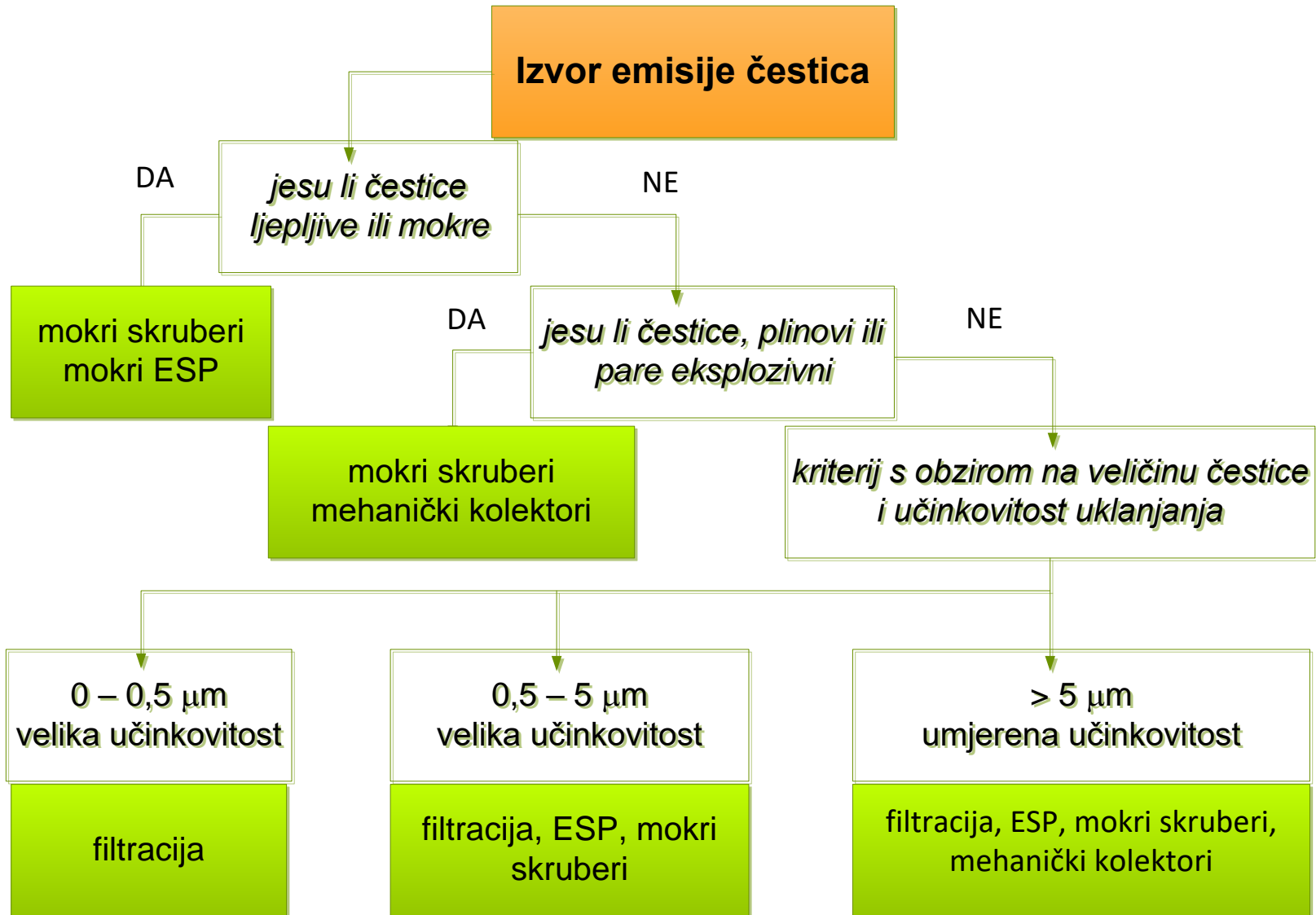


The best available techniques (BAT) reference document (BREF) for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector (BREF)

Izbor postupka za otprašivanje zavisno o veličini čestica i njihovim značajkama



Skrubiranje (mokro pranje otpadnih plinova)

- Mokro i suho skrubiranje/pranje

jedinična je operacija u kojoj se jedna ili više komponenti iz struje otpadnog plina selektivno apsorbira u odgovarajućem apsorbentu.

- Izrazi „skrubiranje“ i „apsorpcija“ (ili „pranje“) su sinonimi

Kod mokrog skrubiranja, voda je najčešći kapljeviti apsorbens, iako se u posebnim slučajevima mogu koristiti i druge relativno nehlapljive kapljevine/otapala

Kod suhog skrubiranja koriste se suhi prah ili polusuha suspenzija kao mogući apsorbenzi, ovisno o zahtjevima separacije.

- Navedeni procesi provode se uređajima - **skruberima (ili apsorberima)**, iako se ponekad za istu svrhu koriste **tornjevi/kolone s raspršivanjem** te **punjene kolone/apsorberi i kolone s pliticama**
- **Skrubiranje** - pri obradi dimnih i/ili otpadnih plinova (ili neke druge onečišćene plinske struje) za kontrolu/uklanjanje kiselih plinova, para, maglica, čestica (lebdeće prašine), teških metala, organskih tvari u tragovima i mirisa.
- Pojedinačni uređaji mogu se koristiti za pranje/uklanjanje ciljanog onečišćivala, međutim sustav za mokro pranje često sadrži dva ili više pojedinačnih skrubera koji su učinkovitiji od pojedinačnog skrubera.

- Sustav mokrog skrubiranja radi **na temelju izravne interakcije apsorpcijske kapljevine i čestica** (ponekad i plinova) koje se žele ukloniti.
- Apsorbens je obično **voda**, u koju se ponekad dodaju odgovarajuće kemikalije da bi se povećala mogućnost apsorpcije
- Na temelju interakcije između čestica i tekuće faze, čestice mogu difundirati iz plinovite faze i apsorbirati se u tekućoj fazi, pri čemu se otprašuje onečišćeni zrak.
- **Mokri skruberi** koriste **vodeni sprej** u različitim izvedbama i pri različitim tlakovima da bi se uklonile krute čestice. Kapljice vode spajaju se s krutim česticama, uzrokujući aglomeraciju, tj. nastajanje **aglomerata čestica-kapljica** znatno većih dimenzija od polaznih krutih čestica koje se želi ukloniti - na taj način olakšava se njihovo izdvajanje iz onečišćenih plinskih struja.
- Važnu ulogu ima raspršivanje kapljevine na male kapljice koje će pospješiti **nastajanje aglomerata** (nakupina čestica i kapljica) ili **stvaranje tankog filma kapljevine oko krutih čestica**

- Uređaji za skrubiranje mogu smanjiti PM **do 95%**.
- Sustav skrubiranja zahtijeva **izvor kontinuirane opskrbe vodom** i pritom nastaje **tekući otpad** koji je potrebno obraditi u sustavu za obradu otpadnih voda.
- **Apsorpcija čestica** u tekuću fazu ovisno o svojstvima čestica koje se uklanjaju, tekuće faze i svojstava otpadnog plina može biti: **fizička i kemijska**.

Ključni kriteriji za projektiranje uređaja za mokro pranje:

- primjenjivanje otapala/kapljevine koja osigurava visoku topljivost zagađivala koje se uklanja,
- maksimalno uvećanje kontaktne površine između otpadnog plina i kapljevine i zadovoljavajuća brzina prijenosa tvari

Kada su ispunjena oba uvjeta, onečišćivalo će lako difundirati iz plinovite faze i apsorbirati se u tekućoj fazi.

Učinkovitost uklanjanja čestica ovisi o:

- topivost onečišćujuće tvari u odabranoj tekućoj fazi za pranje,
- koncentraciji onečišćujućih tvari u plinskoj fazi,
- volumnom protoku plinovite i tekuće faze,
- kontaktnoj površini plinovite i tekuće faze,
- učinkovitost uklanjanja tekuće faze i recikliranja otapala,
- mogućnosti uvećanja kontaktne površine (plin-tekuća faza),
- temperaturi - smanjena temperatura i povećani omjer tekuće faze i zraka poboljšavaju učinkovitost mokrog pranja,
- pH tekuće faze (pH treba biti nizak kod uklanjanja amonijaka, dok je za pranje kiselih plinova potrebno raditi s neutralnim ili visokim pH); kod uklanjanja organskih spojeva u tragovima često se provodi mokro pranje s alkalnim pH).

- **Apsorpcija (prijenos tvari)** iz plinovite u tekuću fazu (ili obrnuto) ovisi o:

fizičkim svojstvima matrice plin-kapljevina (npr. difuznost, viskoznost, gustoća...),

radnim uvjetima sustava za pročišćavanje (npr. temperatura, tlak, maseni protoci plinovite i tekuće faze)

Apsorpcija je učinkovitija:

- a) pri nižim temperaturama,
- b) pri većim kontaktnim površinama,
- c) pri višim omjerima tekuće i plinske faze,
- d) pri višoj koncentraciji onečišćujuće tvari u plinovitoj fazi (ili, alternativno, pri nižoj koncentraciji onečišćujuće tvari u tekućoj fazi; u nekim se slučajevima koriste povišeni pritisci kako bi se povećala pokretačka sila).

Suho skrubiranje ili suha apsorpcija

Dvije glavne izvedbe suhih apsorpcijskih sustava koje se trenutno primjenjuju u industriji:

apsorpcija suho-suho i
polusuha apsorpcija.

- **u sustavu suho-suho** ubrizgava se praškasto alkalno apsorpcijsko sredstvo u struju onečišćenog plina.
- **kod polusuhe metode** ubrizgava se koncentrirana suspenziju u struju onečišćenog plina i zatim se uklanja tekuća faza isparavanjem, ostavljajući za sobom aktivno, suho alkalno apsorpcijsko sredstvo.

Kod obje metode **alkalno sredstvo koje nije potrošeno ili drugi kruti otpad uklanjaju se pomoću ESP ili pomoću vrećastog filtra**. Svi uređaji za suho pranje sadrže pomoćni sustav za ubrizgavanja kemikalija nakon kojeg slijedi reakcijska zona u kojoj zagađivalo u plinu koje se uklanja reagira sa suhom alkalnom komponentom. Proces se završava uklanjanjem zaostalih krutih čestica pomoću ESP ili vrećastog filtra.

