

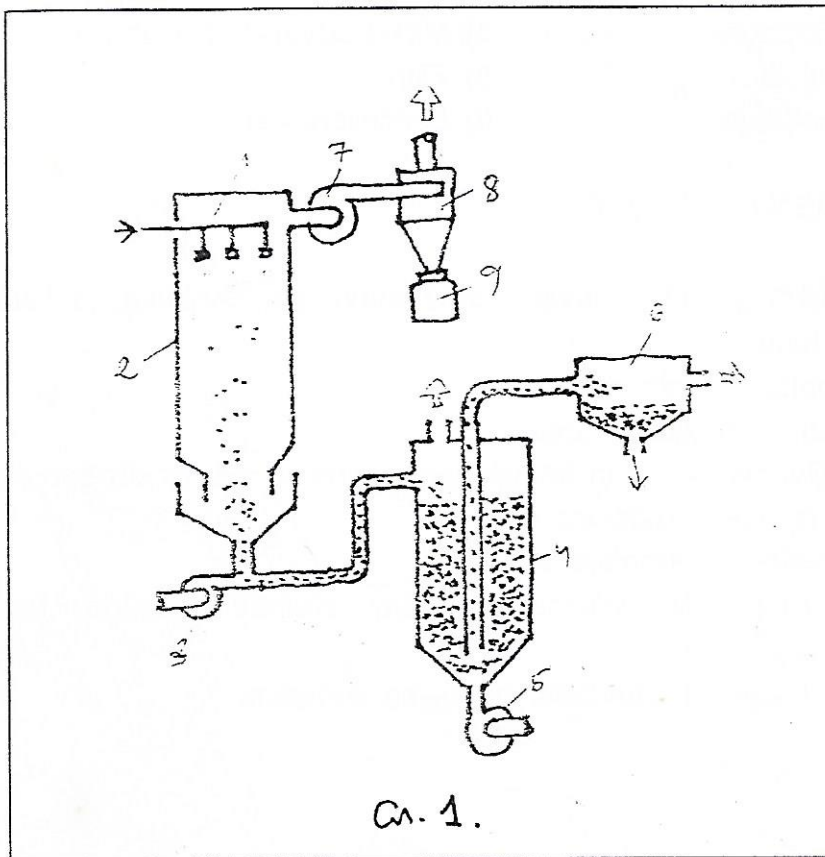
## IZDVAJANJE ČESTICA IZ GASNIH TOKOVA

Separacija čestica iz gasnog toka ili razdvajanje čestica od gasne struje vrši se iz dva razloga:

a) da se čestice - kao koristan produkt izdvoje radi korišćenja ili dalje obrade

b) da se spreči rasturanje čestica u okolinu (atmosferu) i time utiče na očuvanje životne sredine.

Oba aspekta mogu se ilustrovati na primeru procesa proizvodnje veštačkog đubriva prema skici 1. Tečni amonijum-nitrat se zagrejan na  $95^{\circ}\text{C}$  rasprskava sistemom mlaznica (1) na vrhu tornja (2). Kretanjem ka dnu tornja dolazi do isparavanja vlage i kristalizacije i nastanka granula čvrstog amonijum-nitrata. Granule padaju na dno tornja i



ventilatorom (3) se poluautomatski transportuju u fontanski sloj sa cevnim umetkom (4) gde se uz pomoć ventilatora (5) hlade i transportuju u prihvatnu (taložnu) komoru (6). Ventilator (7) obezbeđuje protok gasa kroz toranj. Budući da primarna raspodela kapljica tečnosti nije uniformna tokom granulacije stvoriće se određen prezenat vrlo sitnih čestica koje će biti iznete iz tornja. Ove čestice bi ventilator (7) izbacio u atmosferu, gde bi se one vremenom istaložile na tlo. Uloga centrifugalnog separatora (ciklona) (8) je da izdvoji ove čestice iz gasnog toka i da ih prikupi u prihvatnom rezervoaru (9) radi vraćanja u proces i sprečavanje zagađivanja okoline.

Izdvajanje gasovitih komponenti iz gasnih tonova usloveljeno je jedino mehanizmom difuzije (apsorpcija, adsorpcija) ili hemijske destrukcije (sagorevanje). Pri izdvajanju čestica iz gasne struje deluje drugi mehanizmi: gravitacioni, centrifugalne sile, inercioni sudari, elektrostatičke, termičke ili magnetne sile.

Uredjaji za izdvajanje čestica iz gasova predstavljaju sisteme kroz koje protiče gasna struja, a na čestice deluju sile koje ih primoravaju da napuste

struju gasa. Ove sile treba da budu dovoljno jake da se čestica izdvoji tokom njenog boravka u uređaju.

Sistemi za separaciju čestica se mogu svrstati u sledeće glavne grupe, prema načinu rada, odnosno prema fizičkim principima koji su osnova za konstruisanje uređaja,:

- |                           |                              |
|---------------------------|------------------------------|
| 1) Gravitacione komore    | 4) Mokri odvajači (skruberi) |
| 2) Inercioni odvajači     | 5) Filtri                    |
| 3) Centrifugalni odvajači | 6) Elektrostatički filtri    |

## KARAKTERIZACIJA GASNIH TOKOVA

Pod karakterizacijom gasnih tonova podrazumeva se identifikacija fizičkih i hemijskih parametara toka.

Za gasni tok neophodne informacije su:

- protok, temperatura, pritisak, tačka ...
- sastav, tj. utvrđivanje prisutnih komponenti, njihovih hemijskih svojstava i kinetika rastvaranja u različitim rastvaračima.

Za čestice neophodne informacije su:

- koncentracija, raspodela veličine i srednji prečnik, gustina, brzina taloženja,
- ostala svojstva: lepljivost, čvrstoća, hemijska svojstva.

## NAPOMENE:

### Merenje protoka

1) Prigušene ploče i venturi merila. Ovi instrumenti su permanentno instalisani. Za Prigušenu ploču Min. 6D od mesnog otpora, a za venturi Min. 3D od mesnog otpora.

2) Pito-i Pito-Prandtl-ove cevi. Mogu se koristiti ako je  $V > 10 \text{ m/s}$ ; postoje instrumenti sa električnim pretvaračima pritiska, koji uz odgovarajuće pojačane mogu meriti manje brzine. Najčešće se meri profil brzina po prečniku cevi, pa se integraljenjem određuje srednja brzina.

3) Anemometri (mehanički) ili sa vrelom žicom (Hot-wire); koriste za manje brzine

4) Rotametri - permanentno ugrađeni u cevovod, za manje protoke.

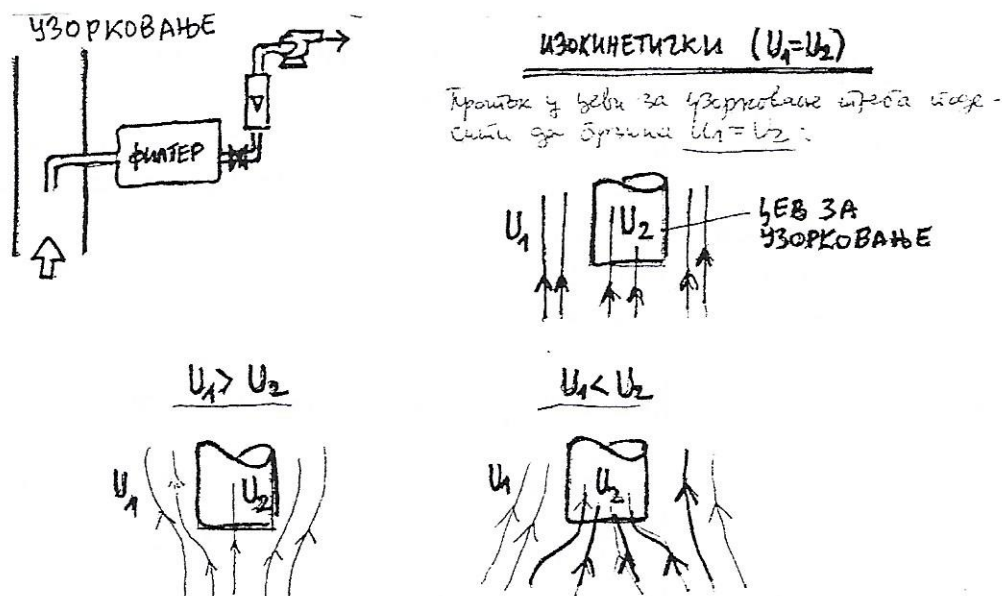
### Merenje temperature

- termometri sa živom ( $0-350^\circ\text{C}$ ), sa alkoholom ( $-80-100^\circ\text{C}$ )
- termoelementi (Cu-Konstantan  $-200-400$ ; Fe-konstantan  $0-800^\circ\text{C}$ ; Pt-Pt/Rh  $0-1800^\circ\text{C}$ , itd.).

Tačke rose značajno je da u cevovodima ne dolazi do pada temperature ispod tačke rose  $\rightarrow$  kondenzacija  $\rightarrow$  korozija.

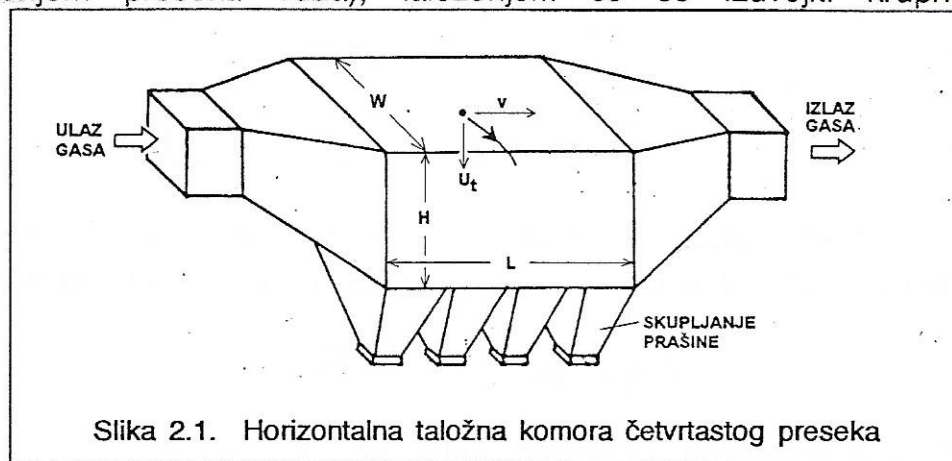


Kod uzorkovanja čestica radi određivanja koncentracije čestica neophodno je da se uzorkovanje obavi pod izokinetičkim uslovima:



## 1. GRAVITACIONI SEPARATORI (TALOŽNE KOMORE)

Najjednostavniji način izdvajanja čestica iz struje gasa je dozvoliti da se čestice istalože u gravitacionom polju. Ako se gasna struja dovoljno uspori (proširenjem preseka voda), taloženjem će se izdvojiti krupnije čestice.



Napomenimo da se, sa stanovišta odprašivanja gasova, krupnim česticama smatraju one koje ne prolaze kroz sito od 200 meša, što odgovara česticama većim od 76 mikrona.

U taložnoj komori dimenzija  $L \times W \times H$  (dužina x širina x visina) (sl.2.1.), najmanja čestica koja će se istaložiti sa efikasnošću od 100% predje sa svojom brzinom taloženja  $U_t$  visinu komore  $H$ , za vreme dok je struja gasa prenese na dužinu  $L$ , brzinom  $v$ . Drugim rečima, tokom vremena boravka gasa u komori ( $L/v$ ) vrši se taloženje čestica (isto vreme =  $H/U_t$ ):

$$\frac{H}{U_t} = \frac{L}{v}$$

Ova jednačina podrazumeva da čestica za vrlo kratko vreme dostigne svoju brzinu taloženja, što je realna pretpostavka za krupnije čestice.

Druga uobičajena inženjerska pretpostavka je da se čestice talože u Stoksovom (laminarnom) režimu. Ova pretpostavka predstavlja dobru aproksimaciju za čestice manje od 100 mikrona, kao što pokazuje tabela 2.1, u kojoj su eksperimentalne vrednosti brzina taloženja (za gustinu 1) uporedjene sa računskim vrednosotima prema Stoksovom zakonu.

Tabela 2.1 Brzine taloženja sferičnih čestica gustine 1000 kg/m<sup>3</sup> u vazduhu  
(1 at, 20° C)

| Prečnik čestice (μ) | Eksperimentalna vrednost (m/s) | Vrednost prema Stoksovoj jednačini (m/s) |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------------|
| 0,1                 | 8,7 · 10 <sup>-7</sup>         | 8,71 · 10 <sup>-7</sup>                  |
| 0,2                 | 2,3 · 10 <sup>-6</sup>         | 2,27 · 10 <sup>-6</sup>                  |
| 0,4                 | 6,8 · 10 <sup>-6</sup>         | 6,85 · 10 <sup>-6</sup>                  |
| 1,0                 | 3,5 · 10 <sup>-5</sup>         | 3,49 · 10 <sup>-5</sup>                  |
| 2                   | 1,19 · 10 <sup>-4</sup>        | 1,19 · 10 <sup>-4</sup>                  |
| 4                   | 5,0 · 10 <sup>-4</sup>         | 5,00 · 10 <sup>-4</sup>                  |
| 10                  | 3,06 · 10 <sup>-3</sup>        | 3,06 · 10 <sup>-3</sup>                  |
| 20                  | 1,2 · 10 <sup>-2</sup>         | 1,2 · 10 <sup>-2</sup>                   |
| 40                  | 4,8 · 10 <sup>-2</sup>         | 5,0 · 10 <sup>-2</sup>                   |
| 100                 | 2,46 · 10 <sup>-1</sup>        | 2,5 · 10 <sup>-1</sup>                   |
| 400                 | 1,57                           | 4,83                                     |
| 1000= 1mm           | 3,82                           | 30,50                                    |

U uslovima kada važi Staksov zakon, najmanji prečnik čestica koje će biti potpuno izdvojene u taložnoj komori može se odrediti prema jednačini:

$$d_{\min, \eta=100\%} = \sqrt{\frac{18\mu Q}{(\rho_p - \rho_f)gWL}}$$

Ova jednostavna jednačina treba da služi samo kao orijentacija pri određivanju efikasnosti kolekcije, pošto je uticaj čestica koje se talože u prelaznoj i turbulentnoj oblasti na čestice koje se laminarno talože skoro uvek od značaja. Osim toga, pri visokim koncentracijama čestica dolazi do izražaja i stešnjeno taloženje koje ima za posledicu sniženje efikasnosti izdvajanja.

Brzina strujanja gasa kroz taložnu komoru mora biti niža od brzine uzburkvanja i iznošenja već istaloženog materijala. Generalno pravilo za većinu materijala je da brzinu gasa treba održavati manjom od 3 m/s. Izuzetak su prah skroba i ugljenika, kada do iznošenja dolazi već pri brzinama manjim od 2 m/s.



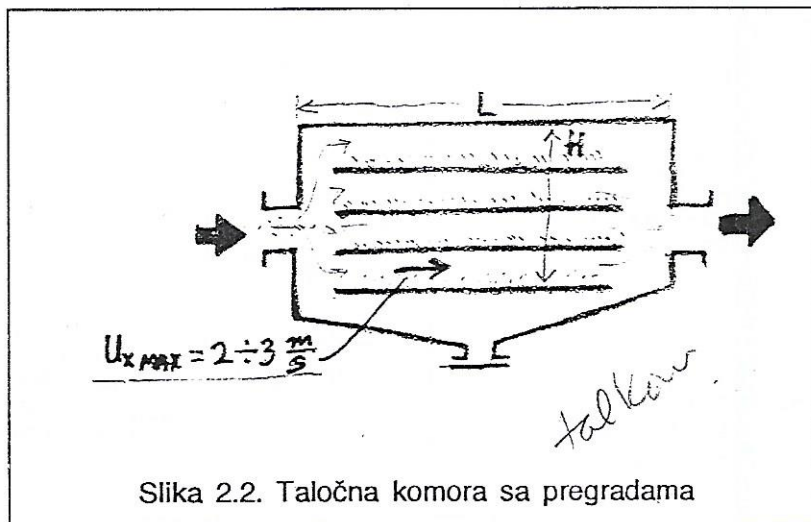
Sve čestice krupnije od  $d_{\min,100\%}$  potpuno se talože. Sitnije čestice se talože samo delimično. Efikasnost taloženja sitnijih čestica može se, ako je taloženje laminarno izračunati prema jednostavnoj relaciji:

$$\eta_i = 100 * \left( \frac{d_i}{d_{\min,100\%}} \right)^2$$

a ako je taloženje turbulentno, prema jednačini:

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{U_t \tau}{H}\right)$$

Jedan od načina za povećanje efikasnosti kolekcije je skraćivanje puta koji čestica mora da pređe da bi se istaložila. To se postiže ubacivanjem pregrada u taložnu komoru (slika 2.2). Ako komora sadrži N pregrada, visina svake sekcije je  $H/(N+1)$ , a frakciona efikasnost  $U_t \cdot (L/V) (N+1)/H$ .



Slika 2.2. Taložna komora sa pregradama

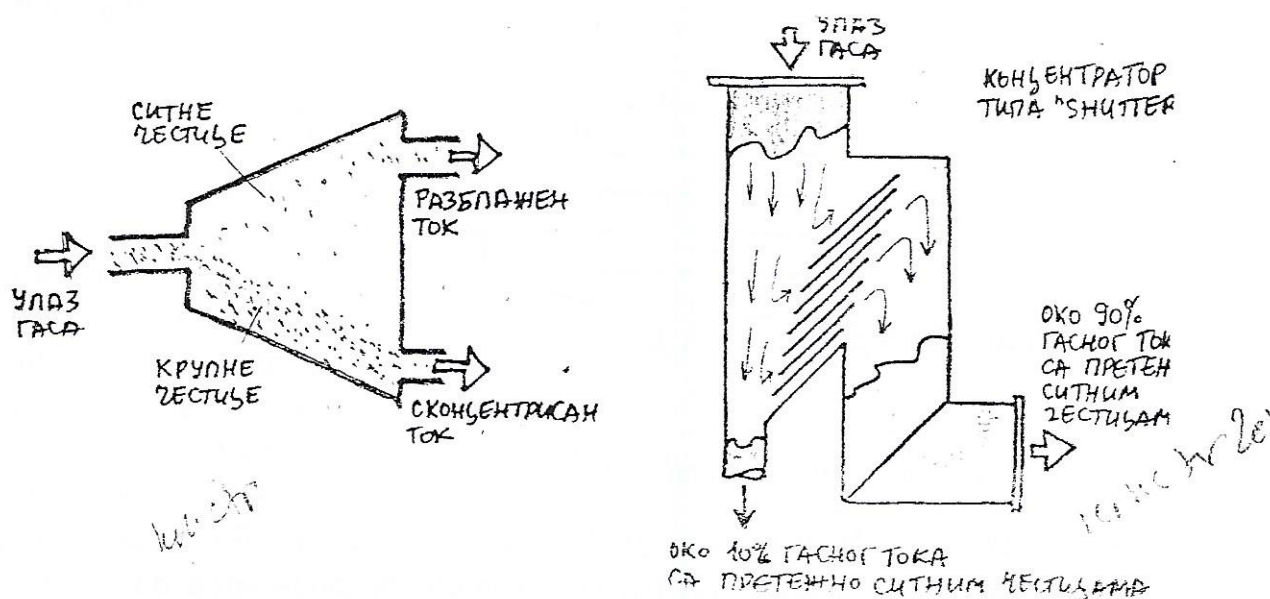
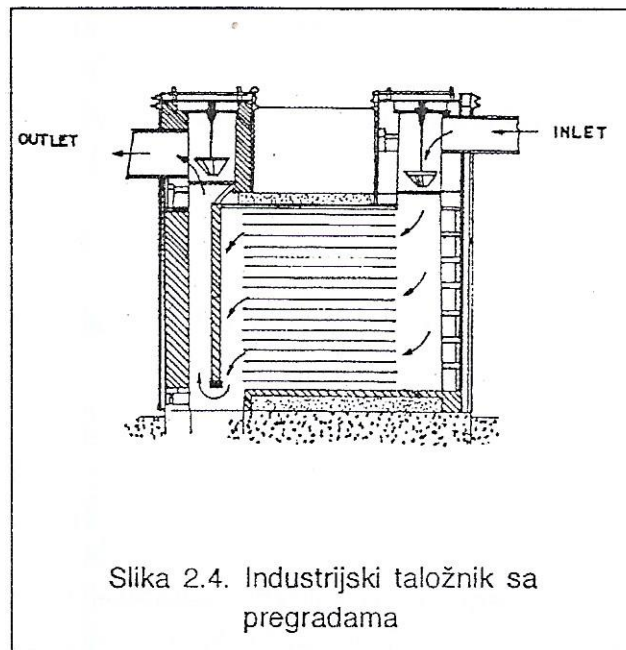
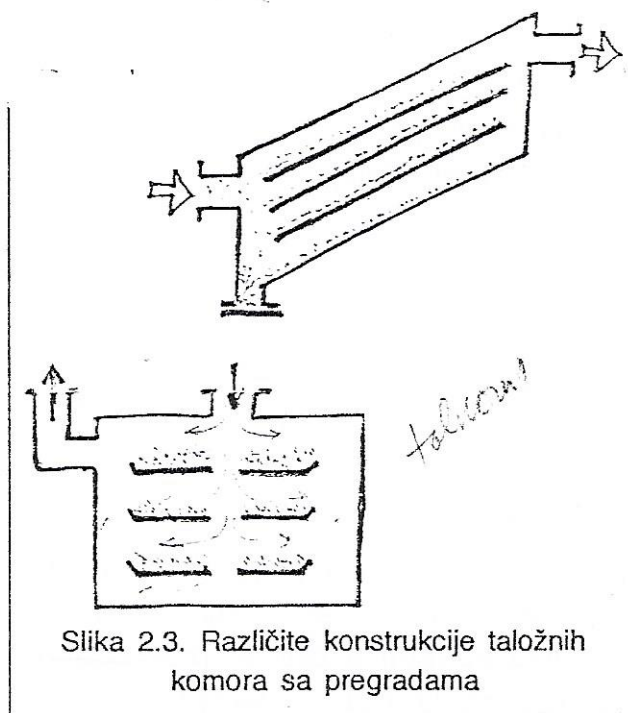
Taložne komore se koriste kao pred-prečištači gasova koji sadrže veće koncentracije čestica ili krupne čestice. Jednostavne su konstrukcije, troškovi investicija i održavanje su niski, materijal se izdvaja u suvom stanju uz mali pad pritiska. Osnovni nedostatak je veliki prostor

koji iziskuje (dužina komore je reda veličine 10 m). Pri projektovanju treba voditi računa da brzina strujanja kroz komoru ne bude veća od 2-3 m/s, da bi se sprečilo odnošenje već staložene prašine.

Iako su taložne komore, u principu, niskoefikasni uređaji u industriji se često koriste. Postoje čitav niz tehničkih rešenja, a neka od tih su prikazana na slici 2.3., dok je na slici 2.4. dat izgled industrijskog taložnika.

Napomenimi da su taložne komore uređaji periodičnog dejstva tj. zahtevaju periodično čišćenje istaloženih čestica.

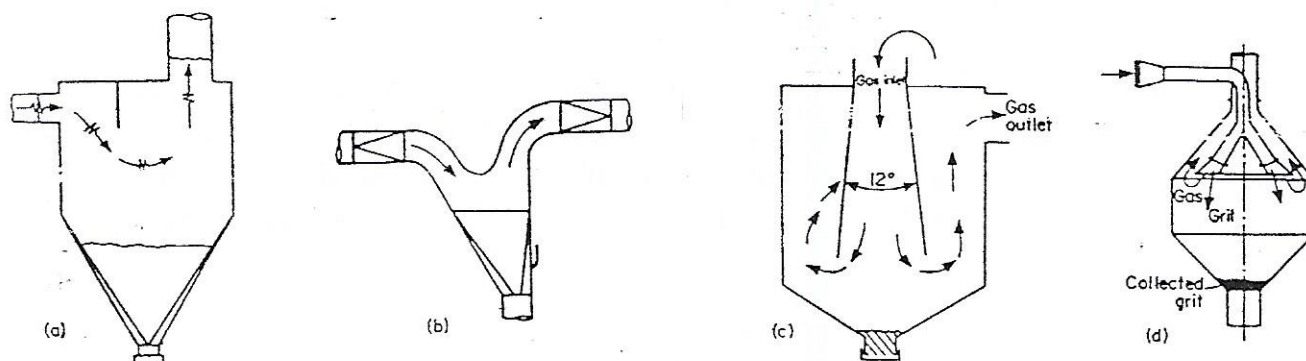
Taložne komore se mogu koristiti i za koncentrisanje struje čestica, kada se želi gasna struja osloboditi dela čestica (krupnih) da se ne bi opterećivali efikasniji uređaji za separaciju. U ovom slučaju iz uređaja dobijamo dve struje: skoncentrisanu i razblaženu. Zapreminski protok razblažene struje je manji u odnosu na ulaznu, od 10 do 50%. Dva tipična tehnička rešenja su prikazana na slici 2.5.



## 2.2. INERCIONI ODVAJAČI

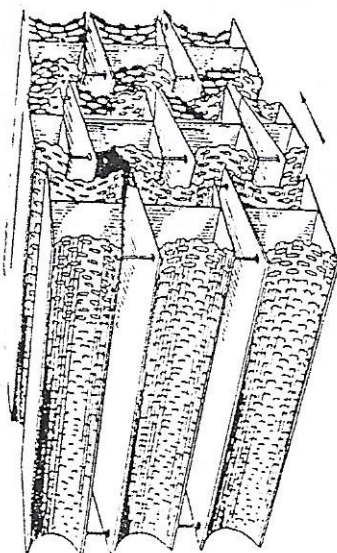
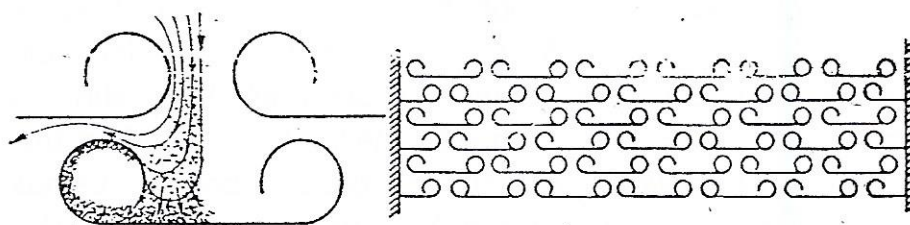
Efikasnost jednostavnih taložnih komore može se povećati i zapremina uređaja smanjiti na taj način što će se česticama saopštiti dopunsko ubrzanje na niže. Na ovaj način se povećava gravitaciona sila, a čestice usled inercije ne mogu u potpunosti da slede gasnu struju. Broj tehničkih rešenja koja koriste ovaj princip je veoma veliki, a neka od njih su prikazana na slici 2.5.



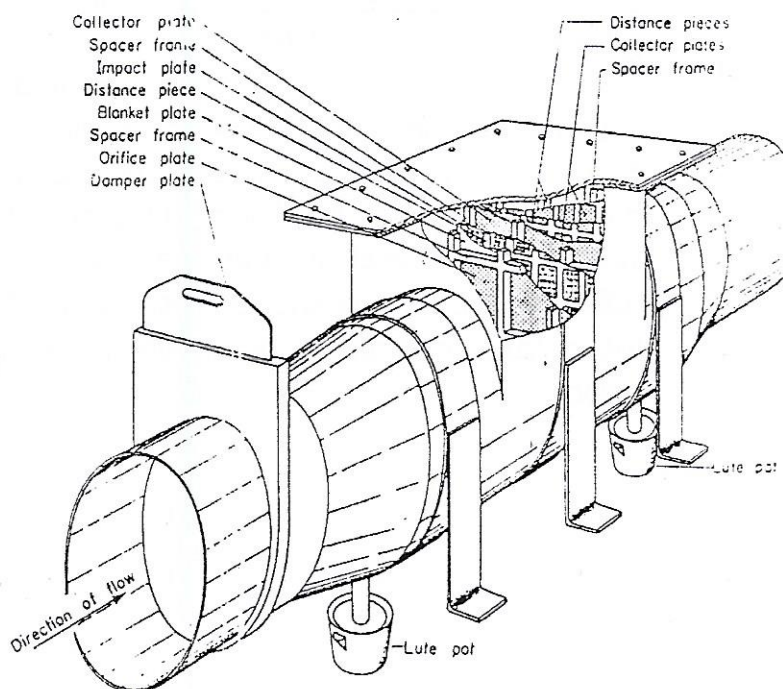


Slika 2.5. Različiti tipovi vertikalnih inercionih odvajača

Drugi tip inercionih odvajača su horizontalne komore sa pregradama. Gas koji nosi čestice prinudjen je da struji izmedju vertikalnih pregrada, a čestice usled inercije nisu u stanju da slede putanju gasa, udaraju u pregrade, gube kinetičku energiju i talože se uz pregradu na niže. Komore mogu biti velikih dimenzija, odnosno kapaciteta. Koriste se različiti inercioni elementi. Jedna od mogućih konstrukcija prikazana je na slici 2.6.



Slika 2.6



## CENTRIFUGALNI SEPARATORI

### Taloženje u centrifugalnom polju

Kretanje čestica u centrifugalnom polju podleže zakonima koji su slični zakonima kretanja čestica u fluidu u gravitacionom polju. U stvari, jedina principijelna razlika je u tome što u centrifugalnom polju deluje mnogo jače ubrzanje ( $a$ ), koje je funkcija poluprečnika obrtanja ( $r$ ) i periferne brzine ( $w$ ), jer je:

$$a = \frac{w^2}{r}$$

Ako je  $m_p$  masa čestica tada je centrifugalna sila na česticu u centrifugalnom polju:

$$F_c = m_p a = m_p \frac{w^2}{r}$$

Periferna brzina data je izrazom:

$$w = 2\pi r n$$

gde je  $n$ - broj obrtaja ( $s^{-1}$ ).

Značaj centrifugalne sile za razdvajanje čestica od fluida možemo

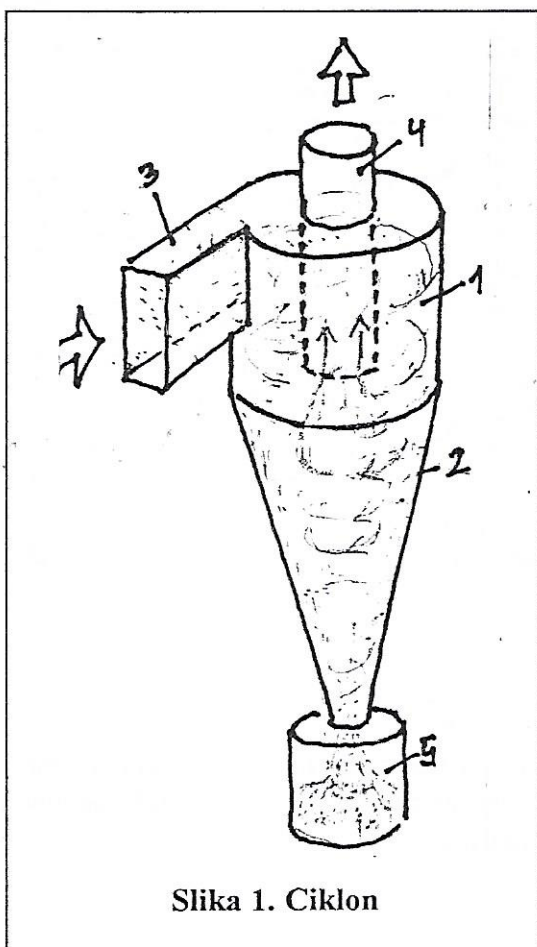
| Tabela 1.                   |           |
|-----------------------------|-----------|
| Br.obrt., $\text{min}^{-1}$ | $F_c/F_g$ |
| 0                           | 0         |
| 50                          | 2.8       |
| 100                         | 11.2      |
| 500                         | 279.5     |
| 1000                        | 1117.9    |
| 10000                       | 111786    |
| 50000                       | 2794655   |
| 100000                      | 11178620  |

razmotriti na sledećem primeru: Telo mase 1 kg u gravitacionom polju ima težinu ( $1 \text{ kg}$ )  $\times$  ( $1 \text{ g}$ )  $= 9.81 \text{ kg} \times \text{m/s}^2 = 1 \text{ N}$ . Ako isto telo rotira, na primer, sa poluprečnikom obrtanja  $r=1 \text{ m}$ , njegova "težina" se višestruko uvećava srazmerno broju obrtaja. Odnos centrifugalne sile koja deluje na to telo ( $F_c$ ) prema sili koja na njega deluje u gravitacionom polju ( $F_g$ ) prikazan je u tabeli 1. Iz tablice vidimo kako se u centrifugalnim poljima mogu proizvesti veoma velike sile.

Na primer, poslednji podatak u tabeli nam kaže da bi jedan kilogram iz gravitacionog polja u navedenom centrifugalnom polju bio "težak" preko 11 miliona kilograma. Zbog toga se u centrifugalnim poljima mogu izdvojiti iz fluida veoma sitne čestice, čak se mogu razdvajati i molekuli po molekulskim težinama. Centrifugalna sila se upotrebljava kako za razdvajanje čvrste od tečne faze (centrifuge, hidrocikloni) tako i za razdvajanje čvrste od gasne faze (cikloni).



Cikloni. Centrifugalni odvajajući čestica (cikloni) su veoma rasprostranjeni uređaji u procesnoj industriji. U njima se suspenzija gas-čestice vrtložno kreće omogućavajući centrifugalnoj sili da izdvoji čestice čvrste materije iz gasovitog fluida. Na sl. 1 prikazan je jedan ciklon. To je vertikalni cilindrični sud (1) koji se donjim delom produžava u konus (2). Suspenzija se uvodi kroz uvodnu cev (3) tangencijalno u odnosu na cilindričan sud (1). Zbog toga će se struja kretati periferno uz unutrašnji zid cilindra. Pošto se struja izvodi kroz cev (4) postavljenu aksijalno u cilindar, to će struja spiralno da se okreće oko usisne cevi po sve manjim poluprečnicima da bi najzad kroz donji deo cevi bila isisana. Na tom putu zbog velike brzine obrtanja i sve manjeg prečnika na suspenziju će delovati sve jača centrifugalna sila prouzrokujući da se čestice talože radijalno na cilindrični i konični deo uređaja. Čestice koje udare u zid gube kinetičku energiju i spiralno se kreću na niže u prihvatni sud (5).



Slika 1. Ciklon

podaci na slici 2.

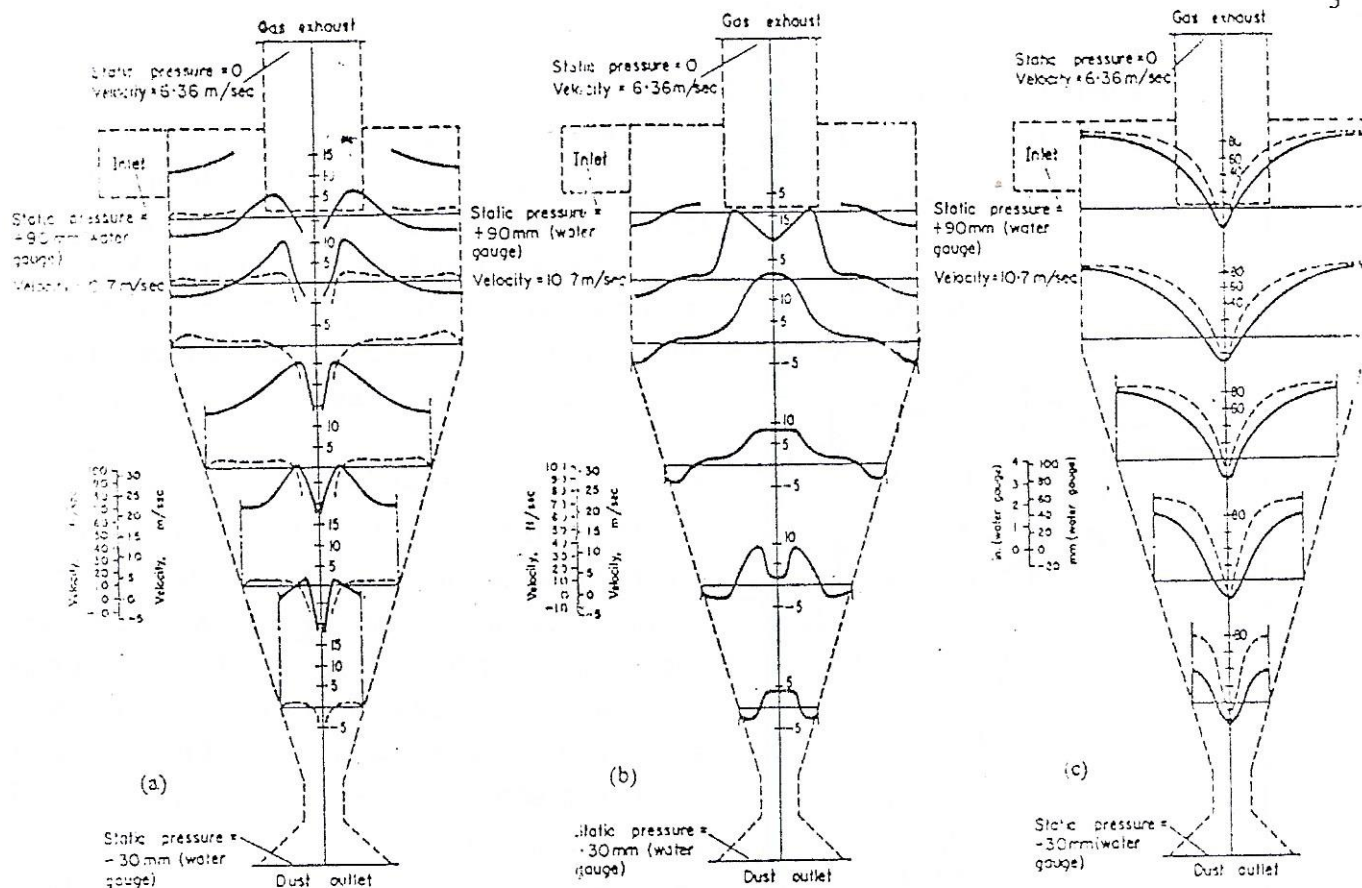
Za projektovanje ciklona najvažnija su dva parametra - efikasnost izdvajanja čestica i pad pritiska.

#### Sistemi za izdvajanje čestica iz ciklona

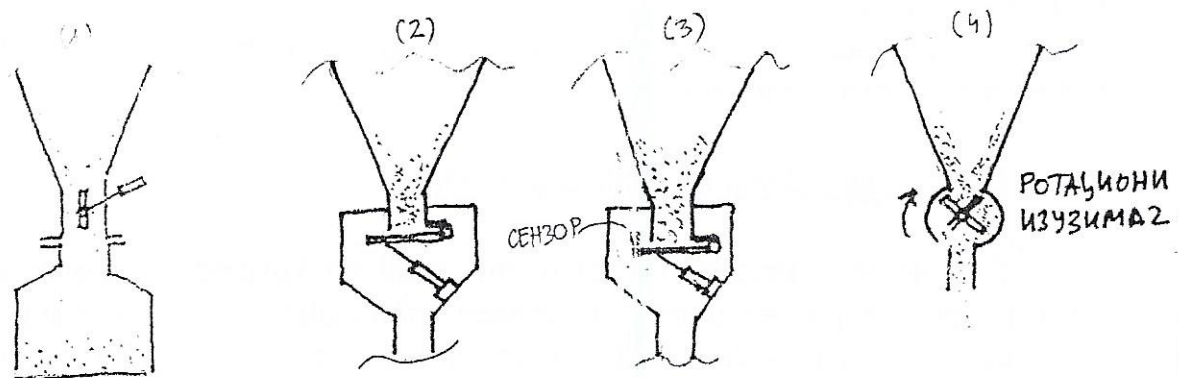
Postoje više sistema (sl. 3) u zavisnosti od količine izdvojenih čestica i od toga da li je proces u pogledu čestica kontinualan ili ne. Za manje količine materijala leptirasti ventil se povremeno zatvori (sl. 3.1) i prihvatni rezervoar manuelno isprazni. Na sl. 3.2 prikazan je zatvarač koji se u odredjenim vremenskim intervalima automatski otvara ili koji se otvara kada masa istaloženog materijala dostigne odredjenu vrednost (sl. 3.3). Ukoliko je istaloženi materijal potrebno kontinualno izuzimati iz uređaja koristi se obrtni zatvarač (sl. 3.4).

Ukupni stepen efikasnosti ciklona definisan je:

$$\eta_t = \frac{m_u - m_i}{m_u} = 1 - \frac{m_i}{m_u}$$



Slika 2. Profil tangencijalne, radijalne i vertikalne komponente brzine gasa u ciklonu  
 a) Profil tangencijalne i radijalne brzine, b) Profil vertikalne brzine, c) Profil ukupnog i statičkog pritiska



Slika 3. Sistemi za izdvajanje čestica iz ciklona

gde je  $m_u$  - protok čvrstih čestica na ulazu u ciklon (kg/s) a  $m_i$  - protok čestica na izlazu iz ciklona (kg/s). Ako je  $V$  zapreminski protok gasa kroz ciklon, a  $c_u$  i  $c_i$  koncentracija čestica na ulazu odnosno izlazu iz ciklona tada je :



$$\eta_t = \frac{Vc_u - Vc_i}{Vc_u} = 1 - \frac{c_i}{c_u}$$

Ukupni stepen efikasnosti nije dovoljan za ocenu rada određenog ciklona. Očigledno je da će stepen efikasnosti biti veći za krupnije čestice, a manji za sitnije čestice. Zbog toga definišemo frakcioni stepen efikasnosti:

$$\eta_i = 1 - \frac{c_{ii}}{c_{ui}}$$

gde su  $c_{ui}$  i  $c_{ii}$  koncentracija i-te frakcije na ulazu odnosno na izlazu. Veza između frakcionog i ukupnog stepena efikasnosti je:

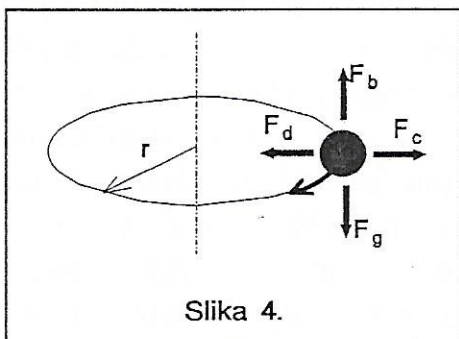
$$\eta_t = 1 - \frac{\sum m_{ui}(1 - \eta_i)}{\sum m_{ui}}$$

gde je  $m_{ui}$  maseni protok i-te frakcije na ulazu u ciklon, a  $\eta_i$  stepen efikasnosti razdvajanja i-te frakcije. Kako je smeša gas čestice na ulazu u ciklon ravnomerno izmešana važi i

$$m_u = \sum x_i m_{ui}$$

gde je  $x_i$  težinski udeo i-te frakcije u ulaznoj struji.

Granični prečnik čestice je prečnik one čestice koja će se sigurno izdvojiti u datom ciklonu. Postoji više modela za određivanje graničnog prečnika i svi oni baziraju na različitim uprošćenjima složene strujne slike strujanja u ciklonu. Ako posmatramo jednu česticu koja rotira na poluprečniku  $r$  oko neke ose (sl.4.) onda su sile koje deluju na česticu su:  $F_c$ - centrifugalna sila,  $F_g$ -gravitaciona sila,  $F_b$ - sila potiska i  $F_d$  - sila trenja između fluida i čestica. Ako zanemarimo silu gravitacije i silu potiska, jer su male u



Slika 4.

odnosu na  $F_c$  i  $F_d$  uslov "ravnoteže" dat je izrazom:

Ako zamislimo da čestica rotira u ciklonu tada uslov ravnoteže znači da

$$F_d = F_c \quad (1)$$

će se čestica beskonačno vrteti oko ose. Ako je  $F_c > F_d$ , centrifugalna sila će "odvući" česticu na zid uređaja, i ona će se istaložiti. Ako je  $F_c < F_d$  sila trenja će "odvući" česticu u osu uređaja i ona će biti izneta iz ciklona. Ako pretpostavimo da su čestice sitne sila trenja ( $F_d$ ) je data Štoksovim zakonom, a uslov ravnoteže je:

$$3\pi\mu w_r d_{gr} = m_p \frac{w^2}{r} \quad (2)$$

gde je  $d_{gr}$ - granični prečnik čestice,  $w$ -periferna brzina i  $w_r$  - radijalna brzina.

Kako je za sfernu česticu  $m_p = (d_{gr}^3 \pi / 6) \rho_p$ , i kako je brzina u radijalnom pravcu  $w_r = dr/d\tau$ , jednačina (2) postaje

$$w_r = \frac{d_{gr} \rho_p w^2}{18 \mu r} = \frac{dr}{d\tau} \quad (3)$$

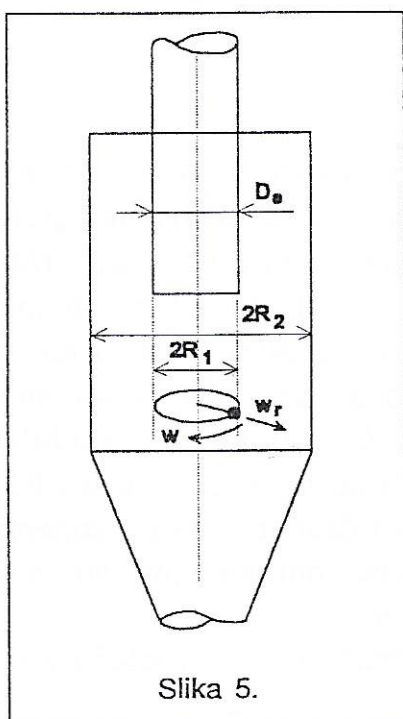
Vreme izdvajanja čestice (vreme "putovanja" od nekog  $R_1$  do  $R_2$ ) je:

$$d\tau = \frac{18 \mu r dr}{d_{gr}^2 \rho_p w^2} \quad (4)$$

odnosno

$$\tau = \frac{18 \mu}{d_{gr}^2 \rho_p} \int_{R_1}^{R_2} \frac{r dr}{w^2} \quad (5)$$

Vreme izdvajanja čestica prečnika  $d_{gr}$  je vreme potrebno da čestica predje put od unutrašnjeg cilindra prečnika  $2R_1$  do spoljnog cilindra prečnika  $2R_2$  (slika 5).  $2R_2$  je očigledno prečnik cilindričnog dela ciklona. Koji je prečnik  $2R_1$  postoje razlike u modelima. Najčešće se pretpostavlja da je prečnik unutrašnjeg (zamišljenog) cilindra jednak prečniku odvodne cevi ( $2R_1 = D_e$ ).



Slika 5.

Prema Barth-u  $2R_1 = D_e/2$ , prema terLinden-u  $2R_1 = 2/3 D_e$ , itd. Mi ćemo usvojiti pretpostavku  $2R_1 = D_e$ .

Geometrijski odnosi za ciklone su standardizovani tako da su sve geometrijske mere u nekom odnosu prema prečniku ciklona, kako pokazuje slika 6. za standardni ciklon (tip A). Pored ovog tipa, koji je standardni ciklon opšte namene (i čija je karakteristika srednja efikasnost i srednji pad pritiska) postoje i drugi tipovi - koji najčešće dobijaju nazive po autoru (na primet po Bart-u). Takodje, pojedini proizvođači opreme imaju svoje interne standardne. Razlike između različitih tipova se ogledaju u odnosu kapaciteta, efikasnosti i pada pritiska.

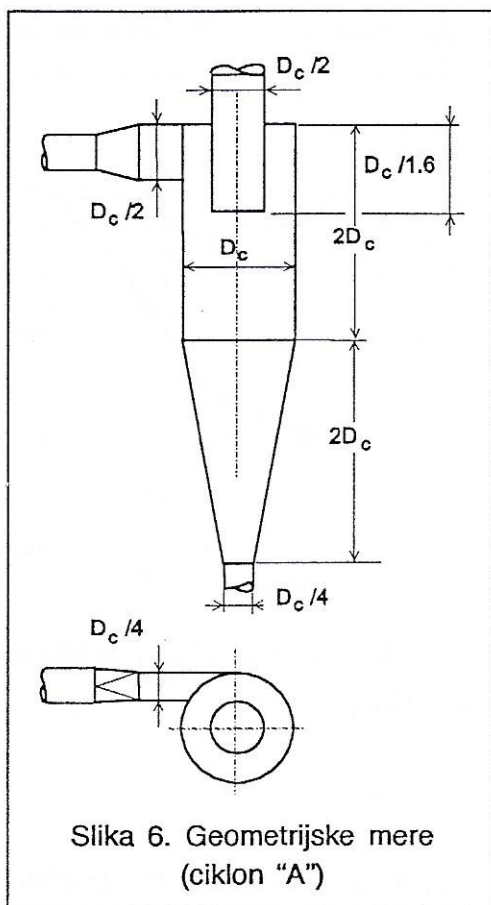
Čestica se u cilindričnom delu ciklona kreće po zavojnoj liniji, pri čemu efektivno napravi  $n$  zavoje. Najjednostavnija hipoteza je da je broj zavoja jednak odnosu visina cilindričnog dela prema visini ulaznog kanala. Za ciklon "A", prema oznakama na slici 6. biće

$$n = \frac{2D_c}{(D_c/2)} = 4 \quad (6)$$

Dok napravi  $n$  obrta čestica predje približno put  $s$ :

$$s = 2\pi n(R_1 + R_2)/2 \quad (7)$$





Kako se čestica kreće (perifernom) brzinom  $w$ , za  $n$  obrta joj je potrebno vreme  $\tau$ :

$$\tau = 2\pi n(R_1 + R_2) / 2w \quad (8)$$

Izjednačavanjem izraza (5) i (8) je

$$2\pi n(R_1 + R_2) / 2w = \frac{18\mu}{d_{gr}^2 \rho_p} \int_{R_1}^{R_2} \frac{r dr}{w^2} \quad (9)$$

Ako pretpostavimo da je periferna brzina ( $w$ ) približno konstantna i jednaka brzini u ulaznoj cevi ( $w=U_i$ ) i da istaložena čestica treba da predje put od  $R_1$  do  $R_2$ :

$$d_{gr}^2 = \frac{18\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\rho_p \pi U_i (R_1 + R_2)} = \frac{9\mu(R_2 - R_1)}{\rho_p \pi U_i} \quad (10)$$

Za standardni ciklon "A", slika 6., važe odnosi:  $R_2=D_c/2$  i  $R_1=D_c/4$ , pa je:

$$d_{gr} = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{D_c \mu}{\rho_p \pi U_i}} \quad (11)$$

Ako je  $V$ - zapreminski protok gasa, a  $A_{ul}$  – ulazna površina za gas, tada je:

$$U_i = \frac{V}{A_{ul}} = \frac{V}{(D_c/2)(D_c/4)} = \frac{8V}{D_c^2} \quad (12)$$

Zamenom jed.(12) u jed. (10) je:

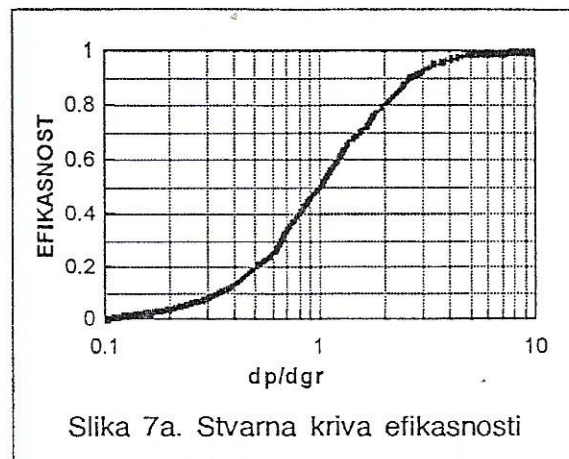
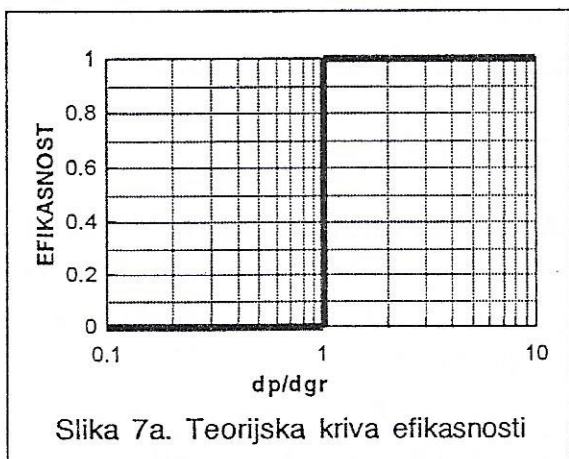
$$d_{gr} = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{D_c^3 \mu}{8\rho_p \pi V}} = 0.149 \sqrt{\frac{D_c^3 \mu}{\rho_p V}} \quad (13)$$

Uočavamo da je za čestice  $d_p \geq d_{gr}$  efikasnost izdvajanja  $E=100\%$ , dok je za  $d_p < d_{gr}$  efikasnost  $E=0$ . Očigledno je da izraz za  $d_{gr}$  zavisi bitno od tri pretpostavke koje su uključene u model

- da čestice rotiraju po zamišljenom cilindru prečnika  $2R_1$
- da gas napravi efektivno  $n=4$  obrta
- da je periferna brzina približno konstantna i jednaka brzini u ulaznoj cevi.

Sva tri faktora zavise od geometrijske uredjaja, tj. od geometrijskih odnosa. Pored navedenog izraza (13) postoje i drugi izrazi za određivanje  $d_{gr}$ . Teorijski, kriva efikasnosti izdvajanja čestica ima oblik prikazan na slici 7a. U praksi, međutim, ima odstupanja: ne rotiraju sve čestice po zamišljenoj poutanji prečnika  $2R_1$ . Može se dogoditi da krupnije čestice rotiraju po putanji prečnika manjeg od  $2R_1$ , pa će biti iznete iz ciklona. Sa druge strane, može se dogoditi da poneka sitnija čestica, koja bi normalno bila izneta strujom gasa iz ciklona, usled sudara sa krupnijom česticom biva odbačena do zida ciklona i

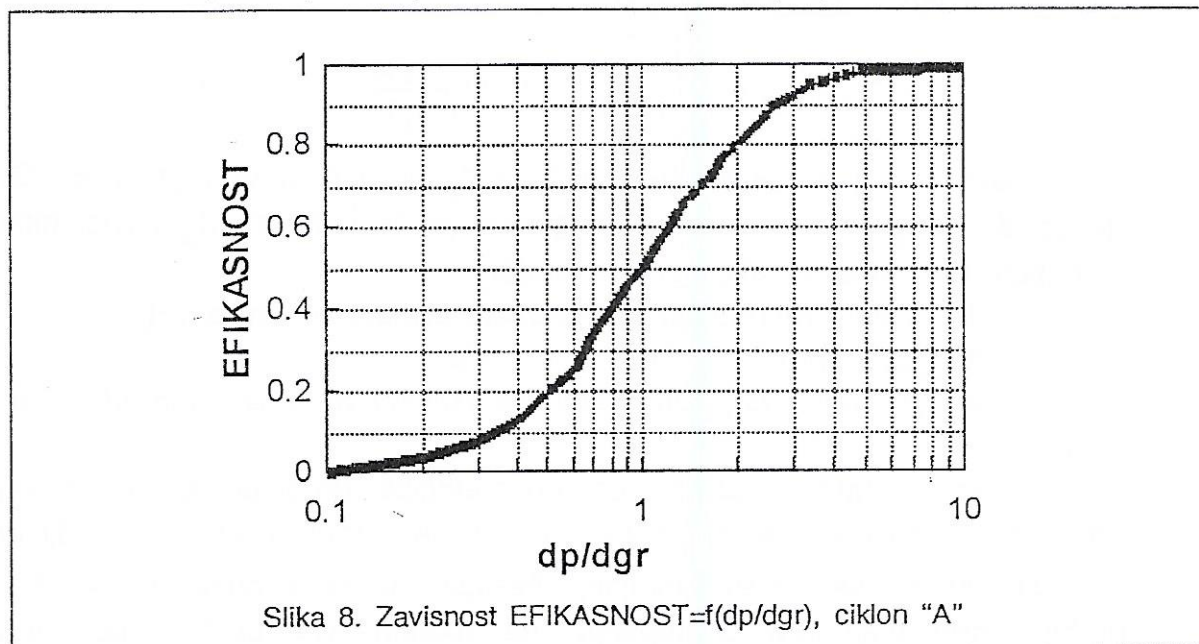
istaložena. Sve ovo ima za posledicu da realna kriva efikasnosti ima karakterističan "S" oblik prikazan na slici 7b. Najčešće se usvaja da je za



granični prečnik čestice (odredjen po jednačini 13) verovatnoća izdvajanja 50%, pa ga nazivamo  $d_{50}$ . Na ovaj način jednačina (13) postaje:

$$d_{50} = 0.149 \sqrt{\frac{D_c^3 \mu}{\rho_p V}} \quad (14)$$

Stvarna efikasnost izdvajanja za čestice odredjenog prečnika  $d_p$  odredjuje se na taj način što se prvo odredi  $d_{50}$  (po jedn.14), a zatim se koristi dijagram  $\eta=f(d_p/d_{50})$ , prikazan na slici 8, koji se odnosi na ciklon tipa "A". Ovakvi dijagrami odredjuju se eksperimentalno za svaki tip standardizovanih ciklona. Na primer, ako posmatramo česticu koja je dvostruko veća od  $d_{50}$



( $d_p/d_{50}=2$ ), njena efikasnost izdvajanja je oko 80%. Sa druge strane, čestica koja je dvostruko manja od  $d_{50}$  ( $d_p/d_{50}=0.5$ ) ima efikasnost izdvajanja od oko 20%.



