koncentracije kiseonika, temperature i pH vrednosti sredine.

Za razliku od natrijum-sulfita, koji se troši daleko više od kiseonika, hidrazin se troši u istoj količini kao i kiseonik. Primena hidrazina je povoljnija nego natrijum-sulfita, jer pored vezivanja kiseonika deluje alkalno.

Rastvoreni gasovi u vodi, a naročito kiseonik, mogu se izdvojiti i primenom jako kiselih jonoizmenjivačkih smola. Količina kiseonika u vodi može se smanjiti na svega $0,001 \text{ mg/dm}^3$.

PREČIŠĆAVANJE VODE OD RASTVORENIH PRIMESA

Odstranjivanje rastvorenih soli

Odstranjivanje rastvorenih soli iz vode može se vršiti u cilju njihovog delimičnog ili potpunog odstranjivanja.

Termički postupak

Termički postupak se koristi za *delimično odstranjivanje rastvorenih soli* iz vode i to onih soli koje čine *privremenu tvrdoću*. Zagrevanjem vode u isparivaču dolazi do raspadanja bikarbonata, a delimično se smanjuje i količina izdvojenih gasova. Pored toga što se sadržaj soli može osetno smanjiti, prednost ovog postupka je i što nije potrebno dodavati nikakvo hemijsko sredstvo.

Hemijski postupak

Hemijska priprema vode podrazumeva ili dodavanje hemijskih supstanci ili filtriranje kroz ispunu hemijski aktivnih supstanci što za posledicu ima promenu sastava rastvorenih primesa u vodi. Prema načinu ostvarenja procesa razlikuju se taložni postupci i postupci jonske izmene

Izdvajanje *rastvorenih soli* iz vode je poznato kao *omekšavanje vode*. Omekšavanje vode se sprovodi na dva osnovna načina:

- hemijskim sredstvima (taloženjem)
- korišćenjem jono-izmenjivačkih smola.

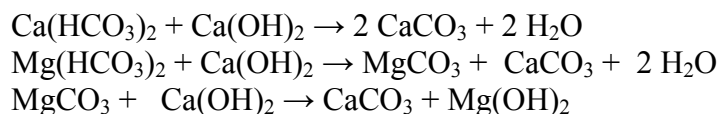
Taložni hemijski postupci

Taložni postupci su postupci kod kojih se delovanjem određene hemijske supstance na rastvorene soli u vodi stvaraju praktično nerastvorna jedinjenja veće gustine od vode koja se talože. Takve supstance su kalcijum-hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ - gašeni kreč), natrijum-hidroksid (NaOH), natrijum-karbonat (Na_2CO_3 - kalcinisana soda), trinatrijum-fosfat (Na_3PO_4), barijum-hidroksid ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) ili barijum-karbonat (BaCO_3). Primenom postupaka jonske izmene ranije uobičajni postupci taloženja su potpuno potisnuti.

Postupak omekšavanja vode hemijskim taloženjem se temelji na provođenju rastvorljivih soli kalcijuma i magnezijuma u nerastvorljive soli kao što su kalcijum-karbonat i magnezijum-hidroksid. Ovi nerastvorni talozi se izdvajaju iz vode taloženjem ili filtriranjem. Ukoliko se izdvajaju samo soli karbonatne tvrdoće (*dekarbonizacija*) onda se govori o *delimičnom omekšavanju vode*. Ako se uklanjaju soli karbonatne i nekarbonatne tvrdoće onda se govori o potpunom omekšavanju vode.

U savremenim hemijskim postupcima pripreme vode upotrebljava se samo kreč. Pošto se krečom odstranjuju samo soli koje čine karbonatnu tvrdoću, postupak se naziva *dekarbonizacija*.

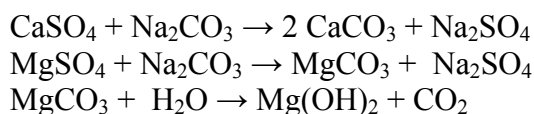
Gašenim krečom ("krečnim mlekom") deluje se na bikarbonate kalcijuma i magnezijuma prema sledećim reakcijama:



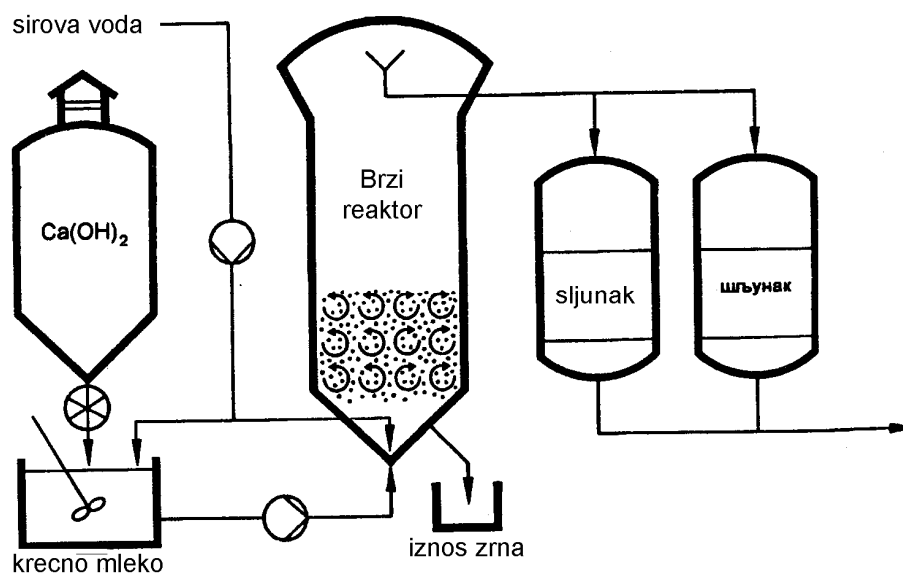
ili sumarno za zadane reakcije



Nastali kalcijum-karbonat i magnezijum-hidroksid, kao teško, kao teško rastvorljive materije se talože, a preostale soli se odstranjuju delovanjem sode (Na_2CO_3):



Danas se za *omekšavanje* vode koriste postupak tzv. *brze dekarbonizacije*. Shema uređaja za brzu dekarbonizaciju data je na slici 10. U ovom postupku se krečno mleko propušta kroz tzv. fluidizovani sloj, čiju ispunu čine čestice kalcijum-karbonata, znači ispuna pri dekarbonizaciji je aktivna. Nastali kalcijum-karbonat u kristalnom obliku se taloži na površini čestica ispune. Prečnik čestica ispune se zato povećava. Kao ispuna služe čestice CaCO_3 iz procesa dekarbonizacije. Kritična veličina čestica ispune je 2 mm. Iznad ove vrednosti se osetno smanjuje reaktivnost ispune.



Slika - Shema uređaja za brzu dekarbonizaciju.

Iz uređaja za "gašenje" kreča, koji je izveden u obliku vertikalnog cilindričnog suda sa koničnim dnom "krečno mleko" dovodi se u reaktor sličnog oblika na čijem se gornjem delu nalazi otvor za odvođenje omekšale vode. Najveći deo nastalih karbonata nastalih navedenim

reakcijama taloži se kao mulj na dnu reaktora i povremeno ispušta. Zaostale čestice, zajedno sa omekšalom vodom propuštaju se kroz filter.

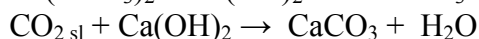
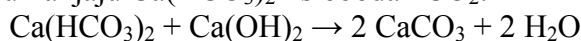
Optimalni rezultati dobijaju se sa vodom čija je temperatura u granicama od 8-30 °C, tvrdoća vode posle omekšavanja se kreće u opsegu 2-3 nemačka stepena

Dekarbonizacija vode se sprovodi kao prva faza omekšavanja vode pre demineralizacije pomoću jonsko-izmenjivačkih smola.

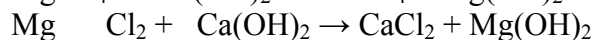
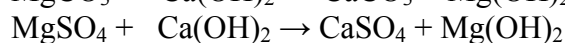
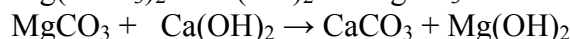
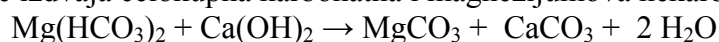
Kao hemijska sredstva za taloženje kod omekšavanja vode koriste se kreč ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), u obliku krečne vode ili krečnog mleka, soda (Na_2CO_3), natrijum-hidroksid (NaOH) i soli fosforne kiseline (Na_3PO_4 , Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ i dr).

Kod korišćenja kreča, kao zasićenog vodenog rastvora (krečno mleko) dolazi do uklanjanja iz vode bikarbonata i slobodne ugljene kiseline koji se talože u vidu kalcijum-karbonata i kao talog izdvajaju iz vode. Postupak sa krečom se koristi za delimično omekšavanje vode na hladno (oko 20 °C) ili na toplo (oko 80 °C).

Na hladno se uklanjaju $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ i slobodan CO_2 :



Kod temperature od oko 80 °C moguće je ovim postupkom izdvojiti i magnezijumova jedinjenja (na toplo se izdvaja celokupna karbonatna i magnezijumova nekarbonatna tvrdoća):



Pošto se za uklanjanje magnezijuma mora upotrebiti višak kreča, to se omekšana voda koja ima višak jona Ca^{2+} i OH^- podvrgava rekarbonizaciji, tj. uvođenju CO_2 , kojim se ovi prevode u CaCO_3 i CO_3^{2-} . Tretmanom vode sa krečom dobija se delimično omekšana voda koja se može koristiti u rashladnim uređajima, u prehrambenoj industriji i drugo.

Uređaj za omekšavanje vode uz pomoć kreča sastoji se iz sledećih delova:

- razdeljivača sirove vode,
- posude za gašenje kreča,
- posude pod pritiskom,
- zasićivača krečne vode,
- reaktora,
- peščanog filtera.

Razdeljivač sirove vode deli vodu u jedan glavni tok koji ulazi u reaktor i na 2-3 manja toka koji prolaze kroz posude za dodavanje hemikalija.

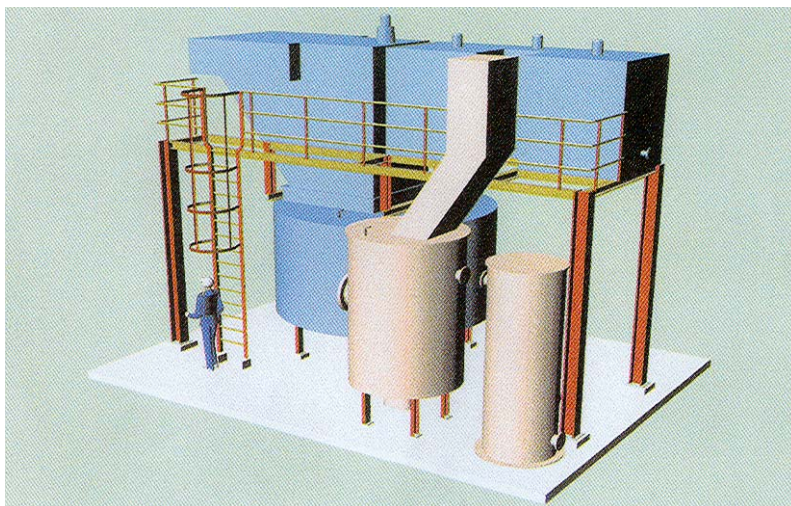
Posude za gašenje kreča se koriste za gašenje kreča sa vodom ukoliko se koristi negašeni komadni kreč. Priprema se krečno mleko koje se ispušta u posudu pod pritiskom preko rešetke za otklanjanje komadastih materijala negašenog kreča ili krečnjaka. Posuda pod pritiskom služi za izluživanje krečnog mleka i uklanjanje nerazmuljenog taloga i sitnog peska.

Zasićivač krečne vode služi za izbistravanje zasićene krečne vode. Izbistrena krečna voda se dalje koristi u postupku omekšavanja vode.

Reaktor služi za odvijanje hemijskih procesa taloženja i za izdvajanje taloga soli koje nastaju u procesu omekšavanja vode. Za izdvajanje nastalog taloga koriste se filterski uređaji različite konstrukcije.

Priprema krečna vode

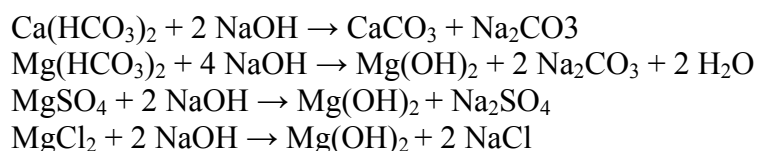
Krečna voda je korišćena kada se zahteva da čisti alkalni medijum bude skoro oslobođen od čvrstih čestica. Aproximativna koncentracija proizvedene krečne vode je 1,0 - 1,3 g/l $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Očekuje se niska zamućenost, to je takođe moguće postići direktnim uvođenjem u čistu vodu.



Slika - Ilustracija postrojenja za oripremu krečne vode kapaciteta 50 m³/h

Omekšavanje vode sa sodom (Na_2CO_3) se primenjuje kada se želi potpuno omekšavanje vode. Soda reaguje sa solima kalcijuma nekarbonatne (stalne) tvrdoće, pa se i koristi nakon dekarbonizacije vode.

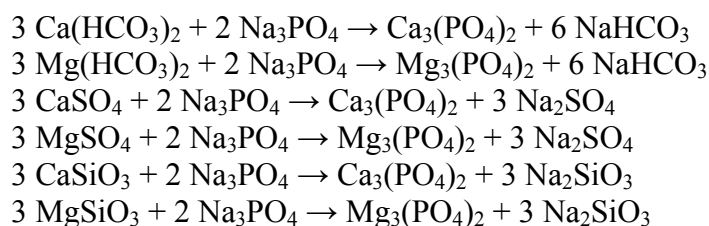
Postupak sa natrijum-hidroksidom se koristi kada je zbir karbonatne tvrdoće i sadržaj slobodnog CO_2 približno jednak nekarbonatnoj tvrdoći. Natrijum-hidroksid reaguje sa karbonatnom i magnezijumovom tvrdoćom:



Nastao Na_2CO_3 reaguje sa ekvivalentnom količinom nekarbonatne tvrdoće. Ako bi karbonatna tvrdoća bila veća od nekarbonatne nastala bi veća količina sode koja bi zbog hidrolize oslobodila korozivni CO_2 .

Natrijum-hidroksid se koristi u kombinaciji sa sodom (ako je visoka nekarbonatna i magnezijumova tvrdoća i mala karbonatna tvrdoća) ili sa krečom (kada je $KT > NT$ i visoka magnezijumova tvrdoća).

Trinatrijum-fosfat se koristi za omekšavanje vode taloženjem soli iz vode, najčešće za uklanjanje ostatka soli nakon upotrebe nekog od jeftinijih sredstava za omekšavanje vode. Primenom postupka fosfatizacije dobija se voda izuzetno male tvrdoće, a kao rezultat postupka nastaju fosfati kalcijuma i magnezijuma, teže rastvorljivi u vodi od karbonata. U ovom postupku deluje se trinatrijum-fosfatom na sve soli kalcijuma i magnezijuma u vodi:



Kod vode malog alkaliteta i na povišenim temperaturama dolazi do transformacije fosfata i stvaranja hidroksi lapatita, koji je teže rastvorljiv i od samih fosfata. U povoljnim slučajevima ovim postupkom može se voda svesti na tvrdoću od 0,05 nemačkih stepeni tvrdoće. Od svih taložnih postupaka, postupak fosfatizacije jedini u potpunosti sprečava pojavu i stvaranje silikatnog kamenca i njegovoj široj primeni smeta jedino visoka cena trinatrijum-fosfata.

Kod manjih kotlovskih postrojenja trinatrijum-fosfat može se primenjivati neposredno u samom kotlu s obzirom, da, ne samo što taloži soli kalcijuma i magnezijuma, već reaguje i napada već stvoreni kotlovski kamenac. Nastali mulj odstranjuje se lako.

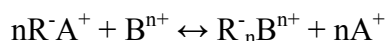
Danas su u upotrebi i polifosfati za omekšavanje vode.

JONSKA IZMENA

Jono-izmenjivačke smole se koriste za tretman vode da bi se postigao veći kvalitet vode, odnosno da bi se provela potpuna demineralizacija vode. Tako pripremljene vode se koriste kod velikih kotlovskih postrojenja i kotlova sa visokim pritiskom. Tehnološki postupak kod korišćenja jonskih izmenjivača je jednostavan, provodi se na hladnom, nije osetljiv na promene kvaliteta i protoka vode koja se prečišćava, nema problema sa odlaganjem mulja, i zbog svih tih prednosti, menjači-jona u tehnologiji vode potiskuju taložna sredstva.

Jonska izmena, osnove i primena kod tretmana voda

Jonska izmena se definiše kao proces gde se uz pomoć nerastvorne supstance odstranjuju pozitivno ili negativno naelektrisani joni iz elektrolitičkih rastvora uz otpuštanje u rastvor jona sličnog naboja u ekvivalentnoj količini. Pri tom ne dolazi do strukturne promene jonoizmenjivačke materije (smole). Izmena jona, do postizanja odgovarajuće ravnoteže, je brza. Izmena jona se može, uprošćeno, prikazati na sleći način:



R - anjonska grupa u jon-izmenjivačkoj smoli

A⁺ i Bⁿ⁺ - joni u rastvoru

Afinitet jednog jona prema jonoizmenjivačkoj smoli može se generalizovati preko sledećih pravila:

- joni visoke valencije su sa prednostima nad jonima niske valencije, što znači da se reakcije izmene jona povećavaju sa povećanjem valencije (Fe³⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ ili PO₄³⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻). Ova prednost se povećava sa smanjenjem ukupne koncentracije jona u rastvoru,
- za jone koji imaju istu valenciju reakcija izmene jona se povećava sa smanjenjem hidratacionog radijusa jona i povećanjem atomskog broja (Ca²⁺ > Mg²⁺ > Be²⁺ ili K⁺ > Na⁺ > Li⁺),
- za rastvore sa visokom ukupnom koncentracijom jona izmena jona ne podleže opštem pravilu, već je često suprotno tom pravilu.

Jono-izmenjivačke smole se proizvode od polimernih materijala, najčešće od polistirenskih lanaca međusobno vezanih sa divinilbenzenom sa rastvorljivim jonskim funkcionalnim grupama koje su vezane na polimerni lanac. Ukupan broj i vrsta funkcionalnih grupa definiše kapacitet jono-izmenjivačke smole i selektivnost prema pojedinim jonima. U praksi su ove smole u vidu granula sfernog ili nekog drugog oblika.

Jonoizmenjivačke smole se mogu podeliti u sledeće grupe:

- a) katjonske jonoizmenjivačke smole
 - jako kiselinske izmenjive smole (JKIS)
 - slabo kiselinski izmenjive smole (SKIS)
- b) anjonske jonoizmenjivačke smole
 - jako bazne izmenjive smole (JBIS)
 - slabo bazne izmenjive smole (SBIS).

Jako kiselinski izmenjive smole sadrže funkcionalne grupe koje su izvedene iz jakih kiselina (kao H_2SO_4). Njihov stepen jonizacije je analogan stepenu jonizacije jakih kiselina što omogućava disocijaciju vodonikovog jona i njegovu mogućnost zamene u širokom pH području. Slabo kisele izmenjive smole sadrže funkcionalne grupe izvedene iz slabih kiselina (najčešće karboksilne i fenolne kiseline). Ove jonoizmenjivačke smole su primenjive u uskom pH području.

