

KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET U SPLITU
SVEUČILIŠTA U SPLITU

ZAVOD ZA KEMIJSKO INŽENJERSTVO

Renato Stipišić

OPERACIJE ODVAJANJA U ZAŠTITI OKOLIŠA

(Skripta za internu upotrebu)

Split, 2011.

PREDGOVOR

Skripta "Operacije odvajanja u zaštiti okoliša" namjenjena je studentima koji su upisali predmet "Kemijsko inženjerstvo u zaštiti okoliša" na stručnom studiju kemijske tehnologije pri Kemijsko-tehnološkom fakultetu, kao i svima drugima koji se susreću s problemima vezanim uz operacije odvajanja u zaštiti okoliša.

U prvom dijelu skripte definirani su grubo disperzni sustavi te principi njihove karakterizacije upotrebom dvaju parametara: stanjem izmješanosti i stanjem disperznosti. Na karakterizaciju disperznih sustava nadovezuju se opće postavke operacija odvajanja disperzne od kontinuirane faze, te su sagledane jedinične operacije odvajanja u sustavima čvrsto / kapljevito, kapljevito / kapljevito i čvrsto / plinovito koje su nezaobilazne u zaštiti okoliša.

Objavljivanju skripte poseban doprinos dali su prof.dr.sc. Nenad Kuzmanić i prof.dr.sc. Davor Rušić, koji su pregledali i recenzirali tekst.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. POSTUPCI ODVAJANJA | 2 |
| 2.1. Karakterizacija disperznih sustava | 2 |
| 2.2. Djelotvornost separatora | 8 |
| 2.3. Odvajanje u sustavima čvrsto / kapljevito | 11 |
| 2.3.1. Zakonitosti gibanja čestica kroz fluid (optjecanje) | 11 |
| 2.3.2. Rešetkanje | 19 |
| 2.3.3. Taloženje (sedimentacija) | 20 |
| 2.3.3.1. Gravitacijsko taloženje | 21 |
| 2.3.3.2. Uređaji za gravitacijsko taloženje | 32 |
| 2.3.3.3. Centrifugalno taloženje | 36 |
| 2.3.3.4. Uređaji za centrifugalno taloženje | 39 |
| 2.4. Odvajanje u sustavima kapljevito / kapljevito | 44 |
| 2.4.1. Flotacija (isplivavanje) | 44 |
| 2.4.1.1. Uređaji za flotaciju | 46 |
| 2.5. Odvajanje u sustavima čvrsto / plinovito | 48 |
| 2.5.1. Otprašivanje | 48 |
| 2.5.1.1. Uređaji za suho otprašivanje | 48 |
| 2.5.1.2. Uređaji za mokro otprašivanje | 63 |
| 2.6. Adsorpcija | 66 |
| 2.6.1. Uređaji za adsorpciju | 68 |
| 2.7. Membranski postupci | 72 |
| 3. LITERATURA | 80 |

1. UVOD

Zbog eksponencijalnog rasta stanovništva na Zemlji te s tim u svezi povećane potrebe za hranom i industrijskim proizvodima, znatno su se povećale količine otpadnih tvari i energije koje se ispuštaju u okoliš. Razvojem kemijske industrije sredinom 50-tih godina prošlog stoljeća, pojavile su se umjetne tvari i spojevi kojih nikada nije bilo u prirodi, pa nisu ni postojali organizmi koji bi takve spojeve razgradili. U ovisnosti o veličini prihvatne sposobnosti pojedinih ekoloških sustava bilo je potrebno manje ili više vremena da se uoče poremećaji prirodne biološke ravnoteže.

Nakon razdoblja naglog rasta i razvoja industrijske proizvodnje, te nekontrolirane uporabe prirodnih bogatstava svijet se našao na prekretnici koja se najčešće označava prijelazom na planiranje budućih djelatnosti uz "održivi razvitak" (zadovoljavanje sadašnjih potreba bez ugrožavanja mogućnosti budućih naraštaja u zadovoljenju svojih potreba). Takav pristup zahtijeva drugačiji način razmišljanja i ponašanja svakog pojedinog člana ljudske zajednice.

U razvijenim je zemljama unaprjeđenje i očuvanje okoliša uključeno u održavanje svih djelatnosti, a ujedno je i sastavni dio svake odluke o planiranom razvoju.

2. POSTUPCI ODVAJANJA

U svrhu zaštite okoliša potrebno je ukloniti neželjene tvari, koje se javljaju kao posljedica različitih ljudskih djelatnosti i industrijskih procesa, čije je nastajanje praktički nemoguće izbjeći. Pri tome se najčešće koriste postupci odvajanja (separacije) pri čemu se vrši odvajanje disperzne faze od kontinuirane faze.

Procesi odvajanja u zaštiti okoliša najčešće se provode u sustavima:

- čvrsto / kapljevito,
- čvrsto / plinovito,
- kapljevito / kapljevito,
- plinovito / plinovito

U idealnim slučajevima procesima odvajanja trebale bi se dobiti potpuno izdvojene faze. Međutim, u praksi je odvajanje uvijek nepotpuno te se kvaliteta odvajanja izražava djelotvornošću separatora.

2.1. Karakterizacija disperznih sustava

Karakterizacija disperznih sustava predstavlja opis primarnih svojstava čestica (veličina, raspodjela, oblik, mikrostruktura, osobine površine i dr.) i fluida (gustoća i viskoznosti), te međusobnog prostornog položaja čestica. U praksi definirati stanje grubodisperznog sustava znači prikazati:

- sastav materijala i homogenost mješavine tzv. stanje izmješanosti,
- geometrijske značajke disperzne faze tzv. stanje disperznosti odnosno granulometrijsko stanje.

Sastav materijala definira se količinom komponenti ili faza prisutnim u promatranom sustavu, a izražava se volumnim ili masenim udjelom.

Za sustave s relativno slobodnom disperznom fazom volumni udio te faze računa se prema izrazu:

$$\varphi_d = \frac{V_d}{V_d + V_k} \quad (1)$$

gdje je: V_d - volumen disperzne faze,
 V_k - volumen kontinuirane faze.

Disperzni sustav u kojemu je, zbog povećanog volumnog udjela disperzne faze, ograničeno kretanje čestica naziva se pakovanje. Sastav materijala ovakvih sustava izražava se vanjskom volumnom poroznošću, koja se obično zove samo poroznost.

$$\varepsilon = \frac{V_d}{V_d + V_k} \quad (2)$$

Poroznost nekog disperznog sustava ovisi o veličini i obliku čestica, te strukturi pakovanja (Tablica 1.)

| Sustav | ε |
|-----------------|---------------|
| Riječni pijesak | 0.39 - 0.40 |
| Ugljena prašina | 0.44 - 0.66 |
| Zrna žita | 0.31 - 0.46 |
| Filtarski kolač | 0.50 - 0.90 |
| Briketi | 0.05 - 0.20 |

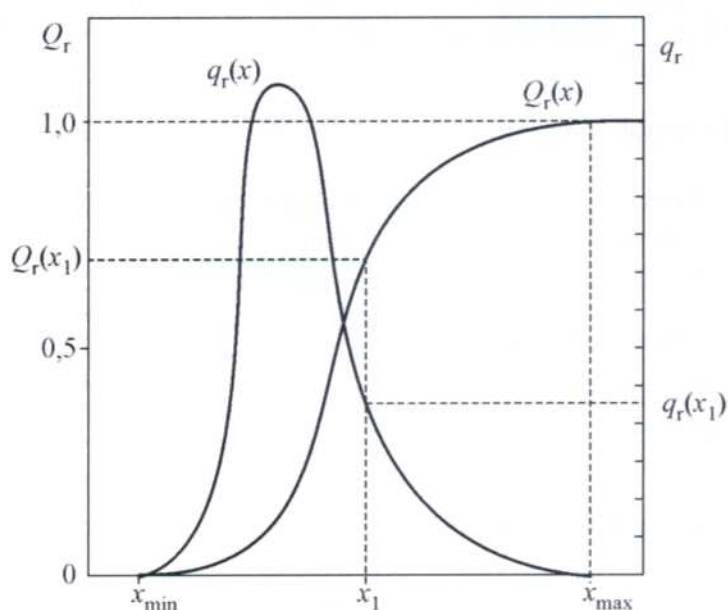
Tablica 1. Poroznost disperznih sustava

Vladanje i svojstva disperznih sustava u velikoj mjeri ovise o strukturi disperzne faze. Struktura disperzne faze izražava se količinskom raspodjelom mjere finoće (parametrima disperznosti) i morfološkim svojstvima.

Kvantitativno definiranje količinske raspodjele mjere finoće zahtijeva poznavanje raspodjele veličina čestica. Budući da su čestice obično nepravilnog oblika karakteriziraju se najčešće ekvivalentnim promjerom kugle.

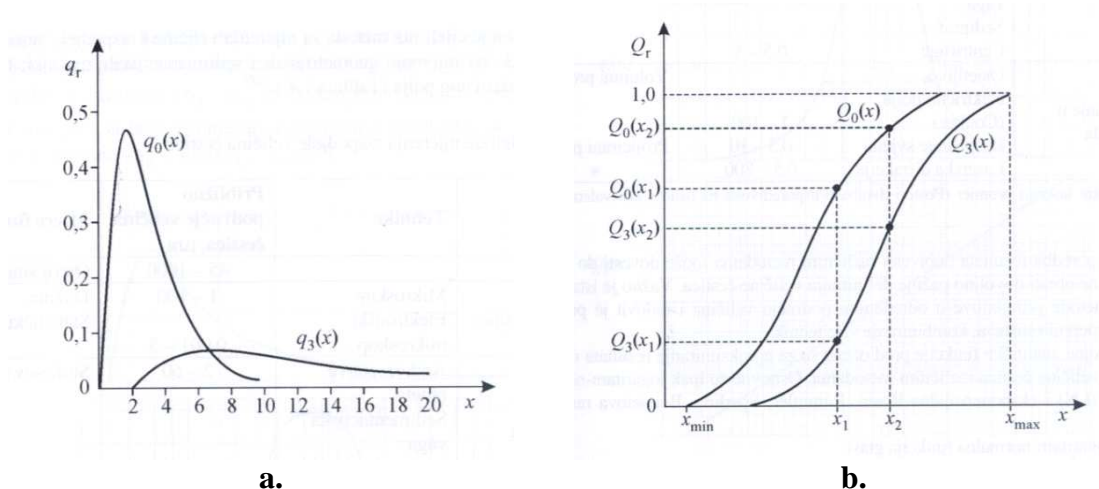
Različite metode mjerenja veličine definiraju različite oznake finoće i vrlo je važno izabrati svojstvo relevantno za odvijanje procesa. Tendencija je izraziti veličinu čestica volumnim ili površinskim promjerom.

Količinska raspodjela (izražena brojem čestica, masom ili volumenom) mjere finoće prikazuje se funkcijom gustoće raspodjele, $q_r(x)$ ili kumulativnom funkcijom raspodjele, $Q_r(x)$ (Slika 1.)



Slika 1. Funkcija gustoće raspodjele, $q_r(x)$ i funkcija raspodjele, $Q_r(x)$

Indeks r ukazuje na način izražavanja količine ($r = 0$ znači da je raspodjela brojčana, a $r = 3$ znači da je masena odnosno volumna). (Slika 2.)



Slika 2. Funkcija raspodjele (a) i kumulativna funkcija raspodjele (b) za različite načine izražavanja količine

Za mjerenje veličine i raspodjele čestica koriste se različite metode. Usporedba rezultata može dovesti do pogrešnih zaključaka ukoliko se ne obrati pažnja na definiranje veličine čestica. Osnovne analitičke funkcije za aproksimiranje rezultata mjerenja raspodjele veličina čestica različitim metodama su:

- logaritam - normalna raspodjela (LN),
- eksponencijalna Rosin, Rammler, Sperling, Bennetova raspodjela (RRSB).

Logaritam - normalna funkcija raspodjele dana je izrazom:

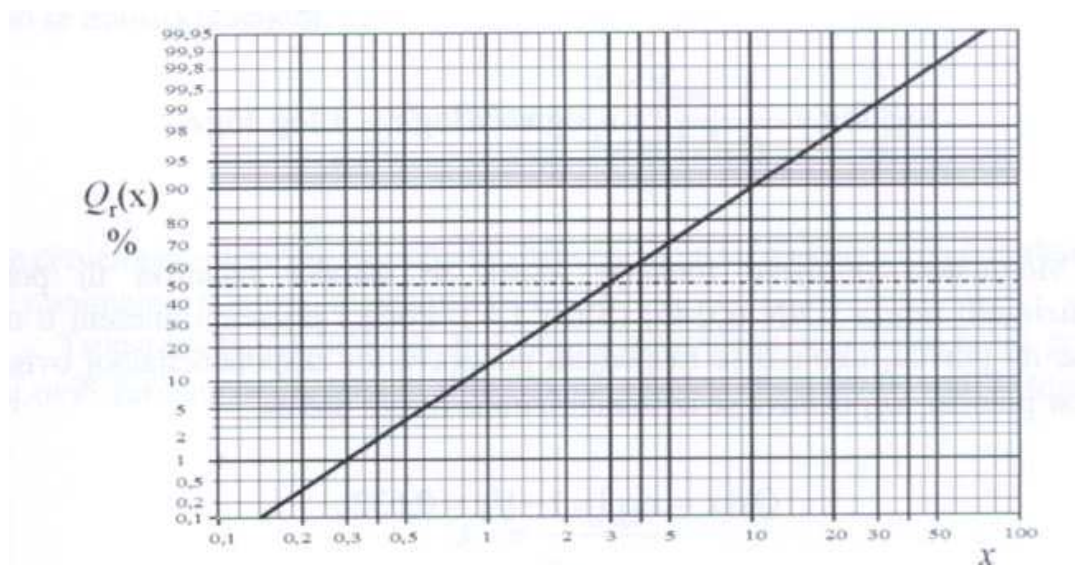
$$Q_r(x) = \frac{1}{\sigma_{lg} \sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{\log e}{x} \exp \left[-\frac{(\log x - \log x_{50/r})^2}{2\sigma_{lg}^2} \right] dx \quad (3)$$

LN - funkcija je definirana parametrom položaja x_{50} i parametrom raspršenosti, σ_{lg} .

Parametar položaja nam definira veličinu čestice od koje je 50 % manjih u sastavu, a parametar raspršenosti je standardna devijacija logaritma varijable x , odnosno:

$$\sigma_{lg} = \frac{\log(x_{84.1} / x_{15.9})}{2} \quad (4)$$

Primjenjivost funkcija testira se računski ili pomoću standardnih predložaka (Slika 3.). Nalaze li se podaci mjerenja na pravcu, raspodjela se može opisati predloženom funkcijom odnosno izraziti njenim karakterističnim veličinama.



Slika 3. Predložak za LN - funkciju raspodjele

Eksponencijalna Rosin, Rammler, Sperling, Bennetova raspodjela (RRSB) funkcija glasi:

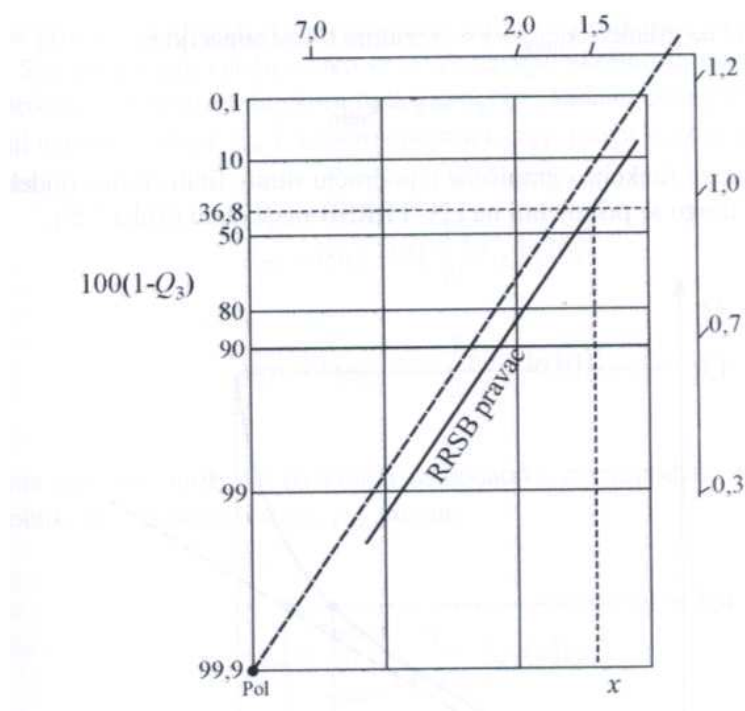
$$Q_3(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{x_{63}}\right)^n\right] \quad (5)$$

RRSB funkcija je definirana parametrom položaja x_{63} i parametrom raspršenosti n .

Osnova grafičkog prikazivanja je izraz:

$$\log\left(\log \frac{1}{1 - Q_3(x)}\right) = n \log x - n \log x_{63} + \log \log e \quad (6)$$

Standardizirani predložak RRSB - funkcije prikazan je na slici 4.



Slika 4. Predložak za RRSB - funkciju raspodjele

Parametar položaja x_{63} očitava se iz predloška prema:

$$Q_3(x = x_{63}) = 1 - \frac{1}{e} = 0.632 \quad (7)$$

Parametar raspršenosti n izračuna se iz nagiba pravca ili se očitava s obruba predloška.

Za interpretaciju eksperimentalnih rezultata pogodniji su parametri srednji maseni promjer, \bar{x}_m i specifična površina, S_m .

Srednji maseni promjer računa se prema izrazu:

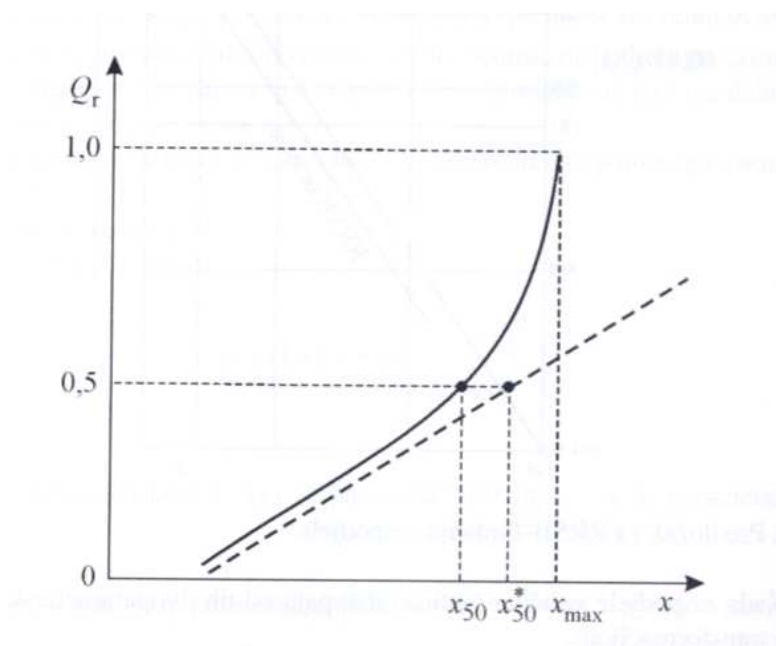
$$\bar{x}_m = x_{50.3} \exp \frac{1}{2} (\sigma_{lg} \ln 10)^2 \quad (8)$$

Specifična površina se može izračunati prema izrazu:

$$S_m = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left(\frac{6}{x \psi \rho_{\xi}} \right) q_3(x) dx \quad (9)$$

Kada raspodjele veličina čestica odstupaju od tih dvoparametarskih funkcija vrši se transformacija:

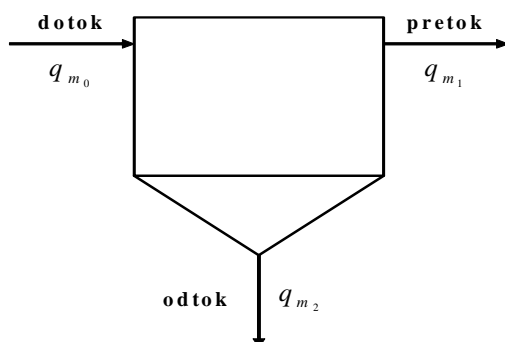
$$x^* = x_{\max} \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x} \quad (10)$$



Slika 5. Transformacija LN - funkcije raspodjele

2.2. Djelotvornost separatora

Na slici 6. shematski je prikazan separator u koji ulazi dotočna struja suspenzije, izražena masenim protokom (q_{m_0}), koja se razdvaja na pretok (q_{m_1}) i odtok (q_{m_2}).