Prednosti mokrog skrubiranja

- potreban je relativno mali prostor,
- mogućnost istovremenog uklanjanja neželjenih plinova i krutih čestica (posebno onih “ljepljivih”),
- mogućnost obrade otpadnih plinskih tokova visoke temperature i s visokim sadržajem vlage,
- niski kapitalni troškovi,
- beznačajan pad tlaka kod procesa u kojima je struja plina već pod visokim tlakom,
- visoka učinkovitost uklanjanja finih čestica (iako uz povećani pad tlaka),
- moguće istovremeno otprašivanje i sorpcija plinovitih zagađivala (SO_2 , NO_x , CO).

Nedostaci mokrog skrubiranja

- Potrebne relativne velike brzine između kapljica i čestica prašine → velika potrošnja energije
- Prijenos onečišćivala iz plinske u tekuću fazu (potrebno je naknadno pročišćavanje vode)
- Pročišćavanje otpadnih vodenih tokova
- Problemi s korozijom (izraženiji kod mokrih sustava u odnosu na suhe sustave)
- Potencijalno nepoželjna neprozirnost oblaka pare ili uvlačenje kapljica
- Potencijalno visok pad tlaka
- Relativno visoki troškovi održavanja

Od svih tehnologija za smanjenje onečišćenja zraka, sustavi mokrog skrubiranja i dalje su jako rašireni i jako učinkoviti.

Mokro otprašivanje/ skrubiranje

- tehnološka operacija koja se zasniva na nastajanju aglomerata ili vodene zavjese kroz koju prolazi onečišćeni plin (***stvaranje tankog sloja/filma kapljevine preko kojeg prolazi onečišćeni plin***)
- u oba slučaja **čvrste čestice se vežu ("lijepe") za kapljevinu, postaju veće (aglomerati) i lakše ih je ukloniti, a plin odlazi prema odvodnom kanalu odn. izlazu u gornjem dijelu uređaja, a nastala kapljevina zajedno s česticama (mulj) odvodi se u donjem dijelu uređaja**
- najjednostavnije izvedbe uređaja učinkovite su za **uklanjanje krutih čestica dimenzija 5-10 μm** , a učinkovitije i energetski zahtjevnije izvedbe skrubera prikladne su **za separaciju vrlo malih čestica (1-2 μm)**
- pri raspršivanju kapljevine (najčešće voda) nastaju **kapi promjera 0,1 do 1,0 μm**

Raspršivanje ili dispergiranje tekuće faze postiže se na različite načine primjenom:

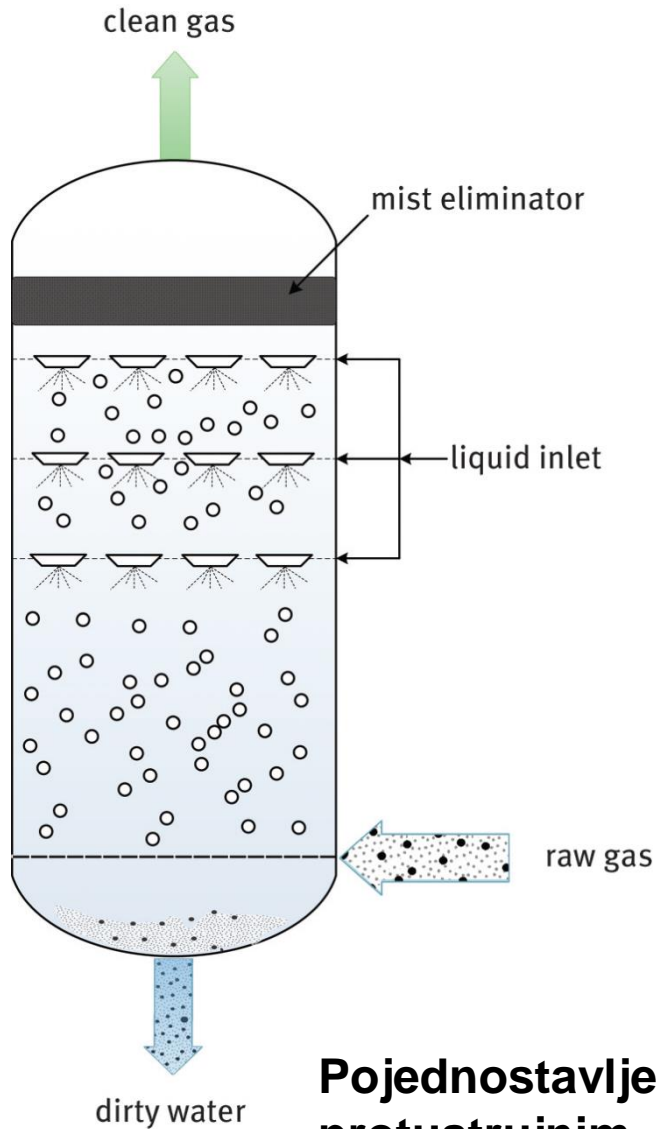
- mlaznica/brizgalica,
- cjevčica za raspršivanje,
- rotirajućih diskova,
- sudaranjem mlazova tekućine sa strujom zraka,
- uvođenjem zraka pod pritiskom...

kontaktiranje faza: ***istostrujno i protustrujno***

Različite izvedbe skrubera s obzirom na način uvođenja kapljevine:

- skruberi s raspršivanjem (kolonski skruberi)
- ciklonski skruberi s raspršivanjem (vrtložni) - tangencijalno uvođenje plina
- skruberi s pregradama
- skruberi s punjenim slojem
- venturijski skruberi
-

⇒ razlika u izvedbi skrubera rezultat je primjene odgovarajućeg mehanizma dispergiranja (raspršivanja) kapljevine!



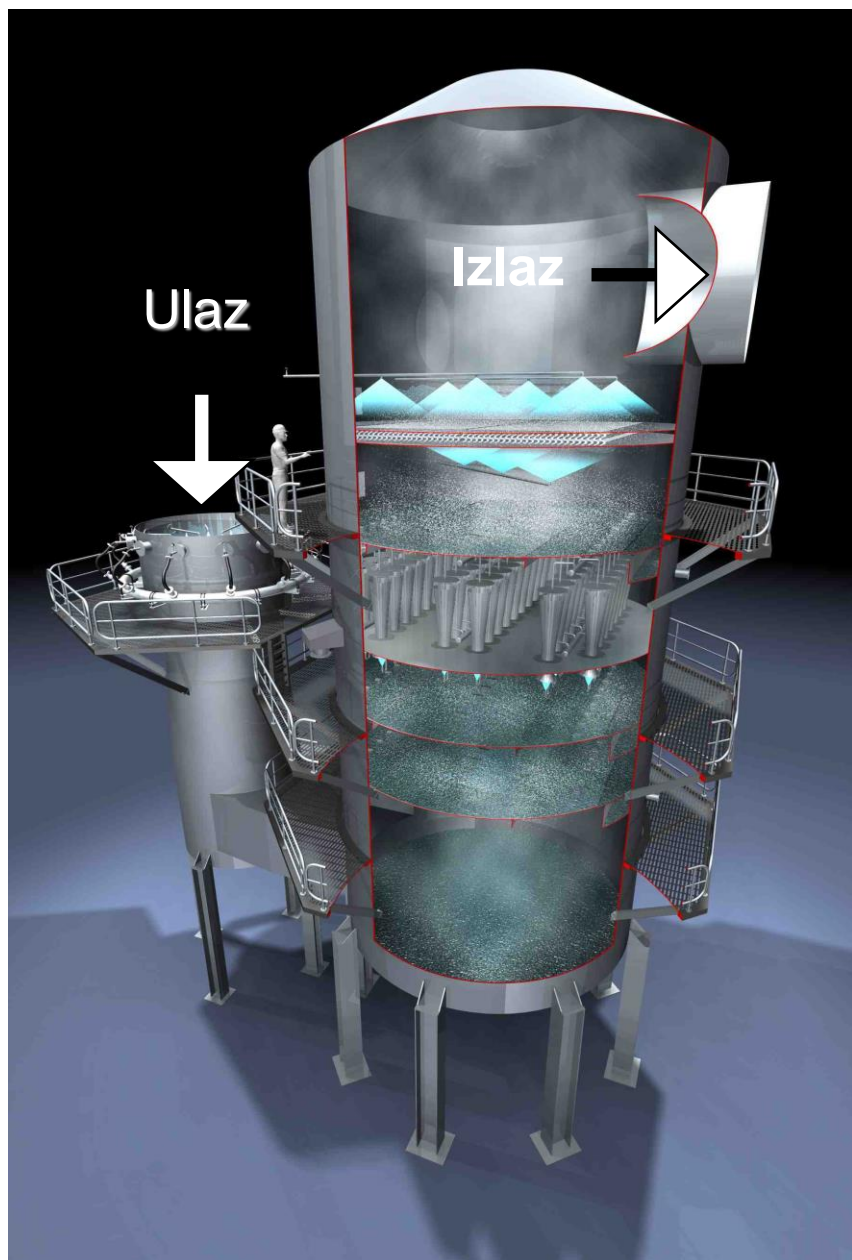
Skruberi s raspršivanjem

često se koriste **za hlađenje ili vlaženje zraka**, a pri čišćenju zraka dolaze u kombinaciji s drugim uređajima.

Koriste se i za:

- **uklanjanje kiselih plinova** (HCl, HF, SiF, SO₂, Cl₂, H₂S....);
- **za apsorpciju H₂S i SO₂** često se umjesto vode i vodenih otopina koriste **amini** (monoetanol-, dietanol-, trietanolamin i sl.), ali takvi apsorbeni ograničeni su za primjenu na sustave bez prisutnosti krutih čestica!