Jako bazne jono-izmenjivačke smole sadrže funkcionalne grupe, uglavnom kvaterne amonijum grupe, dok slabo bazne jono-izmenjivačke smole sadrže primarne, sekundarne ili tercijarne amine kao funkcionalnu grupu. Područje primene jako baznih jono-izmenjivačkih smola je u širokom pH području, dok je područje primene slabo baznih jono-izmenjivačkih smola u uskom pH području.

Proces jonske izmene nastaje propuštanjem vode kroz sloj menjača, pri čemu se određeni joni iz rastvora vezuju za menjač, a iz menjača prelaze u rastvor.

Da bi neka jonoizmenjivačka smola bila efikasna mora u svojoj strukturi sadržavati izmenjive jone, mora biti nerastvorljiva u vodi i mora obezbediti dovoljno prostora u svojoj poroznoj strukturi za slobodni prolaz jona u polimer i iz polimera.

Jonoizmenjivač i proces izmene karakterišu sledeće veličine:

Kapacitet jono-izmenjivačkih smola može se definisati kao sposobnost mase izmenjivača da svoje jone izmenjuje sa u vodi prisutnim jonima. Ovo je osnovna karakteristika jono-izmenjivačkih smola od koje zavisi efekat čišćenja vode i cena prečišćavanja.

Operativni kapacitet jonoizmenjivačke smole je mera stvarnog korisnog kapaciteta smole za izmenu jona iz rastvora.

Efekti izmene jona zavise od vremena koje je potrebno da voda bude u kontaktu sa jonskom masom. To se izražava kao specifično opterećenje (zapreminska opterećenost), a odnosi se na zapreminu vode koja prolazi kroz jedinicu zapremine jono-izmenjivača u jedinici vremena.

Stopa regeneracije data je masom reaktanta potrebnom da se regeneriše jedinica zapremine menjača jona,

Gubitak jona, predstavlja odnos koncentracije jona koji se izmenjuje posle i pre tretiranja iskazan u %,

Habanje, opisuje mehaničko trošenje zrna izmenjivača tokom njegovog rada.

Regeneracija jono-izmenjivačkih smola vraća smolu u njeno prvobitno stanje i omogućava njeno ponovno korišćenje za izmenu jona, odnosno prečišćavanje voda. Regeneracija jono-izmenjivača se vrši laganim propuštanjem rastvora soli kroz njega i ispiranjem viška soli vodom. Za regeneraciju katjonskih jonoizmenjivačkih smola koriste se mineralne kiseline, dok se za regeneraciju anjonskih jonoizmenjivačkih smola koriste alkalije. Za potpunu regeneraciju jono-izmenjivačkih smola potrebno je ponekada koristiti veliku količinu sredstva za regeneraciju tako da se u praksi regeneracija provodi samo do određenog kapaciteta smole,

što se definiše kao nivo regeneracije. Potrebne količine sredstva za regeneraciju u praksi su većinom veće od teoretski potrebnih.



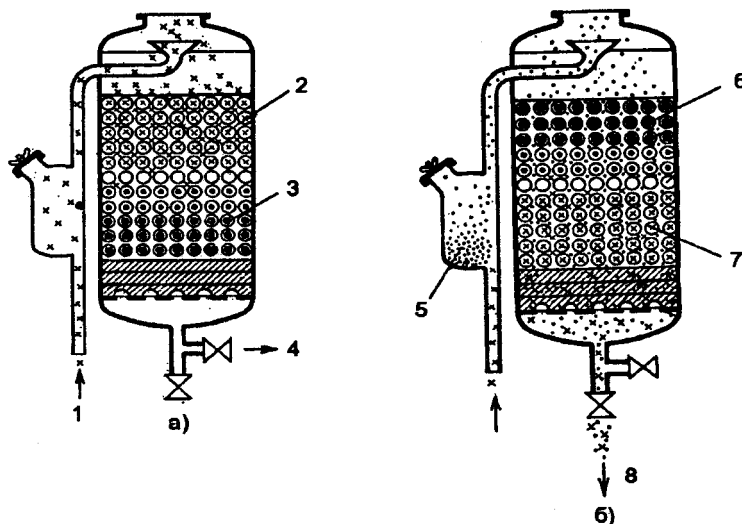
Slika - Izgled jonoizmenjivačke kolone

Kolone sa jono-izmenjivačkim smolama trebaju biti tako konstruisane da ulazna voda bude ravnomerno raspoređena preko cele jono-izmenjivačke mase i da se obezbedi ujednačeno proticanje vode kroz kolonu. Zato je važan odnos između visine stuba jono-izmenjivačke mase i prečnika stuba koji treba da je 2:1. Protočna brzina vode treba da se kreće od 10-35 m/h.

Visina sloja jonnske mase je obično 0,5-3 m. Ukupna visina kolone se dimenzioniše da je 100 % viša od visne sloja jono-izmenjivačke mase.

Jonoizmenjivačke smole se koriste kod procesa pripreme vode:

- za omekšavanje vode (uklanjanje soli kalcijuma i magnezijuma),
- za dekarbonizaciju vode,
- za omekšavanje vode nakon dekarbonizacije, i
- za potpunu demineralizaciju vode.



Slika - (a) Aktivni rad Na-jonoizmenjivačke smole i (b) njegova regeneracija kuhinjskom solju.

- 1 - tvrda voda,
- 2 - zasićena masa jonita (neradna masa),
- 3 - aktivna masa jonita,
- 4 - omekšana voda,
- 5 - kuhinjska so NaCl,
- 6 - regenerisana masa jonita,
- 7 - neregnerisana masa jonita,
- 8 - upotrebljeni rastvor NaCl za regeneraciju i soli Ca i Mg.

Dekarbonizacija vode u jonoizmenjivačima

Dekarbonizacija vode je postupak kojim se iz vode uklanja karbonatna tvrdoća. Radi se o jonoizmenjivačkom uređaju punjenom specijalnom slabo-kiselom jonoizmenjivačkom masom, koja na sebe vezuje jone kalcijuma i magnezijuma iz soli karbonatne tvrdoće i zamenjuje ih jonom vodonika. Tako umesto soli karbonatne tvrdoće nastaje ekvivalentna količina ugljene kiseline koja se, ako smeta, može odvezdušiti. Soli nekarbonatne tvrdoće pri tome prolaze neizmenjene. Jonoizmenjivačka masa se nakon iscrpljivanja svog kapaciteta regeneriše propuštanjem rastvora slabe sone kiseline (HCl), posle čega je ponovo spremna za rad. Zbog problema koje soli karbonatne tvrdoće izazivaju u proizvodnji gaziranih osvežavajućih napitaka (otežano gaziranje, smanjenje kiselosti zbog reakcije sa voćnim kiselinama, smanjenje slasti zbog reakcije sa šećerima i nastajanjima kalcijum saharata, pojava zamucenja zbog reakcije sa pektinima itd.) dekarbonizacija je idealna priprema vode pri proizvodnji gaziranih osvežavajućih napitaka ako u vodi prevladava karbonatna tvrdoća, a što je najčešće slučaj.

Jono-izmenjivačke smole se koriste za dekarbonizaciju vode (delimično omekšavanje), što se provodi uz pomoć slabo kiselog katjonskog izmenjivača (kisela izmena). Pri tom se iz vode eliminišu bikarbonati dok soli mineralnih kiselina (nekarbonatna tvrdoća) ostaju nepromenjene. Ovom izmenom se dobija voda čija zaostala tvrdoća se sastoji od nekarbonatne tvrdoće. Ovaj postupak se uspešno koristi za:

- dekarbonizaciju vode za direktnu upotrebu (rashladne uređaje u industriji gde je potrebna dekarbonizovana tehnološka voda),
- za dekarbonizaciju uz naknadno mekšanje vode,
- za dekarbonizaciju u okviru postrojenja za omekšanje vode, i
- kao pufer-filter za korekciju pH vrednosti nakon demineralizacije vode.

Omekšavanje vode u jonoizmenjivačima

Danas se omekšavanje vode isključivo koriste jonoizmenjivački filteri, koji se sastoje od jonoizmenjivačke kolone punjene određenom količinom jonoizmenjivačke mase koja vezuje na sebe jone kalcijuma i magnezijuma, a zamenjuje ih jonom natrijuma, čime se uklanja tvrdoća vode. Kada se masa zasiti, propuštanjem određene količine rastvora kuhinjske soli (NaCl) ona se ponovo prevodi u aktivnu formu i ponovo je spremna za omekšavanje određene količine vode. Omekšivači se koriste za pripremu vode za kotlove niskih pritisaka, kod različitih grejnih i rashladnih sistema, kod raznih postupaka pranja ambalaže, u bolnicama, kasarnama, hotelima za pranje veša, kao i svim slučajevima u kojima smeta povećana tvrdoća vode.

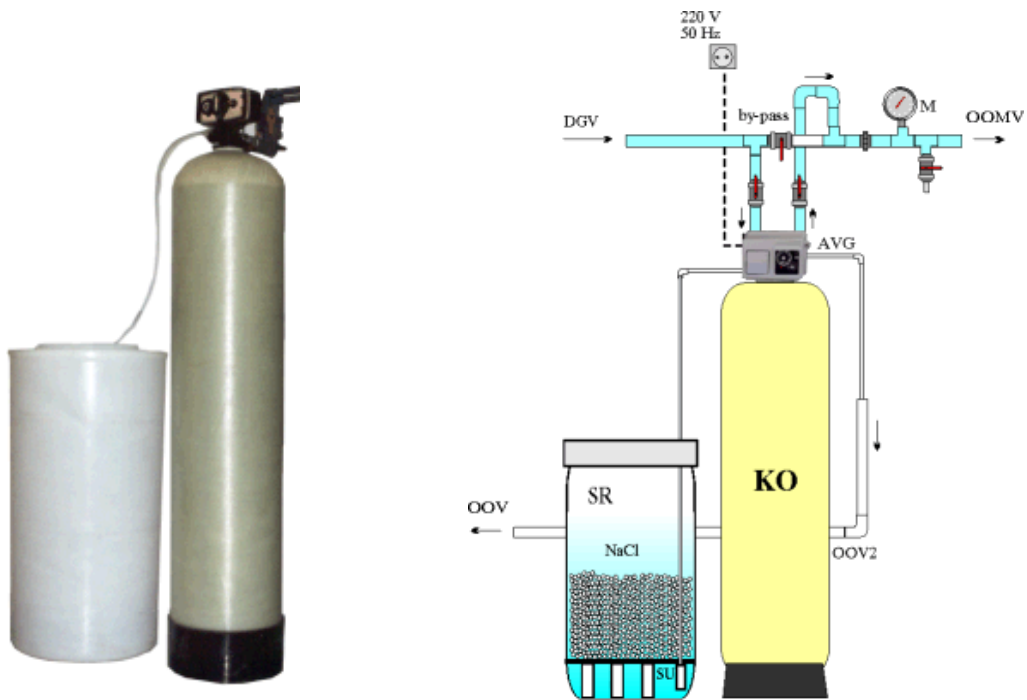
Omekšivači se koriste za pripremu vode za kotlove niskih pritisaka, kod različitih grejnih i rashladnih sistema, kod raznih postupaka pranja ambalaže, u bolnicama, kasarnama, hotelima za pranje veša, kao i svim slučajevima u kojima smeta povećana tvrdoća vode.

Voda u prirodi (u manjoj meri komunalna voda) sadrži rastvorene materije u različitim koncentracijama. Priprema vode postupkom jonske izmene sprovodi se uvek gde se zahteva potpuno ili delimično omekšavanje vode ili gde naslage kamenca mogu napraviti štetu na procesnoj opremi. U okviru postupka omekšavanja vode uklanjaju se kalcijum i magnezijum čiji karbonati i sulfati čine tvrdoću vode.

U zrcima katjonske, jako kisele izmenjivačke mase (smole), obavlja se zamena jona kalcijuma i magnezijuma jonima natrijuma. Proizvodnjom omekšane vode i ciklusom regeneracije, koji je predstavljen sledećom slikom, upravlja automatska ventilna glava, proizvođača Fleck, Francuska.

Zasićena jonoizmenjivačka smola se protivstrujno regeneriše rastvorom natrijum-hlorida (NaCl) pri čemu se joni kalcijuma i magnezijuma ponovo zamenjuju jonima natrijuma iz rastvora za regeneraciju. Nakon ispiranja napojnom vodom, omekšivač je ponovo spreman za rad.

Automatska ventilna glava koja kontroliše rad omekšivača vode može odrediti početak regeneracije na vremenskoj osnovi (npr. svaki drugi dan) ili na bazi izmerene zapremine proizvedene omekšane vode (npr. posle 20 m³), regeneracija koja traje oko tri sata. Regeneracija se može i ručno pokrenuti u bilo koje doba dana. Automatska ventilna glava koja ima mogućnost volumetrijskog određivanja trenutka kada je potrebno izvršiti regeneraciju je bolje rešenje pošto se regeneracija vrši baš kada je to i potrebno i time se postižu značajne uštede u količi sredstva za regeneraciju (tabletna NaCl), a produžava se i životni vek jonoizmenjivačke smole.



- DGV - Dovod gradske vode
 AVG - Automatska ventilska glava
 OOMV - Odvod omekšane vode
 OOV - Odvod otpadne vode
 KO - Katjonski omekšivač
 SR - Sud za reagens

Slika . Jonoizmenjivački filtri za omekšavanje

Dvostruki jonski omekšivač vode kontinualno proizvodi omekšanu vodu. U duplex verziji koriste se dve identične kolone od kojih je jedna u radu, a druga u postupku regeneracije ili čekanju spremna za rad (*stand-by*).

Protok vode kroz kolonu koja je u radu se meri i kada se dostigne unapred definisana količina proizvedene omekšane vode, automatska ventilska glava (npr. Fleck 9500) prebacuje i pušta u rad drugu kolonu.

Zasićena jonska masa u prvoj koloni se regeneriše i ostaje u stanju čekanja sve dok se druga kolona ne zasiti, kada automatska ventilska glava ponovo vraća proces na prvu kolonu.

Dvostruki omekšivač je idealan za potrošače s kontinualnim potrebom za omekšanom vodom ili je protok vode promenljiv (pa nije zahvalno određivati vremenski početak regeneracije).

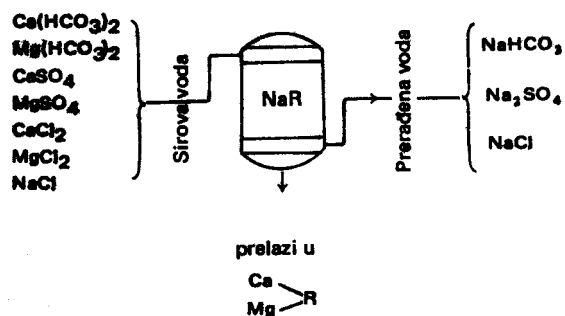
Ovaj omekšivač se dimenzioniše tako da se vrši jedna regeneracija dnevno po koloni, ali ako se to zahteva moguće je svaku kolonu češće regenerisati.



Slika - Automatska duplex verzija uređaja za omekšavanje vode.

Upotreba jono-izmenjivačkih smola za omekšavanje vode ima prednosti nad omekšavanjem vode uz pomoć precipitacije sa hemijskim sredstvima u slučajevima:

- kada je sirova voda sa niskim stepenom obojenja i zamućenosti,
- kada je u pitanju nekarbonatna tvrdoća vode,
- kod variranja tvrdoće vode.



Slika - Shema postrojenja za omekšavanje vode na katjonskom menjaču jona u obliku "natrijumove soli"

Omekšavanje vode hemijskom precipitacijom ima prednosti:

- kada je sirova voda sa visokom obojenošću i zamućenošću,
- kada je niska nekarbonatna tvrdoća vode (visoka alkalna tvrdoća)

DEMINERALIZACIJA VODE

Često se za potrebe medicinskih, farmaceutskih, laboratorijskih, kozmetičkih ili drugih tehnoloških potreba, zahteva u hemijskom smislu apsolutno čista voda, oslobođena svih rastvorenih soli. Takva voda se dobija postupkom demineralizacije. Demineralizator je uređaj koji se u zavisnosti od kvaliteta napojne vode, sastoji od dve ili više serijskih spojenih jonoizmenjivačkih kolona sa različitim ispunama. Prolaskom vode kroz ovaj sistem voda se oslobađa svih rastvorenih soli. Jonoizmenjivačke mase u ovim kolonama se regenerišu rastvorima sone kiseline (HCl) i natrijum hidroksida (NaOH). Demineralizatori služe za proizvodnju demineralizovane vode specifične elektroprovodljivosti od 0 do 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Demineralizovana voda, dobijena pomoću ovih uređaja, koristiti se :

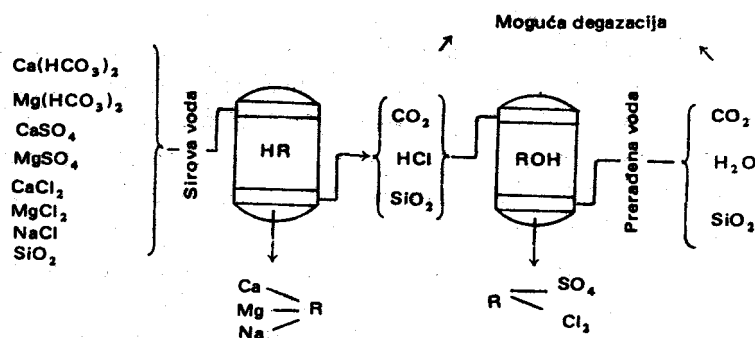
- u proizvodnji kućne hemije (šamponi, deterdženti, ...)
- u proizvodnji napitataka (sokova, gaziranih pića)
- u laboratorijama za pravljenje farmaceutskih rastvora i preparata, testiranja
- u akumulatorima, peglama, hladnjacima, za fino pranje stakla, ...

Kao napojna voda koristi se komunalna voda za piće i zbog drastične razlike u kvalitetu komunalne vode od opštine do opštine neophodno je da se kupac konsultuje za optimalno rešenje u zavisnosti od parametara kvaliteta napojne vode.

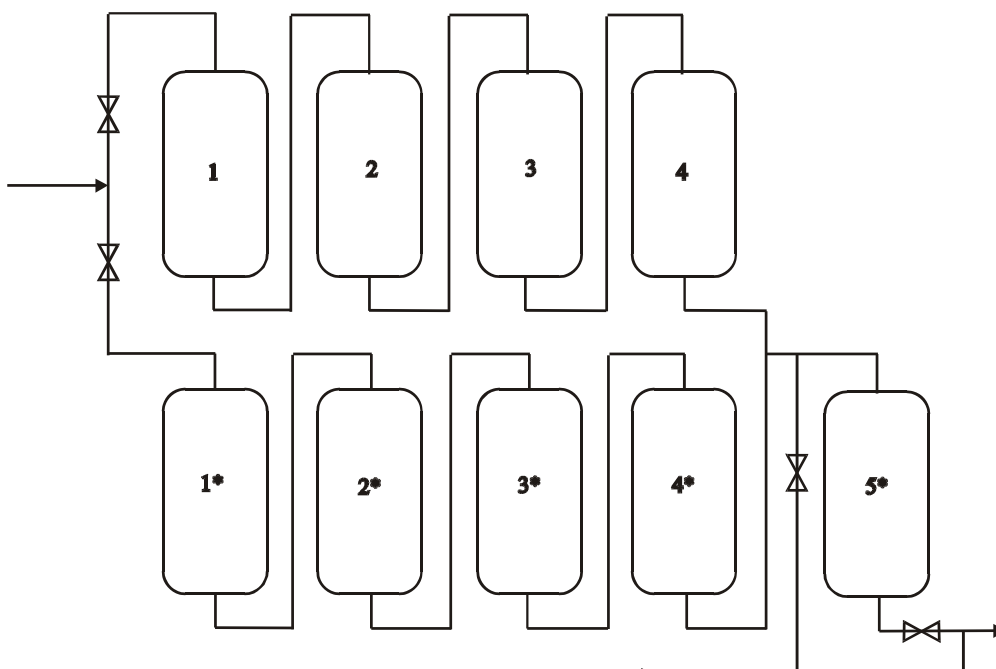
Demineralizacija vode je postupak uklanjanja svih prisutnih soli u vodi. Postupak se provodi korišćenjem katjonskih i anjonskih jono-izmenjivačkih smola.