Slika 6. Shematski prikaz separatora

Definiranje djelotvornosti separatora temelji se na bilanci masenog protoka, koja pretpostavlja da je maseni protok dotoka jednak sumi masenih protoka pretoka i odtoka:

$$q_{m_0} = q_{m_1} + q_{m_2} \quad (11)$$

Ukupna djelotvornost separatora (E_T) definira se omjerom masenog protoka separiranih čestica (q_{m_2}) i mase svih čestica u dotoku (q_{m_0}):

$$E_T = \frac{q_{m_2}}{q_{m_0}} \quad (12)$$

odnosno:

$$E_T = 1 - \frac{q_{m_1}}{q_{m_0}} \quad (13)$$

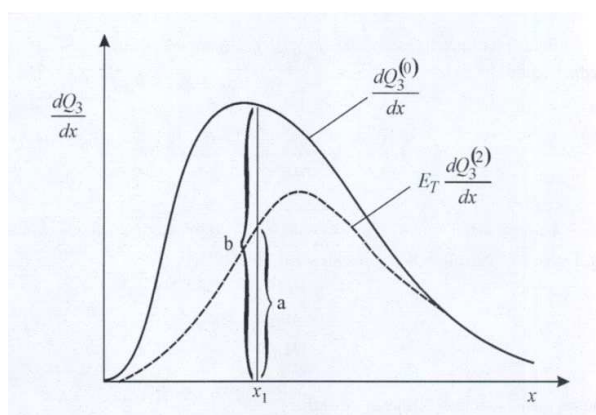
Budući da uvijek nešto kapljevine ulazi u odtok ponekad se uvodi pojam reducirane ukupne djelotvornosti:

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (14)$$

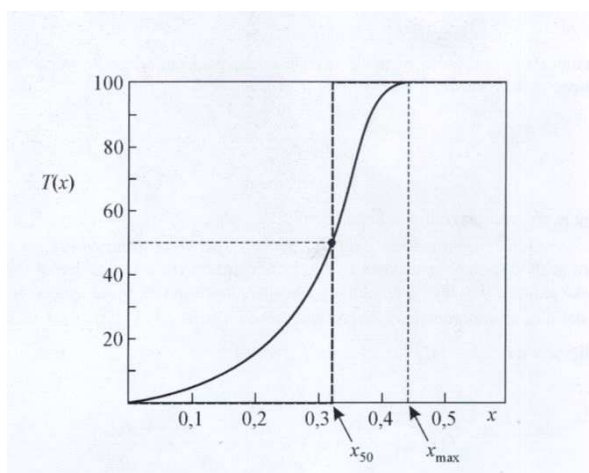
gdje je: R_f - volumni omjer odtoka i dotoka, $\frac{q_{v_2}}{q_{v_0}}$.

Određena vrijednost ukupne djelotvornosti separatora svojstvena je pojedinačnom grubodisperznom sustavu, te nije primjerena za opću ocjenu djelovanja separatora. Povoljnije je koristiti krivulju frakcijske djelotvornosti, koja je definirana omjerom mase separiranih čestica veličine x , $(q_{m_2})_x$ i mase čestica veličine x u odtoku $(q_{m_0})_x$:

$$T(x) = \frac{(q_{m_2})_x}{(q_{m_0})_x} = \frac{q_{m_2}}{q_{m_0}} \frac{dQ_3^{(2)}/dx}{dQ_3^{(0)}/dx} = E_T \frac{dQ_3^{(2)}}{dQ_3^{(0)}} \quad (15)$$



Slika 7. Određivanje vrijednosti frakcijske djelotvornosti



Slika 8. Tipična krivulja frakcijske djelotvornosti

Iz krivulje frakcijske djelotvornosti (Slika 8.) računa se oštrina separacije ($\kappa_{25/75}$, $\kappa_{10/90}$) ili granica razdvajanja (x_{gr}), tj. veličina čestice za koju je djelotvornost 100 %. U praksi se ova točka teško definira, pa se ponekad uzima veličina koja odgovara 98 % efikasnosti. Veličina

x_{98} naziva se i približna granica razdvajanja. Granična veličina koja se često uzima kao veličina (značajka) razdvajanja je i veličina x_{50} .

Krivulja frakcijske djelotvornosti, te iz nje izračunate vrijednosti, vrijedi za definirane radne uvjete separatora.

2.3. Operacije odvajanja u sustavima čvrsto / kapljevito

2.3.1. Zakonitosti gibanja čestica kroz fluid (optjecanje)

Za djelotvorno provođenje postupaka odvajanja nužno je poznavanje teorijske osnove prijenosnih pojava u takvim sustavima. Tako je za praćenje operacija odvajanja nužno poznavanje zakonitosti relativnog gibanja između čvrstih čestica i fluida tj. optjecanje fluida oko čestice. Ove pojave se ne razlikuju bilo da je čvrsta čestica nepokretna u struji fluida ili se giba kroz fluid.

Sitne čestice tonu vrlo polagano, klizeći kroz fluid bez izazivanja bilo kakvih poremećaja. Ako zamislimo da je fluid slojevite građe, izgleda kao da se čestice provlače kroz te slojeve. Takvo se gibanje naziva slojevito ili laminarno gibanje (Slika 9.a.)

Ako se kroz fluid gibaju malo krupnije čestice, koje brže padaju, doći će do uznemirenosti fluida oko padajućih čestica. Gibanje čestica bitno ne narušava slojevitost fluida, već stvara blagu valovitost oko čestice. Ovakvo gibanje naziva se prijelazno gibanje (Slika 9.b.)

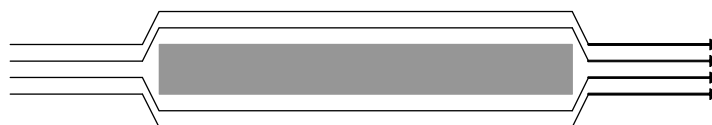
Krupne čestice padaju brzo kroz fluid pri čemu izazivaju vrtložno gibanje fluida oko i iza sebe. Najviše se vrtloga stvara tik iza čestice. Takvo gibanje naziva se vrtložno ili turbulentno gibanje (Slika 9.c.)



Slika 9. Padanje čestica kroz fluid

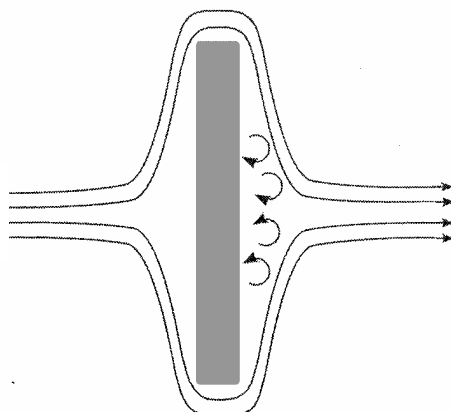
Relativno je svedjedno kreće li se fluid oko čvrste stijenke ili fluid miruje, a kreće se čvrsta čestica svojom masom i površinom. Uvijek se na granici faza čvrsto / kapljevito javljaju te pojave, uzrokovane u najvećoj mjeri silama inercije tvari koja se giba i silama trenja u granici faza realnih tvari. Fluid ima svoju inerciju (ustrajnost da ostane u određenom stanju, ovdje u stanju mirovanja). Kada tijelo pada u fluidu, zbog inercije se fluid ne zatvara odmah iza padajućeg tijela, nego u tom trenutku nastaje vakuum iza čestice koji uzrokuje gibanje fluida u taj prostor. Što je padanje brže, stvara se iza čestice veći vakuum i zbog naglog popunjavanja prostora fluidom dolazi do vrtloženja iza čestice.

Osim brzine padanja na pojave kod optjecanja utječe i oblik čestice koja se giba. Ukoliko je ravna ploča postavljena u smjeru strujanja fluida svojom po površini najmanjom osnovicom vidljivo je da otpor oblika nije bitan (Slika 10.)



Slika 10. Optjecanje fluida oko ravne ploče postavljene u smjeru strujanja fluida

Ako se ploča postavi okomito na smjer strujanja fluida dolazi do snažnog vrtloženja u odnosu na predhodni slučaj (povoljan oblik) iako je brzina gibanja fluida jednaka (Slika 11.)



Slika 11. Optjecanje fluida oko ravne ploče postavljene okomito na smjer strujanja fluida

Na temelju prethodnih razmatranja zaključuje se da pri optjecanju kod malih Reynoldsovih značajki i pogodnog oblika čvrstog tijela prevladava viskozno trenje. Međutim uvijek je prisutan i inercijski otpor (otpor oblika) jer čestice fluida izravno nastrujavaju na čvrsto tijelo te mijenjaju smjer gibanja. Kod visokih vrijednosti Re - značajki i nepodnog oblika prevladava inercijski otpor.

Ukupna sila otpora (F_R) koja se javlja pri optjecanju zbroj je sile trenja (F_{tr}) koja je posljedica viskoznog trenja i inercijske sile (F_o) koja je posljedica otpora oblika.

$$F_R = F_{tr} + F_o \quad (16)$$

Sila otpora za laminarno područje ($Re_m < 1$) može se izračunati na temelju Stokesove jednadžbe:

$$F_R = 3\pi\mu d v_t \quad (17)$$

gdje je: d - promjer čestice koja pada u fluidu,
 v_t - brzina padanja čestice

U skladu s Newtonovim istraživanjima i definiranjima sile kao veličini koja zavisi o geometrijskoj veličini, o brzini gibanja, i o gustoći dimenzijskom analizom dobiva se izraz za silu otpora koji vrijedi za cijelo područje Reynoldsovih značajki:

$$F_R = C_D A \frac{v_t^2 \rho}{2} \quad (18)$$

gdje je: A - poprečni presjek čestice,
 C_D - faktor otpora pri relativnom gibanju čestica kroz fluid.

Ako želimo dobiti silu otpora po jedinici površine:

$$\frac{F_R}{A} = C_D \frac{v_t^2 \rho}{2} \quad (19)$$

Ta je sila po jedinici površine jednaka količini kinetičke energije fluida izgubljene pri optjecanju čestice. Sila otpora posljedica je prijenosa količine gibanja pri optjecanju i izražavamo je kao gustoću toka (fluks) količine gibanja. Zbog prijenosa količine gibanja (kada se gubi dio energije) dolazi do pada tlaka koji se u sustavu čestica - fluid može usporediti s padom tlaka pri strujanju fluida kroz neku cijev kada se kinetička energija gubi trenjem fluida o stijenku cijevi. Iz Darcy - Weissbachove jednadžbe pad tlaka je jednak:

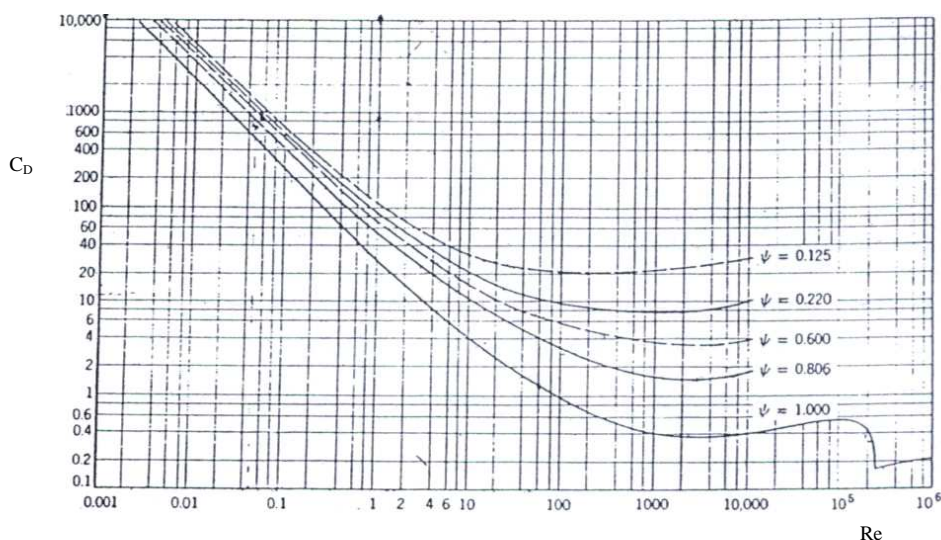
$$\Delta p = \frac{F_p}{A} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2 \rho}{2} \quad (20)$$

Sa stanovišta prijenosa može se kazati da se u sukobljavanju čestice i fluida odvija prijenos količine gibanja i zato dolazi do pada tlaka. Fluks toga prijenosa ovisi o kinetičkoj energiji određene količine fluida, o geometrijskoj veličini, te o značajkama sustava koje se izražavaju faktorom otpora C_D .

Vrijednosti faktora otpora C_D mogu se u laminarnom području jednostavno izračunati pomoću jednadžbe koja se dobiva izjednačavanjem izraza (17) i (18). Uz pretpostavku da je čestica oblika kugle, poprečnu površinu predstavlja A predstavlja krug površine $\frac{d^2\pi}{4}$ pa se dobiva:

$$C_D = \frac{24\mu}{d_c v_t \rho} = \frac{24}{Re} \quad (21)$$

Faktor otpora C_D za prijelazno i turbulentno područje očitava se iz dijagrama ovisnosti C_D o Re i faktoru oblika ili sferičnosti (ψ) (Slika 12.).



Slika 12: Ovisnost faktora otpora C_D o Re i ψ

Re se ovdje izražava kao:

$$Re = \frac{d_{ekv} v_t \rho}{\mu} \quad (22)$$

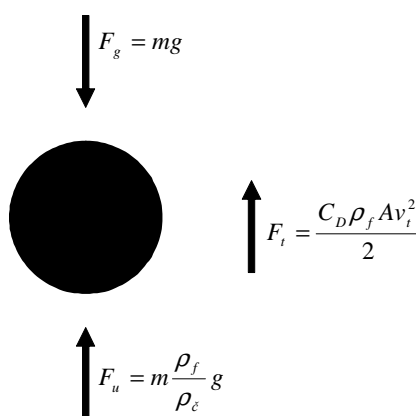
U ovom izrazu mjerodavna je geometrijska veličina d_{ekv} tj. ekvivalentni promjer čestice. Ekvivalentni promjer čestice predstavlja promjer kugle istoga volumena kao što je volumen čestice nepravilnoga oblika.

$$d_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{6V_{\check{c}}}{\pi}} \quad (23)$$

Nepravilnost oblika čestice izražava se faktorom sferičnosti (ψ).

$$\psi = \frac{A_K}{A_{\check{c}}} \quad (24)$$

gdje je: A_K - površina kugle koja ima jednaki volumen kao čestica nepravilnog oblika,
 $A_{\check{c}}$ - površina čestice nepravilnog oblika



Slika 13. Sile koje djeluju na česticu koja struji kroz fluid

Za proračunavanje površine i kapaciteta uređaja za odvajanje nužno je poznavati brzinu padanja čestica. Pomoću zakona očuvanja količine gibanja izjednačavanjem svih mjerodavnih sila koje djeluju pri padanju čestice u fluidu (sile gravitacije, uzgona i otpora) (Slika 13.) izveden je izraz za brzinu padanja čestica kroz fluid:

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_{\check{c}} - \rho_f)gd_{\check{c}}}{3C_D\rho_f}} \quad (25)$$

S obzirom na izraz (21) za izračunavanje faktora C_D , možemo iz jednačbe (25) dobiti izraz za brzinu padanja čestice kroz fluid u laminarnom području ($Re < 1$) tj. Stokesov zakon padanja čestica kroz fluid:

$$v_t = \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) g}{18\mu} \quad (26)$$

Važnost je Stokesovog izraza (26) izuzetna jer se u praksi postupci odvajanja uglavnom primjenjuju kod suspenzija s vrlo finim česticama, čija je brzina vrlo mala.

Za turbulentno područje ($10^3 < Re < 10^5$) C_D postaje konstantan i iznosi 0.44. Ako se ta vrijednost uvrsti u jednačbu (25) dobije se Newtonov zakon padanja čestica kroz fluid:

$$v_t = 1.76 \sqrt{\frac{d_c g (\rho_c - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (27)$$

Za prijelazno područje ($1 < Re < 10^3$) koristi se preuređeni oblik jednačbe (25). Pri tome se dolazi do izraza:

$$\log C_D = \log \left[\frac{4g d_c^3 (\rho_c - \rho_f) \rho_f}{3\mu^2} \right] - 2 \log Re \quad (28)$$

Dobiveni izraz predstavlja jednačbu pravca s nagibom -2. Za slučaj $Re = 1$, odnosno $\log Re = 0$ jednačba poprima oblik:

$$C_D = \frac{4g d_c^3 (\rho_c - \rho_f) \rho_f}{3\mu^2} \quad (29)$$

U ovoj jednačbi se ne pojavljuje brzina padanja čestica kroz fluid, ali se ona može odrediti koristeći se ovom jednačbom i dijagramom ovisnosti faktora otpora C_D o Re i ψ . Odrede se

koordinate toče M ($Re = 1$, $C_D = \frac{4gd_c^3(\rho_c - \rho_f)\rho_f}{3\mu^2}$) kroz koju prolazi pravac nagiba -2.

Sjecište ovog pravca s krivuljom sferičnosti daje točku kojoj odgovara određena vrijednost apscise $Re = \frac{v_t d_c \rho}{\mu}$ iz koje se izračuna brzina padanja čestice kroz fluid (v_t).

U slučaju da se traži promjer čestice, pri čemu je brzina padanja čestica poznata, polazeći iz jednadžbe (25) dolazi se do izraza:

$$\log C_D = \log \left[\frac{4g\mu(\rho_c - \rho_f)}{3\rho_f^2 v_t^3} \right] + \log Re \quad (30)$$

koji predstavlja jednadžbu pravca s nagibom +1. Za slučaj $Re = 1$, tj. $\log Re = 0$, jednadžba ima oblik:

$$C_D = \frac{4g\mu(\rho_c - \rho_f)}{3\rho_f^2 v_t^3} \quad (31)$$

Koordinate točke N kroz koju prolazi pravac nagiba +1 su ($Re = 1$, $C_D = \frac{4g\mu(\rho_c - \rho_f)}{3\rho_f^2 v_t^3}$).

Sjecište pravca s krivuljom sferičnosti daje točku iz čije se vrijednosti apscise izračunava promjer čestice koja pada kroz fluid (d_c)

Ove jednadžbe za brzinu padanja čestica kroz fluid vrijede za rijetke suspenzije. Takvo se odvajanje naziva nesmetano odvajanje jer su čestice udaljene dovoljno pa nema međusobnih sudaranja i trenja. U praksi, brzina je manje ili više smanjena jer su koncentracije suspenzija razmjerno visoke pa imamo smetano odvajanje, a pored toga čestice su najčešće nepravilnog oblika. Zbog toga se stvarna brzina ispravlja:

$$v_{tstv} = v_t K_\psi K_\phi \quad (32)$$

gdje je: K_ψ - dinamički faktor oblika koji se najčešće daje tablično,
 K_ϕ - faktor smetanog odvajanja koji se izračunava iz empirijskih jednažbi.

Vrijednosti faktora K_ψ i K_ϕ manje su od 1 tako da je stvarna brzina manja od brzine izračunate po Stokesovom zakonu.

2.3.2. Rešetkanje

Rešetkanje je postupak kojim se iz kapljevine uklanjaju krupne tvari (lišće, krpe, plastične vrećice, komadići drva i dr.) koje mogu nepovoljno utjecati na radi pumpi i ostalih uređaja u procesu. Najčešće se koristi u prvom stupnju čišćenja otpadnih i oborinskih voda.