Pojednostavljeni prikaz **skrubera s raspršivanjem s protustrujnim tokom kapljevine i onečišćene plinske smjese**



učinkovitost za uklanjanje čestica (>99.5%)
učinkovitost za uklanjanje kiselih plinova i
kondenzata (>98.9%)
učinkovitost za uklanjanje teških metala
(95% - 99% +)

MicroMist™ Scrubber
EnviroCare International

Princip rada skrubera s raspršivanjem:

- u donji dio skrubera dovodi se onečišćeni plin, koji struji prema gornjem dijelu skrubera, gdje voda iz mlaznica, dispergirana u obliku kiše stvara vodenu zavjesu s kapljicama, na koje se "lijepe" čvrste čestice i tako nastali aglomerati zajedno padaju u taložnu komoru u donji dio uređaja
- iz taložne komore odvodi se otpadna voda (mulj)
- plin ulazi u donjem dijelu uređaja i "prolazi" kroz vodenu zavjesu te izlazi pročišćen na vrhu skrubera; uglavnom uz odvajač kapljica na vrhu uređaja

Učinkovitost: 65-75 %

Skruberi s punjenim slojem

- bolji rezultati postižu se **ako se skruberi u donjem dijelu ispune s odgovarajućim materijalom/punilom** ⇒ u tom slučaju, jedan dio čestica se veže za materijal ispune, a ostale čestice u plinu se izdvajaju kao i u neispunjenom skruberu.

Učinkovitost: 75 - 85 %

- **Brzina strujanja plina ne smije biti prevelika (1-5 m/s)**, jer bi u suprotnom plin odnio sa sobom kapljice (odvajači kapljica na vrhu skrubera), a potrebno je osigurati i dovoljno dugo vrijeme kontaktiranja.

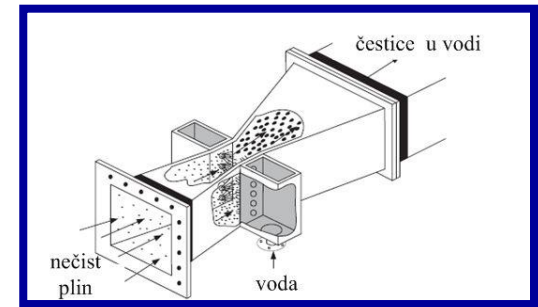
Ključni parametri:

- ***omjer kapljevine i plina (L/G)*** \Rightarrow određen topljivošću plinovitih komponenata, koncentracijom plinovitih spojeva i krutih čestica i značajkama skrubera,
- ***povećanjem omjera (L/G) - povećava se učinkovitost separacije***
 \Rightarrow važno je pronaći optimalni omjer s obzirom na očekivanu učinkovitost i radne troškove,

Osim energetskehtjeva i očekivane učinkovitosti na uspješan izbor skrubera za odgovarajuću primjenu utječe:

- ***kompatibilnost materijala od kojih je skruher izgrađen te kemijskih (kiselost, reaktivnost) i fizičkih značajki plinske smjese (abrazivnost),***
- ***optimalna radna temperatura,***
- ***potreba za dodatnim reagensima i sl.***

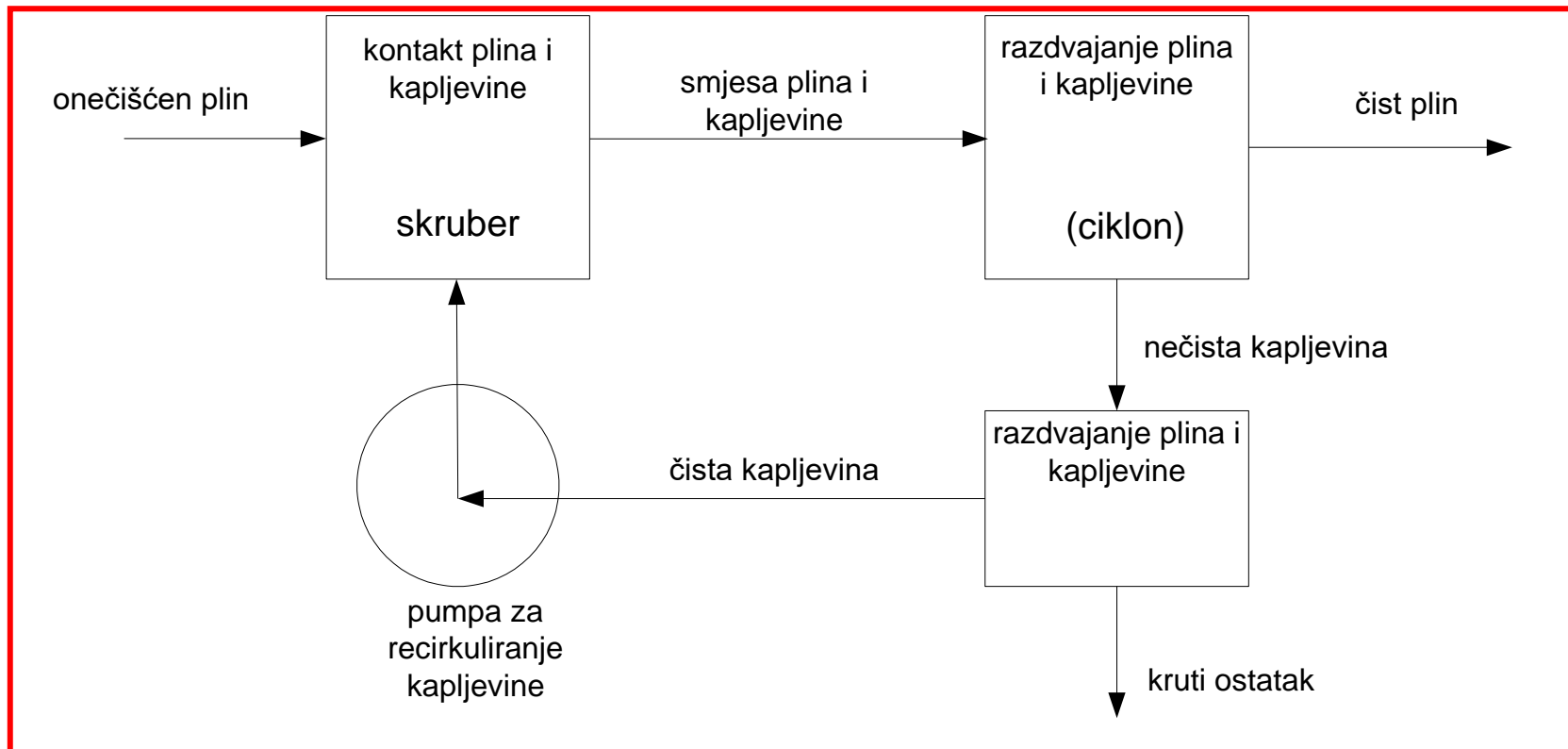
Venturijevi skruberi



Najbolji rezultati postižu se u Venturijevim skruberima!

- za čestice dimenzija od $0,5 \mu\text{m}$ postiže se ***stupanj učinkovitosti i do 99%***.
- onečišćeni plin dovodi se kroz cijev, gdje se zbog naglog sužavanja cijevi na kraju, naglo povećava brzina strujanja plina; istovremeno vodena pumpa ubrizgava vodu, koju plin raspršuje i zajedno tangencijalno ulaze u ciklon.
- zbog velikih brzina strujanja i djelovanja centrifugalnih sila kapljevina sa česticama udara u zidove ciklona, a zatim se slijeva i odlazi u taložnik.

Venturijevi skruberi, osim za otprašivanje, također služe za hlađenje plinova.



Dijelovi integriranog sustava za skrubiranje (mokro otprašivanje) u složenijim izvedbama skrubera s recikliranjem kapljevine

Vrste skrubiranja

Mokro skrubiranje (ili apsorpcija) – za otprašivanje i pranje plinova

⇒ prijenos tvari između topljivog plina i otapala (uglavnom voda) pri njihovom međusobnom kontaktu

- ***fizičko skrubiranje*** – koristi se za uklanjanje kemikalija (fizički procesi prijenosa)
- ***kemijsko skrubiranje*** – uklanjanje i smanjenje koncentracije otopljenih plinovitih komponenata zbog kemijske reakcije
- ***fizičko-kemijsko skrubiranje***

(komponenta je otopljena u apsorbirajućoj tek. fazi i sudjeluje u reverzibilnoj kemijskoj reakciji koja omogućava izdvajanje plinovite komponente, npr. zbog njezinog prevođenja u topljiviji oblik)

Suho skrubiranje – najčešće za uklanjanje plinovitih komponenata i problematičnih komponenata (npr. HF, SO₂, HCl, PAH), teških metala, mirisa iz otpadnog plina ili korozivnih plinova...ubrizgavanjem/raspršivanjem suhog absorbensa

Na apsorpciju onečišćujuće tvari u odgovarajućem otapalu utječe:

- velika površina kontakta,
- velik omjer kapljevina/plin,
- dimenzije/promjer kapljica,
- velika koncentracija onečišćujuće tvari u otpadnoj pl. struji,
- niža temperatura.

Povećanje učinkovitosti uklanjanja finih čestica :

a) primjenom veće energije

To se može postići:

- povećanjem tlaka plina
- atomiziranjem veće količine vode (otapala)

b) metodama koje dovode do porasta veličine čestica/aglomerata:

- snižavanjem temperature \Rightarrow kondenzacija pare
- povećanje protoka \Rightarrow porast turbulencije
- stvaranjem toplinskog gradijenta u uskim prolazima skrubera \Rightarrow raste difuzija čestica u kapljevini

Glavno področje primjene procesa skrubiranja pri obradi odpadnih plinova:

- Uklanjanje/apsorpcija plinovitih komponenata (vodikovi halidi, SO_2 , NH_3 , H_2S ili VOC...)
- uklanjanje krutih čestica malih dimenzija/otprašivanje (čestice obično manje od 2-3 μm)

Otopine za skrubiranje:

- **H₂O** (halidi, NH₃ i dr.)
- **alkalne otopine** - za uklanjanje kiselih komponenata, npr. halida, SO₂, fenola, Cl₂ i dr.; za desulfurizaciju bioplina i dr.,
- **alkalno-oksidacijske otopine**, npr. alkalna otopina s Na-hipokloritom, ClO₂, O₃ ili H₂O₂,
- **Na₂S₄ otopine** za uklanjanje Hg,
- **kisele otopine** (uklanjanje NH₃, amina i sl.),
- **otopine monoetanol amina (MEA) i dietanolamina (DEA)**(npr. za apsorpciju i uklanjanje H₂S)

Izbor vrste skrubera zavisi o:

- željenoj učinkovitosti,
- potrebnoj energiji,
- potrebnim aditivima (kem. i fiz.-kem. skrubiranje),
- značajkama otpadnih plinskih struja.