Demineralizacija se provodi uz upotrebu dva jono-izmenjivača:

- jako kiseli katjonski jono-izmenjivač koji soli cepa u odgovarajuće kiseline, i
- anjonski jono-izmenjivač koji veže mineralne kiseline.



Slika - Shema demineralizacije vode.



Slika - Uproščena shema postrojenja za demineralizaciju vode:

- 1, 1* - jako kiseli katjonski,
- 2, 2* - slabo kiseli katjonski,
- 3, 3* - slabo bazni anjonski,
- 4, 4* - jako bazni anjonski,
- 5 - mešoviti filter.

U vodi nakon tretmana zaostaje samo ugljena i silicijumova kiselina. Ugljena kiselina se otpari, a silicijumova kiselina se veže uz pomoć jako baznog anjonskog jono-izmenjivača. Za obezbeđenje potpuno neutralne vode ($\text{pH} = 7$) voda se na kraju prevodi preko slabo kiselog katjonskog jono-izmenjivača. Na kraju procesa prečišćena voda se prevodi preko kolone sa mešanom jono-izmenjivačkom masom koja se sastoji od jako kisele katjonske mase i jako bazne anjonske mase. na takav način se osigurava demineralizacija vode visokog kvaliteta (električna vodljivost ispod $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ i ispod $1 \mu\text{g}/\text{l SiO}_2$).

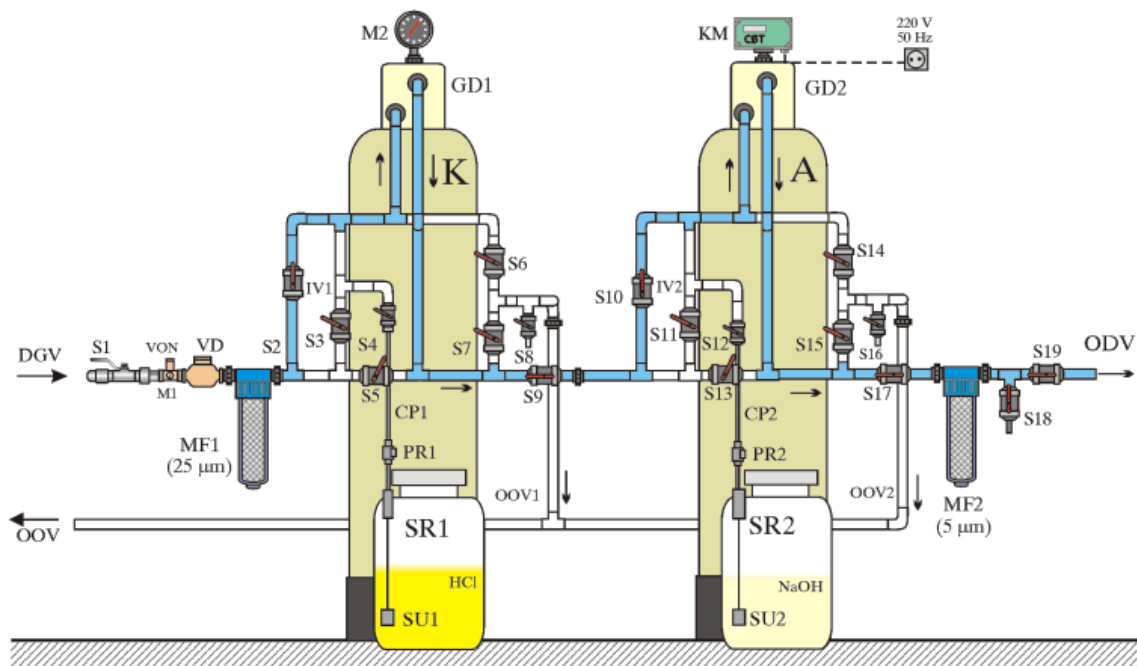


Slika - Automatska protočna postrojenje za pripremu demi vode - jonoizmenjivači

Manuelni demineralizator se u **osnovnoj verziji** sastoji od :

- dve kolone, sačinjenih na bazi polimera, spolja ojačanih unakrsno motanim staklenim vlaknima zatopljenim u epoksidu, koji zadovoljavaju propise za primenu tretmana vode u hemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Kolone su otporne na dejstvo povišenog pritiska (do 10 bara), koroziju i dejstvo kiselina i baza.
- vodomera
- manometra
- mehaničkog predfiltra od 25 μm i izlaznog filtra od 5 μm
- atestiranog procesnog konduktometra
- dva rezervoara od PP, za pripremu rastvora za regeneraciju
- sistem cevovoda i armature od tvrdog PVC
- kuglastih slavina i dva vakuum injektora.

Regeneracija sistema, koja traje oko tri časa vrši se nakon njegovog zasićenja (što se utvrđuje na osnovu pokazivanja konduktometra). Potrebna radna površina za instaliranje uređaja u zavisnosti od tipa je od 3m² do 15m² . Radni prostor mora biti snabdeven i elektičnim priključkom (150 W), odgovarajućim kanalizacionim otvorom i mogućnošću ventilacije (zbog rada sa koncentrovanom kiselinama i bazama). Regulacija rada Uređaja vrši se ručno pomoću sistema kuglastih slavina.



Slika - Tehnološka shema osnovne verzije demineralizatora, manualna izvedba

DGV - dovod gradske vode SR - sud za regeneraciju
 S - slavina kuglasta CP - crevo poliamidno
 VON - ventil za ograničenje nadpritiska SU - sapnica usisna
 M - manometar KM - konduktometar (0 - 50 mS/cm)
 VD - vodomer K - kolona katjonskog jonoizmenjivača
 MF - mehanički filtar A - kolona anjonskog jonoizmenjivača
 GD - glava distribuciona OOV - odvod otpadne vode
 IV - injektor vakumski ODV - odvod demineralizovane vode
 PR - priključak rastavni

Za proizvodnju demineralizovane vode moraju biti otvorene sledeće slavine: S1, S2, S9, S10, S17, S19

Za regeneraciju moraju biti otvorene sledeće slavine:

Kolona K

Protivstrujno ispiranje: S1, S5, S6
 Usisavanje rastvora kiseline HCl : S1, S3, S4, S7
 Istostrujno ispiranje : S1, S2, S7

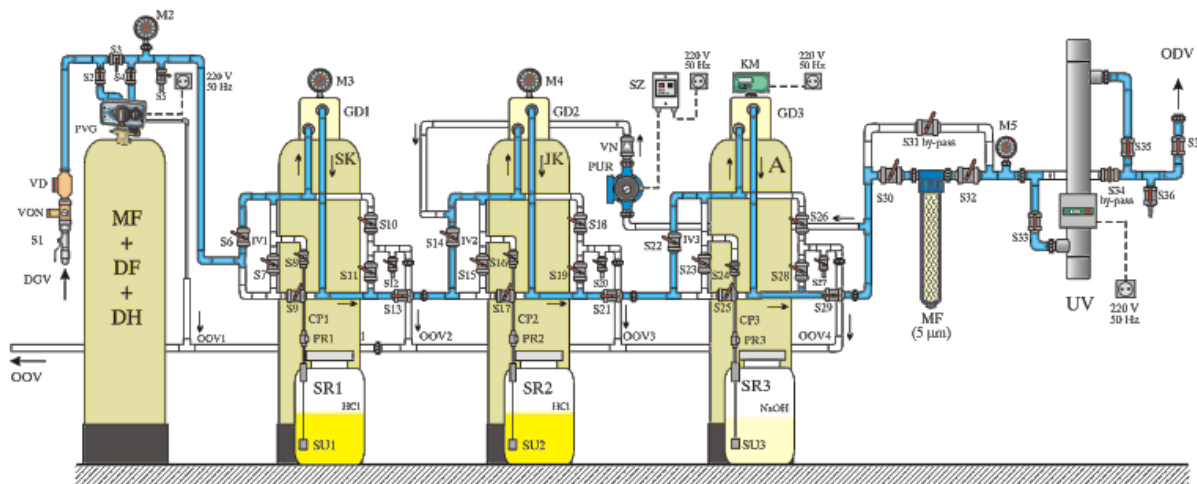
Kolone A

Protivstrujno ispiranje: S1, S2, S9, S13, S14
 Usisavanje rastvora baze NaOH: S1, S2, S9, S11, S12, S15
 Istostrujno ispiranje: S1, S2, S9, S10, S15

Manuelni demineralizator u **proširenoj verziji** sastoji se od osnovne verzije kojem su dodate razne komponente filtracije i separacije kao što su :

- kolonski mehanički filter kojim se iz vode uklanjaju mehaničke nečistoće, gvožđe, mangan i organske komponente uključujući aktivni hlor.
- jonoizmenjivač sa slabokiselom ispunom, kojim se iz vode odstranjuje kalcijumovi i magnezijumovi joni iz bikarbonata.
- recirkulaciona pumpa koja štiti jonoizmenjivačku ispunu od bakteriološke kontaminacije
- mikrofilter, poroziteta 5 μm , koji sprečava prodor nečistoća i delova zrnaca jonoizmenjivača u rezervoar čiste vode.
- UV sterilizator, koji obezbeđuje mikrobiološku ispravnost prečišćene vode.
- druge komponente u zavisnosti od namene filterske jedinice.

Sredstva za regeneraciju su koncentrovana sona kiselina (u prodaji kao 28 - 32 % HCl) i tehnički (ili kvalitetniji ako se demineralizovana voda koristi u farmaceutske ili prehrambene svrhe - purum ili proanalisi) 30% rastvor NaOH. Jonoizmenjivačka ispunu koja se nalazi u kolonama demineralizatora ima radni vek od 3 do 5 godina posle čega se mora zameniti.



Slika - Tehnološka shema jedne od mogućih proširenih verzija demineralizatora

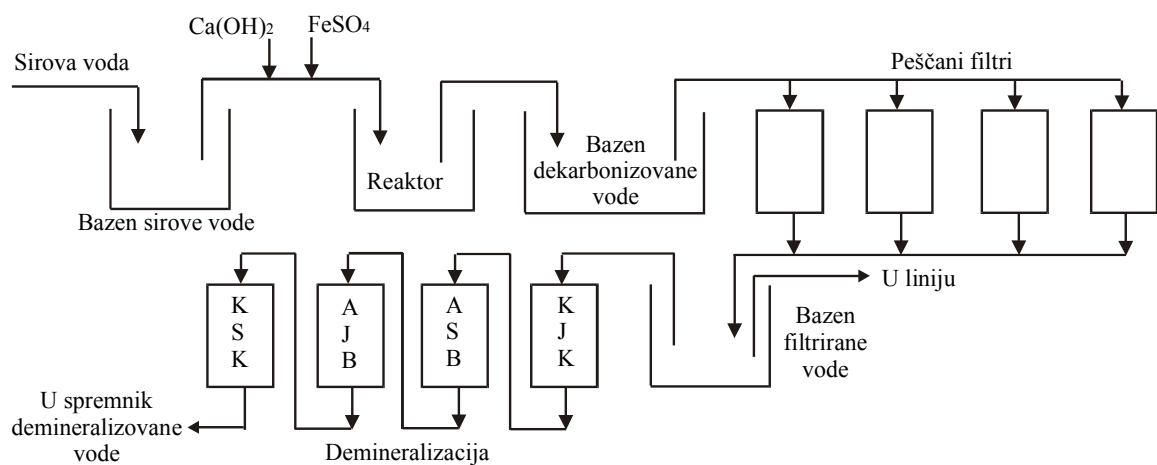
- DGV - dovod gradske vode
 SR - sud za regeneraciju
 S - slavina kuglasta
 CP - crevo poliamidno
 VON - ventil za ograničenje nadpritiska
 SU - sapnica usisna
 M - manometar
 KM - konduktometar (0 - 50 mS/cm)
 VD – vodomer
 SK - kolona katjonskog jonoizmenjivača, slabo kiselog
 MF+DF+DH - mehanički filter, deferizator i dechlorinator
 JK - kolona katjonskog jonoizmenjivača, jako kiselog
 PVG - programska ventilska glava
 A - kolona anjonskog jonoizmenjivača
 GD - glava distribuciona
 UV - UV Sterilizator
 IV - injektor vakumski
 OOV - odvod otpadne vode

PR - priključak rastavni
 ODV - odvod demineralizovane vode



Slika - Izgled jednog montiranog sistema proširene verzije demineralizatora

Shematski prikaz procesa pripreme vode za termoenergetsko postrojenje je dat na slici



Slika- Shematski prikaz procesa pripreme vode za termoenergetsko postrojenje (visoka alkalna tvrdoća)

ADSORPCIJA U PREČIŠĆAVANJU VODA

Adsorpcija je uobičajen postupak izdvajanja organskih supstanci iz vode, a može se definisati kao proces migracije i akumulacije određene supstance iz jedne u drugu fazu, a odvija se na međufaznoj površini. Adsorpcija je, u suštini, površinski fenomen uslovljen razlikom liofilnosti ili liofobnosti rastvorene supstance (*adsorbat*) u odnosu na rastvarač.

Da bi se pravilno razumeli pojmovi koji se sreću u ovoj oblasti, mogu poslužiti sledeće definicije:

Adsorpcija – može biti prenos mase hemijskih supstanci iz tečne faze u čvrstu fazu.

Adsorpcija – hemijska supstanca se vezuje za površinu čvrste faze (glavni mehanizam).

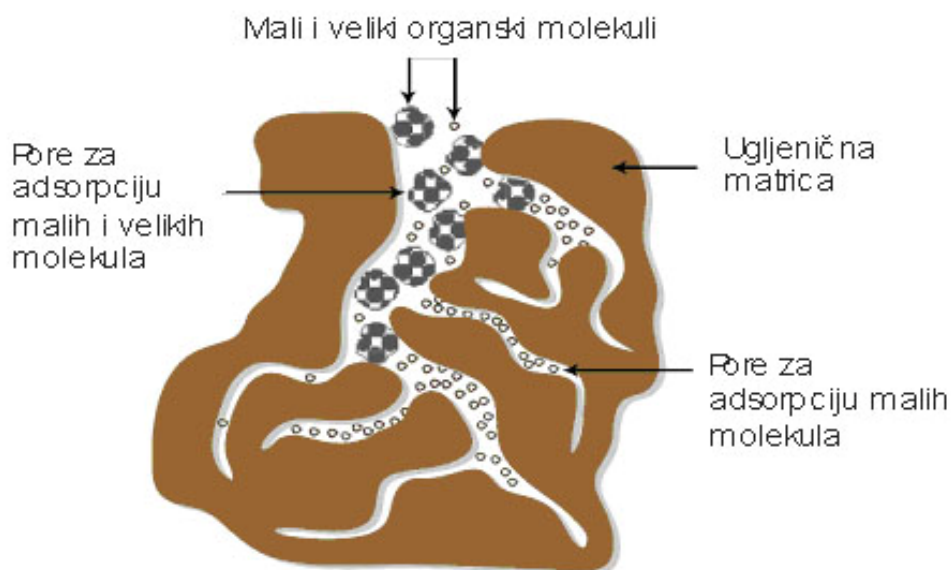
Absorpcija – supstanca prodire u čvrstu fazu, pri čemu nastaje zasićeni rastvor.

Sorpcija – obuhvata oba procesa.

Adsorbens – faza koja adsorbuje.

Adsorbat – faza koju adsorbent adsorbuje (u našem slučaju voda).

U procesu adsorpcije učestvuju Coulone-ove i van der Waals-ove sile, a dominantna sila zavisi od hemijske prirode sistema. Na primer, u sistemu aktivni ugalj – voda karakterističan je mali elektrostatski naboj i u procesu adsorpcije dominantne su van der Waals-ove sile, odnosno, odvija se *fizička adsorpcija*.



Slika - Adsorpcija organskih molekula na aktivnom uglju

Proces adsorpcije se koristi u tretmanu pijaće vode, najčešće za uklanjanje organskih nečistoća i to:

- onih koja daju ukus i miris vodi,
- sintetičkih organskih supstanci,
- obojenih organskih jedinjenja i
- sredstava za dezinfekciju.

Adsorpcijom upravljaju površinske sile, čiji intenzitet određuju sledeći faktori:

- termodinamički (Gibbsov potencijal i temperatura),
- hemijski (hemijske karakteristike adsorbata i rastvora) i
- fizički (međufazna površina i karakteristike adsorbensa).

Za definisanje procesa adsorpcije najbitniji su adsorpciona ravnoteža i kinetika adsorpcije.

Šaržna adsorpcija i adsorpciona ravnoteža

Migracija supstance u sistemu tečno – čvrsto odvija se u dva pravca, iz rastvora ka adsorbensu i sa adsorbensa ka rastvoru, a neto efekat ova dva suprotna procesa je *adsorpcija*. Trenutak kada se dva suprotno usmerena procesa – adsorpcija i desorpcija – uravnoteže naziva se *adsorpciona ravnoteža*.

Na adsorpcionu ravnotežu utiče veliki broj faktora, a najbitniji su: temperatura, specifična površina adsorbensa, veličina i distribucija pora u adsorbensu, hemijski procesi na površini adsorbensa, priroda adsorbata i osobine rastvora.

Temperatura ima veliki uticaj na kinetiku procesa adsorpcije, jer se njegova brzina povećava sa sniženjem temperature rastvora.

Specifična površina ima, takođe, veliki uticaj na adsorpcioni kapacitet u ravnotežnom stanju. Treba razlikovati specifičnu od aktivne površine adsorbensa. Aktivna površina predstavlja površinu pora raspoloživih za adsorpciju i uvek je manja od specifične površine.

Distribucija pora u adsorbensu određuje njegovu selektivnost, kao i kapacitet adsorbovanja molekula različitih veličina. Veličina pora utiče na prolaznost molekula kroz poroznu strukturu adsorbensa. Ako adsorbens ima mali udeo makropora, on ima manji afinitet adsorpcije krupnijih organskih molekula. Suprotno tome, veći udeo mikropora omogućava veći kapacitet adsorpcije manjih organskih molekula.

Hemijski procesi na površini adsorbensa, ako do njih dolazi, znatno utiču na adsorpcionu ravnotežu. Posebno je nepovoljna oksidacija adsorpcionih centara, koja smanjuje kapacitet adsorpcije.

Priroda adsorbensa direktno utiče na njegov afinitet prema adsorbatu i njegov adsorpcioni kapacitet. Sa smanjenjem rastvorljivosti adsorbata u rastvoru adsorpcija raste. *Osobine rastvora* utiču, takođe, na afinitet adsorbensa prema adsorbatu i kapacitet adsorpcije. Tako, na primer, promena pH izaziva promenu polariteta molekula, čime se menja afinitet adsorpcije. Najveći adsorpcioni kapacitet imaju nedisosovani molekuli.

Na određenoj temperaturi sistema, uspostavlja se određena relacija između koncentracije adsorbata u rastvoru i onog koji je vezan za adsorbens, a grafički prikaz te relacije se naziva *adsorpciona izoterma*. Ovo stanje matematički se definiše Freundlich-ovom, Langmuire-ovom i linearnom jednačinom.

Kontinualni sistemi

Adsorpciona ravnoteža izražava krajnje stanje adsorpcionog sistema i može se okarakterisati kao statički pristup problemu. U kontinualnim adsorpcionim sistemima koncentracija adsorbata je dinamički parametar, koji raste sa povećanjem količine tretiranog rastvora, pa je kinetika adsorpcije veoma bitna.