Razlikujemo rešetkanje na rešetkama i sitima. Učinak rešetkanja ovisi o veličini slobodnog otvora kroz koji prolazi voda.

Prema razmaku između šipki rešetke se dijele na:

- široke (međurazmak 50 - 100 mm),
- srednje (međurazmak 10 - 25 mm),
- uske (međurazmak 3 - 10 mm).

Nakupljene krutine s rešetke se uklanjaju ručno ili mehanički.

Rešetke s mehaničkim čišćenjem (Slika 14.) mogu biti oblika luka ili su ravne i nagnute pod kutem od 80° od površine vode, dok se rešetke s ručnim čišćenjem sastoje od ravnih šipki nagnutih po kutem od 60° do 80° od površine vode.

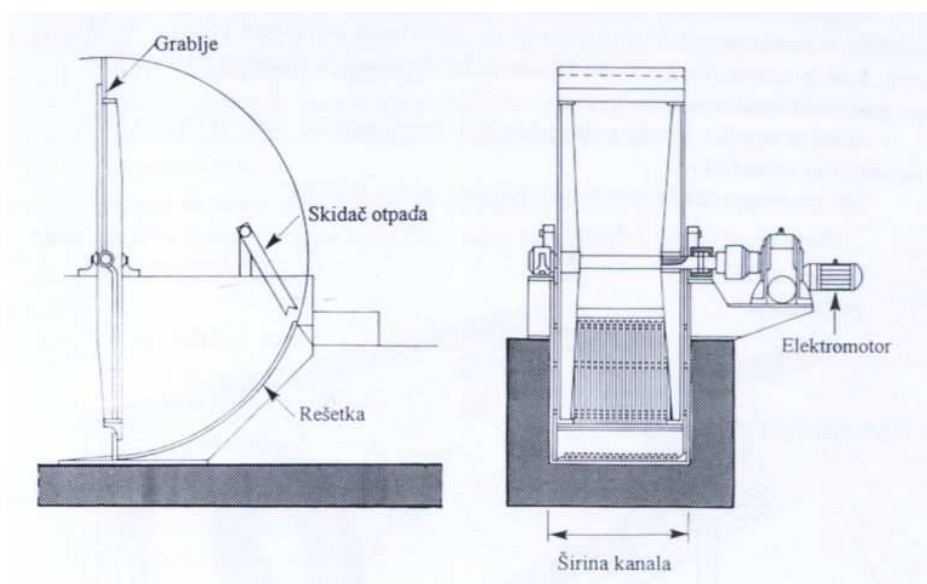
Širina rešetke računa se prema izrazu:

$$b_r = \frac{q_v(s+e)}{hvef} \quad (33)$$

gdje je:

- q_v - protok vode,
- s - debljina šipke rešetke,
- e - razmak između šipki,
- h - dubina vode u kanalu,
- v - brzina vode,
- f - stupanj zapunjenosti rešetke (0.9).

U kanalima s rešetkom može doći do sedimentacije (taloženja) krutih čestica. Da bi se to spriječilo potrebno je da je brzina strujanja otpadne vode veća od brzine sedimentacije čestica.



Slika 14. Rešetka s automatskim čišćenjem

Sita su obično izvedena u obliku valjka koji se okreće oko horizontalne osovine. Na plaštu valjka nalaze se otvori različitih veličina (najčešće od 0.3 do 3 mm).

2.3.3. Taloženje (sedimentacija)

Taloženje (sedimentacija) je operacija odvajanja faza iz suspenzije na osnovi razlike u gustoći između čvrstih čestica i kapljevina.

S obzirom na pokretačku silu taloženje možemo podijeliti na:

- gravitacijsko taloženje i
- centrifugalno taloženje.

2.3.3.1. Gravitacijsko taloženje (sedimentacija)

Gravitacijsko taloženje (sedimentacija) je operacija kojom se čvrste čestice odvajaju od kapljevine usljed djelovanja sile teže. Ako u taložnik (sedimentator) dovedemo suspenziju, čvrste čestice se istalože na dnu, a iznad njih ostaje čista kapljevina koja se može odliti. Ukoliko su čvrste čestice vrlo sitne i ako je njihova gustoća samo nešto veća od gustoće kapljevine taloženje će biti vrlo sporo.

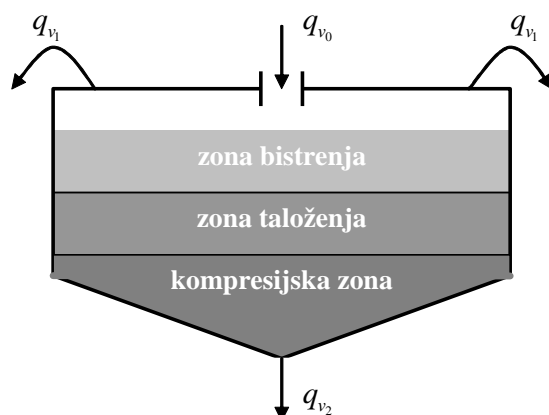
Brzina se općenito može prikazati:

$$v = \frac{h}{t} \quad (34)$$

gdje je: h - visina taložnika,
 t - vrijeme taloženja.

Iz jednadžbe (34) vidi se da će vrijeme taloženja biti kraće ukoliko je visina taložnika niža. Zbog toga se izvode taložnici malih visina, a većih promjera, kako bi čestice malih brzina taloženja što prije stigle na dno taložnika.

U praksi se operacija taloženja najčešće izvodi kontinuirano (Slika 15).



Slika 15. Shematski prikaz kontinuiranog taložnika

Dotok suspenzije u taložnik je stalan. Čvrste čestice se neprekidno talože, a čista kapljevina se prelijeva preko ruba taložnika. U donjem koničnom dijelu taložnika skuplja se mulj koji se povremeno ispušta s dna. Važno je da se suspenzija ne uzbukava za vrijeme taloženja. Umjereno miješanje pospješuje taloženje, a svako je jače miješanje usporava. Na brzinu taloženja čestica utječu masa te veličina čestica, ali i svojstva kapljevine. Kapljevina u kontinuiranom taložniku stalno struji prema vrhu taložnika. S obzirom na brzinu strujanja kapljevine javljaju se tri bitna slučaja:

- Brzina strujanja kapljevine manja je od brzine padanja čvrstih čestica ($v_L < v_t$). Čestice tonu brže nego što se podiže kapljevina. Na dnu se stvara mulj, a na vrhu se prelijeva čista kapljevina.
- Brzina strujanja kapljevine jednaka je brzini padanja čvrstih čestica ($v_L = v_t$). Čestice lebde u kapljevini (praktički ovo vrijedi za suspenzije sastavljene od čvrstih čestica jednakih masa, veličine i oblika),
- Brzina strujanja kapljevine veća je od brzine padanja čvrstih čestica ($v_L > v_t$). Taloženje nije moguće jer kapljevina odnosi čvrste čestice preko ruba taložnika.

S obzirom na izneseno, ulijevanje sedimentacije mora biti stalno nadzirano, kako bi se na vrhu taložnika, kao pretok, uvijek dobivala bistra kapljevina. To znači da brzina taloženja

čvrstih čestica najmanjih dimenzija treba uvijek biti veća od brzine strujanja kapljevine prema vrhu taložnika.

Za uspješno vođenje operacije taloženja neophodno je pravilno dimenzionirati taložnik tj. izračunati potrebnu površinu taložnika na vrhu gdje se prelijeva čista kapljevina, tzv. površinsko opterećenje.

$$A = \frac{q_{v_1}}{v_t} \quad (35)$$

gdje je: q_{v_1} - pretok (volumen kapljevine koja se prelijeva preko gornjeg ruba taložnika u jedinici vremena).

Uvrštavanjem jednadžbe (26) u (35) dobije se izraz za površinu taložnika pri nesmetanom taloženju:

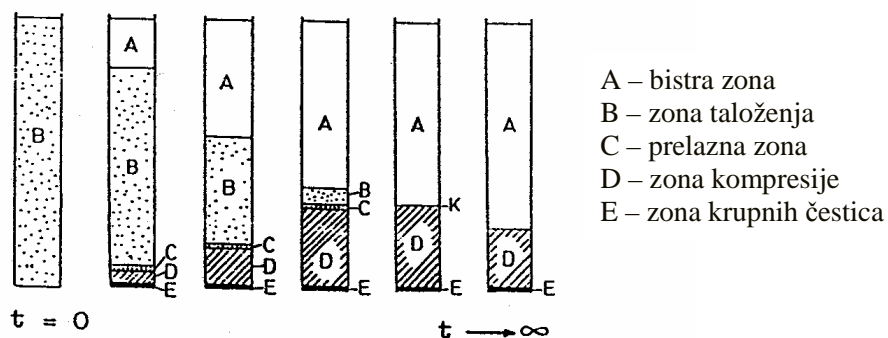
$$A = \frac{q_{v_1}}{\frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) g}{18\mu}} \quad (36)$$

S obzirom da se u praksi uvijek radi o smetanom taloženju u jednadžbu (36) uvrštavaju se faktor za oblik čestice i za smetano taloženje:

$$A = \frac{18q_{v_1}\mu}{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) g K_\psi K_\varphi} \quad (37)$$

Stvarni uvjeti se razlikuju od idealnih zbog turbulencije i nejednoliko raspodijeljenog toka, pa se izračunata površina uvećava za 50 %. U jednadžbi (37) potrebno je naznačiti vrijednost granične veličine čestice.

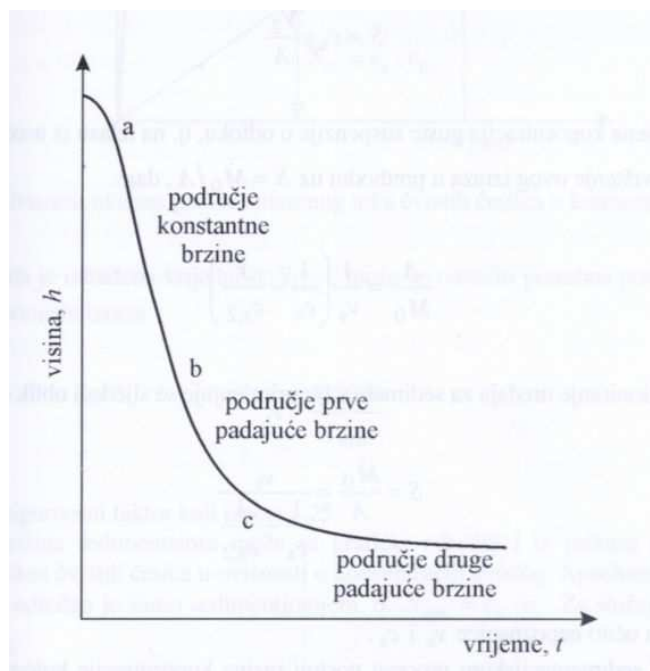
Mehanizam taloženja obično se prati u graduiranim cilindrima (menzurama) (Slika 16.). Kako bi se izbjegao utjecaj stijenke na taloženje čestica promjer cilindra treba biti veći od 0.05 m.



Slika 16. Test taloženja

Vrlo brzo nakon početka taloženja pojavljuje se izrazita granična ploha između bistre zone (A) i zone taloženja (B). Ako u suspenziji postoje krupne čestice, one brzo padaju na dno kolone (E). Iznad toga sloja, izlučivanjem čestica iz zone taloženja, skuplja se u zoni kompresije (D) gusta suspenzija. Koncentracija čestica najveća je na dnu zone kompresije i smanjuje se prema vrhu. Između zone taloženja i zone kompresije pojavljuje se prelazna zona (C). Kako vrijeme taloženja odmiče, zona taloženja postaje sve manja, dok konačno ne ostanu samo bistra zona i zona kompresije. Položaj granične plohe između te dvije zone naziva se točka kompresije. Nakon toga talog postaje sve gušći dok se visina granične plohe ne prestane mijenjati.

Na slici 17. prikazana je ovisnost visine granične plohe bistre zone (h) o trajanju procesa taloženja, tzv. krivulja taloženja. Oblik krivulje karakterističan je za svaki grubodisperzni sustav i mijenja se s promjenom koncentracije.



Slika 17. Krivulja taloženja

Pri kontinuiranom stacionarnom taloženju gibanje čvrstih čestica u svakoj točki zone taloženja sastoji se od dvije komponente: relativne brzine čvrstih čestica u odnosu na kapljevinu (v_s) i brzine oticanja guste suspenzije (v_{tr}).

$$v_{tr} = \frac{q_{v_2}}{A} \quad (38)$$

gdje je: q_{v_2} - volumni protok odtoka.

Maseni protok čvrstih čestica po jedinici površine presjeka posude ili gustoća masneog toka ili fluks čvrstih čestica ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) dan je izrazom:

$$S = \frac{q_{m_0}}{A} = c_s (v_s + v_{tr}) \quad (39)$$

gdje je. c_s - masena koncentracija čvrstih čestica

Ako se pretpostavi da je u razini otvora za odvođenje guste suspenzije $v_s = 0$:

$$S = c_{s_2} \frac{q_{v_2}}{A} \quad (40)$$

gdje je: c_{s_2} - masena koncentracija guste suspenzije u odtoku tj na izlazu iz taložnika

Uvrštavanjem (40) u (39) uz $S = \frac{q_{m_0}}{A}$:

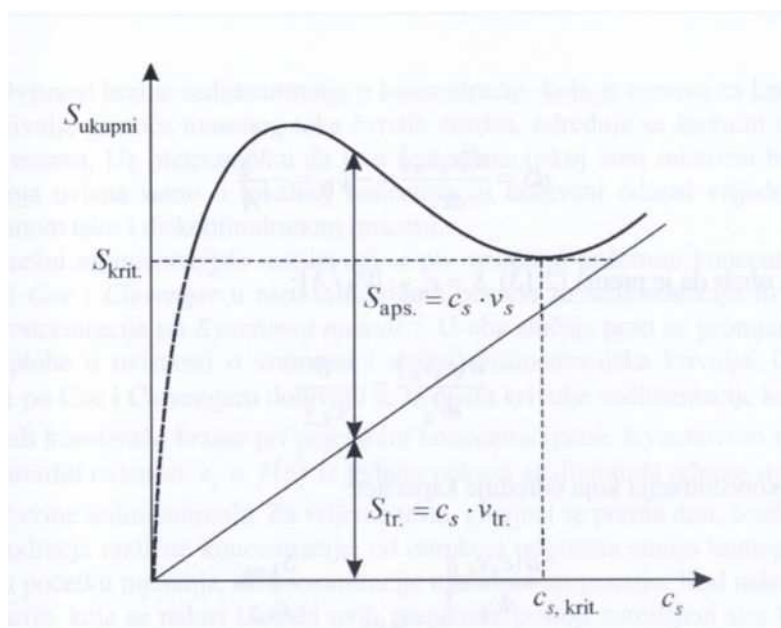
$$\frac{A}{q_{m_0}} = \frac{1}{v_s} \left(\frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_{s_2}} \right) \quad (41)$$

Za dimenzioniranje taložnika primjenjuje se slijedeći oblik jednadžbe (41):

$$S = \frac{q_{m_0}}{A} = \frac{v_s}{\frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_{s_2}}} \quad (42)$$

Očito je da su v_s i c_s nepoznanice.

Kod taloženja postoji koncentracija kojom je dan učin cijelog procesa. Ta se kritična koncentracija i pripadni joj fluks (S_{krit}) mogu odrediti iz dijagrama u kojem je dan ukupni fluks čvrstih čestica (S) u ovisnosti o njihovoj koncentraciji (c_s) (Slika 18). Ukupna gustoća masenog toka čvrstih čestica sastoji se od dva dijela: od toka uzrokovanog taloženjem i toka zbog kontinuiranog odvođenja guste suspenzije.



Slika 18. Ovisnost ukupne gustoće masenog toka čvrstih čestica o koncentraciji

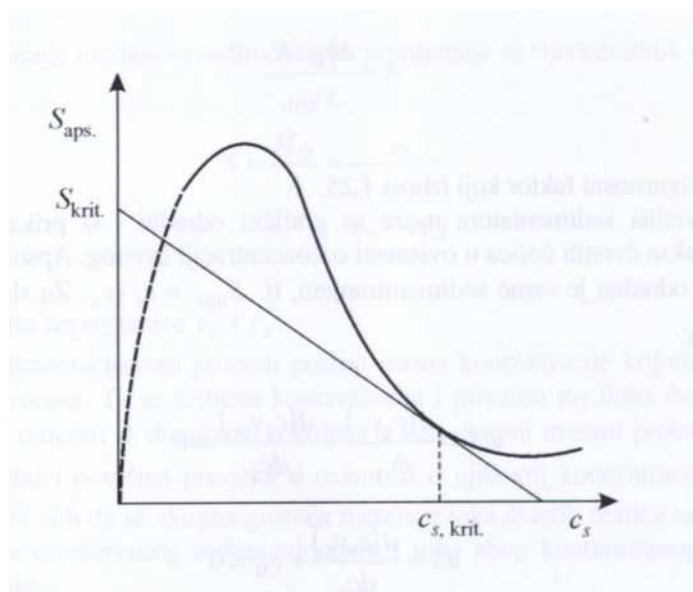
Kada je određena vrijednost S_{krit} , može se izračunati potrebna površina taložnika pomoću izraza:

$$A = \frac{q_{m_0} K}{S_{krit}} \quad (43)$$

gdje je: K - sigurnosni faktor (1.25)

Površina taložnika može se odrediti grafički iz prikaza apsolutnog masenog fluksa čvrstih čestica u ovisnosti o koncentraciji čvrstog. Apsolutni fluks čvrstih čestica određen je samo taloženjem tj. $S_{aps} = c_s v_s$.

Kritična koncentracija koja određuje kapacitet dobiva se povlačenjem tangente iz točke c_{s_2} na krivulju apsolutnog fluksa (Slika 19). Odsječak na ordinati je S_{krit} . Tražena površina računa se iz jednadžbe (43).



Slika 19. Ovisnost apsolutne gustoće masenog toka čvrstih čestica o koncentraciji

Ovisnost brzine taloženja o koncentraciji, koja je osnova za konstrukciju krivulje gustoće masenog toka čvrstih čestica, određuje se šaržnim testom taloženja. Uz pretpostavku da je u zoni taloženja relativna brzina taloženja ovisna samo o lokalnoj koncentraciji dobiveni odnosi vrijede kako za diskontinuirane tako i za kontinuirane procese.

Test taloženja izvodi se pri različitim početnim koncentracijama po metodi Coe i Clevenger u nizu cilindričnih posuda za sedimentaciju ili iz jedne početne koncentracije po Kynchovoj metodi. U oba slučaja prati se promjena visine granične plohe u ovisnosti o vremenu te se snima krivulja taloženja. Ovisnosti $v_s = f(c)$ po Coe i Clevengeru dobivaju se iz dijela krivulje taloženja koji odgovara periodi konstantne brzine pri pojedinim koncentracijama. Kynchovom metodom utvrđuje se ovisnost $v_s = f(c)$ u području padajuće brzine taloženja.