⇒ obično rade sa prethodnim pothlađivanjem

(raspršivanjem, *quench*) *da bi se ohladio ulazni plin i istovremeno zasitila plinska struja*, izbjegavajući na taj način smanjenje brzine apsorpcije i isparavanja otapala

Proces uklanjanja krutih čestica u skruberu uključuje sljedeće stupnjeve:

1. kondicioniranje plina i čestica, tj. snižavanje temperature i zasićenje s vodenom parom,
2. dispergiranje (raspršivanje) kapljevine, npr. strujom plina, sapnicama ili rotirajućim diskovima,
3. sakupljanje krutih čestica u sloju kapljevine ili na kapima,
4. uklanjanje krutih čestica i kapljevine iz struje otpadnog plina.

***Potreba za kapljevinom u procesu skrubiranja je reda veličine
1-3 l/ m³ plina***

Značajke procesa skrubiranja

- uklanjanje vrlo malih čestica, plinova, kiselih i alkalnih spojeva
- mali kapitalni troškovi u usporedbi sa ESP i vrećastim filtrima
- velik pad tlaka \Rightarrow troškovi rada
- **plinovite otpadne smjese \Rightarrow tekuće otpadne smjese** (tehnički gledano to je **opravdano samo ako su volumni protoci otpadne vode zanemarivo mali u odnosu na volumne protoke otpadnog plina koji se obrađuje i ako se obrada tako nastalih vodenih tokova može provesti primjenom nekog jednostavnog procesa**)
- ulazne brzine strujanja plina: ~ 100 m/s
- učinkovitost: ~ 99 %
- pad tlaka: do 1 bar!

Prednosti

- mogu se bez većih rizika koristiti za obradu velikih volumena plinova koji sadrže zapaljive, ljepljive i eksplozivne sastojke,
- omogućavaju istovremenu apsorpciju plina i odvajanje krutih čestica u samo jednom stupnju,
- omogućavaju hlađenje toplih plinova (i kasniju primjenu nekog drugog procesnog uređaja),
- omogućavaju uklanjanje mirisa, teških metala i suspendiranih čestica,
- ukupna učinkovitost može se mijenjati,
- korozivni plinovi i krute čestice mogu se neutralizirati,
- dolaze u različitim izvedbama \Rightarrow velika fleksibilnost rada,
- niski inicijalni troškovi instaliranja,
- umjereno visoka učinkovitost za uklanjanje sitnih čestica,
- moguće nastajanje korisnih međuprodukata (kemikalije, mineralna gnojiva i sl.).

Nedostaci

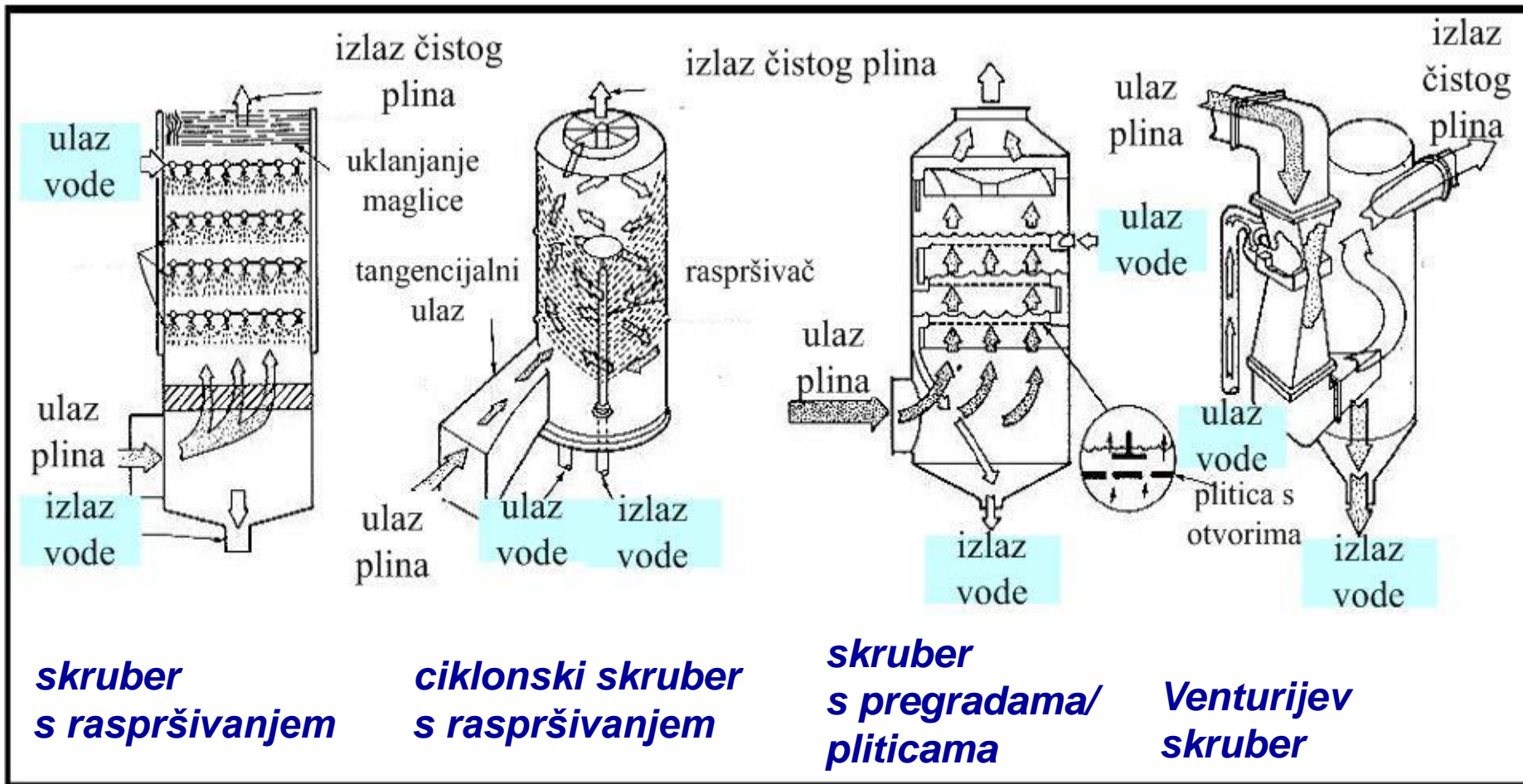
- velika potreba za energijom za postizanje visoke učinkovitosti,
- umjereni do visoki troškovi održavanja (korozija, abrazija, oštećenje rotirajućih dijelova, mlaznica i sl.),
- problemi vezani uz obradu otpadnih voda/muljeva,
- separirane čestice u vlažnom stanju; skupo odlaganje krutog otpada/mulja,
- prikupljene čestice ponekad mogu biti nečiste i ne mogu se jednostavno reciklirati,
- zaštita od smrzavanja/pothlađivanja; ponekad je potrebno predgrijavanje,
- problemi vezani uz ponovno pokretanje rada i dr.,
- mogućnost velikog pada tlaka, Δp (potreba za energijom).

Područja primjene skrubera:

- metalurška ind.
- kemijska industrija
- ljevaonice
- spalionicama
- ind. papira i dr.

- uobičajena primjena za uklanjanje kiselih plinova i mirisa
- primjena ograničena na uklanjanje jako topljivih plinova

Različite izvedbe skrubera - usporedba



Skruber s raspršivanjem (ili kolonski skruber)

- otpadni plin se dovodi u kontakt sa raspršenim kapima; veličina kapi mora se dobro optimirati primjenom **sapnica/mlaznica** da se postigne zadovoljavajuća površina kontakta,
- iz vode koja **recirkulira** kroz sustav moraju se ukloniti krute čestice da bi se spriječilo prljanje sapnica (čišćenje i zamjena sapnica predstavlja glavni dio posla vezanog uz održavanje sustava),
- ukupna učinkovitost iznosi ca. 90 % za čestice $> 8 \mu\text{m}$,
- mala potrošnja energije, rade pri relativno malom padu tlaka (mali Δp)
- primjena u ind. papira i dr.

Različite izvedbe skrubera s raspršivanjem

- okomite izvedbe skrubera s raspršivanjem
- vodoravne izvedbe skrubera s raspršivanjem