Za uspešnu adsorpciju neke supstance veoma je bitna dužina adsorpcione kolone. Za konkretan adsorbat i određene uslove adsorpcije, uvek postoji određena dužina kolone pri kojoj se već u prvom efluentu javlja probojna koncentracija adsorbata. Ova dužina se naziva *kritična dužina kolone* i ona je direktno proporcionalna *kritičnom kontaktnom vremenu*.

Kritično kontaktno vreme je veoma bitan parametar za definisanje procesa adsorpcije i za date uslove (temperatura, pH, sastav rastvora i vrsta adsorbensa) određen je relacijom:

$$\tau_{\min} = \frac{L_k}{Q_v A}$$

gde je: L_k – kritična dužina kolone, Q_v – protok vode i A – površina preseka kolone.

Ova relacija definiše minimalno kontaktno vreme τ_{\min} potrebno za efikasnu adsorpciju.

Adsorpcioni kapacitet kolone (adsorpcioni kapacitet do tačke proboja) je, takođe, veoma bitan parametar procesa adsorpcije u kolonama. On definiše masu adsorbata koja se izdvoji do postizanja probojne tačke.

Karakteristike adsorbensa imaju izuzetno veliki značaj za proces adsorpcije. Veličina zrna adsorbensa u kolonama je značajan kinetički parametar, jer ona određuje putanju prenosa mase. Smanjivanjem veličine zrna, skraćuju se putanja prenosa mase i vreme postizanja adsorpcione ravnoteže, usled čega se smanjuje kritična dužina kolone. Iz toga sledi da zrna adsorbensa treba da budu što manja. Nažalost, smanjenje zrna ima negativan uticaj na hidrodinamičke parametre adsorpcione kolone sa nasutim slojem adsorbensa (brzinu filtracije, pritisak u koloni, ispiranje kolone). Zbog toga se veličina zrna adsorbensa mora optimizovati.

Uniformnost zrna adsorbensa je, takođe, bitna za uspešnost adsorpcije, jer utiče na izbegavanje pojave segregacije slojeva sa približnim prečnikom čestica, pri pranju kolone, a što značajno može promeniti fluidno-mehaničku sliku pri ponovnom prolasku vode kroz adsorber. Što je prečnik zrna uniformniji u čitavom adsorberu, to se ovaj negativan efekat više izbegava.

Piroda adsorbata je direktno vezana za adsorpcioni kapacit adsorbera.

Izvođenje postupka adsorpcije

Postupci adsorpcije se dele na šaržne i kontinualne.

Šaržna adsorpcija se obavlja u sudu sa mešanjem u koji se stavlja voda iz koje se želi izdvojiti određena supstanca i u njega doda adsorbens. Uz mešanje, proces adsorpcije teče do uspostavljanja adsorpcione ravnoteže. Nakon završene adsorpcije, adsorbens sa adsorbovanom supstancom se odvaja gravitacionim taloženjem, filtracijom ili centrifugisanjem. Adsorbovana supstanca se desorbuje sa adsorbensa rastvorom u odnosu na koji adsorbens ima veliki afinitet i

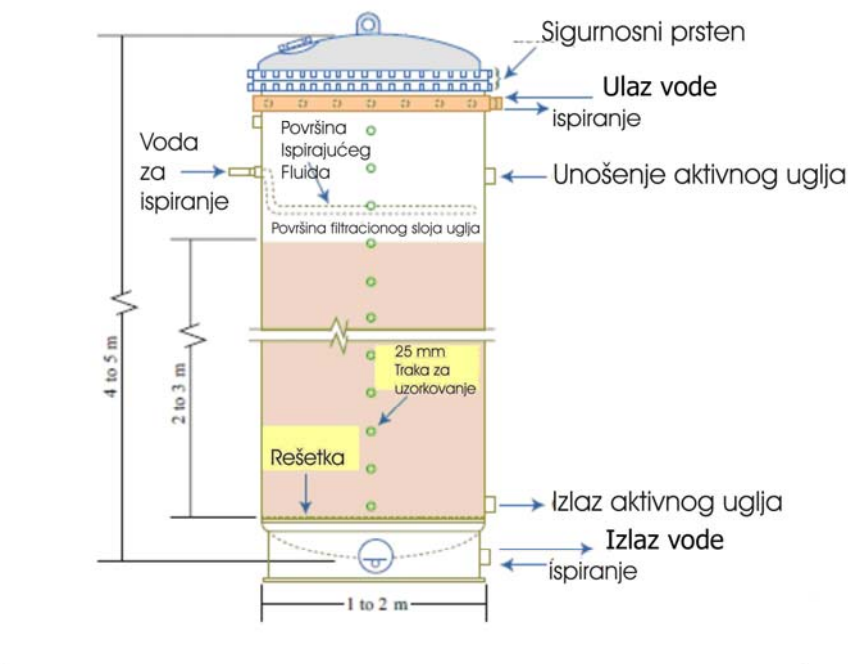
karakterističan je za dati sistem. Šaržni postupak adsorpcije se izvodi u slučaju malih koncentracija adsorbata i relativno malih količina rastvora.

Kontinualna adsorpcija se vrši u adsorpcionim kolonama (jedna ili više njih u nizu). Ovaj postupak adsorpcije se primenjuje kod velikih količina rastvora. Na slici 3-2 šematski je prikazana adsorpciona kolona sa nepokretnim slojem adsorbensa.

Kontinualnu adsorpciju karakterišu četiri uzastopna fenomena:

- transport adsorbata iz rastvora do površine adsorbensa,
- transport adsorbata kroz granični sloj na površini adsorbensa,
- transport adsorbata kroz pore adsorbensa i
- adsorpcija adsorbata na poroznoj strukturi adsorbensa.

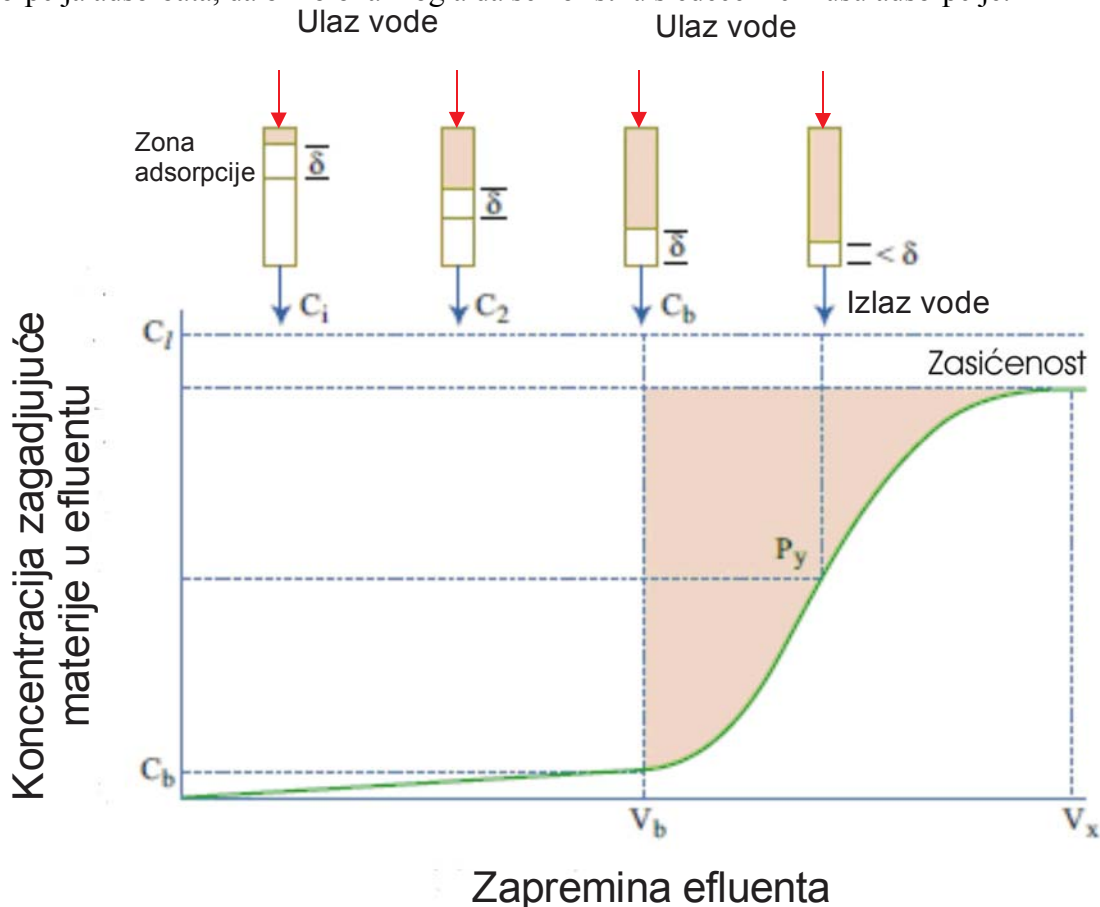
Najsporiji od ovih koraka kontroliše ceo proces. U principu, to su drugi i treći korak. Prvi je dovoljno brz jer se odvija u turbulentnoj zoni, dok je četvrti korak najbrži.



Slika Sistem za kontinualno izvodjenje adsorpcije

Kod adsorpcione kolone sa nasutim slojem adsorbensa rastvor iz koga se želi izdvojiti određena supstanca propušta se kroz kolonu odozgo nadole. Propuštanjem rastvora, u koloni se formira zona adsorpcije, tj. zona prenosa mase. Ona se prvo formira u gornjim slojevima adsorbensa, koji se postepeno zasićava, a zatim putuje ka dnu kolone (slika). Na početku, usled adsorpcionih fenomena, koncentracija adsorbata je veoma niska u rastvoru koji izlazi iz kolone (*effluentu*). Tokom trajanja adsorpcije, zona adsorpcije se spušta ka dnu kolone, a koncentracija adsorbata u izlaznom rastvoru postepeno raste. Kada zona adsorpcije dođe do dna kolone, koncentracija

adsorbata u efluentu dostiže maksimalnu vrednost (C_B). U tom trenutku je dostignuta tzv. *tačka proboja kolone*, što znači da je adsorbens u koloni zasićen adsorbatom. Nakon toga se radi desorpcija adsorbata, da bi kolona mogla da se koristi u sledećem ciklusu adsorpcije.



Slika - Tok procesa adsorpcije u koloni sa tipičnom probojnom tačkom

Aktivni ugalj je danas jedno od najsigurnijih sredstava za poboljšanje kvaliteta industrijskih i pijaćih voda, a isto tako i za preradu izvesnih otpadnih voda. Uopšte aktivni ugalj je najefikasniji poznati adsorbent za preradu tečnosti.

Postupak dobijanja aktivnog uglja sastoji se iz 2 koraka:

1. Materijali sa visokim sadržajem ugljenika (drvo, ugalj, kora kokosovog oraha...) se zagrevaju uz minimalnu količinu kiseonika do oslobađanja ugljenika (karbonizacija), čime se stvara ugalj, koji će adsorbirati organske supstance;
2. Ugljenisani materijal se uparava ili izlaže vrelom CO_2 , kako bi se formirale pore i brazde, (aktivacija), čime se povećava dodirna površina za sorpciju.

Kod primene razlikujemo dve osnovne vrste:

- ugalj u prahu, PAK
- granulirani aktivni ugalj, GAK

Prašcasti aktivni ugalj

Najčešće se nalazi sa granulaciom od 0.04 do 0.14 mm, a koristi se u procesima flokulacije i dekantacije. Za pravilno korišćenje praškastog aktivnog uglja, najvažnije je poznavati neophodnu dozu koju je potrebno primeniti. Najpouzdanije je tu dozu odrediti eksperimentalno i to na sledeći način:

U n sudova se stavljaju rastuće doze aktivnog uglja C_{ac1} , C_{ac2} , C_{acn} , kao i agensi za izbistravanje i flokulaciju. Posle flokulacije, dekantacije i filtracije mere se izdvojeni procenti zagadjivača, C_1 , C_2 ,..... C_n za svaki uzorak. Znajući koncentraciju zagadjivača u probi bez aktivnog uglja C_0 , konstruiše se kriva zavisnosti:

$$C=C_0e^{-aC_{ac}}$$

gde je a konstanta aktivnog uglja koji se za odgovarajuću svrhu primenjuje.

Takodje je:

$$\log C/C_0 = -aC_{ac}$$

pri čemu je ovo prava u semilogaritamskoj podeli.

Odredjivanje potrebne koncentracije u zavisnosti od tipa uglja odredjuje se grafički.

Korišćenjem PAK, ne može se postići neka značajnija redukcija zagadjivača, već samo delimična, pa se ovaj način prerade najčešće koristi za „skidanje vrhova zagadjjenja”, pri akcidentnim zagadjenjima vode.

Granulisani aktivni ugalj

Dobija se od praškastog aktivnog uglja uz pomoć veziva i oblikovanja, a veličina mu ide od 0.4 do nekoliko milimetara, čuva se u zatvorenim posudama, obično u posudama pod pritiskom, Slika .



Slika - Rezervoari za zrnasti aktivni ugalj

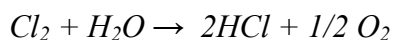
Ovaj ugalj ima:

fizičko dejstvo, kao prava filtarska masa,

adsorptivno dejstvo, pošto adsorbuje većinu zagadjivača rastvorenih u vodi,

biološko dejstvo, jer može poslužiti kao sredina za razvoj mikroorganizama pogodnih za biodegradaciju izvesnih zagadjivača u vodi, najčešće amonijaka,

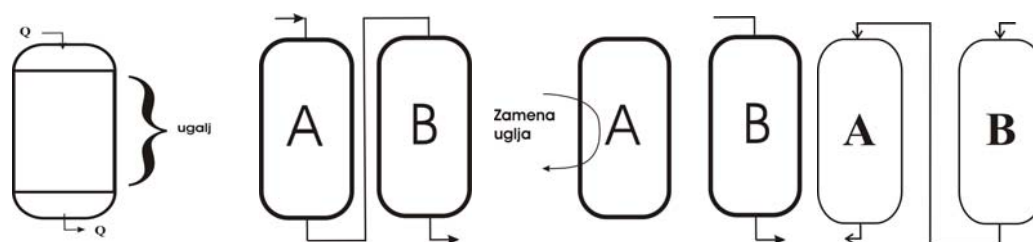
katalitičko dejstvo, za uklanjanje viška hlora u vodi, kada ne dolazi ni do adsorpcije ni do hemijskog vezivanja, već se obavlja reakcija katalize, uz smanjenje pH vode.



Smanjenju kapaciteta uklanjanja hlora iz vode pomoću GAK, doprinose sve one supstance koje onemogućavaju kontakt vode i GAK, kao što su talog $CaCO_3$, adsorbovani zagadjivači, hlorfenoli, deterdženti itd.

Vreme kontakta je 7-20 minuta u standardnim uređajima za tretman vode, a sam ugalj ima ograničenu moć adsorpcije, pa neke hemijske supstance ne može da veže, tako da one uspevaju da „prodju“ adsorber.

Aktivni ugalj se obično koristi u posudama pod pritiskom, najčešće postavljenim u nizu i povezani cevima i ventilima, pomoću kojih se reguliše rad rezervoara, Slika 3-5.



Slika Šema uređaj za kontinualnu adsorpciju

Kada dođe do zasićenja uglja, rezervoar A se isključuje iz rada i radi samo rezervoar B. Proces se zatim odvija u suprotnom smeru, voda prolazi prvo kroz rezervoar B, a zatim kroz rezervoar A. Proces se nastavlja sve dok ne dođe do zasićenja uglja u rezervoaru B. Drugi rezervoar je uvek „svež“, jer je neophodno obezbediti potpuni tretman vode i u slučaju kad dođe do prevremenog zasićenja nečistoćama.

Regeneracija GAK

Najčešće, regeneracija GAK se izvodi termički, izlaganjem GAK-a temperaturi od $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, u peći sa kontrolisanim dotokom vazduha, kada izgori i jedan deo uglja (5-10%), dok je drugi postupak fizičko-hemijska regeneracija, koja obuhvata: preradu vodenom parom, pranje kiselinom ili bazom i procedjivanjem preko odgovarajućeg rastvarača.

Adsorpciona izoterma

Proces adsorpcije se može definisati preko tzv. adsorpcione izoterme, koja povezuje q_A i C_A , pri čemu su:

q_A = koncentracija čvrste faze

C_A = koncentracija adsorbata u tečnoj fazi

U literaturi se može naći više oblika različitih izotermi, kao što su linearna, Langmuir-ova, Braunauer-Emmett-Teller-ova ili najčešće korišćena adsorpciona izoterma za aktivni ugalj, Freundlich-ova izoterma.

Ona ima sledeći oblik:

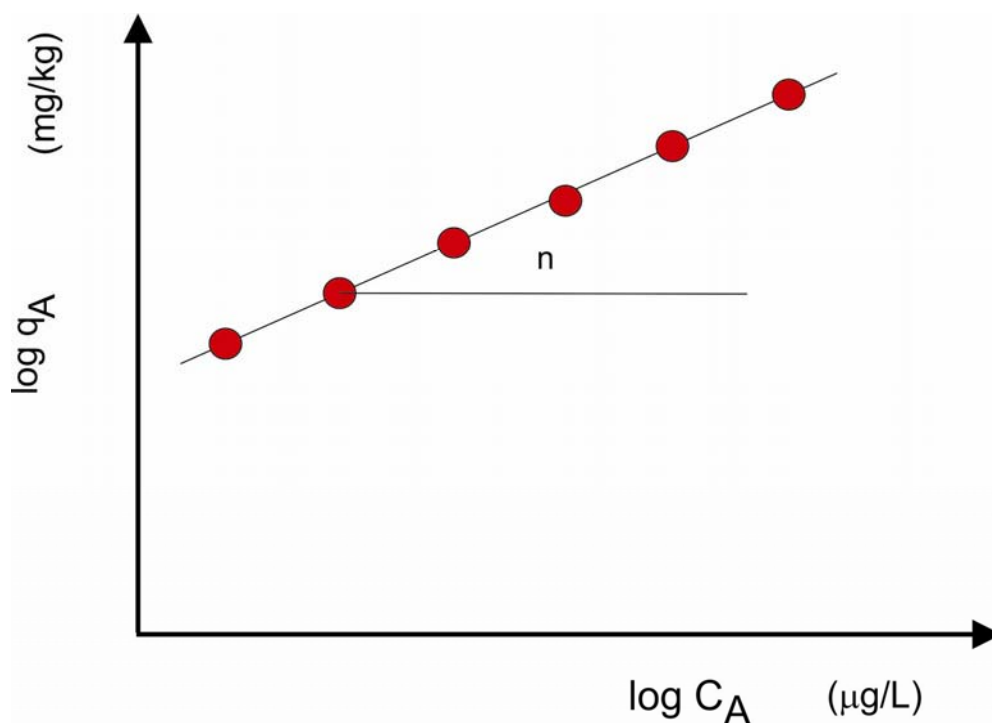
$$q_A = K_F \cdot C_A^{1/n}$$

pri čemu se q_A izražava u mg/kg, a C_A u $\mu\text{g/L}$, pa samim tim i konstanta K_F , ima sledeće jedinice:

$$\frac{\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)}{\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{L}}\right)^{1/n}}$$

Izoterme se određuju laboratorijskim ispitivanjima, po sledećim koracima:

- Određena masa uglja se stavlja u času (M)
- Doda se određena zapremina vode V
- Pažljivo se meša 6 dana, dok se ne uspostavi ravnoteža
- Meri se ravnotežna koncentracija u vodi
- Izračunava se $q_A = \frac{V}{M} (C_0 - C_A)$
- Crta se grafik logaritamske zavisnosti q_A od C_A , Slika 3-6.
- Ako se koristi Freundlich-ova izoterma, logaritamska zavisnost će biti linearna



Slika . Određivanje karakteristika adsorptivnog sredstva

Sa grafika se odredi nagib, n, a nakon toga i vrednost konstante K_F . Ova ispitivanja često se rade pri industrijskoj proizvodnji aktivnog uglja, kako bi se odredile njegove karakteristike.