Pored navedenog, za ciklone se obično definišu i preporučene brzine u ulaznoj cevi. Tako je za ciklon tipa "A" preporučena brzina u ulaznoj cevi  $U_i=10-18$  m/s.

#### Pad pritiska u ciklonu

Ciklon se u instalaciji obično tretira kao mesni otpor i pad pritiska se koreliše u funkciji kvadrata najveće brzine, a to je ulazna brzina  $U_i$ . Tako je za ciklon tipa "A" pad pritiska definisan relacijom:

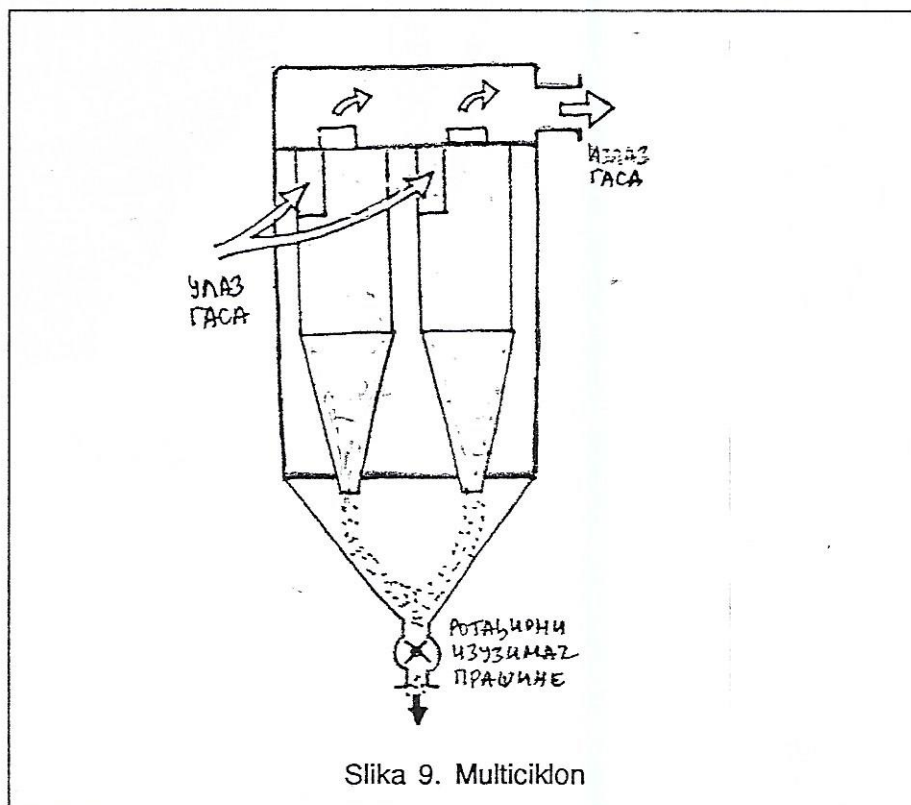
$$\Delta P = 13 \frac{\rho_f U_i^2 A_{ul}}{2 D_e^2} \quad (15)$$

Gde je  $\rho_f$  gustinba gasa. Kako je za ovaj ciklon  $D_e = D_c/2$ , a  $A_{ul} = (D_c/2)(D_c/4)$ , to jednačina (15) konačno postaje (za ciklon tipa "A"):

$$\Delta P = 3.25 \rho_f U_i^2 \quad (Pa/m) \quad (16)$$

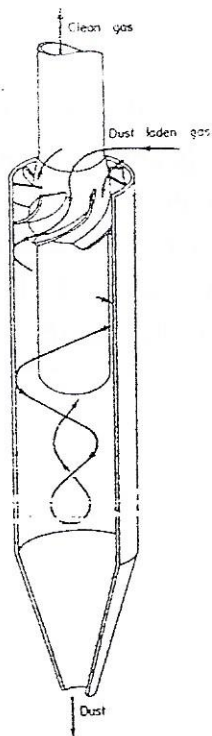
#### Multicikloni

Analizom jednačine (14) može se pokazati da će dva geometrijski slična ciklona, pri istoj ulaznoj brzini gasa, imati različite granične prečnike čestica ( $d_{50}$ ) i da će veći ciklon imati manju efikasnost. Ako je potrebno obraditi veliki zapreminski protok gasa, sa relativno velikom efikasnošću, tada je moguće rešenje da se koristi baterija od  $N$  paralelno vezanih ciklona, koja se naziva multiciklon. Na slici 9 dat je šematski prikaz jednog multiciklona.

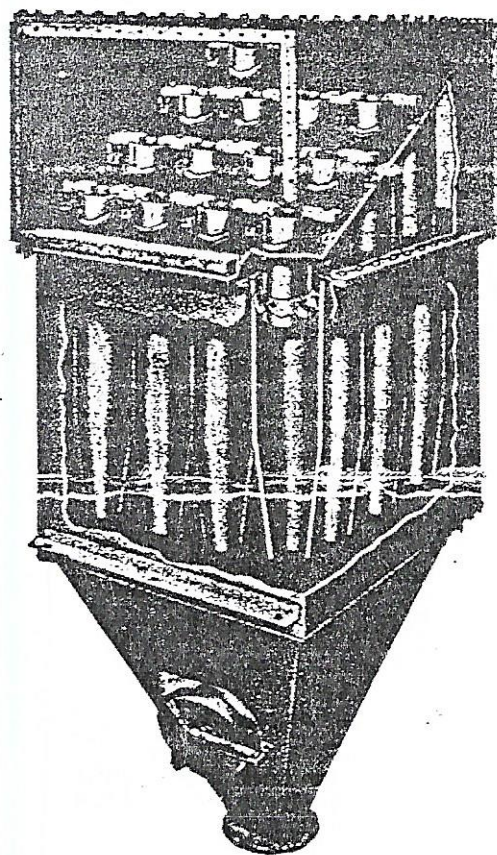


### Aksijalni cikloni

Cikloni o kojima je do sada bilo reči nazivaju se radijalni, zbog toga što se gasna struja uvodi radijalno (tangencijalno) u cilindrični deo uređaja i na taj način se česticama saopštava centrifugalna sila. Rotaciju čestica moguće je ostvariti i u tkz. aksijalnim ciklonima (slika 9). U ovom slučaju gas se koaksijalno (u odnosu na telo ciklona) uvodi u uređaj, a rotiranje se ostvaruje specijalno profilisanim lopaticama (stator). Budući da se u ovom slučaju ostvaruje manji stepen rotacije u odnosu na radijalne ciklone, efikasnost aksijalnih ciklona je manja. Na slici 10 prikazan je multiciklon koji je sastavljen od niza aksijalnih ciklona u paralelnoj vezi.



Cn. 9.



Cn. 10



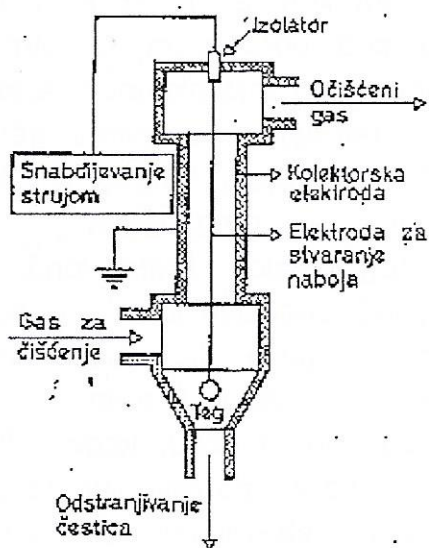
## ELEKTOSTATSKI PRECIPITATORI (ELEKTRO-FILTERI)

Elektronski precipitatori, poznati i kao elektrostatski taložnici ili elektro-filtri (netačno jer se ne vrši filtriranje), služe za čišćenje gasova od čvrstih ili tečnih čestica širokog spektra veličina.

Izdvajanje čestica iz gasa uz pomoć elektrostatičkih precipitatora (EST) zasniva se na naelektrisanju čestica koje nosi gas prolaskom kroz jako električno polje i njihovom privlačenju od strane suprotno naelektristanih tela (kolektorske elektrode). Čestice koje se skupljaju na elektrodama, ukoliko su u tečnom stanju, pod uticajem gravitacionih sila odlaze prema dnu precipitatora, slivaju se i odstranjuju. Čvrste čestice se sa kolektorskih elektroda (povremenim otresanjem ili vibracijom) skupljaju na dno precipitatora, odakle se odstranjuju.

U elektrostatskom precipitatoru osnovne sile koje deluju na izdvajanje čestica iz gasa su sile elektrostatskog privlačenja.

Električno polje koje služe za izdvajanje čestica uspostavlja se izmedju dve elektrode. Kod jednostavnih precipitatora par elektroda je i izvor naelektrisanja i kolektor čestica. Ukoliko ima više elektroda, tada se govori o višeelektrotaložnim precipitatorima.

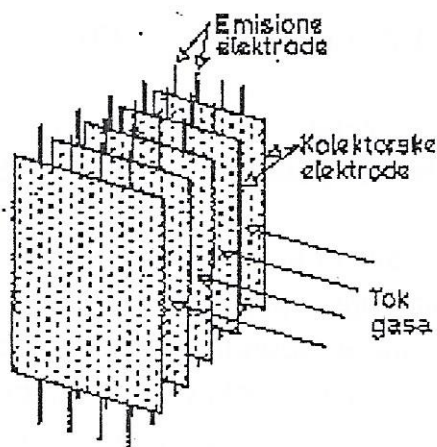


Sl.1. Cilindrični jednostepeni elektrostatički taložnik

Kod jednostavnog cilindričnog elektrostatskog precipitatora, čiji šematski prikaz je dat na slici 1, gas koji se prečišćava ulazi na njegovo dno, tu se čestice naelektrisavaju i kreću se dalje prema zidu precipitatora (koji predstavlja kolektorsku elektrodu), gde se zadržavaju i izdvajaju. Elektroda za stvaranje naboja na česticama je postavljena u sredini elektrostatskog precipitatora. Često se za čišćenje gasova postavlja (u parovima) više pojedinačnih cilindričnih elektrostatičkih precipitatora.

Pored cilindričnih elektrostatskih precipitatora upotrebljavaju se i precipitatori sa paralelnim pločama. Sastoje se od paralelnih ploča (slika 2), izmedju kojih je postavljen veći broj paralelnih obešenih žica o izolatore, koje služe kao elektrode za obezbedjenje naboja na česticama.

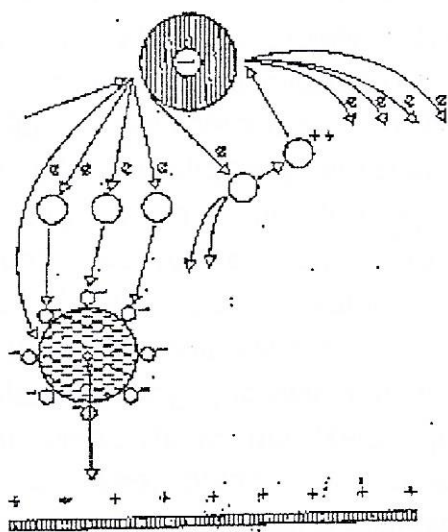
Rastojanja izmedju emisije (elektroda za isijavanje elektrona) i kolektorske elektrode su oko 25 cm. Naponska razlika izmedju elektroda iznosi 30 000 - 115 000 volti, a veličina napona zavisi od više faktora:



Sl.2. Šematski prikaz elektrostatičkog taložnika sa paralelnim pločama

Uspešan rad elektrostatskih precipitatora zavisi od emisije negativnog naboja (elektrona), koji se spaja sa česticama, što im, u odgovarajućem električnom polju, omogućava kretanje prema kolektorskoj (pozitivnoj) elektrodi.

Mada je poznato više mehanizama formiranja jona u gasu, jedini mehanizam koji se može koristiti u elektrostatskim precipitatorima je



Sl.3. Šematski prikaz procesa u koroni pri elektrotaloženju čestica

- napona proboja gasa koji se prečišćava,
- međuelektrodnog rastojanja,
- pada napona kroz sloj istaloženih čestica,
- koncentracije čestica u gasu i njihove specifične naelektrisanosti i
- pojave povratne korone.

Da bi se ostvarilo što jače električno polje, naponska snaga se održava što bliže naponu proboja, uz istovremeno odstranjivanje izdvojenih čestica, čime se izbegava formiranje debelog sloja čestica na elektrodama, a time i pad napona kroz sloj čestica.

To je pojava koja se dešava pod određenim uslovima i koja omogućava kretanje elektriciteta kroz gas.

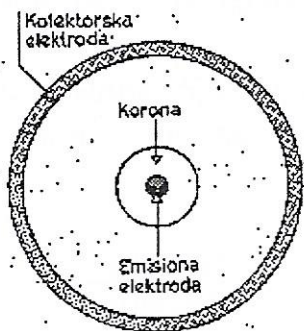
U normalnim uslovima gas provodi električnu struju veoma slabo. To provođenje omogućava prisustvo određenog, malog broja jona u gasu. Zahvaljujući prisustvu jona u gasu i jakom električnom polju koje se uspostavlja moguće je formiranje korone.

Elektroni u gasu, kada udju u jako električno polje, dobijaju ubrzanje prema pozitivnom naelektrisanju. Ubrzani elektroni će se kretati prema pozitivnom naelektrisanju sve dok se ne sudare sa nekom česticom, drugim elektronima,

atomima ili molekulima. Ukoliko elektroni imaju dovoljnu energiju, oni prilikom sudara izbijaju nove elektrone, čije kretanje takodje ubrzava električno polje. Novoizbijeni elektroni će, dalje, izbijati nove elektrone. Na svome putu elektroni, udarom ili adsorpcijom, naelektrisu jone gasa, koji se kreću prema pozitivnoj elektrodi. Pozitivno naelektrisani joni iz gasa privučeni negativnom (emisionom) elektrodom udaraju o nju i izbacuju nove elektrone stvarajući "elektronsku avinu". To i'ustrije i šematski prikaz dat na s'ici 3. Na ovaj način



samo jedan elektron velike energije može da proizvede hiljade novih elektrona. Ovi procesi se dešavaju u području korone, koja je u blizini elektrode, što se može videti sa šematskog prikaza datog na slici 4.



Sl.4. Šematski prikaz korone

Ponekad dolazi do formiranja negativne korone - ukoliko nastali slobodni elektroni nisu u stanju da se spajaju sa molekulama gasa i da formiraju negativne jone. Tada se elektroni kreću prema pozitivnoj elektrodi uz nastanak varničenja, što uslovljava razbijanje korone. Pojedini gasovi, kao što je azot, slabo primaju elektrone, tako da je prisustvo ovih molekula u gasu nepovoljno za korišćenje negativne korone. Međutim, sumpor-dioksid, vodena para, kiseonik i ugljen-dioksid su

veoma dorbi apsorberi elektrona.

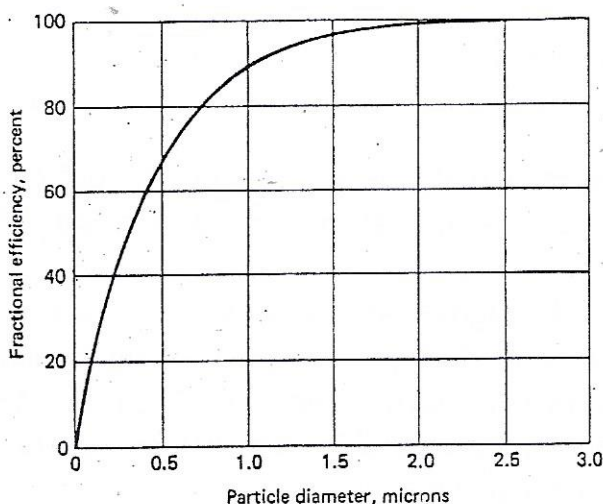
Elektrostatski precipitatori najefikasnije izdvajaju čestice iz gasa ako je ravnomeran raspored brzina kretanja gasa koji se čisti. Pojava vrtložnog kretanja gasa može da dovede do podizanja istaloženih čestica, a time i do smanjenje efikasnosti elektrostatskih precipitatora.

Pri kretanju gasa sa česticama kroz elektrostatski precipitator na čestici

utiču tri potencijalna polja:

- a) strujno polje fluida zbog razlika u pritisku gasa
  - b) gravitaciona sila
  - c) električno polje,
- zatim sile trenja, pojava turbulentnog kretanja gasa i dr.

Na efekat izdvajanja čestica iz gasa značajno utiču i električne karakteristike gasa, a to su: a) stepen električne provodljivosti čestica, b) sposobnost čestice da se lako naelektrišu sudarom ili vezivanjem naelektrisanih čestica, elektrona ili jona i c) gustina



Sl.5. Tipičan dijagram frakcione efikasnosti EST

čestice i karakteristike njene površine.

Tipična kriva frakcione efikasnosti izdvajanja čestica pomoću elektrostatskog precipitatora prikazana je na slici 5.

Veličina električnog otpora čestica određuje pravilnost rada elektrostatskog precipitatora. Električni otpori čestica koji su iznad  $10^{10} \Omega/\text{cm}$  smanjuju prolaz struje kroz električno polje, a time i efikasnost izdvajanja elektrostatskog precipitatora. Električni otpori čestica koji su manji od  $10^6 \Omega/\text{cm}$  dovode do brzog razelektrisanja čestica koje su istaložene na elektrodi, što

može znatno smanjiti efikasnost rada elektrostatskog precipitatora. Prisustvo u gasu molekula vode, sumpor-dioksida i nekih drugih molekula, kao i temperatura utiču na elektroprovodljivost istaloženih čestica. S porastom temperature električni otpor čestica raste do određenog maksimuma, kada ponovo opada.

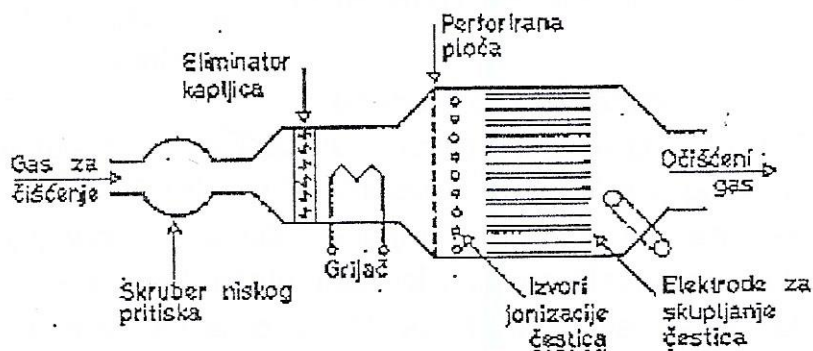
Elektrostatski precipitatori su uređaji koji zbog svojih karakteristika imaju široku primenu. Ovi uređaji imaju određene prednosti ali i mane, kako je navedeno u Tabeli 1.

Tabela 1. Opšte karakteristike elektrostatičkih taložnika

| Prednosti                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Nedostaci                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-stepen uklanjanja čestica od 99% do preko 99,9%,</li> <li>-izlazna količina čestica manja od <math>1 \text{ mg/Nm}^3</math>,</li> <li>-veličina čestica koje se uklanjaju od <math>500 \text{ } \mu\text{m}</math> do <math>0,01 \text{ } \mu\text{m}</math> i manje,</li> <li>- potrošnja energije od <math>0,2</math> do <math>1 \text{ k Wh/1000 m}^3</math> gasa,</li> <li>- vrsta čestica - čvrste i tečne</li> <li>- radna temperatura do <math>600^\circ\text{C}</math>,</li> <li>- stepen izdvajanja slabo se menja sa promenom opterećenja,</li> <li>- mali pad pritiska gasa</li> <li>- rad je kontinualan,</li> <li>- potreban je mali broj osoblja za opsluživanje i</li> <li>- postrojenje je dugotrajno; slaba erozija.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- zauzima veliku površinu i prostor</li> <li>- veliki troškovi investicija,</li> <li>- pogodni su za velike količine gasa - od nekoliko hiljada do više stotina hiljada <math>\text{m}^3/\text{h}</math></li> <li>- primenljivi su za čestice sa električnim otporom od <math>10^6</math> do <math>10^{13} \text{ } \Omega/\text{cm}</math></li> <li>- nemogućnost egzaktnog predviđanja koeficijenta prečišćavanja i</li> <li>- ograničena primena na zapaljive i eksplozivne aerosole</li> </ul> |

Svi elektrostatski precipitatori mogu da se, s obzirom na veličinu napona koji se na njih dovodi, svrstaju u dve grupe: a) visokonaponski EST i b) niskonaponski EST.

Efikasnost uređaja zavisi od njegove konstrukcije kao i od gasa koji nosi čestice. U praksi se upotrebljavaju dva glavna tipa visokonaponskih EST, kao što je već rečeno: EST sa ravnim površinama i EST sa površinama u vidu cevi. Na slici 6 prikazana je primena EST sa ravnim površinama u kombinaciji sa skruberom niskog pada pritiska.



Sl.6. Dvostepeni prečištač gasova: skruber i EST



Zapremiski protoci gasa koje ulaze u visokonaponski elektrostatski precipitator se kreću od 20 do 1000 m<sup>3</sup>/s, uz brzine od 0,9 do 4,6 m/s. Radne temperature se kreću od sobne do 672 K. Napon koji se koristi u precipitatoru je 30-100 kV. U tabeli 2 navedeni su primeri tipičnih primena EST.

Tabela 2. Primeri primene visokonaponskih elektrostatskih precipitatora

| PODRUČJE PRIMENE                           | Konc. čestica u gasu, g/m <sup>3</sup> | Veličina čestica μm | Temperatura gasa K |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Termoelektrane                             | 5,56-15,95                             | 3-15                | 422-533            |
| Pulpa i papir                              | 2,28-20,5                              | 0,4-2               | 380-464            |
| Željezo i čelik:                           |                                        |                     |                    |
| Koksni gas                                 | 1,14                                   |                     |                    |
| Postrojenja za sinterovanje                | 2,28                                   | 6                   | 394-422            |
| Visoka peć                                 | 0,11-0,69                              | -                   | 294-311            |
| Otvorena peć                               | -                                      | 0,03-3              | -                  |
| Bazne peći za oksidaciju                   | 34,2                                   | 0,1-1,0             | 394-561            |
| Lučne peći                                 | -                                      | 0,5                 | -                  |
| Kupolne peći                               | 2,05-25,1                              | 1-10                | -                  |
| Portland-cement                            | 6,85-114                               | -                   | 422-645            |
| Proizvodnja gipsa                          | 9,12-127                               | -                   | 325-450            |
| Proizvodnja H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0,46-5,7                               | 2,3                 | 300-356            |
| Proizvodnja fosfora                        | 9,12-80                                | -                   | 533-589            |
| Proizvodnja čadji                          | -                                      | 0,02-0,4            | -                  |
| Gradski inceneratori                       | -                                      | 15-30               | -                  |
| Katalitički kreking                        | 0,46-2,28                              | 10-12               | 589-645            |

Niskonaponski elektrostatski precipitatori, često poznati pod nazivom elektronski vazdušni filtri, služe za izdvajanje fino dispergovanih tečnih čestica, koje emituje neki od tehnoloških procesa. Niskonaponskim elektrostatskim precipitatorima ne mogu se iz gasa izdvajati čvrste čestice većeg promera i čestice koje su u količinama većim od 0,9 g/m<sup>3</sup>.

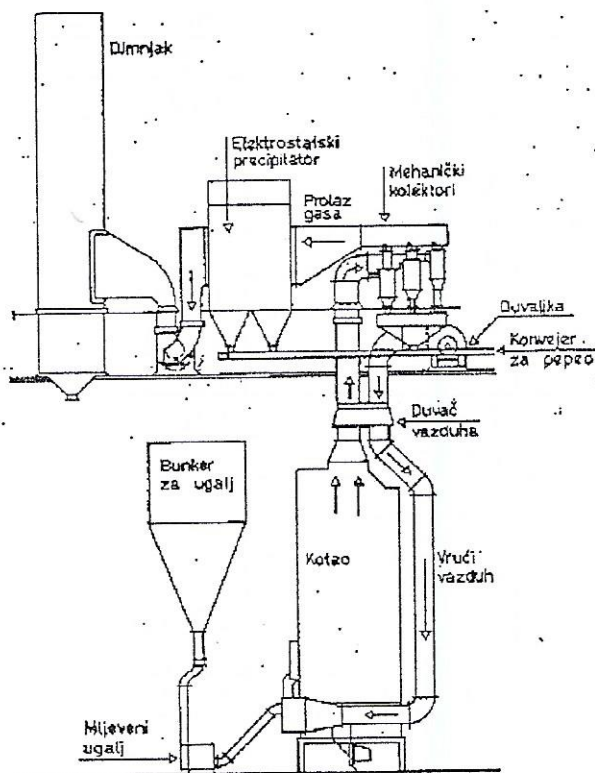
Niskonaponski elektrostatski precipitatori se razlikuju od visokonaponskih u veličini napona koji se dovodi u precipitator. Napon koji se dovodi je 12-13 kV.

Sistem niskonaponskih elektrostatskih precipitatora može da se kombinuje sa skruberima, eliminatorima kapljica kao i uređajima za poboljšanje električnih karakteristika čestica pre nego što udju u precipitator. Uz pomoć skrubera odstranjuju se velike čestice, eliminator kapljica odstranjuje kapljice skruberske tečnosti, dok regulator temperature omogućava postavljanje najpogodnije temperature gasa koji se čisti.

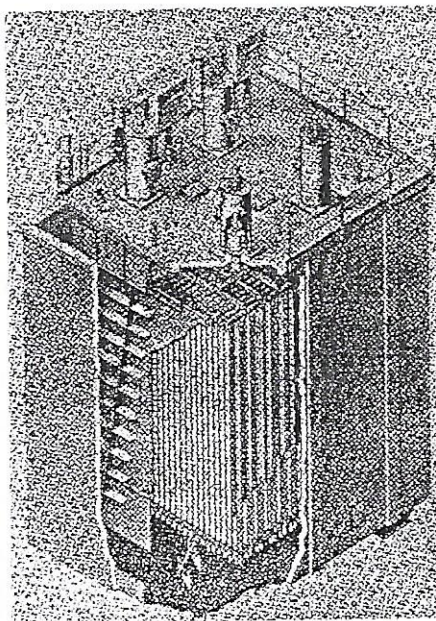
Ovi sistemi imaju dosta široku primenu, tako da se upotrebljavaju prilikom mlevenja plodova pri proizvodnji ulja, pri proizvodnji papira, u fabrikama za sušenje mesa i pri odvijanju drugih procesa.

Kao primer primene visokonaponskih elektrostatskih precipitatora može da posluži proizvodnja industrijske pare uz upotrebu mlevenog uglja, čiji šematski prikaz je dat na slici 6, gde je EST primenjen u kombinaciji sa ciklonima i prethodnim čistačima gasa.

Na slici 7 dat je izgled jednog industrijskog visokonaponskog EST velikog kapaciteta.



Sl.6. EST u manjem postrojenju za proizvodnju električne energije



Sl. 7. Industrijski EST



## UPOREĐENJE OPREME ZA UKLANJANJE ČESTICA

Izbor opreme za uklanjanje čestica zavisi od više operativnih veličina, a treba da bude izabrana odnosno projektovana tako da zadovolji standarde za dozvoljenu emisiju. Glavna promenljiva u ovim analizama je ukupni protok gasa koji treba prečistiti. Pri izboru opreme treba birati maksimalno moguću efikasnost, jer treba imati u vidu da vremenom, u eksploataciji, efikasnost obično opadne za 10-tak procenata. Na efikasnost kolekcije utiče više faktora:

- da li postrojenje radi ispod ili iznad projektovanog kapaciteta
- fizičke i hemijske karakteristike čestica (veličina, oblik, poroznost, lepljivost i sl.)
- opterećenje gasnog toka, tj. koncentracija čestica na ulazu u uređaj ( $\text{g/m}^3$ ); na primer, za veliku količinu čestica mogu biti neophodni ne tako skupi prečišćivači, pre nego što gas delimično prečišćen udje u skuplje i efikasnije kolektore.

Pri izboru i projektovanju treba voditi računa i o temperaturnom rasponu, kao i mogućnost naglog povećanja temperature iznad granica izdržljivosti opreme.

Niže su navedana 4 osnovna tipa opreme za uklanjanje čestica, kao i neke situacije u kojima su pojedini tipovi najefikasniji. Treba imati na umu da je lista opšta i da može da postoji veliki broj posebnih situacija.

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. Cikloni se obično koriste kad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Prašina je suva</li> <li>b) Koncentracija je prilično visoka</li> <li>c) Traži se klasifikacija</li> <li>d) Ne zahteva se veoma visoka efikasnost</li> </ul>                 | <p>3. Filtri se se tipično koriste kad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Zahteva se veoma visoka efikasnost</li> <li>b) Vredan materijal treba da se sakupi suv</li> <li>c) Gas je uvek iznad svoje tačke kondenzacije</li> <li>d) Protoci gasa relativno mali</li> <li>e) Temperature su relativno niske</li> </ul> |
| <p>2. Skruberi se tipično koriste kad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fine čestice treba da se uklone sa relativno visokom efikasnošću</li> <li>b) Može biti poželjno hladjenje, a vlaga nije velika</li> <li>c) Gasovi su sagorljivi</li> </ul> | <p>4. Elektrostatički taložnici (odvajači) se tipično koriste kad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Traži se veoma visoka efikasnost i uklanjanje fine prašine</li> <li>b) Treba obraditi veoma velike zapremine gasa</li> <li>c) Vredan materijal treba da bude zadržan.</li> </ul>                                 |

Sa listom operativnih zahteva i poznavanjem mogućnosti različitih opštih klasa kolekcija opreme (prečišćivača), može se napraviti preliminarno snimanje (uporedjenje), koje će dovesti do određenog broja mogućnosti izbora u okviru raspoložive tehnologije.

Detaljno uporedjenje mogućnosti različitih kolekcija opreme nije produktivna vežba. Kolekcije opreme su do sada dostupne od strane njihovih

proizvodjača. Mogućnosti opreme se menjaju sa razvojem tehnologije. Ipak postoje određene važne karakteristike koje vredi ovde proučiti i porediti.

Tabela 1 daje tipične operativne podatke pojedinih kolektora.

Tabela 1. Tipični operativni podaci za različite sisteme uklanjanja čestica

| Opšti tip uređaja          | Specifični tip uređaja        | Tipičan Kapacitet                                                      | Pad pritiska In H <sub>2</sub> O | Potrebna snaga W/(m <sup>3</sup> /min) |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
| Mehanički kolektori        | Taložne komore                | 15-25 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>3</sup> zapremine komore       | 02-0.5                           | 1-4                                    |
|                            | Inercioni odvajajući          | 100-3500 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> ulazne površine     | 0.5                              |                                        |
|                            | Visokoefikasni ciklon         | 2500-3500 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> ulazne površine    | 3-5                              | 15-35                                  |
| Filteri                    | Automatski                    | 1-63500 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> filtracione površine | 4-6                              | 35-45                                  |
| Mokri skruberi             | Kolone sa raspršivanjem       | 400-600 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> preseka površine     | 2-5                              | 7-35                                   |
|                            | Kolone sa punjenjem           | 500-700 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> preseka površine     | 6-8                              |                                        |
|                            | Venturi skruberi              | 6000-30000 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> preseka grla      | 10-50                            | 140-425                                |
| Elektrostatički odvajajući | Suvi                          | 2-8 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> površ. elektrode         | 0.2-0.5                          | 15-35                                  |
|                            | Mokri, sa orošavanjem čestica | 5-15 ft <sup>3</sup> /min po 1 ft <sup>2</sup> površ. elektrode        | 0.5-0.7                          | 10-15                                  |

Drugi faktor od velikog značaja je efikasnost kolekcije u funkciji od prečnika čestica. Slika 1 pokazuje tipične krive za četiri klase opreme uključujući 2. tipa ciklona (kriva A i B). Očigledno je sa ovog grafika da efikasnost kolekcije široko varira u ovom rasponu veličine čestica. Ove krive su predstavljene da bi se utvrdili njihovi trendovi. Poseban položaj krive efikasnosti zavisi od karakteristika čestica, kao i od izrade (dizajna) opreme datog proizvođača.

U završnoj analizi, izbor opreme za uklanjanje čestica mora se takodje zasnivati na ekonomskoj analizi, vodeći računa o investicionim i eksploatacionim troškovima.

U Tabeli 2 prikazane su tipične efikasnosti različitih tipova uređaja za tri karakteristične veličine čestica.



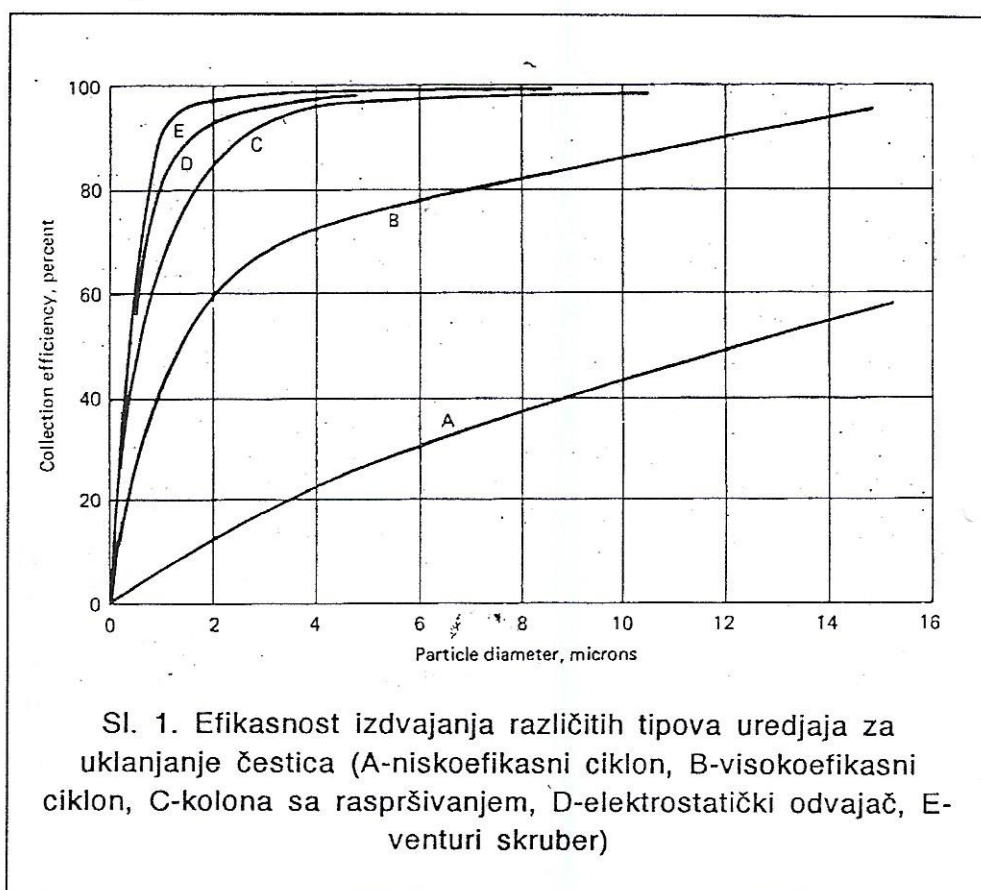
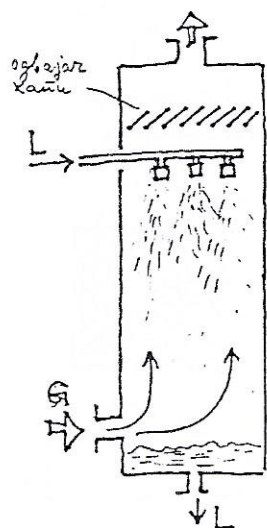
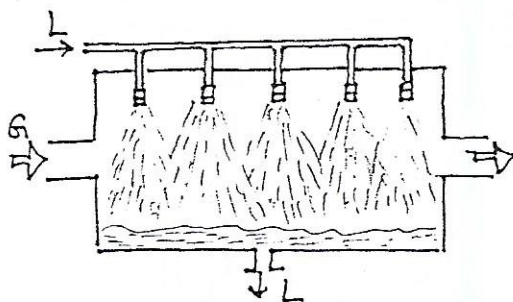


Tabela 2. Tipični efikasnosti za karakteristične veličine čestica

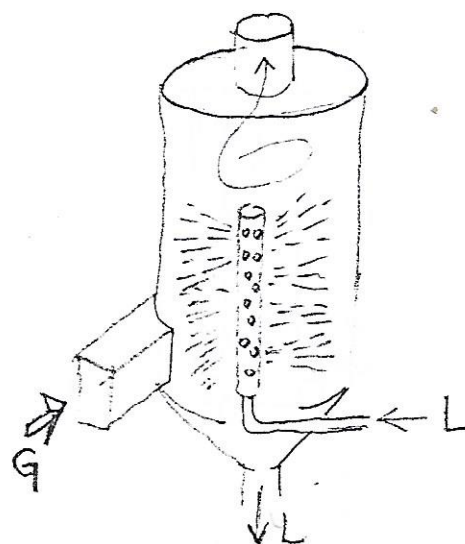
| Tip uređaja             | Efikasnost za čestice 5 $\mu\text{m}$ | Efikasnost za čestice 2 $\mu\text{m}$ | Efikasnost za čestice 1 $\mu\text{m}$ |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Srednje-efikasni ciklon | 30                                    | 15                                    | 10                                    |
| Visoko-efikasni ciklon  | 75                                    | 50                                    | 30                                    |
| Elektrostatički odvajač | 99                                    | 95                                    | 85                                    |
| Filteri                 | 99.8                                  | 99.5                                  | 99                                    |
| Kolone sa raspršivanjem | 95                                    | 85                                    | 70                                    |
| Venturi skruber         | 99.7                                  | 99                                    | 97                                    |



Спринклерни контакт

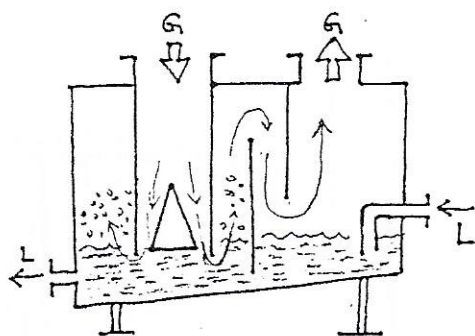


Мунакрсни контакти

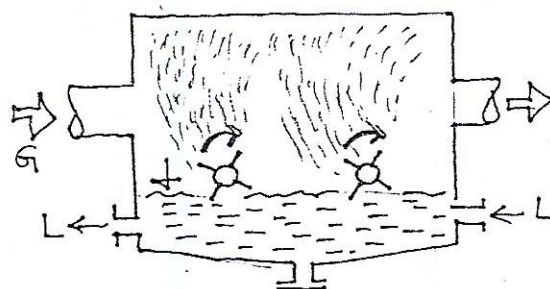


Центрифугални розаризатор

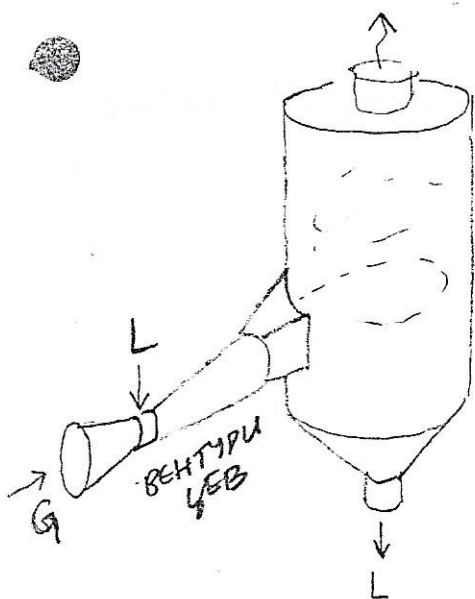
Коморе са млазницама



Џетлов скрубер

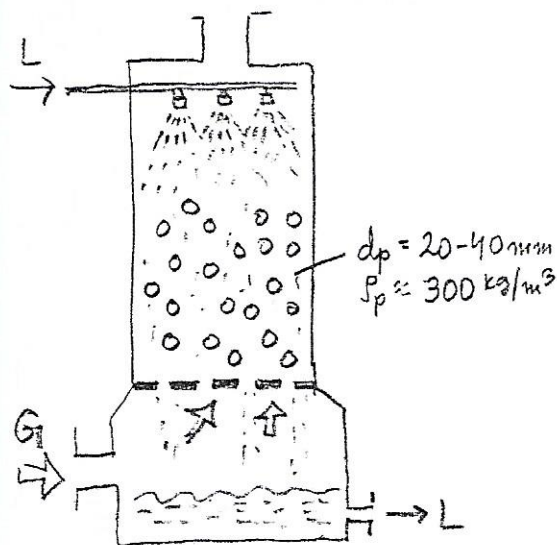


Скрубер са ротирajuћим брaњовима (Рам-ов)



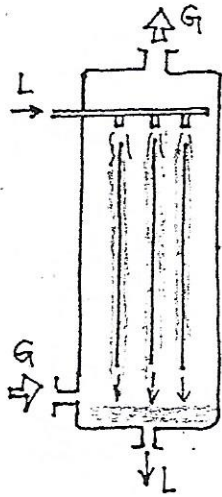
Вентури скрубер

С. УРЕЂАЈИ СА РАСПРШИ-  
ВАЊЕМ КАПИ

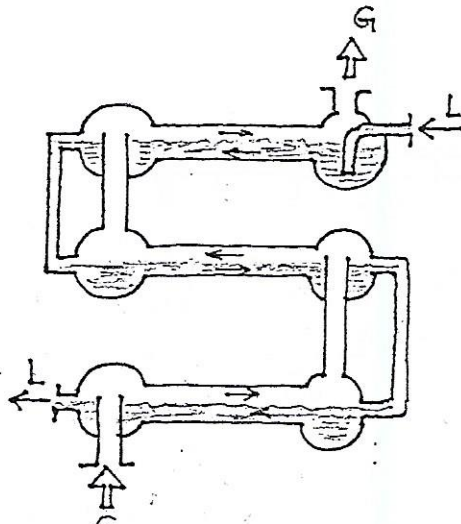


Д. СКРУБЕР СА ФЛУИДИЗОВАНИМ  
СЛОЈЕМ

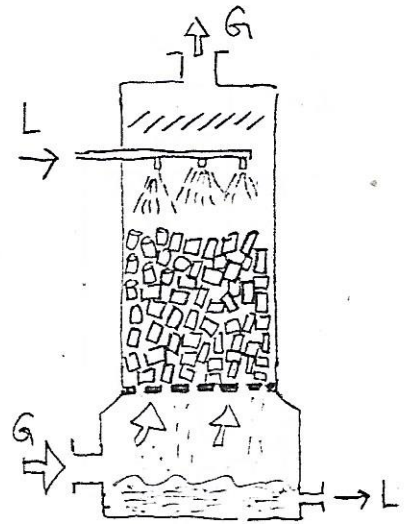




Колона са кливним  
површинама

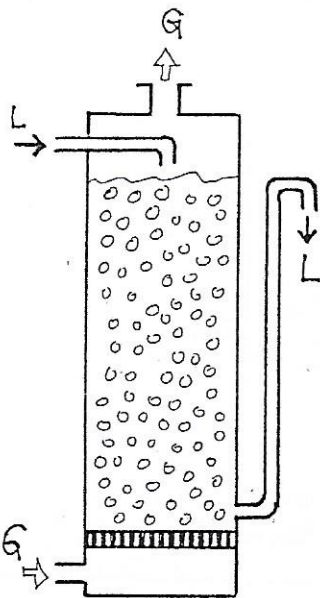


Каскадни апсорбер

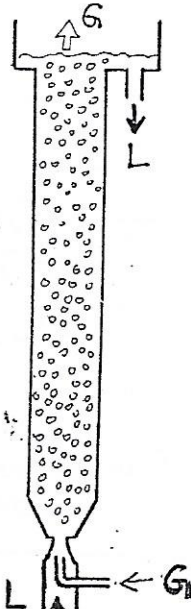


Колона са тањњем

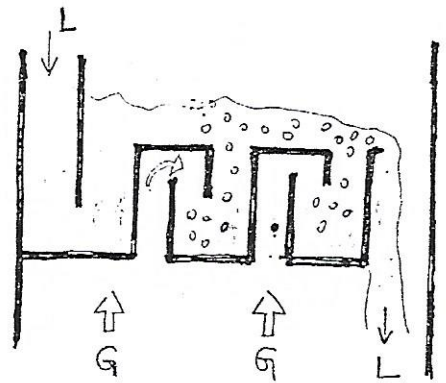
### A. УРЕЂАЈИ СА "СЛОБОДНОМ" ПОВРШИНОМ КОНТАКТА



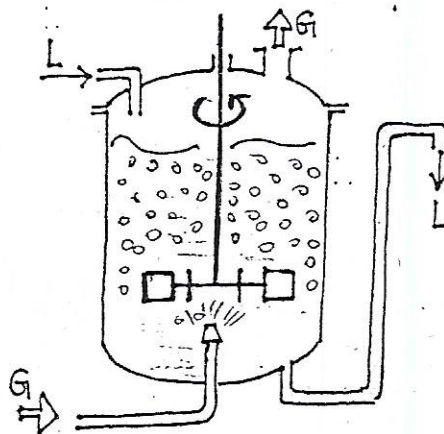
Бубољанна колона



Бубољанна колона  
са двофлуидном  
млазницом



Колона са "S" погодношћом



Аератор са мешањем

### B. УРЕЂАЈИ СА БАРБОТАЈУЋОМ МЕХУРА

## IZDVAJANJE GASOVITIH SASTOJAKA

Postoje tri osnovne metode izdvajanja gasovitih sastojaka iz neke gasne smeše:

1. Apsorpcija u tečnosti
2. Adsorpcija na čvrstoj površini
3. Hemijska promena - prevodjenje u neškodljiv (ili manje škodljiv) gas - direktnim sagorevanjem ili katalitičkom oksidacijom.

### 1. APSORPCIJA U TEČNOSTI

Apsorpcija je tehnološka operacija, pri kojoj se jedna ili više komponenti gasne smeše apsorbiraju (rastvaraju ili reaguju) u tečnosti. Apsorpcija, prema tome, može biti čisto fizički fenomen, pri kome se neki gas iz gasne smeše rastvara u tečnosti. Hemisorpcija je proces u kome je apsorpcija praćena hemijskom reakcijom u tečnoj fazi između rastvorenog gasa i reaktanta iz tečnosti. Neki od najčešće korišćenih industrijskih apsorpcionih sistema su:

| G A S                              | RASTVARAČ | REAKTANT IZ TEČNOSTI                                             |
|------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S | Voda      |                                                                  |
| CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S | Voda      | Monoetanolamin                                                   |
| CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S | Voda      | Dietanolamin                                                     |
| CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S | Voda      | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> |
| CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S | Voda      | KOH, NaOH                                                        |
| HCl, HF                            | Voda      |                                                                  |
| HCl, HF                            | Voda      | NaOH                                                             |
| Cl <sub>2</sub>                    | Voda      |                                                                  |
| SO <sub>2</sub>                    | Voda      | NH <sub>3</sub>                                                  |
| NH <sub>3</sub>                    | Voda      |                                                                  |
| NO <sub>2</sub>                    | Voda      |                                                                  |
| HCN                                | Voda      | NaOH                                                             |
| CO                                 | Voda      | Cu i NH <sub>3</sub> -soli                                       |

Apsorpcija gasova je tipičan proces prenosa mase kroz dve faze. Kada se gas kreće uz površinu tečnosti, a masa gasa je u turbulentnom kretanju, turbulentno mešanje održava konstantnu koncentraciju u masi gasa. U blizini površine, kretanje gasa je sporije, formira se granični sloj, a na samoj površini gas miruje. Za oba tipa apsorpcije (fizička i hemisorpcija) proračun prenosa mase i projektovanje apsorbatora baziraju na poznavanju teorije difuznog prenosa mase. U ove svrhe se i dalje najviše koristi teorija dva filma.

Napomena: Apsorpcija je obradivana u okviru predmeta FENOMENI PRENOSA, tako da će u okviru ovog kursa biti naglašene samo neke opće inženjerske karakteristike sistema.



Apsorpcija u tečnosti predstavlja operaciju prenosa mase koja se može izvršiti u različitim kontaktnim uređajima, a spada u sisteme gas-tečnost.

#### Sistemi za kontakt gas-tečnost

Generalno, sistemi za kontakt gas-tečnost se mogu razmatrati na nekoliko načina: a) prema načinu proticanja gasova i tečnosti (suprotnosmerno, istosmerno ili unakrsno) ; b) faze mogu da imaju kontinualni ili diskontinualni tok (tj. da bude jedna dispergovana u drugoj); c) prema mehanizmu prenosa mase mogu da se razmatraju stupnjevito ili diferencijalno kontaktno.

U svakom uređaju - koji treba da ostvari što bolji prenos mase, mora biti definisana i hidrodinamična slika sistema.

Najčešće se kontaktni uređaji gas-tečnost razmatraju prema načinu kontakt faza. U tom slučaju se uočavaju tri osnovne grupe:

- I - uređaji u kojima se ostvaruje "slobodna" površina kontakta faza
- II - uređaji sa barbotажnim kontaktom gasnih mehura kroz tečnost (tj. sistemi gde je gas dispergovana faza, a tečnost kontinualna)
- III - uređaji sa raspršivanjem tečnosti u vidu kapi (tj. sistemi gde je tečnost dispergovana faza, a gas kontinualna).

U prvu grupu uređaja sa "slobodnom" površinom kontakta faza spadaju sledeći glavni tipovi uređaja (slika A): kolone sa slivnim površinama, kaskadni apsorberi i kolone sa punjenjem. Osnovna karakteristika ovih uređaja je da do kontakta dolazi prilikom slivanja tečnosti, pri čemu gasna (parna) faza protiče istosmerno ili suprotnosmerno iznad (ili pored ili oko ) nje. Pri ovome ne dolazi do disperzije jedne faze u drugoj.

Kod uređaja sa barbotажom mehura gas (para) se dovodi ispod tečnosti i u vidu mehura prolazi kroz tečnost. Glavni tipovi uređaja u ovoj grupi (slika B) su: barbotажna kolona, kolone sa podovima i aerator sa mešanjem. Medjufazna površina kapaciteta u ovom slučaju je površina mehura.

Kod uređaja sa raspršavanjem kapi kontakt se ostvaruje raspršavanjem tečnosti u kapi i kolonama ili komorama kroz koje protiče gas. Prema načinu raspršivanja tečnosti može se napraviti klasifikacija uređaja (slika C): komore sa mlaznicama koje raspršavaju tečnost suprotnostrujno, istostrujno ili unakrsno; grupa uređaja u kojoj gas stružeći velikom brzinom disperguje tečnost u kapi. U ovu grupu spada i Venturi skruker. Karakteristika ovih uređaja je da su pogodni i u slučajevima kada gas sadrži čestice. U ovom slučaju medjufazna površina za prenos je površina kapljice.

Noviji tip uređaja je skruker sa fizidizovanim slojem (slika D). U ovom slučaju gas je kontinualna faza a tečnost se disperguje odozgo preko mlaznica. "Čestice" su obično vrlo lake šuplje plastične sfere (prečnika 10 do 40 mm) i njihova uloga u sistemu je da povećaju stepen turbulencije u sistemu i time pospeše prenos mase. Često se ovaj uređaj naziva "turbulent hed contactor". Način kontakta gasa i tečnosti je hibridan - delom je to kontakt

gasa i kapljica tečnosti, a delom je gas u kontaktu sa tečnošću koja se sliva preko loptica.

Gas na izlazu iz navedenih uređaja često nosi najfinije kapljice tečnosti, pa se za sprečavanje odnošenja ugrađuju se odvajači kapi.

Bitno za pravilno projektovanje uređaja je: pravilan izbor uređaja (tj. tipa), definisanje geometrije (prečnik i visina kolona), definisanje operativnih uslova i pada pritiska

U tabeli 1 dat je rezime osnovnih karakteristika procesa apsorpcije, dok je u tabeli 2 dat pregled najvažnijih karakteristika nekoliko karakterističnih uređaja.