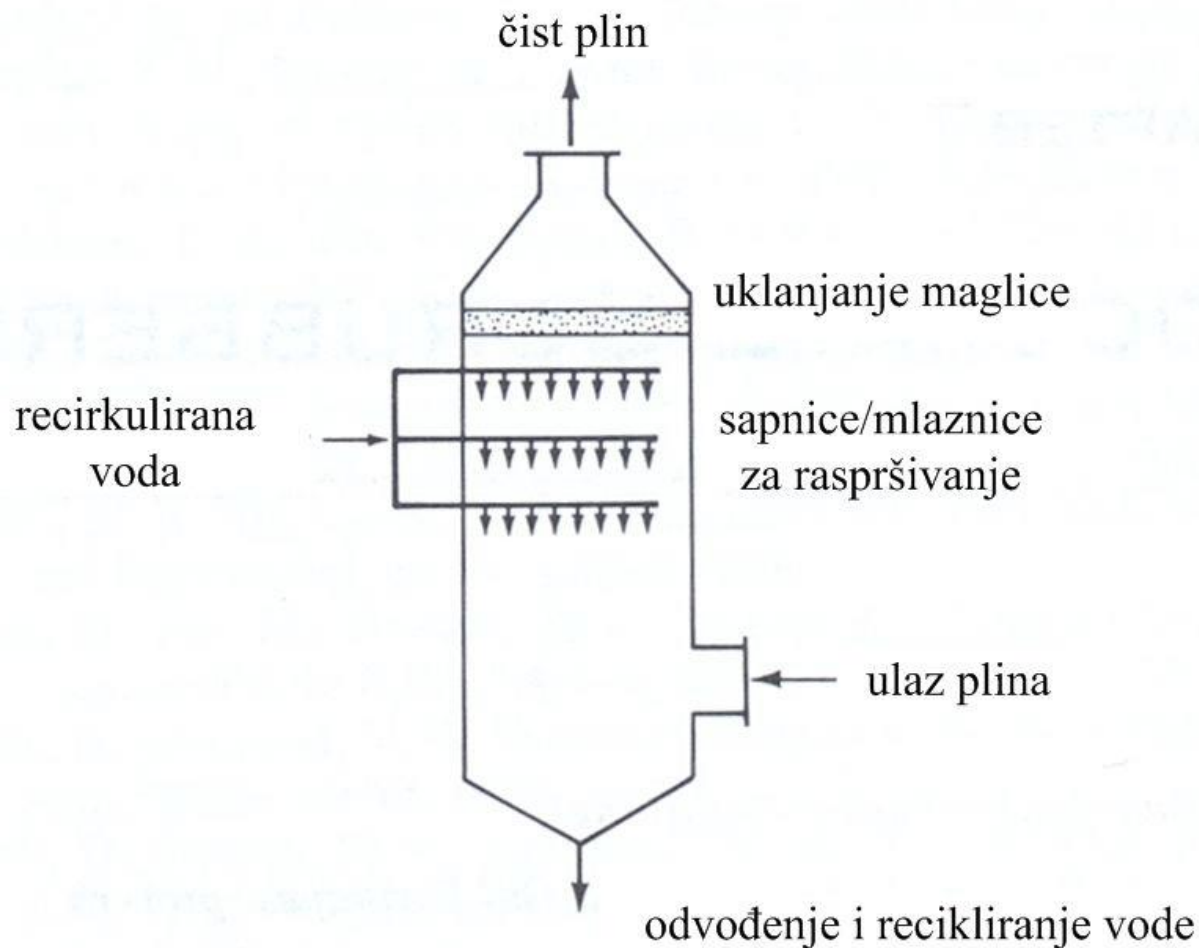
protok kapljevine: 1,34 – 2,68 l/m³

tlak kapljevine: 241-344 Pa

Učinkovitost procesa zavisi o:

- veličini kapi,
- protoku plina,
- omjeru protoka plin/kapljevina,
- putanji kapi.

a) okomit skruber s raspršivanjem (protustrujni tok)

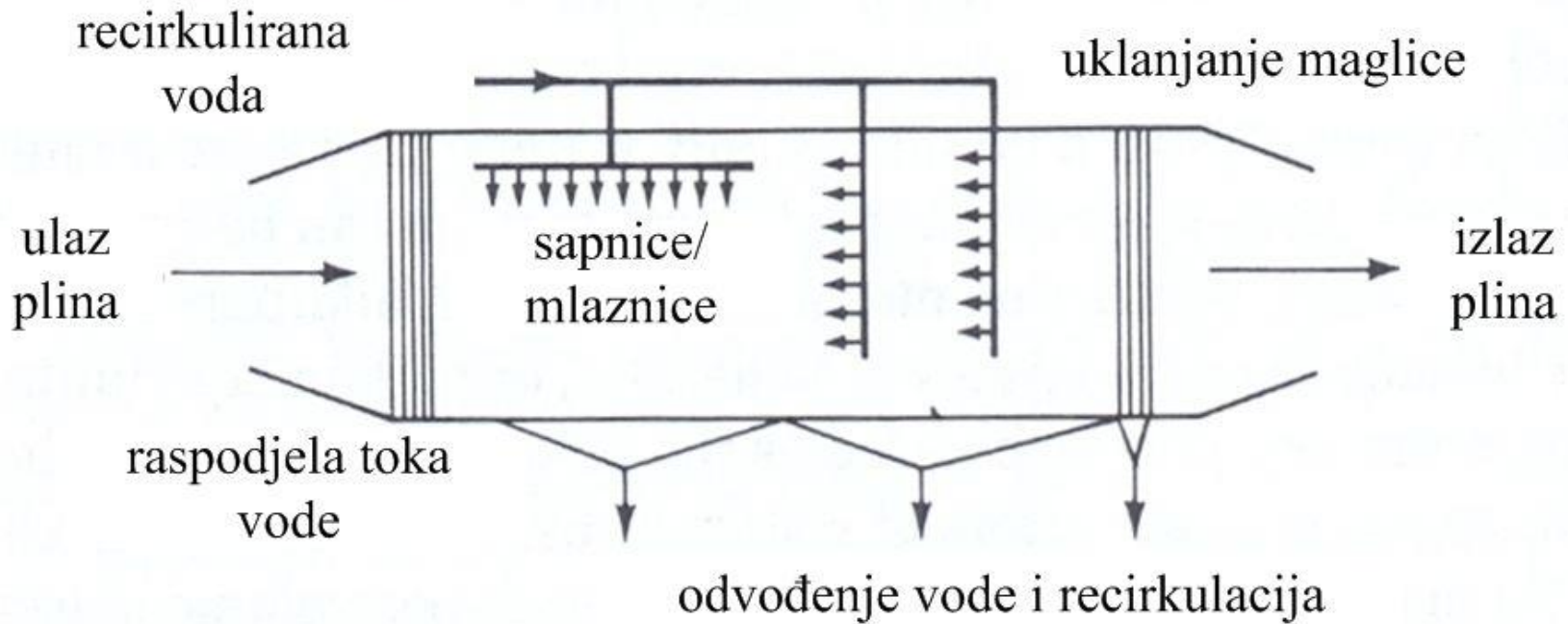


potreban je **velik omjer kapljevina-plin**

za uklanjanje finih čestica: $> 3 \text{ l/m}^3$

- kapi moraju biti dovoljno velike da bi njihova brzina taloženja bila veća od linearne brzine strujanja plina

b) vodoravan skruber s raspršivanjem (poprečni tok)



Ciklonski skruberi s raspršivanjem

- tangencijalno uvođenje nečistog plina – veće linearne brzine plina (centrifugalne sile),
- dodatne centrifugalne sile omogućavaju dobru separaciju čestica i plina i omogućavaju rad s manjim dimenzijama kapi \Rightarrow veća učinkovitost u odnosu na kolonski skruber s raspršivanjem,
- mogu raditi pri manjim protocima kapljevine u odnosu na skrubere s raspršivanjem, ali zahtijevaju veću snagu uslijed većeg pada tlaka,
- prikladniji su od skrubera s raspršivanjem kada je veći maseni udio krutih čestica koje je potrebno ukloniti

učinkovitost: ca. 95 % za čestice $> 5 \mu\text{m}$

protok kapljevine: 0,4-0,8 l/m³

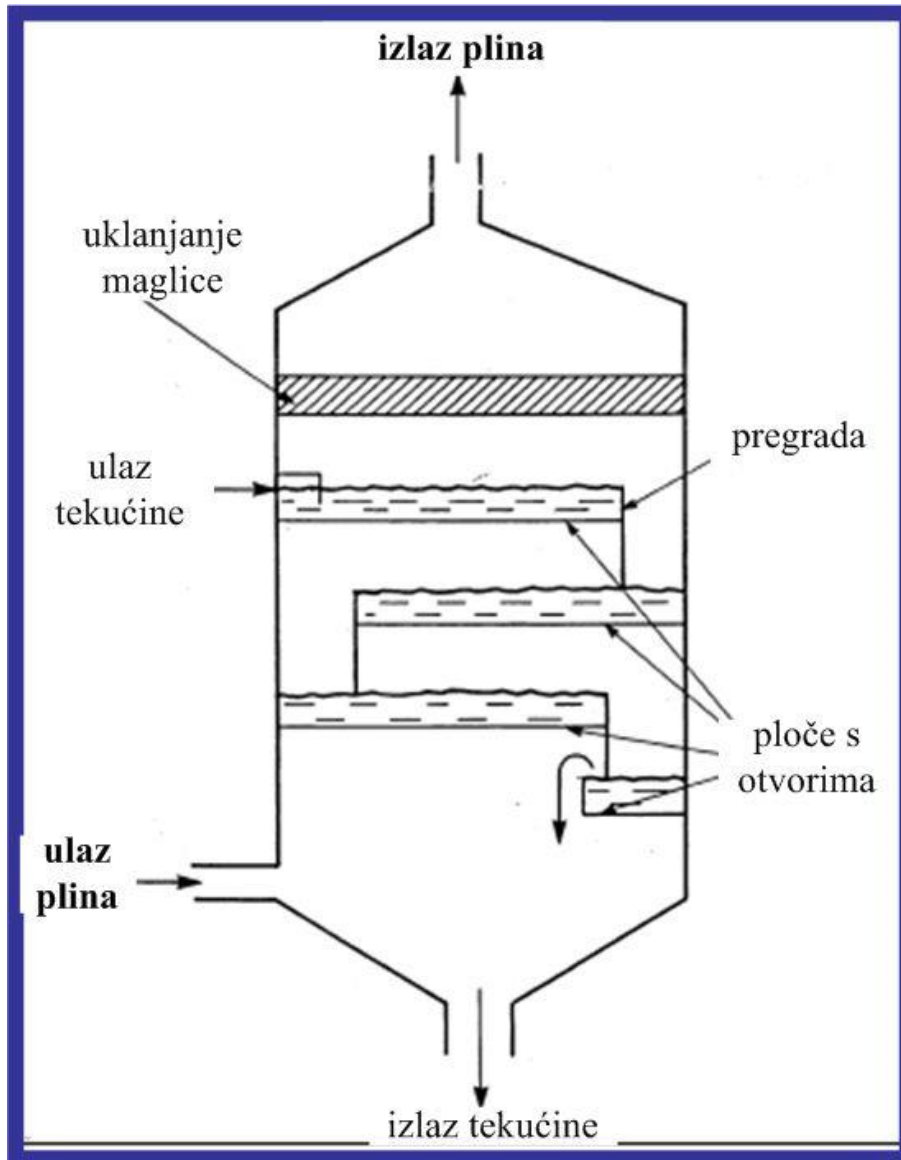
pad tlaka: 1000-2000 Pa

Skruberi s pregradama – stvaranje tankog sloja vode

Smjesa zraka i kapljevine udara u čvrstu površinu (prepreku ili pregradu):