DEZINFEKCIJA VODE ZA PIĆE

Zahtevi mikrobiološke ispravnosti vode za piće

Najvažniji zahtev koji voda za piće mora da ispuni je higijenska ispravnost, odnosno da nikako ne sme štetno da utiče na zdravlje ljudi. Ključni napredak u kvalitetu i dužini života upravo je ostvaren kad je ispunjen taj zahtev tokom devetnaestog i početkom dvadesetog veka, nažalost, ne kod celog čovečanstva. Njegov značajan deo i danas boluje i umire (posebno deca) zbog infekcija i zaraznih bolesti koje se prenose higijenski neispravnom vodom za piće (hidrične infekcije). To je veoma ozbiljan zdravstveni, socijalni, ekonomski, ali najviše etički i moralni problem savremene svetske zajednice čije celovito rešavanje još nije ni na vidiku.

Pošto sterilne (bez mikroorganizama) prirodne vode nema, to nije čak ni kišnica, jasno je da ni voda za piće ne može biti sterilna, odnosno u njoj ne sme biti mikroorganizama koji izazivaju obolenja – patogena, a brojnost ostalih mikroorganizama treba da bude u dozvoljenoj meri koja je rezultat dosadašnjih naučno-stručnih saznanja u mikrobiologiji i medicini. Zbog ogromne biološke raznovrsnosti mikroorganizama, posebno bakterija i ozbiljne štetnosti patogena i pri veoma maloj brojnosti, mikrobiološka ispitivanja u smislu otkrivanja, izolacije i određivanja brojnosti patogena vrlo su složena, dugotrajna i osetljiva, što ih čini prilično teško primenljivim za stalne analize koje su neophodne u cilju obaveznog uklanjanja patogena, tj. dezinfekcije koja je jasan imperativ u pripremi vode za piće. Dezinfekcija znači inaktiviranje, tj. uklanjanje svih zaraznih organizama (šire posmatrano i svih supstanci izazivača bolesti) iz vode u njenoj pripremi za piće. Ona u jednostavnijem načinu primene obuhvata jednokratni proces, npr. dezinfekciju vode seoskog bunara, dok u većim, složenijim sistemima za pripremu vode podrazumeva kombinaciju tri procesa: početnu oksidaciju koja prethodi ostalim procesima, primarnu (inaktiviranje mikroorganizama u vodi) i sekundarnu dezinfekciju (produženo, tj. rezidualno delovanje u celom distributivnom sistemu), npr. kod savremenih postrojenja za preradu površinske vode u vodu za piće.

Osnovni pokazatelji mikrobiološkog kvaliteta vode za piće

Prisustvo mikroorganizama indikatora fekalnog zagađenja vode vrlo verovatno ukazuje i na prisustvo crevnih patogena, a pošto je prve mnogo brže i lakše otkriti, oni se koriste za posredno određivanje patogena. Najznačajniji bakteriološki indikatori fekalnog zagađenja su *Escherichia coli*, (kao najspecifičnija od brzo odredljivih termotolerantnih i drugih koliformnih bakterija preporučena od Svetske zdravstvene organizacije – SZO za osnovni indikator), fekalne streptokoke i spore sulfid-redukujućih klostridija. Prema SZO visoko rizični patogeni su: *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni*; virusi (adenovirusi, enterovirusi, hepatitis A, hepatitis E, Norwalk virus, Rotavirus) i paraziti *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Entamoeba histolytica* i *Dracunculus*. Drugi najznačajniji opšti pokazatelj mikrobiološkog kvaliteta vode je brojnost aerobnih mezofilnih bakterija, obavezan u svim vrstama pregleda vode i posebno značajan u proceni efikasnosti tehnoloških procesa pripreme vode za piće. Zakonom o zaštiti zdravlja stanovništva je propisano da kontrolu kvaliteta vode za piće obavljaju zavodi za javno zdravlje kao nadležne državne zdravstvene ustanove. Važećim Pravilnikom o higijenskoj ispravnosti vode za piće (Sl. list SRJ br. 42/98) propisane su četiri vrste laboratorijskog pregleda vode za piće sa zahtevanim mikrobiološkim pokazateljima kvaliteta:

- **osnovni (A)** – najčešći pregledi za otkrivanje indikatora zagađenja koja s najčešći uzrok higijenske neispravnosti
- **periodični (B)** – ispitivanje većeg broja pokazatelja
- **novi zahvati vode (V)** – takođe ispitivanje većeg broja pokazatelja kao preventiva ugrožavanju vodovodnih distribucionih sistema
- **higijensko-epidemiološka indikacija (G)** – konkretna situacija nalaže određivanje dodatnih pokazatelja kvaliteta pored osnovnih.

Tabela Mikrobiološki pokazatelji kvaliteta vode za piće po vrstama laboratorijskih pregleda
(Sl. list SRJ br. 42/98, Dalmacija i sar., 2009)

Osnovni (A)	Periodični (B)	Novi zahvat vode (V)	Hemijsko-epidemiološka indikacija (G)
<ul style="list-style-type: none"> • ukupne koliformne bakterije • koliformne bakterije fekalnog porekla • ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija • streptokoke fekalnog porekla • sulfito-redukujuće klostridije • <i>Proteus</i> vrste • <i>Pseudomonas aeruginosa</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • ukupne koliformne bakterije • koliformne bakterije fekalnog porekla • ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija • streptokoke fekalnog porekla • sulfito-redukujuće klostridije • <i>Proteus</i> vrste • <i>Pseudomonas aeruginosa</i> • Enterovirusi¹ • Bakteriofagi¹ • Crevne protozoe i helminti i njihovi razvojni oblici 	<ul style="list-style-type: none"> • ukupne koliformne bakterije • koliformne bakterije fekalnog porekla • ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija • streptokoke fekalnog porekla • sulfito-redukujuće klostridije • <i>Proteus</i> vrste • <i>Pseudomonas aeruginosa</i> • Enterovirusi¹ • Bakteriofagi¹ • Feruginoze² • Crevne protozoe i helminti i njihovi razvojni oblici 	<ul style="list-style-type: none"> • ukupne koliformne bakterije • koliformne bakterije fekalnog porekla • ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija • streptokoke fekalnog porekla • sulfito-redukujuće klostridije • <i>Proteus</i> vrste • <i>Pseudomonas aeruginosa</i> • Enterovirusi¹ • Patogeni mikroorganizmi sa higijensko-epidemiološkim indikacijama
1 samo iz površinskih voda, prema higijensko-epidemiološkim indikacijama			
2 kvalitativno, ako u vodi ima gvožđa i mangana iznad MDK			
3 iz površinskih voda, voda izdani i karstnih voda			

Metode procene mikrobiološkog kvaliteta vode za piće

Metode kojima se određuje brojnost mikroorganizama u vodi se dele na direktne i indirektne. Objektivno, jedino se direktnim brojanjem pod mikroskopom može realno proceniti brojnost u nekom uzorku. Indirektne metode koje podrazumevaju izolaciju i gajenje na prirodnim ili veštačkim hranljivim podlogama imaju opšti nedostatak u nepostojanju univerzalne hranljive podloge koja zadovoljava potrebe svih prisutnih bakterija zbog njihove velike biološke raznovrsnosti po pitanju izvora energije i ugljenika, enzima, kao i abiotičkih uslova (sadržaj

kiseonika, temperatura, pH i dr.). Ipak i one su značajne jer podešavanjem uslova kultivacije mogu proceniti brojnost organotrofa koji su najznačajniji u smislu zaštite ljudskog zdravlja.

Metode za bakteriološki, virusološki, biološki i parazitološki pregled vode za piće su propisane starijim podzakonskim aktom (*Sl. list SFRJ br. 33/87*). Danas su dostupne i savremenije, brže i osjetljivije metode za određivanje indikatorskih organizama u proceni kvaliteta vode za piće. Najzastupljenije metode koje se danas koriste za mikrobiološke laboraorijske preglede su:

- **MPN** (most probable number) ili **MT** (multiple tube) – metod najverovatnijeg broja ili metod više epruveta
- **MF** (membrane filtration) – metod membranske filtracije
- **P/A** (presence/absence) – metod testa prisutno/odsutno
- **HPC** (heterotrophic plate count) – metod određivanja broja kolonija heterotrofa
- **BARTs** (biologic activity reaction tests) – biološki aktivni reakcioni testovi.

Podela postupaka dezinfekcije vode za piće

Procesi dezinfekcije su složeni jer ne zavise samo od osobina mikroorganizama i primenjenog dezinfekcionog sredstva, vremena kontakta, nego značajno i od uslova sredine u kojoj se odigravaju. Razni mikroorganizmi su veoma različito osjetljivi na dejstvo određenog dezinfekcionog sredstva. Od njihovih osobina najznačajnije su brojnost, fiziološko stanje, otpornost vegetativnih oblika (značajno zavisi od uslova sredine), sposobnost obrazovanja spora, prisustvo ćelijskih kapsula i omotača. Biološko delovanje na živu ćeliju se zasniva na denaturaciji proteina, oštećenju integriteta i funkcije omotača, interakcije sa enzimima ili metaboličkom antagonizmu. Od dobrog sredstva za dezinfekciju vode se zahteva (*Gaćeša, Klašnja, 1994*):

- da uklanja, tj. inaktivira sve patogene mikroorganizme eventualno prisutne u vodi
- da se dezinfekcija završava za što kraće vreme i u uslovima većih promena temperature
- da u koncentracijama u kojima efikasno dezinfikuje vodu ne izaziva toksičnost vode, i ne daje joj neprijatan ukus ili miris
- da je jeftino i da se lako nabavlja i skladišti
- da se lako dozira u vodu, bez primene složene i skupe aparature
- da se lako i brzo može odrediti njegova koncentracija u vodi
- da u dužem periodu vremena obezbeđuje mikrobiološku higijensku ispravnost vode, odnosno da ima produženo (rezidualno) dejstvo neophodno u sprečavanju naknadnog inficiranja vode (reinfekcija) u distributivnom delu vodovodnih sistema.

Logična podela dezinfekcionih postupaka je sledeća:

- a) **oksidativni (reagentni) procesi:**
 - hlor (gasoviti hlor, hipohloriti, hloramini)
 - hlor-dioksid
 - drugi halogeni (jedinjenja joda, broma i fluora)
 - ozon (ozonizacija će biti detaljnije predstavljena u posebnom poglavlju)
 - permanganat
 - ne-fotohemijski unapređeni procesi oksidacije (Advanced oxidation processes – AOPs):
 - ozon/vodonik-peroksid (perokson)

- vodonik-peroksid/Fe²⁺ (Fenton i Fenton-slični procesi)
- elektrohemijska oksidacija
- jonizacija

b) neoksidativni (nereagentni) procesi:

- ultraljubičasto zračenje (UV)
- ultrazvuk (US)
- membranska mikrofiltracija i ultrafiltracija
- oligodinamički efekti jona srebra i bakra (uslovno)
- toplota (pasterizacija, sterilizacija)
- fotohemijski unapređeni procesi oksidacije:
 - heterogena fotokataliza na titan-dioksidu
 - fotoliza u ultravakuumu
 - mikrotalasi

c) kombinacija oksidativnih i neoksidativnih procesa – unapređeni procesi oksidacije:

- vodonik-peroksid/UV
- ozon/UV
- ozon/vodonik-peroksid/UV
- Foto-Fenton (vodonik-peroksid/Fe²⁺/UV)
- vodonik-peroksid/US
- ozon/US
- Fenton/US.

U našoj sredini daleko najviše se primenjuju hlor i njegovi derivati, bukvalno u svim slučajevima snabdevanja vodom za piće, od najmanjih seoskih bunara do najvećih vodovodnih sistema. U većim sistemima za preradu površinskih voda prisutna je i ozonizacija, kao predtretman i kao glavni oksidacioni i dezinfekcioni proces. UV zračenje i mikrofiltracija se sve više primenjuju u vidu primarnog tretmana. Završna dezinfekcija hlorisanjem (sekundarno hlorisanje u većim sistemima) je neizostavna zbog produženog (rezidualnog) delovanja hloramina u sprečavanju reinfekcije u distributivnoj mreži vodovoda. Iako se neki od novijih kombinovanih unapređenih procesa oksidacije (perokson, njegova kombinacije sa UV zračenjem i fotokataliza) već široko primenjuju u mnogim postrojenjima u svetu, njihova komercijalna primena u Srbiji je u povoju.

Tabela Karakteristike pet najčešće primenjivanih dezinfekcionih sredstava
(Crittenden i sar. 2005, Dalmacija i sar. 2005)

	dezinfekciono sredstvo				
	slobodan hlor	kombinovani hlor	hlor-dioksid	ozon	UV zračenje
efikasnost pri dezinfekciji					
bakterija	odlična	dobra	odlična	odlična	dobra
virusa	odlična	dovoljna	odlična	odlična	dovoljna
protozoa	dovoljna do loša	loša	dobra	dobra	odlična
endospora	dobra do dovoljna	loša	dovoljna	odlična	dovoljna
upotreba kao	najčešće	često	povremeno	često	vanredno

primarnog dez. sredstva					(hitno)
maksimalno dozvoljena rezidualna koncentracija	4 mg/l 5 mg/l ¹	4 mg/l	0,8 mg/l 0,4 mg/l ¹	-	-
doza	1-6 mg/l	2-6 mg/l	0,2-1,5 mg/l	1-5 mg/l	20-100 mJ/cm ²
1 Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće (Sl. list SRJ br. 42/98)					

Značaj rezidualne koncentracije dezinfekcionog sredstva i vremena kontakta

Dva osnovna faktora značajna za proces dezinfekcije s aspekta određivanja ili predviđanja efikasnosti primenjenog dezinfekcionog sredstva su njegova rezidualna koncentracija C (mg/l) i vreme kontakta t (min), međusobno povezani izrazom

$$C \cdot t = \text{konstanta (min} \cdot \text{mg/l)}$$

(1-1)

što ih čini obrnuto srazmernim u matematičkom smislu. To znači da ista efikasnost dezinfekcije postiže u slučaju niske rezidualne koncentracije i dužeg vremena, kao i visoke rezidualne koncentracije i kraćeg vremena kontakta. Efikasnost dezinfekcije se izražava procentom inaktivacije, odnosno logaritmom (log) inaktivacije, pri čemu uklanjanje 90 % mikroorganizama (preostalo 10 %) znači 1 log inaktivacije, uklanjanje 99 % (preostao 1 %) znači 2 log inaktivacije itd. Naravno da pored ova dva najvažnija i drugi faktori značajno utiču na efikasnost dezinfekcije: temperatura, pH vrednost, prisustvo sunčeve svetlosti, vrsta i oblik kontaktnog reaktora i dr.

Vreme kontakta se određuje primenom "metode traga", odnosno praćenjem vremena pojavljivanja vizuelno lako uočljive komponente na izlazu iz reaktora. Efikasnost dezinfekcije značajno raste sa porastom temperature, što znači da C·t vrednost značajno opada. Uticaj pH vrednosti je različit kod raznih dezinfekcionih sredstava, npr. slobodnom hloru najbolje odgovara neutralna sredina, dok je u slučaju ozona poželjnija kisela sredina. Izbor mikroorganizama koji bi bili optimalni indikatori mikrobiološkog kvaliteta vode (što znači da imaju približnu brzinu inaktivacije kao otpornije vrste patogena, a mnogo se lakše, brže i jeftinije kvalitativno i kvantitativno određuju) je prilično težak posao. Američka agencija za životnu sredinu (US EPA) je preporučila C·t vrednosti za *Giardia ciste* i enteroviruse, dve izuzetno otporne vrste mikroorganizama, što je prikazano u tabelama 3. pri čemu ona predlaže izbor postupka dezinfekcije na osnovu efikasnosti inaktivacije u prethodno primenjenim postupcima filtracije.

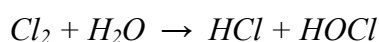
U slučaju UV zračenja primenjuje se vrednost slična C·t vrednosti, pri čemu je logično rezidualna koncentracija C zamenjena intenzitetom UV zračenja I (mW/cm²) i vreme kontakta vremenom ekspozicije t (s), pa se dobija proizvod I·t (mW/cm² · s = mJ/cm²) čija vrednost znači potrebnu dozu UV zračenja za sigurnu dezinfekciju (inaktivaciju poverenja), prikazano u tabeli.

Tabela C-t vrednosti (min·mg/l) neophodne za inaktivaciju enterovirusa u zavisnosti od temperature i pH vrednosti (*US EPA 1989, Dalmacija i sar. 2005*)

dezinfekciono sredstvo	log inaktivacije pri pH 6-9	temperatura (°C)					
		0,5	5	10	15	20	25
Slobodni hlor	2	6	4	3	2	1	1
	3	9	4	4	3	3	1
	4	12	8	6	4	3	2
ozon	2	0,9	0,6	0,5	0,3	0,25	0,15
	3	1,4	0,9	0,8	0,5	0,4	0,25
	4	1,8	1,2	1,0	0,6	0,5	0,3
Hlor-dioksid	2	8,4	5,6	4,2	2,8	2,1	1,4
	3	25,6	17,1	12,8	8,6	6,4	4,3
	4	50,3	33,5	25,1	16,8	12,6	8,4
hloramini	2	1243	837	643	428	321	214
	3	2063	1423	1067	712	534	356
	4	2883	1988	1491	994	746	497

Dezifekcija hlorisanjem

Rastvaranjem hlora u vodi nastaju hlorovodonična i hipohlorasta kiselina po reakciji:

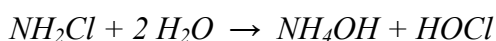


Smatra se da je upravo molekulska hipohlorasta kiselina ona supstanca koja stupa u reakciju sa bakterijama narušavajući ćelijski metabolizam, odnosno izazivajući njihovu smrt. Inaktiviranje bakterija leži u njenoj hemijskoj reakciji sa enzimima koji su neophodni za životne procese ćelija. Drugo tumačenje je da prilikom delovanja hlora osnovnu ulogu ima nascentni kiseonik, koji nastaje razlaganjem hipohloraste kiseline po reakciji:



koji oštećuje ćelije složenim oksidativnim mehanizmom, koji je takođe i suština oksidativne razgradnje organskih i drugih oksidabilnih supstanci iz vode elementranim hlorom.