Tabela 1. Osnovne karakteristike procesa apsorpcije

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Opis procesa                  | Difuzioni proces prenosa molekula gasa u tečnu fazu, pod uticajem gradijenta koncentracije (pogonska sila).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Uticajni faktori              | Apsorpciju ubrzavaju sledeći faktori:<br>a) velika međufazna površina gasa i tečnosti<br>b) turbolencija na međufaznoj površini<br>c) dugo vreme kontakta faza<br>d) ponovljeni kontakti faza (višestepena operacija)<br>e) veliki koeficijenti difuzije<br>f) mali viskozitet tečnosti<br>g) velika rastvorljivost i /ili velika negativna vrednost promene slobodne energije                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Uslovi za efikasnu apsorpciju | a) velika rastvorljivost gasa ili<br>b) nepovratna hemijska reakcija između gasa i tečnosti                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Efekti apsorpcije             | a) izdvajanje gasa ili pare<br>b) hladjenje, kondenzacija, vlaženje gasa<br>c) izdvajanje čestica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Izbor tečnosti                | a) tečnost treba da bude:- neisparljiva, jeftina, stabilna, nekorozivna, malog viskoziteta, nezapaljiva, reaktivna - ako je potrebna hemisorpcija<br>b) ako je komponenta koju treba izdvojiti dobro rastvorljiva, a prisustvo vodene pare ne predstavlja problem, koristi se voda<br>c) u vodu se prema potrebi dodaju reaktanti, supstance koje grade komplekse ili taloge, emulzifikatori i površinski aktivne materije                                                                                                                                                                                                                                           |
| Rastvorljivost                | a) Henrijev zakon $p=H \cdot c$ važi samo za pravolinijski deo ravnotežne linije i striktno se može primeniti jedino na gasove koji ne menjaju oblik molekula pri rastvaranju (permanentni gasovi, ugljovodonici itd.)<br>b) Ukoliko gasovi pri rastvaranju učestvuju u hemijskoj reakciji, disosuje ili na bilo koji drugi način menjaju strukturu molekula, Henrijev zakon se ne može primeniti. U takve gasove, kada je tečna faza voda, spadaju kiseline, baze, kiseli i bazni oksidi itd.<br>c) Ravnotežna koncentracija je najveća koncentracija koja se uopšte može postići pri rastvaranju nekog gasa u određenoj tečnosti, na datom pritisku i temperaturi. |



Tabela 2. Osnovne karakteristike nekoliko važnijih tipova uređaja

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kolona sa punjenjem     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. koristi se kada su dozvoljeni veliki protoci tečnosti</li> <li>2. pogodna za istovremeno hladjenje i vlaženje gasa</li> <li>3. vreme kontakta je dugo, što je važno za apsorpciju gasova koji se loše rastvaraju ili sporo reaguju</li> <li>4. nije pogodna za kolekciju čestica, niti za hemisorpcije sa čvrstim produktima reakcije</li> <li>5. nije pogodno za velike protoke gasa, ako su poželjni ili se zahtevaju mali protoci tečnosti</li> <li>6. maksimalni protoci gasa i tečnosti ograničeni su, za definisani presek kolone, plavljenjem i odnošenjem kapi</li> <li>7. punjenje <ol style="list-style-type: none"> <li>a) tipovi punjenja- lomljeni materijali, Rašigovi, Lesingovi i spiralni prsteni, Berlova i Intalox sedla, metalne i plastične ljuske i strukture gredice, lopte, mrežasto punjenje</li> <li>b) karakteristike – niska cena, velika površina po jedinici zapremine, mali otpor strujanju fluida, mehanička i hemijska otpornost, dug vek</li> <li>c) pa pritiska - 20-80 mmVS/m visine sloja; opada sa porastom poroznosti punjenja</li> </ol> </li> <li>8. plavljenje nastaje kada brzina gasa, pri konstantnom protoku tečnosti, postane toliko visoka da tečnost više ne može da se sliva niz punjenje; u tački plavljenja postaje nemoguć suprotnostrujni tok gasa i tečnosti; pad pritiska u tački plavljenja iznosi za sistem voda-vazduh 125-330 mmVS/m, zavisno od tipa punjenja</li> <li>9. radni parametri kolona sa punjenjem <ul style="list-style-type: none"> <li>- brzina gasa 50-70% brzine plavljenja</li> <li>- za brzinu gasa od 50% brzine plavljenja, <math>\Delta P</math> je oko 40 mmVS/m</li> <li>- brzine gasa najčešće iznose 20-50 cm/s</li> </ul> </li> </ol> |
| Kolona sa podovima      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. koriste se kada su poželjni mali protoci tečnosti</li> <li>2. koriste se kada gas sadrži male količine veoma rastvornih polutanata</li> <li>3. stupnjevit kontakt gasa i tečnosti</li> <li>4. vrlo velika međufazna površina</li> <li>5. vrste podova <ul style="list-style-type: none"> <li>- zvonasti podovi se sve manje koriste</li> <li>- rešetkasti podovi imaju veći kapacitet i stabilnije i sigurnije rade od zvonastih podova, ali je radni opseg protoka uži pa je potrebna pouzdanija regulacija</li> <li>- inercioni podovi imaju dobre karakteristike i za kolekciju čestica</li> </ul> </li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Kolona sa raspršivanjem | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. obično se koristi kada je prvenstveni cilj ekonomično hladjenje gasova</li> <li>2. efikasnosti apsorpcije su niske, koristi se zato samo za vrlo rastvorljive gasove</li> <li>3. efikasnost se povećava kada se gas uvodi tangencijalno; ovakve komore se nazivaju mokri cikloni</li> <li>4. padovi pritiska su mali, 30-75 mmVS pri brzini gasa od 0,6 m/s</li> <li>5. po pravilu je neophodan odvajač kapi</li> <li>6. u prisustvu čestica ne dolazi do blokiranja, kao u kolonama sa punjenjem, ako se vodi računa da čestice ne zaprljaju mlaznice</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

|                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Visokoenergetski skruberi, tipa Venturi skrubera</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. manje dimenzije i investicioni troškovi u odnosu na kolone za apsorpciju</li> <li>2. vremena kontakta gasa i tečnosti veoma kratka, u poredjenju sa kolonama sa punjenjem i podovima</li> <li>3. vrlo veliki padovi pritiska</li> <li>4. kao apsorberi imaju znatno lošije karakteristike nego kolone Venturi skruber</li> </ol> <p>a) nije potreban pritisak za raspršavanje tečnosti, gas daje energiju za raspršavanje</p> <p>b) padovi pritiska 250-2500 mmVS</p> <p>c) brzina gasa u grlu skrubera 80-120 m/s</p> <p>d) velika potrošnja snage, veliki problemi održavanja snažnih ventilatora</p> <p>e) obično je neophodan separator kapi</p> <p>Venturi skruber sa samousisavanjem (ejektorski skruber)</p> <p>(Radi na principu mlaza tečnosti koji usisava gas; tečnost se aeriše gasom i dolazi do jednostepenog kontakta u uslovima visoke turbulencije)</p> <p>a) kapacitet gasa zavisi od geomterije grla skrubera i od protoka tečnosti</p> <p>b) neophodan je separator kapi</p> <p>c) kapacitet je najviše 30 m<sup>3</sup>/min gasa, pa se za veće protoke moraju koristiti paralelno vezani skruberi</p> <p>d) pad pritiska je 100-200 mmVS, ali pritisak na mlaznici za tečnost može da dostigne 7 at</p> |
| <p>Skruber sa unakrsnim tokom</p>                       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. pad pritiska manji nego u kolonama sa punjenjem i podovima</li> <li>2. manji operacioni troškovi nego za dva tipa kolona</li> <li>3. porozno punjenje se ispira tečnom fazom, pa je ovaj uredjaj pogodan za simultanu apsorpciju gasova i kolekciju čestica</li> <li>4. ostali kriterijumi za rad ovih uredjaja isti su kao za kolone sa punjenjem</li> <li>5. na površini punjenja održava se sloj pene, debljine 100-200 mm</li> <li>6. na izlazu iz skrubera potreban odvajač kapi</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <p>Skruber sa fluidizovanim slojem</p>                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. radne brzine gasa 2-3 m/s (izuzetno do 5 m/s)</li> <li>2. efikasnosti kolekcije čestica u 6-stepenom uredjaju sa loptama prečnika 38 mm iznose oko 90%, a kritični prečnik čestica je 0,5 <math>\mu</math>m</li> <li>3. efikasnosti apsorpcije HCl, NH<sub>3</sub> i HF su oko 98%</li> <li>4. visina nasutog sloja je oko 30 cm po sekciji, a ukupna visina sekcije je nekoliko puta veća</li> <li>5. pad pritiska je 500-700 mmVS</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

## KOLONE SA PUNJENJEM

Od navedenih uredjaja, kolone sa punjenjem se najšire koriste za apsorpciju budući da su najefikasnije. Kolone sa vlažnim zidovima nalaze primenu samo u nekim specifičnim procesima, a kolone sa raspršivanjem se koriste ili kao pred-prečištači ili kada se ne zahteva velika efikasnost prečišćavanja gasova.



Operacijama prenosa mase kao što su vlaženje i sušenje gasova, apsorpcija i desorpcija gasova i destilacija zajedničko je da gas i tečnost treba dovesti u što intimniji kontakt da bi se ostvario difuzioni prenos između ove dve faze.

Operacije su ovde nabrojane prema rastućoj složenosti. Kod vlaženja gasova tečnost je čista supstanca, pa se gradijenti koncentracije pojavljuju samo u gasnoj fazi. Kod apsorpcije, međutim, koncentracitni gradijenti postoje i u gasu i u tečnosti i do difuzije aktivne komponente dolazi u obema fazama, a često dolazi do difuzije više komponentata. Za destilaciju je karakteristična tesna veza između prenosa toplote i mase i difuzija svih komponentata. U mnogim apsorpcionim sistemima, po pravilu onda kada se dešava hemijska reakcija (hemisorpcija) praćena toplotnim efektima, takodje se odvijaju istovremeno procesi prenosa toplote i mase.

U svim nabrojenim operacijama prenosa, osnovna funkcija upotrebljenog punjenja je da omogući što efikasniji kontakt gasa i tečnosti, što znači:

- 1) što veću kontaktnu površinu između faza
- 2) što veći stepen turbulencije između gasa i tečnosti kako bi se smanjili otpori odnosno povećala brzina difuzije. Sa stanovišta troškova operacije
- 3) što manji  $\Delta P$ .
- 4) što jednostavniju konstrukciju uređaja.

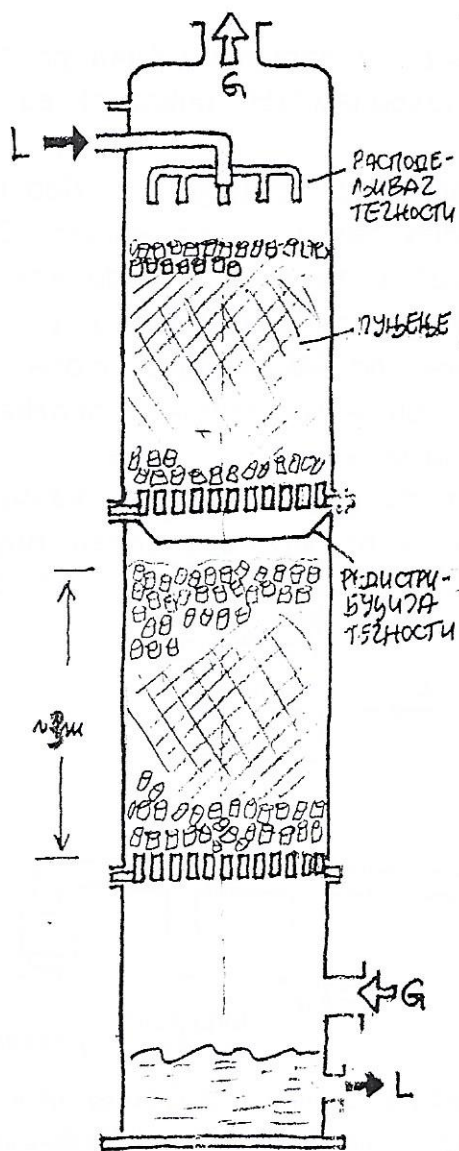
Ovi zahtevi su očigledno suprotni pa se praktično svako projektovanje aparata svodi na optimizaciju. Teorijska i eksperimentalna istraživanja dovela su vremenom do izvesnog broja rešenja pa je projektovanje određenog broja uređaja definisano.

Kolone sa punjenjem (slika 1) u kojima se obavlja suprotnostrujni kontakt gasa i tečnosti, predstavlja vertikalonu kolonu punjenu različitim materijalima. Tečnost se uvodi odozgo i orošava sloj, a gas dotiče sa dna kolone.

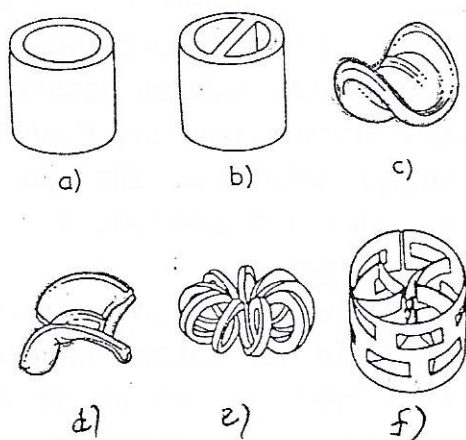
Punjenje. Punjenje može biti odgovarajući lomljeni materijal ili jednaki pravilni elementi koji se mnogo češće koriste. Osnovne karakteristike punjenja su:

1. Obezbedjivanje velike kontantne površine . Ovde se misli na što veću vrednost  $a$  ( $m^2/m^3$ ) ali u makroskopskom smislu - unutrašnja poroznost materijla nema značaja. Potrebna je što veća spoljna površina na kojoj će se formirati film tečnosti koja se sliva kroz sloj. Ipak, skoro uvek spoljna površina punjenja ostaje veća od formirane međufazne površine.

2. Pogodne strujne karakteristike što podrazumeva zahtev za velikom poroznošću sloja kako bi brzina početnog plavljenja bila što veća, a pad pritiska pri datoj brzini gasa. Drugim rečima, potrebni su visok kapacitet kolone uz što manji  $\Delta P$ . Dalje, poželjno je da pad pritiska u gasnoj fazi potiče u što većoj meri od podužnog trenja (a ne od mesnih otpora) jer je podužno trenje ono koje pospešuje prenos.



Slika 1. Apsorpciona kolona



Slika 2. Punjenja

(a-Raschigovi prstenovi, b-Lessingovi prstenovi, c-Berlova sedla, d-Intalox sedla, e-Tellerette, f-Pallovi prstenovi)

3. Hemijska inertnost prema gasnoj i tečnoj fazi

4. Dovoljna čvrstoća

5. Niska cena

6. Dobre karakteristike vlaženja

Vrsta punjenja. Postoje različiti tipovi standardnih punjenja: Rašigovi prstenovi, Berlova sedla, Intalox sedla i dr., kako je prikazano na slici 2. Izrađuje se od najrazličitijih materijala: keramika, metal, staklo, plastika. U industriji se koriste najčešće punjenja 1 do 2"(in) (1 in=25,4 mm). Postoje dva osnovna načina unošenja punjenja: slagana i nasuta. Slažu se, po pravilu, prstenasta punjenja veća od 3". Punjenja se nasipaju "na suvo", a u slučaju većih kolona pod vodom.

Pored ovih punjenja koriste se i rešetke (mreže) i složene gredice (slika 3). Metalne ili plastične mreže koriste se sve više pošto imaju istovremeno veliku površinu i veliku poroznost. Drvene gredice ili keramički blokovi imaju minimalni pad pritiska i koriste se uglavnom u tornjevima za hladjenje.

Kolona. Najčešće je kružnog preseka. Materijal: metal, keramika, zidana od kiselo otporne opeke, staklo itd., zavisno od zahtevanih antikorozivnih karakteristika.

Rešetke. Rešetke istovremeno nose punjenje (potrebna odgovarajuća mehanička nosivost) i raspodeljuju gas (potreban veliki slobodan presek), a treba da obezbedi i nesmetano cedjenje tečnosti. Neka tipična rešenja prikazana su na slici 4. Retko se koriste perforirane ploče, tipske rešetke su načinjene od gredica.

Raspodeljivač tečnosti

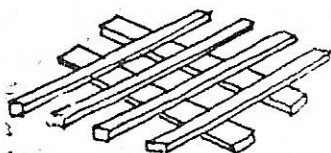
Aдекватna primarna raspodela tečnosti je vrlo bitna. Deo punjenja koji nije orošen tečnošću je beskorisan. Praktičan kriterijum je da treba da bude najmanje 5 napojnih



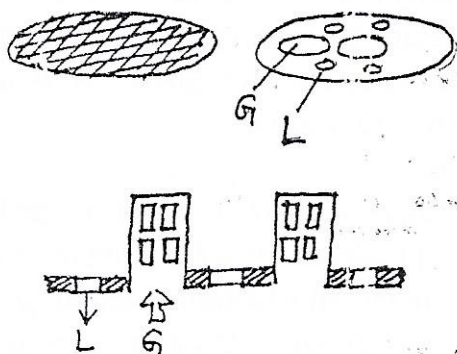
Наслањана мрежа



Наслањене преглице

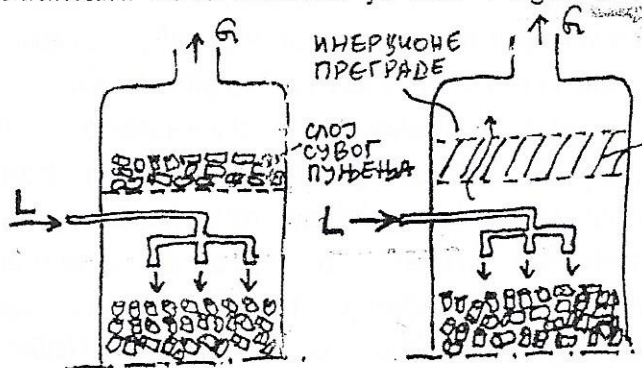


Slika 3. Druga punjenja



Slika 4. Raspođeljivači-nosači punjenja

Medjufazna površina nije jednaka površini suvog punjenja. Pri malim fluksevima tečnosti, medjufazna površina može biti samo 30% od površine punjenja. Minimalni fluks tečnosti je oko  $1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Ako je sa stanovišta bilansa mase za



Slika 6. Odvajači kapi

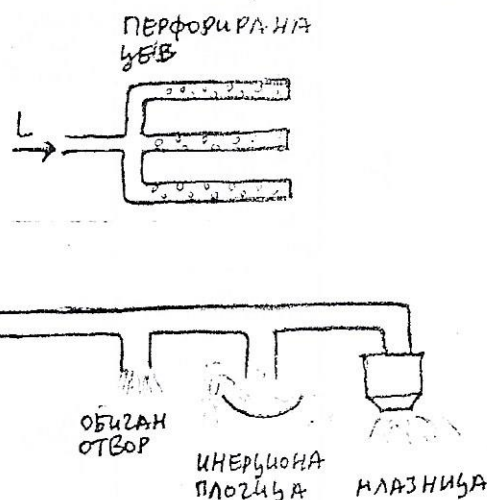
mlaznice za raspodelu tečnosti izlazni gas nosi maglu sačinjenu od kapi tečnosti. Magla se izdvaja u odvajačima kapi:  $0,6 \approx 1\text{m}$  suvog punjenja na vrhu kolone, sloj metalne mreže, naizmenično redjane ploče kroz koje gas struji cik-cak (inercione pregrade). Kapi se odvajaju i tečnost se ponovo sliva u kolonu.

U tabeli 1 date su osnovne karakteristike najvažnijih tipova punjenja.

tačaka po  $1 \text{ ft}^2$  odnosno 50 napojnih tačaka po  $1\text{m}^2$  preseka. Neki tipovi raspodeljivača prikazani su na slici 5.

Tečnost ima tendenciju kretanja na zidovima kolone, dok gas okupira centralni deo kolone. Ova spregacija je sve izrazitija od vrha ka dnu kolone. Naglašenija kod slaganog i krupnijeg punjenja; prečnik punjenja ne sme biti veći od  $1/8$  prečnika kolone. I u slučajevima sitnog punjenja treba obezbediti preraspodelu tečnosti na svakih 3-4 m visine.

Medjufazna površina gasa i tečnosti predstavlja osnovni faktor koji utiče na brzinu prenosa mase.



Slika 5. Sistemi za uvođenje tečnosti

Pri visokim brzinama gasa i onda kada se koriste imercione Odvajači kapi

#### Odvajači kapi

Pri visokim brzinama gasa i onda kada se koriste imercione

Tabela 1. Karakteristike nasutih punjenja

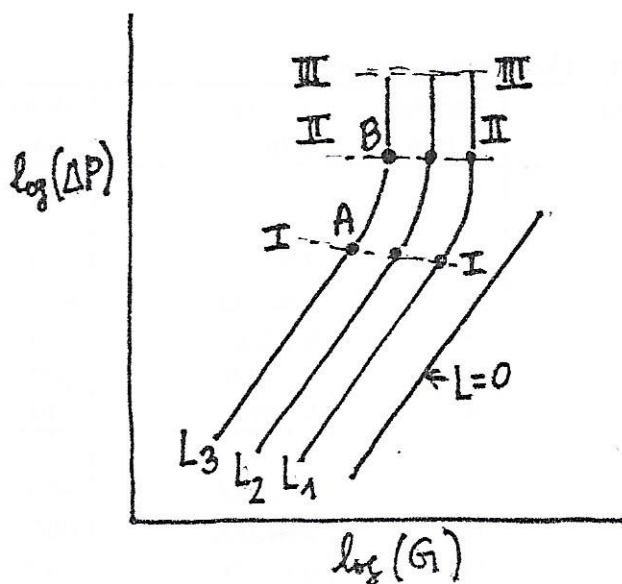
|                                 | Spec.pov.<br>$a(m^2/m^3)$ | Poroznost<br>$\varepsilon$ | Ekv.preč.<br>$d_p$ mm | Broj kom. u<br>1 $m^3$ | Masa<br>$kg/m^3$ |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| Rašigovi prstenovi<br>Keramički |                           |                            |                       |                        |                  |
| 10x10x1,5mm                     | 440                       | 0,70                       | 6                     | 700 000                | 700              |
| 15x15x2                         | 330                       | 0,70                       | 9                     | 220 000                | 690              |
| 1": 25x25x3 mm                  | 200                       | 0,74                       | 15                    | 50 000                 | 530              |
| 1.5": 35x35x4 mm                | 140                       | 0,78                       | 22                    | 18 000                 | 530              |
| 2": 50x50x5 mm                  | 90                        | 0,785                      | 35                    | 6 000                  | 530              |
| Rašigovi prstenovi<br>Čelični   |                           |                            |                       |                        |                  |
| 10x10x0,5mm                     | 500                       | 0,88                       | 7                     | 770 000                | 960              |
| 15x15x0,5                       | 350                       | 0,92                       | 12                    | 240 000                | 660              |
| 25x25x0,8                       | 220                       | 0,92                       | 17                    | 55 000                 | 640              |
| 50x50x1                         | 110                       | 0,95                       | 35                    | 7 000                  | 430              |
| Palovi prstenovi<br>Keramički   |                           |                            |                       |                        |                  |
| 25x25x3 mm                      | 220                       | 0,74                       | 14                    | 46 000                 | 610              |
| 35x35x4 mm                      | 165                       | 0,76                       | 18                    | 18 500                 | 540              |
| 50x50x4 mm                      | 120                       | 0,78                       | 26                    | 5 800                  | 520              |
| Palovi prstenovi<br>Čelični     |                           |                            |                       |                        |                  |
| 15x15x0,4 mm                    | 380                       | 0,90                       | 10                    | 230 000                | 525              |
| 25x25x0,6 mm                    | 235                       | 0,90                       | 15                    | 52 000                 | 490              |
| 50x50x1 mm                      | 108                       | 0,90                       | 33                    | 6 400                  | 415              |
| Berlova sedla<br>Keramička      |                           |                            |                       |                        |                  |
| 12,5 mm                         | 460                       | 0,68                       | 6                     | 570 000                | 720              |
| 25 mm                           | 260                       | 0,69                       | 11                    | 78 000                 | 670              |
| 38 mm                           | 165                       | 0,70                       | 17                    | 30 500                 | 670              |
| Intalox-sedla<br>Keramička      |                           |                            |                       |                        |                  |
| 12,5 mm                         | 625                       | 0,78                       | 5                     | 730 000                | 545              |
| 19 mm                           | 335                       | 0,77                       | 9                     | 229 000                | 560              |
| 25 mm                           | 255                       | 0,775                      | 12                    | 84 000                 | 545              |
| 38 mm                           | 195                       | 0,81                       | 17                    | 25 000                 | 480              |
| 50 mm                           | 118                       | 0,79                       | 27                    | 9 350                  | 530              |

1" (inch)=25,4 mm

Proticanje gasa kroz kolonu sa punjenjem

Proticanje gasa kroz kolonu sa punjenjem prikazana je na slici 7, kao zavisnost  $\log(\Delta P) = f[\log(G)]$ , gde je  $\Delta P$ -pad pritiska, a  $G$ -maseni protok gasa. Linija za  $L=0$  (protiče samo gas) je prava linija sa nagibom 1,8-2, što podseća na Ergunovu jednačinu za strujanje kroz porozan sloj. Orošavanjem kolone, sa povećanjem gustine slivanja (povećanjem protoka tečnosti  $L$ , pri čemu  $L1$  odgovara najmanjem protoku, a  $L3$  najvećem) dobijaju se linije  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ .





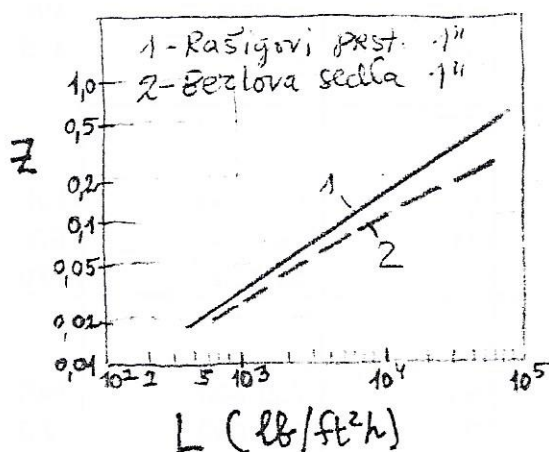
Slika 7. Pad pritiska u koloni sa punjenjem

tečnost u vidu mehurića, a pad pritiska se povećava i bez promene fluksa gasa. Inverzija se sastoji u tome što je u ovoj zoni gas postao dispergovana faza za razliku od donje zone gde je gas kontinualna faza.

Presečene linije I-I i L=const. (tačka A) nazivaju se napojnim tačkama, a zona između I-I i II-II je napojna zona, koja je optimalna sa stanovišta

prenosa mase jer je fizički kontakt gasa i tečnosti najintenzivniji. Presečene tačke na liniji II-II nazivaju se početkom plavljenja (flooding points) ili inverzija.

Povećano zadržavanje tečnosti u napojnoj zoni korisno je zbog boljeg kvašenja punjenja i intenzivne turbulencije gasa u tečnosti, a time i boljeg koeficijenta prenosa mase.

Slika 8. Hold-up u funkciji  $L$ 

dinamičkog zadržavanja ( $Z_{din}$ ), pri čemu je

Statičko zadržavanje potiče samo od kapilarnosti i odgovara količini tečnosti koja se zadrži kada se prekine dotok tečnosti.  $Z_{st}$  je razlika masa "mokrog" i suvog punjenja. Zadržavanje se računa po jedinici zapremine punjenja, ali može i po jedinici površine jer je  $Z=f(a,\delta)$  gde je  $\delta$ -debljina tečnog filma. Na primer za Rašigove prstenove od 1":

$$Z = 0.00039 \cdot L_f^{0.57} \mu_L^{0.13} \rho_L^{-0.84} \left( \frac{\sigma}{73} \right)^{0.925 - 0.262 \log(L_f)}$$

Dok je za Berlova sedla od 1":

$$Z = Z_{st} + Z_{din}$$

Zadržavanje tečnosti  $Z$  (hold-up) sastoji se od statičkog zadržavanja ( $Z_{st}$ ) i

$$Z = 0.00039 \cdot L_f^{0.57} \mu_L^{0.13} \rho_L^{-0.84} \left( \frac{\sigma}{73} \right)^{0.925 - 0.262 \log(L_f)}$$

gde je  $Z$ -zadržavanje tečnosti ( $m^3/m^3$  punjenja),  $L_f$ - fluks tečnosti ( $lb/ft^2h$ ),  $\mu_L$ - viskozitet tečnosti (cP),  $\rho_L$ - gustina tečnosti ( $g/cm^3$ ) i  $\sigma$ -površinski napon ( $dyn/cm$ ). Napomenimo da su prethodne jednačine dimenziono nehomogene i da se moraju koristiti navedene jedinice. Na slici 8 prikazane su navedene relacije za slučaj da je tečna faza voda.

Zadržavanje tečnosti je vezano sa kvašenjem punjenja u koloni, a to znači i sa kontaktnom površinom između gasa i tečnosti. Iako je logično da kontaktna površina gas-tečnost bude proporcionalna okvašenoj površini punjenja, smatra se da deo površine koji je prekriven tečnošću koja se ne kreće nije aktivan. Može biti i obrnuto, da aktivna površina bude veća od geometrijske kada dodje do talasanja, raspršavanja isl. (obično u blizini plavljenja). Da bi se obezbedilo optimalno kvašenje punjenja ispod tačke napajanja, često se računa sa tkz. minimalnim protokom efektivnog kvašenja (MPEK):

$$MPEK = L'_{min} = \frac{\text{Zaprem. fluks tecne faze}}{\text{Spec. povr. punjenja}} = \frac{m^3 / m^2 s}{m^2 / m^3} = m^3 / ms$$

Prema eksperimentalnim ispitivanjima Morris i Jackson-a

- za sva punjenja, osim za prstenove veće od 3" (76mm) i osim za gredice sa razmakom većim od 2 in (50mm)

$$L'_{min} = 2.2 \cdot 10^{-5} \quad m^3 / ms$$

- za prstenove veće od 3in i gredice sa rastojanjem većim od 2" (50mm)

$$L'_{min} = 3.4 \cdot 10^{-5} \quad m^3 / ms$$

Napomenimo da je veza između  $L'_{min}$  i masenog fluksa tečnosti

$$L_f = L'_{min} \cdot \rho_L \cdot a$$

Gde je  $L_f$ -fluks tečnosti,  $\rho_L$ -gustina tečnosti i  $a$ -specifična površina punjenja.

Složenost pitanja okvašene i aktivne površine je i u tome što to nije samo hidrodinamičko pitanje, već zavisi i od operacije (destilacija ili apsorpcija). Naime, pri isparavanju sva okvašena površina je aktivna, a pri apsorpciji tečnost u zastoynim zonama se brzo zasiti i na tim mestima prestaje prenos mase. Međutim, u slučaju hemisorizije površina zastoynne zone je aktivna dokle god postoji aktivna supstanca u tečnosti. Na osnovu iznetog, može se zaključiti da je aktivna površina pri apsorpciji dobro rastvornih gasova proporcionalna  $Z_{din}$ , a pri isparavanju - aktivna površina odgovara okvašenoj i srazmerna je ukupnom zadržavanju  $Z$ .

Kako u operativnim troškovima jedne kolone sa punjenjem najveću stavku predstavlja snaga potrebna za potiskivanje gasa (koja je srazmerna

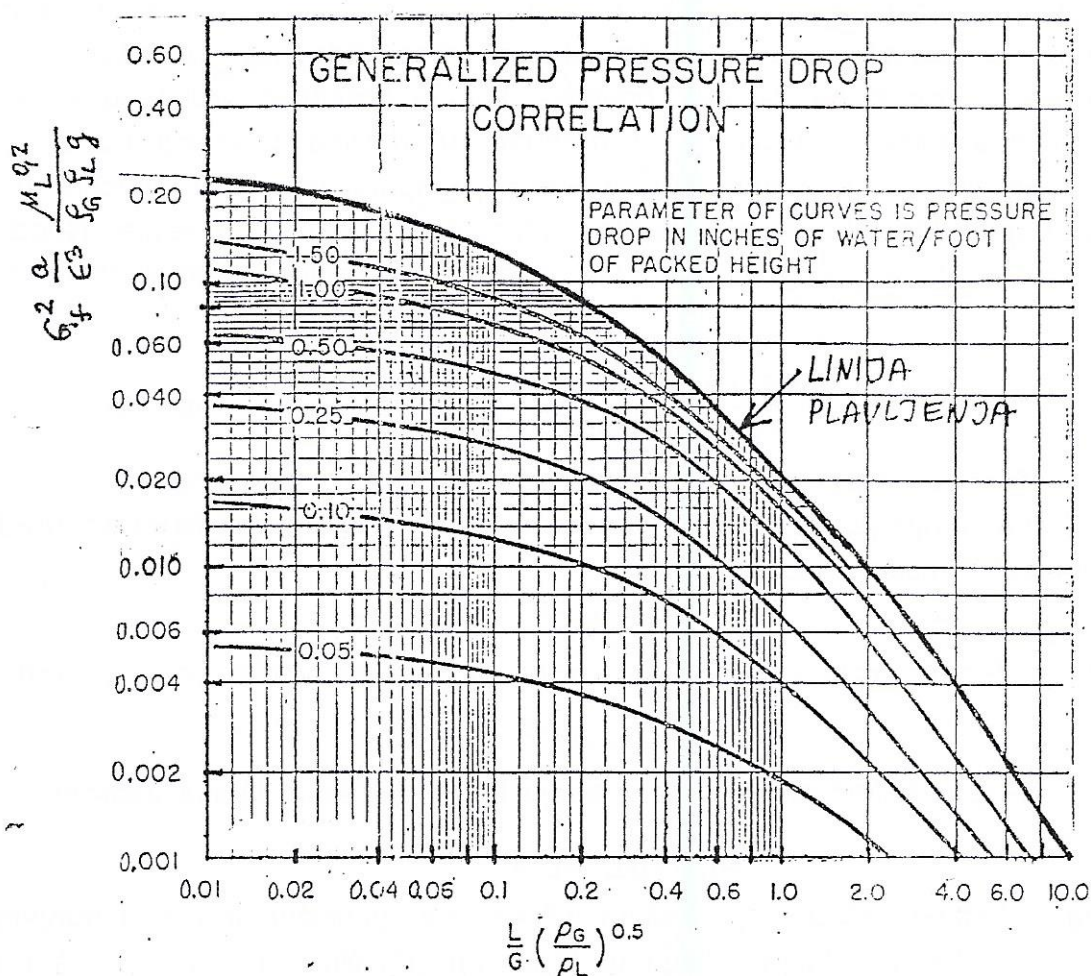


protoku i padu pritiska), to je od primarnog značaja da se odredi optimalni fluks gasa i tečnosti.

Odredjivanje brzine plavljenja Klasičan pristup je pomoću grafičke korelacije koju su dali Lobo i saradnici (slika 10) kao bezdimenzionu zavisnost:

$$Y = f(X), \text{ odnosno } G_f^2 \frac{a}{\varepsilon^3} \frac{\mu_L^{0.2}}{g \rho_L \rho_G} = f\left(\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}\right)$$

gde je  $G_f$  – maseni fluks gasa ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ),  $G$  – maseni protok gasa ( $\text{kg/s}$ ),  $L$  – maseni protok tečnosti ( $\text{kg/s}$ ),  $a$  – specifična površina punjenja ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ),  $\rho_G$  – gustina gasa,  $\rho_L$  – gustina tečnosti,  $\varepsilon$  – poroznost punjenja i  $\mu_L$  – viskozitet



Slika 10. Dijagram plavljenja

tečne faze (u cP). Napomenimo da je dimenzija za viskozitet van SI sistema.

Rad u oblasti linije plavljenja se ne preporučuje zbog nestabilnosti sistema. U zavisnosti od vrste punjenja preporučuju se sledeći radni fluksevi gasa: Za Rašigove prstenove  $G_f = (0,6-0,8)G_{\text{PLAVLJENJA}}$ , za Berlova sedla  $G_f = (0,65-0,8)G_{\text{PLAVLJENJA}}$  i za Intalox sedla  $G_f = (0,65-0,85)G_{\text{PLAVLJENJA}}$ .

### Pad pritiska u koloni sa punjenjem

Za strujanje kroz porozan sloj modifikovani koeficijent trenja je definisan izrazom:

$$f_p = \left( -\frac{\Delta P}{z} \right) \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \frac{d_p}{\rho_f U^2} \quad (1)$$

gde je  $f_p$  – modifikovani koeficijent trenja,  $\Delta P$ -pad pritiska (Pa),  $z$ -visina poroznog sloja (m),  $d_p$  – prečnik čestica,  $\rho_f$  – gustina fluida,  $\varepsilon$  - poroznost sloja i  $U$  – površinska brzina fluida (zapreminski protok po jedinici površine prazne kolone).

Modifikovani koeficijent trenja zavisi od modifikovanog Re-broja

$$f_p = 150 \frac{1-\varepsilon}{\text{Re}_p} + 1.75 \quad (2)$$

gde je

$$\text{Re}_p = \frac{d_p \rho_f U}{\mu}$$

gde je  $\mu$ -viskozitet fluida. Iz jednačine (1) pad pritiska je:

$$\left( -\frac{\Delta P}{z} \right) = f_p \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f U^2}{d_p} \quad (3)$$

Strujanje gasa kroz kolonu sa punjenjem je, u osnovi, strujanje kroz porozan sloj, samo što su u ovom slučaju "čestice" mnogo veće, pa koristimo termin "punjenje". Ergun-ova jednačina ne važi za ovako krupna punjenja.

I način. Analogno jednačini (3) možemo napisati da je za kolonu sa punjenjem (kao uostalom i za svaki otpor strujanju fluida):

$$\left( -\frac{\Delta P}{z} \right) = \frac{\zeta_0}{2} \frac{\rho_G u^2}{d_e} \quad (4)$$

gde je  $\zeta_0$  - koeficijent otpora punjenja,  $\rho_G$  - gustina gasa ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  - međučestina (intersticijalna) brzina gasa (m/s) i  $d_e$  - ekvivalentni prečnik punjenja. Kako je

$$u = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon \cdot A_c}$$

gde je  $A_c$ -površina slobodnog preseka kolone. Ekvivalentni prečnik punjenja je definisan:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} \quad (5)$$

a modifikovani Rejnoldsov broj za gas, za kolone sa punjenjem:

$$\text{Re}_G = \frac{d_e \cdot u \cdot \rho_G}{\mu_G} = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot U \cdot \rho_G}{a \cdot \mu_G} = \frac{4 \cdot G_f}{a \cdot \mu_G} \quad (6)$$



Prema Ergunu za suva nasuta punjenja važi:

$$\zeta_0 = \frac{133}{\text{Re}_G} + 2.34 \quad (7)$$

Napomenimo da se u slučaju kolona sa punjenjem koriste specifične definicije ekvivalentnog prečnika i Reynoldsovog broja (jednačine 5 i 6).

Za cilindrična punjenja (Rašigovi i Palovi prstenovi) nešto tačnije rezultate daju korelacije Žavornkova:

$$\text{Za } \text{Re}_G < 40: \zeta_0 = 140 / \text{Re}_G \quad (8)$$

$$\text{Za } \text{Re}_G > 40: \zeta_0 = 16 / \text{Re}_G^{0.2} \quad (9)$$

Navedeni izrazi važe za *čisto strujanje gasa* ( $L=0$ ).

Kada kroz sistem struji i tečnost, poroznost je manja jer deo slobodnog prostora zauzima tečnost i otpor je znatno veći pa se za izračunavanje  $-\Delta P/z$  kada je  $L>0$  koriste različite empirijske korelacije.

Dijagram koji se koristi ispod tačke napajanja za različita punjenja (Rašigovi i Palovi prstenovi, Berlova i Intalox sedla) je Teučov (Teutsch) koji

daje odnos pada pritiska u okvašenom i suvom punjenju u funkciji bezdimenzionog parametra  $K$ , prikazanog na slici 11. Parametar  $K$  je grupa:

$$K = 0.12 \cdot Fr_L \cdot \text{Re}_L^{-0.8} (1 + 7.5 \cdot 10^{-5} \text{Re}_G) \quad (11)$$

Frudov broj je definisan

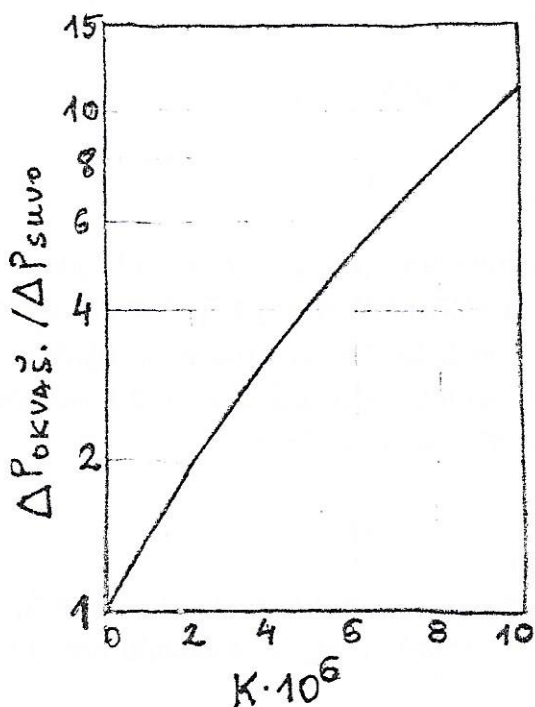
$$Fr_L = \frac{U_L^2 a}{g} \quad (12)$$

gde je  $U_L$ -prividna (površinska brzina) tečnosti:

$$U_L = \frac{V_L}{A_c} \quad (13)$$

gde je  $V_L$  – zapreminski protok tečnosti. Reynolds-ov broj za tečnost je definisan

$$\text{Re}_L = \frac{4L_L}{a\mu_L} \quad (14)$$



Slika 12.  $\Delta P_{okv}/\Delta P_{suvo}=f(K)$

II način. Od direktnih empirijskih korelacija navodimo korelaciju koju je predložio Leva:

$$\left( -\frac{\Delta P}{z} \right) = m \cdot 10^{\frac{nL_f}{\rho_L} - 8} \frac{G_f^2}{\rho_G} \quad (= Pa/m) \quad (15)$$

gde su  $G_f$  i  $L_f$  maseni fluksevi gasne i tečne faze ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ),  $\rho_G$  i  $\rho_L$  – gustine gasa odnosno tečnosti ( $\text{kg/m}^3$ ).  $\underline{m}$  i  $\underline{n}$  su empirijski parametri koji zavise od tipa punjenja, kako je prikazano u tabeli 2.

Levina zavisnost važi do tačke početnog opterećenja (tačka u kojoj zavisnost  $\Delta P/L=f(G_f)$  gubi krivolinijski karakter i počinje naglo da raste (linja II-II, slika 7). Zato je neophodno proveriti da li važi u pogledu opsega za  $L_f$  i opsega za izračunatu vrednost  $\Delta P/z$  prema tabeli.

Tabela 2. Konstante  $m$  i  $n$  u korelaciji za pad pritiska u koloni sa punjenjem

| PUNJENJE           | $m \cdot 10^{-10}(\text{m}^{-1})$ | $n(\text{sm}^{-1})$ | opseg $L_f$<br>( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) | Opseg $\Delta P/z$<br>( $\text{Pa/m}$ ) |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Rašigovi prstenovi |                                   |                     |                                            |                                         |
| 1/2"               | 19,0                              | 85                  | 0,41-11,7                                  | 0-410                                   |
| 3/4"               | 4,50                              | 53,1                | 2,44-14,6                                  | 0-410                                   |
| 1"                 | 4,39                              | 51,3                | 0,49-36,6                                  | 0-410                                   |
| 1.5"               | 1,65                              | 47                  | 0,98-24,4                                  | 0-410                                   |
| 2"                 | 1,52                              | 34,8                | 0,98-29,3                                  | 0-410                                   |
| Berlova sedla      |                                   |                     |                                            |                                         |
| 1/2"               | 8,27                              | 40,2                | 0,41-19,1                                  | 0-410                                   |
| 3/4"               | 3,30                              | 34,8                | 0,49-19,5                                  | 0-410                                   |
| 1"                 | 2,19                              | 34,8                | 0,98-39,1                                  | 0-410                                   |
| 1.5"               | 1,10                              | 26,6                | 0,98-29,3                                  | 0-410                                   |
| Intalox sedla      |                                   |                     |                                            |                                         |
| 1"                 | 1,70                              | 32,7                | 3,42-19,5                                  | 0-410                                   |
| 1.5"               | 0,775                             | 26,6                | 3,42-19,5                                  | 0-410                                   |

III način. Pogodan za proračun podova pritiska i brzina u kolonama je Eduljejev dijagram (slika 12). Na apscisi je dat odnos prividnih brzina tečnosti i

$$Y = C \frac{U_G^2}{g d_p} \left( \frac{\mu_L}{U_G d_p \rho_G} \right)^{0.1} \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^2 \left( \frac{\rho_G}{\rho_A} \right)^{0.85} \quad (16)$$

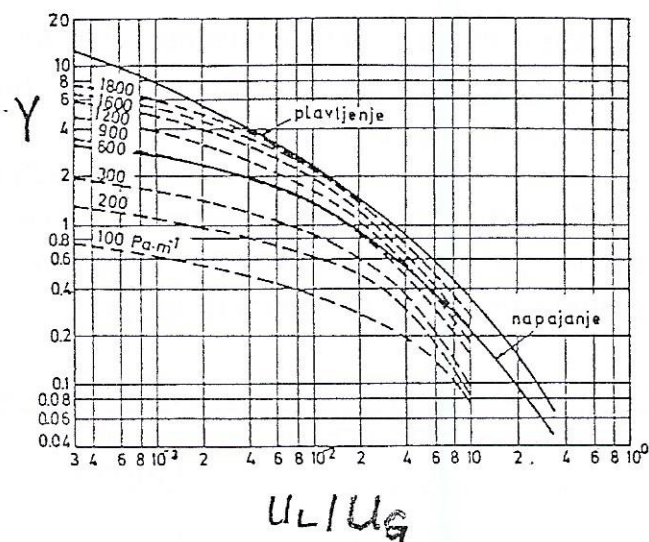
gde je  $\rho_V$  – gustina vode,  $\rho_A$  – gustina vazduha, a  $d_p$  – ekvivalentni prečnik punjenja (Tabela 1). Prividne (površinske) brzine gasa ( $U_G$ ) i tečnosti ( $U_L$ ) definisane su kao zapreminski protoci po jedinici površine prazne kolone.

Konstanta  $C$  zavisi od vrste punjenja, kako je prikazano u Tabeli 3.

Tabela 3. Podaci za konstantu  $C$  u jednačini (16)

| Punjenje                               | $d_p$ , mm | $C$   |
|----------------------------------------|------------|-------|
| Složeni Rašigovi prstenovi (keramički) | 15-38      | 0,251 |
| Nastuti Rašigovi prstenovi (keramički) | 9,5-51     | 1,0   |
| Nasuti Rašigovi prstenovi (metalni)    | 25-51      | 0,610 |
| Palovi prstenovi (metalni)             | 25-38      | 0,261 |
| Intalox sedla                          | 13-38      | 0,370 |
| Berlova sedla                          | 13-38      | 0,471 |





Slika 12. Zavisnost  $Y=f(U_L/U_G)$

Obično se zna odnos  $L/G$  iz kojeg se izračuna  $U_L/U_G$  i odredi  $Y$ -od napajanja do plavljenja (koje je nezavisno od  $L$ ). Iz  $Y$  se odredi prividna brzina gasa, a zatim prividna brzina tečnosti  $U_L$ .

# PREČIŠĆAVANJE GASOVA MOKRIM POSTUPCIMA

## 1. UVOD

### 1.1. Opšte napomene

Separacija čestica iz gasnog toka odnosno razdvajanje čvrste od gasne faze je često primenjivana hemijsko-inženjerska operacija. Razlozi za ovu operaciju mogu biti dvojaki:

a) tehnološki, kada su čestice u gasnoj fazi produkt nekog procesa koje je potrebno izdvojiti radi korišćenja ili dalje obrade;

b) ekološki, kada je primarni cilj da se spreči emitovanje čestica u okolinu (atmosferu), što ne isključuje napred navedenu mogućnost.

Ljudska aktivnost zagadjuje vazduh u svim vidovima u kojima se zagadjuvači javljaju: čvrstim česticama (prašinom), kapljicama (tečnostima), parama (molekuli) i gasovima (molekuli). U najširem smislu pojam čestice obuhvata čvrste čestice i kapi svih veličina i molekule. Ovde je čestica definisana kao samostalna jedinka, koja ima sastav kao i druge čestice iste vrste. U Tabeli I prikazana je veličina karakterističnih čestica.

Tabela I. Veličine karakterističnih čestica

| Vrsta čestica               | Opseg veličina, $\mu\text{m}$ | Gde se nalaze                      |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Molekuli                    | 0,0002-0.005                  | Gasovi i pare                      |
| Nevidljivo sitne (koloidne) | 0,001-1                       | Aerosoli, postojani dimovi i magle |
| Vrlo sitne                  | 0,1-10                        | Fine prašine                       |
| Srednje                     | 10-100                        | Obična prašina                     |
| Grube                       | veće od 100                   | Grube prašine, kapi kiše           |

Iz ove tabele uočavamo da nije reč samo o jednoj veličini čestica, nego je u pitanju opseg veličina pojedinih čestica i očigledno je da postupci izdvajanja čestica različitih veličina ne mogu biti isti. Pravilo je da svakoj veličini čestica odgovara najpogodniji način prečišćavanja.

Kada je reč o prečišćavanju gasova postupkom skrubiranja, u pitanju je trofazni dispergovani sistem. Dispergovanje faza u hemijskom inženjerstvu se obavlja da bi se postigla dva efekta: Prvo, da bi se formirala veća međufazna kontaktna površina i drugo da bi se ostvarilo relativno kretanje između faza. Oba efekta su preduslovi za ostvarivanje velikih brzina prenosa, a sa time i efikasnijeg procesa.

Disperzni sistemi mogu biti:

a) Disperzije čvrstih čestica, gde je čestica (oznaka S) dispergovana, a gde kontinualna faza može biti gas (G) ili tečnost (L)

b) Disperzije kapljica, gde je u pitanju kontakt dispergovane fluidne-tečne (L) čestice i gasa (G) kao kontinualne faze. Specijalan slučaj predstavlja kontakt dve tečnosti koje se ne mešaju, na primer vode i ulja. Ovde je obično jedna faza dispergovana u vidu kapi (L), koje su u kontaktu sa drugom kontinualnom tečnom fazom (L)

c) Disperzije mehura, gde je u pitanju kontakt dispergovane fluidne-gasne čestice (mehura) (G) i tečnosti (L) kao kontinualne faze

d) Složene disperzije, na primer istovremeni kontakt dispergovanih čestica (S) i kapljica (L) sa gasom (G) kao kontinualnom fazom u različitim trofaznim sistemima.



Fenomeni vezani za prečišćavanje gasova postupkom skrubiranja spadaju u disperzne sisteme navedene pod d).

U hemijskom-inženjerstvu najčešće pod pojmom "čestica" se podrazumeva čvrsta čestica, kap i mehur. Materijal koji formira česticu je onda disperzna faza, a okolna fluidna faza koja može biti gas ili tečnost, predstavlja kontinualnu fazu. Čestica je telo koje od okolnog medijuma (kontinualne faze) deli prepoznatljiva međufazna površina. Ako je materijal koji čini česticu čvrst u pitanju je čvrsta čestica ili čestica u užem smislu. Ako je materijal koji čini česticu tečnost u pitanju je kap, a ako je materijal gas u pitanju je mehur. Kapi i mehuri se jednim imenom nazivaju "fluidne čestice". Po definiciji česticom se smatra telo (čvrsto, kap ili mehur) koje je biološki inertno i koje nema sopstveni pogon. Tela sa sopstvenim pogonom se ponašaju na drugačiji način u struji fluida u odnosu na inertno telo bez sopstvenog pogona.

Čvrsta čestice, kapi i mehuri su veoma različitih veličina, donja granica veličine čestice je oko  $1\ \mu\text{m}$  jer manje čestice podležu Braunovom kretanju. Drugim rečima, ove čestice ne kreću se slobodno pod dejstvom spoljnih sila, na primer pod dejstvom gravitacije. Sa druge strane, kretanje čvrstih "čestica" većih od oko  $10^5\ \mu\text{m}$  je znatno složenije.

## 1.2. Ekološki aspekt

U Tabeli II. navedeni su literaturni podaci za emisiju (u kg po t proizvoda) u dvema industrijama, koje bi postajale u slučaju da nema uređaja za smanjenje emisije.

**Tabela II.** Emisija polutanata (kg po t proizvoda)

Proizvodnja amonijum-nitrata

| Deo procesa        | Čestice | NO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> |
|--------------------|---------|-----------------|-----------------|
| Neutralizator      | -       | -               | 1,0             |
| Granulator         | 0,2     | 0,45            | 0,25            |
| Sušnice, hladnjaci | 3,5     | 12,5            | 0,65            |

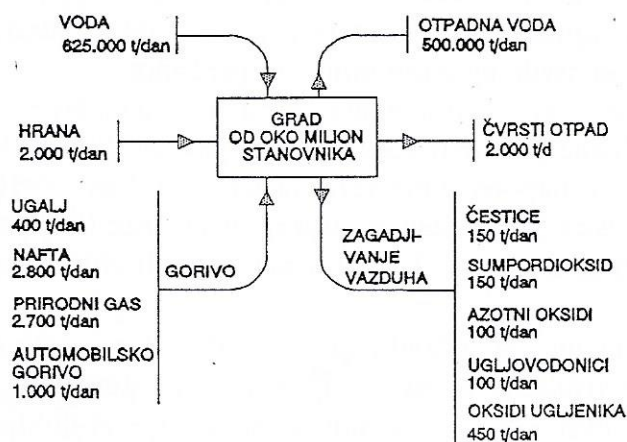
Proizvodnja bakra

| Proces      | Čestice | Oksidi sumpora |
|-------------|---------|----------------|
| Prženje     | 42,5    | 490,0          |
| Topljenje   | 20,0    | 14,0           |
| Rafinisanje | 5,0     | -              |
| U k u p n o | 67,5    | 504,0          |

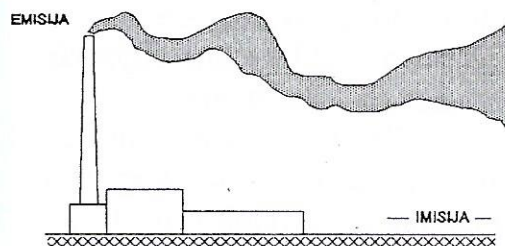
Na sl.1. prikazan je dnevni bilans mase za prosečno industrijski razvijen grad od oko milion stanovnika. Uočavamo da su količine otpadnih materijala znatne, pri čemu je emisija čvrstih čestica u atmosferu oko 150 t/dan ili 150 g čestica po stanovniku.

Propisima (Sl. glasnik RS 66/91) i Pravilnikom o maksimalno dozvoljenim koncentracijama u prizemnom sloju atmosfere (Sl. glasnik RS 54/92) definisane su granične vrednosti imisije, tj. koncentracije zagađujućih materija u prizemnom sloju atmosfere, zavisno od lokaliteta (urbano područje, rekreativno područje, itd.). Propisi o emisiji u Srbiji još nisu doneti. Nacrt

pravilnika, koji je u postupku donošenja, predviđa oštre norme dozvoljene emisije po industrijskim granama i zagađivačima. Stupanje na snagu ovih propisa postaviće pred inženjere složene zadatke. Definicija emisije i imisije koncentracije šematski je prikazana na sl.2.



Sl.1. Bilans mase za grad od oko 1.000.000 stanovnika



Sl.2. Emisija i imisija

## 2. DINAMIKA TROFAZNIH SISTEMA

### 2.1. Karakterizacija čvrstih i fluidnih čestica (kapi)

Ukoliko su sve čestice u nekom sistemu iste veličine kažemo da je sistem monodisperzan. Ako se dimenzije čestica razlikuju u pitanju je polidisperzan sistem, što je najčešći slučaj u inženjerskoj praksi.

**Čvrste čestice.** Čvrstu česticu karakterišu veličina, oblik i specifična površina. Pored navedenih veličina, koje se mogu na određeni način kvantitativno iskazati, za određene procese važne su i druge karakteristike čestica: lepljivost, mehanička stabilnost, hrapavost, sklonost otiranju, i sl. Matematički modeli kojima se služimo u analizi disperznih - heterogenih sistema zahtevaju sa jedne strane poznavanje karakteristika individualnih čestica, a sa druge strane i poznavanje karakteristika slojeva čestica (nepokretnih ili pokretnih).

**Veličina čvrstih čestica.** Veličina čestice je dimenzija koja najbolje opisuje datu česticu. Kada je u pitanju sferična čestica njen prečnik je jedina dimenzija koja je karakteriše. Kod čestica koje su nepravilnog oblika definisanje reprezentativnog prečnika nije jednostavno pitanje. U zavisnosti od prirode procesa u kome učestvuju čestice, reprezentativni prečnici se definišu na više načina, o čemu je bilo reči u prethodnim izlaganjima.

**Raspodela veličina čestica i srednji prečnik.** Kada su u određenoj smeši prisutne čestice različitih dimenzija, očigledno je da srednji prečnik nije jednostavno aritmetička srednja vrednost. Pri izračunavanju srednjeg prečnika u nekoj polidisperznoj smeši mora se voditi računa u relativnoj zastupljenosti pojedinih frakcija u smeši. Kao što je već naglašeno ranije, postoji više definicija srednjeg prečnika: zapreminski, površinski, površinsko-zapreminski, prečnik pri istoj projektovanoj površini, itd.

**Oblik čvrstih čestica.** Realni sistemi retko sadrže sferične čestice. Od ranije navedenih faktora oblika, najčešće se koristi sferičnost.

**Fluidne čestice (kapi).** Osnovna karakteristika fluidne čestice (kapljice ili mehura gasa) je da je njena veličina i oblik rezultira iz odnosa dinamičkih sila koje teže da je deformišu i sila površinskog napona koje teže da održe oblik takve čestice.



Veličina kapi. Napred iznete definicije različitih prečnika važe i za fluidne čestice. Za polidisperznu smešu kapljica, pri proračunima najčešće se koriste *srednji zapreminski prečnik* kapi ( $d_{kv}$ ) i *srednji zapreminsko-površinski prečnik* ili Sauterov srednji prečnik ( $d_{ks}$ ), koji predstavlja prečnik one kapi koja ima isti odnos zapremine prema površini kao cela disperzija. Sauterov srednji prečnik obično iznosi 0,7-0,9 od srednjeg zapreminskog prečnika.

Oblici kapi. Za razliku od čvrstih čestica koje, ako nema otiranja i dezintegracije (lomljenja), zadržavaju svoj oblik, kapi su podložne promeni oblika pod dejstvom dinamičkih sila, koje teže da ih deformišu, i sila površinskog napona, koje teže da održe njihov sferični oblik. Pri slobodnom kretanju kroz kontinualnu fazu (gas), čestice dispergovane faze (kapljice) mogu imati oblik sfere, elipsoida, sferične ili elipsoidne kape, kao i niz nepravilnih oblika koji, po pravilu, nisu stabilni.

Za sada nema pouzdane opšte korelacije za određivanje oblika kapi tečnosti dispergovanih u gasu. Kapi malih prečnika su približno sferične ( $d_{kv} < 1$  mm), gde je  $d_{kv}$  - zapreminski prečnik kapi. U oblasti prečnika  $1 \text{ mm} < d_{kv} < 10 \text{ mm}$ , kapi postepeno dobijaju oblik elipsoida spljoštenih u pravcu kretanja. Pri kretanju velikih kapi ( $d_{kv} > 10 \text{ mm}$ ) formira se snažan vrtlog na zadnjem delu kapi koje zbog toga dobijaju oblik nestabilnih sfernih ili elipsoidnih kapa i lako se dezintegrišu u roj sitnih kapljica.

Metode za određivanje veličine čestica. Za određivanje veličine čestica koristi se više metoda: direktno merenje, metoda mernog mikroskopa, metoda sedimentacije, metoda standardnih sita, itd. sve do najsavremenijih metoda (laser-dopler anemometrija, automatski elektronski mikroskopi i dr.) u sprezi sa on-line računarskom statističkom obradom uzorka. U načelu, dimenzije čestica određene različitim metodama nisu među sobom apsolutno jednake. One imaju relativnu vaznost, jer samo ista metoda za isti materijal, istog oblika, daje reproduktivne rezultate. To znači da se veličine čestica mogu porediti, po pravilu, samo ako su određene istom metodom. Uzorak materijala koji se analizira treba da je reprezentativan, što znači da zrnasti materijal pre uzorkovanja treba izmešati (homogenizovati).