- a) **pregrada prekrivena kapljevinom** (rad uz male brzine recirkulacije vode, ca. $0,07 \text{ l/m}^3$; učinkovitost: **90 %** za čestice $>2 \mu\text{m}$)
- b) **plitica s otvorima** koja sadrži sloj kapljevine i pjene, a zatim plin udara u ploču smještenu iznad plitice s otvorima; protok kapljevine: $0,26 - 0,4 \text{ l/m}^3$; učinkovitost: **97 %** za čestice veličine ca. $5 \mu\text{m}$)
- c) **na pliticama se nalazi sloj punila, npr. plastičnih kuglica** koje su djelomično fluidizirane, a abrazivno djelovanje olakšava čišćenje plitica

Skruberi s pregradama

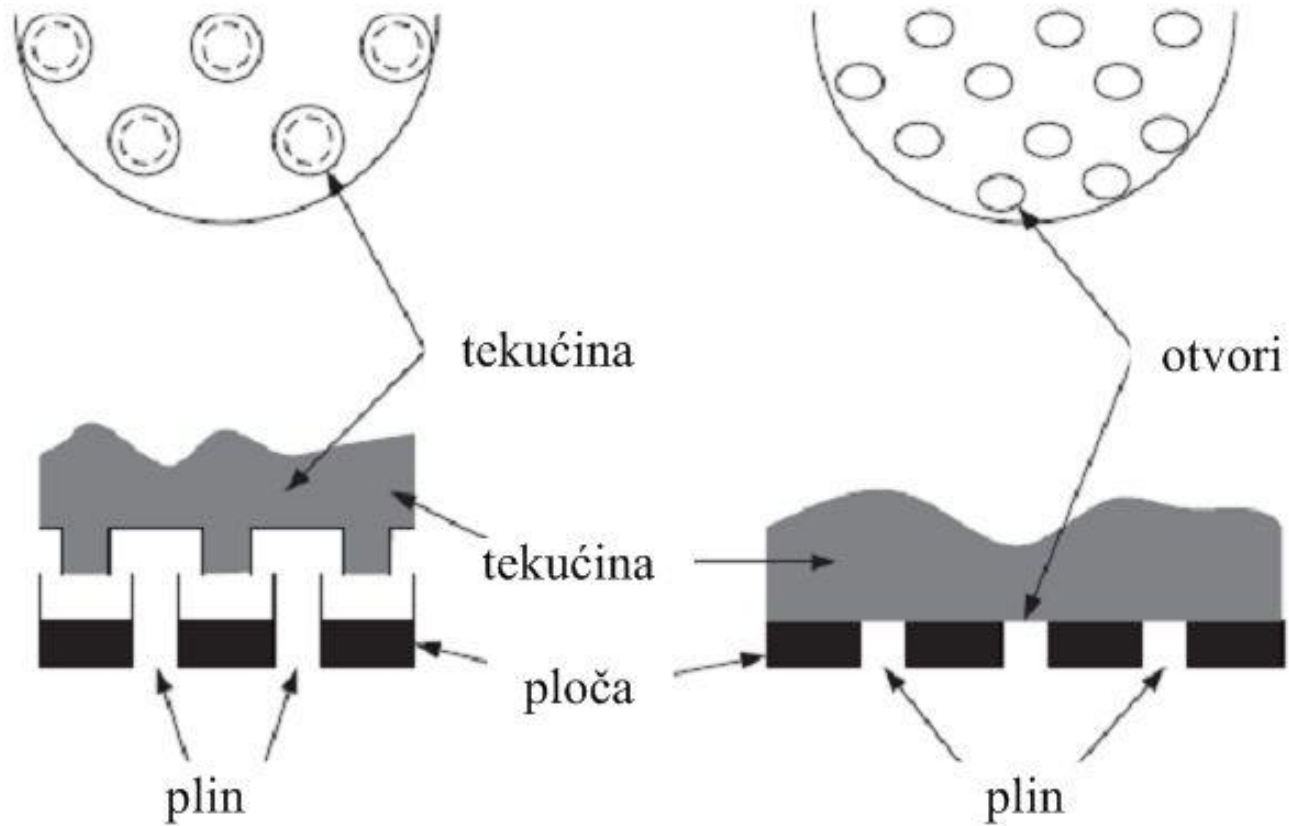


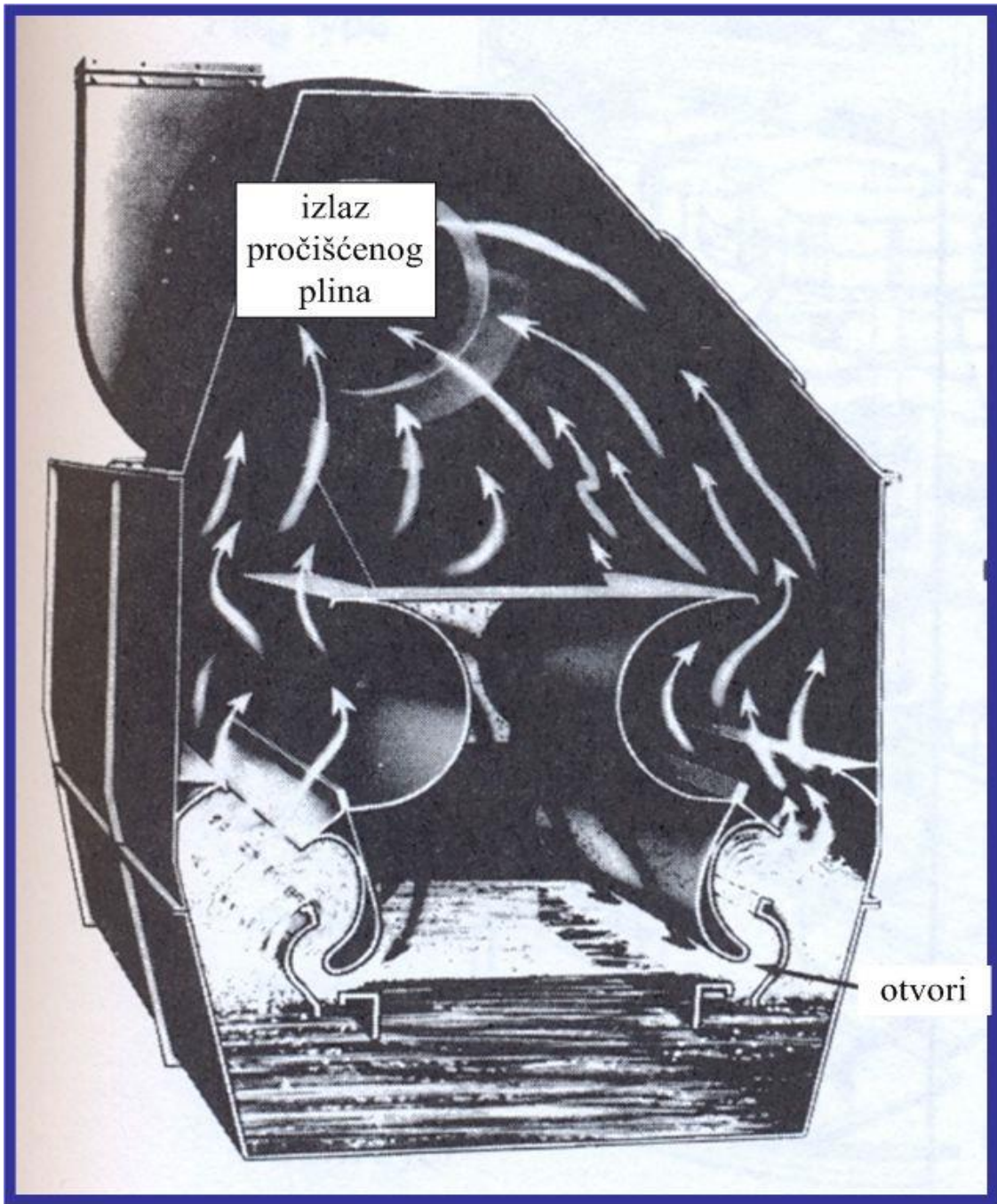
Ploče s otvorima: 5000 do 50 000 /m²

Značajke:

- uporaba za uklanjanje kiselina, SO₂, mirisa i sl.,
- velika učinkovitost,
- lakoća održavanja i čišćenja,
- fleksibilnost rada (pri različitim protocima)