Dezinfekcija hlorisanjem, odnosno gasovitim hlorom, hipohlorastom kiselinom i hipohloritima, kao i hloraminima (NH_2Cl , $NHCl_2$ i NCl_3 – jedinjenja nastala reakcijom amonijaka i elementarnog hlora) je najzastupljeniji postupak dezinfekcije u svetu, kako ranije, tako i sada. U našoj zemlji se primenjuje apsolutno u svim vodovodnim sistemima, od najmanjih do najvećih. On je relativno jednostavan, jeftin, i u najvećem broju slučajeva dovoljno efikasan postupak dezinfekcije, a produženo (rezidualno) dejstvo hlornih derivata štiti vodu od reinfekcije u distributivnoj mreži. Ono se zasniva na prisustvu rezidualnog aktivnog hlora (koncentracije 0,3-0,5 mg/l), kao i hloramina (sami imaju skromno dezinfekciono dejstvo), od kojih je na pH vrednostima vode u mreži (neutralna i blago bazna sredina) najzastupljeniji monohloramin koji postepeno reaguje s vodom po reakciji:



oslobađajući hipohlorastu kiselinu koja obezbeđuje stalno dezinfekciono dejstvo. Od vrednosti pH u vodi zavisi dominantno prisustvo elementarnog hlora (kisela sredina), hipohloraste kiseline (blago kisela i neutralna sredina) ili hipohloritnog anjona (bazna sredina). Jasno je da je za hlorisanje optimalna blago kisela sredina koja uslovljava hipohlorastu kiselinu koja je najpoželjnije dezinfekciono sredstvo. Porast temperature značajno pospešuje efekte hlorisanja, odnosno na 10°C za isti efekat hlorisanja potrebna je dvostruko veća doza hlora nego na 20°C. Ipak voda se iz ekonomskih razloga uvek hlorige na ambijentalnoj temperauri (zagrevanje vode radi boljeg hlorisanja je tehno-ekonomski potpuno neopravdano, pa se naravno i ne primenjuje). Efekat hlorisanja zavisi i od vrsta prisutnih mikroorganizama, jer su razni mikroorganizmi u različitoj meri otporni na delovanje hlora i njegovih jedinjenja.

Za hlorisanje se upotrebljavaju razna komercijalna sredstva prikazana u narednoj tabeli.

Tabela Dezinfekciona sredstva koja se koriste za hlorisanje vode (Gaćeša i Klašnja, 1994)

Oblik	Formula	Komercijalno ime	Sadržaj hlora, %	Primedba
Hlorni gas	Cl ₂	Tečni hlor*	100	Nabavlja se u bocama ili dobija elektrolizom NaCl.
Natrijumhipohlorit	NaOCl	Žavelova voda	10-15	Koristi se samo kao vodeni rastvor.
Kalcijumhipohlorit	Ca(OCl) ₂	Kaporit, Hiperit	70	
Kalcijumhlordhipohlorit	CaCl(OCl)	Hlorni kreč	25-35	Raspada se uz taloženje kreča i CaCO ₃ .
Neorganski hloramini	NH ₂ Cl NHCl ₂ NCl ₃	Amonijum-hloramini	do 25	Nastaje na pH: 6-8 5-6 <5
Organski hloramini		Halamid, Pantocid, itd.	do 25	Deluju duže i sporije.
Hlordioksid	ClO ₂		50	Deluje brže i efokasnije.

*Naziv za hlor dobijen elektrolizom, komprimovanjem (10 bar) preveden u tečno stanje i napunjen u čelične boce.

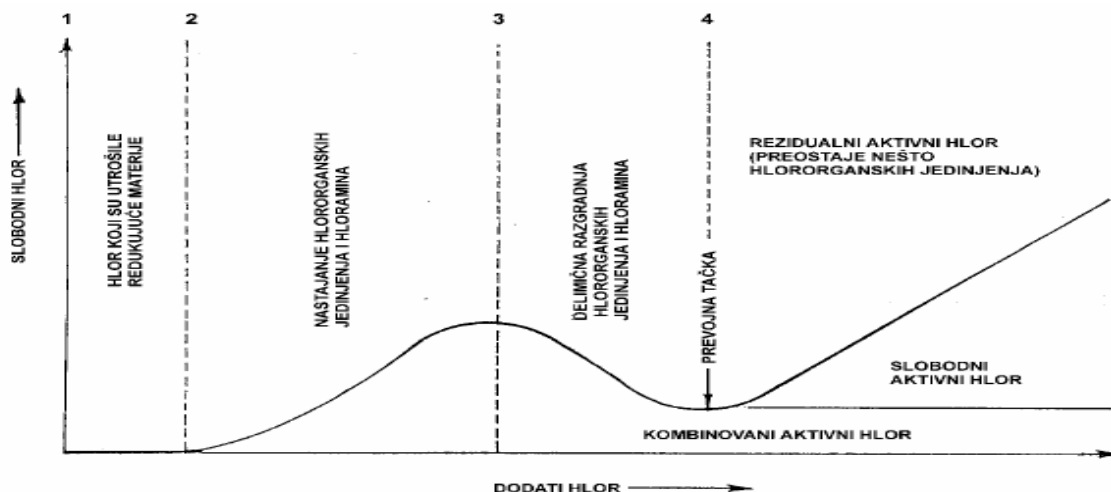
Efikasnost delovanja, odnosno baktericidnost hlornih preparata opada po sledećem redosledu: hlordioksid > elementarni hlor > kalcijumhipohlorit > hlorni kreč > natrijumhipohlorit > hloramini.

Hlor je snažno oksidaciono sredstvo, i ako u vodi ima sastojaka koji se mogu oksidovati, hlor će se nakon doziranja u vodu utrošiti na oksidaciju ovakvih supstanci, pre nego što dođe do izražaja njegovo dezinfekciono delovanje. Prema tome, količina hlora koja se dozira u vodu prilikom dezinfekcije podrazumeva i ovaj hlor koji se troši za oksidaciju, npr. Fe²⁺ u Fe³⁺, S⁴⁺ u S⁶⁺ i dr. Takav hlor utrošen za oksidaciju je ranije nazvan vezani hlor, što je pogrešan naziv jer nikako ne odgovara njegovoj ulozi (on je potrošen na oksidaciju, a ne vezan u nekom obliku). Slobodni aktivni hlor se nalazi u obliku hipohloraste kiseline (HOCl) i hipohloritnog anjona (OCl⁻), obezbeđuje trenutnu dezinfekciju, ali i produženo delovanje hlora koje štiti vodu u distributivnoj mreži od reinfekcije. Kombinovani aktivni hlor čine hloramini koji

imaju još izraženije produženo dejstvo, što je već navedeno (ova vrsta hlora je pre zaslužila naziv vezani hlor jer se polako otpušta iz hloramina, a ne onaj utrošen za oksidaciju, ali to ne treba koristiti da se ne bi pobrkale te dve savim različite vrste hlora). Ukupni (rezidualni) aktivni hlor je zbir slobodnog aktivnog i kombinovanog aktivnog hlora.

$$\text{dodati hlor} = \text{hlor utrošen za oksidaciju} + \text{ukupni (rezidualni) aktivni hlor}$$

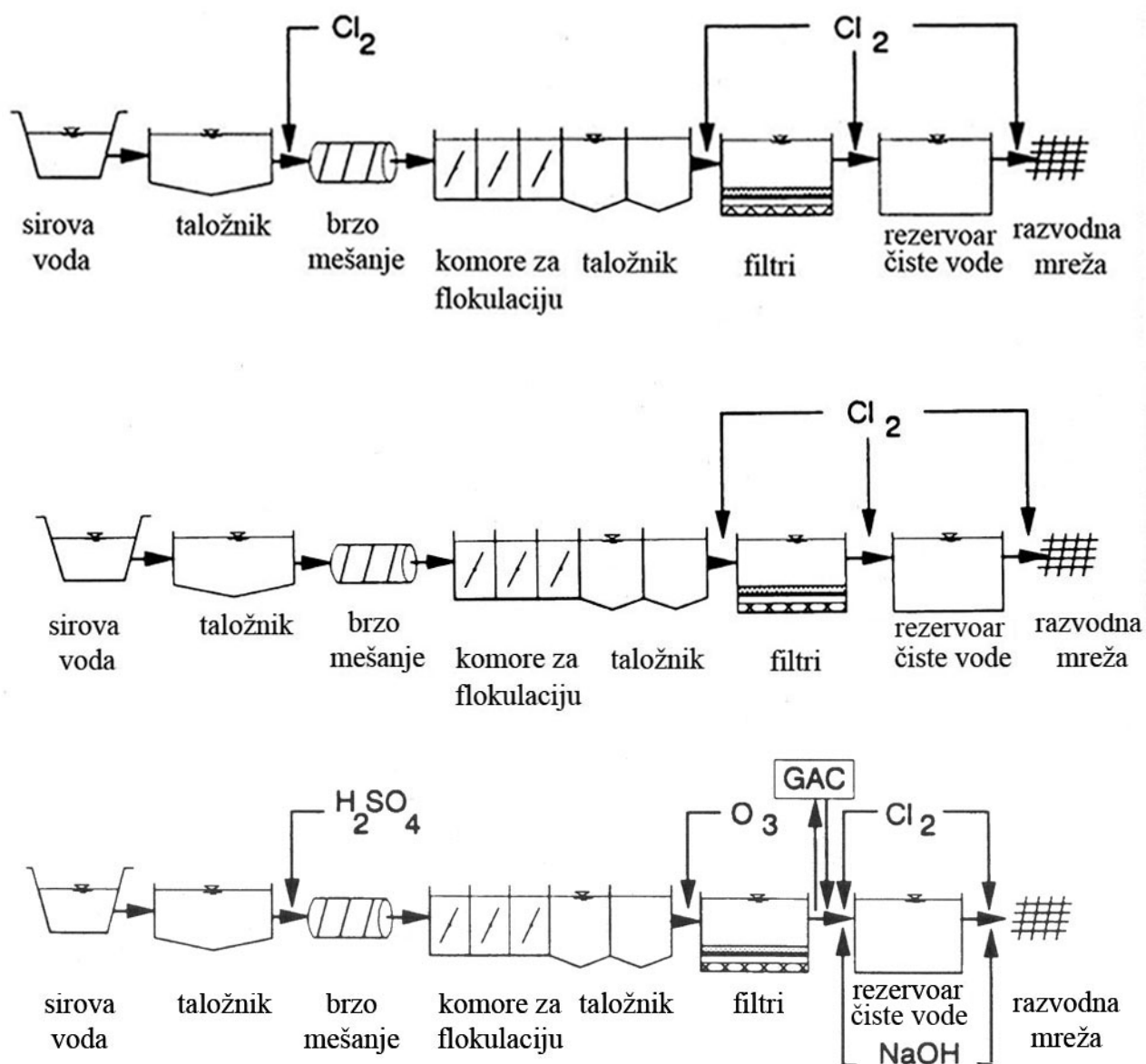
$$\text{ukupni (rezidualni) aktivni hlor} = \text{slobodni aktivni hlor} + \text{kombinovani aktivni hlor}$$



Slika Zavisnost ukupnog aktivnog (rezidualnog) hlora od dodatog hlora

Deo 1-2 na slici predstavlja navedenu oksidacijuna početku dodavanja hlora, pa sledi deo 2-3 koji znači stvaranje hlororganskih jedinjenja i hloramina do maksimuma krive. U delu 3-4 naizgled nelogično dolazi do pada rezidualnog hlora sa porastom dodatog (do minimuma krive koji se naziva prelomna tačka), a razlog su reakcije međusobne oksidoredukcije mono- i dihloramina i njihove oksidacije molekulskim hlorom do elementarnog azota, čime se smanjuje količina rezidualnog hlora. Zato je za uspešno hlorisanje potrebno preći prelomnu tačku, odnosno doći u deo desno od 4 gde postoji očekivana direktna srazmera dodatog i rezidualnog hlora.

Gasoviti, odnosno tečni hlor iz koga se prvi dobija, je neprikosnoveno najbolji i najjeftiniji način kontinualnog hlorisanja, pa se primenjuje za sve veće vodovodne sisteme. U slučajevima diskontinualnog hlorisanja i kontinualnog hlorisanja manjih vodovodnih sistema česta je primena hipohloritom. Iako to ima nekih prednosti (tačnije doziranje manjih protoka, jednostavnost opreme i manji bezbednosni rizici pri transportu, skladištenju i upotrebi), značajni su i nedostaci, kao što je opadanje koncentracije hlora u hipohloritu vremenom, negativan uticaj povišene temperature i značajno viša cena. Zato je neophodno napraviti valjanu tehno-ekonomsku analizu korišćenja hipohlorita za svaki konkretan slučaj po pitanju uslova nabavke, načina skladištenja, veličina zaliha, opadanja koncentracije hlora u rastvoru hipohlorita, moguće proizvodnje na licu mesta i dr.

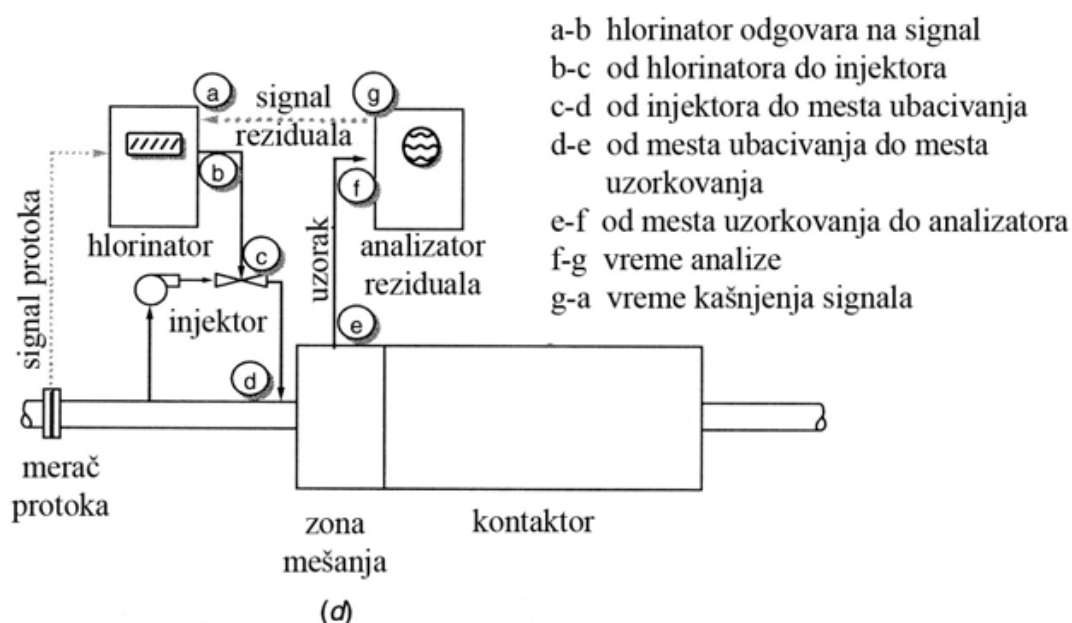


Slika Postupci hlorisanja u pripremi vode za piće (White, 1999, Dalmacija i sar. , 2005)

Postupci hlorisanja u smislu mesta uvođenja hlora zavise od toga da li se prerađuju podzemne ili površinske vode, i od njihovog kvaliteta. U slučaju uobičajenog kvaliteta podzemne vode (praktično bez organskog i mikrobiološkog zagađenja i nizak sadržaj amonijaka) potrebno je samo dovoljno vreme kontakta hlora i vode kao završni proces u liniji prerade. Kod površinske vode ima mnogo više varijanti. U slučajevima mikrobiološkog zagađenja u flokulacionim bazanima u okviru tipičnih linija prerade primenjivano je predhlorisanje pre bistenja i standardna primarna i sekundarna dezinfekcija na kraju linije pripreme vode za piće (gornja šema na slici 1-2). Ukoliko voda ima veći sadržaj prekursora (najčešće huminske supstance) trihalometana (THM) i drugih opasnih sporednih proizvoda dezinfekcije (SPD), predhlorisanje je zabranjeno (za vode sa sadržajem suspendovanih materija većim od 25 mg/l). Moguće zagađenje ispune pešćanih filtera se može izbeći hlorisanjem pre filtera, koje se vrši povremeno, odnosno tzv. šok-hlorisanjem (srednja šema na slici 2). Najbolji način izbegavanja opasnih SPD je uklanjanje njihovih prekursora pre hlorisanja, obično

ozonizacijom i adsorpcijom na granulisanom aktivnom uglju (GAC), što je prikazano na donjoj šemi na slici 1-2.

Reaktori (kontaktori) za hlor imaju osnovni zadatak da obezbede dovoljno dugo vreme zadržavanja pošto je u C-t konceptu zbog prirode hlora ograničena vrednost koncentracije. Prisustvo usmerivača (šikana) toka vode to donekle olakšava, ali ne dovoljno pa se kompletna reakcija hlora i vode završava u cevovodima distributivnog sistema jer se u njima približno postiže idealno klipno proticanje što je najpoželjnije po pitanju dužine vremena kontakta. Kontrola doziranja hlora se vrši: manuelno, preko reziduala, preko protoka vode, kaskadno ili savremeno računarskim sistemom kontrole (Supervisory Control And Data Acquisition –SCADA).



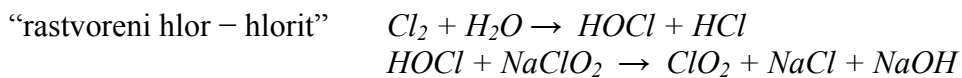
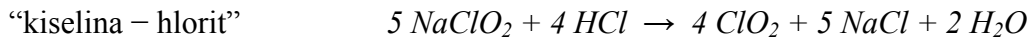
Slika Kaskadna kontrola doziranja hlora (Crittenden i sar., 2005, Dalmacija i sar., 2005)

Hlor i neki hlorni preparati koja se koriste u procesu dezinfekcije po svojoj prirode spadaju u veoma opasne i štetne supstance. U istoriji primene hlora, nažalost, činjenica je da je gasoviti hlor zbog svoje otrovnosti upotrebljen u Prvom svetskom ratu kao prvo hemijsko oružje, a zatim je usledila primena još mnogo otrovnijih derivata hlora kao bojnih otrova. Zato oni zahtevaju izuzetnu pažnju i odgovarajuće stroge mere zaštite prilikom njihove proizvodnje, transporta, skladištenja i primene.