Direktno merenje. Ako su čestice krupne ( $> 5 \text{ mm}$ ) moguće je direktno merenje kljunastim merilom (nonijusom), mikrometrom i sl. Kako se meri karakteristična dužina velikog broja čestica, koje su slučajno zahvaćene, može se reći da srednja vrednost svih merenja predstavlja karakterističnu dimenziju ovih čestica.

Metoda mernog mikroskopa. I ovo je u osnovi direktna metoda, s tom razlikom što se koristi pogodno optičko uvećanje. Veliki broj čestica se stavi, bez reda, na mikroskopsko staklo, i po pogodnom uvećanju poredi sa mikroskalom koja se nalazi u vidnom polju. Umesto mikroskopa može se koristiti pogodno uvećana fotografija. Danas se pogodno uvećana fotografija najčešće analizira uz pomoć računara, korišćenjem nekog od programa za procesiranje slike.

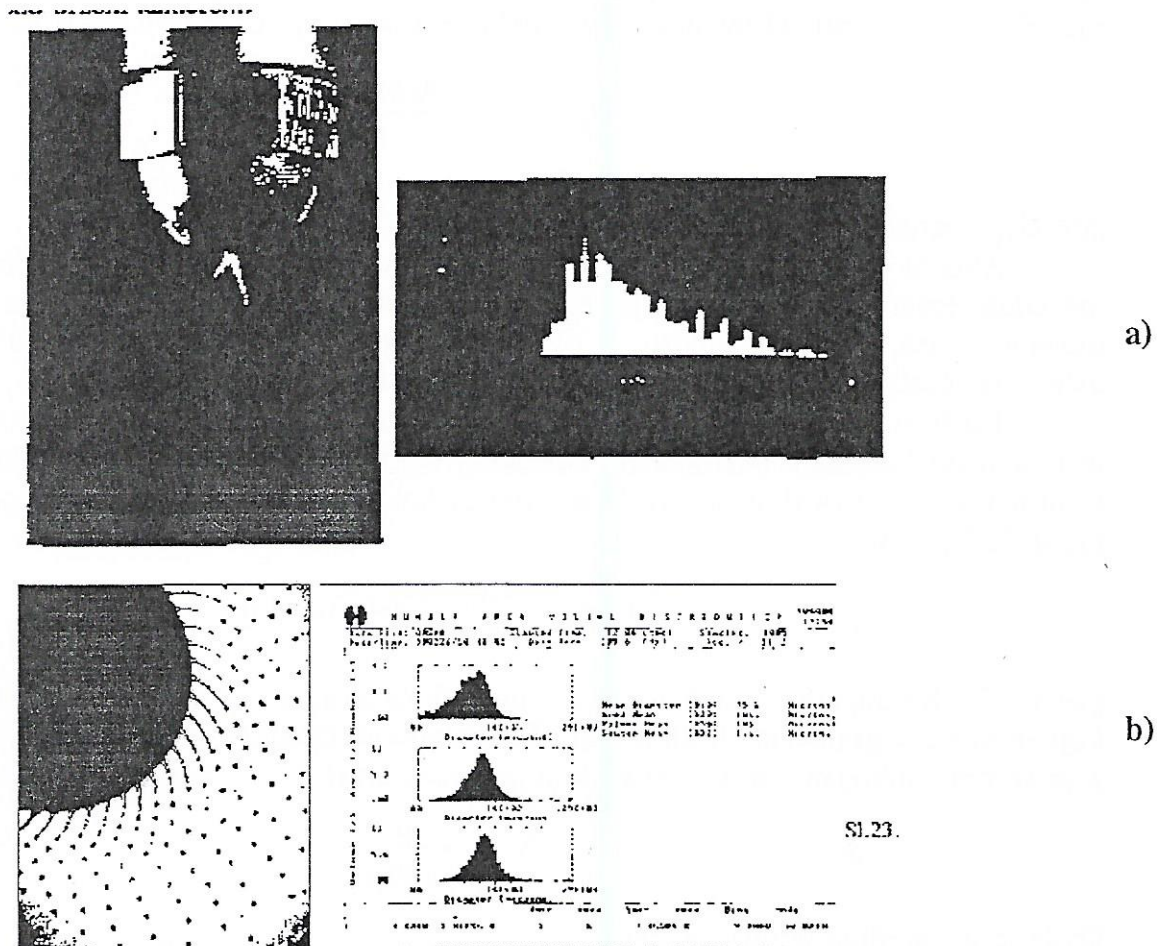
Metoda sedimentacije. Ovaj metod koristi se najčešće za definisanje veličina čestica čije su dimenzije 2 do  $60 \mu\text{m}$ . Meri se brzina taloženja čestica u mirnom fluidu (tečnost ili gas) ili fluidu koji se kreće nasuprot čestici. Očigledno je da će se sitnije čestice taložiti sporije od krupnijih. Na osnovu podataka o brzini taloženja i poznavanja određenih zakonitosti kretanja čestica u fluidu moguće je, posredno, odrediti veličinu čestica.

Metoda standardnih sita se najčešće koristi za određivanja veličine čestica. To je mehanička klasifikacija pomoću garniture standardnih sita, a koristi se za smeše u kojima je prečnik čestica veći od oko  $40 \mu\text{m}$ . Sastav određene smeše čestica prema veličini zrna nazivamo granulometrijskom analizom. Postoji više sistema sita: DIN, ASTM, Tyler i GOST, a međusobno se razlikuju po veličini okca i debljini žice.

Kada su u pitanju fluidne čestice (kapljice) njihova veličina i oblik se najčešće određuje pomoću fotografije snimljene pri pogodnom osvetljenju i ekspoziciji, kao i korišćenjem novih mernih metoda. Kao ilustracija na sl.3a. prikazana je konična mlaznica koja rasprskava vodu



zajedno sa histogramom raspodele veličine kapi koji je dobijen laser-dopler-anemometarskom metodom. Na sl.3b. prikazano je formiranje kapi sa rotirajućeg diska, kao i histogram raspodele veličine kapi.



Sl.3. Raspodela veličina kapi za dva tipa mlaznica

## 2.2. Kretanje čvrstih i fluidnih čestica (kapi)

### Brzina taloženja čvrstih čestica.

Bilans sila na kapi česticu prečnika  $d_k$ , koja se slobodno kreće kroz kontinualnu fazu (taloži) dovodi do opšteg izraza za određivanje konačne brzine kretanja (taloženja):

$$U_t = \sqrt{\frac{4d_k g (\rho_k - \rho_g)}{3C_d \rho_g}} \quad (1)$$

gde je  $\rho_k$ -gustina kapi,  $\rho_g$ -gustina gasa, a  $C_d$ -koeficijent otpora. Koeficijent otpora  $C_d=f(Re_t)$ , a zavisnost prolazi kroz tri karakteristične oblasti, što govori o postojanju tri režima kretanja kapi: Viskozni režim ( $Re_t < 50$ ), prelazni režim ( $50 < Re_t < 200$ ) i turbulentni režim



( $Re_t > 200$ ), gde je  $Re_t$  Reynolds-ov kriterijum pri brzini taloženja ( $= d_k U_t \rho_k / \mu_g$ ), a  $\mu_g$  je viskozitet gasa. Zamenom korelacija za  $C_d$  u jedn.(1) dobijaju su relacije za brzinu taloženja u pojedinim režimima. Kada se radi o prečišćavanju gasova postupkom skrubiranja, tretiraju se vrlo sitne čestice, koje imaju malu brzinu taloženja, pa je najčešći režim sa kojim se susrećemo laminarni. U ovom režimu koeficijent otpora je  $C_d = 24/Re_t$ , pa je:

$$U_t = U_{St} = \frac{d_k^2 g (\rho_k - \rho_g)}{18 \mu_g} \quad (2)$$

gde  $U_{St}$  - označava brzinu taloženja u Štoksovom (laminarnom) režimu.

Ako su čestice reda veličine  $1 \mu m$ , a to je veličina od značaja za skrubere, prisutan je još jedan fenomen. Naime, kada je čestica veoma sitna, a to znači reda veličine slobodnog puta molekula gasa, gas se u odnosu na česticu više ponaša kao kontinualni medijum. Pod ovim uslovima, čestice se kreću brže nego što to predviđa Stoksova jednačina.

Da bi uzeo u obzir ovo povećanje brzine kretanja čestice (tzv. "klizanje"), Kaningem je izračunao korekciju baziranu na kinetičkoj teoriji gasova, koja se generalno primenjuje u svim jednačinama za sitne čestice. Kaningemov koeficijent se može izračunati po jednačini koju predlaže Epstein:

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d} [0.7004 (2a - 1)] \quad (3)$$

gde je  $C$  - Kaningemov koeficijent,  $d$  - prečnik čestice,  $a$  - je koeficijent elastičnosti sudara, koji se kreće u granicama  $0.88 < a < 0.92$ . Sa dovoljnom tačnošću može se usvojiti  $a = 0.9$ .

$\lambda$  je srednji slobodan put molekula, koji se izračunava:

$$\lambda = \frac{\mu}{0.499 \rho \bar{u}} \quad (4)$$

Ovde je  $\bar{u}$  - srednja brzina molekula:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (5)$$

gde je  $R$  - univerzalna gasna konstanta,  $M$  - molekulska masa gasa, a  $T$  - apsolutna temperatura.

Stvarna brzina taloženja sitnih čestica je:

$$U_t = C \cdot U_{St} \quad (6)$$

Temperatura ima značajan uticaj na Kaningemov koeficijent, naročito za veoma male čestice. Ovaj uticaj je prikazan u Tabeli III.

**Brzine kretanja kapi u disperzijama.** Kapi tečnosti, koji se slobodno kreću kroz kontinualnu fazu, mogu se ponašati kao čvrste sfere, mogu se kretati uz pojavu unutrašnje cirkulacije ili se deformišu i osciluju uz intenzivnu unutrašnju turbulenciju fluida. Brzina kretanja kapi, kao i prenos mase u disperziji, uslovljeni su ovim fenomenima koji u prvom redu zavise od veličine kapi. Celovit teorijski model kretanja kapi još uvek nije formulisano. Teorijska rešenja postoje za sferične čestice fluida malih prečnika, dok su uslovi strujanja koji su od osnovnog interesa za prenos mase u industrijskim sistemima (kretanje nesferičnih kapi, uz fragmentaciju i koalescenciju) definisani na nivou empirijskih relacija.

Metodologija proračuna terminalnih brzina kretanja u osnovi je ista i za čvrste čestice



**Tabela III.** Vrednosti Kaningemovog koeficijenta za čestice od 0.01 do 10  $\mu\text{m}$  i za temperature od 0°C do 1600°C

| Temperatura<br>(°C) | Viskozitet<br>vazduha<br>(Pas) | Prečnik čestica ( $\mu\text{m}$ ) |       |       |        |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|--------|
|                     |                                | 0.01                              | 0.10  | 1.0   | 10.0   |
| 0                   | $17.04 \cdot 10^{-6}$          | 20.15                             | 2.64  | 1.149 | 1.015  |
| 200                 | 25.85                          | 39.84                             | 4.58  | 1.299 | 1.0297 |
| 400                 | 32.86                          | 59.89                             | 6.55  | 1.457 | 1.0450 |
| 600                 | 38.80                          | 80.43                             | 8.59  | 1.626 | 1.0606 |
| 800                 | 44.05                          | 100.99                            | 10.64 | 1.801 | 1.0761 |
| 1000                | 48.76                          | 121.5                             | 12.69 | 1.982 | 1.0918 |
| 1200                | 53.10                          | 142.4                             | 14.77 | 2.171 | 1.1076 |
| 1400                | 57.13                          | 163.3                             | 16.85 | 2.363 | 1.1234 |
| 1600                | 60.90                          | 184.2                             | 18.94 | 2.557 | 1.1393 |

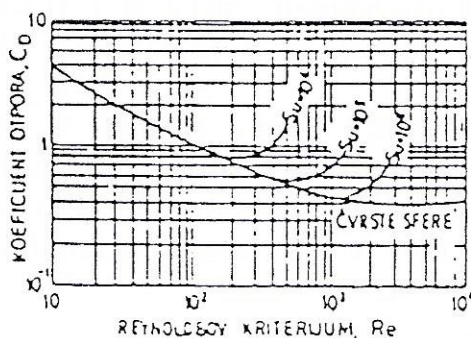
i kapi tečnosti. Brzina se računa iz jedn. (2), kao funkcija koeficijenta otpora  $C_d$ , prečnika kapi ( $d_k$ ) i fizičkih osobina čestice (kap) i fluida (gas). Osnovni problem očigledno predstavlja definisanje zavisnosti  $C_d = f(\text{Re}_t)$  za različite oblike kapi, i za različite režime njihovog kretanja kroz kontinualnu fazu.

**Viskozni režim.** U ovom režimu važi relacija za čvrste čestice (jedn.2.)

**Prelazni režim.** U ovoj oblasti su prečnici kapi veći nego u viskoznom režimu, pa su i brzine slobodnog kretanja veće. Iza kapi dolazi do stvaranja vrtloga, a zapažene su i pojave deformacija, koje česticama fluida daju oblik elipsoida spljoštenih u pravcu kretanja. Kapi se ipak mogu tretirati kao približno sferične čestice, budući da razlika duže i kraće ose elipsoida ne premašuje 10%.

**Turbulentni režim.** Oblast visokih Reynolds-ovih brojeva ( $\text{Re}_t > 200$  za kapi) odgovara kretanju nesferičnih kapi velikih srednjih prečnika ( $1 \text{ mm} < d_k < 15 \text{ mm}$ ). Koeficijenti otpora u ovom slučaju odredjuju se na osnovu dijagrama iz literature.

Hughes i Gilliland (Hjuz i Gililend) su korelisali podatke za brzine taloženja kapi



**Sl.4.**  $C_d = f(\text{Re})$  za kretanje kapi u gasovima

različitih tečnosti u vazduhu, u obliku bezdimenzionog parametarskog dijagrama prikazanog na sl.4. Koeficijent otpora  $C_d$  predstavlja funkciju Reynoldsovog kriterijuma, a kao parametar se pojavljuje Suratmanov (Suratman) kriterijum ( $Su = \sigma \rho_g d_k g / \mu_g^2$ ), gde je  $\sigma$ -površinski napon tečnosti. Dijagram se odnosi na čiste tečnosti.

U novijoj literaturi može se naći više pokušaja generalizacije relacija za brzine kretanja čestica fluida, koji baziraju na uvođenju bezdimenzionih kriterijuma koji definišu fizičke karakteristike kontinualne i dispergovane faze.

Kapi tečnosti su spljoštane u pravcu kretanja i imaju



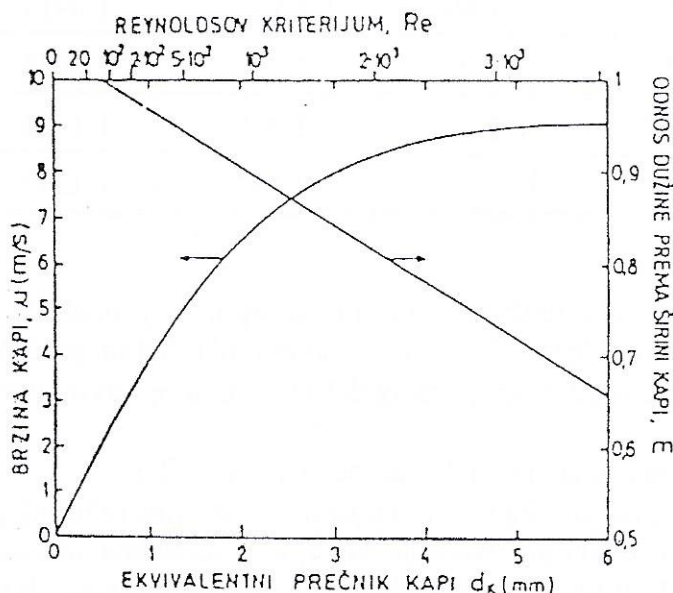
oblik elipsoida, koji se sa porastom prečnika i brzine kretanja kapi sve više deformišu i sve jače osciluju. Kada prečnik kapi premaši 10 mm, formira se vrtlog u šupljini na zadnjem delu kapi, kapi dobijaju nestabilan oblik sferne kape i dezintegrišu se. Karakter promene brzine kretanja kapi uslovljen je delovanjem dva suprotna efekta. Sa porastom prečnika kapi raste brzina kretanja, ali se istovremeno pojačavaju oscilacije koje povećavaju koeficijent otpora. Ukupni efekat je pojava maksimuma na određenom  $Re_k$  broju, posle kojeg brzine kretanja kapi postaju manje od brzine taloženja čvrstih čestica istih karakteristika.

Maksimalna brzina kretanja kapi odgovara Reynoldsovom kriterijumu za početak oscilacija kapi, koje se može odrediti iz empirijske korelacije Hua i Kintnera (Hu i Kintner):

$$Re_{osc,k} = 22 \left[ \frac{\rho_g^2 \sigma^3}{(\rho_k - \rho_g) g \mu_g^4} \right]^{0.15} \quad (7)$$

Prečnik kapi koje se kreću maksimalnom brzinom predstavljen je korelacijom Kle-a i Treybal-a:

$$(d_k)_{max} = 0,33 \rho_g^{-0.14} (\rho_k - \rho_g)^{0.43} \mu_g^{0.3} \sigma^{-0.24} \quad (8)$$



Sl.5. Brzine kretanja i stepen deformacije kapi vode u vazduhu na 20°C

### 2.3. Formiranje kapi tečnosti

Dispergovanje tečnosti u gasu (ili drugoj nemešljivoj tečnosti) odvija se u tri stupnja: formiranje mlazeva ili lamela tečnosti, deformisanje i kidanje ovih elemenata u kapi i fragmentacija primarno formiranih kapi.

**Formiranje kapi iz mlazeva tečnosti.** Formiranje mlaza tečnosti i njegova dezintegracija u kapi prolazi kroz četiri hidrodinamička režima, prikazana na sl.6. Pri malim brzinama tečnosti, na otvoru se formiraju pojedinačne kapi, slično formiranju mehura gasa na izolovanom otvoru. Kada se dostigne kritični protok tečnosti  $V_M$ , na otvoru se formira mlaz tečnosti. Uslov za formiranje mlaza definisan je jednačinom:

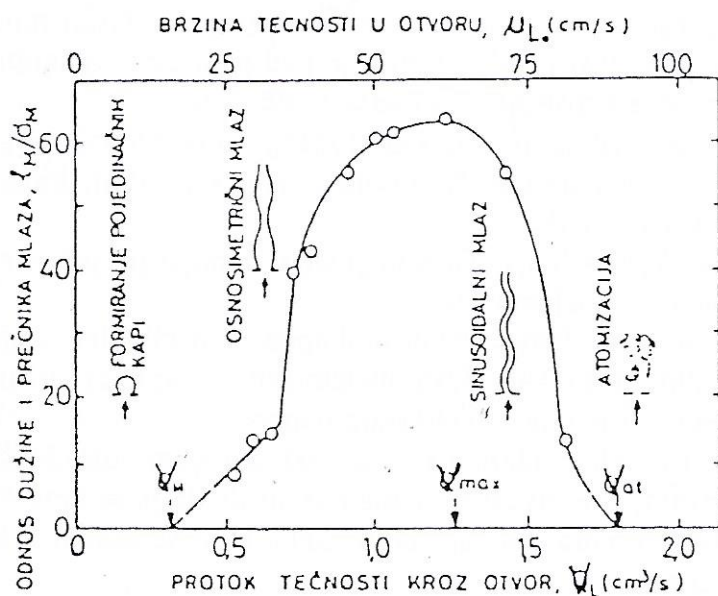
$$V_M = 1.36 \sqrt{\frac{\sigma d_0^3}{\rho_L} \left[ 1 - \frac{d_0}{1.24 V^{1/3}} \right]} \quad (9)$$

gde je  $\sigma$  - površinski napon tečnosti, a  $V$  označava ukupnu zapreminu kapi koje bi se formirale kada ne bi postojao mlaz tečnosti:

$$V = \frac{\Psi_H \pi d_0 \sigma}{\Delta \rho g} \quad (10)$$

Parametar  $\Psi_H$  (Harking-ov faktor) uzima u obzir činjenicu da na otvoru zaostaju kapljice koje narušavaju osnovnu jednačinu ravnoteže, tako da je stvarna zapremina kapi manja od teorijske.

Empirijski faktor  $\Psi_H$  može se naći u literaturi.



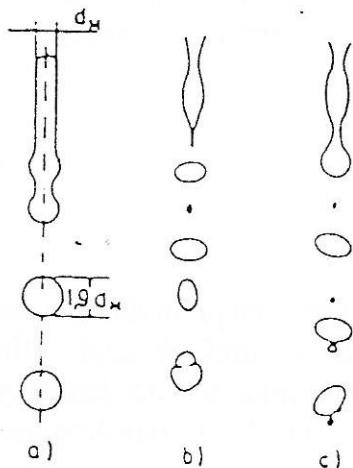
Sl.6. Režim formiranja i dezintegracije mlaza tečnosti (sistem heptan-voda)

U opsegu protoka tečnosti ( $V_M < V_L < V_{max}$ ) mlaz je osnosimetričan, a pri većim protocima ( $V_{max} < V_L < V_{at}$ ) dobija oblik sinusoide.  $V_{max}$  je maksimalni protok u stabilnom mlazu. Iznad  $V_{max}$  mlaz tečnosti osciluje, pošto svako smanjenje preseka prati odgovarajući porast pritiska u tom preseku. Ove oscilacije su uzrok nestabilnosti mlazeva i njihove fragmentacije (atomizacije), pri nekom protoku  $V_{at}$ .

Kidanje simetričnih mlazeva šematski je prikazano na sl.7. U idealnim uslovima, kada nema spoljnih uticaja na formiranje talasa u mlazu, može se primeniti Rayleighev (Rejli) teorijski model stabilnosti mlaza. Kapi

su monodisperzne, a prečnik kapi ( $d_k$ ) i rastojanje između dve susedne kapi ( $l$ ) su:

$$d_k = 1.89 d_M, \quad l = 4.5 d_M \quad (11)$$



Sl.7. Formiranje kapi iz jednog otvora

gde  $d_M$  označava sednji prečnik mlaza tečnosti.

Realno ponašanje mlazeva tečnosti, snimljeno tehnikom brze fotografije i šematski prikazano na sl.7b i 7c, vrlo je blisko predviđanjima. Glavno odstupanje je u pojavi sitnih satelitskih kapi u osnovnoj populaciji uniformnih kapi.

Prečnici kapi, formiranih iz mlazeva tečnosti niskog viskoziteta, u disperzijama tečnosti u gasu, mogu se računati prema jedn.(8). Mlazevi tečnosti velikog viskoziteta daju pri dispergovanju u gasu krupnije kapi, čiji se srednji prečnici mogu predvideti korišćenjem Weber-ove jednačine:

$$d_k = 1.89 d_M \left[ 1 + \frac{3 \mu_L}{(\sigma \rho_k d_M g)^{0.5}} \right]^{1/6} \quad (12)$$

gde je  $\mu_L$ -viskozitet tečnosti.



Atomizacija predstavlja dezintegraciju mlaza u sitne kapi, neposredno iznad otvora cevi, i, po pravilu, dešava se samo pri dispergovanju mlaza tečnosti u gasu. Pretpostavlja se da je dominantni mehanizam formiranja kapi otkidanje ligamenata tečnosti sa površine mlaza i njihova dezintegracija u kapi. Kriterijum za prelaz iz oscilatornog režima u režim atomizacije je:

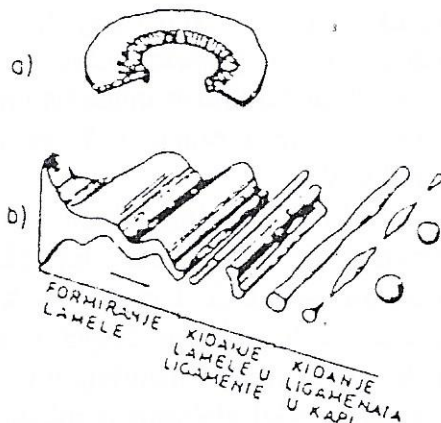
$$Re_{at} = \frac{d_M U_r \rho_k}{\mu_L} > 280 \left[ \frac{\mu_L}{\sigma \rho_L d_M g} \right]^{-0.82} \quad (13)$$

gde je  $U_r$ -relativna brzina mlaza tečnosti u odnosu na okolni gas, koja odgovara protoku  $V_{at}$ .

Dispergovanjem mlazeva tečnosti dobija se relativno uniformna populacija kapi, ugao raspršavanja mlaza je mali ( $5^\circ$ - $20^\circ$ ), a dubina prodiranja mlaza u masu kontinualne faze velika. Ovo je, ipak, malo korišćen metod dispergovanja; drugim metodama se mogu dobiti mnogo finije disperzije. Atomizacija mlazeva se poboljšava kada se obavlja pod pritiscima manjim od napona pare tečnosti i kada okolni gas protiče istostrujno sa mlazom tečnosti.

**Formiranje kapi iz lamela tečnosti.** Većina mlaznica za dispergovanje tečnosti u gasu radi na principu kidanja lamela tečnosti u elemente različitih oblika, koji se, zatim, kidaju u nizove kapi. Ovaj proces je šematski prikazan na sl.8.

Za razliku od mlaza, lamela tečnosti je stabilna. Dezintegracija nastupa po jednom od sledećih mehanizama:



Sl.8. Formiranje i kidanje lamela tečnosti

a) Ivica lamele tečnost skuplja se u cilindar, koji se zatim kida u kapi. Ovaj mehanizam je karakterističan za tečnosti malog površinskog napona.

b) Usled udara kapi ili pod uticajem turbulencije, stvaraju se otvori na lameli tečnosti, koji se brzo šire. Ivice otvora dobijaju oblik traka koje se kidaju u kapi (sl.8a).

c) Pri velikim brzinama okolnog gasa, lamela tečnosti se nabira i stvaraju se talasi koji dovode do dezintegracije, na način prikazan na sl.8b.

d) Pri vrlo velikim brzinama gasa, bregovi talasa formiranih po mehanizmu (c) otkidaju se sa površine lamele i dezintegrišu u sitne kapi. Ovaj mehanizam je analogan atomizaciji mlazeva tečnosti. Prečnici ovako

formiranih kapi mogu se izračunati prema jednačini:

$$d_k = 21.4 \left[ \frac{\mu_L (\sigma g / \rho_L)^{0.5}}{\rho_g U_R^2} \right]^{2/3} \quad (14)$$

koja važi pri relativnim brzinama tečnosti i gasa  $U_r > 180$  m/s.

Kada se formiraju kapi, tada u ukupnoj populaciji sve kapi imaju prečnik manji od izvesne maksimalne vrednosti, koja je poznata kao najveći stabilni prečnik kapi. Osnovni problem u analizi dezintegracije kapi je definisanje uslova pod kojima se kap dezintegriše. Najčešće korišćeni kriterijum stabilnosti je odnos aerodinamičkih sila i sila površinskog napona, poznat kao Weberov kriterijum:



$$We = \frac{U^2 \rho_g d_k}{\sigma} \quad (15)$$

gde je  $U$ -brzina kretanja kapi. Kritična vrednost Weberovog kriterijuma, koji određuje najveći stabilni prečnik kapi, jeste u intervalu  $4 < We_c < 20$ , u zavisnosti od vremena kontakta kapi sa okolnim gasom i od viskoziteta tečnosti.

Pri vrlo dugim vremenima kontakta ( $> 10$  s), kapi dezintegrišu pod uticajem sopstvenih vibracija, u dve veće i više sitnih čestica. Najveći stabilni prečnik kapi ima pod ovim uslovima minimalnu vrednost, koja odgovara  $We=4$ .

Pri kraćim vremenima kontakta, u disperziji se mogu održati kapi većih prečnika. Kritična vrednost Weberovog kriterijuma iznosi od  $We = 20$ , za vremena kontakta reda veličine milisekundi, do  $We=10$ .

Kapi tečnosti većeg viskoziteta imaju veću stabilnost, koja se ogleda u većim kritičnim vrednostima Weberovog kriterijuma. Uticaj viskoziteta na veličinu kapi predviđen je jednačinom:

$$We_c = We_{c0} + 14 \left[ \frac{\mu_L}{\sigma \rho_k d_{k,max}} \right]^{1.6} \quad (16)$$

u kojoj  $We_c$  označava kritičnu vrednost Weberovog kriterijuma viskozne tečnosti, a  $We_{c0}$  odgovarajuću vrednost za neviskoznu tečnost (4 do 20, u zavisnosti od vremena kontakta).

## 2.4. Mlaznice za dispergovanje tečnosti

Široka primena raspršavanja tečnosti kao metoda za ostvarivanje kontaktne površine između gasa i tečnosti dovela je do razvoja niza različitih vrsta mlaznica. Pri izboru mlaznica, najčešće se postavljaju neki od sledećih zahteva: fina i uniformna disperzija kapi, koja obezbeđuje veliku kontaktnu površinu; mala frakcija vrlo sitnih kapi, koja minimizuje odnošenje tečne faze strujom gasa; određeni ugao raspršavanja; mogućnost rada u širem intervalu protoka tečnosti; jednostavna konstrukcija i montaža mlaznice; niska potrošnja energije za raspršavanje; mogućnost rada sa zaprljanim tečnostima i suspenzijama, i otpornost na eroziju i koroziju, pogodnim izborom konstrukcionog materijala,

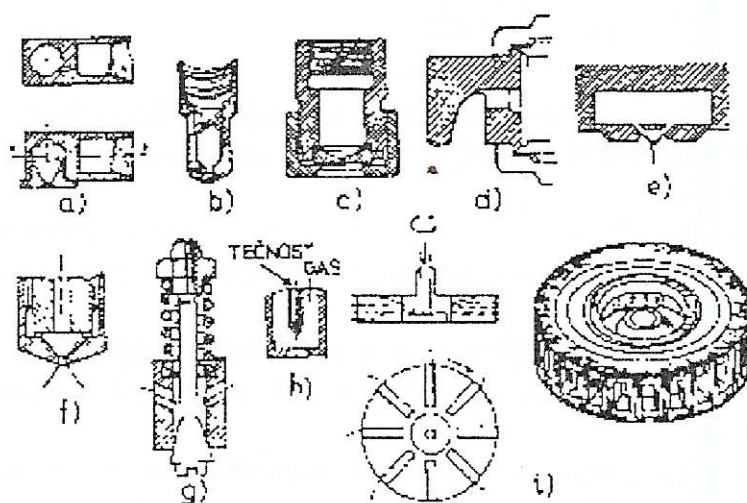
Većina zahteva se međusobno isključuju (na primer, mala potrošnja energije i dobijanje finih i uniformnih disperzija kapi). Danas se u industriji najviše koriste obične, dvofluidne i rotacione mlaznice, koje u najvećem broju slučajeva proizvode disperzije zahtevanih karakteristika. Noviji tipovi mlaznica, koji baziraju na korišćenju zvučne i ultrazvučne energije, imaju povoljne hidrodinamičke i energetske karakteristike, ali još uvek ne nalaze širu industrijsku primenu.

Pregled osnovnih karakteristika pojedinih vrsta mlaznica dat je u Tabeli IV, a odgovarajuća konstruktivna rešenja šematski su prikazana na sl.9.

Energetska efikasnost svih navedenih mlaznica je mala, pošto se dispergovanje tečnosti odvija u tri faze (formiranje mlazeva ili lamela tečnosti, fragmentacija ovih elemenata u kapi i atomizacija kapi) od kojih svaka zahteva velike smicajne napone. U odnosu na ostale delove opreme cena mlaznica je relativno niska.

**Obične mlaznice.** Izbor mlaznica za definisanje protoke tečnosti najčešće se vrši na osnovu podataka proizvođača. Ovi podaci su dati u obliku dijagrama kumulativne raspodele prečnika kapi (na primer, sl.10), za različite protoke tečnosti i padove pritiska u mlaznici.





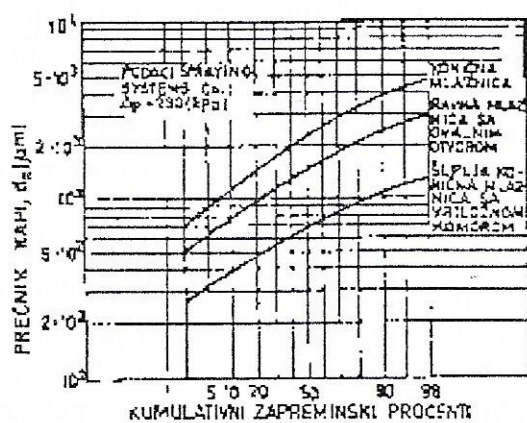
- a-konična sa vrtložnom komorom
- b-konična mlaznica
- c-ravna sa ovalnim otvorom
- d-ravna sa deflektorom
- e-ravna sa dva mlaza
- f-sa recirkulacijom
- g-sa umetkom
- h-dvofluidna
- i-rotaciona sa ožljebljenim diskom

Sl.9. Mlaznice za raspršivanje tečnosti

Pošto se podaci za mlaznice, po pravilu, odnose na dispergovanje vode u vazduhu, neophodna je korekcija u odnosu na fizičke karakteristike radne tečnosti. Srednji prečnik kapi u disperziji u tom slučaju je:

$$\frac{d_k}{d_{k,H_2O}} = \left[ \frac{\sigma_L}{\sigma_{H_2O}} \right]^{0.5} \left[ \frac{\mu_L}{\mu_{H_2O}} \right]^{0.2} \left[ \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_k} \right]^{0.3} \quad (17)$$

gde se indeks  $H_2O$  odnosi na vodu. Srednji prečnik kapi vode se određuje sa kumulativnog



Sl.10. Raspodela prečnika kapi za tri karakteristična tipa mlaznica

dijagrama raspodele prečnika (sl.10). Mlaznice daju disperzije tečnosti sa dosta širokim spektrom prečnika kapi. Pri izboru radne brzine gasa u uređajima sa suprotnostrujnim tokom gasa i tečnosti, mora se voditi računa o frakciji sitnih kapi koje će biti iznesene u struji gasa. Na primer, pri brzini gasa od 1.5 m/s, iz uređaja će biti iznesene kapi čiji je prečnik manji od 350  $\mu m$  ( $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_L = 1 \text{ cP}$ ), ukoliko se na vrhu radne zone ne postavi odvajач kapi. Iznošenje tečnosti zavisi od raspodele prečnika kapi i od brzine gasa, pošto se strujom gasa iznose sve kapi čija je brzina taloženja manja od brzine gasa. Za mlaznice sa šupljim konusom, iznošenje tečnosti dostiže i do 7.5 % od ukupnog protoka tečne faze.

**Dvofluidne mlaznice.** Pored standardnih dvofluidnih mlaznica, navedenih u tabeli IV, ovoj kategoriji pripadaju i neki drugi delovi opreme, od kojih je najvažniji Venturi skruber. Dispergovanje tečnosti u Venturi skruberima odvija se energijom gasa koji struji velikom brzinom (obično oko 100 m/s) kroz grlo skrubera. Formiranje kapi odvija se na složen način, koji predstavlja kombinaciju više opisanih mehanizama dispergovanja (otkidanje ligamenata od mlaza tečnosti, njihova fragmentacija u kapi i naknadna dezintegracija kapi tečnosti, usled turbulencije u struji gasa). Veličina kapi zavisi od velikog broja parametara i u literaturi postoji više empirijskih korelacija za izračunavanje srednjeg prečnika kapi, o čemu će biti reči kasnije.



**Rotacione mlaznice.** Dispergovanje tečnosti na rotacionim diskovima i sfernim kalotama prolazi kroz tri različita režima, u zavisnosti od protoka tečnosti. Pri malom protoku tečnosti, kapi se formiraju i otkidaju na samom rubu rotacione površine. Pri nešto većim protocima, sa ruba otiču mlazevi tečnosti. U normalnom radnom području visokih protoka, sa ruba diska ili sferne kalote otiče tečnost u obliku neprekidnog filma, koji se dezintegriše u kapi slično kao u mlaznicama sa šupljim konusom.

Srednja veličina kapi formiranih na rotacionim diskovima zavisi od protoka tečnosti  $L$ , periferne brzine diska  $U_p$  i ukupne dužine ruba diska  $l$  približno prema relaciji:

$$d_k \sim L^{0.24} / U_p^{0.83} l^{0.12} \quad (18)$$

Uticaj fizičkih karakteristika tečnosti i gasa na veličini kapi još uvek nije dovoljno ispitan. Verovatno je ova zavisnost slična jedn.(18) za obične mlaznice, sa nešto manje izraženim uticajima viskoziteta i površinskog napona.

**Tabela IV.** Pregled karakteristika najvažnijih tipova mlaznica za raspršavanje tečnosti

| Osnovne karakteristike                                                                     | Glavne prednosti                                                                                                                                                                  | Glavni nedostaci                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mlaznice sa vrtložnom komorom (sl.9a)                                                      |                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |
| Centrifugalno kretanje se ostvaruje tangencijalnim ulazom tečnosti iznad otvora mlaznice.  | Ne zagušuju se pri radu sa zaprljanim tečnostima i suspenzijama.                                                                                                                  |                                                                                            |
| Konične mlaznice (sl.9b)                                                                   |                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |
| Slične šupljim koničnim mlaznicama; u konusu je umetak koji poboljšava raspodelu tečnosti. | Ravnomernija raspodela kapi u zoni raspršavanja, u odnosu na šuplje konične mlaznice.                                                                                             | Krupnije kapi pri istim protocima i padovima pritiska, nego u šupljim koničnim mlaznicama. |
| Mlaznice sa ovalnim ili pravougaonim otvorom (sl.9c)                                       |                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |
| U mlaznici se formiraju dve struje tečnosti koja se sudaraju.                              |                                                                                                                                                                                   | Vrlo mali zazori u sklopu mlaznice.                                                        |
| Mlaznice sa deflektorom (sl.9d)                                                            |                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |
| Mlaz tečnosti iz kružnog otvora disperguje u kapi na zaobljenom deflektoru.                | Minimalna mogućnost zagušenja mlaznice.                                                                                                                                           | Daje krupne kapi.                                                                          |
| Mlaznica sa dva mlaza tečnosti (sl.9e)                                                     |                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |
| Dva mlaza tečnosti sudaraju se van mlaznice i formiraju ravan mlaz dispergovanih kapi.     | Mogućnost izolovanja dveju tečnosti sve do njihovog mešanja tokom dispergovanja. Može se formirati ravan mlaz kružnog oblika, kada se mlazevi sudaraju pod uglom od $180^\circ$ . |                                                                                            |
| Mlaznica sa recirkulacijom (sl.9f)                                                         |                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |
| Deo tečnosti recirkuliše posle prolaska kroz komoru mlaznice.                              | Ostvaruje se raspršavanje tečnosti, kao kod koničnih mlaznica, mogućnost promene protoka tečnosti u odnosu 50:1.                                                                  | Gubici energije na recirkulaciju. Dodatna cevna armatura za recirkulacioni tok.            |



| Mlaznica sa umetkom (sl.9g)                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                           |                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kapi se disperguju po koničnoj površini, pošto se tečnost kreće kroz anularni prostor oko umetka. Pri povećanju protoka tečnosti, umetak se pomera i povećava propusnu moć.                                                                    | Najjednostavnija regulacija protoka u širokim granicama.                                                                                                  | Teškoće pri podešavanju položaja umetka u mlaznici.                                           |
| Dvofluidne mlaznice (sl.9h)                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                           |                                                                                               |
| Tečnost protiče kroz centar mlaznice. Energiju za dispergovanje daje gas koji se kreće koaksijalno sa mlazom tečnosti.                                                                                                                         | Mogu se ostvariti velike brzine pri malim pritiscima. Protoci tečnosti mogu biti veliki, mogućnost zagušenja je minimalna.                                | Efikasnost je niža u odnosu na obične mlaznice, pošto se energija troši i na ubrzavanje gasa. |
| Rotacione mlaznice (sl.9i)                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                           |                                                                                               |
| Tečnost se dovodi na rotacionu površinu i raspršava se u obliku ravnomernog filma. Koriste se površine u obliku ravnih diskova, diskova sa kanalima i sfernih kalota. Kapi tečnosti izlaze pod uglom od $90^\circ$ , u odnosu na osu mlaznice. | Veličina kapi ne zavisi od protoka tečnosti, pa postoji mogućnost rada u širokom opsegu protoka. Pogodne za raspršavanje viskoznih tečnosti i suspenzija. | Složena konstrukcija rotacionog sistema. Radijalni izlaz kapi iz mlaznice.                    |

Za određivanje veličina kapi danas su podaci proizvođača najpouzdaniji način predviđanja raspodele veličina kapi, jer baziraju na savremenim eksperimentalnim tehnikama.

## 2.5. Stabilnost mehura i kapi

Disperzije kapi tečnosti u gasu imaju karakteristike dinamičkih sistema. Pošto se formiraju primarne kapi, u disperziji počinju da se odvijaju procesi fragmentacije i koalescencije koji dovode do promena prečnika čestica fluida i doprinose brzom obnavljanju međufazne površine. Raspodela prečnika čestica dispergovane faze neprekidno se menja i predstavlja rezultat uticaja fragmentacije i koalescenije na primarno formiranu disperziju faza.

Osnovni problem u analizi fragmentacije mehura i kapi svodi se na definisanje uslova pri kojima nastupa fragmentacija, a to znači na određivanje maksimalnog prečnika stabilne čestice fluida. Na čestice dispergovane faze deluju tri napona: smicajni napon ( $\propto \tau$ ), površinski napon ( $\propto \sigma/d$ ) i viskozni napon ( $\propto (\mu_d/d)(\tau/\rho_d)^{0.5}$ ). Za većinu realnih disperzija, viskozni napon je zanemarljivo mali u odnosu na smicajni površinski napon. Sile površinskog napona održavaju sferičnost kapi i sprečavaju njihovu dezintegraciju. Na ove sile se može uticati površinski aktivnim materijama. Dinamičke sile smicajnog napona, koje vode dispergovanju fluida, izazvane su potiskom ili strujanjem fluida pod uticajem viskoznih ili inercionih sila. Ukoliko dinamičke sile ne deluju ravnomerno po celoj površini čestice fluida, dolazi do deformisanja, a zatim i do fragmentacije formiranih mehura i kapi, kao posledica internih cirkulacija.

Ravnotežna veličina čestica dispergovane faze dostiže se kada odnos smicajnog i površinskog napona dostigne određenu vrednost. Ova vrednost, koja predstavlja karakteristiku uređaja, a verovatno i fizičkih osobina disperzije, definisana je ranije datim Weberovim kriterijumom.

Dezintegracija kapi može biti izazvana različitim uzrocima tako da se javlja više



različitih mehanizama dezintegracije, kao i relativno širok spektar maksimalnih stabilnih prečnika mehura i kapi.

**Dezintegracija kapi u nepokretnom fluidu.** Kada je kontinualna faza nepokretna, ili se vrlo sporo kreće (laminarna oblast) karakteristična su dva mehanizma dezintegracije. Pri dugim vremenima kontakta dispergovane i kontinualne faze, od presudnog uticaja su sopstvene vibracije čestica fluida koje vode nestabilnosti i fragmentaciji na dve ili više sitnijih čestica. Ovaj mehanizam je tipičan za krupne kapi tečnosti, a poznat je kao Rayleigh-Taylorova (Rejli-Tejlorova) nestabilnost.

Pri kratkim vremenima kontakta, kada nema dovoljno vremena za razvoj sopstvenih vibracija kapi, do fragmentacije dolazi, uglavnom, zbog deformisanja kapi. Kap se prvo spljošti u pravcu strujanja, zatim počne da osciluje i konačno se razbija u veliki broj vrlo sitnih kapljica.

Maksimalni stabilni prečnik kapi tečnosti, koje se kreću kroz nepokretan gas, može se približno izračunati prema jednačini:

$$d_{k,\max} \approx 4 \left[ \frac{\sigma}{\rho_k - \rho_g} \right] \quad (19)$$

koja važi i za većinu sistema tečno-tečno. Maksimalni stabilni prečnici kapi vode u vazduhu su oko 1 mm, kapi ugljentetrahlorida u vazduhu oko 0,36 mm, itd.

**Dezintegracija mehura i kapi u polju brzina fluida.** Delovanje gradijenata brzina, odnosno smicajnih napona, na površinu kapi smanjuje maksimalni stabilni prečnik čestica u disperziji. Sile površinskog napona u ovim uslovima ne mogu više da održe ravnotežu sa povećanim silama otpora; čestica fluida počinje da rotira, izdužuje se u traku i kida se u nekoliko velikih i više sitnih delića. Srednji zapreminski prečnik kapi u disperziji formiranoj na ovaj način određuje se prema jednačini:

$$d_k \approx \left[ \frac{136 \mu_L \sigma^{1.5} d_{k,0}^{0.5} g^{1.5}}{\rho_g^2 \rho_L^{0.5} U_R^4} \right]^{1/3} \quad (20)$$

gde je:  $d_{k,0}$  - početni prečnik kapi. Jednačina je primenljiva i na dezintegraciju kapi u nepokretnom gasu pri kratkim vremenima kontakta.

**Dezintegracija mehura i kapi u turbulentnom toku.** U uslovima razvijene turbulencije kontinualne faze, fragmentacija nastupa usled lokalnih promena pritiska izazvanih vrtloženjem fluida. Relacija koju je za kapi tečnosti izveo Hinze je:

$$d_{k,\max} \sim [\sigma g / \rho_g]^{3/5} e^{-2.5} \quad (21)$$

gde je:  $e$  - jedinična potrošnja snage u turbulentnom toku (srazmerna gradijentu pritiska). Jednačina pokazuje da maksimalni stabilni prečnik čestica dispergovane faze u ovim uslovima raste sa porastom površinskog napona i opada sa porastom stepena turbulencije kontinualne faze.

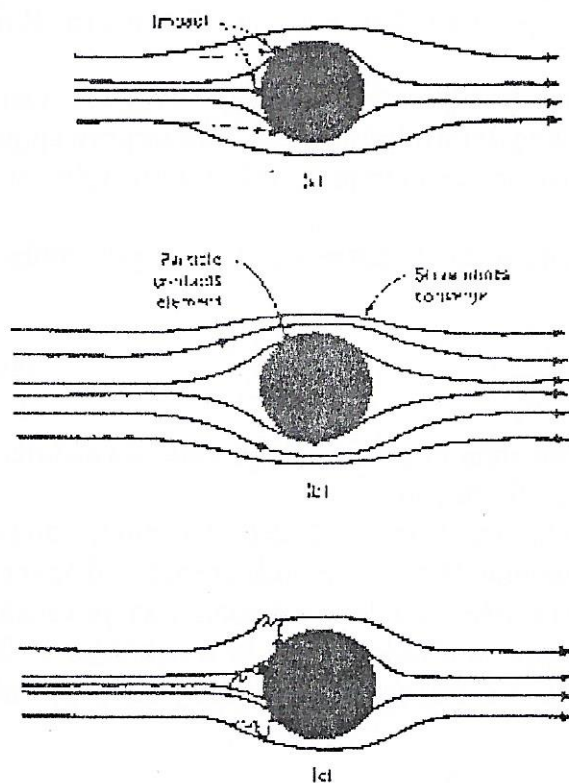
Ostali mehanizmi dezintegracije mehura i kapi su od manjeg značaja sa stanovišta primene disperzija faza, pa će ovde biti samo nabrojani: fragmentacija usled rezonancije, kada se sopstvena frekvencija oscilovanja uskladi sa frekvencijom vrtloga u kontinualnoj fazi; fragmentacija kapi usled sudara sa čvrstim površinama ili česticama i fragmentacija disperzija u jakom električnom polju.

Može reći da je fragmentacija kapi pojava koja još uvek nije dovoljno ispitana. Raspolaze se jedino navedenim semiempirijskim i empirijskim relacijama za približno određivanje maksimalnih stabilnih prečnika fluidnih čestica u disperzijama.



## 2.6. Mehanizam kolekcije

Mehanizmi izdvajanja čestica u skruberima su: inercioni sudari, zahvatanje čestica i difuzija, koji su šematski prikazani na sl.11. Pored ovoga, kao dodatni efekt javlja kondenzacija pare na česticama kao nukleusima. Mada se pri generisanju kapi stvaraju i izvesna



Sl.11. Tri mehanizma kolekcije čestica  
(a - inercioni sudari, b - direktni sudari, c - difuzija)

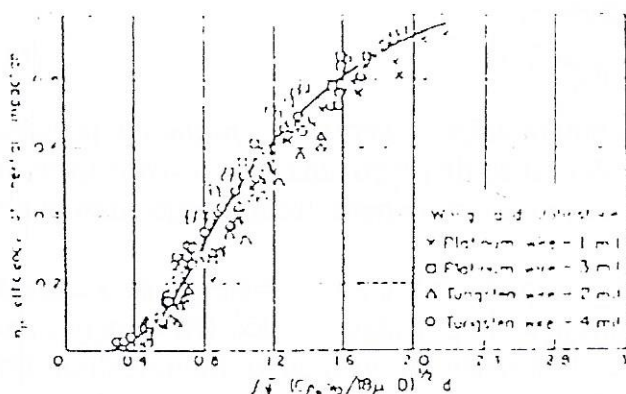
naelektrisanja na kapima, utvrđeno je da ona nemaju značajnijeg uticaja na kolekciju čestica. Od zanemarljivog značaja su i termičke sile, koje imaju uticaja samo pri vrlo visokim razlikama temperatura čestica i kapi tečnosti.

**a) Inercioni sudari.** U skruberu se gas kreće kroz raspršene kapi tečnosti. Kada snop strujnica gasa naidje na kapljicu, strujnice gasa divergiraju oko kapi. Čestice koje se nalaze u gasu imaju, zbog svoje veće mase, veću inerciju i zato manje skreću sa prvobitne putanje. Sa slike se vidi da će sve čestice iz gasnih strujnica na rastojanju manjem od neke vrednosti od ose kapi završiti svoj put na površini kapi tečnosti. Ovaj mehanizam izdvajanja čestica naziva se mehanizmom inercionih sudara.

Kada se postavi jednačina kretanja čestice i ona reši uz pretpostavku da je strujanje fluida oko čestice laminarno (u Stoksovoj oblasti), dolazi se do značajnog parametra za projektovanje skrubera, poznatog kao parametar inercionih sudara:

$$\psi = C \frac{\rho_p d^2 v_0}{18 \mu D} \quad (22)$$

gde je  $C$  - Kaningemov koeficijent,  $\rho_p$  - gustina čestice,  $d$  - prečnik čestice,  $v_0$  - brzina fluida u odnosu na kapljicu,  $\mu$  - viskozitet fluida i  $D$  - prečnik kapljice.



Sl.12. Eksperimentalna verifikacija mehanizma inercionih sudara

Efikasnost kolekcije čestica inercionim sudarima za sferične kapi (sl.11.) može se predstaviti jednačinama:

$$\begin{aligned} \eta_I &= 1 - e^{-\psi} \quad \text{..... za } \psi < 1 \\ \eta_{II} &= 1 - e^{-\sqrt{\psi}} \quad \text{..... za } \psi > 1 \end{aligned} \quad (23)$$

Eksperimentalna verifikacija jedn.(23) prikazana je na sl.12. za slučaj inercionih sudara sferičnih čestica sa žicom (cilindrom).

Pri proračunu parametra inercionih sudara  $\Psi$ , kao brzinu taloženja treba uzeti relativnu brzinu kapi u odnosu na gas, tj. razliku  $U_t - v_g$ .

**b) Zahvatanje čestica.** Zahvatanje čestica (na vlaknima filtera ili na kapima tečnosti u skruberu) nastaje kontaktom čestice i površine za kolekciju, kao rezultat veličine čestice, za razliku od inercionih sudara koji nastaju kao rezultat inercije, odnosno mase čestice.

Da bi čestica bila izdvojena ovim mehanizmom, ona mora proći pored površine za kolekciju na rastojanju manjem od sopstvenog poluprečnika. Jedino u tom slučaju će doći u kontakt sa površinom. Za razlikovanje ovog mehanizma od mehanizma inercionih sila postoji jednostavan kriterijum: ako bi čestica bila izdvojena i da su njene dimenzije zanemarljivo male (tačke mase), mehanizam izdvajanja je inercioni sudar.

Mehanizam zahvatanja čestica je po pravilu značajniji pri filtraciji, mada i u skruberima ima određenog uticaja na efikasnost kolekcije. Teorijska efikasnost izdvajanja čestica mehanizmom zahvatanja, na sferičnoj površini (što je najbolja aproksimacija za kap) iznosi:

$$\eta_c = (1 + R)^2 - \frac{1}{1 + R} \quad (24)$$

gde je  $R = d/D$  ( $d$  - prečnik čestice,  $D$  - prečnik kapi).

Kada čestice mogu biti izdvojene i inercionim sudarima i zahvatanjem, ukupna efikasnost se dobija prema jednačini:

$$\eta_{Ic} = 1 - (1 - \eta_c)(1 - \eta_I) \quad (25)$$

**c) Difuzija čestica.** Difuzioni sudari čestica sa kolekcionom prašinom rezultat su Braunovog kretanja čestica kroz fluid. Pošto Braunovo kretanje dolazi do izražaja samo kod čestica submikronskih razmera, ovaj mehanizam je zaista značajan samo pri uklanjanju veoma sitnih čestica, znači u filtrima, dok je u skruberima od drugorazrednog interesa. Čak i pri izdvajanju submikronskih čestica, vreme boravka gasa u skruberu je suviše kratko (brzina gasa je suviše visoka) da bi difuzioni efekti bili od značaja.



### 3. SKRUBERI

Skruberi, ili mokri odvajači, koriste efekte sakupljanja čestica na tečnim kapima raspršenim u struji gasa koja se prečišćava. Efekat je dobro poznat i često prisutan u prirodi, kao prečišćavanje atmosferskog vazduha posle kiše.

Široka primena skrubera u prečišćavanju gasova od prašine rezultat je njihove visoke efikasnosti pri uklanjanju sitnih čestica, relativno jednostavne konstrukcije i malih investicionih troškova, kao i velikih mogućnosti prilagođavanja uređaja potrebama specifičnih primena.

Mokri odvajači imaju niz prednosti, ali i nedostataka, u odnosu na suve kolektore (gravitacione komore, cikloni, filtri i elektrostatički precipitatori) o kojima se mora voditi računa pri izboru i projektovanju. Osnovne performanse suvih i mokrih odvajača, uporedno su prikazane u Tabeli V.

Tabela V. Prednosti i nedostaci suvih i mokrih prečistača

| Mokri odvajači (skruberi)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Suvi odvajači                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Prednosti:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mogućnost istovremenog odprašivanja i apsorpcije gasova</li> <li>2. Izdvajanje rastvorljivih supstanci i njihovo vraćanje u proces u obliku rastvora</li> <li>3. Istovremeno prečišćavanje i hlađenje vrelih gasova</li> <li>4. Korozivne i otrovne komponente se mogu izdvojiti i neutralisati</li> <li>5. Nema opasnosti od eksplozije, ako se primeni pogodna tečnost</li> <li>6. Uređaj je, po pravilu, manjih dimenzija od suvog prečistača</li> </ol> <b>Nedostaci:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rastvorene materije se moraju rekristalisati iz rastvora</li> <li>2. Nerastvorne materije treba odvojiti od tečne faze taloženjem ili filtracijom</li> <li>3. Problemi otpadnih voda</li> <li>4. Pojava pare u izlaznom gasu</li> <li>5. Izlazni gas je obično zasićen parom i sadrži sitne kapljice</li> <li>6. Submikronske čestice se teško vlaže, pa se teško i izdvajaju</li> <li>7. Problemi korozije</li> <li>8. Zimi se tečnost može zalediti</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Izdvaja se materijal u suvom stanju, što je značajno za neke produkte</li> <li>2. U većini slučajeva nema korozije</li> <li>3. Skladištenje (odlaganje) izdvojene prašine zahteva manji prostor</li> <li>4. Za opasne otpatke mogu se koristiti sagorivi filtri</li> <li>5. Čestice veće od 50 <math>\mu\text{m}</math> se izdvajaju sa visokom efikasnošću uz dug vek trajanja uređaja.</li> </ol><br><ol style="list-style-type: none"> <li>1. Higroskopni materijali grade naslage koje je teško istresti.</li> <li>2. Održavanje uređaja i odlaganje prašine može biti opasno.</li> <li>3. Visoke temperature mogu da ograniče izbor konstrukcionih materijala.</li> <li>4. Pojava vlage u gasu onemogućava primenu nekih uređaja.</li> <li>5. Skladištenje (odlaganje) izdvojene prašine može biti problem.</li> </ol> |

Skruber je uređaj vrlo pogodan za prečišćavanje gasova kada su ispunjeni svi ili većina sledećih uslova:

1. Proces dozvoljava kontakt gasa sa tečnom fazom
2. Tečnost od ispiranja gasa neće stvoriti sekundarni problem zagađivanja, tj. ne premeštamo zagađivanje iz gasne u tečnu fazu. Alternativno, ovaj problem se rešava prečišćavanjem vode.