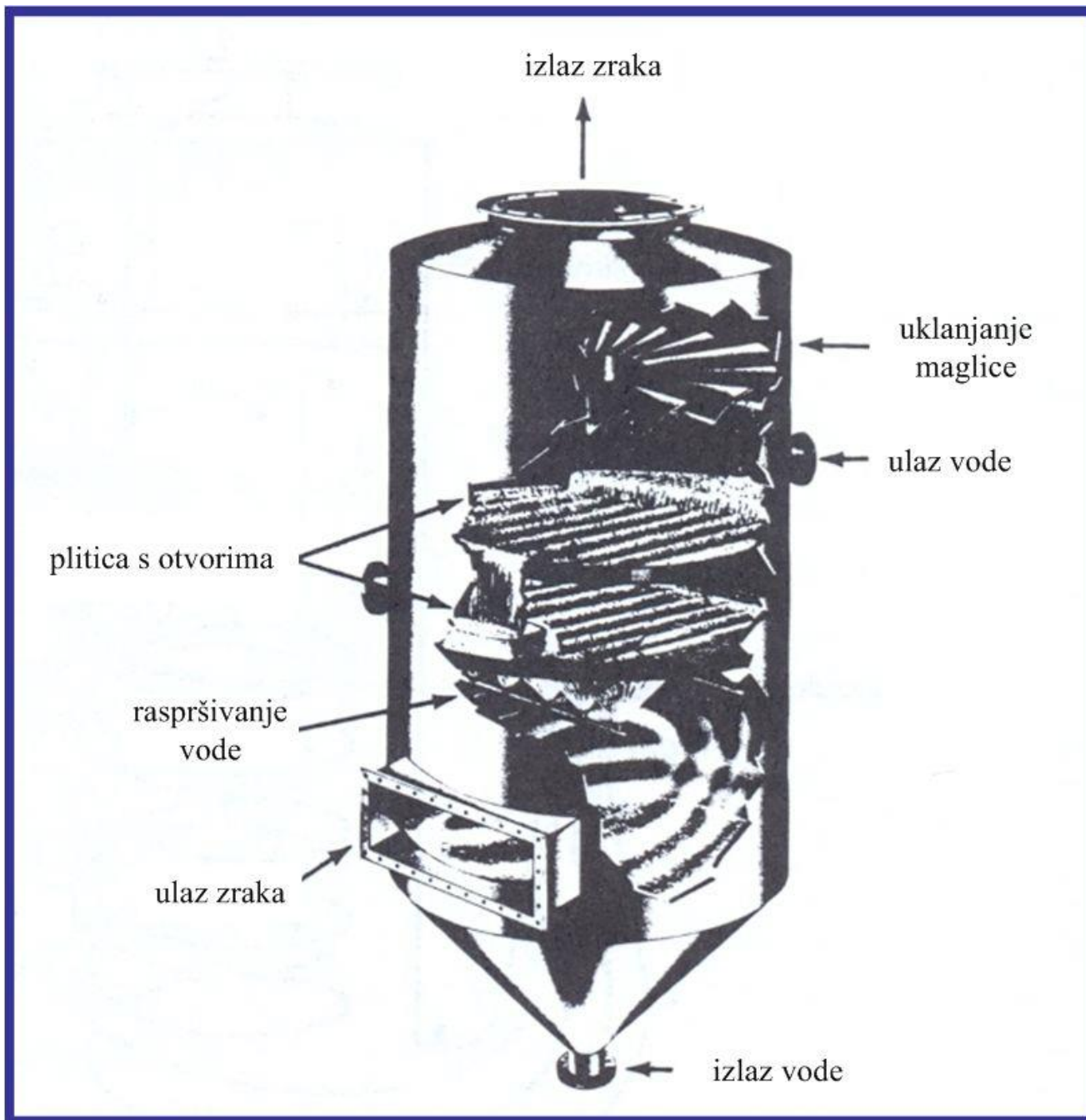
Različite izvedbe otvora na pregradama





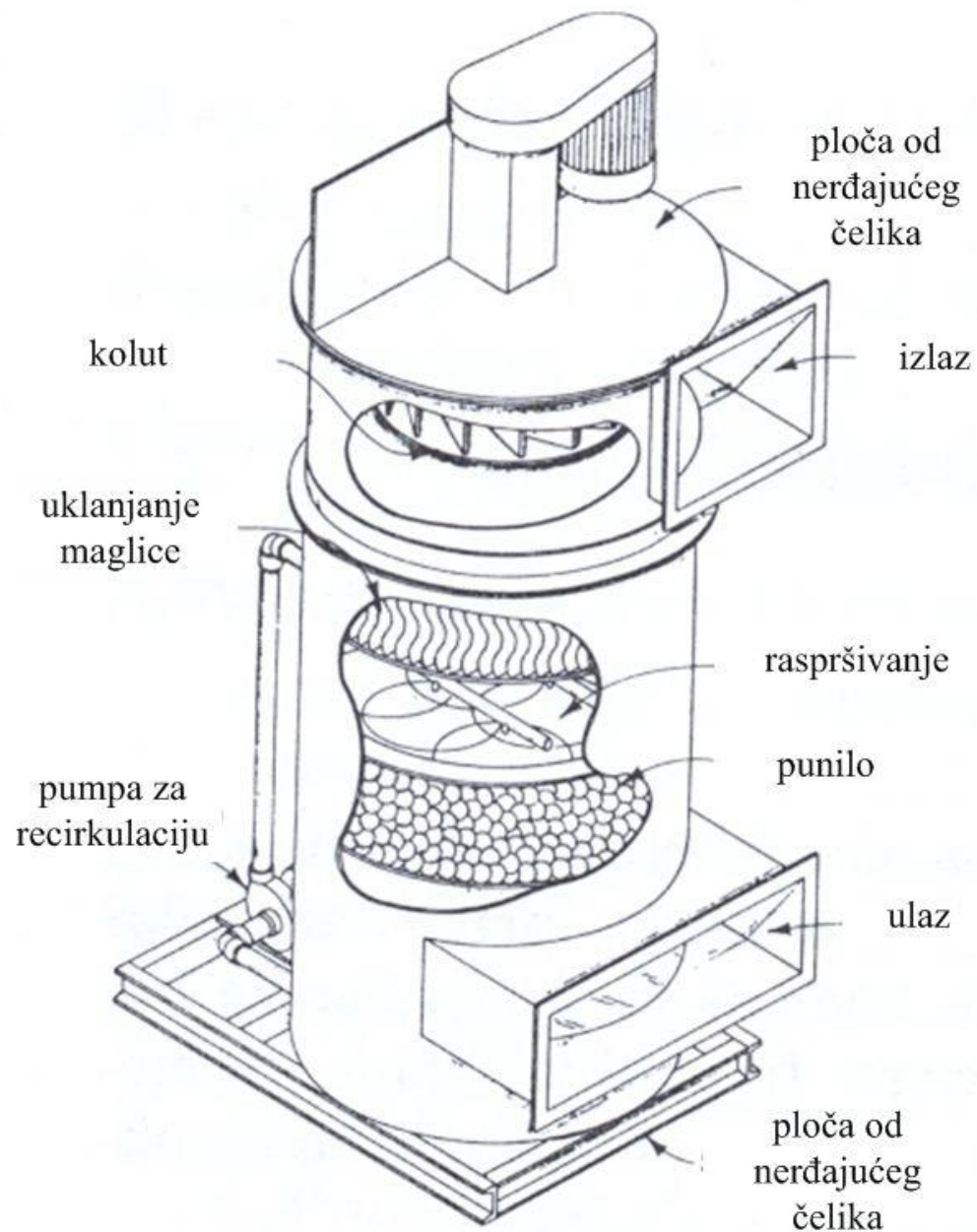
a)

pregrada prekrivena kapljevinom



b)

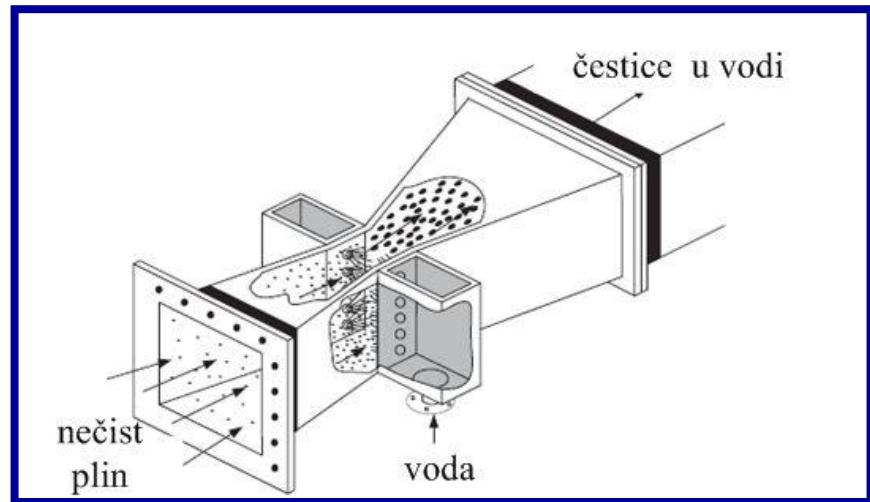
plitica s otvorima



c)

na pliticama se nalazi
punilo

Venturijev skruber



Značajke:

- najveća učinkovitost, čak i za uklanjanje vrlo malih čestica ($< 2 \mu\text{m}$)
- radni uvjeti: $Q_l/Q_G = 0,001-0,003$; $V_G = 60-120 \text{ m/s}$
- **istostrujni rad**
- ponekad su jedina mogućnost za pročišćavanje (npr. za uklanjanje ljepljivih, zapaljivih i korozivnih materijala)
- zbog mogućnosti rada pri velikim protocima zraka ($\sim 120 \text{ m/s}$) \Rightarrow **mogu biti malih dimenzija; jednostavni za održavanje**
- velik Δp !

Venturijev skruber s ciklonskim separatorom (za uklanjanje kapljica)

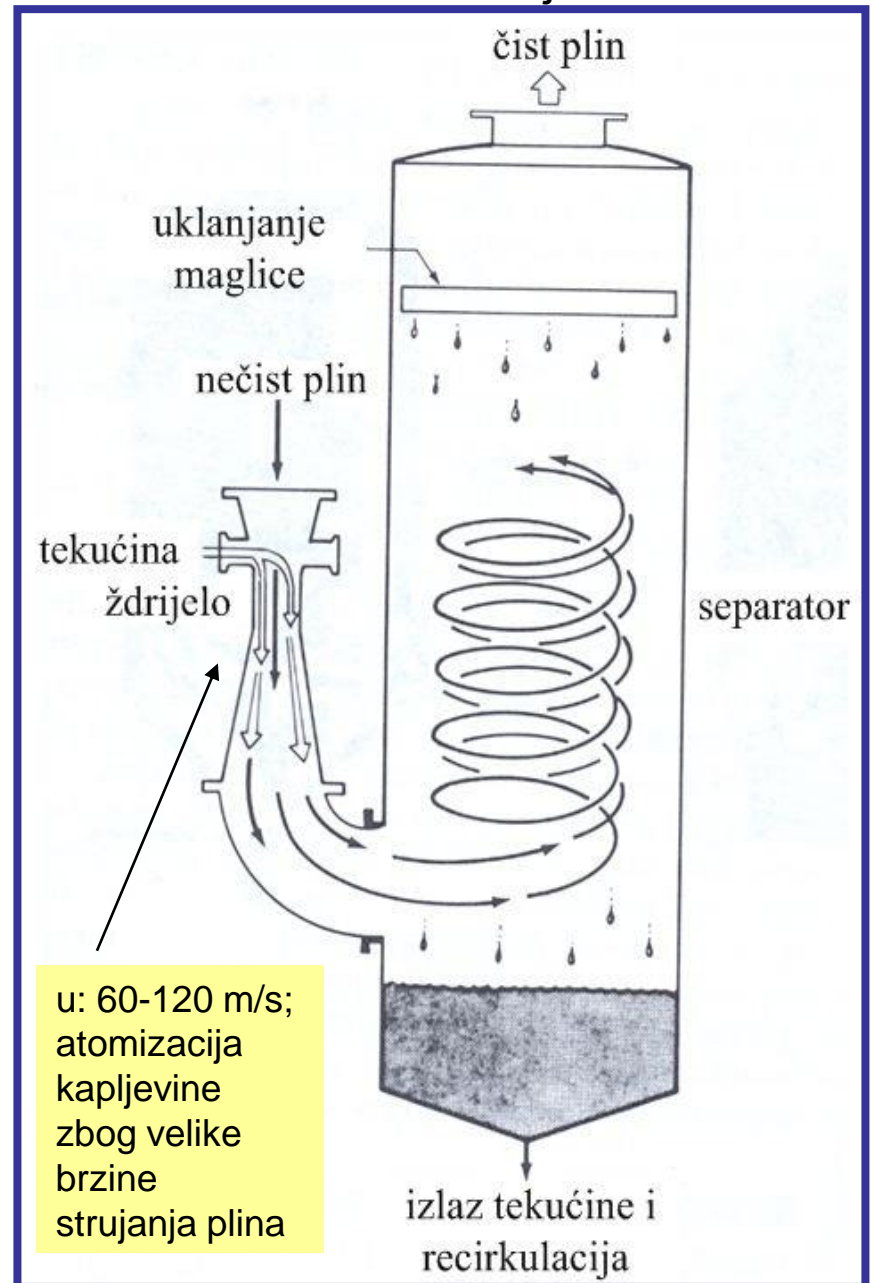
- raspršivanje kapljevine velikom brzinom strujanja plina u ždrijelu skrubera (zbog velikog suženja) ⇒ razbijanje/usitnjavanje kapi