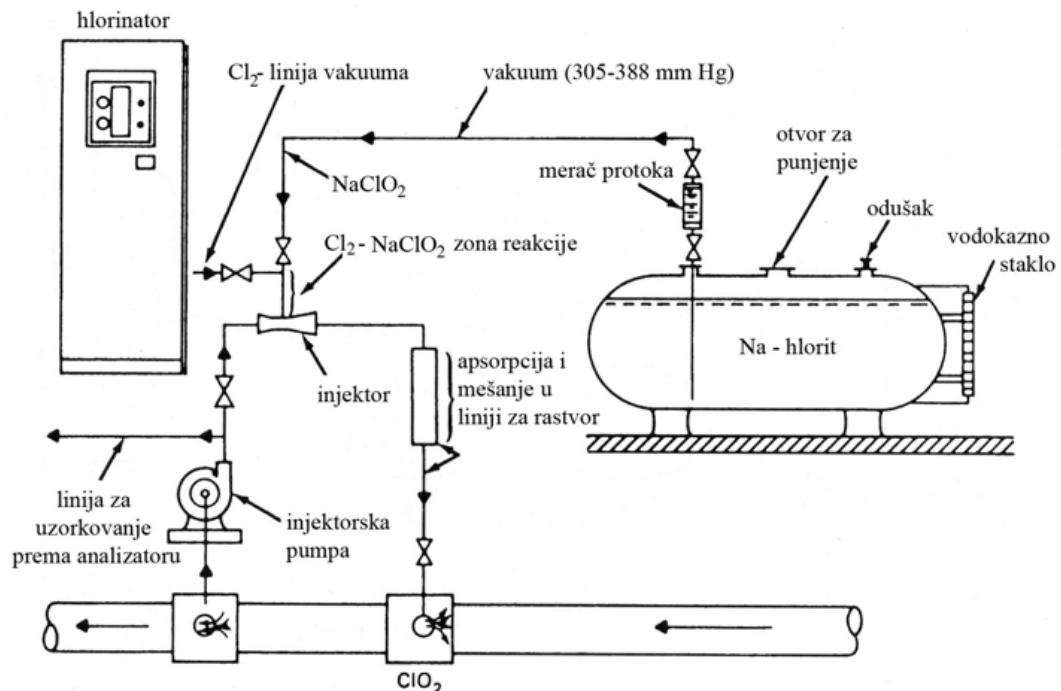
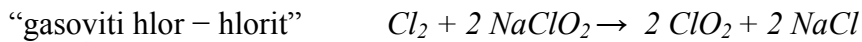
Tabela Delovanje različitih koncentracija hlora u vazduhu na ljudski organizam (Gaćeša i Klašnja, 1994)

Koncentracija, ml/m ³	Delovanje
0.02-0.05	Koncentracija koja se može osetiti čulom mirisa
0.1	Granična koncentracija za duže(trajno) delovanje
1.0	Maksimalno dozvoljena koncentracija na radnom mestu u kraćem vremenskom periodu
3.0	Jaki simptomi nadražaja; veoma težak rad
5.0	Maksimalna koncentracija kod koje je moguć kratkotrajni oporavak
20	Opasno po život pri delovanju od 30 min
50	Smrt nastupa za 30-60 min
100	Smrt nastupa skoro trenutno

Alternativno sredstvo hlora i hipohloritima je hlor-dioksid. Gradi veoma stabilne vodene rastvore do 20 g/l, pri čemu je do pet puta rastvorljiviji od elementarnog hlora. Hlor-dioksid se obično koristi u tretmanu vode za piće u koncentracijama između 0,1-0,4 mg/l, i ima 2,63 puta veću oksidacionu moć nego gasoviti hlor. Nestabilnost gasovitog hlor-dioksida zahteva da se on proizvodi “na licu mesta”, što značajno poskupljuje investicione troškove ove dezinfekcije, a operativni troškovi su veliki jer je skup hlorit iz koga se dobija (kod nas se isključivo uvozi). Trenutno su u upotrebi tri postupka za njegovu proizvodnju:



(1-6)



Slika Šema dobijanja hlor-dioksida po postupku „gasoviti hlor – hlorit”
 (White, 1999, Dalmacija i sar., 2005)

Hlor-dioksid ima efikasna biocidna svojstva u širokom rasponu pH vrednosti (od 3 do 9), pri čemu inaktivira patogene koji su veoma otporni na delovanje hlora, tako da se hlorisanjem praktično ne mogu uništiti, kao što su *Giardia* i *Cryptosporidium*. Posebno je značajno što se njegovim korišćenjem sprečava obrazovanje opasnih SPD kao što su THM, halosirćetna kiselina i hlorfenoli, ali se stvaraju nepoželjni hloriti čija je maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) po našem Pravilniku samo 0,2 mg/l, što prilično otežava primenu hlor-dioksida u praksi, pogotovo u slučaju većeg sadržaja huminskih supstanci u vodi. Hlor-dioksid nikako ne može zameniti primenu gasovitog hlora u većim sistemima, ali može biti alternativa hipohloritima u manjim sistemima pripreme vode, kao i korisna dopuna u kombinovanim sistemima.

Dezinfekcija ultraljubičastim (UV) zračenjem

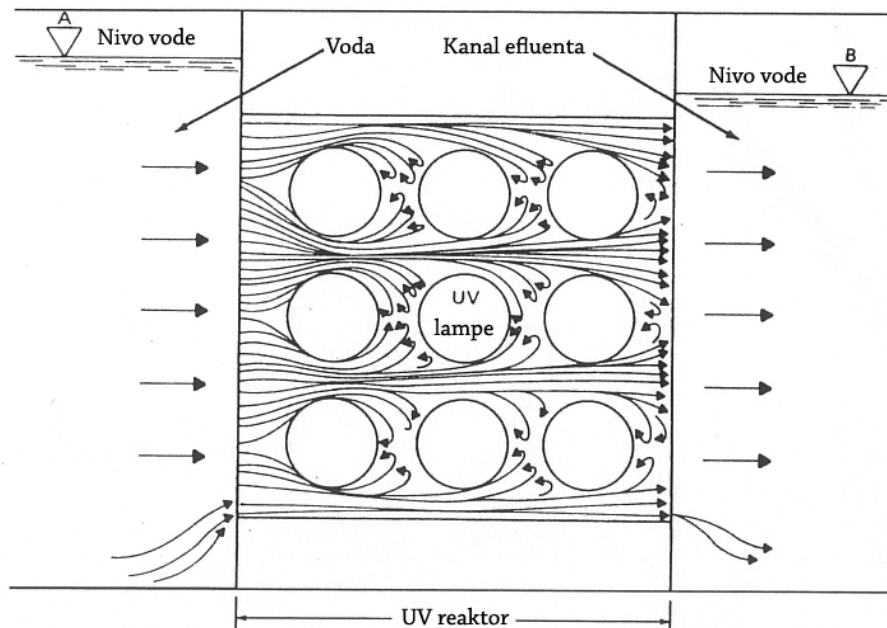
Za dezinfekciju se primenjuje deo elektromagnetne radijacije talasnih dužina 200-300 nm koji se naziva kratki UV talasi ili UV-C koji se apsorbuje u dezoksiribonukleinskoj kiselini (DNK) ćelija izazivajući promene u njenoj strukturi (zato je ta oblast opasna i za zdravlje ljudi pri dugotrajnom izlaganju). Ovo zračenje izaziva dimerizaciju susednih nukleotida timina u DNK i time sprečava prepis genetskog koda, odnosno razmnožavanje ćelija. Većina virusa sadrži samo ribonukleinsku kiselinu (RNK) koja umesto nuleotida timina ima uracil, pa su značajno manje osetljivi, zato se Rotavirus preporučuje kao najpogodniji indikatorski organizam vode za piće za ovu vrstu dezinfekcije (kod oksidativnih postupaka to su *Giardia lamblia* ciste). Posebno treba istaći da se UV zračenjem u procentu većem od 99,9 % mogu inaktivirati organizmi koji su veoma otporni na hlorisanje, a pre svega rezistentne protozoe, *Cryptosporidium parvum* oociste i pomenute *Giardia lamblia* ciste, čak pri relativno niskim dozama zračenja manjim od 15 mJ/cm², što je velika prednost ovog vida dezinefekcije (tabela 9). Glavni nedostatak je odsustvo produženog (rezidualnog) delovanja, odnosno izražena mogućnost reinfekcije u distributivnoj mreži, što znači da je UV zračenje vrlo pogodno za primarnu dezinfekciju, ali praktično neprimanjivo za sekundarnu. Jedan od nedostataka je i reaktivacija, odnosno sposobnost ozračenih organizama da se vrate u stanje pre zračenja tokom dužeg zadržavanja u vodovodnim sistemima (omogućeno prilagodljivošću živih organizama na uticaje sredine kao suštinskim uslovom za evoluciju). Razlikuju se fotoreaktivacija na sunčevoj svetlosti i oporavak u mraku, a oba procesa se zasnivaju na enzimskom delovanju.

Tabela UV doza zahtevana za sigurnu inaktivaciju (inaktivaciju poverenja) za *Cryptosporidium*, *Giardia* i viruse (Federal Register 2003, Dalmacija i sar. 2005)

Log inaktivacije poverenja	UV doza (mJ/cm ²)		
	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Giardia</i>	virusi
0,5	1,6	1,5	39
1,0	2,5	2,1	58
1,5	3,9	3,0	79
2,0	5,8	5,2	100
2,5	8,5	7,7	121
3,0	12	11	143
3,5	-	-	163
4,0	-	-	186

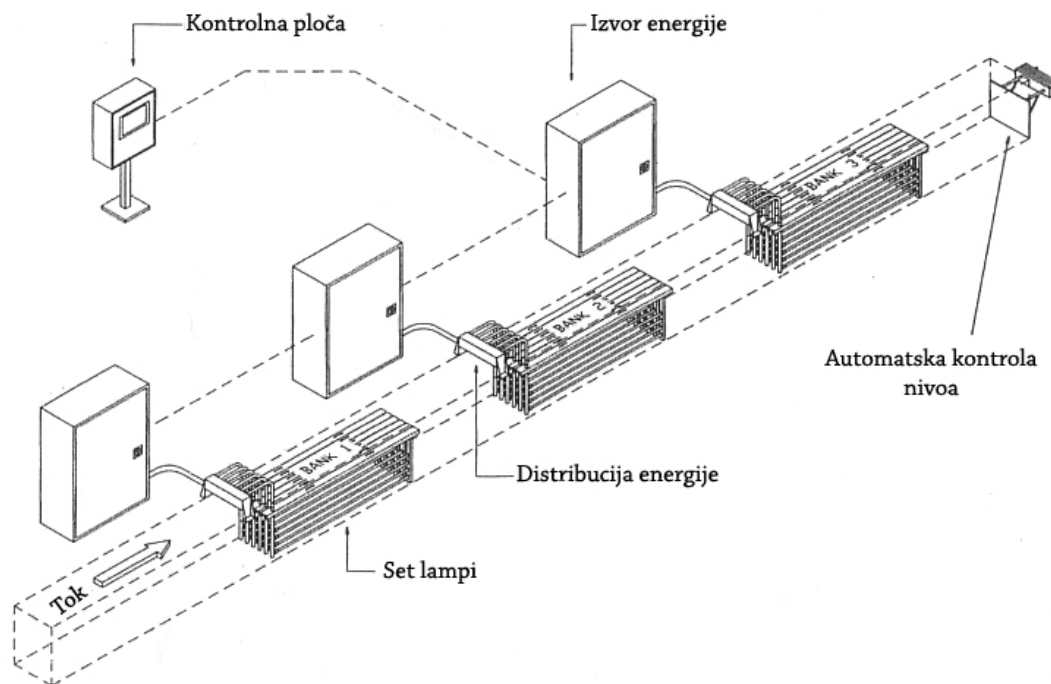
U komercijalnoj primeni, koja je u značajnom razvoju, koriste se sledeće vrste lampi:

- niskog pritiska i niskog intenziteta (monohromatske na 254 nm)
- niskog pritiska i visokog intenziteta
- srednjeg pritiska i visokog intenziteta (polihromatske 200-300 nm)
- pulsirajuće.



Slika Tipičan UV reaktor sa perpendikularnim protokom (Dalmacija i sar., 2005)

Najviše se primenjuju najstarije lampe niskog pritiska i niskog intenziteta koje su slične fluorescentnim svetilkama. U njima je pritisak manji od 1333 Pa (10 tor), sadrže 60 mg žive (što ih čini opasnim otpadom kad im prođe radni vek od oko 8000 sati), dužine su 1 m i optimalna radna temperatura im je 150 °C. Da bi se izbegli problemi sa živom razvijen je nov tip lampi na bazi amalgama. Na rezultate UV dezinfekcije značajno utiče i sadržaj rastvorenih supstanci. UV doze se određuju korišćenjem pomenutih I-t vrednosti i zavise od propisanih vrednosti inaktivacije patogena, brojnosti patogena i prisustva dispergovanih čestica i ne zavise od promena temperature. Dezinfekcioni efekat zavisi od intenziteta zračenja i vremena izlaganja, odnosno brzine opstrujavanja vode oko lampi, što je uslovljeno dizajnom reaktora. Kod konvencionalnih sistema vreme izlaganja je 10-30 s i zavisi od konfiguracije lampi. Lampe koje su smeštene blizu jedna drugoj naravno imaju veliki UV intenzitet. Turbulencija vode je stimulirana velikim brzinama, bližim razmakom lampi, perpendikularnim tokom vode u odnosu na lampu i većom dužinom. Nekoliko hiljada postrojenja za UV dezinfekciju vode za piće se koriste širom sveta jer ona tehno-ekonomski vrlo konkurentna postupcima hlorisanja i ozonozacije, često i bolja od njih.



Slika Postrojenje za UV dezinfekciju sa kontrolnim uređajima (Dalmacija i sar., 2005)

Sporedni proizvodi najčešće primenjenih dezinfekcionih postupaka

Tabela Sporedni proizvodi (nusproizvodi) dezinfekcije (SPD) hlorom/hipohloritom, hloraminom, hlor-dioksidom i ozonom (Dalmacija i sar., 2009)

Dezinfekciono sredstvo	Značajni organohalogeni SPD	Značajni nehalogenovani organski SPD	Značajni neorganski SPD
hlor/hipohlorit	trihalometani halosirćetne kiseline haloacetonitrili hloral hidrat hlorpikrin hlorfenoli N-hloramini halofuranoni	aldehidi cijanoalkanske kiseline benzen karboksilne kiseline N-nitrozodimetilamin (NDMA)	hlorat (uglavnom iz hipohlorita)
hloramin	trihalometani halosirćetne kiseline haloacetonitrili hlorcijan, hloramini hloraminokiseline hloral hidrat halo ketoni	aldehidi ketoni NDMA	nitrat nitrit hlorat hidrazin
hlor-dioksid			hlorit, hlorat
ozon	bromoform monobromsirćetna k. dibromsirćetna k. dibromaceton bromcijan	aldehidi ketoni ketokiseline karboksilne kiseline NDMA	

Poređenje najčešće primenjenih dezinfekcionih postupaka

Tabela Prednosti i nedostaci upotrebe hlora, hlor- dioksida, ozona i UV u dezinfekciji vode
(Crites and Tchobanoglous, 1998, US EPA 1999)

Prednosti	Nedostaci
Hlor	
Dobro poznata tehnologija	Opasne hemikalije kojim su izloženi radnici i stanovništvo; moraju se koristiti stroge mere zaštite na radu
Efikasno dezinfekciono sredstvo	Relativno dugo vreme kontakta u poređenju sa drugim dezinfekcionim sredstvima
Rezidual hlora mora se meriti i održavati u granicama	Kombinovani hlor je manje efikasan u inaktivaciji nekih virusa, spora i cista pri manjim dozama koje se koriste za koliformne bakterije
Kombinovani rezidual hlora može se stvoriti i dodatkom amonijaka	Rezidualna toksičnost tretiranog izlaznog toka mora se smanjiti dehlorisanjem
Germicidni reziduali hlora mogu se održavati u dugačkoj distributivnoj mreži	Obrazovanje trihlormetana i drugih sporednih produkata dezinfekcije (SPD)
Raspolaganje hemijskim sistemom za dodatne mere kao kontrola mirisa, dozirne RAS linije i dezinfekcioni pogon za vodene sisteme	Oslobađanje isparljivih organskih jedinjenja iz bazena za kontakt sa hlorom
Oksiduje sulfide	Oksiduje gvožđe, magnezijum i ostala neorganska jedinjenja (troši dezinfekciono sredstvo)
Relativno jeftin (troškovi rastu u slučaju zahtevnije protivpožarne regulative)	Oksiduje različita organska jedinjenja (troši dezinfekciono sredstvo)
Dostupan kao kalcijum i natrijum hipohlorit, što je bezbednije od gasnog hlora	Povećan nivo ukupnih rastvorenih materija u izlaznom toku
	Povećan sadržaj hlorida u otpadnoj vodi
	Povećani sigurnosni zahtevi, specijalno protivpožarna regulativa

Prednosti	Nedostaci
Hlor-dioksid	
Efikasno dezinfekciono sredstvo	Nestabilan, mora se proizvesti na licu mesta
Mnogo efikasniji od hlora u inaktivaciji većine virusa, spora, cista i dr.	Oksiduje gvožđe, magnezijum i druga neorganska jedinjenja (troši dezinfekciono sredstvo)
Biocidne osobine nisu zavisne od pH vrednosti vode	Oksiduje brojna organska jedinjenja (troši dezinfekciono sredstvo)
Pod povoljnim uslovima primene halogenovani SPD se ne stvaraju	Obrazuje SPD (hlorite i hlorate)
Oksiduje sulfide	Može dovesti do stvaranja mirisa
Razgrađuje fenole za razliku od hlora	Razlaže se na sunčevoj svetlosti

Duže rezidualno dejstvo od hlora	Povećan nivo ukupnih rastvorenih materija u izlaznom toku
	Troškovi rada mogu biti visoki (nekoliko puta skuplji od hlora, obavezno određivanje hlorita i hlorata)

Prednosti	Nedostaci
Ozon	
Efikasno dezinfekciono sredstvo	Nema trenutnih informacija o uspešnosti dezinfekcije
Mnogo efikasniji od hlora u inaktivaciji većine virusa, spora, cista i dr.	Nema rezidualnog efekta
Biocidne osobine nisu zavisne od pH vrednosti vode	Manje efikasan u inaktivaciji nekih virusa, spora, cista pri manjim dozama koje se koriste za koliformne bakterije
Kraće kontaktno vreme nego kod hlora	Obrazovanje SPD
Oksiduje sulfide	Oksiduje gvožđe, magnezijum, i ostala neorganska jedinjenja (troši dezinfekciono sredstvo)
Zahteva manje prostora	Oksidiše različita organska jedinjenja (troši dezinfekciono sredstvo)
Povećava sadržaj rastvorenog kiseonika	Tretman zahteva isključenje dotoka gasa
	Bezbednosni zahtevi
	Visoko korozivan i toksičan
	Značajna potrošnja energije
	Relativno skup postupak
	Visoka zahtevi tokom rada i održavanja
	Zahteva kiseonik velike čistoće kao polaznu sirovinu

Prednosti	Nedostaci
UV	
Efikasno dezinfekciono sredstvo	Nema trenutnih informacija o uspešnosti dezinfekcije
Bez toksičnih ostataka	Nema produžeg (rezidualnog) efekta
Efikasniji od hlora pri inaktivaciji većine virusa, spora, cisti	Manje efikasan u inaktivaciji nekih virusa, spora, cista, pri manjim dozama koje se koriste za koliformne bakterije
Ne stvara SPD pri dozama za dezinfekciju	Značajna potrošnja energije
Ne povećava nivo ukupnih rastvorenih materija u izlaznom toku	Problemi sa hidrodinamikom u UV reaktorima
Efikasan u razgradnji zaostalih organskih supstanci kao NDMA	Relativno skup postupak (cene padaju sa novim i unapređenim modelima na tržištu)
Povećana bezbednost u odnosu na druge	Zahteva se veliki broj UV lampi kada se koristi

dezinfekcione postupke	sistem „nizak pritisak i nizak intenzitet“
Zahteva manje prostora od dezinfekcije hlorom	Lampe „nizak pritisak i nizak intenzitet“ zahtevaju pranje kiselinama radi skidanja kamenca
Pri većim UV dozama od zahtevanih za dezinfekciju, UV zračenje smanjuje koncentraciju tragova organskih supstanci kao NDMA	Potreba za hemijskim sistemom za pomoćne operacije kao kontrola mirisa i dozirne RAS linije

Kombinovana i interaktivna dezinfekcija

Poslednjih godina primetna je upotreba više različitih primarnih i sekundarnih dezinfekcionih sredstava, uzastopnim (sekvencijalnim) ili istovremenim korišćenjem. Mora se imati u vidu da, iako se rado o dobro poznatim dezinfekcionim postupcima, njihovo kombinovanje je tehnologije koja se tek razvija. Moguća perspektiva daljeg usavršavanja dezinfekcionih postupaka a je u interaktivnoj dezinfekciji. Ovaj proces gde se više različitih dezinfekcionih sredstava primenjuje zajedno, pre svega u ulozi primarne dezinfekcije, može dovesti do pojave efikasnije i efektivnije patogene inaktivacije odnosno do stvaranja sinergističkog efekta. Sinergistički efekat je jednak razlici u vrednostima efekta inaktivacije postignutog istovremenom primenom većeg broja dezinfekcionih sredstava i zbira efekata ostvarenih pojedinačnim postupcima (u nekim slučajevima je prisutno i antagonističko dejstvo, pa svaku kombinaciju treba laboratorijski dobro ispitati). U poglavlju 1.2. navedeni su kombinovani i interaktivni načini dezinfekcije koji su kombinacija oksidativnih, kao i oksidativnih i neoksidativnih postupaka i zajedno čine unapređene procesi oksidacije (AOPs).