3. Potrebno/poželjno je hladjenje gasa
4. Sagorljive/zapaljive čestice ili gasove treba tretirati sa minimalnim rizikom
5. Čestice su sitne (ispod 20  $\mu\text{m}$ )
6. Potrebna je visoka efikasnost prečišćavanja
7. Potrebno je istovremeno izdvajanje gasovitih komponentata

Izbor skrubera nije jednostavan zadatak. Ima puno faktora koje treba uvažavati pri izboru i uvek je dobra praksa činiti izbor na bazi literaturnih podataka i iskustava za slične procese i, po mogućnosti, na osnovu direktnog uvida u konkretna tehnološka rešenja za istu ili sličnu aplikaciju.

Faktori značajni za izbor skrubera mogu se podeliti na ekološke, inženjerske i ekonomske, kako je navedeno u Tabeli VI.

Tabela VI. Faktori značajni za izbor skrubera

| Ekološki                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Inženjerski                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ekonomski                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Lokacija postrojenja<br>2. Raspoloživi prostor<br>3. Okolni uslovi<br>4. Raspoloživost resursa (voda, energija, prostor)<br>5. Maksimalno dozvoljena izlazna koncentracija<br>6. Prisustvo vodene pare u izlaznom gasu (beo dim)<br>7. Buka (uglavnom od ventilatora visokog pritiska) | 1. Karakteristike prašine, magle ili<br>a. raspodela prečnika čestica<br>b. koncentracija<br>c. hemijska reaktivnost<br>d. fizičke i hemijske osobine (gustina, rastvorljivost, eksplozivnost, lepljivost itd.)<br>e. korozivnost i abrazivnost<br>f. toksičnost<br>2. Karakteristike gasa (temperatura, pritisak, vlažnost, sastav, količina)<br>3. Karakteristike tečnosti za ispiranje (gustina, viskozitet, korozivnost, stvaranje pene...)<br>4. Karakteristike skrubera<br>a. veličina i težina<br>b. kriva frakcione efikasnosti<br>c. pad pritiska<br>d. stabilnost i pouzdanost<br>e. metode odlaganja mulja | 1. Kapitalni troškovi<br>a. uređaj<br>b. instalacija<br>2. Operativni troškovi<br>a. redovni troškovi<br>b. održavanje<br>c. uštede (kad je proizvod koristan) ili troškovi deponovanja<br>3. Očekivani vek postrojenja<br>a. konstrukcioni materijali<br>b. uticaj promena kapaciteta gasa na efikasnost i pad pritiska<br>c. utrošci snage pored ventilatora<br>d. infrastruktura<br>e. ograničenja temperature<br>f. održavanje |

Za većinu skrubera je karakteristična jednostavna konstrukcija (nema pokretnih delova, sve je dostupno) omogućava primenu doslovno svih konstrukcionih materijala. Od onih koji se najčešće koriste, pomenimo nerđajući čelik, crni čelik obložen gumom i plastične materijale.

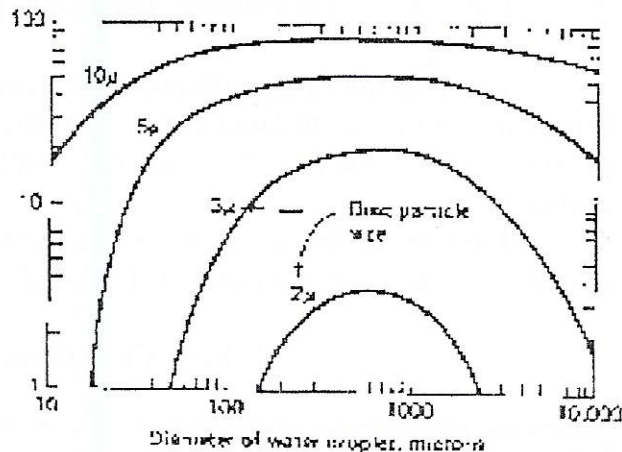
Generalno pravilo za atomizaciju skrubere je da treba pokušati da se koristi opseg 0.7-1 lit/ $\text{m}^3$ , pošto taj opseg obično daje dobru veličinu kapi, visoku efikasnost i prihvatljiv pad pritiska.



### 3.1. Komore sa raspršivanjem

Najjednostavniji tip skrubera su komore sa raspršivanjem. Kapljice tečnosti generišu se uz pomoć mlaznica i padaju na niže kroz struju zaprljanog gasa. Da kapljice tečnosti ne bi bile iznete iz uređaja, njihova veličina mora biti dovoljno velika da njihova brzina padanja bude veća od brzine gasa. U praksi, brzina gasa u komori se kreće u granicama od 0,6 do 1,2 m/s. U slučaju vode, kapi manje od 1 mm su približno sferične, pa se njihova brzina taloženja (padanja) može izračunati na bazi napred datih relacija.

Budući da je veličina kapljica tečnosti u komorama sa raspršivanjem u granicama 0,1-1 mm, čestice koje bivaju zahvaćene ovim kapima su relativno velike, a dominantan mehanizam zahvatanja je mehanizam inercionih sudara. Na sl.13. prikazana je zavisnost efikasnosti zahvatanja od prečnika kapljica za različite veličine čestica prašine. Može se uočiti da se maksimalna efikasnost postiže sa kapljicama veličine oko 800  $\mu\text{m}$ . Položaj maksimuma ne zavisi od veličine čestica prašine. Za ove skrubere najpogodnije je koristiti grube mlaznice koje

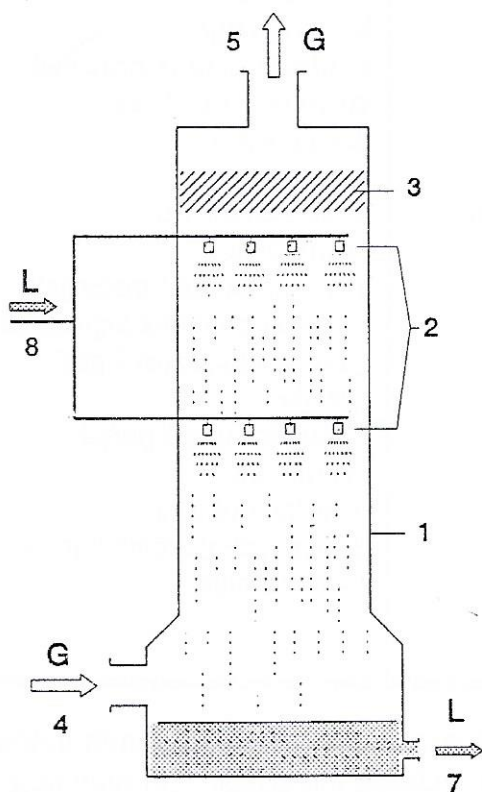


Sl.13. Optimalna veličina kapi koje padaju u gravitacionom polju za zahvatanje čestica mehanizmom inercionih sudara

daju kapi nešto ispod 1 mm. Kao najpogodnije preporučuju se impakcione mlaznice, jer su najmanje osetljive na eventualno zagušivanje česticama. To je naročito značajno u slučaju da se deo tečnosti za pranje (skrubiranje) recirkuliše.

Kapi vode (najčešće korišćena tečnost za ispiranje gasova) prečnika 0,8 mm (800 mikrona) talože se u vazduhu relativnom brzinom većom od 3 m/s, a kapi prečnika 0,4 mm brzinom 1,58 m/s. Stoga su za raspršavanje tečnosti u ovom tipu skrubera najpogodnije mlaznice koje proizvode krupne kapi, prečnika nešto manjeg od 1 mm. Ove zahteve najbolje zadovoljavaju mlaznice u kojima se tečnost raspršava udarom mlaza o čvrstu površinu.

Na sl.14. prikazana je šematski vertikalna komora sa raspršivanjem (sprej komora). Mlaznice mogu biti postavljene normalno na pravac strujanja gasa (kao što je slučaj na sl.14.) ili po obodu komore, kada imamo "suprotnostrujni" kontakt ili na zidovima komore, kada imamo "unakrsni" kontakt. Horizontalne komore (sl.15.) obezbeđuju unakrsni kontakt gasa i tečnosti. U oba slučaja se preporučuje ugradnja odvajača kapi, da bi se sprečilo izbacivanje kapljica u atmosferu. Jedna od konstrukcionih varijanti kod horizontalnih komora sastoji se u ugradnji vertikalnih pregrada (inercionih odvajača) koje služe za odvajanje kapljica iz gasnog toka (sl.16.). Na ovaj način

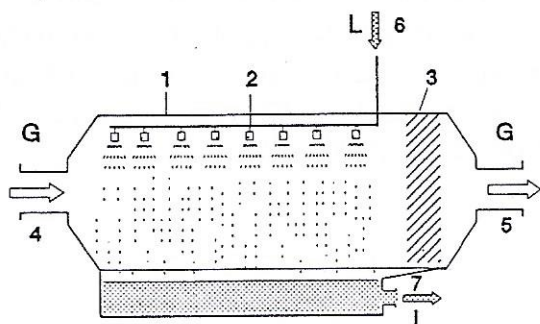


Sl.14. Vertikalna komora sa raspršivanjem ("suprotnostrujni" tok)

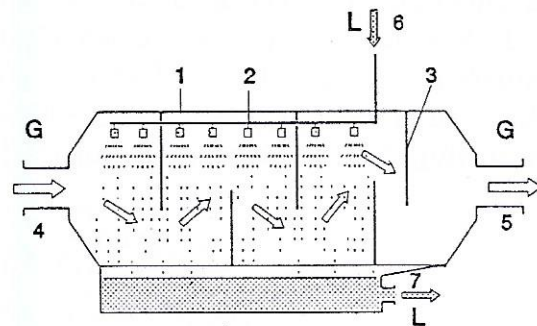
(inercionih odvajača) koje služe za odvajanje kapljica iz gasnog toka (sl.16.). Na ovaj način



obebeđen je stepenast kontakt, budući da je u svakom segmentu (stepenu) ulazna koncentracija čestica manja. Na sl.17. prikazana je korelacija izmedju izlazne koncentracije čestica ( $\text{g}/\text{Nm}^3$ ) i specifične potrošnje vode ( $\text{l}/\text{Nm}^3$ ) za komore sa raspršivanjem. Ovaj dijagram i sl.13. koriste



Sl.15. Horizontalna komora sa raspršivanjem ("unakrsni tok")



Sl.16. Horizontalna komora sa raspršivanjem i inercionim pregradama

se za procenu efikasnosti ovog tipa skrubera. Potreban broj mlaznica određuje se na taj način što se za određenu efikasnost izdvajanja grafički odredi specifična potrošnja vode, a iz poznatog protoka gasa i ukupna potrošnja vode. Na osnovu pritiska i potrošnje vode određuje se potreban broj mlaznica.

Efikasnost kolekcije u koloni sa raspršavanjem može da se predstavi u funkciji broja prenosnih jedinica  $N_t$ :

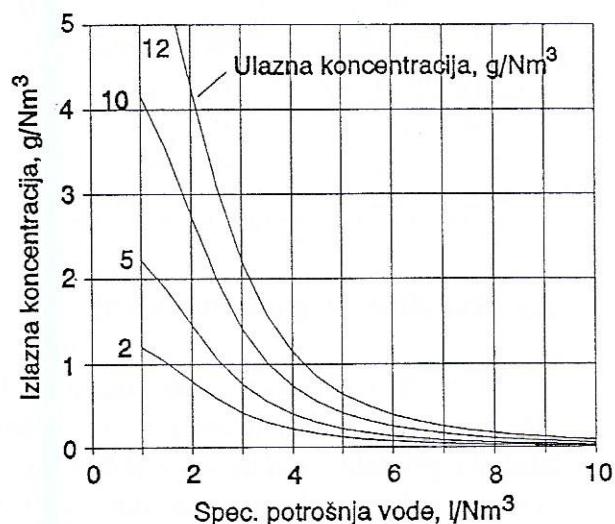
$$\eta = 1 - e^{-N_t} \quad (26)$$

a broj prenosnih jedinica  $N_t$  se, primenom teorije inercionih sudara računa kao:

$$N_t = \frac{3v_g t \eta_L}{2D} \cdot \frac{L}{G} \quad (27)$$

gde je  $L$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) - protok tečnosti,  $G$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) - protok gasa,  $v_g$  ( $\text{m/s}$ ) - brzina gasa u odnosu na skruber,  $t$  (s) - vreme boravka kapi u skruberu ( $=z/v_d$ ;  $v_d = U_t - v_g$ ),  $z$  (m) - visina kolone,  $v_d$  ( $\text{m/s}$ ) - brzina kapi u odnosu na skruber i  $D$  (m) - prečnik kapi.

U slučaju da se skruber koristi i za hladjenje gasova, potrebno je voditi računa da se prečnik kapljice tokom boravka u komori smanjuje usled isparavanja vode, što ima uticaja na efikasnost izdvajanja čestica.



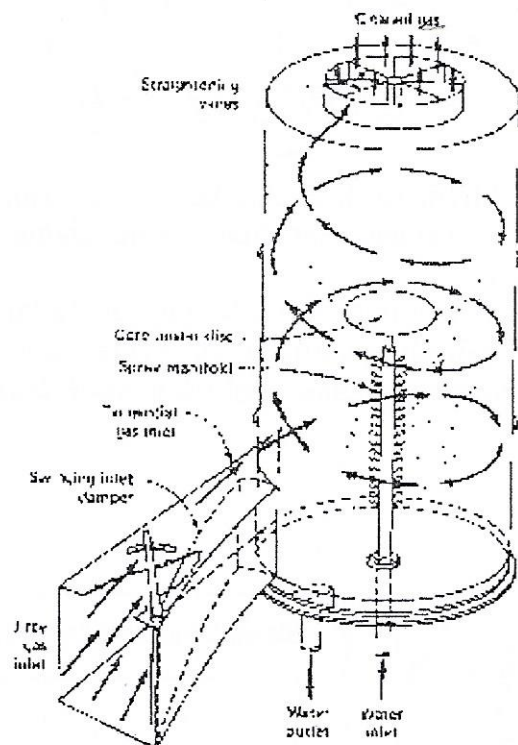
Sl.17. Korelacija efikasnost-specifična potrošnja vode za komore sa raspršivanjem

### 3.2. Centrifugalni skruberi

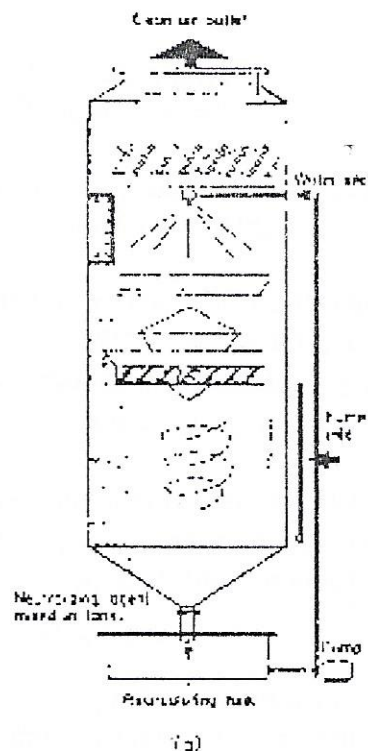
Efikasnost izdvajanja čestica manjih od onih koje se mogu izdvojiti u običnim komorama sa raspršivanjem može se povećati povećanjem relativne brzine izmedju kapljica i gasne struje. Sila na kapljice tečnosti može se povećati korišćenjem centrifugalne sile rotirajuće gasne struje. Na taj način se povećava učestanost inercionih sudara. Na primer, ako gas rotira sa



tangencijalnom brzinom od 17 m/s na radijusu od 0,3 m, centrifugalna sila na česticu koja sledi putanju gasa je 100 g. Efikasnost ovih skrubera kreće se do 97% za čestice veće od  $1\ \mu\text{m}$ . Komercijalno se realizuju dva tipa centrifugalnih skrubera, radijalni i aksijalni. Kod radijalnog skrubera (sl.18.) gasna struja se uvodi tangencijalno u cilindričnu komoru sa ulaznom brzinom od 15-60 m/s. Tečnost se raspršuje pomoću mlaznica koje su postavljene na distributivnoj cevi smeštenoj u osi komore. Kod aksijalnog skrubera (sl.19.) gas se uvodi direktno u cilindričnu komoru, a rotacija gasa se obezbeđuje preko usmerivača (statora) fiksiranih u komori. Oba tipa centrifugalnih skrubera realizuju se za kapacitete od 10 do 1000  $\text{m}^3/\text{min}$ .



Sl.18. Centrifugalni skruber (radijalni)

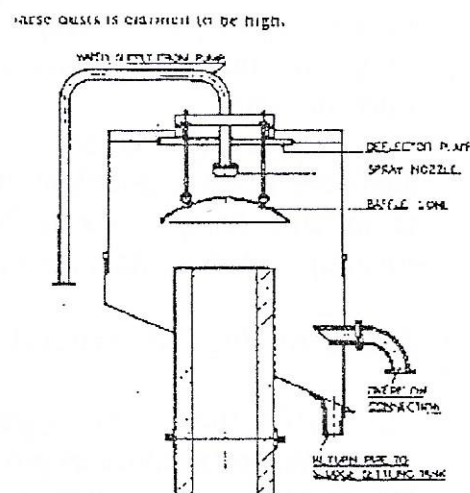


Sl.19. Centrifugalni skruber (aksijalni)

### 3.3. Skruberi sa samousisavanjem

Kod ovih skrubera kapljice tečnosti koje prečišćavaju gas se formiraju pomoću gasne struje koja penetrira na pogodan način kroz tečnost dezintegrišući lamele tečnosti u kapi. Najjednostavniji uređaj ove vrste, koji se često primenjuje kod kupolnih peći (sl.20.), dovodi vodu na disk koničnog oblika koji formira anularnu lamelu tečnosti. Gasovi iz peći prekidaju ovu lamelu u kapljice. Ovaj sistem ima mali pad pritiska (manji od 6 mm vodenog stuba), pa tako ne zahtevaju dopunske ventilatore. Sličan princip je primenjen i kod skrubera Rotoclone. Na sl.21. prikazan je segment uređaja koji ilustruje mehanizam mformiranja kapljica, dok je na sl.22. prikazana jedna od konstrukcija uređaja. Na sl.23. prikazan je princip raspršivanja kod skrubera Doyle, dok je jedna od konstrukcija uređaja prikazana na slici 24.

Ovakvi uređaji se često koriste u metalurgiji za



Sl.20. Skruber za kupolne peći



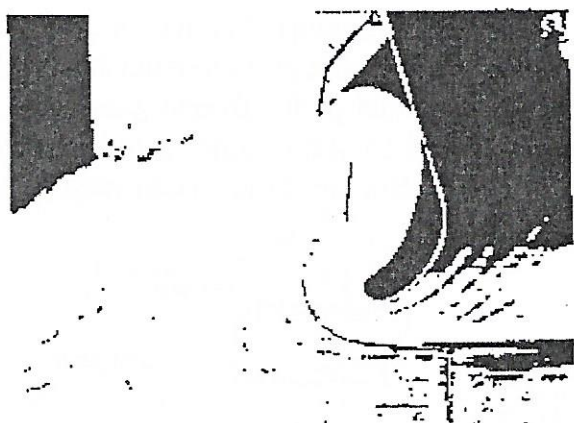
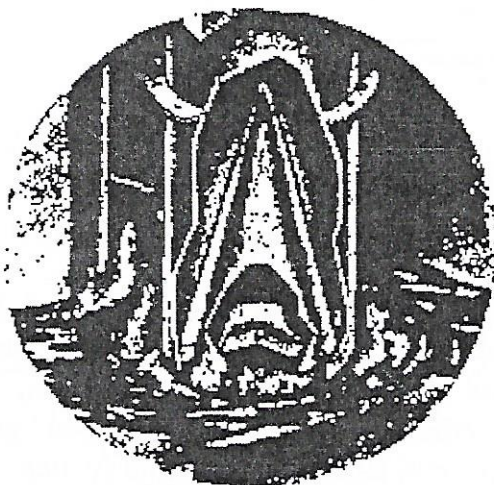


Fig. 12.13. Action of a self-induced spray scrubber (Rotoclone No. 12)

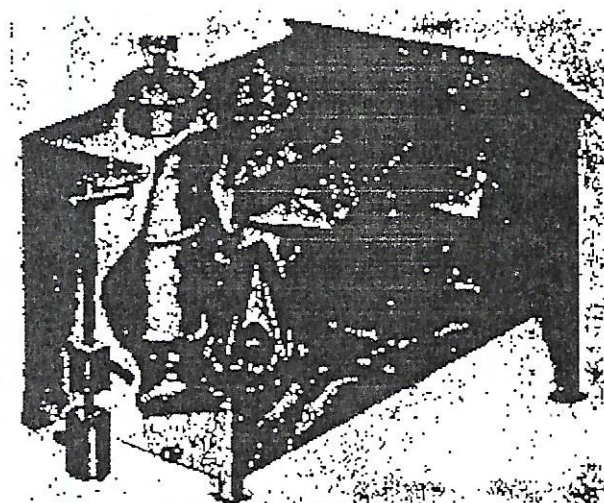
SI.21. Generisanje spreja (skruber Rotoclone)



SI.22. Skruber Rotoclone



SI.23. Generisanje spreja (skruber Doyle)



SI.24. Skruber Doyle

prašine i lepljive materijale, kao i za uklanjanje eksplozivnih prašina. Za rad uređaja potrebna je snaga od 0,05 do 0,08 kW po  $1 \text{ m}^3/\text{min}$  gasa koji se obrađuje. Utrošak vode čini samo isparena voda i iznete kapljice iz uređaja, pri čemu treba imati u vidu periodično obnavljanje. Ukoliko temperatura gasa dozvoljava, postrojenje može biti izradjeno od PVC-a, čime se problemi korozije eliminišu. Čestice izdvojene iz gasnog toka padaju sa kapljicama u rezervoar i u njemu se talože. Istaloženi mulj iz rezervoara može se kontinualno izvlačiti ejektorom ili prebacivati muljnom pumpom u centralnu deponiju. Efikasnost ovih skrubera se kreće od 90-99.5%, zavisno od područja primene, odnosno zavisno od karakterističnih čestica za pojedine industrije.

### 3.4. Skruberi sa dodirnim platformama i pakovanim slojem

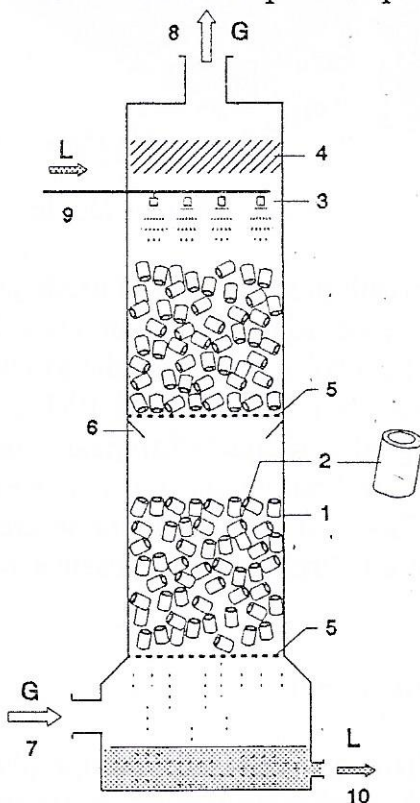
Skruberi sa dodirnim platformama. Ukoliko zaprljani gas nailazi na seriju platformi na kojima je formirana lamela tečnosti koju gas dezintegriše svojim prolaskom, može se očekivati veća efikasnost izdvajanja jako sitnih čestica, u odnosu na skrubere sa samousisavanjem iz



prethodne tačke. Međutim, pad pritiska u ovakvim sistemima je veći. Projektovanje uređaja sa ovakvim načinom kontakta išlo je u dva pravca: modifikacija kolona sa podovima i korišćenje kolona sa pakovanim slojem. Kolone sa podovima slične su kolonama za destilaciju s tim što se koriste oko 5 puta veće brzine gasa kroz otvore na podu. Brzina gasa kroz jedan otvor kreće se od 4,5 do 6 m/s. Preko poda se sliva tečnost za skrubiranje, a relativno velika brzina gasa prouzrokuje da se na otvoru formira mlaz koji čini smeša gas (koji nosi čestice) - tečnost. Iznad otvora se nalaze specijalne prepreke, u koje ovakav mlaz udara, a kao posledica javlja se kolekcija čestica u tečnosti koja se sliva. Za maksimalnu efikasnost preporučuje se da je vazduh zasićen vodenom parom, što se najčešće postiže injektiranjem pare u ulaznu gasnu struju. Na sl.25. prikazana je jedna od mnogobrojnih konstrukcija.

### Skruberi sa pakovanim slojem

Zbog relativno velikog pada pritiska i mogućnosti zagušivanja, klasični pakovani slojevi sa punjenjem realativno malih dimenzija (ispod oko 10 mm) se retko koriste za izdvajanje čestica, mada su relativno često prisutni plitki pakovani slojevi za eliminaciju sitnih ponesenih kapljica iz nekog uređaja za skrubiranje. Ponekad se koriste klasične kolone sa punjenjem, koje su vrlo efikasne kako za apsorpciju gasovitih komponenti tako i za uklanjanje čestica. Tipična konstrukcija kolone sa punjenjem, prikazana je na sl.26., dok su na sl.27. prikazana tipična punjenja.



Sl.26. Kolona sa punjenjem

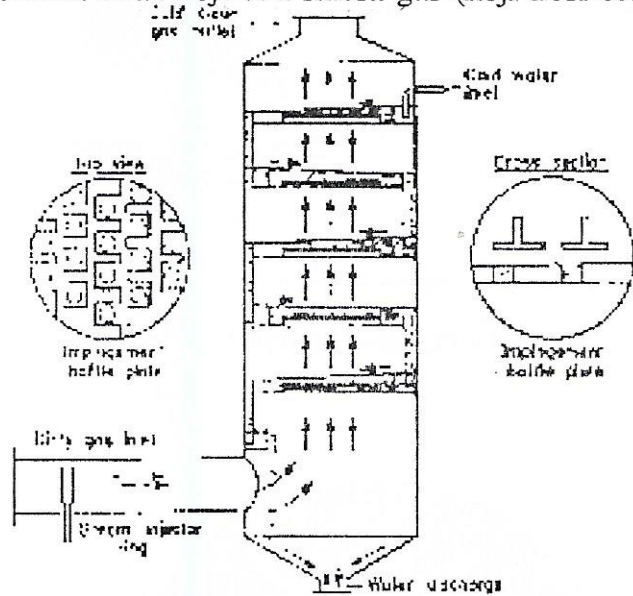
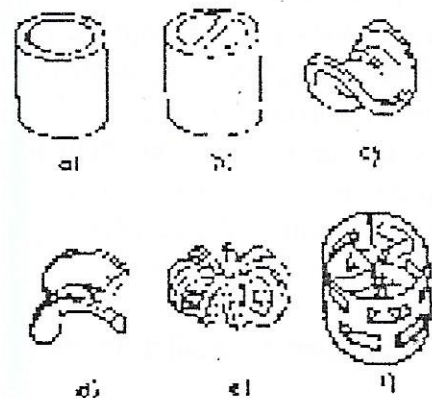


Fig. 9.17. Impingement plate scrubber (Peabody) 1988

Sl.25. Skruber sa dodirnim platformama

Tipična konstrukcija kolone sa punjenjem, prikazana je na sl.26., dok su na sl.27. prikazana tipična punjenja.



Sl.27. Punjenja za kolonu (a-Rašigovi prsenovi, b-Berlova sedla, c-Intalox sedla, d-Telerete, e-Rašigovi prstenovi, f-Telerete)

Kao punjenje se koriste krupni komadi, dimenzija najčešće 2" (5 cm).

U novije vreme se kao punjenje koriste krupne sfere dovoljno teške (gustina iznad cca 1500 kg/m<sup>3</sup>) da ne ekspanduje ni u uslovima plavljenja sloja. Fizički, kontakt gasa i tečnosti odvija se suprotno-strujno, u sloju punjenja poplavljenom tečnošću (sl.28.). Ovi uređaji su dobili široku primenu pre svega zato što se istovremeno mogu izdvajati čestice i gasoviti sastojci iz gasnog toka.

Leva, Ergun i Epstein su razvili korelaciju za pad pritiska u poplavljenom pakovanom sloju:

$$\frac{\Delta p}{z} = 1.75 \cdot 10^4 \frac{C_f G^2}{g \rho_G} \exp \left[ \beta \left( \frac{L}{G} \right) G^2 \right] \quad (28)$$

gde je  $\Delta p/z$  (Pa/m) - pad pritiska po jedinici visine sloja,  $G$  (kg/m<sup>2</sup>h) - fluks mase gasa,  $C_f = 6(1 - \epsilon)/\epsilon^3 d_g$ ,  $\epsilon$  - poroznost,  $d_g$  (m) - prečnik sferičnog punjenja,  $\beta$  - konstanta punjenja, za staklene sfere je  $0.47 \cdot 10^{-8}$ .

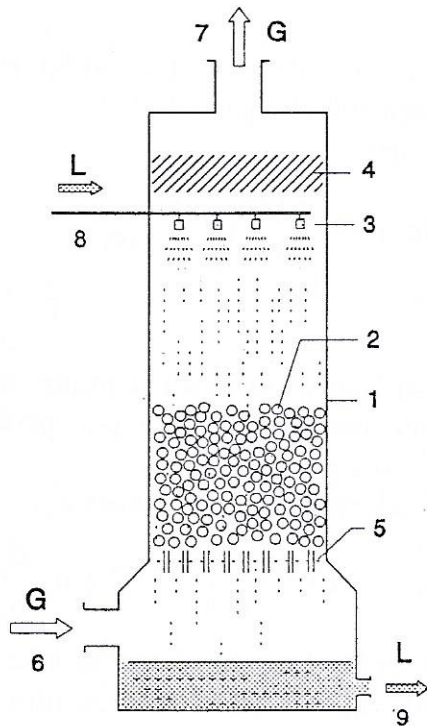
Pad pritiska u turbulizovanom sloju tečnosti iznad punjenja je:

$$\Delta p = 187 + 306 H_t \quad (29)$$

gde je  $H_t$  (m) - visina sloja tečnosti iznad punjenja koje se može odrediti iz korelacije (Lowry i Van Winkle):

$$H_t = 0.34 + 2.46 \cdot 10^{-6} \left( \frac{G}{\rho_G} \right)^2 \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \quad (30)$$

Sl.28. Skrubler sa pakovanim slojem krupnih sfera



Ukupni pad pritiska je zbir padova pritiska u sloju punjenja i sloju tečnosti iznad punjenja.

Efikasnost kolekcije čestica prečnika  $d_p$  može se izračunati iz efikasnosti kolekcije u sloju punjenja i sloju tečnosti iznad punjenja:

$$\eta(d_p) = 1 - [1 - \eta_G(d_p)][1 - \eta_{TL}(d_p)] \quad (31)$$

gde je  $\eta_G(d_p)$  - efikasnost kolekcije čestica prečnika  $d_p$  u sloju punjenja,  $\eta_{TL}(d_p)$  - efikasnost kolekcije čestica prečnika  $d_p$  u sloju tečnosti iznad punjenja.

Ove parcijalne efikasnosti odredjuju se iz sledećih jednačina:

$$\eta_G(d_p) = 1 - \exp \left( -1.49 \frac{L}{G} \Psi \frac{H_g}{d_g} \right) \quad (32)$$

gde je  $\Psi$  - parametar inercionih sudara, koji je za ovaj mehanizam kolekcije:

$$\Psi = 1.39 \cdot 10^{-9} \frac{G \rho_p (d_{pi})^2}{g \rho_G \mu_G d_g} \quad (33)$$

gde je  $d_{pi}$  - prečnik čestica i-te frakcije,  $H_g$  - visina sloja punjenja.

$$\eta_{TL}(d_p) = 1 - \exp \left( -6.3 F^2 \Psi \frac{H_t}{d_g} \right) \quad (34)$$

gde je  $F$  - specifična težina sloja turbulizovane tečnosti (relativna u odnosu na H<sub>2</sub>O) i  $H_t$  -



visina sloja turbulizovane tečnosti.

Ukoliko skruber sa slojem punjenja radi kao dvostepena jedinica, što je dosta čest slučaj, ukupna efikasnost se računa na uobičajeni način, iz efikasnosti dva stupnja.

### 3.5. Skruberi sa fluidizovanim slojem

Imaju iste prednosti kao i skruberi sa slojem punjenja, ali i dve dodatne karakteristike: kapacitet gasa je značajno veći i ne dolazi do blokiranja sloja (plavljenja) (sl.29.).

Pad pritiska se može odrediti iz Epstein-ove korelacije:

$$\Delta P_{MB}(Pa) = 1.67 \cdot 10^{-7} \frac{n_s H_{ps} G^2}{d_p} \exp \left[ 3.76 \cdot 10^{-2} \left( \frac{L}{G} \right)^{0.9} G^{1.7} \right] \quad (35)$$

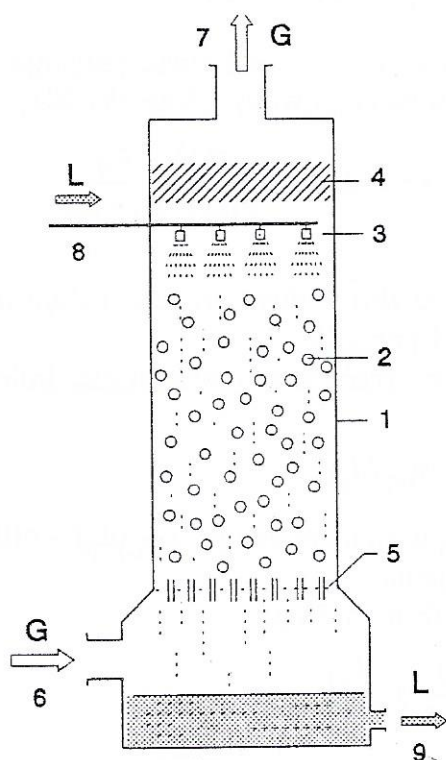
$$\Delta P_D(Pa) = 6.9 \cdot 10^{-6} G^2$$

gde je  $\Delta P_{MB}$  - pad pritiska u fluidizovanom sloju,  $n_s$  - broj stepeni sa fluidizacionim slojem,  $H_{ps}$  - statička visina sloja u svakom stepenu,  $d_p$  - prečnik punjenja,  $\Delta P_D$  - pad pritiska u odvajaju kapi (ako je ugrađen), tipično iznosi do 15% od  $\Delta P_{MB}$ .

Efikasnost kolekcije čestica prečnika  $d_p$ :

$$\eta(d_p) = 1 - \exp \left[ 1.16 \cdot 10^{-16} \left( \frac{L}{G} \right)^{3.3} G^{3.66} \psi n_s \frac{H_{ps}}{d_{ps}} \right] \quad (36)$$

Kao punjenje za fluidizaciju koriste se lake šuplje sfere (gustine oko  $300 \text{ kg/m}^3$ ) veličine 10-30 mm. Kako su sfere lake, pad pritiska je mali. Sa druge strane, velike sfere zahtevaju veliku brzinu gasa za fluidizaciju, pa je kapacitet ovakvih urejaja vrlo visok.



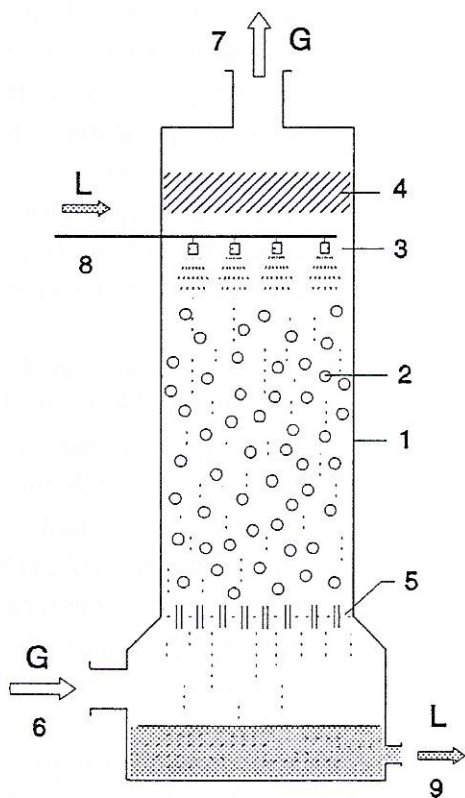
Sl.29. Skruber sa fluidizovanim slojem lakih sfera ("turbulent bed contactor")

### 3.6. Skruberi sa plivajućim slojem

Ovaj sistem, u odnosu na skrubere sa pakovanim i fluidizovanim slojem, modifikovan je na taj način što se punjenje od lakih sfera smešta između dve mreže (sl.30.). Punjenje ima tendenciju da "pliva" u gasu koji struji nasuprot. Mehanizam kolekcije je sličan okolini sa dodirnim površinama, zbog toga što se mali mlazovi formiraju između sfera, a potom se sudaraju sa susednom sferom. Pseudo fluidizovano stanje sprečava zagušivanje, tako da se ovaj tip može, takodje, koristiti za eliminaciju velikih koncentracija lepljivih čestica. Pad pritiska u ovakvim skruberima je oko 30 mmVS, a efikasnost je slična skruberima sa pakovanim slojem.

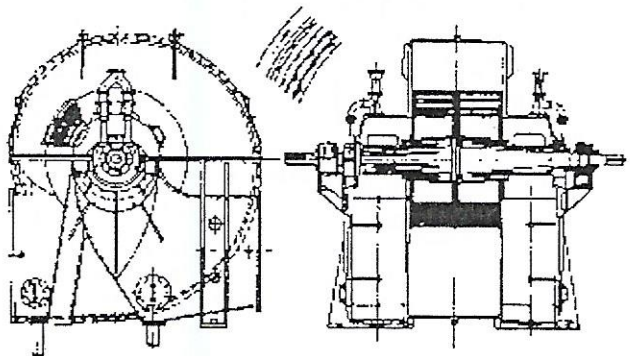
### 3.7. Dezintegracioni skruberi

Skruberi o kojima je do sada bilo reči koriste se, uglavnom, za čestice veće od  $1\ \mu\text{m}$ . Za kolekciju sub-mikronskih čestica neophodno je stvoriti disperziju vrlo



Sl.30. Skruber sa plivajućim slojem

reated. The separator is very effective, removing 90 per cent of the 1 micron



Sl.31. Dezintegracioni skruber

finih kapljica zbog toga da se ostvari mala vrednost parametra inercionih sudara, sa jedne strane, kao i da se razvije površina da bi se pospešio mehanizam difuzije, sa druge strane.

Jedan od načina da se ovo postigne (sl.31.) je da se tečnost za skrubiranje dezintegriše proticanjem između statora i vrlo brzog rotora, uz istovremeno proticanje zaprljanog gasa kroz sistem. Princip je sličan radu rotacionih mlaznica. U uređaju se ostvaruje vrlo velika relativna brzina između kapljica i gasa, od 60-90 m/s. Krupne čestice (posebno iznad  $10\ \mu\text{m}$ ) imaju tendenciju da eroziraju sistem, pa se preporučuje ugradnja pred-skrubera za eliminaciju krupnijih čestica i ulazna koncentracija čestica svede na oko  $1\ \text{g}/\text{m}^3$ . Potrošnja snage u ovakvim uređajima je visoka, 0,3-0,5 kW/(m<sup>3</sup>/min). Efikasnost je oko 90% za čestice od  $1\ \mu\text{m}$ , a oko 70% za čestice od  $0,5\ \mu\text{m}$ .

### 3.8. Venturi skruberi

U Venturi skruberu, visoka brzina gasa dovodi do dezintegracije mlazeva tečnosti u kapi. Utrošena energija je stoga najvećim delom sadržana u padu pritiska gasa u skruberu, a malim delom u energiji potrebnoj za rasprskavanje tečnosti. Dva tipa Venturi skrubera šematski su prikazana na sl.32.: a - za tangencijalnim uvedenjem gasa u separator čestica i b - sa turbinskim odvajanjem kapljica.

Uređaj se sastoji od dva osnovna dela: grla skrubera i separatora kapi. Grlo skrubera je kružnog ili pravougaonog preseka i ima karakterističan profil Venturi cevi. Ispred najužeg dela (vena contracta) postavljen je venac mlaznica kroz koje se dovodi tečnost. Gas ulazi bočno, velikom brzinom, i smicajnim silama proizvodi kapi koje nosi kroz grlo skrubera ka separatoru kapi. Separator kapi je sud u kome se gravitacionim ili, češće, centrifugalnim silama kapljice na kojima su se izdvojile čestice prašine odvajaju iz gasne struje.

Efikasnosti kolekcije čestica u Venturi skruberu doprinose i kondenzacioni efekti. Ako je gas u oblasti visokih brzina, odnosno niskih pritisaka (u samom grlu), zasićen vodenom parom, u oblasti većih pritisaka, odnosno manjih brzina (u difuzoru), dolazi do kondenzacije



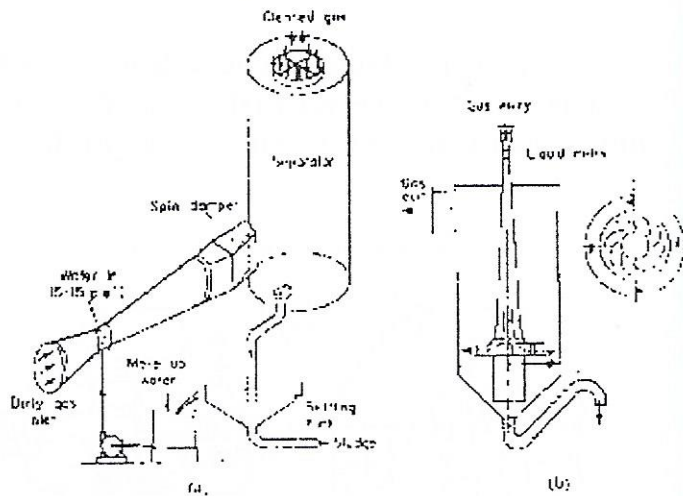


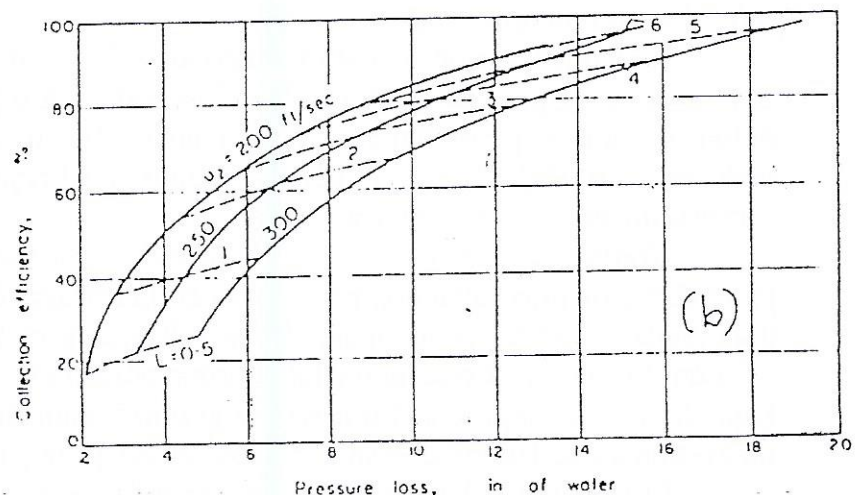
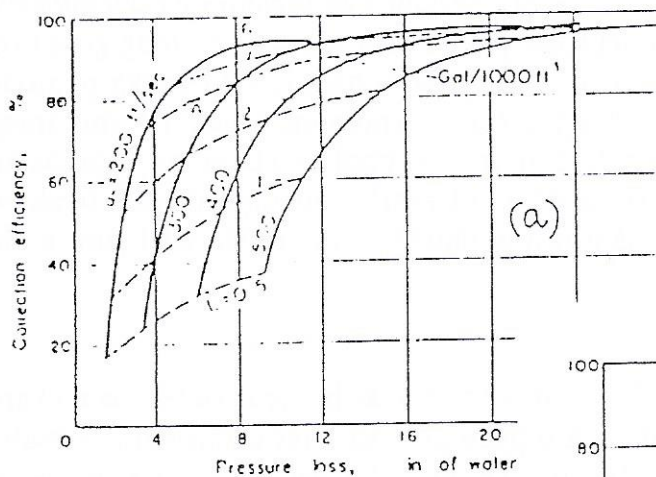
FIG. 32. Pease-Anthony type venturi scrubbers:  
(a) Tangential entry to separating chamber; (b) Turbine entry to separating chamber.

Sl.32. Venturi skruberi (tip Pease-Anthony)  
(a - tangencijalni, b - turbinski)

na česticama koje se ponašaju kao nukleusi. Čestice na ovaj način povećavaju dimenzije, a njihova ovlažena površina olakšava aglomeraciju, što sve vodi povećanju efikasnosti kolekcije.

Venturi skruber je patentiran 1925. godine, prvi put komercijalno primenjen 20 godina kasnije, a danas se izuzetno mnogo koristi za izdvajanje čestica i apsorpciju gasova u hemijskoj i metalurškoj industriji.

Na sl.33. prikazane su karakteristike tangencijalnog Venturi skrubera, prema navodima proizvođača, i to: a) pri kolekciji čestica soli nakon mlinova i b) pri uklanjanju kapljica  $H_2SO_4$ . Dijagram efikasnosti dat je u funkciji pada pritiska u gasnoj fazi, a parametarske linije odgovaraju brzini gasa u grlu (ft/s) i utrošku  $H_2O$  (u gal/1000 ft<sup>3</sup>).



Sl.33. Efikasnost skrubera Pease-Anthony

**Veličina kapi.** Rad Venturi skrubera zavisi pre svega od veličine kapi koje se stvaraju pod dejstvom smicajnih sila gasne struje na mlazevima tečnosti. Nukiyama i Tanasawa su veličinu kapi koje se stvaraju atomizacijom korelisali sledećom jednačinom:

$$D(\mu m) = \frac{585}{v_r} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_L}} + 597 \left( \frac{\mu_L}{\sqrt{\sigma \rho_L}} \right)^{0.45} \left( 10^3 \frac{L}{G} \right)^{1.5} \quad (37)$$

gde je:  $\sigma$  (dyn/cm) - površinski napon tečnosti,  $\mu_L$  (P) - viskozitet tečnosti,  $v_r$  (m/s) - relativna brzina između gasa i tečnosti u grlu,  $L/G$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) - odnos protoka gasa i tečnosti i  $\rho_L$  (kg/m<sup>3</sup>) - gustina tečnosti.

Za sistem voda-vazduh, na normalnoj temperaturi i pritisku, jednačina se pojednostavljuje na oblik:

$$D = \frac{5000}{v_r} + 28.64 \left( \frac{L}{G} \right)^{1.5} \quad (38)$$

gde je  $D$  ( $\mu m$ );  $v_r$  (m/s);  $L/G$  (lit/m<sup>3</sup>).

Ova korelacija važi u sledećem opsegu:

| Parametar                             | Opseg važenja N&T jednačine | Tipične vrednosti u industrijskoj primeni |
|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| Brzine gasa, $v_G$ (m/s)              | 72-225                      | 45-120                                    |
| $L/G$ (l/m <sup>3</sup> )             | 0.08-1                      | 0,6-4                                     |
| Odnos mas. protoka gasa i tečnosti    | 1,6-15                      |                                           |
| Viskozitet tečnosti (cP)              | 0,3-50                      | 1                                         |
| Površinski napon tečnosti (dyn/cm)    | 19-73                       | 70                                        |
| Gustina tečnosti (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,7-1,2                     | 1                                         |

Korelacija koju su predložili Kim i Marshall slična je N&T korelaciji, ali pokriva veći opseg  $L/G$  (0.008-5) i za slične radne uslove predviđa manji prečnik kapi:

$$d_m = 206.6 \frac{\sigma^{0.41} \mu_L^{0.32}}{(v_r^2 \rho_G)^{0.57} S^{0.36} \rho_L^{0.16}} + 4745 \left( \frac{\mu_L^2}{\rho_L \sigma} \right)^{0.71} \frac{1}{v_L^{0.54}} \left( \frac{G}{L} \right)^m \quad (39)$$

gde je:  $d_m$  ( $\mu m$ ) - srednji maseni prečnik kapi,  $S$  (m<sup>2</sup>) - poprečni presek grla skrubera,  $G$  (kg/s) - maseni protok gasa,  $L$  (kg/s) - maseni protok tečnosti,  $m$  - bezdimenziona konstanta ( $m=-1$  za  $G/L \leq 3$ ;  $m=-0.5$  za  $G/L > 3$ ).

Johnstone i Roberts su utvrdili da za Venturi skrubere postoji vrlo jednostavna relacija između specifične površine kapi i efikasnosti kolekcije čestica, apsorpcije SO<sub>2</sub> i vlaženja vazduha. Rezultati njihovih ispitivanja prikazani su za sva tri procesa na sl.34. Nagib svake od linija predstavlja broj prenosnih jedinica za taj proces, a efikasnost je na poznat način povezana sa  $N_t$ .

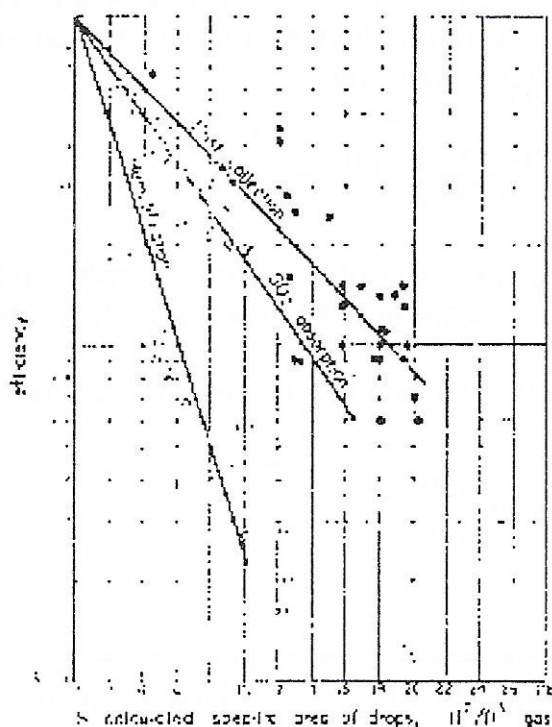
Za kolekciju čestica, jednačina glasi:

$$\eta = 1 - e^{-kS} \quad (40)$$

gde je  $S$  (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) - specifična površina kapi po m<sup>3</sup> gasa, koja se izračunava iz izraza:

$$S = 1833 \frac{L/G}{D} \quad (41)$$





Sl.34. Korelacija - efikasnost venturi skrubera za apsorpciju, humidifikaciju i kolekciju čestica

gde je  $S$  ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ),  $L/G$  ( $\text{lit}/\text{m}^3$ ) i  $D$  ( $\mu\text{m}$ ), a za većinu čestica je  $K=0.125$ .

Johnstone je, znajući da inercioni sudari predstavljaju vladajući mehanizam kolekcije u Venturi skruberima, povezoao efikasnost kolekcije sa parametrom inercionih sudara i dao sledeću jednačinu:

$$\eta = 1 - e^{-K \frac{L}{G} \sqrt{\Psi}} \quad (42)$$

gde je  $L/G$  ( $\text{lit}/\text{m}^3$ ), a za većinu čestica važi  $K=0.673$ . Eksperimentalna verifikacija jedn(42) prikazana je na sl.35.

Pad pritiska u Venturi skruberu sastoji se iz dve komponente:

- gubitka na ubrzavanju i usporavanju gasa u grlu skrubera

- gubitka na ubrzavanju kapi tečnosti, a postoji nekoliko modela za izračunavanje.

I. Calvert je dao jednačinu izvedenu iz pretpostavke da se sva energija troši na ubrzavanje kapi tečnosti do brzine gasa u grlu skrubera:

$$\Delta p (\text{Pa}) \cdot v_G^2 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \frac{L}{G} \left( \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \right) = 1.03 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) \quad (43)$$

Sl.35. Fig. 9.22.

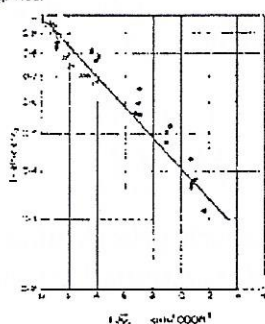


FIG. 9.22. Correlation of venturi scrubber efficiency on the basis of inertial impaction [22]

A. Liquid flow rate = 0.5 m³/min.  
B. Inlet air velocity = 10 m/s.  
C. Inlet air humidity = 0.01 kg/kg dry air.  
D. Inlet air temperature = 20°C.  
E. Inlet air pressure = 101.3 kPa.  
F. Inlet air density = 1.2 kg/m³.

II. Hesketh je predložio alternativnu jednačinu:

$$\Delta p (\text{Pa}) = 0.87 v_G^2 \rho_G A_t^{0.133} \left( \frac{L}{G} \right)^{0.78} \quad (44)$$

gde je  $A_t$  ( $\text{m}^2$ ) - površina preseka grla skrubera.

Ako se tečnost ne ubrizgava pre najužeg preseka u grlu skrubera, nego u samom grlu skrubera, izračunate vrednosti treba uvećati za oko 10%.

III. Prema Bernulijevoj jednačini je:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_f v^2}{2} \quad (45)$$

gde je  $v$  - brzina u grlu skrubera, pri čemu je koeficijent otpora korelisan (gde je  $G/L$  u  $\text{l}/\text{m}^3$ ):

$$\xi = 0.566 \frac{L}{G} + 0.93 \quad (46)$$

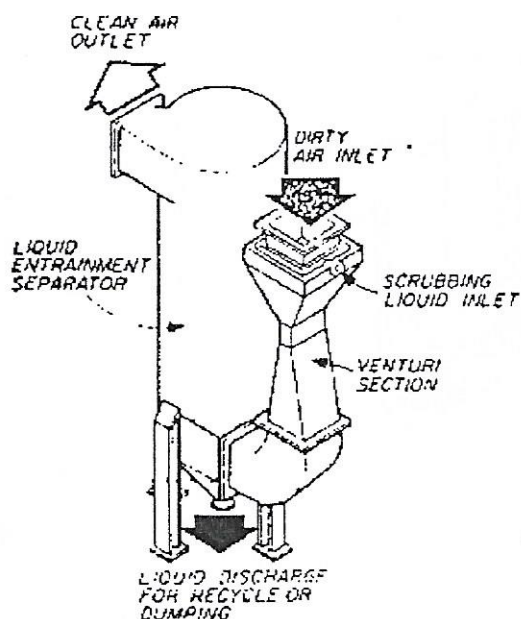
Sl.35. Korelacija - efikasnost Venturi skrubera u funkciji parametra inercionih sudara

Prečnik čestice koja se taloži sa efikasnošću 50% je:

$$d_{50\%} = \exp \left[ -1.56 - 1.46 \ln \frac{\Delta h}{127} \right] \quad (47)$$

gde je  $\Delta h$  (mmVS) - pad pritiska u Venturi skruberu.

Navedene jednačine pokazuju da efikasnost kolekcije čestica definisanih karakteristika u najvećoj meri zavisi od pada pritiska gasa u skruberu i odnosa protoka tečnosti i gasa; ove dve veličine određuju potrošnju snage po jedinici protoka gasa koji se prečišćava.



Sl.36. Venturi skruber

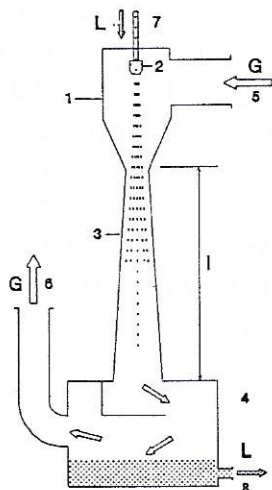
Preduslov efikasnog rada Venturi skrubera je ravnomerna raspodela kapi tečnosti po preseku grla skrubera. Pokušaji da se ovaj problem reši doveli su vremenom do razvoja više varijanti konstrukcije grla skrubera. U starijim tipovima Venturi skrubera, korišćen je veliki broj mlaznica, raspoređenih po grlu skrubera, koje su raspršivale tečnost pod visokim pritiskom. U ovakvim sistemima je, međutim, dolazilo do brze erozije mlaznica.

Danas najčešće korišćeno rešenje je grlo u obliku tankog pravougaonika, na čijim dužim stranicama su raspoređene mlaznice. Skraćivanjem puta raspršavanja, smanjuje se i pritisak pod kojim se raspršava tečnost. Jedna od konstrukcija, koja se često koristi prikazana je na sl.36.

Najsavremeniji tipovi Venturi skrubera imaju grlo promenljivog preseka, kako bi se na optimalan način prilagođavali promenama protoka gasa (naravno, ako je proces takav da se ovakve promene mogu očekivati). Promena preseka se postiže

pomeranjem jedne stranice pravougaonika, ili (za kružni presek) ubacivanjem konusa koji se može vertikalno pomerati.

Industrijski Venturi skruberi konvencionalnog tipa imaju kapacitet u opsegu 6-8500 ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) i potrošnju tečnosti za raspršavanje od 0.6-1 ( $\text{lit}/\text{m}^3$  gasa). Brzine gasa u grlu skrubera iznose 50-180 ( $\text{m}/\text{s}$ ), a padovi pritiska 250-2000 (mmVS).