Gibajući se kroz fluid čestice prolaze kroz područja različite koncentracije, od one koja odgovara stanju homogene suspenzije na početku mjerenja do koncentracije ugušćene suspenzije. Kod neke kritične koncentracije, koja se nalazi između ovih graničnih, postoji zamišljeni sloj kroz koji prolazi manje čestica nego što u njega ulazi. Taj sloj određuje tzv. kapacitet obrade. Kynch je pokazao da ovaj sloj koji u šaržnom testu putuje prema površini konstantnom brzinom (u_s), utječe na koncentraciju u sloju ispod granične plohe bistrog fluida,

a time i na brzinu taloženja. Pretpostavlja se da je u koloni površine presjeka (A), visine (h_0) i koncentracije (c_0) prisutno $c_0 Ah_0$ čvrstih čestica. Kroz graničnu plohu između bistre kapljevine i suspenzije čija je koncentracija (c_j) u vremenu (t_j) prolazi $c_j At_j (v_{s_j} + u_s)$ čvrstih čestica. Bilanca čvrstih čestica daje:

$$c_0 Ah_0 = c_j At_j (v_{s_j} + u_s) \quad (44)$$

Kako je po Kynchu:

$$u_s = \frac{h_j}{t_j} = konst. \quad (45)$$

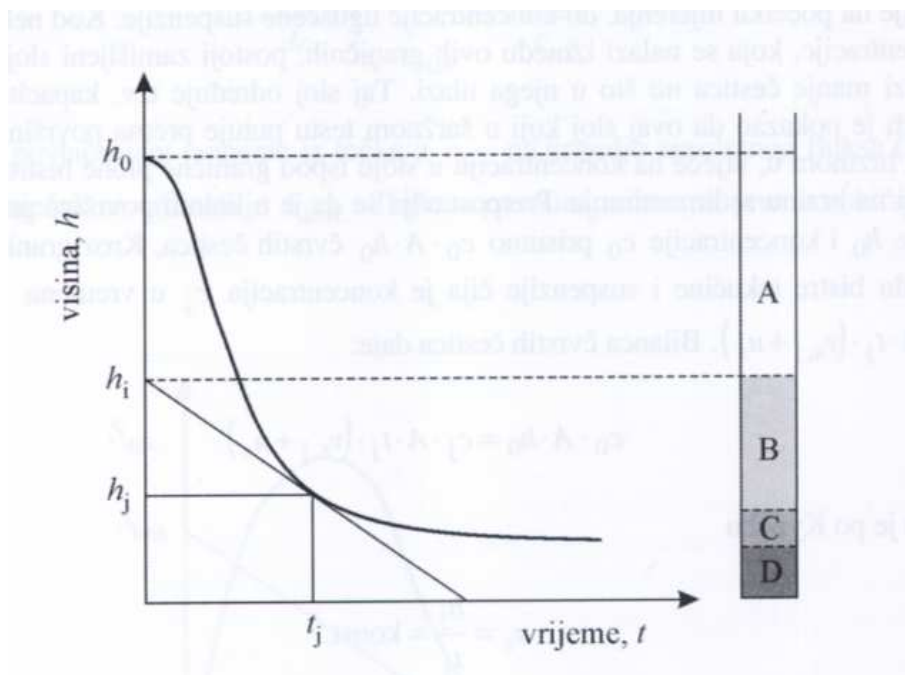
$$c_j = \frac{c_0 h_0}{h_j + v_{s_j} t_j} \quad (46)$$

Brzina taloženja $v_s = (dh/dt)$ (nagib tangente na krivulju taloženja) javlja se u sloju koncentracije (c_j) kada sloj kritične koncentracije stiže do granične plohe. Slijedi da je odsječak na ordinati (h): $h_j + v_{s_j} t_j$. Ako uzmemo: $h_i = h_j + v_{s_j} t_j$ slijedi:

$$c_j = \frac{c_0 h_0}{h_i} \quad (47)$$

gdje je: h_i - visina koju bi suspenzija dosegla kada bi koncentracija čvrstih čestica bila ista kao i u graničnoj plohi.

Za bilo koju vrijednost h_i može se izračunati koncentracija c_j . Brzina v_{s_j} odredi se kao nagib pravca povučenog kroz točku h_i i tangentu krivulje taloženja (Slika 20).



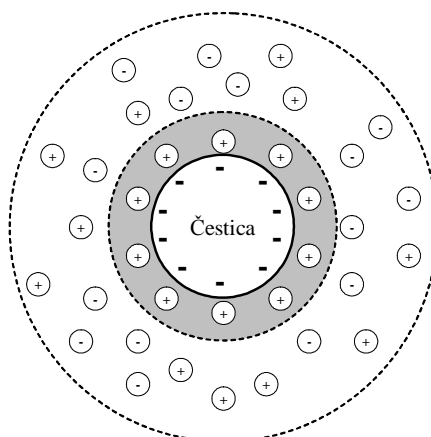
Slika 20. Kynchova analiza

Koagulacija i flokulacija

S obzirom da je taloženje sitnijih čestica dugotrajan proces potrebno ga je ubrzati određenim postupcima. Proces taloženja može se neovisno o tipu taložnika ubrzati zagrijavanjem suspenzije ili okrupnjavanjem čvrstih čestica. Čestice se mogu okrupnuti različitim postupcima aglomeriranja, a najsitnije čestice, čije taloženje ometa njihov električni potencijal, okrupnjuju se postupcima koagulacije (zgrušavanje) i flokulacije (pahuljičenje).

Koagulacija je postupak unošenja određenih kemijskih tvari koji smanjuju sile koje onemogućavaju približavanje čestica u kapljevini.

Stabilnost koloidnih otopina uvjetovana je ionizacijom nastalom rastvaranjem ili adsorpcijom određenih čestica, pri čemu se na površini koloidne čestice stvara elektrostatički naboj. Ioni se uz površinu čestice nalaze u dva sloja. U adsorbiranom sloju neposredno uz negativno nabijenu česticu nalaze se pozitivno nabijeni ioni. Drugi, difuzni sloj, čine ioni suprotnog naboja (Slika 21).



Slika 21. Shematski prikaz slojeva uz česticu

Uslijed istoimenih elektrostatičkih naboja koloidi se međusobno odbijaju i ostaju raspršeni u kapljevini. Međusobno odbijanje je to veće što je količina istoimenog naboja veća, odnosno što je čestica više naelektrizirana. Između stijenke čestice i okolne kapljevine postoji razlika u naponu - potencijal. Razlika je najveća na samoj površini čestice i smanjuje se prema difuznom sloju. Razlika napona na graničnom sloju (između adsorpcijskog i difuznog) i kapljevine naziva se zeta-potencijal. Dodavanjem iona suprotnog naboja može se snižavati zeta-potencijal. Na taj način dobivamo neutralne čestice i destabiliziranu koloidnu otopinu. Neutralizirane čestice mogu se međusobno spajati, povećavati obujam i masu kako bi se mogle dalje taložiti.

Koloidi u prirodnim vodama uvijek su negativno nabijeni, a slično je i za većinu otpadnih voda. Neutralizacija elektronabijenih koloida provodi se dodavanjem iona suprotnog naboja. Sredstva kojima se postiže destabilizacija koloidne otopine nazivaju se koagulantima.

Koagulanti mogu biti:

- mineralne soli s polivalentnim kationima ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$, AlCl_3 , NaAlO_2 , $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$),
- prirodni ili sintetički polimeri (polielektroliti)

Izbor i količina sredstava za koagulaciju temelji se na laboratorijskim ispitivanjima suspenzije, a ovise o porijeklu i sastavu otpadne suspenzije, te zahtjevanom stupnju čišćenja. Dodavanje kemijskih sredstava u većim količinama može dovesti do ponovnog naelektriziranja čestica (ali suprotnog naboja), promjene pH, a može se pojaviti i prekomjerno stvaranje mulja, što stvara probleme pri njegovoj daljnoj obradi.

Flokulacija je postupak kojim se koaguliranim česticama u suspenziji dodaju flokulanti, kako bi se aglomerirane čestice povezale u dugačke lance. Flokulanti se dijele na: anionske, kationske i neutralne, a mogu se podijeliti i na organske i anorganske. Kakav će se flokulant upotrijebiti ovisi o sastavu kapljevine i o česticama. Pri tome bitnu ulogu ima električni naboj čestica. Najstariji flokulant je aktivni silicij, koji se dodaje odmah nakon koagulacije. Od ostalih flokulanata najčešće se koriste bentonit, neke vrste gline, istaloženi kalcij karbonat, sitan pijesak, diatomejska zemlja, aktivni ugljen. Organska sredstva za flokulaciju dobivaju se od algi, škroba te sjemenki i biljaka, dok se od sintetičkih sredstava najčešće koriste flokulanti malih (poliamini) ili velikih (poliakrilamidi) molekulskih težina.

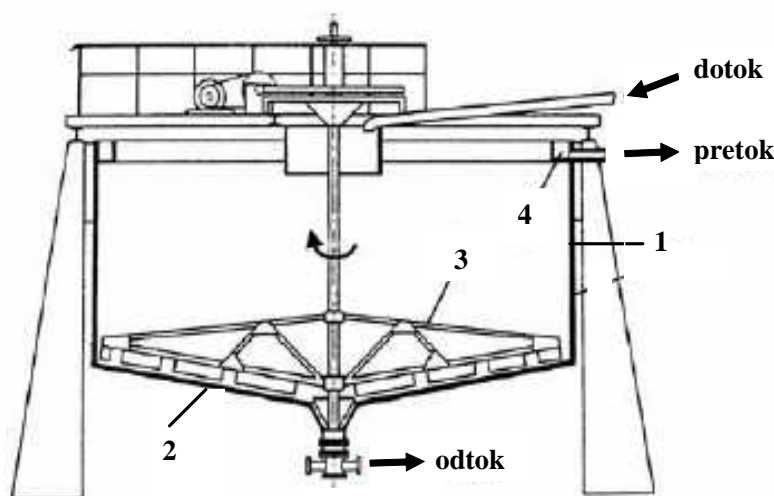
Postupcima koagulacije i flokulacije veličina čestica se mijenja tijekom procesa pa se brzina padanja čestica kroz fluid određuje iskustveno.

2.3.3.2. Uređaji za gravitacijsko taloženje

Taložnici ili sedimentatori su uređaji u kojima se odvija postupak taloženja (sedimentacije). Prema načinu rada mogu biti diskontinuirani (šaržni) i kontinuirani.

Diskontinuirani (šaržni) taložnici upotrebljavaju se za male količine obrade. Taloženje se odvija u četvrtastim posudama s ravnim dnom ili u kružnim posudama sa stožastim dnom koje su spojene na uređaje za dovod suspenzije, odvod izbistrene kapljevine i odvod taloga. Posuda se napuni suspenzijom, a nakon što je postignuto željeno stanje taloženja, odlije (dekantira) se izbistrena kapljevina, te ispusti talog.

Kontinuirani taložnici (Slika 22.) su najčešće kružnog oblika, velikih promjera (od nekoliko metara do nekoliko desetaka metara) i relativno malih visina (2 do 3 m). Taložnici manjih kapaciteta obično su izrađeni od čeličnog lima, dok su veći taložnici od betona. Gornji dio (1) je vrlo plitak kružni plašt valjka, a donji je plitak konus (2). Kroz sredinu okomito prolazi vratilo s polukružnom konstrukcijom na čijim se šipkama nalazi zgrtač mulja (3). Suspenzija se odozgo ulijeva kroz cijev oko vrtila i raspodjeljuje po posudi. Dotok suspenzije tako je prilagođen da struja uvis bude spora. Krupnije čvrste čestice se talože u suspenziji, padaju na dno konusa, te ispuštaju u obliku gustog mulja. Vratilo s zgrtačem mulja polagano se okreće u suspenziji pri dnu. Time se suspenzija vrlo blago miješa, tako da se pospješuje taloženje i prikupljanje gustoga mulja, a da se pri tome ne izaziva uznemiravanje gornjih slojeva suspenzije. Zgrtač mulja potpomaže pražnjenje gustoga mulja iz taložnika. S obzirom na taloženje krupnijih čestica, na površini je samo suspenzija s vrlo sitnim česticama ili ponajviše sasvim čista kapljevina, koja se izlijeva preko ruba u žlijeb (4)



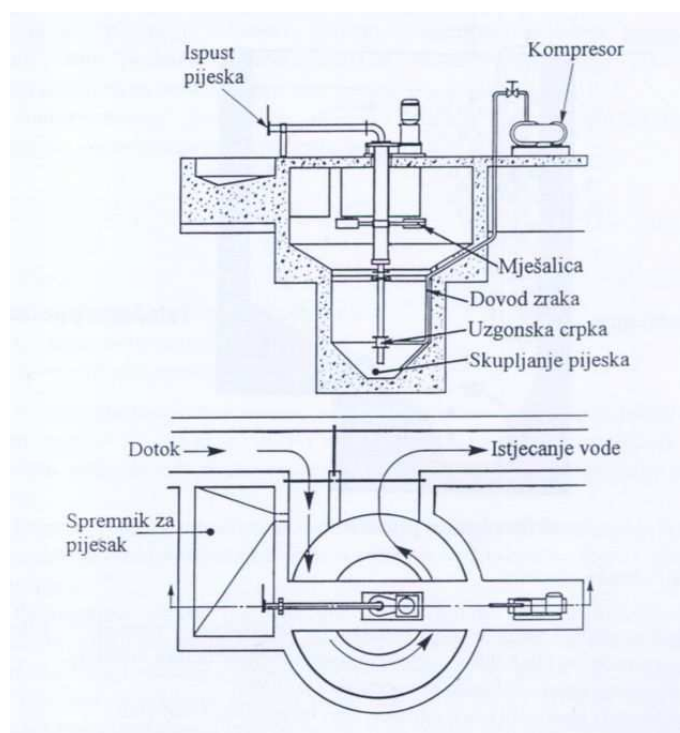
Slika 22. Kontinuirani taložnik

Pjeskolovima se iz kapljevina uklanja pijesak, šljunak i druge krutine veće gustoće. Koriste se kod prethodnog čišćenja otpadnih voda iz kanalizacijskih sustava. Na ovaj način štite se pumpe, cjevovodi i drugi uređaji od trošenja. Odstranjivanje se obavlja u spremnicima u

kojima se smanjuje brzina protjecanja kapljevine te se na taj način omogućava taloženje većih čestica. Pri tome se nastoji spriječiti istodobno taloženje čestica organske tvari.

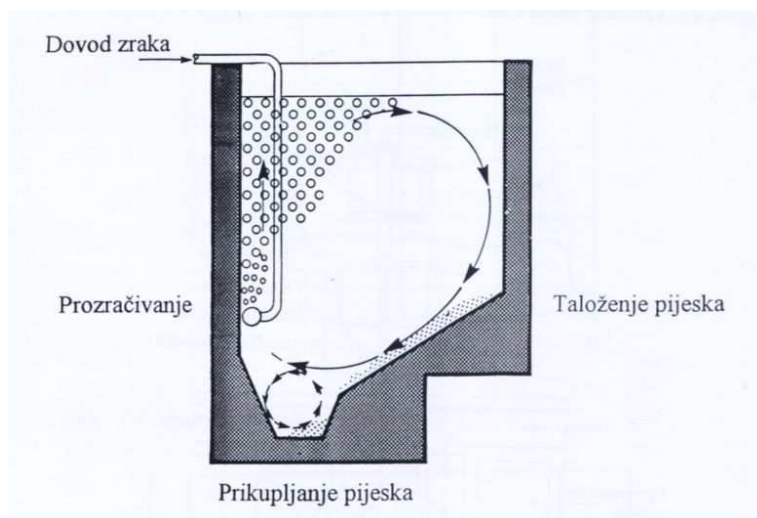
Dimenzioniranje pjeskolova obavlja se prema površinskom opterećenju, odnosno brzini taloženja čestica pijeska određene veličine. Krtičnom brzinom smatra se ona brzina kod koje se istaloženi pijesak neće odnositi iz pjeskolova.

Pjeskolovi malih dimenzija mogu se primjenjivati u jednostavnim kanalima s promjenjivom ili stalnom brzinom protjecanja. To su tzv. *pjeskolovi s kružnim tokom kapljevine* (Slika 23.)



Slika 23. Pjeskolov s kružnim tokom kapljevine

Kod pjeskolova srednjih i većih dimenzija koristi se i prozračivanje, tzv. *prozračeni pjeskolovi* (Slika 24.).



Slika 24. Prozračeni pjeskolov

U prozračenom pjeskolovu moguće je postići:

- uklanjanje pijeska i šljunka bez organskih primjesa,
- uklanjanje plutajućih tvari tj. tvari manje gustoće od kapljevine,
- prethodno prozračivanje kapljevine da bi se uklonili neugodni mirisi.

Ukoliko uz pjeskolov ide i mastolov tada je potrebno dodati i odgovarajući prostor za skupljanje plutajućih tvari.

Specifična potrošnja zraka ovisi o poprečnom presjeku pjeskolova, o načinu prozračivanja (veličina mjehurića), te dubini mlaznice:

za sitne mjehuriće: $q_{v_z} = (0.63 + 0.52 \ln d_i)^{-0.62}$

za krupne mjehuriće: $q_{v_z} = (0.07 + 0.76 \ln d_i)^{-1.33}$

gdje je: d_i - dubina mlaznice.

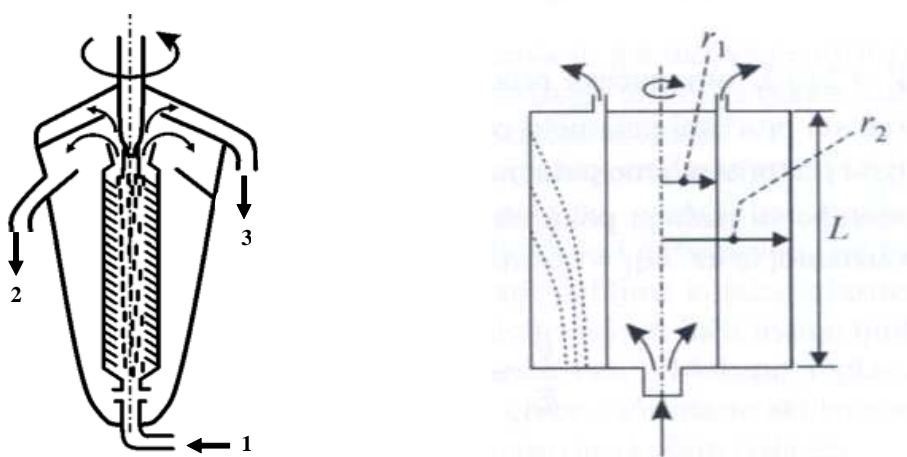
2.3.3.3. Centrifugalno taloženje

Centrifugalno taloženje je operacija kod koje se čvrste čestice odvajaju od kapljevine zbog djelovanja centrifugalne sile. Centrifugiranjem se odvajaju čestice malih dimenzija koje se ne mogu odvojiti gravitacijskim taloženjem.

Centrifugalni taložnici se sastoje od cilindrične posude koja se brzo okreće oko svoje osi i u koju se uvodi suspenzija. Kapljevina se odvodi pomoću cijevi za obiranje, a čvrste čestice zaostaju u bubnju ili se kontinuirano odvođe. Djelotvornost separatora određena je vladanjem najmanjih čestica. Budući da se radi o česticama malih dimenzija, gibanje se odvija u laminarnim uvjetima pa se proračun centrifugalnih taložnika temelji na Stokesovom zakonu u kojem je gravitacijska akceleracija zamijenjena centrifugalnom akceleracijom:

$$v_c = \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) \omega^2 r}{18\mu} \quad (48)$$

gdje je: d_c - promjer granične dimenzije čestica,
 $\omega^2 r$ - centrifugalna akceleracija.



Slika 25. Cijevna centrifuga

Osnovna analiza gibanja čestica najjednostavnije se opisuje na primjeru cijevne centrifuge (Slika 25.). To je uspravna cijev koja se okreće velikom brzinom oko vertikalne osi. Suspenzija ulazi odozdo (1) i struji aksijalno prema gore. Čvrste se čestice zbog veće gustoće gibaju do stijenke cijevi i tu se zadržavaju (2), dok se bistra kapljevina prelijeva kroz otvore na vrhu centrifuge (3).

Ako se jednačba (48) pomnoži s vremenom (t) dobiva se izraz za put (l) koji čestica prevali u centrifugi:

$$l = v_c t = \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) \omega^2 r}{18\mu} t \quad (49)$$

Ako se uzme da je $t = \frac{V}{q_v}$ slijedi:

$$l = \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) \omega^2 r}{18\mu} \frac{V}{q_v} \quad (50)$$

Put (l) prevaljen u vremenu (t) jednak je polovici udaljenosti s površine kapljevine do stijenke bubnja (s):

$$l = \frac{s}{2} \quad (51)$$

Uvrštavanjem (51) u (50) dobije se izraz za protok suspenzije kroz centrifugu:

$$q_v = 2 \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) V \omega^2 r}{18\mu s} \quad (52)$$

Ako se i brojnik i nazivnik pomnože sa g dobiva se konačni izraz za protok suspenzije kroz sedimentacijsku centrifugu:

$$q_v = 2 \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho_f) g V \omega^2 r}{18\mu s g} \quad (53)$$

Prvi član jednadžbe (53) predstavlja brzinu taloženja pod djelovanjem sile teže (v_t), a drugi član, koji u sebi sadrži veličine karakteristične za korištenu centrifugu, površinu tanka za taloženje gravitacijom ekvivalentnih karakteristika kao centrifuga, tzv. Amblerov faktor kapaciteta (Σ).