Prednosti primene interaktivne i kombinovane dezinfekcije su:

- korišćenje već poznatih i proverenih postupaka hlora, hlor-dioksida, ozona, hloramina i dr.
- može u pojedinim slučajevima da poboljša proces pripreme vode za piće
- u mnogim slučajevima je efikasnija mikrobiološka inaktivacija od pojedinačne upotrebe.

Nedostaci primene interaktivne i kombinovane dezinfekcije su:

- interaktivne tehnologije su u povelju sa mnogim nepoznanicama u vezi stvaranja SPD, međusobnih interakcija pojedinačnih sredstava i tehnikama primene.
- mogu u pojedinim slučajevima da dovedu do antagonističkih efekata dezinfekcije
- u nekim slučajevima je povećana osetljivost na pH u odnosu na pojedinačnu primenu.

Tabela Inaktivacija *Cryptosporidium parvum* interaktivno ozonom i hlor dioksidom (Provči, 2010)

Dezinfekciono sredstvo	Nivo inaktivacije (log-jedinice)		
	pH 6.0	pH 8.0	pH 11.0
Ozon	1.6	0.8	0
Hlor dioksid	0.9	1.4	2.4
Ozon praćen hlor dioksidom	4.0	3.6	2.9
Inaktivacija pripisana sinergizmu	1.5	1.4	0.5

Dezinfekcija ozonom

Ozon je prvi put upotrebljen za dezinfekciju vodenih izvorišta u Francuskoj, u ranim godinama prošlog veka, da bi se potom njegova upotreba proširila i na ostale zemlje, pre svega Zapadne Evrope i Amerike. U početku, zbog relativno visoke cene njegove proizvodnje, korišćen je u postupcima pripreme vode za piće.

Mada je, istoriski posmatrano, ozon bio prvenstveno namenjen za dezinfekciju vode, kasnija unapređenja u samom postupku proizvodnje ozona i tehnologiji rastvaranja učinila su upotrebu ozona ekonomski više konkurentnom i za dezinfekciju otpadnih voda.

Uobičajena upotreba ozona je za kontrolisanje ukusa, mirisa i komponenti koje doprinose obojenju vode. Ozon se takođe može koristiti i u tretmanu voda za kontrolisanje mirisa, a u novijim postupcima i za uklanjanje rastvorljivih, organskih supstanci, na mestima odigravanja adsorpcionih procesa pomoću ugljenika.

U daljem tekstu, pozabavićemo se karakteristikama, hemijom, proizvodnjom i analizom karakteristika ozona, kao dezinfekcionog sredstva i njegove primene.

Osobine Ozona

Ozon je nestabilan gas koji nastaje kada se molekuli kiseonika razlažu do atomskog kiseonika. Proizvodi se postupkom elektrolize, fotohemijским reakcijama ili radiohemijским reakcijama, kao i električnim pražnjenjem. Ono što je svima prepoznatljivo je njegovo nastajanje dejstvom ultraljubičaste svetlosti i munja tokom olujnih grmljavina.

Metod električnog pražnjenja se najčešće koristi za proizvodnju ozona pri upotrebi za dezinfekciju vode i otpadnih voda.

Ozon je gas plave boje na normalnoj, sobnoj temperature, karakterističnog mirisa. Može se detektovati u opsegu koncentracija od 2×10^{-5} do 1×10^{-4} g/m³ odnosno od 0.01 do 0.05 ppm_v (zapreminskih ppm). Njegov veoma karakterističan miris nam omogućava da ga obično možemo detektovati ispod koncentracija koje bi mogle biti štetne po zdravlje ljudi. Stabilnost ozona u vazduhu je veća nego u vodi, ali u oba slučaja je vreme raspadanja reda veličine minuta. Gasoviti ozon je eksplozivan kada koncentracija dostigne vrednost od oko 240 g/m³ (približno 20% težinskih, u vazduhu). Osobine ozona su date u *Tabeli 2-1*. Rastvorljivost ozona u vodi je određena Henrijevim zakonom. Karakteristične vrednosti Henrijevih konstanti su date u *Tabeli 2-2*.

Tabela Osobine ozona^a

Osobina	Jedinica	Vrednost
Molarna masa	g	48,0
Tačka ključanja	⁰ C	-111.9±0.3
Tačka topljenja	⁰ C	-192.5±0.4
Latentna toplota isparavanja na 111,90C	kJ/kg	14.90

Gustina u tečnom stanju na - 1830C	Kg/m ³	1574
Gustina u parnoj fazi na 0°C i 1 atm	g/mL	2.154
Rastvorljivost u vodi na 20.0°C	mg/L	12.07
Pritisak pare na - 183°C	kPa	11.0
Gustina pare u odnosu na suv vazduh na 0°C i 1 atm	/	1.666
Specifična zapremina pare na 0°C i 1 atm	M ³ /kg	0.464
Kritična temperatura	⁰ C	-12.1
Kritičan pritisak	kPa	5532.3

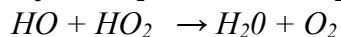
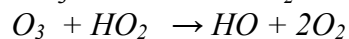
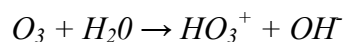
^a Delimično prerađeno od Rice (1996), U.S. EPA (1986); While (19991)

Tabela Vrednosti Henrijeve konstante za ozon^a

Temperatura ⁰ C	Henrijeva konstanta atm/mol frakcije
0	1940
5	2180
10	2480
15	2880
20	3760
25	4570
30	5980

Hemija Ozona

Neke od hemijskih osobina koje ispoljava ozon mogu se objasniti njegovom reakcijom razgradnje, za koju se veruje da se odigrava na sledeći način:

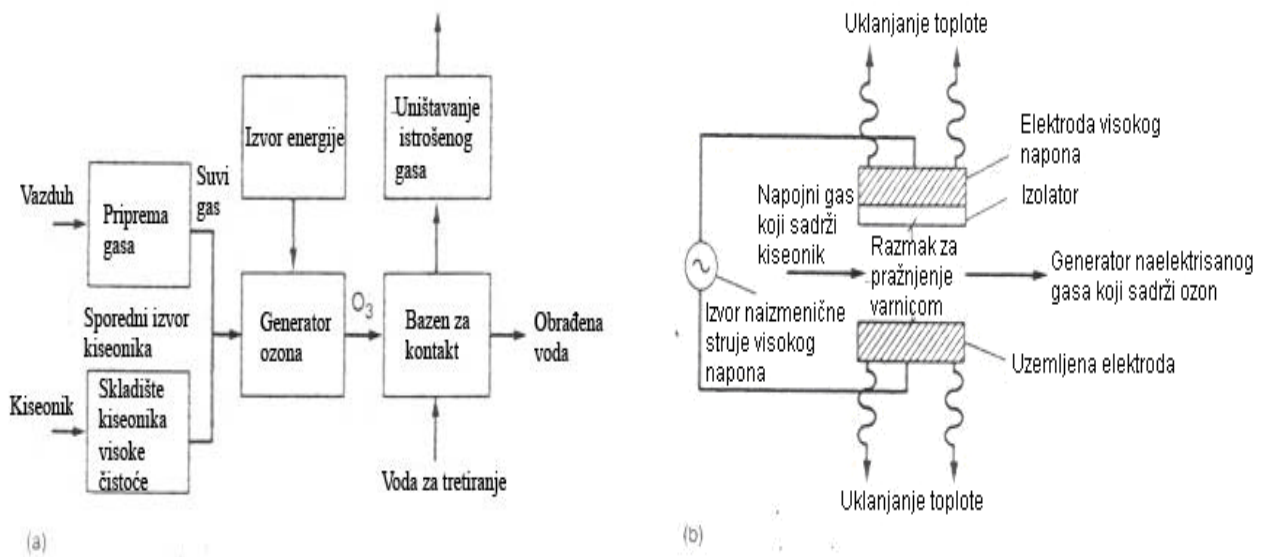


Obrazovani slobodni radikali, HO₂ i HO, imaju veliku oksidacionu moć i verovatno su aktivni učesnici u procesu dezinfekcije. Ovi slobodni radikali takođe poseduju oksidacionu snagu da reaguju sa nečistoćama u vodenom rastvoru.

Komponente sistema za dezinfekciju ozonom

Kompletan sistem za dezinfekciju ozonom, kao što je prikazano na *Slici 2-1/a*, se sastoji iz sledećih komponenti:

(1) snabdevanje energijom, (2) postrojenja za pripremu napojnog gasa, (3) postrojenja za proizvodnju ozona, (4) postrojenja za obezbeđivanje kontakta ozona sa tečnošću koja se dezinfikuje i (5) postrojenja za razgradnju izdvojenog gasa (*Rice. 1996*).



Slika - Elementi sistema za dezinfekciju ozonom

(a) šematski dijagram kompletnog sistema za dezinfekciju ozonom i
 (b) šematski prikaz detalja ozonskog generatora (Preuzeto iz U.S. EPA, 1986)

Energetski zahtevi

Glavni energetski zahtevi odnose se na pretvaranje kiseonika u ozon. Dodatna energija je potrebna za pripremu napojnog gasa, kontakt ozona, razgradnju zaostalog ozona i za kontrolne i merne uređaje. Energetski zahtevi za osnovne komponente su navedeni u Tabeli 2-3.

Tabela Tipični energetski zahtevi pri korišćenju ozona

Komponenta	kWh/kg ozona
Priprema vazduha (kompresor i sušnice)	4.4-6.6
Stvaranje ozona:	
Dotok vazduha	3.2-19.8
Čisti kiseonik	6.6-13.2
Kontakt vode sa ozonom	2.2-6.6
Sve ostale potrošnje	1.2-2.2

Priprema napojnog gasa

Ozon se može proizvesti koristeći vazduh, vazduh obogaćen kiseonikom ili kiseonik visoke čistoće. Ako se za proizvodnju ozona koristi vazduh on se mora pripremiti uklanjanjem vlage i čestica, pre uvođenja u generator ozona. Sledeće faze se moraju izvršiti pri pripremi vazduha:

- (1) kompresija vazduha,
- (2) hlađenje i sušenje vazduha i
- (3) filtriranje vazduha.

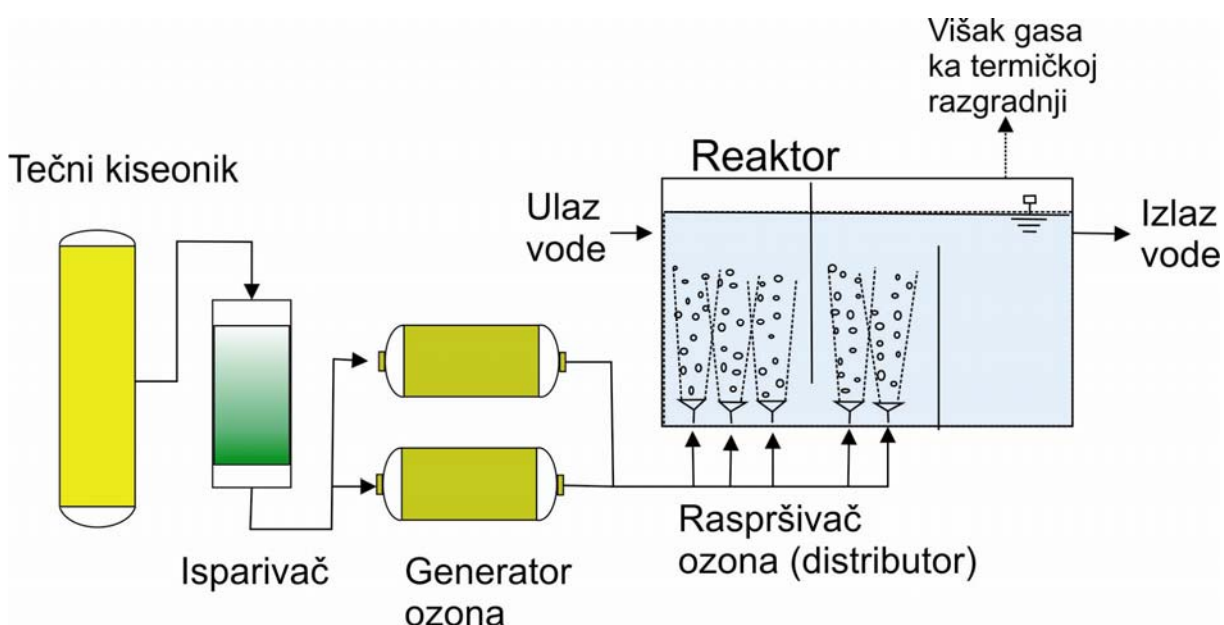
Ako se koristi kiseonik visoke čistoće, faza pripreme nije potrebana.

Proizvodnja ozona

Ozon je hemijski veoma nestabilan, pa se veoma brzo razlaže do kiseonika nakon stvaranja i stoga se mora proizvoditi na samom mestu upotrebe. Danas, najefikasniji metod za proizvodnju ozona je električnim pražnjenjem. Nezavisno da li se proizvodi iz vazduha ili iz kiseonika visoke čistoće, neophodno je stvariti visoki napon na zazoru između blisko postavljenih elektroda (pogledati *Sliku 2-1/b*), kroz koji će gas proći. Korona visoke energije stvorena ovim rasporedom elektroda razlaže jedan molekul kiseonika, koji se udružuje sa druga dva molekula kiseonika i obrazuju se dva molekula ozona. Struja gasa obrazovana ovim procesom iz vazduha može sadržati oko 1 do 3 težinska procenta ozona, a iz čistog kiseonika oko tri puta više, tj. 3 do 10 procenta, posebno primenom najnovije generacije ozonskih generatora.

Reaktori za kontakt sa ozonom

Koncentracija ozona proizvedenog bilo iz vazduha ili čistog kiseonika je tako niska, pa je efikasnost prenosa do tečne faze veoma važna pri ekonomskim razmatranjima isplativosti korišćenja ozona. Iz ovog razloga, najčešće se koriste zatvorene, relativno duboke komore za kontakt ozona i vode. Šematski prikaz tipičnog procesa dezinfekcije ozonom je prikazan na *Slici 2-2*. Ozon se dovodi u kontakt sa vodom u nekoliko redno povezanih zatvorenih komora za kontakt. U prvu komoru se uvodi na dnu, pomoću poroznih difuzera ili posebnih injektora. Brzo reagovanje ozona sa jedinjenjima odigrava se u prvoj komori. Mešavina voda-ozon zatim ulazi u drugu komoru, gde se odigravaju sporije reakcije. Dezinfekcija, se generalno, odigrava u drugoj komori. Treća komora služi za kompletiranje sporih reakcija i da omogući razlaganje ozona. Specijalno dizajnirani ugradni statički mešači su takođe usavršeni za poboljšanje rastvaranje ozona u vodi. Pravilno konstruisan difuzerski sistem treba normalno da obezbedi rastvaranje od oko 90% unete količine ozona u vodu.



Slika - Tipična šema načina primene ozona pri dezinfekciji

Razlaganje viška gasa

Veoma je važno znati da je ozon ekstremno iritirajući i otrovan gas, pa se kompletna gasna struja iz komore za kontakt ozon-voda, mora posebno tretirati, kako bi se razložio sav zaostali, neprereagovali ozon. Proizvod koji se dobija razlaganjem zaostalog ozona je čist kiseonik, koji se može reciklovati na ulaz u generator za proizvodnju ozona. Način uvođenja ozona, konstrukcione karakteristike reaktora, kao i fluidno-mehanički parametri u sistemu zavise od inventivnosti projekatana u konkretnim slučajevima.

Efikasnost ozona kao dezinfektanta

Ozon je krajnje reaktivan oksidans i generalno se veruje da se uništavanje bakterija kroz proces ozonizacije odigrava direktno razgradnjom ćelijskog zida (ćelijsko razaranje). Uticaj prisutnih sastojaka u vodi na dezinfekciju ozonom, dat je u sledećoj *Tabeli*.

Ozon je takođe veoma efikasno anti-virusno sredstvo i uopšteno se veruje da je mnogo efikasniji od hlora. Ozonizacijom ne nastaju rastvorene čvrste materije i nije pod uticajem amonijumovog jona kao i pH vode. Iz ovih razloga, ozonizacija se smatra alternativom bilo procesa sa hlorom bilo sa hipohloritom, specijalno tamo gde se zahteva dehlorinacija i gde su dostupna postrojenja za kiseonik visoke čistoće u pogonu gde se i vrši tretman.

Model dezinfekcionog procesa sa ozonom

Isti model koji se može primeniti za većinu dezinfekcionih procesa, važi i za ozon, pa važi (Finch and Smith; 1989, 1990; U.S. EPA, 1986):

$$\begin{aligned} N/N_0 &= 1 && \text{za } U < q \\ N/N_0 &= [U/q]^{-n} && \text{za } U > q \end{aligned}$$

gde je N = broj organizama zaostao posle dezinfekcije
 N_0 = broj organizama pre dezinfekcije
 U = korišćena (ili prenesena) doza ozona, mg/L
 n - nagib krive zavisnosti dozirne količine
 q - vrednost preseka x ose pri $N/N_0 = 1$ ili $\log N/N_0 = 0$ (prihvaćeno da je jednako početnoj potrebnoj količini ozona)

Tabela Uticaj sastojaka u vodi pri upotrebi ozona za dezinfekciju voda

Sastojak	Efekat
BOD, COD, TOC, i dr	Organska jedinjenja koja sadže BOD i COD mogu povećati potrošnju ozona. Stepenn uticaja zavisi od njihovih funkcionalnih grupa i hemijske strukture
Huminske materije	Utiču na brzinu razlaganja ozona i potrošnju
Ulja i masti	Može povećati potrebu za ozonom

Ukupno suspendovane materije (TSS)	Povećava potrebu za ozonom i štiti uočene bakterije
Alkalinitet	Nema ili mali efekat
Tvrdoća	Nema ili mali efekat
Amonijak	Nema ili mali efekat, može reagovati pri visokim pH
Nitriti	Oksidišu se ozonom
Nitrati	Mogu smanjiti efikasnost ozona
Gvožđe	Oksidišu se ozonom
Mangan	Oksidišu se ozonom
pH	Utiče na brzinu razlaganja ozona

Zahtevana doza ozona mora se povećati vodeći računa o efikasnosti prenosa mase ozona u tretiranu vodu. Zahtevana doza može se izračunati iz sledećih jednačina:

$$D = \left(\frac{U}{TE} 100 \right)$$

Gde je D = ukupna zahtevana doza ozona, mg/l
U = upotrebljena (ili dopremljena) doza ozona, mg/l
TE = efikasnost prenosa ozona, %

Tipična efikasnost prenosa ozona varira između 80 do 90 procenta.

Obrazovanje nus-proizvoda i njihova kontrola

Kao i kod hlora, obrazovanje neželjenih nusproizvoda je jedan od problema koji se povezuju i sa upotrebom ozona kao dezinfekcionog sredstva. Stvaranje i kontrola DBP-a pri upotrebi ozona biće razmatrana u sledećim delovima. Jedna od prednosti ozona je da ne obrazuje hlorirane sporedne proizvode dezinfekcije, ali se mogu obrazovati određeni aldehidi, različite kiseline, i aldo- i keto-kiseline, kada nije prisutna dovoljna količina bromidnog jona. Specifična količina i relativna raspodela jedinjenja će zavisiti od prirode, predhodno, prisutnih jedinjenja. S obzirom da hemijska priroda voda varira od lokacije do lokacije, pre definisanja tehnoloških parametara, preporučljivo je uraditi ispitivanje na pilot jedinici, kako bi se utvrdila efikasnost ozona kao dezinfekcionog sredstva.



Slika Hlorinatori za doziranje gasnog hlora



Slika Rotometar za ručno podešavanje doze hlora



Slika VIS spektrofotometar za određivanje NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , Fe, Al, SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Mn, fenola...



Slika Aparatura za određivanje utroška KMnO_4 , i pripremu za spektrofotometrijska merenja