Sl.37. Venturi skruber sa samousisavanjem

#### Venturi skruber sa samousisavanjem

Jedna od konstruktivnih varijanti Venturi skrubera je Venturi skruber sa samousisavanjem (ejektor-Venturi). Princip rada prikazan je na sl.37. Tečnost se uvodi u mlazu pod pritiskom dovoljnim da usiša struju gasa. Otuda pritisak duž grla skrubera raste, umesto da opada kao u standardnom Venturi skruberu.

Ovaj skruber troši velike količine tečnosti (i do 10  $\text{lit}/\text{m}^3$  gasa). Efikasnost kolekcije se može izračunati prema jednačini:

$$\eta = 1 - \exp \left( -748 \frac{l}{d_k} \eta_l \frac{L}{G} \right) \quad (48)$$

gde je  $l$  (m) - efektivna dužina radne zone (mlaza),  $d_k$  - prečnik kapi, a ostale oznake su kao ranije.

Jedna od konstrukcija, koja sadrži bateriju



samousisavajućih Venturi cevi, prikazana je na sl. 38.

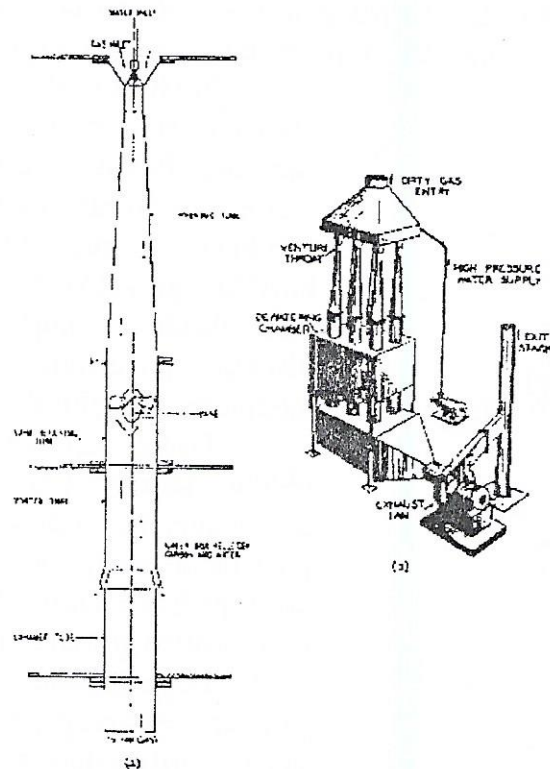


FIG. 3.24. Penifsa water spray multiple tube venturi scrubber, using straight through cyclone separation chamber:  
(a) Single tube showing spray and separating section.  
(b) General arrangement of plant.<sup>210</sup>

Sl.38. Venturi skruber sa samousisavanjem - jedno od konstrukcionih rešenja

### 3.9. Korelacije za efikasnost skrubera

Već je napomenuto, posebno kod Venturi skrubera, da je za povećanje efikasnosti izdvajanja određene prašine potrebno uložiti veću snagu, odnosno da pri istoj efikasnosti snaga raste sa opadanjem veličine čestica koje se izdvajaju. Ovo zapažanje je bilo osnova ideje da se uspostavi kvantitativna korelacija između efikasnosti skrubera i ukupno utrošene snage (odnosno pada pritiska). Prema radovima Sumrau-a, ukupna snaga potrebna za rad skrubera ( $P_T$ ) sastoji se od snage potrebne za potiskivanje gasa ( $P_G$ ) i snage potrebne za potiskavanje (raspršivanje) tečnosti ( $P_L$ ), pri čemu je  $P_T = P_G + P_L$ . Sumrau je dao relacije koje povezuju snagu (u kW) po jedinici protoka gasa (na svakih 1000 m<sup>3</sup>/h). Ove relacije su:

$$P_G = 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta h \quad \text{kWh/1000 m}^3 \quad (49)$$

gde je  $\Delta h$  pad pritiska u aparatu u mmVS. Za tečnu fazu je:

$$P_L = 28,15 \cdot \Delta p_L \cdot (Q_L / Q_G) \quad \text{kWh/1000 m}^3 \quad (50)$$

gde je  $\Delta p_L$  - pad pritiska (atm) na mlaznicama za raspršivanje tečnosti,  $Q_L$  (m<sup>3</sup>/h) je protok tečnosti, a  $Q_G$  (m<sup>3</sup>/h) je protok gasa.

Efikasnost skrubera korelisana je u preko bezdimenzione prenosne jedinice,  $N_t$ , koja je

definisana u funkciji efikasnosti kao:

$$N_t = \ln \left[ \frac{1}{1-\eta} \right] \quad (51)$$

**Tabela VII.** Broj prenosnih jedinica i efikasnost

| Broj prenosnih jedinica | Efikasnost % |
|-------------------------|--------------|
| 0,5                     | 39,35        |
| 1,0                     | 63,21        |
| 2,0                     | 86,47        |
| 4,0                     | 98,17        |
| 6,0                     | 99,752       |
| 10,0                    | 99,9955      |

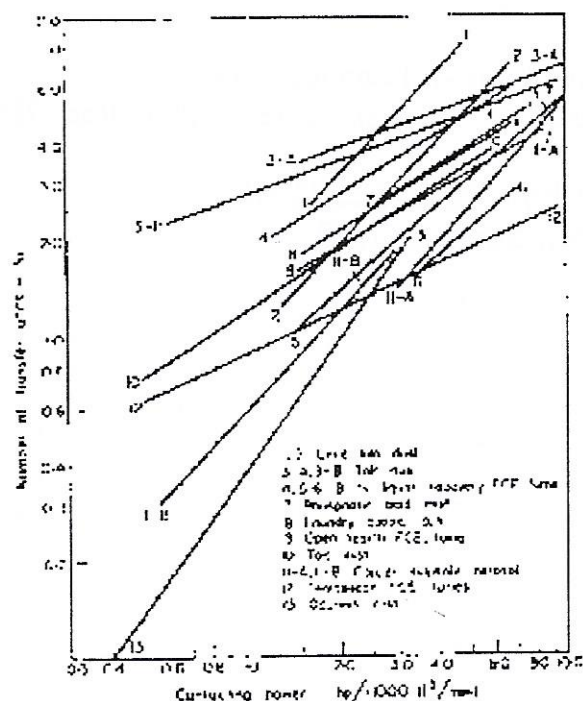
koja daje relativno mali broj prenosnih jedinica za efikasnosti do 99%. Uporedne vrednosti  $N_t$  i  $\eta$  date su Tabeli VII.

Semrau je dao dijagram (sl.39.) broj prenosnih jedinica u funkciji ukupne utrošene snage za različite skrubere i čestice i pokazao da postoji linearna veza u log-log sistemu, nezavisno od tipa skrubera. Ova relacija može se iskazati kao

$$N_t = \alpha P_T^\beta \quad (52)$$

gde su  $\alpha$  i  $\beta$  parametri karakteristični za pojedine prašine (čestice). Za sada raspoloživi podaci za parametre  $\alpha$  i  $\beta$  za različite čestice navedeni su u Tabeli VIII. Ova korelacija je vrlo značajna jer pokazuje da se efikasnost kolekcije bilo kog tipa skrubera može povezati sa ukupno utrošenom snagom za rad uređaja. Napomenimo da je apscisa na

dijagramu (sl.20) data kao  $KS/(1000 \text{ ft}_3/\text{min})$  ( $1 \text{ KS}=0,7355 \text{ kW}$ ,  $1 \text{ ft}=0,3048 \text{ m}$ ).



**Sl.39.** Korelacija za efikasnost skrubera  
(linija odgovaraju različitim prašinama)



Tabela VIII. Koeficijenti u jednačini  $N_t = f(P)$ 

| Vrsta čestica                           | Tip skrubera                                    | $\alpha$ | $\beta$ |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|---------|
| prašina kreča i sode iz peći za pečenje | Venturi; centrifugalna kolona sa raspršavanjem  | 1.47     | 1.05    |
| isti gasovi posle grubog prečišćavanja  | Venturi; centrifugalna kolona sa raspršavanjem  | 0.915    | 1.05    |
| prašina talka                           | Venturi                                         | 2.97     | 0.362   |
| prašina iz metalurških peći             | Venturi i centrifugalna kolona sa raspršavanjem | 1.75     | 0.620   |
| magla fosforne kiseline                 | Venturi                                         | 1.33     | 0.647   |
| prašina u ind. čelika                   | Venturi                                         | 1.26     | 0.569   |
| prašina talka                           | centrifugalna kolona sa raspršavanjem           | 1.16     | 0.655   |
| neprijatni mirisi                       | Venturi                                         | 0.363    | 1.41    |

### Literatura

1. W.Strauss, **Industrial Gas Cleaning**, Pergamon Press, London, 1974.
2. Grupa autora, **Hemijsko-tehnološki priručnik**, V. Hemijsko inženjerstvo, Rad, Beograd 1986.
3. K.Wark i C.Warner, **Air Polution**, Harper&Row, New York, 1981.
4. J.Djuković, **Zaštita životne okoline**, Svjetlost, Sarajevo, 1990.

## ADSORPCIJA

Adsorpcija je separacioni proces u kome se, u najširem smislu, selektivno povećava ili smanjuje koncentracija komponenti iz rastvora ili gasovitih smeša na graničnoj površini faza heterogenog sistema (čvrsto-gas, čvrsto-tečno i tečno-tečno, ako se te dve tečnosti ne mešaju). Sa stanovišta smanjenja zagadjenosti vazduha, široku primenu je našla adsorpcija iz gasne faze na čvrstoj površini. Na ovaj način se molekuli polutanata uklanjaju iz otpadnog gasnog toka. Čvrsta faza na čijoj se površini povećava koncentracija neke od komponenata, naziva se adsorbent, dok se komponenta koja se vezuje za površinu adsorbenta, naziva adsorbat. Osim za smanjenje vlažnosti vazduha i drugih gasova, adsorpcija je korisna kako za uklanjanje mirisa i štetnih sastojaka iz industrijskih gasova tako i za rekuperaciju para organskih rastvarača. Adsorpcija je naročito pogodna metoda kada je:

- gasoviti polutant teško sagoreva,
- polutant neka supstanca čija je rekuperacija ekonomski značajna,
- vrlo niska koncentracija polutanta u izduvnom gasu.

Primena adsorpcije raste zbog sve šire upotrebe u kontroli kvaliteta vazduha, naročito u slučaju vrlo malih količina polutanata u otpadnim gasovima, kada su troškovi drugih načina prečišćavanja previsoki. Organske sinteze, a naročito heterogeni katalitički procesi, zahtevaju reaktante visoke čistoće koji se takodje prečišćavaju adsorpcijom.

### A) VRSTE ADSORPCIJE

Adsorpcija na medjufaznoj površini, zavisno od karaktera veza koje se uspostavljaju izmedju adsorbenta i adsorbata, može biti fizička ili hemijska.

Fizička adsorpcija je posledica delovanja slabih medjumolekulskih privlačnih sila (van der Waals-ove sile) izmedju molekula gasa i čvrstog adsorbenta. Doprinos elektrostatičkih sila je značajan samo u slučaju adsorbenta jonske strukture (zeoliti). Oslobodjena toplota usled egzotermnog procesa adsorpcije, zavisi od jačine privlačnih sila i bliska je toploti kondenzacije gasne komponente; tipične vrednosti su 2-20 kJ/mol. Fizička adsorpcija je povratan proces, što znači da će se povećanjem temperature ili povećanjem porcijalnog pritiska adsorbata, adsorbovani gas lako desorbovati bez hemijske promene. Količina fizički adsorbovanog gasa naglo opada sa porastom temperature (usled reverzibilnosti procesa) i zanemarljiva je iznad neke kritične temperature. Fizička adsorpcija je obično direktno proporcionalna stepenu pokrivenosti površine adsorbenta. Adsorbovani molekuli nisu fiksirani na površini adsorbenta, već se mogu po njoj translatorsno kretati. Takodje, fizička adsorpcija može biti i višeslojna, pri čemu je privlačno dejstvo najjače u prvom sloju adsorbata. Generalno, fizička adsorpcija je vrlo brz proces.



Hemisorpcija je posledica uspostavljanja hemijskih veza izmedju adsorbenta i adsorbata, koje mogu biti jonskog, kovalentnog ili koordinacionog tipa. Pošto su ove veze jače i oslobodjena toplota će biti znatno veća nego kod fizičke adsorpcije i bliska je toploti hemijske reakcije; tipične vrednosti su 20-400 kJ/mol. Stoga je za reakciju izmedju hemisorbovanih molekula potrebna manja energija aktivacije nego za reakciju istih molekula u gasnoj fazi, što čini osnovno objašnjenje dejstva čvrstih katalizatora na povećanje brzine hemijske reakcije. Hemisorpcija je sporija u odnosu na fizičku adsorpciju, jer zahteva određenu energiju aktivacije, i često je nepovratan proces, što desorpciju čini nemogućom. Ako je potrebna regeneracija adsorbenta ili rekuperacija adsorbovane komponente, mora se izabrati takav adsorbent da ukupnu brzinu procesa adsorpcije određuje fizička adsorpcija. Kod hemisorpcije se može obrazovati samo jedan sloj adsorbata, jer su rastojanja na kojima deluju velentne sile izmedju adsorbenta i adsorbata ekstremno kratka. Ovako adsorbovani molekuli se ne mogu kretati po adsorbovanoj površini.

Ovde su navedene samo neke osnovne karakteristike dva granična tipa adsorpcije. U većini slučajeva adsorpcioni procesi se odvijaju kao kombinacija različitih tipova, što otežava jasno razlikovanje fizičke i hemijske adsorpcije.

## B) ADSORBENTI

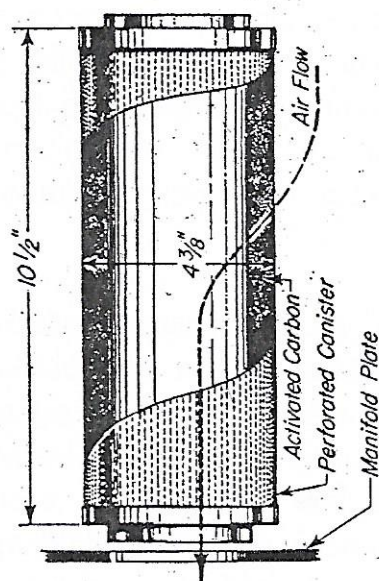
Adsorbenti su čvrste materije veoma porozne strukture i na osnovu raspodele prečnika pora mogu se klasifikovati u mikroporozne ( $r < 75 \text{ \AA}$ ) i makroporozne ( $r = 75-75000 \text{ \AA}$ ). Osnovna karakteristika adsorbenta je veoma velika specifična površina, pri čemu unutrašnja površina, koja potiče od pora, ima znatno veći značaj od spoljašnje u procesu adsorpcije. Na primer, efektivna specifična površina aktivnog uglja iznosi i do  $10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

Dobar adsorbent mora posedovati izvesne fizičke karakteristike. Pad pritiska u pakovanom sloju adsorbenta treba održati u dozvoljenim granicama. Adsorbenti treba da budu mehanički otporni na pritisak i habanje, naročito kod adsorpcije sa pokretnim slojem. Dimenzije zrna adsorbenta treba da budu takve da se izbegne njihovo odnošenje gasnim tokom iz fluidizovanog sloja. Ako se adsorbent regeneriše toplotom, mora raspolagati otpornošću na termičke udare, ne sme se kruniti i tako gubiti adsorpcione osobine.

Pored navedenih osobina značajna je i polarnost površine adsorbenta. Prema polarnosti adsorbata bira se i polarnost adsorbenta: polarna jedinjenja se bolje adsorbuju na polarnim adsorbentima i obratno.

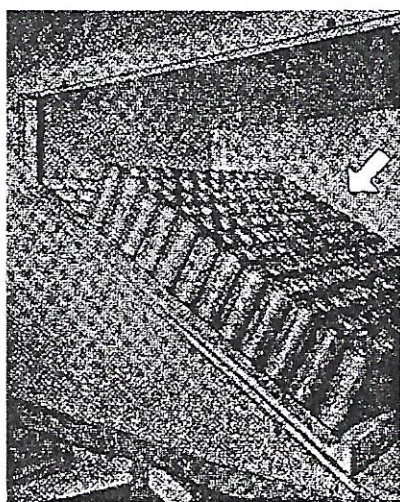
Najznačajniji nepolarni adsorbent je aktivni ugalj. Dobija se pirolizom uglja, drveta, koštica voća i ljuski kokosovog oraha, na  $1150^\circ\text{C}$ , zatim se aktivira vrelim gasovima ili vodenom parom (na  $600^\circ\text{C}$ ). Obično se proizvodi u obliku granula. Aktivni ugalj je vrlo efikasan za adsorpciju nepolarnih organskih molekula, naročito na temperaturama bliskim njihovoj tački ključanja. Aktivni ugalj predstavlja adsorbent koji se najčešće koristi, s obzirom na veoma razvijenu površinu ( $10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$ ). Adsorpcija na aktivnom uglju se izvodi pri relativno niskim temperaturama



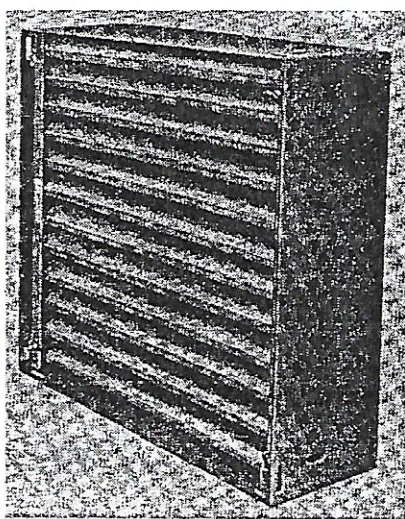


Sl. 1. Perforirani cilindar punjen aktivnim ugljem

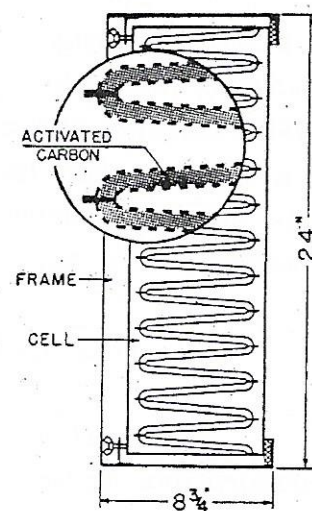
granulama aktivnog uglja (slika 1), koji se mogu postaviti u potreban broj redova,



Sl. 2. Uredjaj za adsorpciju sa cilindrima punjenim aktivnim ugljem



Sl. 3. Ramska konstrukcija uredjaja za adsorpciju sa slojem aktivnog uglja u sendviču izmedju platna



sa proizvodnim brojem kutija po redu. Raspored kutija je fleksibilan i može se prilagoditi raspoloživom prostoru. Jedan tip ovakvog kompletnog uredjaja prikazan je na slici 2. Na slici 3 prikazana je ramska konstrukcija koja se ugradjuje ventilacione u cevovode, u cilju uklanjanja malih koncentracija mirisa ili drugih organskih komponenti u vazduhu.

U polarne adsorbente ubrajaju se adsorbenti neorganskog porekla: silika gel, aktivne zemlje (dijatomejska, fulerova), oksidi aluminijuma (alumina), molekulska sita (zeoliti). Ovi materijali adsorbuju i polarne i nepolarne molekule, mada znatno brže polarne. Silika gel se dobija taloženjem iz reakcije sumporne kiseline i



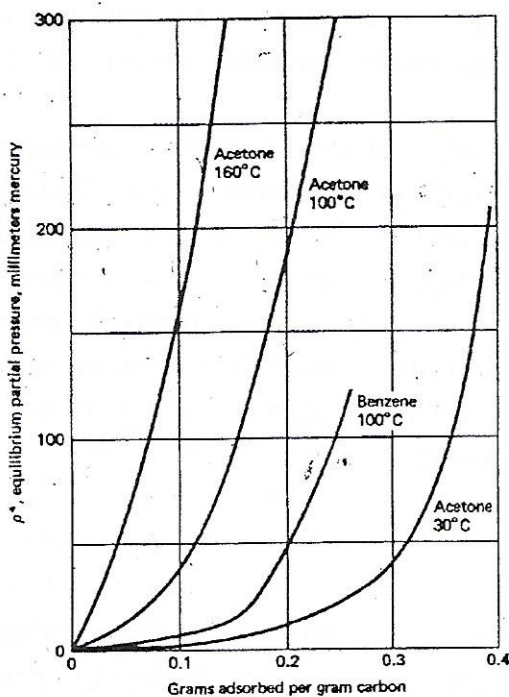
rastvora natrijum silikata, i takodje se proizvodi u granulama. Osnovna primena mu je u dehidraciji vazduha ili nekih drugih procesnih gasova, s obzirom da silika gel vrlo lako adsorbuje vodu, medjutim adsorpcija je ogranicena na temperature ispod 250oC. Drugi dehidracioni agens je aktivirana alumina (oksid aluminijuma). Fulerova zemlja je u suštini aktivirana prirodna glina, koja se koristi u naftnoj i prehrambenoj industriji.

Posebnu grupu polarnih adsorbenata čine sintetički zeoliti (zeolitske rešetke), koji se nazivaju molekulska sita. Najčešće se koriste kristalni metalni alumosilikati. Poluprečnici pora odredjenog tipa molekulskog sita su mnogo uniformniji u odnosu na druge vrste adsorbenta. Osnovno svojstvo molekulskih sita je selektivna adsorpcija koja se odigrava ili prema kritičnim prečnicima molekula ili prema polarnosti. Zeoliti vezuju pre svega molekule čije su dimenzije manje od efektivnog prečnika pora, tako da će lakše pravolinijski lančasti molekuli prodirati u pore nego razgranati ili prstenasti. Kada je nominalni prečnik pora molekulskog sita 0,003  $\mu\text{m}$ , mogu se adsorbovati molekuli  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{NH}_3$ . Povećanjem prečnika pora do 0,004  $\mu\text{m}$ , takodje se adsorbuju i veći molekuli:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  i  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Daljim povećanjem prečnika, do 0,0005  $\mu\text{m}$ , adsorbuju se i normalni parafini. S druge strane, pošto su molekulska sita jako polarna, dobro vezuju polarne molekule. Na osnovu veličine prečnika pora i vrste jedinjenja, mogu se oštro odvajati razne molekulske vrste. Zbog jakih veza, adsorpcija se može vršiti na znatno višim temperaturama. Molekulska sita bogata silicijum-oksidad otporna su i prema kiselinama i kiseonika. Organska molekulska sita služe za fino prečišćavanje, sušenje i razdvajanje ugljovodonika.

### C) TEORIJA RAVNOTEŽNE ADSORPCIJE

Adsorpcione ravnotežne izoterme daju važne informacije za odredjeni adsorpcioni sistem. Teorije adsorpcione ravnoteže mogu se klasifikovati u nekoliko grupa, s obzirom da ne postoji jedinstven model adsorpcije koji bi se koristio i za fizičku i za hemijsku adsorpciju. Svaki model primenljiv je samo za odredjeni opseg uslova, tako da se adsorpcioni procesi moraju klasifikovati na osnovu važnosti aproksimacija i karaktera primenjenih teorija.

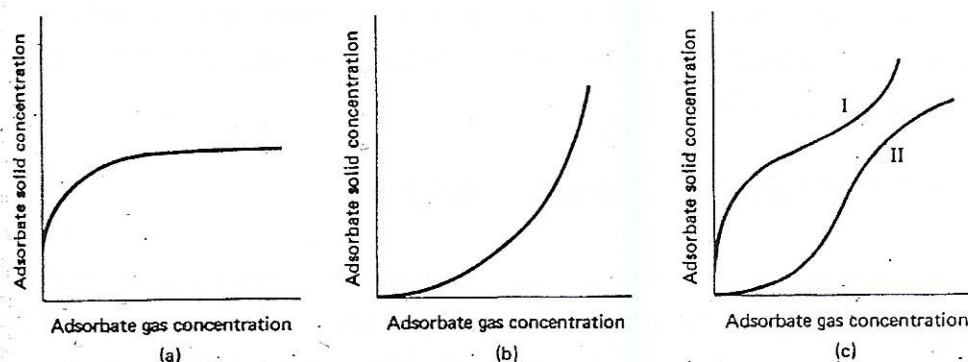
Na slici 4 dati su eksperimentalni podaci za adsorpciju dva gasa, acetona i benzena, na aktivnom uglju. Kao što se može očekivati, povećanje parcijalnog pritiska adsorbata u gasnom toku usloviće veći stepen adsorpcije na datoj temperaturi. Povećanjem radne temperature za dati adsorbent, smanjuje se adsorbovana količina, pa je poželjno u sloju adsorbenta održavati što je moguće nižu temperaturu. Adsorpcija se povećava i sa porastom molekulske mase adsorbata, i sa slike 4 se vidi da se za isti parcijalni pritisak i istu temperaturu znatno više adsorbuje benzena od acetona pri ravnotežnim uslovima.



Sl. 4. Ravnotečni podaci za adsorpciju na aktivnom uglju

jednačina za adsorpciju odgovaraju ovom tipu izoterme. Eksperimentalni podaci sa slike 4 se najbolje prikazuju Freundlich-ovom adsorpcionom izotermom.

Izoterma sa slike 5(b) i izoterma I sa slike 5(c) se odnose na višeslojnu adsorpciju i zapažene su samo kod adsorbenata koji imaju širok opseg veličine pora. Tip II sa slike 5(c) se takodje odnosi na višeslojnu adsorpciju, ali koja je praćena kondenzacijom adsorbovanog gasa u porama adsorbenta, što vodi opadanju kapaciteta adsorpcije na visokom pritisku.



Sl. 5. Tipične ravnotežne izoterme

Na osnovu navedenih izoterma i do sada izloženog dolazi se do važnog zaključka: prinos adsorpcije je utoliko veći ukoliko je početna koncentracija adsorbata veća, a temperatura niža; za manje ravnotežne koncentracije, kojima se skoro uvek teži; potrebne su veće količine adsorbenta da bi se dobio isti efekat izdvajanja. Kriva adsorpcije, koja odgovara nekom od tipova sa slike 5, ne mora se poklapati sa krivom desorpcije. Desorpcija se može izvoditi povećanjem

Generalno, adsorpciona izoterma predstavlja odnos adsorbovane mase ili zapremine i parcijalnog pritiska ili koncentracije adsorbata u masi gasa na određenoj temperaturi. Ravnotežna koncentracija adsorbata može biti vrlo osetljiva na promenu temperature. Na osnovu eksperimentalnih podataka, adsorpcione izoterme za fizičku adsorpciju su svrstane u četiri grupe, kao što je prikazano na slici 5.

Kriva na slici 5(a) odgovara adsorpciji u slučaju pravog mikroporoznog adsorbenta, čije pore nisu mnogo veće od prečnika molekula adsorbata. Kada se cela površina prekrije monoslojem adsorbata, dalje povećavanje parcijalnog pritiska ne utiče na količinu adsorbovane supstance. Lengmuir-ova (teorijska) i Freundlich-ova (empirijska)



temperature ili izlaganjem adsorbenta što čistijem inertnom fluidu koji ne sadrži adsorbat ili primenom vakuuma, jer se na taj način moguća ravnoteža stalno pomera i postiže se željeni efekat.

Najčešće korišćena jednačina za opisivanje eksperimentalnih adsorpcionih podataka je BET adsorpciona izoterma (Brunauer, Emmet and Teller) za višeslojnu, fizičku adsorpciju. Predpostavka za ovaj model je da nije potrebno da se popuni monosloj da bi došlo do formiranja drugog i narednih slojeva adsorbata, a za svaki sloj važi Langmuir-ova izoterma. U višeslojnoj adsorpciji promena entalpije adsorpcije za prvi monosloj je različita od vrednosti promene entalpije kondenzacije gasa, dok je za naredne slojeve molekula jednaka promeni entalpije kondenzacije. Matematička formulacija BET izoterme je:

$$\frac{V}{V_m} = \frac{cP}{(P_0 - P)[1 + (c-1)(P/P_0)]}$$

$V$  je zapremina ukupno adsorbovane količine gasa na određenom pritisku i temperaturi, a  $V_m$  je zapremina adsorbovanog gasa kada monosloj prekriva površinu.  $P_0$  je parcijalni pritisak adsorbata na temperaturi sistema,  $P$  je aktuelni parcijalni pritisak adsorbata u masi gasa, a  $c$  je karakteristični parametar adsorpcionog procesa, tj. funkcija razlike moćatne entalpije adsorpcije i molarne entalpije kondenzacije. Vrednosti  $V_m$  i  $c$  se eksperimentalno određuju. Pogodno je prethodnu jednačinu preurediti u oblik:

$$\frac{1}{cV_m} + \frac{c-1}{cV_m} \frac{P}{P_0} = \frac{P}{V(P_0 - P)}$$

Na ovaj način se dobija linerarna zavisnost izmedju  $(P/V)(P_0 - P)$  i  $P/P_0$  kojom se obradjuju eksperimentalni podaci, i iz koje se lakše određuju vrednosti  $c$  i  $V_m$ . U slučaju monoslojne adsorpcije, ova jednačina se svodi na Langmuir-ovu. U nekim slučajevima BET jednačina može imati i S-oblik, i tada se mora pristupiti drugim tehnikama određivanja  $V_m$ .

#### D) BRZINA ADSORPCIONOG PROCESA

Brzina adsorpcije se menja sa vremenom: u početku je najveća da bi na kraju, pri postizanju dinamičke ravnoteže, bila jednaka nuli. Pošto površina adsorbenta nije homogena, prvo se zaposedaju najaktivnija, a zatim sve manje aktivna mesta površine; što je mesto aktivnije to je i toplotni efekat veći.

Brzinu procesa adsorpcije određuju sledeći stupnjevi:

- 1) prenos mase iz gasne struje do površine adsorbenta (konvekcija i spoljna difuzija)
- 2) prenos mase unutar pora adsorbenta (unutrašnja difuzija)
- 3) prenos oslobodjene toplote u procesu adsorpcije, od molekula koji su se vezali za adsorbent u masu fluida

- 4) migracija po površini, tj. aktivno kretanje molekula po površini adsorbenta do onih centara koji su najpogodniji za adsorpciju
- 5) reakcija na površini za koju je potrebna određena energija aktivacije
- 6) reakcija u unutrašnjosti zapremine, tj. nije potpuno ograničena na površini adsorbenta.

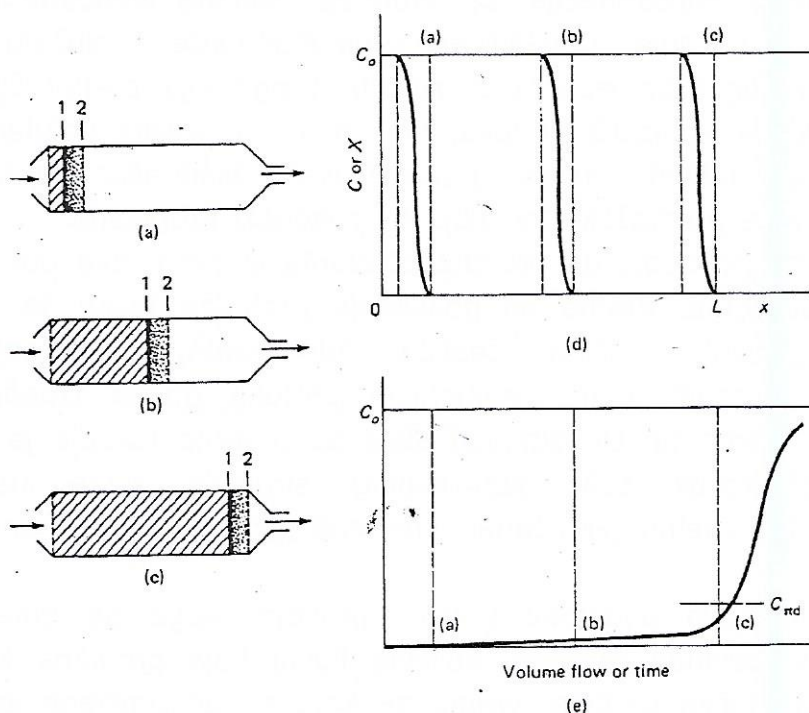
Stupnjevi koji se odnose na fenomene prenosa (1-3) su od praktičnog značaja. Obično su ograničavajući stupnjevi procesa spoljna ili unutrašnja difuzija, pošto su znatno sporiji u odnosu na sam proces adsorpcije. Koji od ova dva stupnja kontroliše ukupnu brzinu procesa zavisi od operativnih uslova. Na pr. kod šaržnog adsorbera sa intenzivnim mešanjem to je unutrašnja difuzija, dok kod sistema sa kontinualnim proticanjem pri uobičajenim protocima odlučujući ulogu ima spoljna difuzija. Kad pored fizičke dolazi i do hemijske adsorpcije mora se poznavati kinetika procesa adsorpcije. Pod tim se podrazumeva određivanje vremenske promene brzine adsorpcije, vremenske promene adsorbovane količine, kao i određivanje veze izmedju brzine adsorpcije i pritiska, temperature i stepena adsorpcije.

Stupnjevi (1,2,4) koji se odnose na prenos mase traju određeno vreme i tako doprinose ukupnom vremenu trajanja adsorpcije. Radi ekonomičnosti, u praksi se ne ide do uspostavljanja ravnoteže pošto bi vreme potrebno da se ona dostigne bilo veoma dugo, a efekat mali.

## E) DINAMIKA ADSORPCIJE

Razmatra se situacija kad zagađeni gasni tok prolazi kroz pakovani sloj

adsorbenta. Gasni tok je, na primer, binarna smeša inertnog gasa (vazduh) i polutanta početne koncentracije  $C_0$ . Faze adsorpcije u pakovanom sloju prikazane su na slici 6. U početnom periodu rada najbrža i najefikasnija adsorpcija odvija se u sloju adsorbenta najbližem ulazu, gde je sloj adsorbenta u dodiru sa smešom najveće koncentracije polutanta  $C_0$ . Ova situacija je ilustrovana na slici 6a, gde relativna gustina tačaka izmedju pozicije 1



Sl. 6. Dinamika adsorpcije - kretanje adsorpcione zone duž pakovanog sloja adsorbenta



i 2 ukazuje na relativnu koncentraciju polutanta adsorbovanog u sloju. Šrafirana oblast (od ulaza do pozicije 1) je potpuno zasićena polutantom. Deo sloja između pozicija 1 i 2 predstavlja "adsorpcionu zonu". Koncentracija polutanta u gasnoj smeši se menja od  $C_0$  (u tački 1) do vrednosti bliske nuli (u tački 2). Na slici 6(d) prikazan je profil C (masa polutanta po jedinici zapremine zagadjenog gasa) ili X (masa polutanta po jedinici mase adsorbenta) duž sloja, za različite vremenske periode od početka procesa. Očigledan je nagli pad koncentracije polutanta od početka do kraja adsorpcione zone. Tokom procesa, sve deblji sloj adsorbenta postaje praktično zasićen polutantom i samim tim adsorpciono skoro neefikasan. To dovodi do pomeranja adsorpcione zone duž sloja, od ulaza ka izlazu. Na slici 6-5(b) prikazan je slučaj kad se posle nekog vremena, skoro polovina sloja potpuno zasitila adsorbatom. Kretanje adsorpcione zone je praćeno kretanjem fronta koncentracije polutanta  $C_0$  u gasnoj smeši, i odvija se znatno manjom brzinom od brzine proticanja gasa kroz kolonu. Na slici 6(e) data je promena koncentracije polutanta u gasnoj smeši na izlazu iz sloja u funkciji, ili zapremini inertnog gasa u smeši (vazduha) koja prodje kroz sloj, ili vremena izvodjenja procesa. U slučajevima (a) i (b), izlazna koncentracija polutanta ima konačnu vrednost, ali je bliska nuli. U jednom trenutku donja granica adsorpcione zone stiže na kraj sloja, ukupne dužine L (slika 6(c)). Tada se na izlazu detektuje prva merljiva koncentracija polutanta (slika 6(e)), što odgovara "tački proboja". Posle tačke proboja, izlazna koncentracija polutanta u gasu počinje naglo da raste i taj deo krive se naziva "kriva proboja". Karakteristična je i "tačka zasićenja" na krivoj proboja, posle koje praktično nema adsorpcije, a izlazna koncentracija polutanta je bliska njegovoj ulaznoj koncentraciji  $C_0$ .

Imajući u vidu kontrolu koncentracije  $C_0$  vrednost izlazne koncentracije polutanta, posle tačke proboja, ne sme premašiti emisione standarde, u slučaju da se gas direktno iz adsorpcionog sloja ispušta u okolinu. Stoga nije preporučljivo raditi u blizini tačke proboja, jer varijacije protoka, ulazne koncentracije polutanta, temperature, ili neki drugi faktori, mogu prouzrokovati fluktuacije izlazne koncentracije i do vrednosti koje premašuju one koje su zakonski propisane.

U praksi je poželjno da ne dodje do proboja polutanta iz sloja, sve dok se ne zasiti 75-80% sloja adsorbenta. Vreme do postizanja probojne tačke se, po pravilu, produžava smanjenjem veličine čestica adsorbenta, smanjenjem koncentracije adsorbata u ulaznom toku, smanjenjem protoka gasne smeše i povećanjem debljine sloja adsorbenta. Uniformnost sloja adsorbenta takodje je od velikog značaja, jer bilo kakav oblik kanalisnog strujanja gasa usled neuniformnosti sloja usloviće znatno skraćenje vremena do postizanja tačke proboja.

Na osnovu eksperimentalnih podataka i krive proboja mogu se odrediti karakteristični parametri adsorpcionog procesa: količina fluida koja protekne kroz sloj adsorbenta u periodu do tačke proboja, vreme za koje se adsorpciona zona pomeri duž sloja za sopstvenu debljinu, masa adsorbata uklonjenog iz smeše do tačke proboja, masa adsorbenta koja se zadržava na adsorbentu od tačke proboja



do tačke zasićenja, ukupni kapacitet adsorbenta unutar adsorpcione zone i frakcioni kapacitet adsorbenta (nagib krive proboja).

#### F) REGENERACIJA ADSORPCIONOG SLOJA

Kada se u adsorpcionom sloju dostigne tačka proboja neophodno je izvršiti regeneraciju zasićenog sloja, čime se osposobljava za ponovnu upotrebu. Procesu regeneracije (desorpcije adsorbata) doprinose faktori koji su suprotni od onih koji doprinose adsorpciji i to su: povišenje temperature, smanjenje pritiska, potiskivanje drugim adsorbatima, istiskivanje gasovima ili vodenom parom, ekstrakcija adsorbata, sagorevanje ili hemijska promena adsorbata. Tokom regeneracije adsorpciona zona postaje desorpciona zona koja se sad kreće u suprotnom smeru kroz sloj.

Razlikuju se dva osnovna tipa regeneracije: hladna i topla.

Za hladnu regeneraciju se često koristi atmosferski vazduh kao regeneracioni fluid. Medjutim, često je mnogo efektnije vršiti regeneraciju toplim fluidom, jer se na ovaj način mnogo više adsorbata uklanja po jedinici zapremine fluida koji protiče kroz sloj. Pri izboru gasova za toplu regeneraciju mora se voditi računa o njihovoj reaktivnosti i eksplozivnosti u smeši sa adsorbatom (u prvom redu se odnosi na vazduh). Nedostatak tople regeneracije je taj da se regenerisani adsorbent mora ohladiti pre nego što otpočne novi proces adsorpcije. Ako se adsorbent ne ohladi, može se znatno smanjiti količina adsorbovanog polutanta po jedinici mase adsorbenta.

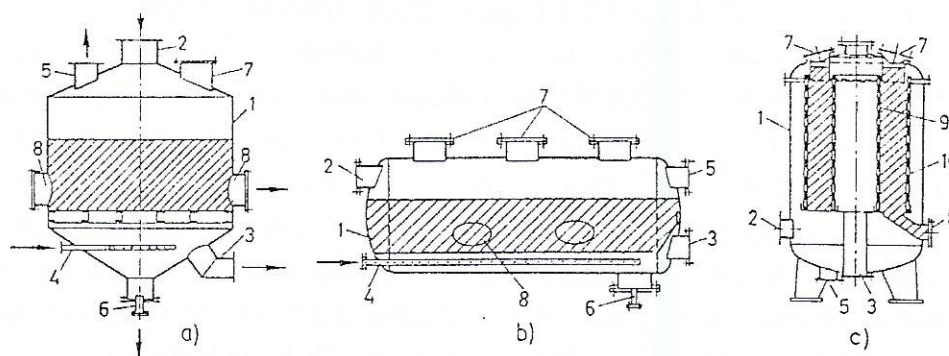
U nekim slučajevima kada je desorpcija teška i skupa, adsorbent se najčešće odbacuje sa bezvrednim adsorbatom.

#### G) KARAKTERISTIČNI ADSORPCIONI POSTUPCI I ADSORBERI

Osnovni zahtevi koji se susreću u fazi projektovanja ili izbora raspoložive opreme za proces adsorpcije, uključuju: (1) obezbedjenje potrebnog vremena zadržavanja gasovite smeše, (2) predtretman gasnog toka u cilju uklanjanja neadsorbirajućih materija, koje mogu umanjiti efikasnost adsorpcionog sloja, (3) predtretman gasne smeše radi uklanjanja gasova visokih koncentracija, koji se sa polutantom kompetitivno adsorbiraju, nekim efikasnijim metodama, u smislu sprečavanja mogućeg preopterećenja adsorpcionog sistema, (4) dobra distribucija protoka fluida kroz sloj adsorbenta i (5) obezbedjenje regeneracije sloja adsorbenta nakon njegovog zasićenja adsorbatom. Generalno, može se napraviti izbor između regenerativnog i neregenerativnog tipa adsorpcionog sistema, kao i između periodičnog (šaržnog) i neperiodičnog (kontinualnog) načina rada. U slučaju kada je koncentracija polutanta u ulaznom gasnom toku manja od 1 ili 2 ppm, uglavnom se i adsorbent i adsorbovana supstanca odbacuju. Tada se koriste sistemi sa jednim prolazom, neregenerativni i zamenljivi adsorpcioni elementi. Potopuno odbacivanje ovih elemenata, bez uklanjanja adsorbata, jedino je bezbedno kada je



adsorbat neka relativno neisparljiva supstanca. Kada su koncentracije polutanata u ulaznom toku veće od nekoliko ppm, primenjuju se regenerativni tipovi višekomornih sistema sa jednim ili dva prolaza. Periodične postupke karakteriše povremenost faze adsorpcije, tj. kroz pakovani sloj adsorbenta prodivava se gasovita smeša, radi izdvajanja neke gasovite komponente. Adsorbovani gas ili para se u istom prostoru adsorbera desorbuje vrelom parom ili gasovima. U većini slučajeva, za realizaciju adsorpcije, koristi se četvorofazni ciklični postupak (Bayer-ov postupak). Njega čine četiri faze: adsorpcija, regeneracija adsorbenta vrelom vodenom parom, sušenje i hlađenje adsorbenta hladnim gasovima. Položaj sloja adsorbenta u uređaju može biti horizontalan ili vertikalni. Na slici 9-9 su prikazani oblici adsorbera za četvorofazni adsorpcijski ciklus. Debljina sloja adsorbenta može biti od 0.3 do 1 m i više, a trajanje jednog ciklusa je obično 2-3 sata.



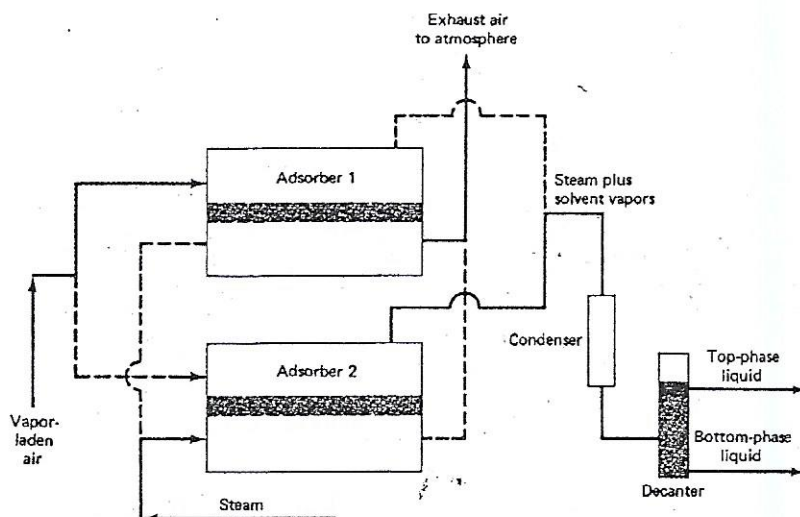
Sl. 7. Oblici adsorbera za četvorofazni ciklus:

1-omotač, 2-dovod smeće za adsorpciju i vazduha za sušenje i hlađenje, 3- odvod prečišćenog gasa i vazduha pri sušenju i hlađenju, 4-odvod vodene pare, 5- odvod para pri desorpciji, 6-odvod kondenzata, 7-otvori za punjenje adsorbera adsorbentom, 8-otvor za iznošenje adsorbenta

Pošto adsorber prolazi ciklično kroz navedene faze, da bi se mogla ostvariti kontinualna adsorpcija, oni se obično povezuju u grupe po tri adsorbera: u jednom se odigrava adsorpcija, a u drugom desorpcija i priprema za ponovnu adsorpciju, dok je treći adsorber rezervni. Na ovaj način se obezbeđuje kvazikontinualan rad.

Na slici 8 je prikazan sistem sa dve osnovne faze Bayer-ovog ciklusa: adsorpcijom i desorpcijom.

U adsorberu (1) se vrši adsorpcija, a za to vreme se sloj adsorbenta u adsorberu (2) regeneriše, suši i hladi i tako se obezbeđuje kontinualan rad sistema. Generalno, površinske brzine gasne smeše su u opsegu 6-30 m/min, a vremena zadržavanja iznose od 0,6 do 6 s.



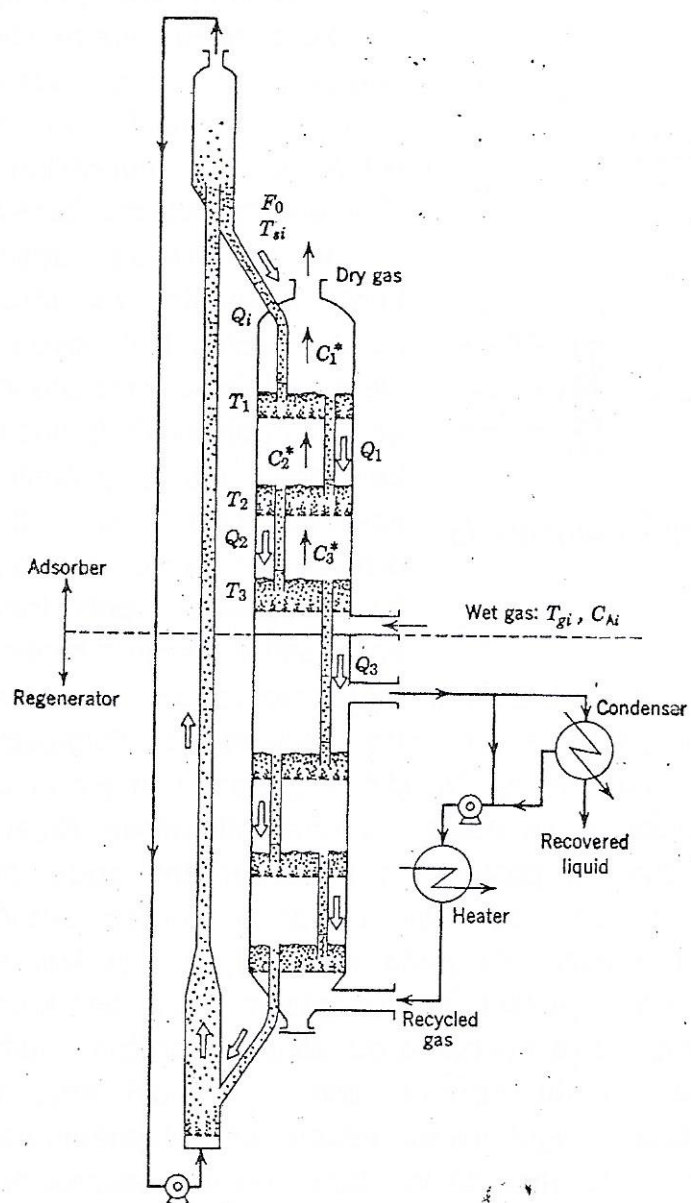
Sl. 8. Šema veza faza adsorpcije i desorpcije Bayerov-og postupka

Adsorpcija se može odigravati u pokretnom sloju, ispregradjivanom podovima (adsorberi sa podovima, višestepena fluidizacija). Kod višestepene fluidizacije ostvaruju se efektivni suprotnostrujni tokovi mase. Na slici 9 prikazan je jedan od uređaja iz ove grupe: fluidizacioni adsorber sa podovima (diskontinualnim slojem) za sušenje gasova. U adsorpcionoj zoni su postavljena tri perforirana poda, što znači da je adsorpcija trostepena. U ovoj zoni se ostvaruje suprotnostrujna adsorpcija, pošto se adsorbent kreće naniže (sa poda na pod), a gas koji se obrađuje naviše. Desorpcija zagrejanim recirkulacionim gasom, koji se kreće suprotnostrujno adsorbentu naviše, potpuno je odvojena od zone adsorpcije; jedino adsorbent iz adsorpcione zone ulazi u desorpcionu zonu i prolazi kroz tri desorpciona stepena. Sa najnižeg poda, regenerisani adsorbent se pneumatski transportuje (istovremeno se i hladi pomoću gasa za transport) na vrh adsorpcione zone (prvi pod u uređaju). Ako je fluidizacioni sloj kontinualan (nije isprekidan podovima), adsorpcija će biti jednostepena. U ovom slučaju se na vrh fluidizovanog sloja dodaje svež adsorbent, a relativno zasićen adsorbent se prelivnim elementima uvodi u zonu regeneracije. Konstrukcija ovakvog uređaja je jednostavnija u odnosu na višestepeni sistem, ali se ne može ostvariti najpovoljniji suprotnostrujni tok.

Pored navedenih adsorpcionih postupaka i adsorbera, postoji još čitav niz drugačijih rešenja i konstrukcija.

Neperiodične postupke karakteriše vremenska neprekidnost faze adsorpcije. Kontinualni rad se ostvaruje neprekidnim uvođenjem polazne smeše gasova i svežeg adsorbenta u prostor za adsorpciju i neprekidnim izvođenjem iz njega prečišćenog gasa i upotrebljenog adsorbenta. Pri adsorpciji čestice adsorbenta mogu biti u fluidizovanom stanju ili mogu biti relativno pokretnom pakovanom sloju čestica.



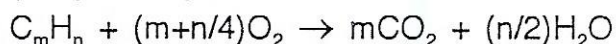


Sl. 9. Fluidizacioni adsorber sa podovima za sušenje gasova

## PROCESI SAGOREVANJA

Neki od industrijskih otpadnih gasova predstavljaju smeše isparljivih organskih jedinjenja i vazduha. Organska jedinjenja (pare, gasovi, mirisi) su veoma značajna, sa stanovišta kontrole zagađenosti vazduha, usled direktnih i sekundarnih toksičnih efekata (fotohemijski smog). Pošto su ove materije u otpadnim gasovima zastupljene u koncentracijama koje su štetne za ljudski organizam, potrebno ih je prevesti u stabilne, netoksične oblike.

Ukoliko se štetne supstance (polutanti, zagađivači) lako oksiduju (napr. ugljovodonici koji potiču od industrijskih rastvarača ili boja), onda se kontrola emisije polutanata ostvaruje sagorevanjem otpadnih gasova, do neškodljivih komponenti prema opštoj reakciji:



Sagorevanje otpadnih gasova je pogodna metoda za smanjenje emisije polutanata iz nekoliko razloga:

1. Skoro svi polutanti jakog mirisa, kada se zagreju u prisustvu kiseonika, ili potpuno sagorevaju ili se hemijski razgrađuju u stabilnije i bezopasnije oblike. U ove polutante spadaju merkaptani, vodonik sulfid i cijanovodonik.

2. Organski aerosoli se takodje efikasno uništavaju sagorevanjem. Ovakvi aerosoli se emituju iz napr. pržionica kafe, pušnica za meso, sušnica za emajl...

3. Odredjeni organski gasovi i pare, koji se ispuštaju u atmosferu, učestvuju u nastajanju smoga. Ova jedinjenja se efikasno uništavaju sagorevanjem u otvorenom plamenu.

4. Neka industrijska postrojenja, kao što su rafinerije, stvaraju velike količine gorivih otpadnih gasova kao i druge veoma toksične i štetne organske supstance. Najbezbedniji način kontrole zagađivanja u ovom slučaju je sagorevanje u plamenu direktno u dimnjaku ili u specijalno projektovanim pećima.

S obzirom da neki veoma reaktivni ugljovodonici imaju značajnu ulogu u nastajanju fotohemijskog smoga, neophodno je kontrolisati i smanjiti njihovu emisiju. Maksimalno dozvoljene koncentracije toksičnih materija se definišu raznim propisima i standardima, koji su sve rigorozniji.

Prednosti sagorevanja su mnogobrojne i uključuju:

1. potpuno uklanjanje ovih sagorljivih polutanata kada je oprema za kontrolu emisije ispravno projektovana,

2. mogućnost adaptacije opreme na umerene promene protoka i koncentracije otpadnog gasa,

3. efektivnost kontrole koja je relativno nepromenljiva za specifični gasoviti polutant,

4. efikasan rad termičkog uređaja, i



5. mogućnost ekonomičnog iskorišćenja oslobodjene toplote prilikom sagorevanja.

Nedostaci procesa sagorevanja su:

(1) visoki operativni troškovi, (2) neophodnost inercionih odvajača u nekim slučajevima, što znatno povećava troškove i (3) mogućnost pojave specijalnih problema u vezi zagađenja kada ugljovodonici sadrže i neke druge atome pored C, H i O. Primeri koji se odnose na prethodni problem su jedinjenja sa Cl, N i S. U ovim slučajevima može biti potrebna dodatna obrada produkata sagorevanja, kao što je ispiranje gasova u tečnostima (u skruberima), a takodje se može pojaviti i problem korozije. Pred toga, u slučaju katalitičkog sagorevanja mogu nastati produkti koji prouzrokuju trovanje, ili deaktivaciju katalizatora suspendovanim čvrstim česticama, ili u slučaju sagorevanja u plamenu, blokiranje gorionika. Kod termičkog i katalitičkog sagorevanja neophodno je obezbediti dodatno zagrevanje za dostizanje potrebne temperature za otpočinjanje (iniciranje) oksidacije polutanata u otpadnim gasovima.

Nekoliko faktora odredjuju projektovanje procesa sagorevanja gasovitih zagađivača: hemijski sastav zagađivača i njihova koncentracija u otpadnom gasu, ulazna temperatura otpadnog gasa u uređaj za sagorevanje, zapreminski protok gasa i dozvoljeni nivoi emisije polutanata. Na osnovu ovih informacija može se odabrati odredjeni način sagorevanja od tri osnovna:

- 1) direktno sagorevanje u plamenu
- 2) termičko sagorevanje
- 3) katalitičko sagorevanje

#### A) DIREKTNO SAGOREVANJE U PLAMENU

Pod paljenjem se podrazumeva nestacionarni proces u kojem u gorivoj smeši dolazi do progresivnog porasta brzine reakcija. Principijelno se razlikuju dva slučaja paljenja: samopaljenje i pripaljivanje (prinudno paljenje).

Samopaljenje nastaje kada se oslobodjena toplota usled egzotermnih reakcija u smeši gorivih gasova nedovoljno brzo odvodi, pa porast temperature prouzrokovan akumulacijom toplote dovodi do progresivnog samoubrzavanja reakcija u celoj zapremini reakcione smeše.

Pripaljivanje je proces kod kojeg se, od nekog lokalnog izvora paljenja, prenošenjem toplote vrši paljenje gorivih materija u blizini ovog izvora, a zatim se iz zone sagorevanja prenosi toplota visokozagrejanih produkata sagorevanja i dolazi do sukcesivnog paljenja susednih slojeva sveže reakcione smeše.

Temperatura, iznad koje se posle početnog paljenja smeše, plamen gasova ili para održava samostalno (tj. odvija se proces samopaljenja) je temperatura samozapaljivosti i zavisi od količine gorivih gasova i količine oslobodjene toplote.

Temperatura izvora pripaljivanja kod prinudnog paljenja uvek je viša od temperature samozapaljivosti.

Poznavanje granica eksplozivnosti ili zapaljivosti i otpadnih supstanci (zagadivača) i gasovitog goriva u smešama sa vazduhom, ima veliki značaj za projektovanje uređaja za sagorevanje kao i za vođenje procesa sagorevanja pri uslovima bezbednim od požara ili eksplozija. Poznavanje ovih granica će pokazati pod kojim uslovima će određeni otpadni gas održavati sagorevanje bez dodatnog obogaćenja goriva, ili daljeg dovoda vazduha.