Amblerov koeficijent kapaciteta (Σ) računa se iz geometrije i uvjeta rada centrifuge ili se očitava iz tablica. Za cijevnu centrifugu vrijedi izraz:

$$\Sigma = \frac{\omega^2}{g} \pi L \left(\frac{3}{2} r_2^2 + \frac{1}{2} r_1^2 \right) \quad (54)$$

gdje je: ω - kutna brzina,
 L - visina centrifuge,
 r_1 - udaljenost od osi sedimentacijske centrifuge do granične površine kolača,
 r_2 - polumjer sedimentacijske centrifuge.

Jednadžba (53) može se napisati u kraćem obliku:

$$q_v = 2v_t \Sigma \quad (55)$$

Pomoću ove jednadžbe moguće je procijeniti protok kroz istovrsne centrifuge na temelju eksperimentalnih rezultata laboratorijskih centrifuga.

$$\frac{q_{v_1}}{\Sigma_1} = \frac{q_{v_2}}{\Sigma_2} = 2v_t \quad (56)$$

Najveći nedostatak ovog tzv. Sigma koncepta je u tome što je veličina razdvajanja nedovoljan kriterij za uspješnost centrifuge. Jedini način da se u potpunosti opišu svojstva centrifugalnih taložnika je primjena frakcijske krivulje djelotvornosti.

2.3.3.4. Uređaji za centrifugalno taloženje

Centrifugalni taložnici dijele se u dvije skupine:

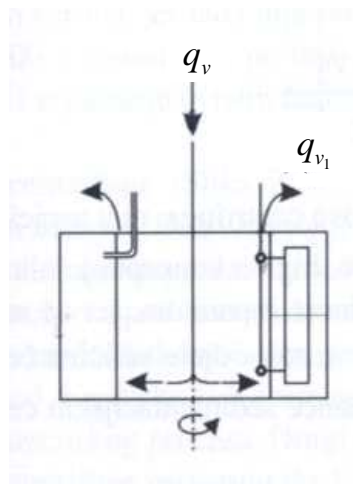
- centrifugalni taložnici s pokretnim (rotirajućim) stijenkama i
- centrifugalni taložnici s nepokretnim stijenkama.

Centrifugalni taložnici s pokretnim (rotirajućim) stijenkama

Cijevna centrifuga (Slika 25.) vrlo je djelotvorna i omogućuje odvajanje čestica veličina ispod 1 μm , a kod većih brzina čak i čestice veličina ispod 0.1 μm . Radi diskontinuirano, a pražnjenje je ručno, nakon što razina čvrstih čestica dosegne određenu visinu unutar bubnja. Za vrijeme rada količina kolača u bubnju raste smanjujući radnu površinu, što uzrokuje smanjenje vremena zadržavanja, a time i smanjenje djelotvornosti centrifuge. Cijevne centrifuge koriste se za bistrenje suspenzija koje sadrže manje od 1% čvrstih čestica jer tada nije potrebna česta kontrola rada centrifuge. Broj okretaja kod laboratorijskih centrifuga iznosi 50000 o/min uz protok od 0.1 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, dok industrijske centrifuge postižu 15000 o/min uz protok od 0.4 - 4.0 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Često se koriste i za odvajanje u sustavima kapljevito / kapljevito.

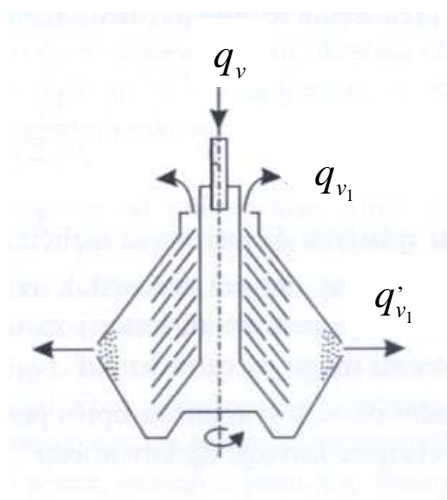
Zdjelasta centrifuga (Slika 26.) se još naziva i centrifuga s neperforiranim bubnjem. Slična je cijevnoj, ali joj je odnos dužina / promjer, kao i djelotvornost, manji. Suspenzija se uvodi u blizini dna bubnja. Čvrste čestice se uklanjaju na zidu, a izbistrena kapljevina pretiče preko ruba na gornjem dijelu bubnja, te se odvodi kontinuirano. Radni ciklus se prekida uređajem za motrenje debljine kolača, te se izbistrena kapljevina koja zaostaje na vrhu kolača obire radi dobivanja kolača s manjim sadržajem kapljevine. Način uklanjanja čvrstih čestica određen je njihovim svojstvima. Mekane i plastične čestice uklanjaju se pri punoj brzini rotacije bubnja, a grube i vlaknaste se skidaju strugačem pri smanjenoj brzini. Kolač propada kroz otvoreno dno zdjele. Ovaj tip centrifuga se primjenjuje za odvajanje suspenzija s malim udjelom čvrstih čestica jer tada nije potrebno često čišćenje. Broj okretaja kreće se u području od

450 - 3500 o/min, uz protoke od 6 - 10 m³ h⁻¹. Najčešće se koriste za odvodnjavanje i odvajanje čestica iz otpadnih tokova.



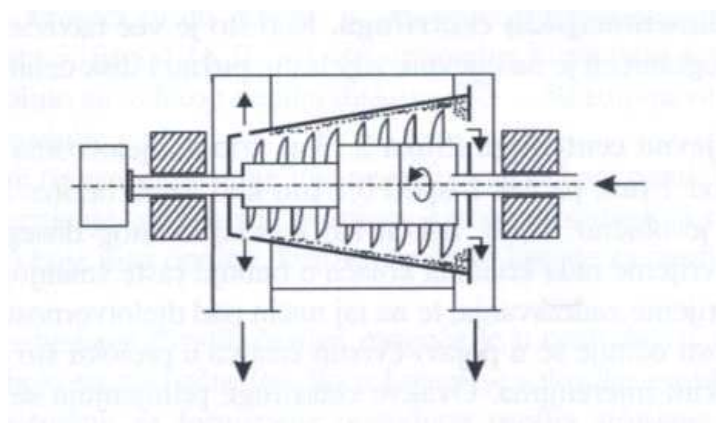
Slika 26. Zdjelasta centrifuga

Disk centrifuga (Slika 27.) se sastoji od bubnja koji rotira zajedno s nizom koničnih diskova pomoću kojih se povećava kapacitet razdvajanja čvrstih čestica od kapljevina. Suspenzija ulazi kroz centralnu cijev i prolazi ispod diskova u prostor između diskova i stijenke centrifuge. Kapljevina ulazi među diskove, te se giba prema izlazu. Čvrste čestice na donjem dijelu gornjeg od dva diska koji formiraju kanal. Ovo gibanje čestica je prvi i najvažniji korak odvajanja. Drugi korak je klizanje čestica niz disk. Disk centrifuge ostvaruju do 12000 o/min s protocima do 100 m³ h⁻¹.



Slika 27. Disk centrifuga

Pužna centrifuga (Slika 28.) ima horizontalni konični bubanj. Radi kontinuirano. Odnos dužine i promjera bubnja je 1.5 - 3.5. U bubnju se nalazi pužni transporter, koji se rotira brzinom nešto manjom ili većom od brzine rotiranja bubnja (1600 - 6000 o/min). Suspenzija se uvodi kroz aksijalnu cijev u centru rotora i prolazi kroz otvore na pužnici prema zidu bubnja. Sakupljene čvrste čestice se pokreću pužnim transporterom prema suženom dijelu bubnja u smjeru suprotnom od smjera kapljevine. Razina kapljevine se održava ustavama podešenim na traženi pretok. Protoci kod ovih centrifuga iznose od $0.4 - 60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Primjena ovih centrifuga u industriji je višestruka.



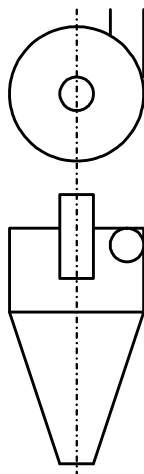
Slika 28. Pužna centrifuga

Centrifugalni taložnici s nepokretnim stijenkama - hidrocikloni

Hidrocikloni nemaju pokretnih dijelova, već kapljevina sama stvara vrtlog s velikim gradijentom brzine. Problem koji se pri tome javlja je smično naprezanje koje može razbiti aglomerate i flokule što nije poželjno kod odvajanja faza, ali je važan kod razdvajanja čestica prema veličini. Usprkos nedostacima hidrocikloni se primjenjuju za obje namjene zbog niske cijene. Njihova primarna namjena je ugušćivanje suspenzije u centrifugalnom polju.

Hidrociklon se sastoji od cilindričnog dijela spojenog na koničnu sekciju. Dotočna suspenzija ulazi u gornji dio cilindričnog dijela i pri tome uzrokuje jako vrtložno gibanje u ciklonu. Kapljevina s dijelom čvrstih čestica izlazi na vrhu kroz cijev postavljenu u središtu cilindričnog dijela, tzv. pretočna cijev ili sabirnik vrtloga. Čestice većih dimenzija, s

zaostalom kapljevino, se spuštaju konusnim dijelom do spremnika čvrstih čestica (Slika 29.).



Slika 29. Hidrociklon

Kod dimenzioniranja hidrociklona treba voditi računa o utjecaju različitih parametara. Izbor hidrociklona temelji se na odnosu između pada tlaka i protoka, te odnosa između djelotvornosti separatora i protoka.

Protok je dan izrazom:

$$q_v = 23.2kD^2 \left(\frac{\Delta p}{\rho_i} \right)^{0.5} \quad (57)$$

gdje je:

$k = 1.3$,

D - promjer hidrociklona,

Δp - pad tlaka

ρ_i - relativna gustoća suspenzije u odnosu na vodu.

Pad tlaka je dan izrazom:

$$\Delta p = C_L \frac{v^2 \rho}{2} \quad (58)$$

gdje je: v - karakteristična brzina (obično brzina u ulaznoj cijevi),

C_L - faktor oblika (pokazatelj gubitka energije strujanja).

Faktor oblika C_L ovisi o Re - broju, koncentraciji čvrste tvari, te o geometriji ciklona.

Za hidrociklon iskustvena ovisnost dana je izrazom:

$$\Delta p \propto q_v^a \quad (59)$$

gdje a ima vrijednost između 2 i 3.3. Ovaj odnos određuje dužina ciklona i pretočne cijevi.

Utjecaj protoka na djelotvornost separatora izražava se utjecajem na veličinu odvajanja x_{50} . Za koncentracije u dotoku manje od 0.5 vol % čvrstog uz odgovarajući niski odnos R_f (odtok / dotok) vrijedi izraz:

$$\frac{x_{50}}{D} = k \left(\frac{\mu D}{q_v \rho} \right)^{0.5} \quad (60)$$

gdje je: k - konstanta ovisna o dimenzijama uređaja.

$$\frac{x_{50}}{D} = f \left(\frac{q_v \rho}{D \mu}, \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = f \left(Re_0, \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (61)$$

Iz izraza (58) i (60) utvrđena je ovisnost:

$$x_{50} \propto \Delta p^{-0.25} \quad (62)$$

Prema ovome nije ekonomično da hidrociklon radi uz pad tlaka iznad 1 do 2 bara jer povećanje tlaka snižava veličinu razdvajanja samo 16 %. Veliki cikloni rade s tlakovima od 1 bara, dok mali cikloni ponekad rade uz 4-5 bara.

Nadalje slijedi

$$x_{50} \propto D^{3/2} \quad (63)$$

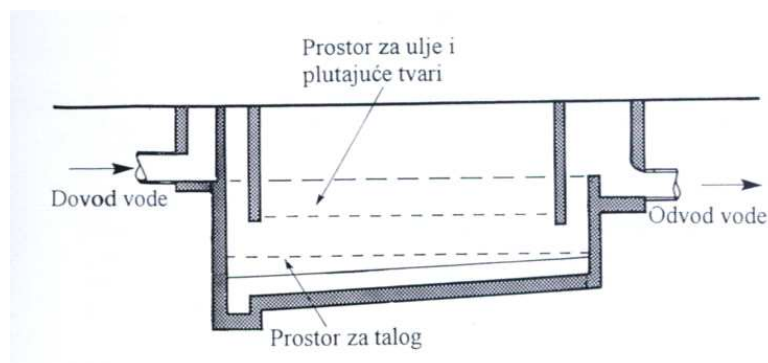
Iz ovoga se vidi da cikloni manjeg promjera rade s većom efikasnošću. U slučaju potrebe za što boljim odjeljivanjem većih količina čvrstih čestica poželjnije je koristiti više manjih, paralelno spojenih ciklona.

2.4. Odvajanje u sustavima kapljevito / kapljevito

2.4.1. Flotacija (isplivavanje)

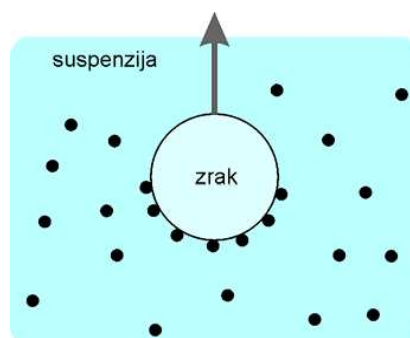
Flotacija (isplivavanje) je operacija kojom se odvajaju čestice krutina i kapljevina manje gustoće iz kapljevina veće gustoće. Flotacija može biti prirodna i umjetna (izazvana).

Prirodna flotacija se javlja kod svih gravitacijskih taložnika. Čestice manje gustoće (ulja i masti) isplivavaju na površinu. Uranjanjem pregrada ispred preljeva sprječava se odnošenje plutajući čestica s površine. Ovaj postupak se primjenjuje kod mastolova kojima se uklanjaju masti i ulja iz garaža, autoradionica, restorana, zatim kod objekata za zaštitu voda, pri nadzoru oborinskih voda s površina prometnica u vodozaštitnim područjima (Slika 30.). Učinak uklanjanja je od 80 - 90 %.



Slika 30. Mastolov za čišćenje oborinskih voda

Umjetna flotacija (Slika 31.) se izaziva uvođenjem u kapljevinu mjehurića plina (najčešće zraka). Mjehurići zraka "lijepe" se na čestice čija je gustoća veća od gustoće kapljevine, te se na taj način postiže prividno manja gustoća.



Slika 31. Umjetna flotacija

S obzirom na način dovođenja zraka postupci flotacije mogu se podijeliti na:

- flotaciju s dovođenjem mjehurića zraka pod atmosferskim tlakom,
- flotaciju s otopljenim zrakom u suspenziji pod tlakom, te naglim sniženjem tlaka,
- flotaciju s zasićenjem suspenzije zrakom pod atmosferskim tlakom, te sniženjem tlaka.

Promjenom tlaka između zraka i suspenzije postiže se raspršivanje zraka u sitne mjehuriće. čime se povećava učinak flotacije.

Povećanje učinka flotacije postiže se i dodatkom kolektora. Kolektori su kemijska sredstva koja obavijaju čestice koje želimo ukloniti vrlo tankim monomolekulskim filmom, te se na taj način povećava "ljepivost" čvrstih čestica na mjehuriće zraka.

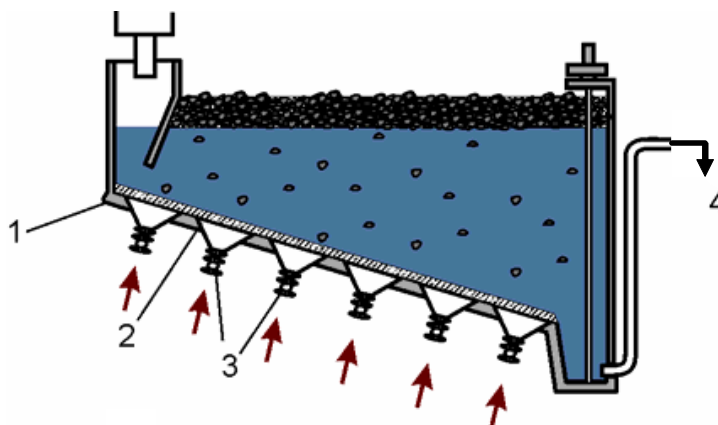
Za povećanje učinka flotacije koriste se i pjenušci. Pjenušci su kemijska sredstva slična sapunima koja se dodaju u suspenziju kako bi mjehurići zraka ostali što sitniji i kako bi se na površini suspenzije mogla stvoriti čvrsta pjena. U toj pjeni skupljaju se čestice koje se žele ukloniti iz suspenzije. Posebnim sakupljačima pjena se uklanja sa površine. Uklonjena pjena puca, a ostaju čvrste čestice koje smo uklonili iz suspenzije.

Količine dodanih reagenasa moraju se kontrolirati zbog njihove cijene. Njihova upotreba svodi se na najmanju mjeru, a da pri tome postignemo što bolje rezultate flotacije. Višak reagenasa može izazvati razne probleme tijekom flotacije (npr. velika količina pjenušaca stvara veliku i jaku pjenu koja se preljeva preko ruba uređaja te na taj način prlja cijeli pogon).

Postupak flotacije primjenjuje se kod obrade komunalnih i industrijskih otpadnih voda, a pogotovo kad te vode sadrže veće količine ulja, masti, pahuljičastih i vlaknastih tvari.

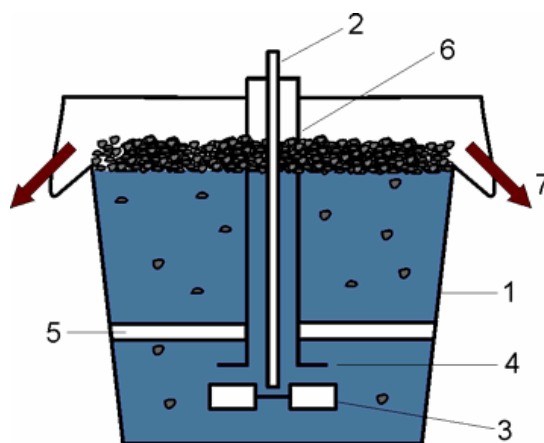
2.4.1.1. Uređaji za flotaciju

Pneumatski flotacijski uređaj (Slika 32.) je bazen kosog dna (1) u koji neprekidno utječe suspenzija. Na dnu (2) se nalaze sapnice (3) kroz koje se u suspenziju uvodi zrak pod tlakom. Taj se zrak, zahvaljujući poroznom dnu, razbija na sitne mjehuriće na koje se vežu čestice. Na površini suspenzije stvara se pjena koja se neprekidno skida. Iz uređaja izlazi bistra kapljevina (4).



Slika 32. Pneumatski flotacijski uređaj

Mehanički flotacijski uređaj (Slika 33.) se sastoji od posude (1) kroz čiju sredinu prolazi okomito vratilo (2) na čijem se donjem kraju nalazi turbinsko mješalo (3). Iznad mješala se nalazi željezna ploča (4) na koju se nastavlja cijev (6). Posuda je poroznom pregradom (5) podijeljena na dva dijela. Okretanjem vratila s mješalom stvara se oko mješala podtlak zbog kojeg se kroz cijev u suspenziju uvlači zrak. Zrak se između ploče i mješala raspršuje u sitne mjehuriće koji se penju prema površini suspenzije, noseći na sebi čvrste čestice.