To znači da u određenom opsegu koncentracija smeša gorivog gasa i vazduha postaje eksplozivna, tj. obrazuje se samoodržavajući plamen koji se progresivno prostire kroz celu smešu.

U smešama gorivih gasova, ako su dovoljno razblažene, ne može se prostirati plamen. Ulogu razblaživača može imati višak oksidacionog sredstva, kiseonik iz vazduha, višak goriva ili neki inertni gas. Oblast koncentracija gorivog gasa u smeši sa vazduhom, u kojoj je moguće spontano prostiranje plamena, ograničena je koncentracionim granicama zapaljivosti. Najniža koncentracija gorivog gasa ispod koje nije moguće prostiranje plamena je donja koncentraciona granica zapaljivosti, a najveća koncentracija gorivog gasa iznad koje nije moguće paljenje naziva se gornja koncentraciona granica zapaljivosti.

Oslobodjena količina toplote usled sagorevanja izražava se po  $\text{m}^3$  gasne smeše na  $21^\circ\text{C}$ . Za stehiometrijski odnos smeše ugljovodonika i vazduha, toplota sagorevanja je oko  $3725 \text{ kJ/m}^3$ . Aproximativno se uzima da donja granica zapaljivosti zahteva polovinu ove vrednosti ( $\approx 1900 \text{ kJ/m}^3$ ). Iz bezbednosnih razloga je potrebno koncentraciju zapaljivih supstanci u otpadnim industrijskim gasovima održavati ispod donje granice zapaljivosti. Generalno se preporučuje da sadržaj toplote u gasnom toku ne bude viši od  $370 - 550 \text{ kJ/m}^3$ . Najsigurnije je pravilo da se koncentracija u otpadnom gasu, koji se transportuje do komore za sagorevanje, održava ispod 25% vrednosti donje eksplozivne granice (L.E.L). Ako bi se ovaj gas slučajno potpalio pri transportu, porast temperature u smeši neće biti dovoljan za samoodržavanje sagorevanja.

Direktno sagorevanje u plamenu je proces kojim se otpadni gasovi direktno sagorevanju u komori sa ili bez naknadno dodatog goriva. U nekim slučajevima sam otpadni gas može biti zapaljiva smeša i bez dodavanja



vazduha. U drugim slučajevima, smeša će biti u oblasti zapaljivosti čak i nakon razblaživanja vazduhom. Ako se smeša nalazi van donje granice zapaljivosti, dodatak relativno male količine goriva, verovatno će je dovesti u oblast zapaljivosti.

U dobro dizajniranom plameniku otpadni gas, čija je toplota sagorevanja oko 3150-3350 kJ/m<sup>3</sup>, može se uspešno sagoreti bez pomoći goriva. Isto ovo se može postići i predgrevanjem gasnog toka za nekoliko stotina °C, pošto se sa povećanjem temperature smanjuje donja granica tj. proširuje se oblast zapaljivosti. U svakom slučaju, sagorevanje direktno u plamenu treba primenjivati samo u slučajevima kada toplota sagorevanja gorivih supstanci u

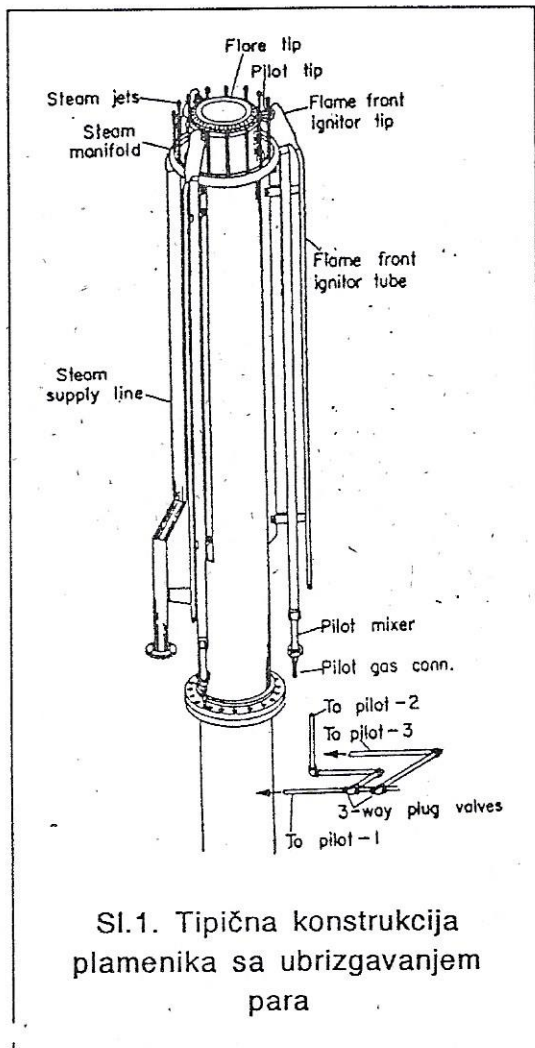
Tabela 1. Granica zapaljivosti nekih  
zagadjuvača (u vol.%)

|                  | Donja | Gornja |
|------------------|-------|--------|
| H <sub>2</sub>   | 4.0   | 75     |
| H <sub>2</sub> S | 4.3   | 45     |
| CO               | 12.5  | 74     |
| Prirodni gas     | 4.8   | 13.5   |
| Etil-etar        | 1.9   | 48     |

otpadnom gasu predstavlja znatan udeo u ukupnoj toploti potrebnoj za sagorevanje. Ovaj doprinos bi trebalo da bude veći od 50% ukupne potrebne toplote za sagorevanje zbog ekonomičnosti procesa. U tabeli 1. date su koncentracione granice zapaljivosti nekih važnih zagadjuvača iz industrijskih procesa u smeši sa vazduhom.

Jedan od problema direktnog sagorevanja u plamenu je da se formiraju oksidi azota (NO<sub>x</sub>), usled prisustva vazduha u višku i dovoljno dugog održavanja visoke temperature gasne smeše. Na ovaj način se procesom sagorevanja jedan tip polutanata zamenjuje drugim (NO<sub>x</sub> - sekundarno zagadjenje).

Da bi temperatura u komori za sagorevanje bila dovoljno visoka neophodno je obezbediti intenzivno (turbulentno) mešanje kiseonika iz vazduha i gorivog gasa, kao i dovoljno vreme zadržavanja gorivog gasa u komori. Dizajn plamenika i komore za sagorevanje kao i stepen izmešanosti gasova odredjuju ove faktore. Ako su gasovi koji se uvode u plamenik prethodno dobro izmešani, plamen će biti kraći, stabilniji, topliji i plavičast, a ako su gasovi naizmešani plamen će biti sjajan usled hemijske razgradnje para ugljovodonika uz stvaranje užarenih čestica ugljenika. Problem koji se javlja kod sagorevanja u plamenu, uglavnom u petrohemijskoj industriji i rafinerijama, je veliko variranje protoka otpadnih gasova, što ometa efikasan rad plamenika, odnosno plamen je nestabilan, može doći do njegovog otkidanja ili uvlačenja. To znači da plamenik mora biti konstruisan tako da se plamen održava stabilnim pri različitim protocima gasa, brzinama vetra (ako je sagorevanje u dimnjaku) i sastavima gasa.



Jedan od čestih problema je pojava čadjavog plamena. Gasovi će sagorevati bez stvaranja čadji samo ako je težinski odnos ugljenik-vodonik veći od 1:3. Na primer u metanu ( $\text{CH}_4$ ) je ovaj odnos 1:3 i pri njegovom sagorevanju se javlja bezdimni plamen. S druge strane, acetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) sa odnosom 1:12 sagoreva uz pojavu čadjavog plamena.

Pojava čadjavog i nestabilnog plamena može se izbeći ubrizgavanjem para organskih jedinjenja u zonu plamena, na taj način se efektivno povećava turbulencija, samim tim i brzina sagorevanja usled mnogo „boljeg kontakta kiseonika sa ugljenikom i gorivom. Usled turbulentnog režima isticanja organskih para, tokom sagorevanja se javlja kraći plamen, tj. povećana je stabilnost plamena.

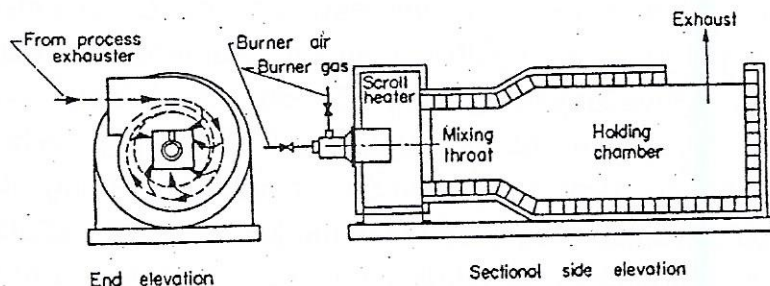
Tipična konstrukcija plamenika sa ubrizgavanjem para organskih jedinjenja je prikazana na slici 1. Kroz mlaznice postavljene oko zone plamena, se ubrizgava smeša vazduha i para organskih jedinjenja. Potrebna količina organskih para varira (od 0,05 do 0,33 kg pare/kg gasa) u zavisnosti

od koncentracije aromatičnih jedinjenja. Obezbedjen je i injekcioni (potpalni) plamenik. Ako su gorivi gasovi toliko razblaženi da se ne obezbedjuje minimalno izdvajanje toplote za održavanje sagorevanja, onda se predgrevanjem gasova u nekim slučajevima dobija dovoljna količina toplote za sagorevanje. Za predgrevanje gasova se koristi prstenasti plamenik. Ako su u gasnoj smeši prisutne kapljice ulja, one se moraju ukloniti pre uvođenja smeše u plamen u cilju bezbednog izvođenja procesa.

Sagorevanje u otvorenom plamenu se alternativno može izvoditi u zatvorenoj komori. Na slici 2. je prikazana tipična konstrukcija komore u kojoj se primenjuje kružni režim strujanja gasa, čime se obezbedjuje visok stepen turbulencije i dovoljno vreme zadržavanja (0,2-0,7 sec) u malom prostoru. Temperatura u komori se održava u opsegu  $482\text{--}760^\circ\text{C}$ , a gasoviti produkti se mogu direktno ispustiti u atmosferu, ili se njihova toplota može iskoristiti uz pomoć razmenivača toplote. Ako se ostvaruje rekuperacija toplote izlaznih



Velika pažnja se mora posvetiti projektovanju ovakvih komora za sagorevanje da bi se izbeglo pregrevanje i moguće eksplozije gasne smeše.

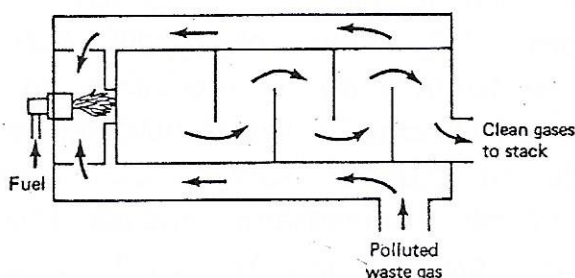


SI.2. Komora za sagorevanje

va, pošto je potrebno smešu gorivih gasova i vazduha zagrejati na temperaturu samopaljenja. Dobro projektovani sistemi su efikasni i preko 98%.

## B) TERMIČKO SAGOREVANJE

Kada su koncentracije gorivih polutanata toliko niske da ne obezbeđuju dovoljno toplote za samoodržavanje plamena (samosagorevanje), mora se pristupiti drugim načinima sagorevanja. Jedan od njih je termičko sagorevanje, koje se obično primenjuje u slučajevima kada je toplota sagorevanja gorivih gasova u opsegu 40-750 kJ/m<sup>3</sup>. Tok otpadnog gasa se prvo predgreva u razmenjivaču toplote, a zatim prolazi kroz zonu sagorevanja sa plamenikom koji se snabdeva dopunskim gorivom. Na ovaj način se gorive supstance iz otpadnog gasa zagrevanju iznad temperature samopaljenja i sagorevanju u prisustvu kiseonika prisutnog u zagadjenom gasu. Ako u otpadnom gasu nema dovoljno kiseonika za sagorevanje, onda se otpadnom gasu dodaje vazduh uz pomoć ventilatora. Glavna prednost ovog procesa, šematski prikazanog na slici



SI.3. Šematski prikaz termičkog sagorevanja

Veliki značaj pri projektovanju uređaja za termičko sagorevanje imaju: vreme, temperatura i turbulencija. Vreme zadržavanja gasova u uređaju mora biti dovoljno da bi se obezbedilo potpuno sagorevanje gorivih materija. Uobičajeno je da vreme zadržavanja iznosi 0,2-0,8 sec. Turbulencija se odnosi na intenzitet mehaničkog mešanja potrebnog za ostvarenje potpunog kontakta goriva i kiseonika, kao i gorivih polutanata sa produktima sagorevanja i toplotom oslobodjenom u

3. je da se sagorevanje izvodi u temperaturnom opsegu 540-820°C. Ovaj temperaturni opseg omogućuje niže troškove konstrukcije komore za sagorevanje, takodje izbegnuto je i nepoželjno stvaranje sekundarnih polutanata (NO<sub>x</sub>) u odnosu na sagorevanje u plamenu.



plamenu. Potpuno mešanje je mnogo značajnije pri uklanjanju mirisa nego pri kontroli emisije ugljovodonika, jer ispuštanje i vrlo malih koncentracija organskih jedinjenja od kojih potiče neprijatan miris, u atmosferu se vrlo često detektuje. Pri odgovarajućem mešanju gasova i stabilizovanjem plamena potrebno je kraće vreme zadržavanja. Povećanjem jednog ili sva tri faktora (vreme, temperatura, turbulencija) povećava se i mogućnost potpunog uklanjanja polutanata. Smanjenje bilo kog faktora zahtevaće povećanje jednog ili oba preostala faktora u cilju održavanja, istog stepena smanjenja emisije polutanata. Povećanje turbulencije odgovarajućom konstrukcijom plamenika je najjeftinija i najlakša adaptacija sistema za sagorevanje. Povećanje efikasnosti sagorevanja povećanjem vremena zadržavanja se ostvaruje samo do neke vrednosti, pošto duže vreme zadržavanja zahteva veću komoru, što znači da se cena uređaja znatno uvećava. Više temperature se mogu postići samo korišćenjem veće količine dodatnog goriva, što opet povećava operativne troškove.

Radne temperature u procesu termičkog sagorevanja variraju u zavisnosti

| Tabela 2. Temperature u procesu termičkog sagorevanja (°K) |          |
|------------------------------------------------------------|----------|
| Oksidacija ugljovodonika                                   | 780-1030 |
| Oksidacija COI                                             | 950-1060 |
| Uklanjanje mirisa oksidacijom                              | 750-980  |

od vrste gorivih polutanata u otpadnom gasu. Polutanti mogu biti ugljovodonici generalno, CO, mirisi ili kombinacija nekoliko njih. Približne srednje vrednosti radnih temperatura potrebnih za njihovo sagorevanje date su u sledećoj tabeli 2.

Temperaturni opsezi iz tabele se odnose na plamenike sa kratkim, stabilnim plamenom; za plamenike tunelskog tipa specifični temperaturni opsezi su za 100°C viši za iste oksidacione procese iz tabele. Potrebno je naglasiti da je za oksidaciju CO potrebno nekoliko stotina °C više nego za oksidaciju ugljovodonika. Značajna količina CO može nastati kao rezultat nepotpune oksidacije ugljovodonika ili drugih konstrukcionih problema. Ako radna temperatura nije dovoljno visoka da obezbedi skoro potpunu oksidaciju CO, treba obezbediti duže vreme zadržavanja gasa ili povećati radnu temperaturu. U uređajima za termičko sagorevanje koji rade na nižim temperaturama iz karakterističnog opsega za oksidaciju ugljovodonika često će se povećati sadržaj CO. Nepotpunom oksidacijom ugljovodonika mogu nastati intermedijarni produkti kao što su aldehidi, koji i sami predstavljaju vrlo toksične materije i drugi visoko toksični gasovi.

Temperatura koja se postiže u sekciji za sagorevanje ima značajan uticaj na stepen oksidacije ugljovodonika. U tabeli 3. dati su podaci za efikasnost termičkog sagorevanja ugljovodonika u zavisnosti od temperature.

Pored temperature i mnogi drugi faktori utiču na efikasnost sagorevanja. U njih spada vreme zadržavanja i stepen mešanja, kao i tip ugljovodonika u zagadjenom gasnom toku, koncentracija ugljovodonika koja se kontroliše, i tip plamenika. Temperatura takodje utiče i na efikasnost sagorevanja CO.



Tabela 3. Uticaj temperature na efikasnost sagorevanja ugljovodonika

| Efikasnost (%) | Temperatura (°K) |
|----------------|------------------|
| 75-85          | 8770-925         |
| 85-90          | 900-990          |
| 90-100         | 925-1025         |

osnovu koje se određuje veličina komora potrebna za dato kontaktno vreme.

Uopšteno, proračuni komora za termičko sagorevanje se izvode zbog određivanja potrebne količine dodatnog goriva da bi se obezbedila željena temperatura izlaznog gasa iz komora, zapremine gorivih gasova, na

### - C) KATALITIČKO SAGOREVANJE

Videli smo da termičko sagorevanje ima prednost u odnosu na direktno sagorevanje u plamenu u slučajevima kada je u otpadnom gasu relativno niska koncentracija polutanata. Tada se može koristiti i katalitičko sagorevanje polutanata, kao druga alternativa.

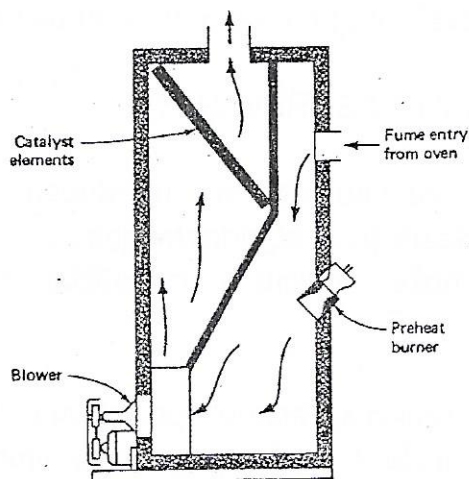
Generalno, kod katalizovanih reakcija brzinu povećanju katalizatori, supstance koje se u toku reakcije ne troše i ne menjaju bruto stehiometrijsku jednačinu reakcije. Ako se homogena reakcija odvija veoma sporo, pogodnim katalizatorom brzina se može znatno povećati. Ova pojava se objašnjava time da katalizator stvara nestabilno intermedijarno jedinjenje sa jednim reaktantom, koje zatim reaguje sa drugim reaktantom dajući željeni proizvod, uz istovremeno oslobađanje katalizatora, tako da je njegova ukupna koncentracija nepromenjena. Na ovaj način se pojavljuje novi paralelan stupanj, sa istim reaktantima i proizvodima i manjom energijom aktivacije, tako da ukupnu brzinu reakcije određuje najbrža, katalizovana reakcija (stupanj sa stvaranjem intermedijera). Najčešći tip heterogenih katalizovanih reakcija su one kod kojih je katalizator čvrsta faza, a reaktanti i proizvodi fluidi, najčešće gasovi. Kao posledica navedenog dejstva katalizatora, potrebno vreme zadržavanja u katalitičkom uređaju je mnogo manje od onog u uređaju za termičko sagorevanje. Umesto vremena zadržavanja od 0,3-0,9 sec tipičnog za termičke komore za sagorevanje, zahtevi za trajanje katalitičkog dejstva su reda veličine oko nekoliko stotinki sekunde. Kod termičkog sagorevanja je znači 20-50 puta potrebno duže vreme zadržavanja nego u katalitičkim konvertorima. U suštini se, za katalitičke uređaje, koristi "zapreminska brzina" umesto vremena zadržavanja. Zapreminska brzina se definiše kao odnos protoka gasa ( $m^3_N/h$ ) i zapremine katalitičkog sloja ( $m^3$ ), (space velocity, S.V.).

Druga značajna prednost katalitičkog uređaja u procesu sagorevanja je da je temperatura samopaljenja (temperatura iniciranja reakcije) niža nego kod homogene reakcije, kao posledica smanjenja energije aktivacije u prisustvu katalizatora. S toga se otpadni gas ne mora zagrevati do toliko visokih temperatura koje su potrebne za termičko sagorevanje (tj. homogenu reakciju).

Katalitičkim sagorevanjem otpadnih gasova, neophodna temperatura za egzotermnu oksidaciju organskih gasova i para može se sniziti i za  $500^{\circ}\text{C}$  u odnosu na termičko sagorevanje.

Dodatna prednost katalitičkog sagorevanja u odnosu na termičko je što je sada potrebna samo stehiometrijska količina kiseonika za oksidaciju, pa se minimizuju zahtevi za predgrevanje reakcione smeše.

Većina otpadnih gasova iz industrijskih postrojenja su na relativno niskoj temperaturi, pa je



Sl.4. Šematski prikaz katalitičkog konvertora

potrebno predgrevanje gasa do temperature na kojoj otpočinje katalitičko sagorevanje polutanata u uređaju za sagorevanje. Karakterističan opseg temperatura iniciranja reakcije oksidacije je između  $320$  i  $540^{\circ}\text{C}$ . Ovaj temperaturni opseg je ispod opsega temperatura samopažjenja u procesu termičkog sagorevanja, što znači da je otpadne industrijske gasove potrebno samo malo dogreјati. Reakcija sagorevanja se odvija na površini katalizatora (unutrašnjoj i spoljašnjoj), tj. na aktivnim centrima. Iako se na površini katalizatora odvija veoma egzotermna reakcija, ne pojavljuje se otvoren plamen u uređaju. Efikasnost katalitičkog sagorevanja je vrlo visoka 95-98%, tako da se izlazni gas iz katalitičkog konvektora sastoji uglavnom od  $\text{CO}_2$ , vodene pare i azota (potpuno prevodjenje polutanata u netoksične gasove).

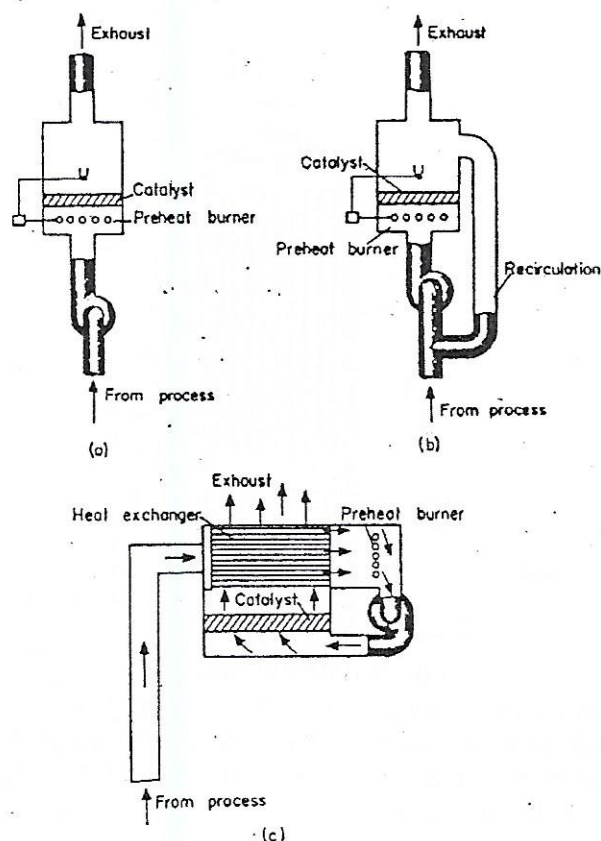
Šematski prikaz jednog katalitičkog konvertora prikazan je na slici 4, dok su na slici 5. prikazana različita konstruktivna rešenja, gde se toplota izlaznih gasova koristi za predgrevanje ulazne smeše (b,c). Na slici 6 prikazan je manji industrijski reaktor sa pakovanim slojem katalizatora.

Pošto su za katalitičko sagorevanje potrebne niže temperature, i produkcija sekundarnih polutanata (uglavnom  $\text{NO}_x$ ) je veoma niska čak i pri relativno dugom vremenu zadržavanja u uređaju, što predstavlja još jednu prednost ovog načina uklanjanja polutanata iz otpadnih gasova.

Mnogo supstanci ima katalitičke osobine, ali se samo neke od njih koriste u katalitičkom tretmanu otpadnih gasova.



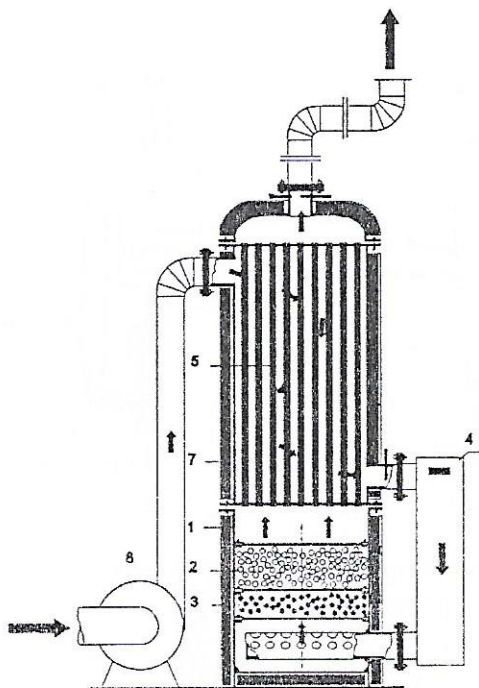
- a) Predgrevanje gasne smeše gorionikom
- b) Predgrevanje gasne smeše gorionikom (u inicijalnoj fazi) i recirkulacijom dela produkta sagorevanja
- c) Predgrevanje gasne smeše gorionikom (u inicijalnoj fazi) i predgrevanje pomoću razmenjivača toplote



Sl.5. Šematski različiti varijanti izvođenja procesa

Katalizator je ustvari aktivna komponenta (plemeniti metali, oksidi metala ili neka druga oksidaciona supstanca), koja se nanosi na nosač od inertnog materijala. Najčešće korišćen nosač katalizatora je  $\gamma$ -alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Ona je inertna za većinu reakcionih sistema, strukturno stabilna i na relativno visokim temperaturama. Za nosače se pored alumine koriste: silikagel, dijatomejska zemlja, aktivni ugalj itd.. Da ne bi bili previsoki operativni troškovi kontrole zagađenja vazduha, aktivna supstanca ne sme biti preskupa, treba da ima relativno dug vek trajanja i da efikasno funkcioniše kao katalizator u što širem opsegu temperatura. Nosač katalizatora treba da je od materijala koji se lako oblikuje presovanjem poroznih čestica praha u različite oblike: prstenove, cilindre, tablete, sfere. Formirana zrna nosača imaju veoma poroznu strukturu, što obezbeđuje potrebnu ukupnu površinu katalizatora za katalitičku reakciju. Takodje, nosač mora biti strukturno stabilan, hemijski inertan i da poseduje mehaničku čvrstoću. Na slici 7 prikazan je presek zrna katalizatora  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , kod koga je platina impregnisana na poroznom nosaču samo u površinskom sloju debljine oko 100  $\mu\text{m}$  (model "ljuske jajeta").

Sloj katalizatora u uređaju treba da bude što uniformniji da bi se izbeglo realno proticanje gasa kroz sloj, tj. kanalisanje, opstrujavanje i zastoje zone, pošto ove pojave znatno utiču na smanjenje stepena konverzije i efikasnosti rada uređaja. Takodje, u sloju katalizatora ne sme biti preveliki pad pritiska.



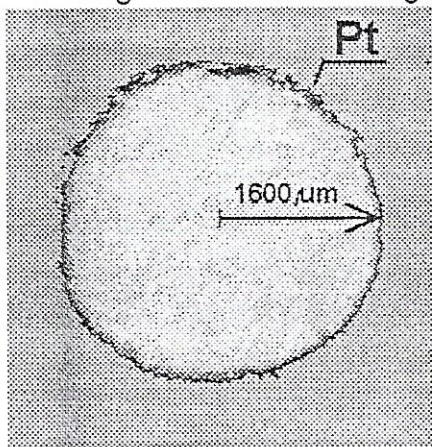
Sl.6. Katalitički reaktor

(1-reaktor, 2-pakovani sloj katalizatora, 3-pakovani sloj za ravnomernu raspodelu gasa, 4-električni predgrejač, 5-cevni razmenjivač toplote, 6-ventilator, 7-izolacija)

alumine. Ugljovodonici veće molekulske težine se mnogo lakše oksiduju nego ugljovodonici manje molekulske težine. Katalitička reaktivnost organskih jedinjenja u zavisnosti od molekulske strukture raste u sledećem poredku:

Aromatična jedinjenja < razgranati parafini < normalni parafini < olefini < acetileni

Katalitička oksidacija gasovitih plutanata je veoma atraktivna s obzirom da su energetske zahteve mnogo manji nego kod termičkog sagorevanja. Kolike će biti energetske uštede pre svega zavisi od vrste gasovitih polutanata u otpadnom industrijskom gasu.

Sl.7. Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizator (IHTM, Beograd)

(Sadržaj Pt-0.12 mas.%, specifična površina 140 m<sup>2</sup>/g)

U realnim procesima katalitičkog sagorevanja otpadnih gasova, potrebna ukupna površina katalizatora u sloju treba da obezbedi zapreminsku brzinu (S.V.) od približno 0,2  $\text{ft}^2/(\text{scf}/\text{min})$ . Za neke otpadne supstance koje se teže oksiduju potrebno je obezbediti S.V.  $\approx 0,5 \text{ ft}^2/(\text{scf}/\text{min})$ . Kao još jedna podloga za dizajn katalitičkog konvertora, koristi se približan podatak da za postizanje 85-95% konverzije polutanata, treba da se obezbedi 0,5-2,0  $\text{ft}^3$  na svakih  $10^6 \text{ scf}/\text{min}$  otpadnog gasa.

Najčešće korišćeni katalizatori za uklanjanje velikog broja organskih gasova i para su plemeniti metali: platina i paladijum fino dispergovani na zrnju inertnog nosača, najčešće

alumine. Ugljovodonici veće molekulske težine se mnogo lakše oksiduju nego ugljovodonici manje molekulske težine. Katalitička reaktivnost organskih jedinjenja u zavisnosti od molekulske strukture raste u sledećem poredku:

U tabeli 4 su date temperature za iniciranje katalitičkog uklanjanja polutanata iz nekih industrijskih procesa. U rastvarače, navedene u tabeli, spadaju toluol, metil-etil-keton, ksilol, alkoholi i drugi.

Temperatura katalizatora je nešto iznad temperature otpadnih gasova koji se sagorevaju, i porast temperature gasova se približno može odrediti na osnovu oslobodjene toplote tokom hemijske reakcije oksidacije.



Tabela 4. Približne temperature na ulazu u reaktor za iniciranje procesa katalitičkog sagorevanja

| Proces                      | Komponenta koja se sagoreva             | Približna inicijalna temperatura |
|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| Katalitičko kreiranje       | CO, ugljovodonici                       | 600-700 °F                       |
| Proizvodnja formaldehida    | H <sub>2</sub> , metan, CO, formaldehid | 650 °F                           |
| Proizvodnja polietilena     | Ugljovodonici                           | 500-1200 °F                      |
| Proizvodnja azotne kiseline | Azotni oksidi                           | 500-1200 °F                      |
| Štamparije                  | Rastvarači                              | 600 °F                           |

U realnim katalitičkim uređajima pad pritiska u sloju je relativno mali, reda veličina  $10^2$  Pa. Imajući u vidu sve prednosti katalitičkog sagorevanja u odnosu na druge načine prečišćavanja (visoka efikasnost, niska potrošnja energije, vrlo niska produkcija sekundarnih polutanata (NO<sub>x</sub>), i mali gabarit uređaja), troškovi izrade uređaja i operativni troškovi su uglavnom niski, izuzimajući sam katalizator koji je najskuplja komponenta celog uređaja.

Troškovi održavanja katalizatora zavise od prirode otpadnoj gasa i od radnog veka katalizatora. Efikasnost katalizatora, u smislu ubrzanja reakcije, menja se sa vremenom, tj. aktivnost katalizatora se smanjuje tokom njegovog korišćenja. Ponekad do pada aktivnosti dolazi veoma brzo (za nekoliko sekundi) dok je u drugim slučajevima katalizatore potrebno regenerisati ili zameniti tek nakon nekoliko godina upotrebe. U svakom slučaju, katalizatore koji se deaktiviraju potrebno je s vremena na vreme regenerisati ili zameniti.

Razlikuju se tri osnovna uzroka deaktivacije:

1) Transformacije strukture katalizatora. Usled dužeg rada katalizatora na temperaturama višim od maksimalno dozvoljene (tabela 5), u slučaju  $\gamma$ -alumina kao najčešće korišćenog nosača, može doći do prelaska iz  $\gamma$  modifikacije u  $\alpha$  - modifikaciju. Isto tako nosač od amorfne silike može preći u kristalni oblik. Tekstura katalizatora se često menja tokom rada, što se objašnjava promenama raspodele veličine pora. U nekim slučajevima može doći do segregacije aktivne i inertne komponente katalizatora, ili do stvaranja čvrstog rastvora jedne komponente u drugoj. Vrlo često se javlja pojava sinterovanja metala nanetih na nosač. Sve ove pojave vode deaktivaciji katalizatora.

2) Taloženje čvrstih nečistoća. Usled nanošenja neke čvrste materije može doći do brze deaktivacije fizičkim blokiranjem površine katalizatora. U nekim slučajevima sadržaj čvrstih čestica i prašine u otpadnom gasu može biti veliki, pa se pre uvođenja gasa u katalitički konvertor prašina mora izdvojiti na pogodan način. Nečistoće koje se talože na katalizatoru mogu biti i čvrsti produkti sagorevanja, a uobičajeni primer je nanošenje ugljenika koji nastaje tokom katalitičkog kreiranja ugljovodonika. Organska jedinjenja sa fosforom,



koja se sreću u aerosolima, mogu obrazovati tanak sloj fosforne kiseline po površini katalizatora, blokirajući tako aktivne centre. Teški metali napr. olovo i arsen, deluju slično fosfatima obrazujući tanke deaktivirajuće slojeve. Taloženje čvrstih čestica na zrnima katalizatora smanjuje raspoloživu aktivnu površinu za hemijsku reakciju, a samim tim efikasnost sloja kao i radni vek katalizatora. Uobičajeni radni vek katalizatora koji se koriste za prečišćavanje otpadnih gasova, u odsustvu taloženja nečistoća, iznosi 3-5 godina. Ukoliko su nataložene čestice otporne na dejstvo visoke temperature, kao što su čestice aluminijuma, silicijuma, gvoždja, onda je deaktivacija trajna i katalizator se potpuno mora zameniti.

3) Trovanje je proces deaktivacije kada se površina katalizatora polako menja usled hemisorpcije teško odstranjivih materijala ("otrova") na aktivnim centrima površine. Ukoliko je hemisorpcija "otrova" povratna, promenom radnih uslova može se reaktivirati katalizator. Ukoliko je hemisorpcija nepovratna, deaktivacija je trajna. U tom slučaju treba izvršiti hemijsku obradu površine ili potpunu zamenu istrošenog katalizatora. Metali (aktivna komponenta) mogu biti zatrovani velikim brojem jedinjenja. Na pr. na Pt se odsorbuje S, kiseli katalizatori se lako truju baznim jedinjenjima, oksid bakra (aktivna komponenta) i gasoviti HCl iz smeše reaguju dajući hlorid bakra koji se odsorbuje na površini, gasovi koji sadrže sumporna jedinjenja reaguju sa oksidom aluminijuma (nosač) dajući fosfate itd.

Deaktivacija katalizatora može biti ravnomerna za sve aktivne centre na površini (homogeni napad na centre) i selektivna kad su najpre napadnuti i onesposobljeni aktivniji centri (preferencijalni napad na centre). Homogeni napad na centre je karakterističan za fizičko nanošenje materija na površinu katalizatora (taloženje nečistoća), dok do preferencijalnog napada na centre dolazi pri hemisorpciji malih količina otrova.

S obzirom na prirodu otpadnih gasova iz mobilnih izvora, pri izboru efikasnog katalizatora za uklanjanje polutanata, deaktivacija predstavlja osnovni problem. Vrlo je važno poznavati mehanizam deaktivacije, na osnovu kog se mogu postaviti realne osnove za projektovanje i predviđanje efikasnosti rada katalitičkog uređaja za sagorevanje.

Na kraju, treba napomenuti da za većinu katalizatora postoji maksimalno dozvoljena temperatura u određenom opsegu radnih uslova, čija je vrednost oko 820°C. Pri prolasku otpadnog gasa kroz sloj katalizatora, poželjan porast temperature usled reakcije sagorevanja iznosi od 100 do 200°C.

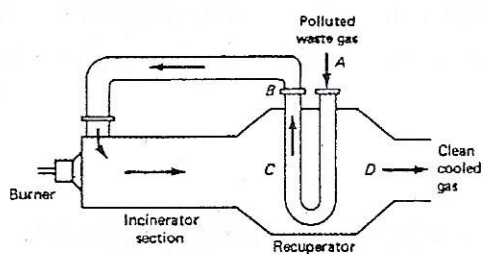
Ako se temperatura ne kontroliše, naglo povećanje koncentracije polutanta iznad neke uobičajene vrednosti može prouzrokovati burnu i



nekontrolisanu reakciju i nagli porast temperature gasa može dovesti do uništenja katalizatora.

#### D) SAGOREVANJE SA REKUPERACIJOM TOPLOTE

Potrebno je navesti još jedan važan uslov, bez obzira koji se tip sagorevanja otpadnih gasova i para primenjuje (direktno u plamenu, termičko, katalitičko). U zavisnosti od tipa sagorevanja, temperatura izlaznih (prečišćenih) gasova iz uređaja za sagorevanje varira od 300 - 1100° C. Kao posledica procesa sagorevanja, izlazni gas ima relativno visoku temperaturu i značajni sadržaj energije, a pošto su saogrevanjem uklonjene sve toksične ili korozivne supstance izlazni gas je u suštini inertan. Stoga se prečišćen izlazni gas može iskoristiti u nekom drugom procesu kao izvor znatne količine toplote.



Sl.8. Šematski prikaz sagorevanja sa rekuperacijom toplote

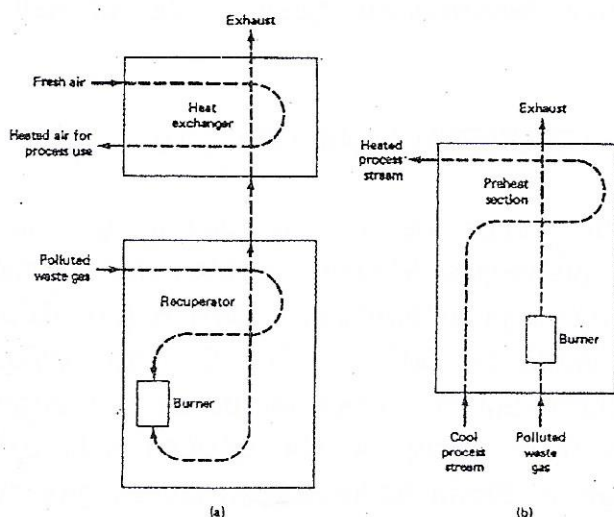
Direktno sagorevanje u plamenu daje izlazni gas sa karakterističnom temperaturom oko 1400°C, i visokim sadržajem toplote. Ovaj izlazni gas može biti veoma koristan kao toplotni izvor za neke procese, naročito ako je protok gasa relativno veliki. Izlazni gasovi procesa termičkog i katalitičkog sagorevanja imaju znatno niže temperature (300-600°C), i

moгу se iskoristiti za predgrevanje ulaznog (otpadnog) gasa u uređaj za sagorevanje. Što se više toplote oslobodi tokom procesa sagorevanja otpadnog gasa, izlazni gasovi će imati višu temperaturu, pa će za zagrevanje ulazne smeše na temperaturu samopaljenja, odnosno iniciranja katalitičke reakcije trebati manje dodatnog goriva. Na slici 8 dat je šematski prikaz komore za termičko sagorevanje sa rekuperacijom toplote izlaznog gasa. Efikasnost rekuperatora je definisana izrazom:

$$\eta = \frac{T_B - T_A}{T_C - T_A}$$

gde su pozicije A, B, C, i D naznačene na slici. Kvantitativno efikasnost rekuperatora predstavlja odnos aktuelnog porasta temperature ulaznog otpadnog gasa i maksimalno mogućeg porasta temperature. U praktičnim slučajevima efikasnost rekuperatora se kreće od 60-70%. Stoga je potreba za dodatnim gorivom samo 15-35% od količine koja je potrebna za proces bez rekuperacije toplote.

Upotreba rekuperatora u cilju energetske uštede u procesima termičkog i katalitičkog sagorevanja ne mora da obezbedi i ekonomske uštede. Smanjenje troškova goriva se mora uporediti sa procenjenim ulaganjima u dodatnu opremu. Razmenjivač toplote mora biti relativno veliki da bi obezbedio potrebnu količinu prenosa toplote, pošto su koeficijenti prenosa toplote za sisteme gas-



Sl.9. Šematski prikaz mogućih načina rekuperacije toplote

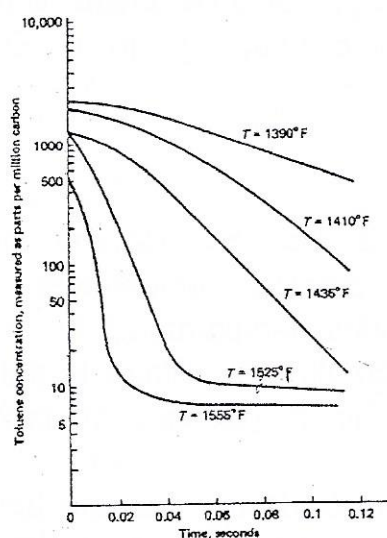
prikazano na slici 9b.

gas relativno mali. Cena uređaja za sagorevanje se skoro duplira dodatnom rekuprecijom. Tok čistog gasa, koji na izlazu iz rekuperatora može još uvek imati relativno visoku temperaturu, može se iskoristiti kao izvor toplote u nekom drugom procesu, kao što je prikazano na slici 9a. Ne mora se obavezno koristiti vreo gas koji napušta komoru za sagorevanje u rekuperatoru. Raspoloživa energija ovog gasnog toka može se direktno koristiti za predgrevanje nekog drugog toka fluida kao što je

## KINETIKA REAKCIJA I KATALIZA U PROCESIMA SAGOREVANJA

### A) NEKE EKSPERIMENTALNE KINETIČKE JEDNAČINE HOMOGENIH REAKCIJA

Za postizanje željenog stepena redukcije ugljovodonika u procesima sagorevanja, izuzetno su značajna tri faktora: vreme, temperatura i mešanje (odnosno turbulencija). Kinetika reakcija određuje potrebnu radnu temperaturu i potrebno vreme zadržavanja za oksidaciju gasovitih polutanata. S druge strane,



Sl.10. Promena koncentracije toluola sa vremenom

vreme zadržavanja i temperatura direktno utiču na dimenzije uređaja za sagorevanje i dodatnu potrošnju goriva. Stoga su kinetički parametri reakcije oksidacije ugljovodonika i ugljen monoksida neophodne informacije za definisanje podloga za projektovanje.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja oksidacije toluola na laboratorijskom nivou (prečnik reakcionog suda je 5 inča) prikazani su na slici 10. Uticaj temperature na proces oksidacije je očigledan. Na temperaturama iznad 1050 K, skoro potpuna oksidacija toluola se postiže za 0,1 s. (Temperature označene na slici su merene na izlazu iz reakcionog suda). Slični podaci dobijeni pri oksidaciji metana, heksana i



cikloheksana ukazuju na isti trend promene koncentracije za isti opseg radnih temperatura i vremena kao kod toluola. Eksperimentalni podaci pokazuju da je za postizanje stepena konverzije ugljovodonika od 90% i više, potreban vrlo kratak vremenski period.

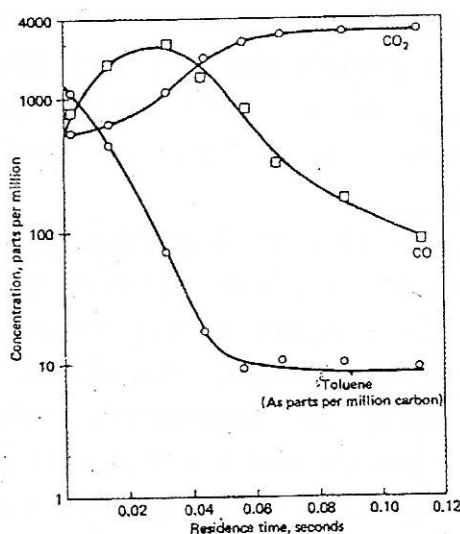
Na osnovu eksperimentalnih podataka prikazanih na slici 10, kao i ispitivanja oksidacije drugih ugljovodonika, utvrđeno je da je brzina reakcije pseudo-prvog reda, s obzirom da je kiseonik prisutan u višku pa je i njegova koncentracija približno konstantna. Vrednosti konstante brzine ( $k$ ) i energije aktivacije ( $E$ ) se dobijaju na osnovu obrade eksperimentalnih podataka izrazom Arrhenius-ovog tipa:

$$-\frac{dC_{HC}}{d\tau} = kC_{HC} = k_0 C_{HC} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

gde je  $C_{HC}$  koncentracija ugljovodonika, a  $k_0$  je predeksponencijalna konstanta brzine (faktor učestanosti sudara). U tabeli 5 su date eksperimentalno određene vrednosti  $k_0$  i  $E$  za četiri uobičajena ugljovodonika i za ugljen monoksid. Za oksidaciju CO su dobijene vrednosti  $k_0$  i  $E$  za dva seta temperatura, veće od 1030 K i manje od 1030 K. Interesantan podatak je da se CO mnogo teže oksiduje u poredjenju sa ugljovodonicima.

Tabela 5. Eksperimentalni podaci za tipične reakcije katalitičke oksidacije

| Supstanca     | E (kJ/gmol) | $K_0$                                              |
|---------------|-------------|----------------------------------------------------|
| Toluol        | 245         | $6.56 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$                |
| Heksan        | 220         | $4.51 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$                |
| Cikloheksan   | 199         | $5.13 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$                |
| Prirodni gas  | 206         | $1.65 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$                |
| CO (>1400 °K) | 167         | $2.5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ ppm}^{1/2}$  |
| CO (<1400 °K) | 418         | $\approx 10^{20} \text{ s}^{-1} \text{ ppm}^{1/2}$ |



Sl.10. Promena koncentracije toluola sa vremenom

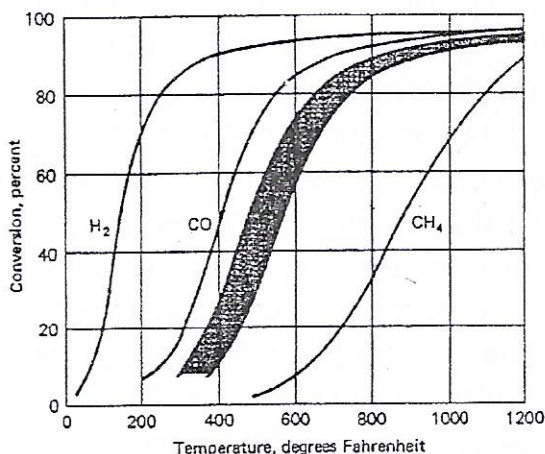
Na slici 11 su dati koncentracioni profili tokom vremena na 1100K za toluol, CO i CO<sub>2</sub>. Koncentracioni profili za CO i CO<sub>2</sub> ukazuju da oksidacija CO počinje nakon dužeg vremena nego što je potrebno za oksidaciju toluola. Očigledno je da se CO mnogo teže oksiduje u odnosu na ugljovodonik za istu vrednost temperature i vremena. Za sagorevanje CO je potrebna viša temperatura i duže vreme u poredjenju sa ugljovodonicima. Stoga, konstrukcija uređaja samo za sagorevanje ugljovodnika može biti različita nego za slučaj kad je pored ugljovodonika prisutan i CO.

## B) NEKE OSNOVNE POSTAVKE KATALITIČKIH UREĐAJA ZA SAGOREVANJE

Katalitičku oksidaciju određuju dva nezavisna stupnja: (1) prenos mase i toplote između površine (spoljašnje i unutrašnje) katalizatora i gasne faze, (2) hemijska reakcija na graničnim površinama (na aktivnim centrima). Za razliku od prenosa mase do spoljne površine katalizatora, koja je uzastopna u odnosu na površinsku hemijsku reakciju, difuzija reaktanata u pore se odigrava istovremeno sa hemijskom reakcijom na unutrašnjim površinama, pa je neophodna simultana analiza oba stupnja. U slučaju hemijske reakcije prvog reda moguće je povezati izraze za brzinu spoljne difuzije, hemijske reakcije i unutrašnje difuzije u opšti izraz za brzinu ukupnog procesa, jer su brzine svih ovih stupnjeva linearne funkcije koncentracije. Kao što je spomenuto, reakcija oksidacije ugljovodonika se može aproksimirati izrazom za brzinu pseudo prvog reda, pošto je kiseonik prisutan u višku. Ako se radni uslovi podese tako da se može zanemariti otpor difuzije unutar pora katalizatora, (što je najčešće slučaj u praksi), pa preovladjuje hemijska reakcija na spoljnoj površini, onda je konstanta brzine ukupnog procesa ( $k$ ) u vezi sa konstantom brzine spoljnog prenosa mase ( $k_{mt}$ ) konstante hemijske reakcije ( $k_{chem}$ ) data izrazom:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{mt}} + \frac{1}{k_{chem}}$$

Na relativno niskim temperaturama (napr. 425-525 K) ukupni proces određuje hemijska reakcija kao sporiji stupanj, tj.  $1/k = 1/k_{chem}$ , jer je  $k_{mt} \gg k_{chem}$ . Na dovoljno visokim temperaturama 600-750 K, hemijska reakcija postaje dovoljno brza tako da je  $k_{chem} \gg k_{mt}$ , pa ukupni proces određuje spoljni prenos mase:  $1/k = 1/k_{mt}$ .



Sl.11. Krive konverzija-temperatura

čak i na nižim temperaturama od 200 F (94°C) konverzija  $H_2$  je zadovoljavajuća. Visoki stepeni konverzije  $H_2$  se postižu u opsegu 300-500 F (150-260°C). Za postizanje visokih stepena konverzije ugljovodonika potrebna je znatno viša temperatura 750-1000F (400-

Na slici 11 prikazane su krive stepen konverzije-temperatura za  $H_2$ , CO,  $CH_4$  i isparljive ugljovodonike pri oksidaciji na Pt/ $Al_2O_3$  katalizatoru.

Ovaj tip katalizatora pokazuje visoku selektivnost u odnosu na  $H_2$ , tj.



540°C). Deo krivih koji odgovara nižim temperaturama na kojima stepen konverzije naglo raste sa temperaturom, odgovara uslovima kada ukupni proces odredjuje hemijska reakcija. Horizontalni deo krive (više temperature) odgovara uslovima kada ukupni proces odredjuje spoljni prenos mase. Sa slike se vidi da je Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizator najmanje aktivan u slučaju metana, odnosno za visoke konverzije potrebne su veće temperature od 1100 F (600°C). Katalizatori, koji se koriste za prečišćavanje otpadnih gasova, biraju se tako da favorizuju oksidaciju većine štetnih supstanci prisutnih u smeši. Kao što se vidi na slici 11, specifična aktivnost katalizatora varira u zavisnosti od tipa molekula koji se oksiduje. U zavisnosti od operativnih uslova u uređaju za sagorevanje (vreme, temperatura), varira i ostvareni stepen konverzije različitih ugljovodonika iz otpadnih gasa.

Napomena:  $T(^{\circ}\text{C}) = 5\{T(\text{F}) - 32\} / 9$

---

## SISTEMI ZA PREČIŠĆAVANJE SUMPORNIH OKSIDA

Nekontrolisane emisije  $\text{SO}_2$ , nastale sagorevanjem fosilnih goriva, zavise od sadržaja sumpora u gorivu koji se kreće u granicama od 0.1 - 5% . Oko 90% sumpora se pri sagorevanju emituje kao  $\text{SO}_2$ , a oko 5 do 10% sumpora se zadržava u pepelu uglja.

Generalno se može zaključiti da na svakih 1% težinskih sumpora u uglju, sagorevanjem preko dimnih gasova emituje se 2000 mg/m<sup>3</sup> sumpor-dioksida. Da bi se ovako velika emisija redukovala do nekih 400 mg/m<sup>3</sup>, što predstavlja prosečnu graničnu vrednost dozvoljenih emisija, treba sniziti emisije  $\text{SO}_2$  čak do 90%.

Među industrije koje ispuštaju značajne količine sumpora spadaju: rafinerije, topionice ruda, fabrike sumporne kiseline, fabrike sumpora, postrojenja za odsumporavanje prirodnog gasa i fabrike celuloze i hartije.  $\text{SO}_2$  emituju i spaljivači čvrstih otpadaka. Emisija  $\text{SO}_2$  iz saobraćajnih sredstava predstavlja manji deo od ukupne emisije  $\text{SO}_2$ .

U industrijski razvijenoj zemlji, različite grupe industrija doprinose ukupnoj emisiji  $\text{SO}_2$  na sledeći način:

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| -termoelektrane i toplane uključujući industrijske termoelektrane.....      | 50% |
| -industrijsko sagorevanje.....                                              | 25% |
| -industrijski procesi.....                                                  | 9%  |
| -potrošnja goriva na malo u domaćinstvima, ustanovama i maloj privredi..... | 14% |
| -saobraćaj .....                                                            | 2%  |

Izneti podaci potvrđuju činjenicu da se najveće količine  $\text{SO}_2$  emituju prilikom delatnosti u kojima se vrši sagorevanje goriva.

Odsumporavanje dimnih gasova emitovanih iz energetske postrojenja je poznata tehnologija sa velikim brojem različitih ispitanih i instaliranih procesa.

Mnoge zemlje imaju sopstvene limite emisija koje se razlikuju prema strogosti usvojenih zahteva u oblasti zaštite vazduha od zagađivanja. Treba napomenuti da zahtevi nisu tako strogi za industrijske energane kao što su za termoelektrane, jer su im kapaciteti različiti – za industriju su manji, a osim toga može se koristiti para i topla voda za zagrevanje lokalnih naselja.

### 1. POSLEDICE FORMIRANJA $\text{SO}_2$ I NJEGOVOG ISPUŠTANJA U ATMOSFERU

Ukupna reakcija formiranja  $\text{SO}_2$  iz sumpora u fosilnim gorivima je:

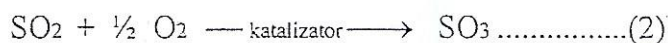


Reakcija je veoma egzotermna – oslobođena toplota iznosi 296,800 kJ/kgmol na 25°C. Pored  $\text{SO}_2$ , u reakciji sagorevanja nastaje i mala količina sumpor-trioksida,  $\text{SO}_3$ . Odnos nastalog  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  se kreće u granicama 40:1 do 80:1.

Pri atmosferskim uslovima sumpor-dioksid može reagovati i kao oksidujuć i redukujuć agens. Od važnosti sa aspekta aero zagađenja je sposobnost  $\text{SO}_2$  da reaguje fotohemijski ili katalitički sa drugim zagađivačima u atmosferi, formirajući sumpor-trioksid, sumporu

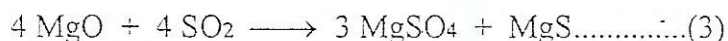


kiselinu i razne soli sumporne kiseline. Na primer, u prisustvu oksida metala kao katalizatora u atmosferi odigrava se reakcija:

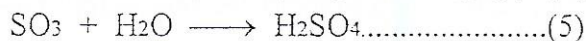
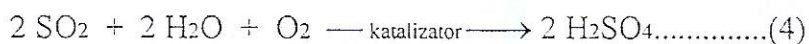


Konverzija  $\text{SO}_2$  u  $\text{SO}_3$  pri atmosferskim temperaturama je spor proces. Međutim, kada se  $\text{SO}_2$  ispusti u atmosferu, proces se ubrzava heterogenom katalizom na površini suspendovanih čestica. Mnoge supstance, uključujući i okside azota, reaguju kao katalizatori u reakciji (2). Ovo takođe dovodi i do formiranja većih količina sulfatnih aerosola, koji su veoma štetni po ljudsko zdravlje.

Neki oksidi metala oksidišu sumpor-dioksid direktno do sulfata:



Pri visokoj vlažnosti u atmosferi odigravaju se još dve reakcije:



Reakcija oksidacije (4) brzo se odigrava u prisustvu metalnih soli, kao što su sulfati i hloridi gvožđa i magnezijuma. Ove soli predstavljaju katalizatore reakcije. Kapljice sumporne kiseline koje se formiraju, pored svog jakog korozivnog dejstva, smanjuju i vidljivost. Reakcije (4) i (5) su takođe odgovorne za fenomen kiselih kiša.