Slika 33. Mehanički flotacijski uređaj

2.5. Odvajanje u sustavima čvrsto / plinovito

2.5.1. Otprašivanje

Zadatak otprašivanja je uklanjanje čvrstih čestica iz struje plina. Glavni postupci o kojima govorimo pri otprašivanju su postupci odvajanja faza.

Uređaji koji se koriste pri odvajanju čvrstih čestica iz plinova se mogu podijeliti na:

- uređaje za suho otprašivanje,
- uređaje za mokro otprašivanje.

2.5.1.1. Uređaji za suho otprašivanje

U uređajima za suho otprašivanje odvajanje čestica od plina odvija se bez primjene posebnih sredstava za sakupljanje čestica. Odvajanje se postiže zbog djelovanja triju sila:

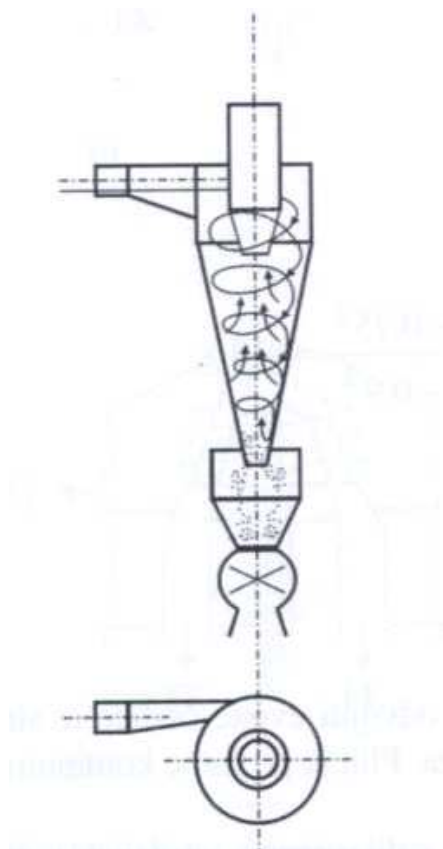
- masene ili inercijske,
- površinske ili adhezijske,
- električne sile.

U većini slučajeva jedna sila prevladava nad ostalima, pa se prema prevladavajućoj sili uređaji za suho otprašivanje se dijele na tri osnovna tipa:

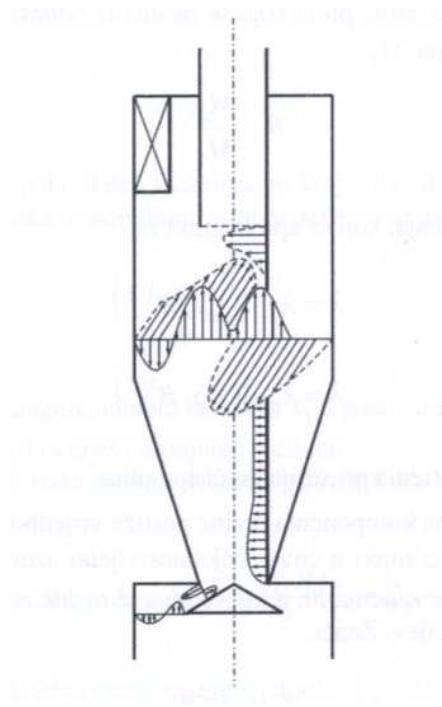
- cikloni,
- filtri za plinove,
- elektrofiltri.

Cikloni

Cikloni (Slika 34.) su najčešće korišteni uređaji za otprašivanje. Sastoje se od ulazne komore, konusnog dijela, sabirne komore za čvrste čestice i izlazne cijevi za plin. Onečišćeni plin uvodi se tangencijalno što dovodi to kružnog kretanja plina. Pri tome se stvara dvostruki vrtlog u kojem plin najprije kreće spiralno prema dolje uz stijenku konusnog dijela, a onda odozdo prema gore kroz uronjenu centralnu cijev. Centrifugalna sila nosi čvrste čestice prema stijenci, te one pod utjecajem težine padaju niz stijenku te se sakupljaju u sabirnoj komori. Ciklon radi kontinuirano.



Slika 34. Ciklon



Slika 35. Shematski prikaz strujanja u ciklonu

Zbog složenosti nije moguć potpuni opis trodimenzionalnog, vrtložnog i dvofaznog strujanja već se daje njegov pojednostavljeni prikaz (Slika 35.). Tangencijalna brzina se računa na vanjskom promjeru ciklona ili na promjeru uronjene cijevi.

$$\frac{v_{ti}}{v_i} = \frac{1}{F\alpha \frac{r_i}{r_a - \frac{b_e}{2}} + \lambda \frac{h}{r_i}} \quad (64)$$

gdje je:

- v_{ti} - brzina na promjeru uronjene cijevi u ciklon,
- v_i - brzina u izlaznoj cijevi ciklona,
- F - odnos površine presjeka ulaznog otvora ciklona i površine presjeka ciklona,
- α - ulazni koeficijent ciklona,
- r_i - polumjer uronjene cijevi u ciklon,
- r_a - polumjer ciklona,
- b_e - širina ulaznog otvora ciklona,

λ - koeficijent trenja pri strujanju onečišćenog plina,

h - visina ciklona.

Brzina u izlaznoj cijevi (v_i) se računa prema izrazu:

$$v_i = \frac{q_v}{r_i^2 \pi} \quad (65)$$

gdje je: q_v - volumni protok.

Odnos površine presjeka ulaznog otvora i površine presjeka ciklona (F):

$$F = \frac{b_e h_e}{r_i^2 \pi} \quad (66)$$

gdje je: h_e - visina ulaznog otvora.

Ulazni koeficijent ciklona (α) za ulazne pravokutne ulazne otvore iznosi:

$$\alpha = 1.0 - \left(0.54 - \frac{0.153}{F} \right) B_e^{1/3} \quad (67)$$

gdje je: B_e - omjer širine ulaznog otvora ciklona (b_e) i polumjera ciklona (r_a).

Koeficijent trenja (λ) aproksimira se prema izrazima:

$$B < 1 \quad \lambda = \lambda_g (1 + 2B^{1/2}) \quad (68)$$

$$B > 1 \quad \lambda = \lambda_g (1 + 3B^{1/2}) \quad (69)$$

gdje je: $\lambda_g = 0.005$ - koeficijent trenja pri strujanju čistog plina,

B - opterećenje struje plina.

Opterećenje struje plina (B) računa se prema slijedećem izrazu:

$$B = \frac{q_{m_p}}{q_{m_f}} \quad (70)$$

gdje je: q_{m_p} - maseni protok onečišćenog plina,

q_{m_f} - maseni protok čistog plina.

Radijalna brzina na vanjskom promjeru ciklona u blizini stijenke ciklona je jako mala pa se može zanemariti, a konstantna je uzduž zamišljenog zida cilinda koji se nastavlja na uronjenu cijev.

$$v_r(r_a) = 0 \quad (71)$$

$$v_r(r_i) = \frac{q_v}{2\pi r_i (h - h_i)} \quad (72)$$

gdje je: h_i - visina uranjanja izlazne cijevi.

Veličina granične čestice (x_{gr}) može se izračunati primjenom bilance sila koje djeluju na česticu.

Centrifugalna sila koja nosi česticu radijalno prema stijenci ciklona računa se prema izrazu:

$$F_c = \frac{x_{gr}^3 \pi}{6} (\rho_c - \rho) \frac{v_{ti}^2}{r_i} \quad (73)$$

Sila otpora:

$$F_r = 3\pi \mu x_{gr} v_r(r_i) \quad (74)$$

Veličina granične čestice:

$$x_{gr} = \left[\frac{18\mu v_r (r_i) r_i}{(\rho_c - \rho) v_{ti}^2} \right]^{0.5} \quad (75)$$

Pad tlaka računa se iz sume padova tlaka u ulaznoj struji, glavnoj struji i izlaznoj cijevi:

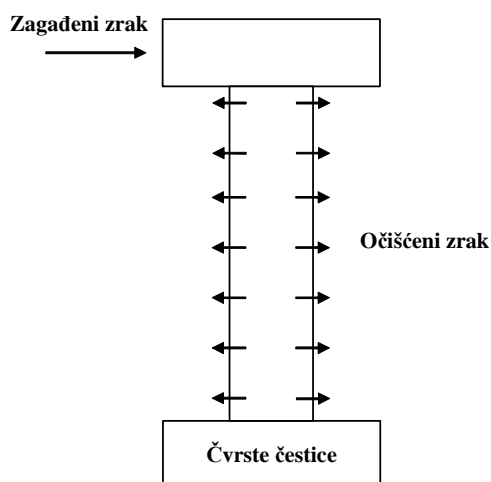
$$\Delta p = \Delta p_u + \Delta p_g + \Delta p_i = \frac{v_i^2 \rho}{2} (\xi_u + \xi_g + \xi_i) \quad (76)$$

gdje su: ξ - koeficijenti mjesnih otpora.

U praksi se primjenjuju cikloni širokog raspona dimenzija, te različitih izvedbi. Isto tako koriste se baterije ciklona u kojima je spojen veći broj ciklona manjeg promjera jer je kod ciklona manjeg promjera veća centrifugalna sila.

Filtri za plinove (Filtri s vrećama)

Filtri za plinove (Filtri s vrećama) (Slika 36.) su uređaji za pročišćavanja plinova uz pomoć poroznog filtarskog sredstva (vreća), pri čemu čestice onečišćenja zaostaju na filtarskom sredstvu (vreći), a plin prolazi kroz njega. Ukoliko se na filtarskom sredstvu (vreći) nakupi sloj čestica, koje će i same predstavljat otpor prolasku čvrstih čestica poput filtarskog sredstva. Tada na tom sloju mogu zaostajat i čestice manje od otvora filtarskog sredstva.



Slika 36. Vrećasti filter

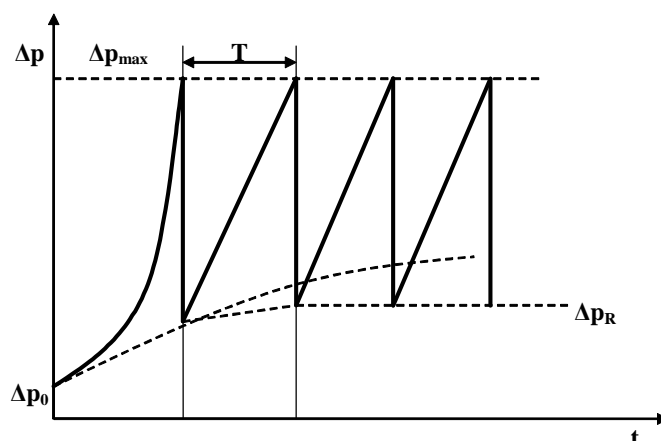
U ovisnosti o koncentraciji čestica čestica filtri za plinove se dijele na:

- industrijske filtre,
- filtre za zrak.

U industrijskim filtrima čiste se plinovi koji sadrže do 50 g m^{-3} čvrstih čestica, a ponekad i više, dok su koncentracije čvrstih čestica u plinova koji se čiste u filtrima za zrak manje od 10 g m^{-3} .

Dimenzioniranje uređaja temelji se na iskustvu pri čemu se veći značaj pridaje padu tlaka nego frakcijskoj djelotvornosti.

Promjena pada tlaka tijekom vremena je skokovita (Slika 37.). Pad tlaka raste tijekom vremena nakupljanja čestica na filtarskom sredstvu. U prvoj fazi tj. fazi začepjenja pora pad tlaka raste nelinearno. Nakon što je postignut maksimalni pad tlaka slijedi faza čišćenja. Pad tlaka ne vraća se pri tom na početnu vrijednost (Δp_0) već pada na vrijednost Δp_R koja je veća od vrijednosti Δp_0 . Razlog tome je zaostajanje izvjesne količine čvrstih čestica u porama filtarskog sredstva. U slijedećoj fazi pad tlaka raste linearno jer odmah dolazi do stvaranja kolača. Vremenski tok pada tlaka ukazuje na stabilnost rada filtra tj. da li dolazi do začepjenja.



Slika 37. Shematski prikaz pada tlaka u filtru

Prilikom matematičkog opisivanja vremenskog toka pada tlaka polazi se od pretpostavke da je prilikom filtracije ukupan pad tlaka uzrokovan otporom filtarskog sredstva i otporom kolača:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (77)$$

S obzirom da je strujanje laminarno ($Re < 1$) Δp_1 i Δp_2 izraziti Darcyjevom jednadžbom:

$$\Delta p = \frac{1}{B_1} \mu l_1 v + \frac{1}{B_2} \mu l_2 v \quad (78)$$

gdje je:

- l_1 - debljina filtarskog sredstva,
- l_2 - debljina kolača,
- B_1 - propusnost filtarskog sredstva s nakupljenim česticama,
- B_2 - propusnost kolača,
- v - brzina filtriranja.

Debljina filtarskog kolača (l_2) može se izraziti iz masene bilance pod pretpostavkom da je otprašivanje potpuno:

$$l_2 = \frac{cvtE_T}{\rho_\varepsilon(1-\varepsilon)} = \frac{W}{\rho_\varepsilon(1-\varepsilon)} \quad (79)$$

gdje je. c - koncentracija čvrstih čestica
 E_T - ukupna djelotvornost,
 t - vrijeme filtriranja,
 W - masa kolača na jedinici površine.

Uvrštavanjem (79) u (78):

$$\Delta p = \frac{1}{B_1} \mu l_1 v + \frac{1}{B_2} \mu \frac{ctE_T}{\rho_\varepsilon(1-\varepsilon)} v^2 = \frac{1}{B_1} \mu l_1 v + \frac{1}{B_2} \mu \frac{W}{\rho_\varepsilon(1-\varepsilon)} v \quad (80)$$

Ako se izraz (80) pojednostavni dobije se:

$$\Delta p = K_1 \mu v + K_2 \mu W v \quad (81)$$

gdje je: K_1 - otpor filtarskog sredstva s nakupljenim česticama nakon čišćenja,
 K_2 - specifični otpor kolača.

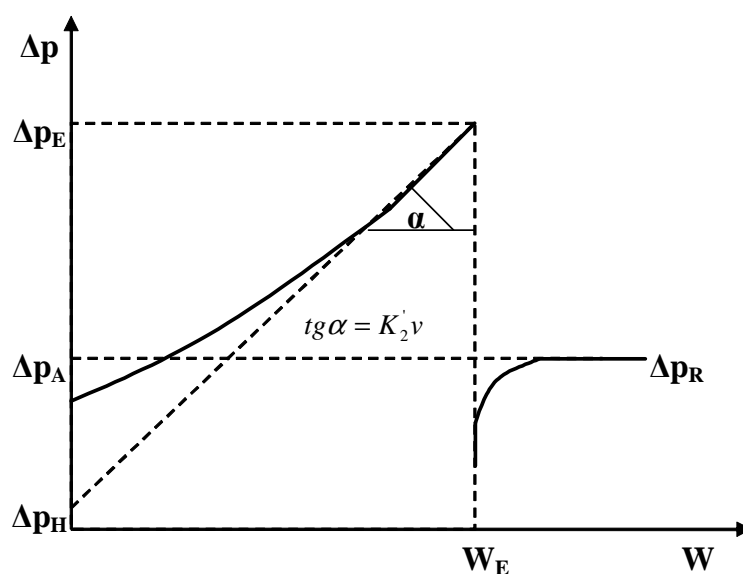
Ako uzmemo:

$$K_1' = \mu K_1 \quad \text{ i } \quad K_2' = \mu K_2 \quad (82)$$

dobijemo da je:

$$\Delta p = K_1' v + K_2' W v \quad (83)$$

Vrijednosti K_1' i K_2' određuju se eksperimentalno. Pri tome se mjerenja promjene pada tlaka (Δp), u ovisnosti o masi čvrstih čestica sakupljenih na jedinicu površine (W), provode uz konstantnu brzinu filtriranja (Slika 38.).



Slika 38. Određivanje parametara filtra za plin

Pri tome se dobije:

$$K'_2 = \frac{\Delta p_E - \Delta p_H}{W_E v} \quad (84)$$

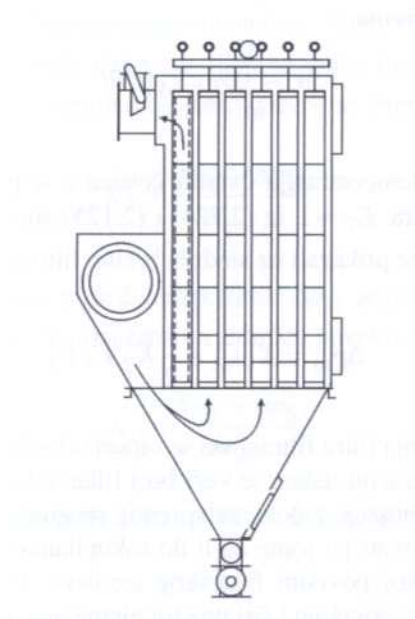
gdje je: Δp_E - krajnji pad tlaka prije čišćenja filtra,
 Δp_H - pomoćna veličina,
 W_E - srednja masa odijeljenih čestica izražena na jedinicu površine filtra.

$$K'_1 = \frac{\Delta p_R - \Delta p_S}{v} \quad (85)$$

gdje je: Δp_R - pad tlaka prije čišćenja filtra,
 Δp_S - pad tlaka u aparaturi bez filtarskog sredstva.

Kod višekomornih filtara (Slika 39.) za vrijeme nakupljanja kolača tijekom jedne faze brzina filtriranja opada u pojedinoj komori pa je srednji pad tlaka dan izrazom:

$$\Delta p_m = K'_1 v(t) + K'_2 W v(t) \quad (86)$$



Slika 39. Višekomorni filter za plin

Iz bilance tvari slijedi izraz za masu čestica koja se odjeljuje po jedinici površine (W) u jednoj fazi filtriranja (T):

$$W = \int_0^T E_T c v(t) dt \quad (87)$$

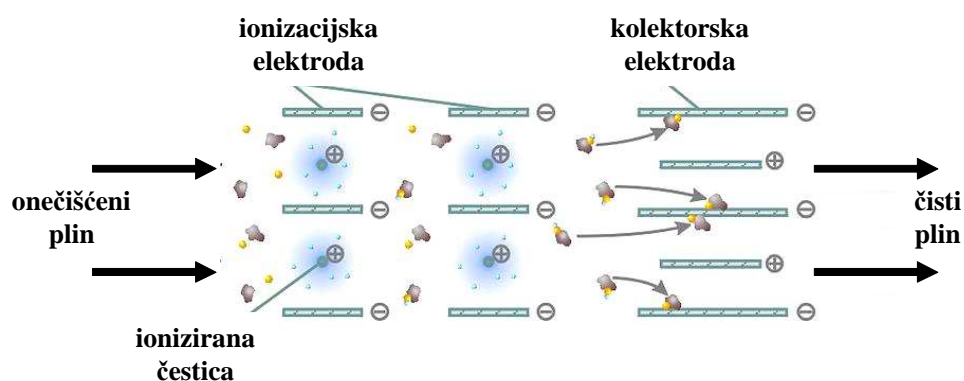
Uz pretpostavku da je koncentracija čvrstih čestica u plinu konstantna, te da je ukupna djelotvornost filtra $E_T \approx 1$ iz (86) i (87) slijedi da se srednji pad tlaka višekomornog filtra pri srednjoj brzini filtracije (v_{sr}) može prikazati izrazom:

$$\Delta p_m = K_1' v_{sr} + \frac{1}{2} K_2' T c v_{sr}^2 \quad (88)$$

Elektrofiltri

Elektrofiltri su uređaji koji čvrste čestice uklanjaju iz plina na način da se na ionizacijskoj elektrodi električki nabiju, a zatim se uz pomoć kolektorske elektrode sakupljaju (Slika 40.). Nabijanje čestica provodi se ioniziranjem plina koji prolazi između elektroda pri čemu nastali ioni električni nabiju čestice. Za tu svrhu služi korona. Korona se javlja kada gradijent jačine električnog polja oko elektrode prijeđe graničnu vrijednost. Stvaranje korone ovisi o naponu,

obliku i međusobnom razmaku elektroda, gustoći, sadržaju vlage, provodljivosti, tlaka i temperaturi plina. Korona je jača što je manji polumjer zakrivljenosti ionizacijske elektrode. Kolektorska elektroda se izrađuje u obliku ploča ili cijevi većeg polumjera jer je na njoj korona nepoželjna.



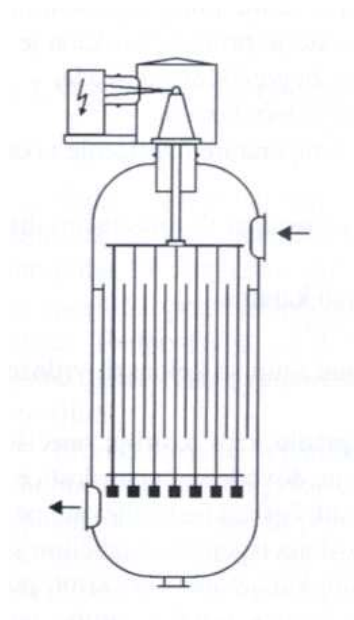
Slika 40. Princip djelovanja elektrofiltra

Proces otprašivanja elektrofilterima sastoji se od sljedećih faza:

- uspostavljanje električnog polja,
- stvaranje električnog naboja,
- prijenos električnog naboja na čvrste čestice sudaranjem iona i čestica ili prijanjanjem iona na čestice,
- gibanje nabijenih čvrstih čestica u električnom polju prema kolektorskoj elektrodi,
- adhezija nabijenih čestica na površinu kolektorske elektrode,
- uklanjanje sloj čvrstih čestica s kolektorske elektrode,
- sakupljanje uklonjenih čvrstica u sabirnik.

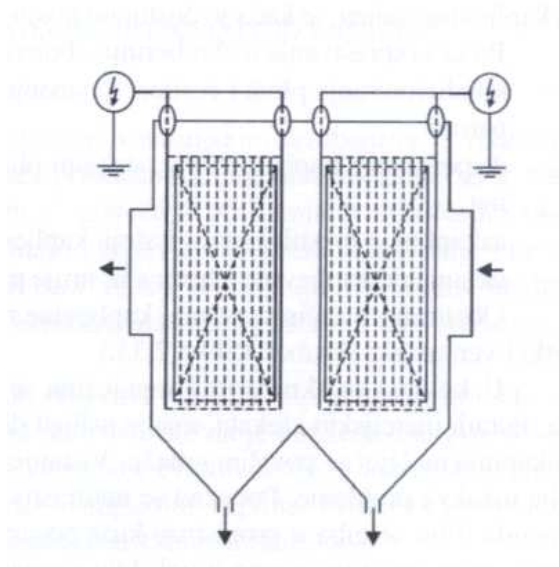
Najjednostavniji elektrofilter je cijevni elektrofilter (Slika 41.). Sastoji se od žice koja je smještena u osi cijevi. Pri tome je žica ionizacijska elektroda, a cijev kolektorska. Napon između elektroda ovisi o razmaku između elektroda, a njegove vrijednosti iznose od

20 - 80 kV. Cijevni elektrofiltri koriste se za otprašivanje plinova s manjim koncentracijama čvrstih čestica.



Slika 41. Cijevni elektrofilter

Najčešće korišteni tip elektrofiltera je pločasti elektrofilter (Slika 42.). Ionizacijske elektrode jednake su kao i kod cijevnih elektrofiltera, dok su kolektorske elektrode izvedene u obliku ravnih ili valovitih ploča. Pločasti elektrofilteri koriste se za otprašivanje plinova s većim koncentracijama čvrstih čestica.



Slika 42. Pločasti elektrofilter

Prema konstrukciji elektrofiltri mogu biti:

- jednostupanjski,
- dvostupanjski.

Kod jednostepenih filtara tzv. Cottrelovog precipitatora ionizacijska ćelija i kolektor čine zajedničku jedinku, dok se kod dvostepenih elektrofiltara plin ionizira u jednom, a čestice se sakupljaju u drugom stupnju. Prednost dvostepenih elektrofiltara je u tome što je za rad elektrofiltra potreban manji napon, elektrode mogu biti bliže jedna drugoj i jednostavnije je čišćenje kolektorskih elektroda.

Dimenzioniranje elektrofiltra temelji se na općoj jednadžbi:

$$\frac{A_k}{V_E} L_E = \frac{w_z}{w_{pr}} \ln \left(\frac{1}{1 - E_T} \right) \quad (89)$$

gdje je: A_k - površina kolektorske elektrode,
 V_E - volumen pojedinog elementa elektrofiltra,
 L_E - dužina u smjeru strujanja plina,
 w_z - brzina plina,
 w_{pr} - migracijska brzine čvrstih čestica (određuje se eksperimentalno),
 E_T - djelotvornost separatora.

Djelotvornost separatora dana je izrazom:

$$E_T = 1 - \frac{c}{c_1} \quad (90)$$

gdje je: c - koncentracija čvrstih čestica u plinu na ulazu u elektrofilter,
 c_1 - koncentracija čvrstih čestica u plinu na izlazu iz elektrofiltra.

Za cijevni elektrofilter vrijedi:

$$\frac{A_k}{V_E} L_E = 4 \frac{L_E}{d_e} \quad (91)$$

gdje je: d_e - promjer kolektorske elektrode.

Za pločasti elektrofilar vrijedi:

$$\frac{A_k}{V_E} L_E = 4 \frac{L_E}{a} \quad (92)$$

gdje je: a - udaljenost između ploča.

Volumni protok plina koji treba otpašiti pomoću cijevnog elektrofiltra računa se prema izrazu:

$$q_v = n \frac{d_e^2 \pi}{4} w_z \quad (93)$$

gdje je: n - broj elemenata cijevnog filtra.

Za pločasti elektrofilar vrijedi:

$$q_v = n a h w_z \quad (94)$$

gdje je: h - visina kanala.

2.5.1.2. Uređaji za mokro otprašivanje

Kod mokrog otprašivanja čvrste čestice se uklanjaju iz plinova uz pomoć kapljevine koja se dispergira u plinovima. Pri tom nastaju aglomerati čvrstih čestica i kapljevine koji se uklanjaju iz plina. Uređaji za mokro otprašivanje nazivaju se skruberi.

Proces otprašivanja u skruberima sastoji se iz slijedećih faza:

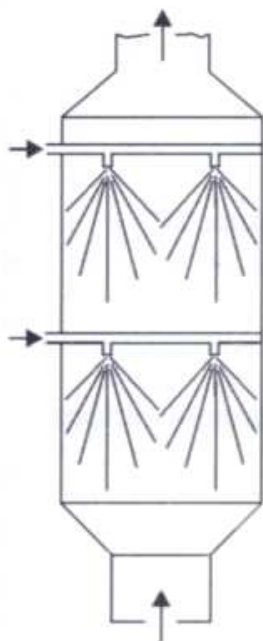
- smanjenje temperature i zasićenje vodenom parom.
- dispergiranje kapljevine pomoću sapnica, diskova ili struje plina,
- uklanjanje čvrstih čestica u sloju kapljevine.

S obzirom na način uvođenja kapljevine skruberi mogu biti:

- kolonski,
- vrtložni,
- rotacijski,
- ventirijski.

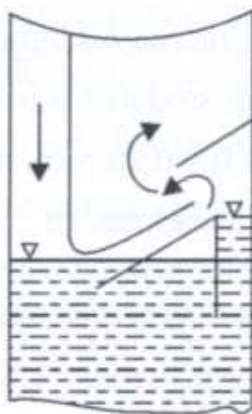
U kolonskim skruberima (Slika 43.) kapljevina se sapnicama raspršuje u struji onečišćenog plina, pri čemu dolazi do kontakta kapljevine i čvrstih čestica. Da bi se povećala kontaktna površina kolone se mogu ispuniti različitim punilima. Plin se giba protustrujno kroz porozni

sloj pri čemu mijenja smjer u ovisnosti o položaju punila. Čestice ne slijede struju plina već udaraju u mokru površinu punila, što pospješuje kontakt.



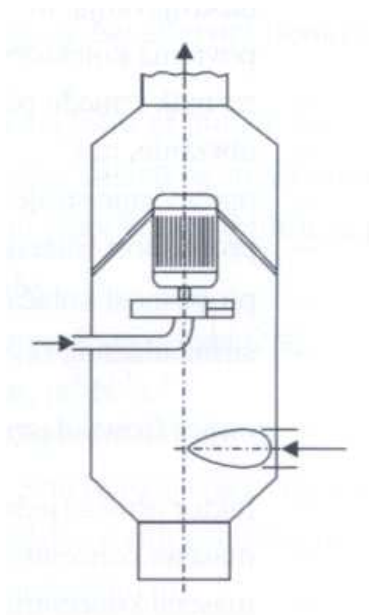
Slika 43. Kolonski skruber

Kod virtložnih skrubera (Slika 44.) struja onečišćenog plina provodi se kroz kapljevinu pri čemu u kapljevini zaostaju čvrste čestice.



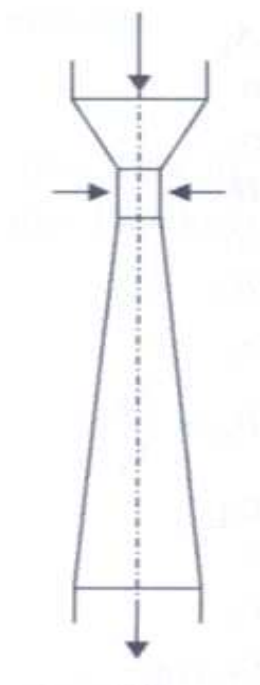
Slika 44. Vrtložni skruber

U rotacijskim skruberima (Slika 45.) kapljevina se raspršuje u onečišćenom plinu pomoću rotacijskih tijela.



Slika 45. Rotacijski skruber

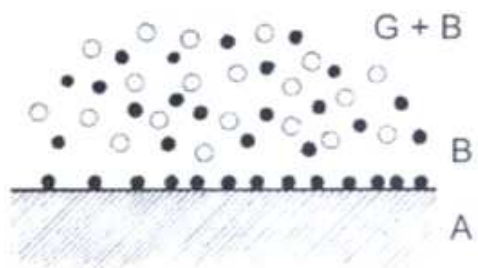
Onečišćeni plin najbolje je otprašivati venturijskim skruberima (Slika 46.) koji se sastoje od cijevi duge i do nekoliko metara u kojoj se kapljevina raspršuje strujom plina.



Slika 46. Venturijski skruber

2.6. Adsorpcija

Adsorpcija je pojava vezanja molekula jedne tvari na površinu druge. Tvar koja na sebe privlači neželjene tvari iz smjese (otopine, suspenzije, emulzije, plinske smjese) naziva se adsorbens. Na slici 47. shematski je prikazan proces adsorpcije. Nad površinom adsorbensa nalazi se smjesa različitih tvari (G+B). Molekule jedne tvari (B) vežu se na površinu adsorbensa za razliku od molekula druge tvari (G) koja ostaje nevezana. Na taj način se iz smjese uklanja nepoželjna tvar dok pročišćena smjesa ide dalje u proces.

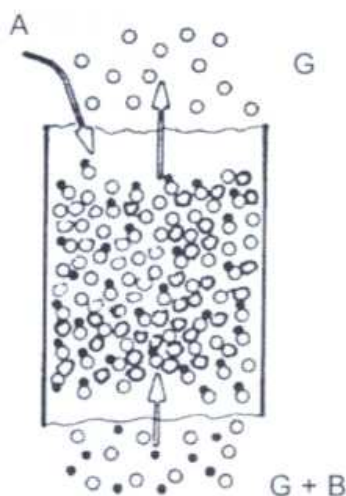


Slika 47. Shematski prikaz adsorpcije

Adsorpcija se može podijeliti na:

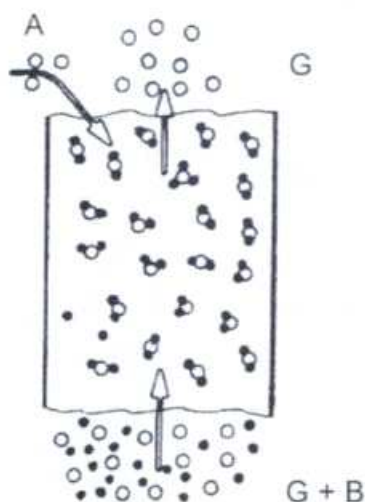
- adsorpciju kroz nepokretni sloj,
- adsorpciju kroz padajući (fluidizirani) sloj.

Za adsorpciju kroz nepokretni sloj (Slika 48.) lako bi se dalo zaključiti da se radi o filtraciji. Međutim, to nije točno jer su molekule tvari (B) koje treba adsorbirati male u odnosu na čestice adsorbensa (A) i šupljine između njih da bi mogle stvarati kolač kao što je to kod filtracije. Fino usitnjene čestice adsorbensa imaju veliku površinu, a samim tim i veliku površinsku energiju. Zbog te površinske energije molekule nekih tvari imaju prirodnu sklonost vezivanja na površinu čestice adsorbensa. Molekule drugih tvari (G) nemaju tu sklonost pa se ne vezuju na čestice adsorbensa. To nam ukazuje na selektivnu sposobnost čestica adsorbensa.



Slika 48. Adsorpcija kroz nepokretni sloj

Slika 49. prikazuje adsorpciju kroz padajući (fluidizirani) sloj. Kroz kolonu se odozgo prema dolje sipa adsorbens (A). U susret česticama adsorbensa (odozdo prema gore) struji smjesa molekula (G+B) koje treba razdvojiti. Molekule sklone adsorpciji (B) vežu se za čestice adsorbensa, te zajedno s njima padaju na dno kolne, dok molekule druge tvari (G) izlaze neadsorbirane na vrhu kolone.



Slika 49. Adsorpcija kroz padajući (fluidizirani) sloj

Adsorpcija se obavlja pod utjecajem fizikalnih ili kemijskih sila.

Ako se radi o fizikalnoj adsorpciji sile prijanjanja adsorbiranih molekula su vrlo slabe (van der Waalsove ili elektrostatičke sile), pa se adsorbens naknadnom obradom može pročititi (reaktivirati), te tako pročišćen ponovno vratiti u proces. Adsorbens je to vredniji što se više puta može reaktivirati.

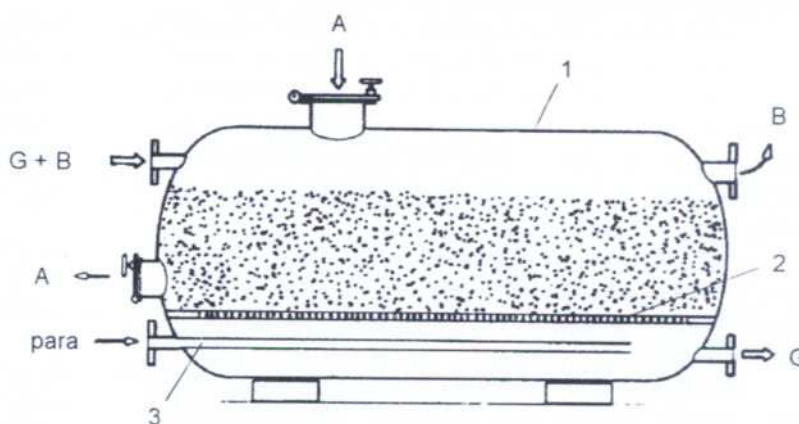
Kemijska adsorpcija nastaje kada reagiraju molekule adsorbensa i molekule tvari koja se adsorbira. Pri tom nastaje kemijski spoj, pa je taj postupak nepovratan.

Adsorpcija ima značajnu ulogu kod pročišćavanja pitkih i otpadnih voda, te kod pročišćavanja industrijskih plinova (sustavi plinovito / plinovito). Adsorpcijom se iz kapljevina uklanjaju: okus, miris, boja, fenoli, deterdženti, fosfati, nitrati, klor. Neke plinske smjese sadrže neke štetne, a istodobno i vrlo korisne sastojke koje treba odijeliti. Tako npr. koksni plinovi sadrže na izlazu iz koksnih peći pare benzena koji je vrlo cijenjena polazna sirovina za mnoge grane kemijske industrije. Vođenjem kroz adsorbere uklanja se benzen u parnom stanju. Prilikom reaktivacije adsorbera pare se desorbiraju i dobiva se benzen u čistome stanju.

2.6.1. Uredaji za adsorpciju

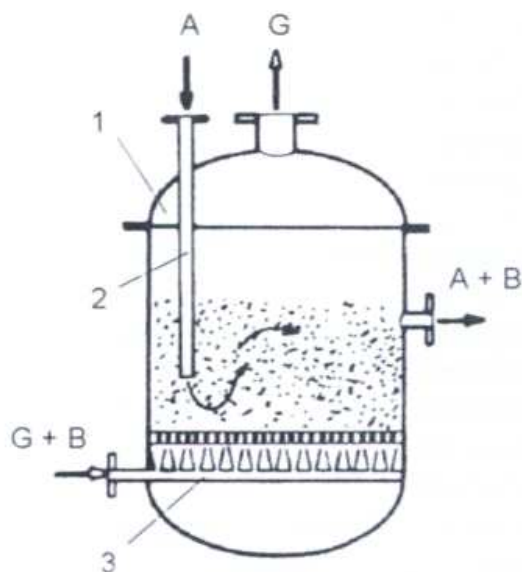
Dva navedena načina rada (Slike 48. i 49.) zahtijevaju dvije vrste adsorbensa i u pogledu granulacije. Za perkolaciju (adsorpcija kroz nepokretni sloj) služe adsorbensi većih čestica (promjer čestica od 2 - 8 mm). Čestice manjih dimenzija nasule bi se prečvrsto i neporopusno, te bi takav sloj čestica pružao preveliki otpor strujanju smjese. Za postupak tzv. kontaktne filtracije koriste se fluidizirane ili padajuće čestice adsorbensa malih dimenzija (ponekad i ispod 0.1 mm).

Adsorber s nepokretnim slojem (Slika 50.) se najčešće koristi kod čišćenja otopina i plinskih smjesa od nepoželjnih primjesa.



Slika 50 Adsorber s nepokretnim slojem

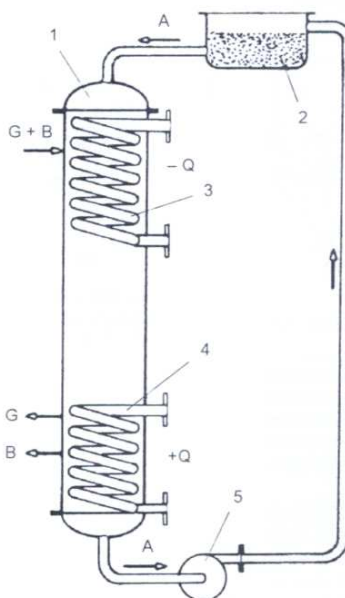
U velikoj posudi (1) na rešetci (2) se nalazi nasuti sloj adsorbensa. Sloj treba biti jednoliko nasut kako bi se spriječilo nastajanje većih kanala kroz koje bi otopina slobodnije prolazila. Na taj način bi adsorbens bio nejednoliko iskorišten. Otopina ulazi odozgo (G+B), struji kroz adsorbens, te očišćena izlazi, kroz rešetku, iz uređaja. Kada se površina adsorbensa zasiti adsorpcija se zaustavlja, te se vrši postupak reaktivacije sloja adsorbensa postupkom desorpcije. Odozdo, ispod rešetke, se pušta suha vrela vodena para. Para desorbira adsorbiranu tvar i zajedno iz sloja izlazi van iz uređaja. Nakon desorpcije vrućim suhim zrakom uklanja se zaostala vodena para. Zatim se vrši hlađenje adsorbensa hladnim zrakom. Kada je adsorbens ohlađen, adsorber je spreman za ponovni rad. Postrojenje se obično sastoji od dva uređaja, tako dok se u jednom vodi postupak adsorpcije u drugome se odvija desorpcija. Rad s adsorberom s nepokretnim slojem iziskuje dosta vremena jer je strujanje kroz sloj adsorbensa sporo. Da bi se smanjilo vrijeme procesa upotrebljavaju se adsorberi kroz padajući tj. fluidizirani sloj (Slika 51.).