## 2. PREGLED TEHNOLOGIJA ODSUMPORAVANJA

Metode za sniženje emisije  $\text{SO}_2$  se mogu klasifikovati u tri grupe:

1. Metode primenjene pre sagorevanja kao što su promena goriva i tretman goriva.
2. Tehnike koje se primenjuju u zoni sagorevanja gde se sorbent injektira u gorivo koje sagoreva.
3. Prečišćavanje dimnog gasa posle sagorevanja.

## 3. METODE ZA REDUKCIJU EMISIJE $\text{SO}_2$ PRE SAGOREVANJA

### 3.1. PROMENE GORIVA

Kako je emisija sumpor-dioksida direktno povezana sa sadržajem sumpora u gorivu, najadekvatniji način za kontrolu (suzbijanje) emisije je korišćenje goriva sa niskim sadržajem sumpora. Tu spadaju ligniti sa 0,5 do 1% sumpora, ali njihova upotreba je ograničena njihovom cenom, u koju su uključeni i troškovi transporta koji mogu biti znatni ukoliko su nalazišta lignita udaljena od elektrane. Osim toga, potrebno je utrošiti znatno veću količinu

uglja da bi se dobila određena količina pare, što dovodi do povećanja količine pepela kao čvrstog otpada.

Sličnu taktiku mogu primeniti energane koje sagorevaju naftu sa visokim sadržajem sumpora. Kao i kod uglja, svako povećanje tražnje na tržištu za naftom sa niskim sadržajem sumpora, dovelo bi do povećanja cena.

Elektrane koje sagorevaju bilo ugalj bilo naftu, mogu se rekonstruisati, sa različitim teškoćama, na ložišta koja sagorevaju prirodni gas. Ovo je ekonomski opravdano rešenje za zemlje koje imaju svoje izvore gasa.

### 3.2. PREČIŠĆAVANJE GORIIVA

Ova metoda ima ograničenje u kapacitetu sniženja sumpora u gorivu i može biti samo prilog ukupne strategije odsumporavanja.

Sumpor u uglju se nalazi prisutan kao organski vezan sumpor oko 30% i integralni je deo matice uglja pa se ne može ukloniti fizičkom obradom. Neorganski vezanog sumpora u uglju ima malo – do 1%. On se nalazi u obliku pirita ( $\text{FeS}_2$ ) koji je prisutan u vidu odvojenih čestica tako da ga je znatno lakše ukloniti fizičkim metodama. Uklanjanje se postiže mlevenjem uglja do čestica prečnika 0,5 do 100  $\mu\text{m}$  i primenom postupaka selektivne flotacije kojom se odvaja pirit od uglja.

Troškovi takvog prečišćavanja su 2 – 3 dolara po toni, a može se redukovati količina sumpora u uglju do 30%. Nedostaci procesa su smanjen prinos uglja i skup proces sušenja uglja (vlažan ugalj ima ograničenu primenu). U Švedskoj je razvijena tehnologija sa primenom vlažnog uglja čija je cena primene 10 – 20 dolara po toni. U okviru ove cene se kreću i druge napredne tehnike fizičke separacije uz višestepenu flotaciju ili magnetnu separaciju pirita.

Nafta se može odsumporavati u rafinerijama, ali to je ekonomično samo za naftu sa visokim sadržajem sumpora i kada se njegovo uklanjanje traži zbog drugih procesa koji slede u rafineriji.

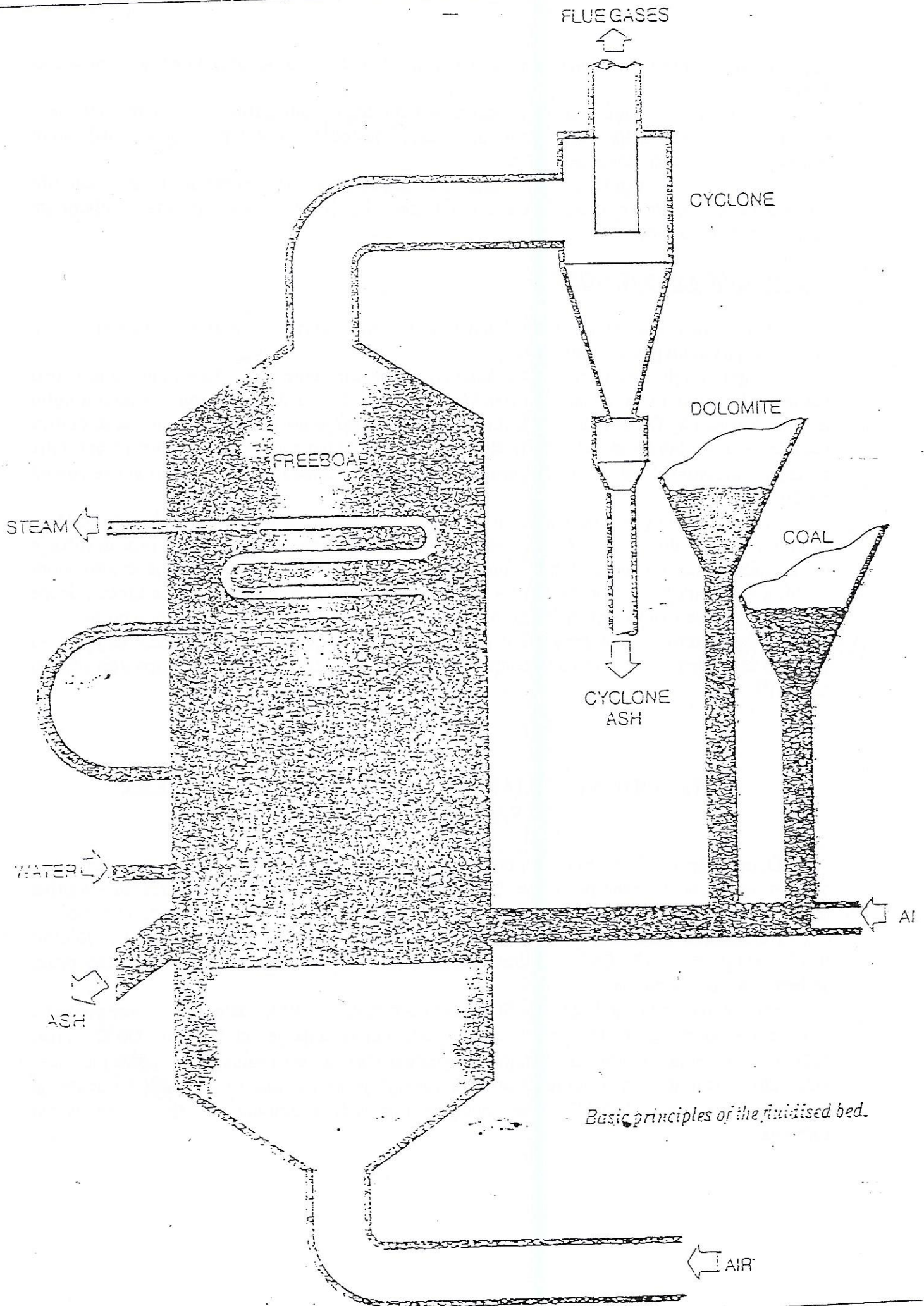
## **4. METODE SUZBIJANJA EMISIJE U TOKU PROCESA SAGOREVANJA**

Ovim tehnikama se  $\text{SO}_2$  oslobođen sagorevanjem goriva uklanja ili u samoj zoni sagorevanja ili neposredno posle nje. One se baziraju na dodavanju suvog sorbenta – aditiva radi uklanjanja sumpor-dioksida dajući pri tome čvrst proizvod koji se sa pepelom izbacuje.

Najčešće korišćeni sorbenti su materijali na bazi kalcijuma: krečnjak ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), kreč ( $\text{CaO}$ ) i hidratizani kreč ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Oni nisu tako skupi kao drugi sorbenti na bazi natrijuma.

Sposobnost sorbenta da zahvati  $\text{SO}_2$  u zoni sagorevanja zavisi znatno od aktivne površine i reakcione temperature. Optimalna temperatura sagorevanja je od 800 do 900°C. Iznad 1200°C će se pojaviti obrnuta reakcija i nagrađeni  $\text{CaSO}_4$  će se razlagati oslobađajući opet  $\text{SO}_2$ . Drugi razlog za niže temperature sagorevanja je mogućnost sinterovanja sorbenta na temperaturama iznad 1200°C. Ovo smanjuje raspoloživu aktivnu površinu i efikasnost sorbenta.

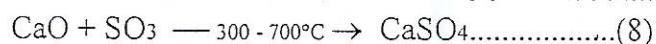
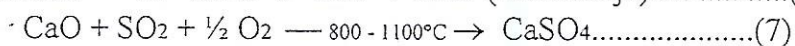
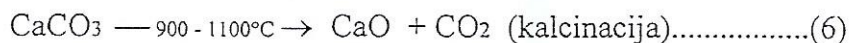




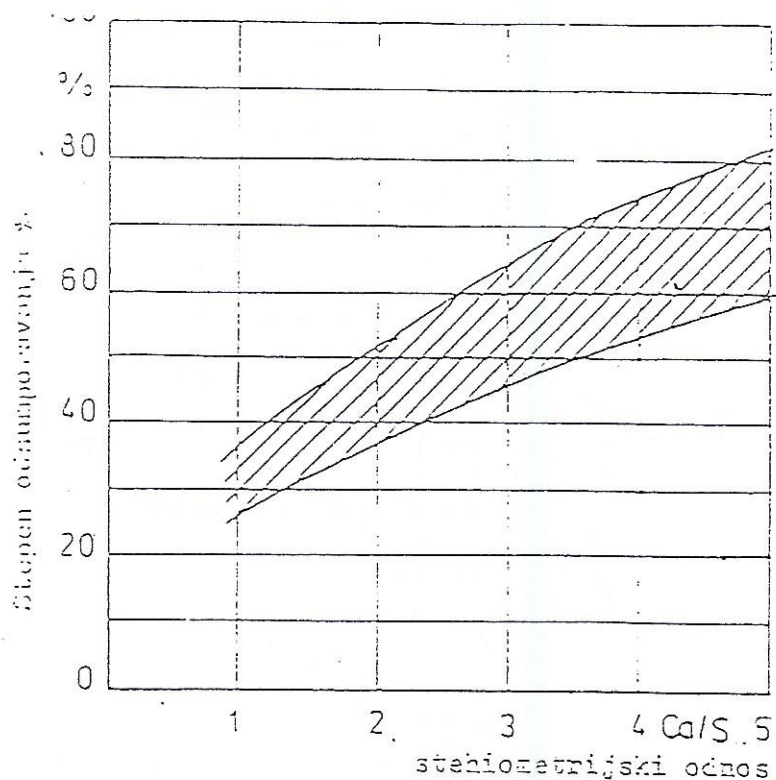
#### 4.1. ADITIVNI POSTUPAK ZA UKLANJANJE SO<sub>2</sub>

Krečnjačko – aditivni postupak se upotrebljava u elektranama i toplanama na lignit i mrki ugalj. Tehnologija postupka je jednostavna i oslanja se na tipične elemente elektrane.

Krečnjak se normalno koristi drobljen i prerađen u krečnjački prah, koji se dodaje struji uglja u određenom odnosu. Ugalj i krečnjački prah se u mlinovima za ugalj izmešaju i uduvavaju u ložište. U ložištu nastaje paralelno sa sagorevanjem kalcinacija i aktiviranje aditiva i vezivanje SO<sub>2</sub> odnosno SO<sub>3</sub> prema sledećim pojednostavljeno prikazanim reakcijama:



Stehiometrijski odnos Ca/S dodavanja aditiva utvrđuje se prema zahtevanom stepenu odsumporavanja.

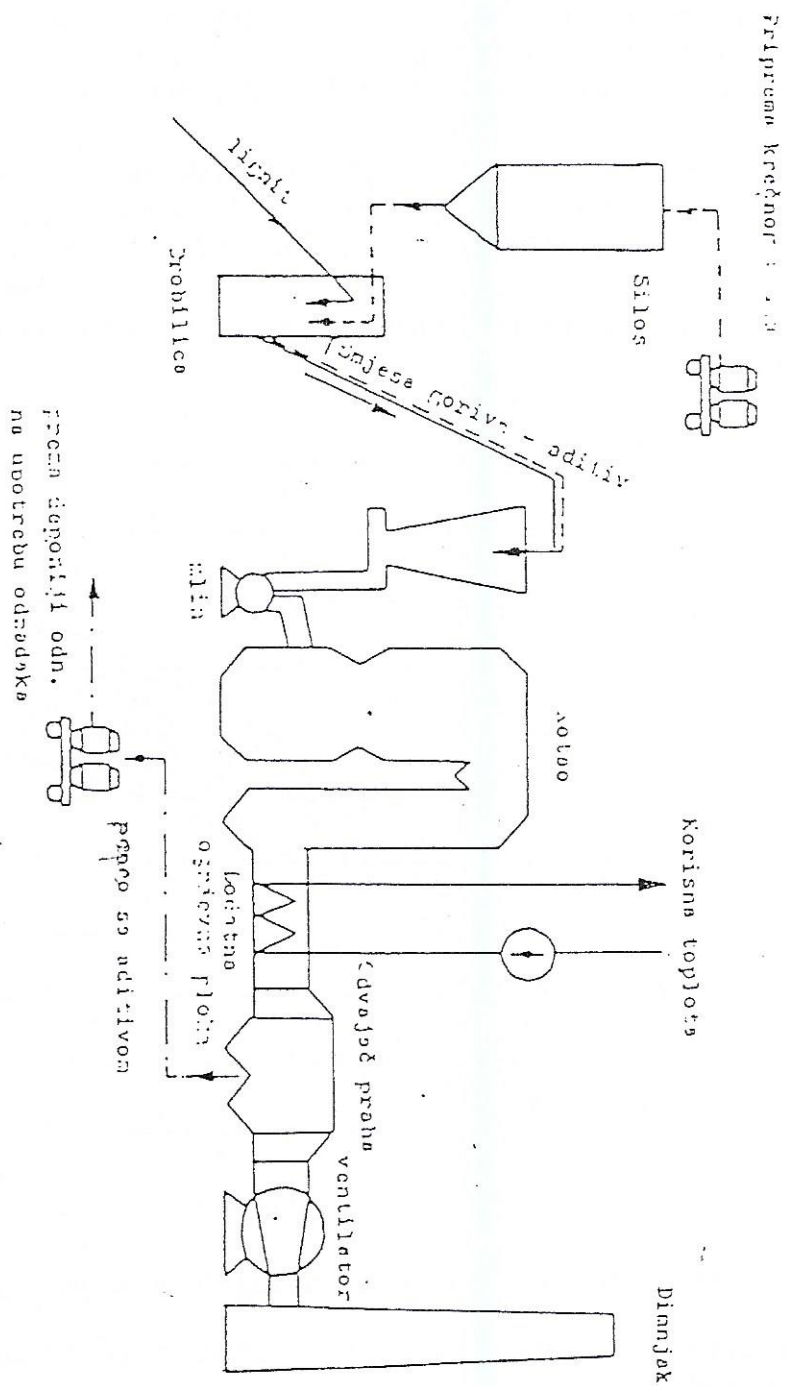


Sl.1 Stepen odsumporavanja u zavisnosti od stehiometrijskog odnosa Ca/S dodatog krečnjačkog praha u lignit.

Za stehiometrijski podatak aditiva Ca/S=1 dodaje se po jednom kilogramu sumpora u gorivu 3,13 kg CaCO<sub>3</sub>.

Odvajanje praha iz dimnih gasova vrši se u trostepenom horizontalnom elektroodvajaču. Odgovarajuća merenja zapašenosti su pokazala da uprkos porastu sadržaja čvrstih čestica i za 2,4 puta u neprečišćenom gasu stepen odvajanja elektrotaložnika je porastao.





Sl. 3. Shematska predstava krečnjačko-aditivnog postupka sa korišćenjem toplote

U poređenju sa prvobitnim sastavom pepela, kod pepela iz odvajača sa aditivom povećava se samo udeo  $\text{CaSO}_4$  i nevezanog  $\text{CaO}$ . Nakon vlaženja i gašenja slobodnog  $\text{CaO}$  moguće je punjenje u otvorene vagone i transport ka deponiji pepela analogno kao kod običnog elektranskog pepela.

## 4.2. NAČINI SAGOREVANJA SPRAŠENOG UGLJA I NAFTE

### 4.2.1. SAGOREVANJE SPRAŠENOG GORIVA

U starim konvencionalnim postrojenjima za sagorevanje sprasenog goriva temperatura plamena može da pređe  $1600^\circ\text{C}$  i tada "hvatanje" sumpora sa prethodno pomešanim krečnjakom i ugljem nije efikasno.

Razrađene su dve alternativne efikasnije metode sagorevanja kod kojih temperatura gasa pada ispod  $1200^\circ\text{C}$ . Postignuto je optimalno mesto za injektiranje sorbenta (na periferiji plamenika) što rezultira sniženjem azotovih oksida ( $\text{NO}_x$ ).

Injektiranje fino sprasenog sorbenta (čestice ispod  $100\mu\text{m}$ ) u peć iznad gorionika, može da snizi  $\text{SO}_2$  emisije za 30 – 40% korišćenjem molarnog odnosa kalcijuma prema sumporu od 2:1. Na ovaj način se značajno povećava nekontrolisana prašina, povećava se prljanje kotla a takođe utiče i na opremu za sakupljanje čestica i pepela (elektrostatski taložnici).

Da bi se povećala efikasnost uklanjanja  $\text{SO}_2$ , primenjen je postupak vlaženja dimnog gasa pošto ovaj prođe sekciju sa grejačima za razmenu toplote. Tu dolazi do daljeg hvatanja  $\text{SO}_2$  i stvaranja čvrstog proizvoda ( $\text{CaSO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ) koji se sakuplja u taložniku. U srednjim elektranama može se na klasičan način ukloniti 20 – 40%  $\text{SO}_2$  a primenom sekcije sa vlaženjem gasa efikasnost uklanjanja se povećava na 40 – 90%.

Injektiranje krečnjaka u ložišta koja sagorevaju naftu nije moguće. Gorionici su manji, manji je prostor za sagorevanje i nisu dizajnirani za rukovanja sa česticama.

### 4.2.2. KONVENCIONALNO SAGOREVANJE

Sagorevanje uglja u nepokretnom sloju se odvija uz dodavanje krupnijih čestica krečnjaka u ložište kotla (preko 1 mm). To je najjednostavnija metoda kontrole emisije  $\text{SO}_2$  sa sorbentom. Međutim, u ovakvim sistemima uklanjanje sumpornih oksida nije efikasno i iznosi samo 15 – 20%. Uzrok su visoke temperature u ložištu ( $1200 - 1500^\circ\text{C}$ ), loši uslovi mešanja goriva – uglja i sorbenta i mali uzajamni kontakti kao i slaba oksidacija.

Proces ubrizgavanja dolomita umesto krečnjaka je primenjen u nekim švedskim elektranama. Dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) u odnosu na krečnjak ima mnogo veću aktivnu površinu za adsorpciju  $\text{SO}_2$  i njegovom primenom dolazi do manjeg prljanja površine kotla.

### 4.2.3. SAGOREVANJE UGLJA U FLUIDIZOVANOM SLOJU

Sagorevanje u fluidizovanom sloju je relativno nova tehnologija, karakterisana niskim radnim temperaturama (oko  $850 - 950^\circ\text{C}$ ). Ovo omogućava uklanjanje sumpora jednostavnim dodavanjem jeftinog sorbenta kao što je krečnjak u sloj. Niže temperature takođe smanjuju stvaranje azotnih oksida.

Fluidizovani sloj sa mehurovima karakterišu dve zone: pravi fluidizovani sloj sa svojom velikom koncentracijom čestica i veoma razređeni sloj iznad njega. U slučaju sloja sa



cirkulacijom, posuda je kompletno ispunjena suspenzijom, sa koncentracijom čestica na dnu sličnom kao kod mehurastog sloja i njenim laganim opadanjem ka vrhu.

Bez obzira koji od ova dva principa se primenjuje, cilj je da se dotokom gasa – vazduha adekvatno obezbedi kiseonik potreban za sagorevanje čestica goriva. Gorivo je ravnomerno suspendovano turbulentnim tokom, kojim se ostvaruje vrlo efikasno mešanje vazduha i goriva. Kvalitet čestica goriva je od malog značaja za efikasnu reakciju – dovoljno je da su one sagorljive. Sagorevanje u fluidizovanom sloju (SFS) je tehnologija koja omogućava sagorevanje više vrsta goriva, uključujući i industrijske otpatke. SFS proces je stabilan, potreban je minimalan nadzor nad operacijom. SFS kotlovi su veoma pogodni za automatsko vođenje.

Priprema i dotur goriva za SFS su generalno jednostavni u poređenju sa sagorevanjem u sprašenom stanju, nije potrebno mlevenje goriva, čime nestaje potreba za mlinovima za ugalj, koji zahtevaju intenzivno održavanje.

#### 4.2.4. PREDNOSTI I OČEKIVANJA OD SFS

##### 1. Mala emisija sumpora

Ovo se postiže jednostavnim dodavanjem lomljenog ili mlevenog krečnjaka/dolomita u sloj. Krečnjak se termički razlaže do  $\text{CaO}$ , koji zatim reaguje sa sumpor-dioksidom i kiseonikom, čime se dobija stabilan krajnji produkt – gips ( $\text{CaSO}_4$ ). Najpogodnija temperatura za ovu reakciju je  $850^\circ\text{C}$ . Zbog dobrog mešanja i kontakta između materijala sloja i gasova, čak i relativno umereno dodavanje absorbensa dovodi do efikasnog uklanjanja sumpora.

##### 2. Mala emisija azotnih oksida

Zahvaljujući činjenici da je temperatura sloja relativno niska, gotovo da nema termičkog stvaranja  $\text{NO}_x$ . Stvaranje  $\text{NO}_x$  iz goriva može takođe biti manji nego kod konvencionalnog sagorevanja, zbog mogućnosti stupnjevitog sagorevanja.

##### 3. Ne postoji problem lepljenja pepela

Pošto je temperatura fluidizovanog sloja niža od temperature topljenja pepela, problem lepljenja se ne pojavljuje.

##### 4. Širok izbor goriva

Široka lepeza goriva može se sagorevati u istom kotlu za SFS, zbog osobina svojstvenih samom fluidizovanom sloju i mogućeg univerzalnog načina rukovanja gorivom.

##### 5. Visoka efikasnost sagorevanja

Gorivo ubačeno u sloj se brzo meša i zagreva. Sagorevanje se odvija ravnomerno i na kontrolisan način. Nesagorele čestice se odnose strujom dimnog gasa i mogu se jednostavno recirkulisati radi završetka njihovog sagorevanja.

##### 6. Visoki koeficijenti prenosa toplote

Prenos toplote između zida kotla i suspenzije (SFS) je veći nego između zida kotla i dimnog gasa (konvencionalno sagorevanje). Pokazano je da je moguće ostvariti veoma visoke toplotne flukseve putem površina za razmenu toplote uronjenih u sloj.

##### 7. Ušteda u prostoru

Kotlovi sa SFS u opštem slučaju zauzimaju manje prostora nego kotlovi sa drugim sistemima sagorevanja, za istu izlaznu snagu.

##### 8. Dobre operativne karakteristike

Ustanovljeno je da su postrojenja sa SFS fleksibilnija pri zaustavljanju, u mogućnosti da obezbede brže startovanje i brže promene opterećenja.

9. Visoka raspoloživost  
Zahvaljujući jednostavnoj i robusnoj konstrukciji sistema za dotur goriva i odnošenje pepela, uz eliminaciju lepljenja pepela, očekuje se dobra raspoloživost.
10. Niski ukupni investicioni troškovi  
Ukoliko se kao zahtev uključi odsumporavanje dimnog gasa, postrojenje sa SFS je uvek najjeftinija raspoloživa opcija.

## 5. TEHNIKE TRETIRANJA POSLE SAGOREVANJA

Tehnike uklanjanja sumpor-dioksida se mogu svrstati pomoću dva klasifikaciona sistema u:

1. regenerativne i neregenerativne
2. mokre i suve

Regenerativni postupci su oni u kojima se ponovo dobijaju početni reaktanti koji se vraćaju na početak procesa. Neregenerativni postupci daju krajnji proizvod kojim se  $\text{SO}_2$  odbacuje i sveže hemikalije se moraju kontinualno dodavati. Izraz "odbacivanje  $\text{SO}_2$ " treba uslovno shvatiti jer se time obuhvataju i proizvodi koji imaju komercijalnu vrednost (npr. gips), pa neki autori smatraju da sve postupke koji daju komercijalno vredan krajnji proizvod treba svrstati u regenerativne.

Kod mokrih sistema krajnji proizvod je u obliku mulja a kod suvih sistema dobijaju se sprášeni materijali.

Regenerativnim postupcima ponovo se oslobađa  $\text{SO}_2$  odnosno elementarni sumpor ili sumporna jedinjenja kao što su  $\text{H}_2\text{S}$  i  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Dobijeni proizvodi se odbacuju ili koriste neposredno, odnosno nakon manje obrade. U slučaju regenerativnih postupaka pri dobijanju  $\text{SO}_2$ , vrši se njegovo prevođenje ili u elementarni sumpor ili u  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Pojedini postupci su se razvili do komercijalne primene i na osnovu njih je izgrađeno više industrijskih postrojenja.

### 5.1. TEHNOLOGIJE PREČIŠĆAVANJA GASOVA

Za redukciju emisija  $\text{SO}_2$  u velikim elektranama ili postrojenjima sa sagorevanjem uglja uglavnom se koriste tri kategorije tehnika koje se uključuju u sisteme nakon procesa sagorevanja.

1. Injektovanje suvog sorbenta u struju gasa pri čemu su i sorbent i ostatak (proizvod procesa sorbcije) – suvi.
2. Polusuvi sistemi: sorbent se injektira kao mulj a dobija se čvrsti, suvi ostatak.
3. Mokri sistemi: i sorbent i ostatak su – vlažni.

#### 5.1.1. INJEKTIRANJE SUVOG SORBENTA

Uvođenje suvog sorbenta u dimni gas koji napušta ložište kotla, može u nekim slučajevima da bude efikasnije za uklanjanje sumpor-dioksida u poređenju sa injektovanjem sorbenta u samo ložište. Kao sorbent se koristi kreč ( $\text{CaO}$ ) ili hidratizani kreč ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), pri čemu se može postići efikasnost uklanjanja  $\text{SO}_2$  od 70 – 90%.

U ove sisteme spada i tehnika uklanjanja sumpor-dioksida na niskim temperaturama što se postiže ili vlaženjem gasa ili vlaženjem sorbenta. Time se dozvoljava formiranje sumporaste



kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) od sumpor-dioksida u gasu, pa efikasnost zavisi od vremena kontakta i temperature dimnog gasa. Ona je 40 – 80% pri molarnom odnosu Ca:S od 2:1.

Ova tehnika se može primeniti sa relativno niskim troškovima u postojeća postrojenja, ali je obavezno da se suvi ostatak sa pepelom izdvaja filtrima. Opravdana je primena za relativno stara i mala energetska postrojenja.

Ima postupaka baziranim na sorbentima kao što su natrijumkarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) koji su efikasni na temperaturi od 130 – 180°C. Na toj temperaturi se Na-bikarbonat razlaže dajući natrijumkarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) veoma dobre porozne strukture koje dozvoljava solidnu adsorpciju sumpor-dioksida da bi se formirao uz dobru oksidaciju natrijum sulfata ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Efikasnost sistema iznosi 80 – 90% uklanjanja pri molarnom odnosu Na:S od 2:1. Mana je visoka cena Na-bikarbonata, osim ukoliko je lokalno prisutan u prirodnom obliku; značajno je i povećanje prašine a ostatak sadrži rastvorljive soli natrijuma.

### 5.1.2. POLUSUVI SISTEMI

Polusuv sistem se nalaze između suvih i vlažnih sistema i koriste se za velika industrijska ili manja energetska postrojenja. Sorbent, najčešće krečni mulj, se raspršava u dimni gas bilo u postojećem gasovodu ili češće u dodatnom reaktoru i suši se tokom reagovanja  $\text{SO}_2$  u dimnom gasu. Od nastalog suvog proizvoda (mešavina kalcijum-sulfita i kalcijum-sulfata) u reaktoru se zadrži 5 – 10%, dok se ostalih 90 – 95% odnosi strujom gasa u kolektor čestica kao što su vrećasti filtri ili elektrostatski taložnici. Za energane većeg kapaciteta primarni kolektor čestica se postavlja pre reaktora (radi uklanjanja letećeg pepela) a sekundarni uređaji iza reaktora da bi se uklonio proizvod sorpcije  $\text{SO}_2$  sa sorbentom. Često se vrši recirkulacija neprereagovanog sorbenta i pepela da bi se poboljšalo iskorišćenje sorbenta. Obično se na ovaj način može ukloniti 60 – 80%  $\text{SO}_2$  pri molarnom odnosu Ca:S od 2:1.

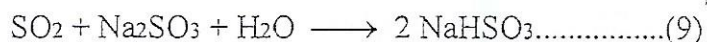
Primena suvih i polusuvih sprej tehnika je najviše kod ugljeva koji imaju manje od 2% sumpora.

Prednost korišćenja suvih sprej tehnologija je odsustvo otpadnih voda i manji energetske gubici u poređenju sa vlažnim skruberom i manji investicioni troškovi. Dobijeni nus-proizvod je neupotrebljiv, odlaze se na deponovanje ili se koristi za popunjavanje rupa ili nasipanje puteva.

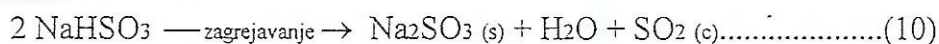
### 5.1.3. REGENERATIVNI SISTEMI

Regenerativni sistemi su tako nazvani jer uključuju postupak ponovnog korišćenja sorbenta. Regeneracija se vrši termički ili hemijski pri čemu se oslobađa koncentrisani sumpor-dioksid (ide dalje na obradu). Značajna su dva komercijalna sistema ovog tipa:

- a) WELLMAN LORD-ov proces koji za apsorpciju  $\text{SO}_2$  iz dimnog gasa koristi rastvor natrijum-sulfita. On se oksidiše do Na-sulfata i treba ga ukloniti iz procesa. Osnovna reakcija je:



Prereagovana tečnost iz skrubera treba da se regeneriše i isparavanjem oslobodi vlažnog sumpor-dioksida.



Regenerisani Na-sulfit se vraća u skruber radi ispiranja gasa a koncentrovana struja 90%  $\text{SO}_2$  gasa vodi se ka nekom procesu prerade: u tečni  $\text{SO}_2$ , do sumporne kiseline ili elementarnog sumpora.

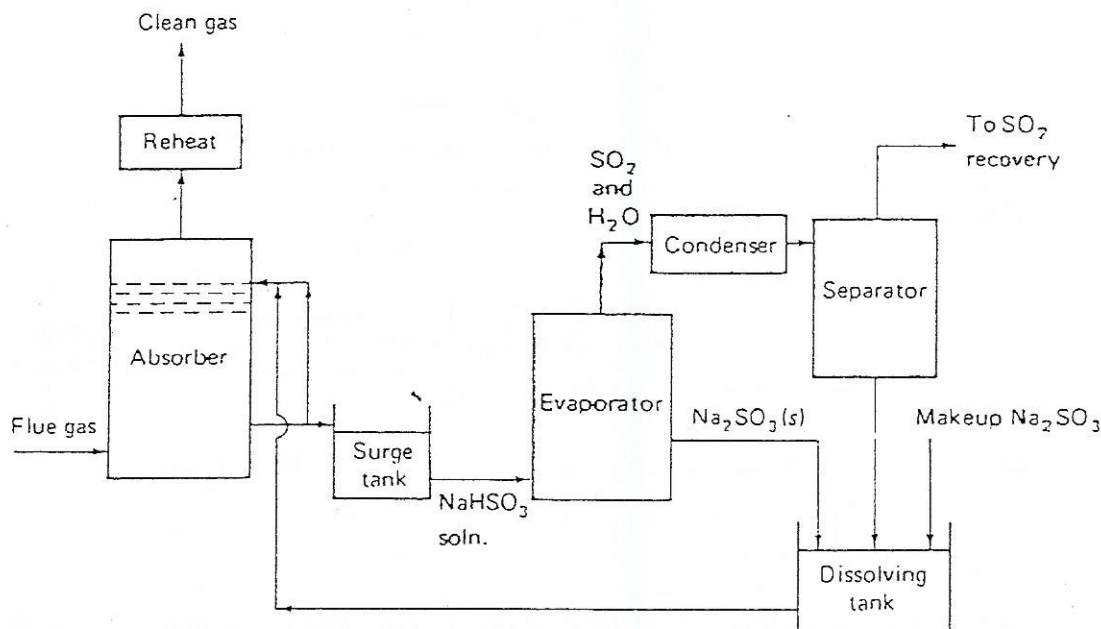


Figure 7-5 · Simplified schematic for single alkali scrubbing of flue gas with regeneration.

Osnovni tok procesa: otpadni gas prolazi kroz otprašivač a zatim kroz venturi predskruber u kome se hladi i vlaži uz dodatno uklanjanje letećeg pepela i hlorida.  $\text{SO}_2$  iz otpadnog gasa se uklanja rastvorom  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  u apsorbent sa sitastim podovima. Nakon odmagljivanja i zagrevanja gas se ispušta u atmosferu.

Izlazna struja u kojoj je apsorbirani  $\text{SO}_2$  odlazi iz apsorbenta u deo za regeneraciju u kome se vrši termička razgradnja  $\text{NaHSO}_3$  nastalog pri apsorpciji. Regeneracija se vrši u dvostepenom isparivaču. Kristalisani  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  mora se ponovo rastvoriti i regenerisanom rastvoru se dodaju nove količine  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  da bi se nadoknadili gubici iz sistema.

Gasni proizvod termičke razgradnje su vodena para i koncentrisani  $\text{SO}_2$ . Nakon kondenzovanja vodene pare i sušenja gasna struja bogata sa  $\text{SO}_2$  koristi se za proizvodnju  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dobrog kvaliteta ili sumpora.

Postupak Wellman – Lord predstavlja do sada najviše primenjivan regenerativni postupak za izdvajanje  $\text{SO}_2$  iz otpadnih gasova Klausovih postrojenja, fabrika  $\text{H}_2\text{SO}_4$  i kotlova loženih ugljem i naftom.

Wellman Lord-ov postupak se obično projektuje za uklanjanje 90 – 95%  $\text{SO}_2$  ali može da se postigne i veći stepen uklanjanja. Visoki investicioni troškovi i velika potrošnja energije predstavljaju najvažnija ograničenja za njegovu primenu. Takođe postoji i neizvesnost pri plasiranju sumpora i sumporne kiseline na tržište.



- b) MAGNEZIJUM-OKSIDNI PROCES. U ovom procesu dimni gasovi se tretiraju sa muljem gašenog magnezijum-oksida radi uklanjanja  $\text{SO}_2$ . Proizvod je smeša magnezijum-sulfita ( $\text{MgSO}_3$ ) i magnezijum-sulfata ( $\text{MgSO}_4$ ).

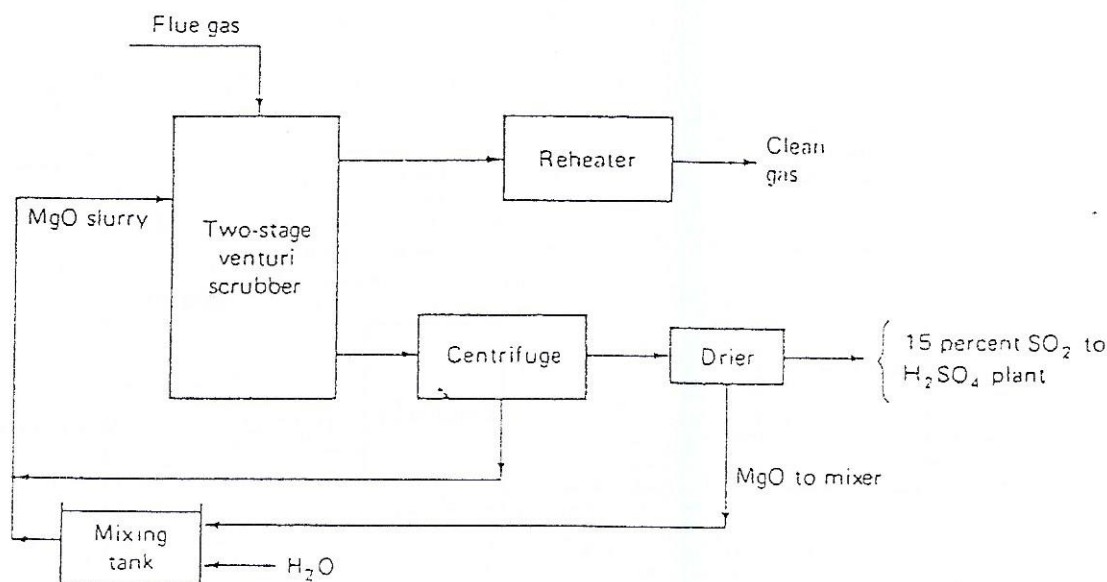
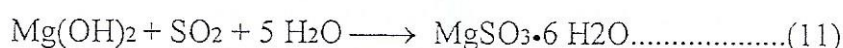
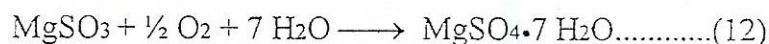


Figure 7-4 Simplified schematic of the magnesium oxide flue gas desulfurization process.

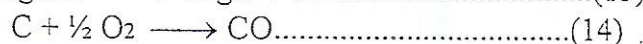
Apsorpcija u rastvoru  $\text{MgO}$  ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) spada u regenerativne postupke za uklanjanje  $\text{SO}_2$  iz otpadnih gasova, koji su se razvili do komercijalne primene. Čestice se prvo uklanjaju u venturi skruberu a zatim se  $\text{SO}_2$  apsorbuje u drugom venturi skruberu prema sledećoj hemijskoj reakciji:

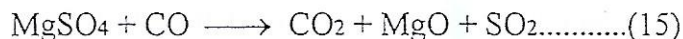


Pri tome dolazi i do delimične oksidacije sulfita:



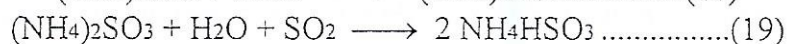
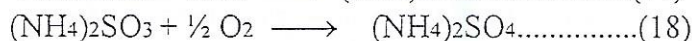
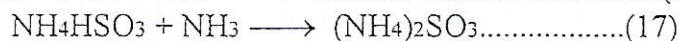
Nastali kristali  $\text{MgSO}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  i  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  se izdvajaju centrifugiranjem i suše do anhidridnog oblika. Čvrsti materijal se kalciniše uz dodatak koksa u cilju redukcije sulfata. Na ovaj način se regeneriše  $\text{MgO}$  i oslobađa struja gasa sa 15 – 16%  $\text{SO}_2$ . Gas iz sušnice, nakon otprašivanja u ciklonu, oslobađa toplotu kojom zagreva izlaznu struju gasa koja odlazi u dimnjak. Nakon obrade struja gasa bogata sa  $\text{SO}_2$  odlazi u postrojenje za proizvodnju  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ili ostalih sumpornih jedinjenja. Reakcije pri regeneraciji su sledeće:





Za postupke sa  $\text{MgO}$ , važe iste prednosti i nedostaci kao i za postupak Wellman – Lord. Step en uklanjanja  $\text{SO}_2$  i kod ovog postupka može biti i veći od 90 – 95%, za koliko se obično sistem projektuje. Velike količine električne energije se troše za mnogobrojne ventilatore i pumpe u sistemu. Svežeg reaktanta je potrebno dodavati u manjoj količini nego za Wellman – Lord postupak. Sistem troši gorivo pri sušenju i kalcinisanju. Izuzetna pogodnost sistema je u mogućnosti skladištenja čvrstog neregenerisanog proizvoda ili njegove regeneracije u centralnom, zajedničkom postrojenju koje može biti udaljeno od postrojenja za odsumporavanje jer su magnezijumove soli stabilne i mogu lako da se transportuju.

c) WALTHER-OV POSTUPAK. Ovim postupkom uklanjanje  $\text{SO}_2$  iz dimnih gasova postiže se dodatkom  $\text{NH}_3$  u struju gasa. Otpadni gas sa dodatkom  $\text{NH}_3$  se uvodi u komoru sa raspršivanjem i sušenjem, a zatim se otprašuje u elektrostatskom taložniku. U skruberu dolazi do sledećih hemijskih reakcija:



Prah  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , koji se odvaja u elektrostatskom taložniku, nakon manje obrade može da se koristi kao đubrivo. Gasna struja koja napušta taložnik se uvodi u razmenjivač toplote u kome prenosi svoju toplotu očišćenom gasu tako da se ovaj zagreva bez korišćenja spoljnog izvora toplote. Step en uklanjanja  $\text{SO}_2$  iz gasa je oko 90%, i očišćeni gas nakon ponovnog odmagljivanja i zagrevanja napušta postrojenje.

## 5.2. KOMBINOVANI $\text{SO}_2/\text{NO}_x$ PROCESI

Ovi procesi su razvijani i razvijaju se zbog potrebe uklanjanja i  $\text{NO}_x$  iz dimnih gasova, što se ne postže ovim do sada navedenim procesima. Mnogi kombinovani procesi su još na

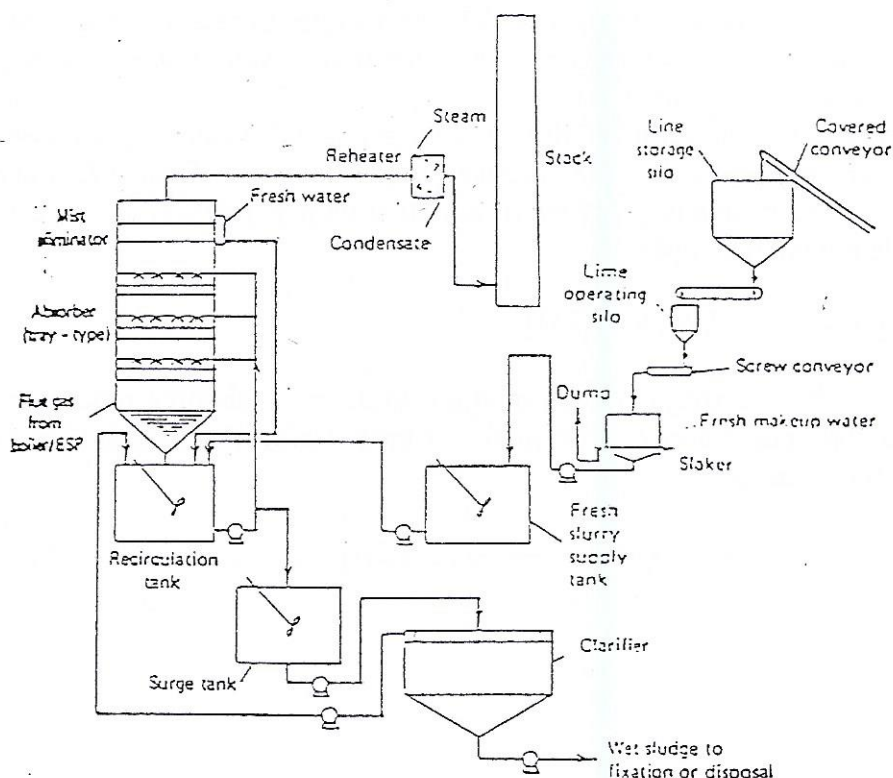


Fig. 12 Typical lime FGD system.



laboratorijskom ili oglednom nivou jer se za većinu smatra da su komplikovani i skupi. Međutim, ukoliko se uvedu strogi standardi za emisiju SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> može doći do promene mišljenja, zato što neki kombinovani procesi mogu postići efikasnost od 90% uklanjanja oba polutanta. Osim toga, ovi procesi imaju kao krajnji proizvod rafinisanu struju SO<sub>2</sub> ili NO<sub>x</sub> koji služe u daljim procesima kao sirovina.

Gas očišćen od pepela i prašine uvodi se u prvi stepen – adsorber sa aktivnim ugljem na temperaturi od 90 – 150°C gde se vrši proces katalitičke oksidacije sa dodatnom vlagom u dimnom gasu radi stvaranja sumporne kiseline koja se adsorbuje na aktivnom uglju. Dalji početak u procesu može da se nastavi injektiranjem amonijaka u dimni gas u komori za mešanje, pre nego što se pređe na drugi stepen – tu se katalitičkom reakcijom između NO<sub>x</sub> i amonijaka formiraju azot (N<sub>2</sub>) i voda.

Desorpcija aktivnog uglja se vrši termički na 400 – 450°C. Gas obogaćen sa SO<sub>2</sub> može da ide u proces za dobijanje elementarnog S ili H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

### 5.3. VLAŽNI SISTEMI ZA UKLANJANJE SO<sub>2</sub>

Ove sisteme karakteriše korišćenje sorbenata u mulju ili rastvoru koji je u kontaktu sa dimnim gasom ispod temperature tačke rose za sumpor-dioksid, proizvodeći vlažni ostatak. Proces se odvija u sistemima sa vlažnim skruberima (apsorber koji može da bude sa sprejem ili pakovanim slojem).

Sistemi za uklanjanje SO<sub>2</sub> iz struje gasa se postavljaju na kraju, iznad postrojenja za sagorevanje uglja i posle filtra koji zadržava leteći pepeo. Ugrađuje se kod elektrana velikog kapaciteta da bi se dobio visok stepen efikasnosti uklanjanja SO<sub>2</sub>: iznad 90% pri odnosu Ca:S (molarnom) od približno 1:1.

Sumporni oksidi iz struje gasa reaguju sa sorbentom u suprotnostrujnim vlažnim kolonama stvarajući smešu sulfita i sulfata. Ukoliko se kao sorbent koristi krečnjak ili kreč, onda se procesom oksidacije "in situ" ili u posebnom oksidacionom rezervoaru dobija gips (CaSO<sub>4</sub>) kao nus-proizvod. Na tržištu su procesi koji proizvode gips – favorizovani jer imaju bolje karakteristike: jednostavno je uklanjanje vode od čestica i gips ima u principu tržišnu vrednost.

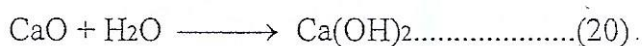
Sistemi sa vlažnim skruberima se mogu grupisati u dve široke kategorije: regenerativni i neregnerativni, u zavisnosti od toga kako se sorbent tretira posle uklanjanja SO<sub>2</sub>.

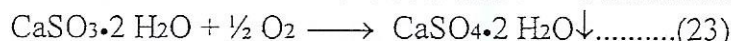
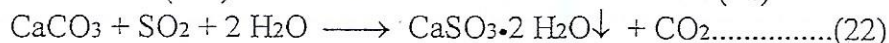
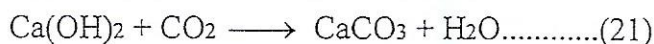
U neregnerativnim sistemima SO<sub>2</sub> je vezan u hemijsko jedinjenje koje se ili koristi kao nus-proizvod ili se odlaze kao otpad.

U regenerativnim sistemima, SO<sub>2</sub> je zadržan sa sorbentom i potom se oslobađa da bi sorbent regenerisan mogao da se recirkuliše ponovo u sistem. Tako oslobođena struja SO<sub>2</sub> je čista i visoko koncentrovana pa se često koristi u daljem procesu da bi se dobila sumporna kiselina ili elementaran sumpor.

#### 5.3.1. NEREGENERATIVNI SISTEMI

Uklanjanje SO<sub>2</sub> iz struje gasa se odvija u vlažnim skruberima procesom adsorpcije gasa na česticama sorbenta. Najviše je primenjivan kreč (CaO) ili krečnjak (CaCO<sub>3</sub>) sa kojima se odvijaju sledeće reakcije:





Čvrsti proizvodi nastali ovim reakcijama se kontinualno izdvajaju zgušnjavanjem mulja u bazenima za bistrenje i dalje odlažu na deponije ili koriste kao komercijalni proizvod (gips). Izbistreni tečni deo se reciklira i vraća u skruber pošto se dodaju sveže količine sorbenta.

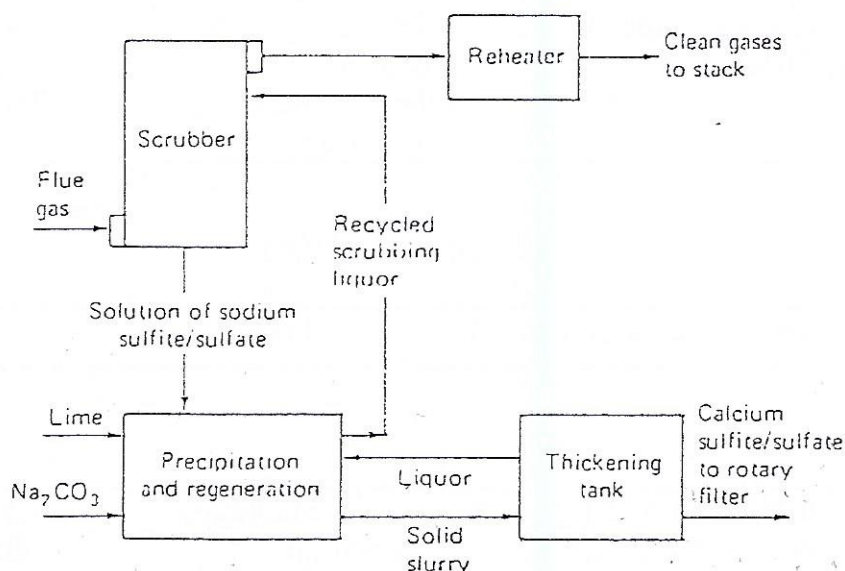


Figure 7-6 Schematic of double alkali scrubbing process.

Mane procesa: dimni gasovi se hlade ispod temperature tačke rose za  $\text{SO}_2$ , pa je moguće zadržavanje kapljica kiseline na opremi što pospešuje koroziju. Ohlađeni gas se mora pre ubacivanja u dimnjak dodatno zagrejati da bi se omogućilo putem potisnog efekta veće izdizanje dimne perjanice a time i bolja disperzija.

Vlažni sistemi kreč/krečnjak daleko su najbrojniji i u procesu odsumporavanja dimnih gasova primenjeni su u preko 85% komercijalnih sistema.

U manjem obimu koriste se skruberi sa rastvorom  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  u kojima se, suprotno – strujno tretiraju dimni gasovi radi redukcije  $\text{SO}_2$ . U toku procesa se dobijaju-rastvorene soli natrijuma koje se prevode prirodnom oksidacijom (vazduhom) u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Natrijum-karbonat je relativno skup sorbent a vodeni rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  može da stvori dodatne probleme sa odlaganjem. Radne karakteristike ukazuju da se pri molarnom odnosu Na:S od 2:1 može ukloniti 90%  $\text{SO}_2$ .

### 5.3.2. DUPLO BAZNO ISPIRANJE (SCRUBBING)

Duplo bazno ispiranje je proces koji koristi rastvorenu alkalnu supstancu –  $\text{NaOH}$ . U skruberu struji gasa dodaje se  $\text{NaOH}$  koji sa  $\text{SO}_2$  iz gasa formira  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  i  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Rastvor sulfata i sulfita odvodi se u reaktor u kome se dodaje kreč kao druga jeftina alkalna supstanca. Stvara se mulj koji sadrži kalcijum-sulfite/sulfate. Mulj se zgušnjava i odvodi na deponiju. Skupi natrijum se kontinualno regeneriše u reaktoru i vraća u skruber.



# REZIME TEHNOLOGIJA ODSUMPORAVANJA

14

## Tehnike pre sagorevanja

| Proces              | Performanse uklanjanja SO <sub>2</sub>                          | Prednosti                                                        | Nedostaci                                                                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pre sagorevanja     |                                                                 |                                                                  |                                                                                                               |
| Promena goriva      | Zavisno od prvobitnog goriva<br>moguće < 1000 mg/m <sup>3</sup> | Nema uticaj na čvrste ostatke.<br>Nema modifikacije postrojenja. | Moguće da nije dovoljno za zadovoljenje propisa.<br>Snabdevanje može biti ograničeno.<br>Problem cene goriva. |
| Prečišćavanje uglja | Konvencionalnim metodama do 30%                                 | Nema uticaj na čvrste ostatke.<br>Nema modifikacije postrojenja. | Moguće da nije dovoljno za zadovoljenje propisa.<br>Potencijal za uklanjanje sumpora je ograničen.            |

## Tehnike u ložištu

| Proces                                            | Performanse uklanjanja SO <sub>2</sub>                      | Prednosti                                                                                         | Nedostaci                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sagorevanje u fluidizovanom sloju                 |                                                             |                                                                                                   |                                                                                                                         |
| Duboki sloj<br>Plitki sloj<br>Cirkulišući sloj    | 60-80% (Ca:S=2:1)<br>30-50% (Ca:S=2:1)<br>80-90% (Ca:S=2:1) | Male modifikacije postrojenja.<br>Pogodan za nova i postojeća postrojenja.<br>Dobro demonstriran. | Moguć problem sa odlaganjem čvrstih ostataka.                                                                           |
| Konvencionalno sagorevanje                        |                                                             |                                                                                                   |                                                                                                                         |
| Na rešetki                                        | 15-25% (Ca:S=2:1)                                           | Male modifikacije postrojenja.<br>Pogodan za nova i postojeća postrojenja.<br>Dobro demonstriran. | Moguće topljenje pepela i smanjena efikasnost sagorevanja.<br>Problem sa odlaganjem čvrstih ostataka.                   |
| U peći                                            | 40-60% (Ca:S=2:1)                                           | Umerene modifikacije postrojenja.<br>Dobro demonstriran.                                          | Nepogodan za neka postojeća postrojenja.<br>Moguće prljanje kotla.<br>Povećanje prašine.                                |
| Sagorevanje sprašenog goriva                      |                                                             |                                                                                                   |                                                                                                                         |
| U peći                                            | 30-40% (Ca:S=2:1)                                           | Umerene modifikacije postrojenja.<br>Bez efekta na sagorevanje.<br>Malo operativnog iskustva.     | Moguće prljanje kotla.<br>Povećanje prašine.                                                                            |
| Sagorevanje sa sniženim NO <sub>x</sub> emisijama | 30-50% (Ca:S=2:1)                                           | Umerene modifikacije postrojenja.<br>Malo operativnog iskustva.                                   | Specijalni gorionik.<br>Moguć uticaj na topljenje pepela i sagorevanje.<br>Moguće prljanje kotla.<br>Povećanje prašine. |

# Tehnike tretiranja posle sagorevanja

15

| Proces                        | Performanse uklanjanja SO <sub>2</sub> | Prednosti                                                                                                                               | Nedostaci                                                                                                                                                          |
|-------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Injektiranje suvog sorbenta   |                                        |                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                    |
| Kreč                          | 40-80% (Ca:S=2:1)                      | Umerene modifikacije postrojenja.<br>Pogodan za nova i postojeća postrojenja.<br>Dobro demonstriran na elektranama.                     | Problem odlaganja čvrstih ostataka.<br>Povećano taloženje čvrstih čestica na opremi.<br>Nije demonstriran na industrijskim energanama.                             |
| Natrijum                      | 70-80% (Na:S=2:1)                      | Umerene modifikacije postrojenja.<br>Dobro demonstriran.                                                                                | Ograničena raspoloživost sorbenta.<br>Problem odlaganja čvrstih ostataka.<br>Povećano taloženje čvrstih čestica na opremi.                                         |
| Polusuvi sistemi              |                                        |                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                    |
| Sprej                         | 60-80% (Ca:S=2:1)                      | Dobro uhodan.<br>Fleksibilan rad.                                                                                                       | Velike modifikacije postrojenja.<br>Ograničen sadržajem sumpora.<br>Problem odlaganja čvrstih ostataka.<br>Moguće prljanje dimnog kanala.                          |
| U dimnom kanalu               | 30-60% (Ca:S=2:1)                      | Umerene modifikacije postrojenja.                                                                                                       | Moguće prljanje dimnog kanala.<br>Problem odlaganja čvrstih ostataka.<br>Malo iskustava u komercijalnoj upotrebi.<br>Povećano taloženje čvrstih čestica na opremi. |
| Mokri sistemi                 | 143-1                                  |                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                    |
| Neregenerativni krečnjak gips | >90% (Ca:S=2:1)                        | Dobro uhodan.<br>Korisni nuzproizvodi.                                                                                                  | Velike modifikacije postrojenja.<br>Zahteva mnogo prostora.<br>Zahteva mnogo vode.<br>Kompleksan proces.                                                           |
| Regenerativni                 | >90% (Na:S=2:1)                        | Dobro uhodan.<br>Korisni nuzproizvodi.<br>Ograničeni zahtevi za sorbentom.<br>Ograničeni zahtevi za vodom.<br>Ograničeni čvrsti ostaci. | Velike modifikacije postrojenja.<br>Zahteva mnogo prostora.<br>Kompleksan proces.                                                                                  |