Slika 51. Adsorber s fluidiziranim slojem

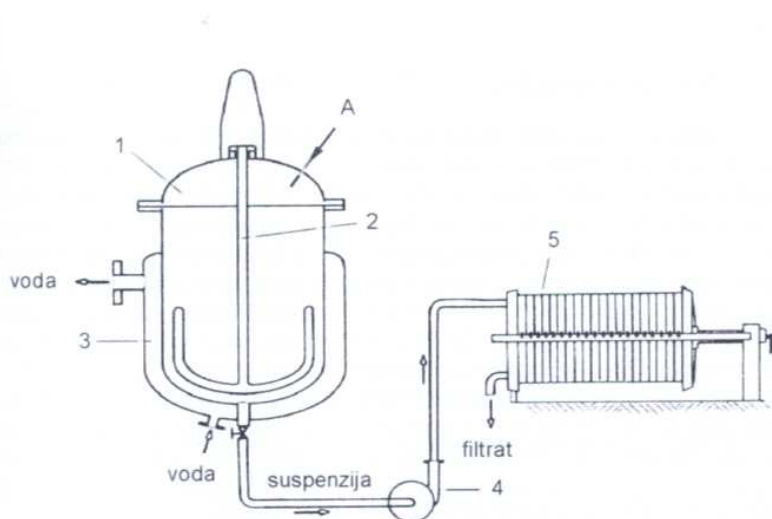
U posudu (1), se kroz cijev (2), uvodi sitan adsorbens koji se kreće kroz prostor unutar posude. Odozdo u adsorber ulazi otopina (G+B) koja se uz pomoć sapnica raspršuje po cijeloj površini posude, te prolazeći kroz rešetku uzrokuje fluidizaciju adsorbensa. Adsorpcijom u tom fluidiziranom sloju otopina se pročišćava te izlazi iz adsorbera (G). Zasićeni adsorbens (A+B) izlazi iz adsorbera, te odlazi na desorpciju. Proces je kontinuiran i vrlo uspješan jer su čestice adsorbensa u kontaktu s molekulama otopine po cijeloj svojoj površini. Adsorpcija u fluidiziranom sloju uspješno se primjenjuje i kod obrade plinskih smjesa.

U adsorpcijsku kolonu (1) (Slika 52.) odozgo se iz spremnika (2) uvodi usitnjeni adsorbens i otopina. Pomoću izmjenjivača topline (3) smjesa adsorbensa i otopine se hladi. Naime, adsorpcija molekula otopine na adsorbensu je egzoterman proces, pri čemu dolazi do oslobađanja topline. Da bi se postigla što bolja efikasnost adsorpcije ta se oslobođena topline treba odvoditi iz procesa. Zatim smjesa dolazi na dno kolone gdje se iz nje odvodi pročišćena otopina, a zasićeni adsorbens se desorbira. Desorpcija je endoterman proces, te je stoga potrebno adsorbens zagrijavati (4), kako bi se povećala učinkovitost desorpcije. Desorbirana komponenta (B) se odvodi iz kolone, a pročišćeni adsorbens se pneumatskim transportom (5) vraća u spremnik.



Slika 52. Adsorpcijska kolona

Problemi kod ovih uređaja se javljaju zbog malih dimenzija čestica adsorbensa (često ispod 0.1 mm). Brzine taloženja ovako malih čestica su jako male (ispod 0.01 m s^{-1}) pa takve moraju biti i brzine kapljevine koja se obrađuje. Povećanjem brzine kapljevine dolazi do odnošenja čestica adsorbensa. Da se to izbjegne čestice adsorbensa se suspendiraju u kapljevini, pri čemu se suspenzija miješa dok se ne postigne zadovoljavajuća čistoća kapljevine. Na slici 53. shematski je prikazano postrojenje za kontaktnu filtraciju.



Slika 53. Postrojenje za kontaktnu filtraciju

U posudi s plaštem (1) miješa se kapljevina iz koje se žele adsorbirati određene nečistoće. Iz spremnika se u posudu dovodi adsorbens (A). Hlađenje se vrši pomoću hladne vode koja se dovodi u plašt posude (3). Nakon izvršene adsorpcije suspenzija se pomoću pumpe (4) odvodi u filter-prešu gdje se odijele pročišćena voda i kolač sastavljen od čestica zasićenog adsorbensa.

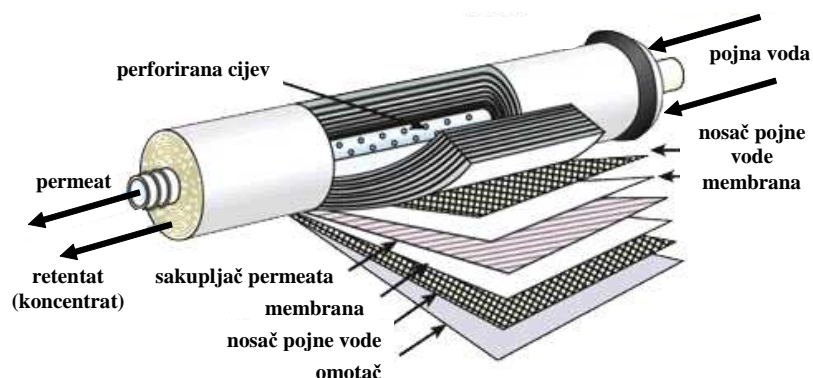
Za uspješan rad adsorpcije potrebno je poznavati granulometrijski sastav adsorbensa, te njegovu adsorpcijsku sposobnost i selektivnost. Površina adsorbensa je vrlo osjetljiva, pa male količine vlage, prašine, onečišćenog zraka, masnoće i sl. mogu uzrokovati njenu neaktivnost. Uz to je potrebno voditi računa o brzinama strujanja fluida koji se obrađuje, te temperaturi procesa adsorpcije i desorpcije.

2.7. Membranski postupci

Membranski postupci su načini postupci odvajanja u sustavima kapljevito / kapljevito pomoću polupropusnih membrana koje propuštaju kapljevinu i određene otopljene tvari, a nepropusne su za tvari koje treba ukloniti iz kapljevine (Slika 54.). Na taj način membrane dijele ulaznu (pojnu) kapljevinu na dva dijela:

- permeat
- retentat (koncentrat)

Permeat predstavlja dio kapljevine oslobođen od prisutnih tvari, dakle skoro čistu kapljevinu, a retentat (koncentrat) predstavlja dio kapljevine u kojoj su komponente pojne kapljevine zadržane i na taj način višestruko koncentrirane.



Slika 54. Membranski postupak

Membrane se mogu klasificirati prema:

- fizikalnoj morfologiji (poroznosti),
- kemijskoj prirodi.

Izotropne membrane su membrane kod kojih je poroznost jednaka po cjelokupnom presjeku, a anizotropne membrane su one membrane kod kojih poroznost nije jednaka. Anizotropne membrane mogu biti:

- asimetrične (napravljene od istog materijala),
- kompozitne (sastavljene od različitih materijala).

Prema kemijskoj prirodi membrane mogu biti:

- organske (polimerne),
- anorganske.

Osnovna klasifikacija membranskih postupaka može se postaviti prema sljedećim parametrima:

- pokretačkoj sili,

- mehanizmu zadržavanja,
- veličini pora,
- fazama u kontaktu.

Pokretačke sile kod membranskih postupaka su:

- razlika tlakova (Δp),
- razlika koncentracija (Δc),
- elektirčni potencijal.

Mehanizmi zadržavanja čestica mogu se zasnivati na:

- razlici veličine čestica
- razlici difuzivnosti čestica kroz membranu,
- razlici naboja čestica.

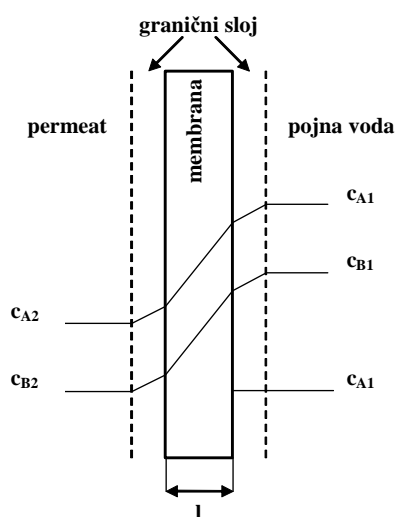
Prema svojoj strukturi membrane mogu biti:

- makroporozne (pore veće od 50 nm),
- mezoporozne (pore veličine 2 - 50 nm),
- mikroporozne (pore manje od 2 nm).

Osnovni membranski postupci su:

- mikrofiltracija,
- ultrafiltracija,
- nanofiltracija,
- dijaliza,
- elektodijaliza,
- pervaporacija,
- reverzna osmoza.

Dijaliza je proces koji služi za odjeljivanje tvari iz otpadnih kapljevina kroz polupropusnu membranu. Pogonska sila kod dijalize je razlika koncentracija pri čemu čestice dimenzija manjih od pora polupropusne membrane prolaze kroz membranu, dok na membrani zaostaju čestice većih dimenzija (Slika 55.).



Slika 55. Koncentracijski gradijenti u dijalizi

Kapljevina koju treba obraditi sastoji se od čestica različitih dimenzija (A, B, C). Na obje strane membrane stvaraju se granični slojevi koji mogu značajno povećati otpor difuziji čestica. Kao što se vidi iz slike 55. postoji razlika koncentracija čestica A i B ispred i iza membrane, dok čestice C zaostaju na membrani jer je njihova veličina veća od veličine pora membrane.

Fluks tvari dan je sljedećim izrazom:

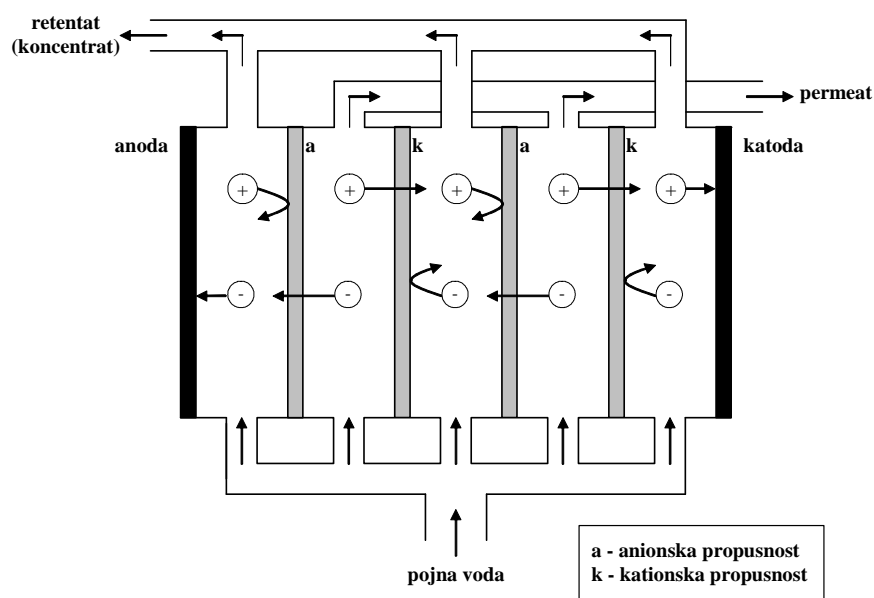
$$J_A = K_A (c_{A_1} - c_{A_2}) \quad (95)$$

$$\frac{1}{K_A} = \frac{1}{k_{1A}} + \frac{1}{k_{mA}} + \frac{1}{k_{2A}} \quad (96)$$

Koeficijenti prijenosa tvari k_1 i k_2 ovise o brzini strujanja i fizikalnim svojstvima kapljevine, te geometriji membrane. Koeficijent prijenosa membrane ovisi o difuzitetu (D) i debljini membrane (l):

$$k_m = \frac{D}{l} \quad (97)$$

U postupku elektrodijalize (Slika 56.) koriste se ion-selektivne membrane i razlika potencijala kao pokretačka sila. Postupak se temelji na načelu elektrolize. U tekućini bogatoj ionima, u kojoj djeluje električno polje, kationi se usmjeravaju na katodu, a anioni na anodu. Pri tom se koriste polupropusne membrane koje propuštaju samo katione, tj. samo anione.



Slika 56. Shematski prikaz elektrodijalize

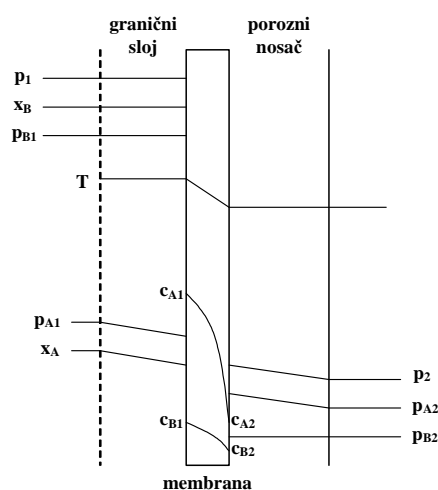
Pervaporacija je proces u kojem jedna ili više komponenata iz pojne smjese prolazi kroz polupropusnu membranu te isparava zbog nižeg tlaka (vakuuma) na drugoj strani membrane. Za pervaporaciju se koriste kompozitne membrane s gustim slojem koji je u kontaktu s pojnom smjesom i poroznim nosivim slojem koji je u kontaktu s parom. Promjena faza odvija se na membrani. Pri tome dolazi do smanjenja temperature pojne smjese jer se za isparavanje koristi njena unutarnja toplina. Taj pad temperature smanjuje efikasnost pervaporacije, pa se

ona koristi kada treba obraditi male količine pojne smjese. Kod većih količina pojne smjese koristi se višefazna pervaporacija sa međufaznim zagrijavanjem. Fluks pojedinih komponenti proporcionalan je koncentracijskom gradijentu i difuzitetu kroz gusti sloj. Koncentracijski gradijent nije linearan jer se membrana širi apsorpcijom kapljevine što uzrokuje povećanje koeficijenata difuzije. Širenjem membrane, zbog apsorpcije jedne komponente, uzrokuje porast difuziteta drugih komponenti. Fluks pojedinih komponenti kroz membranu debljine (l) dan je izrazom:

$$J = \frac{D_0}{\beta l} (e^{\beta c_1} - e^{\beta c_2}) \quad (98)$$

gdje je: β - konstanta

D_0 - difuzitet kod beskonačnog razrjeđenja.



Slika 57. Gradijenti u pervaporacijskoj membrani

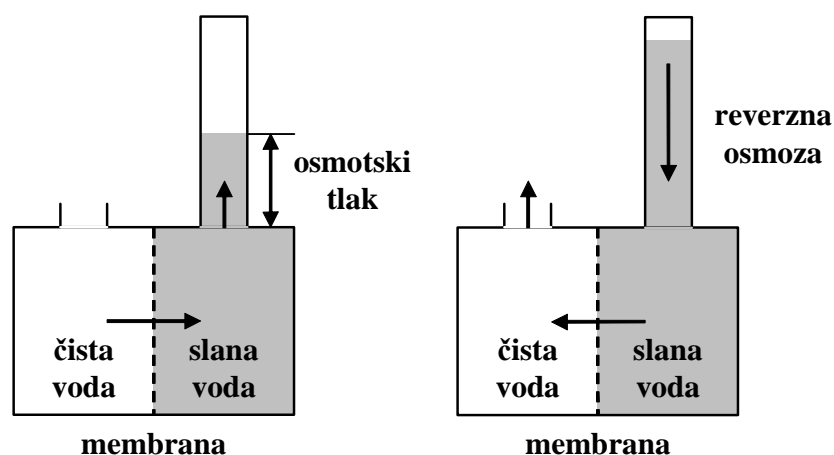
Na slici 57. prikazani su gradijenti za tipičan stacionarni sustav s pervaporacijskom membranom. Pojna smjesa je bogatija komponentom B, ali je komponenta A više topiva u polimeru od kojeg je izrađena membrana. Koncentracija komponente A je visoka s lijeve strane membrane. Koncentracijski gradijent komponente A je mali u graničnom sloju zbog velikog difuziteta. Opadanjem koncentracije A opada i difuzitet. Krivulja gradienta

komponente B ima sličan oblik i prikazuje promjene difuziteta komponente B kroz membranu. Koncentracije komponenti A i B (c_{A2} i c_{B2}) proporcionalne su parcijalnim tlakovima tih istih komponenti (p_{A2} i p_{B2}) s desne strane membrane. Koncentracija otapala A u membrani s lijeve strane ovisi o njegovoj topivosti u polimeru od kojeg je izrađena membrana na radnoj temperaturi i aktivitetu otapala A u tekućini.

Zagrijavanjem pojne smjese propusnost membrane raste 20 - 40 % za porast temperature od 10 °C pri čemu se značajno ne mijenjaju selektivna svojstva. Tlak s lijeve strane membrane iznosi 1 atm kako bi se spriječilo parcijalno isparavanje komponenti pojne smjese. S desne strane membrane nastoji se održavati što je moguće manji tlak kako bi se postigla što veća difuzija kroz membranu.

Pervaporacija se koristi kod uklanjanja hlapivih organskih onečišćenja iz otpadnih voda.

Reverzna osmoza (Slika 58.) je postupak koji se temelji na osmozi. Kada se otopine različitih koncentracija otopljenih tvari odvajaju pomoću membrana koje su propusne za kapljevину, a nepropusne za otoplјenu tvar difuzija kaplјevine se odvija iz posude manje koncentracije u posudu veće koncentracije otoplјene tvari. Ovaj proces se naziva osmozom. Uslijed prolaska kaplјevine iz jedne posude u drugu povećava se tlak kaplјevine u posudi s prethodno većom koncentracijom otoplјene tvari. Razlika između tlakova u posudama naziva se osmotskim tlakom. Veličina osmotskog tlaka ovisi o koncentraciji otoplјene tvari. Ako se poveća tlak u posudi s većom koncentracijom u vrijednosti većoj od osmotskog tlaka kaplјevina će se početi gibati u obrnutom smjeru. Na taj način će se povećavati koncentracija otoplјene tvari u posudi s većom koncentracijom, dok će u posudu s manjom koncentracijom dotjecati čista kaplјevina. Ovaj postupak suprotan od osmoze naziva se reverzna osmoza.



Slika 58. Shematski prikaz reverzne osmoze

Fluks kapljevine može se izraziti sljedećim izrazom:

$$J_v = \frac{c_v D_v v_v}{RT} \left(\frac{\Delta P - \Delta \pi}{l} \right) \quad (99)$$

gdje je: v_v - parcijalni molarni volumen kapljevine,
 $\Delta \pi$ - razlika osmotskih tlakova pojne smjese i permeata.

Fluks otopljene tvari:

$$J_s = D_s S_s \left(\frac{\Delta c_s}{l} \right) \quad (100)$$

gdje je: S_s - konstanta topljivosti

Reverzna osmoza se primjenjuje za demineralizaciju vodenih otopina, te za desalinizaciju morske i slane vode.

3. LITERATURA:

1. W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriott, UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING, McGraw-Hill, 6th edition, New York, 2001.
2. T.D. Reynolds, P. Richards, R. Reynolds, UNIT OPERATIONS AND PROCESSES IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING, Brooks Cole, New York, 1995.
3. M. Hraste, MEHANIČKO PROCESNO INŽENJERSTVO, Hinus, Zagreb, 2003.
4. V. Koharić, MEHANIČKE OPERACIJE, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
5. S. Tedeschi, ZAŠTITA VODA, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, 1997.
6. S. Rozgaj, A. Glasnović, TEHNOLOŠKE OPERACIJE, Profil International, Zagreb, 2000.
6. E. Mitrović-Kessler, FENOMENI TRANSPORTA (PRIJENOS TVARI I ENERGIJE), Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, Skripta za internu upotrebu, Split, 1985.
7. E. Mitrović-Kessler, TEHNOLOŠKE OPERACIJE, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, Skripta za internu upotrebu, Split, 1986.