- velike relativne brzine postižu se injektiranjem vode pod tlakom u ždrijelo (grlo) Venturijeve cijevi kroz koju prolazi zrak brzinom 45-152 m/s

učinkovitost: > 98 % za čestice > 0,5 μm (uz velik pad tlaka!)

- kapljice veličine 75-150 μm uspješno se uklanjaju pri ulaznim brzinama u ciklon od 25-40 m/s; pretpostavlja se da se kapljice vode ponašaju kao i krute čestice u ciklonu pa je moguće primijeniti iste izvedbene jednadžbe

uobičajeni ind. skruber



Izbor materijala za izradu Venturijevog skruberera zavisi o:

- temperaturi
- abraziji
- koroziji
- kemijskom djelovanju

Učinkovitost:

raste s brzinom strujanja (koja zavisi o promjeru Venturijeve cijevi) i s padom tlaka

Ostale moguće izvedbe skrubera:

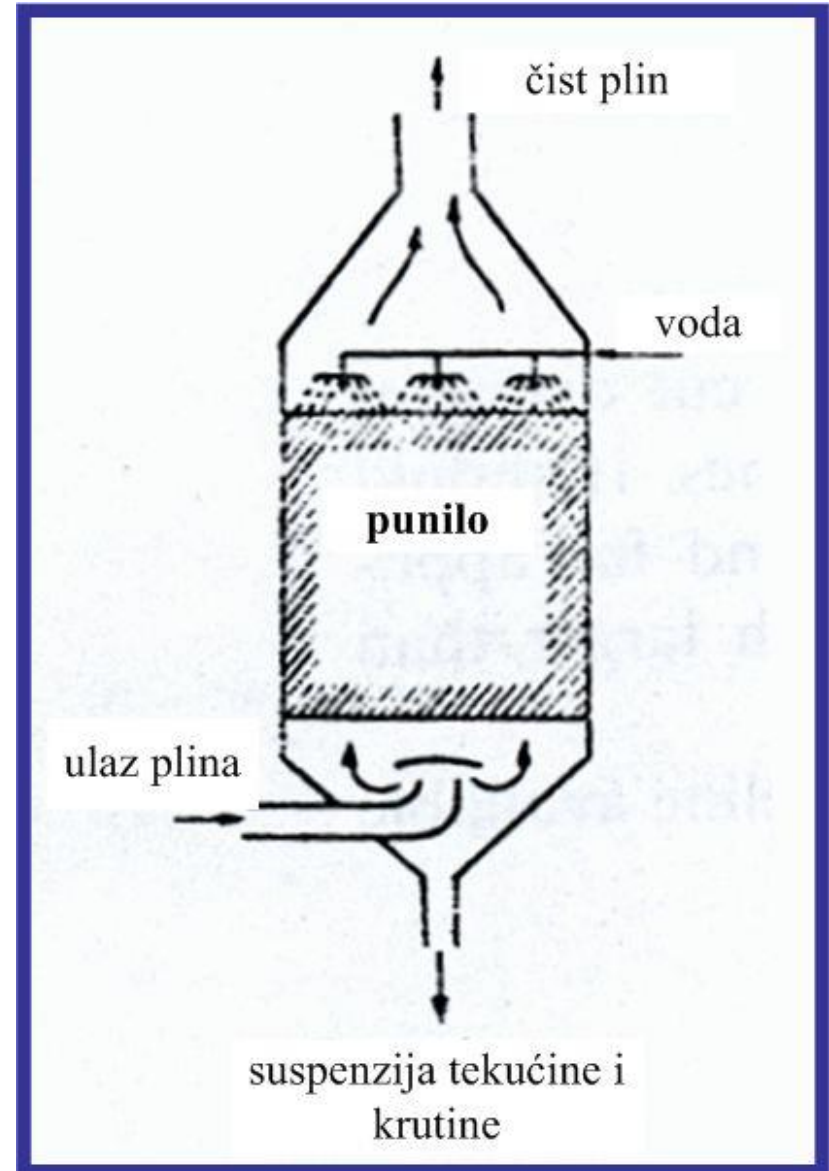
- mehanički skruberi
- skruberi s punjenim slojem,
- skruberi s pokretnim slojem,
- Vorteks skruberi i dr.

Mehanički skruberi

- imaju motorom pogonjeno mješalo smješteno u zoni kontakta plina i kapljevine,
- nedostatak: veliki troškovi održavanja!

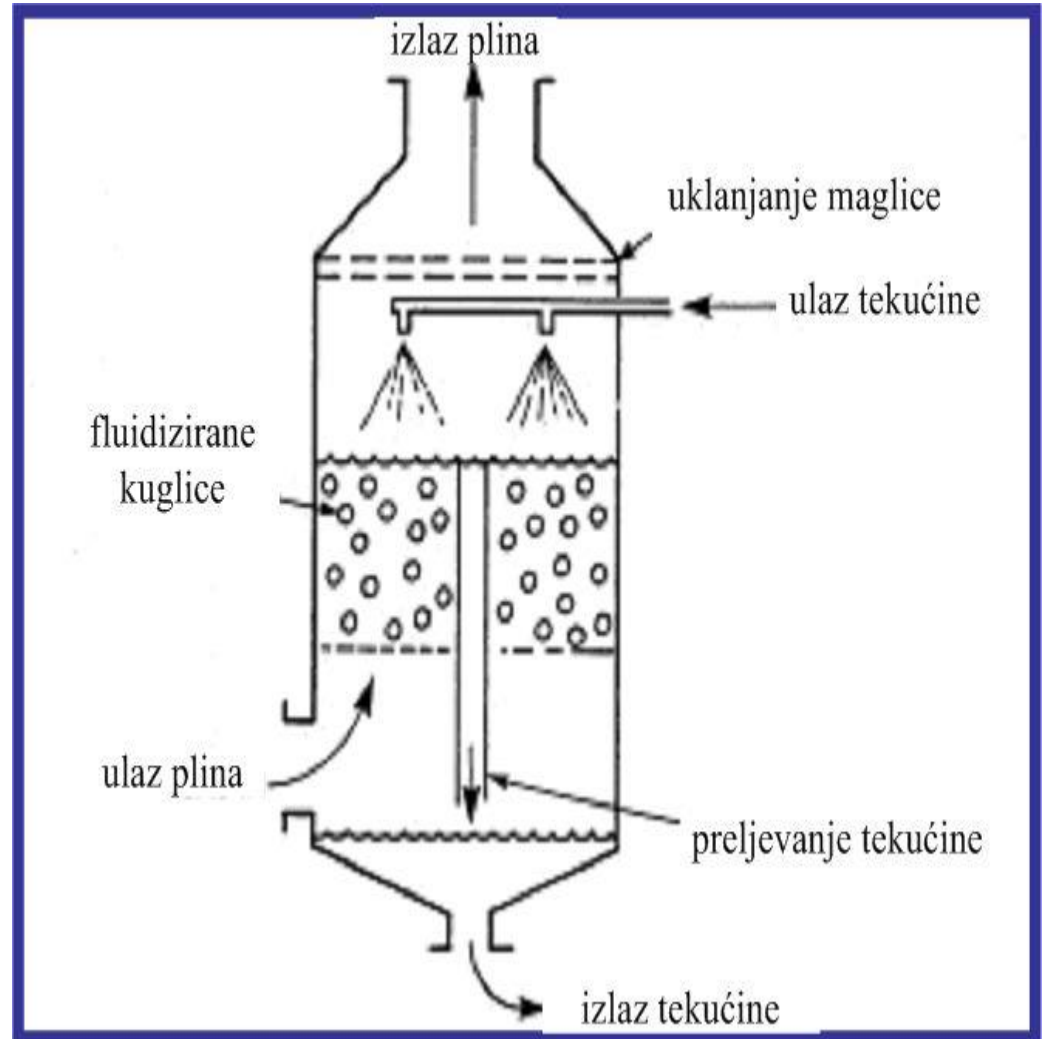
Skruber s punjenim slojem

- raspršivanje kapljevine u struju onečišćenog zraka postiže se pomoću sapnica
- protustrujni tok kapljevine i plina
- ***kolona ispunjena punilom***
⇒ poboljšanje kontakta plina i kapljevine
- ***uz primjenu odgovarajućeg reagensa koriste se za apsorpciju H_2S , SO_2 , NH_3 , Cl_2 , VOC i dr.***
- ***može doći do začepljenja sloja***
⇒ ograničena primjena za uklanjanje čestica (samo ako je sadržaj čestica $< 0,5 \text{ g/m}^3$)



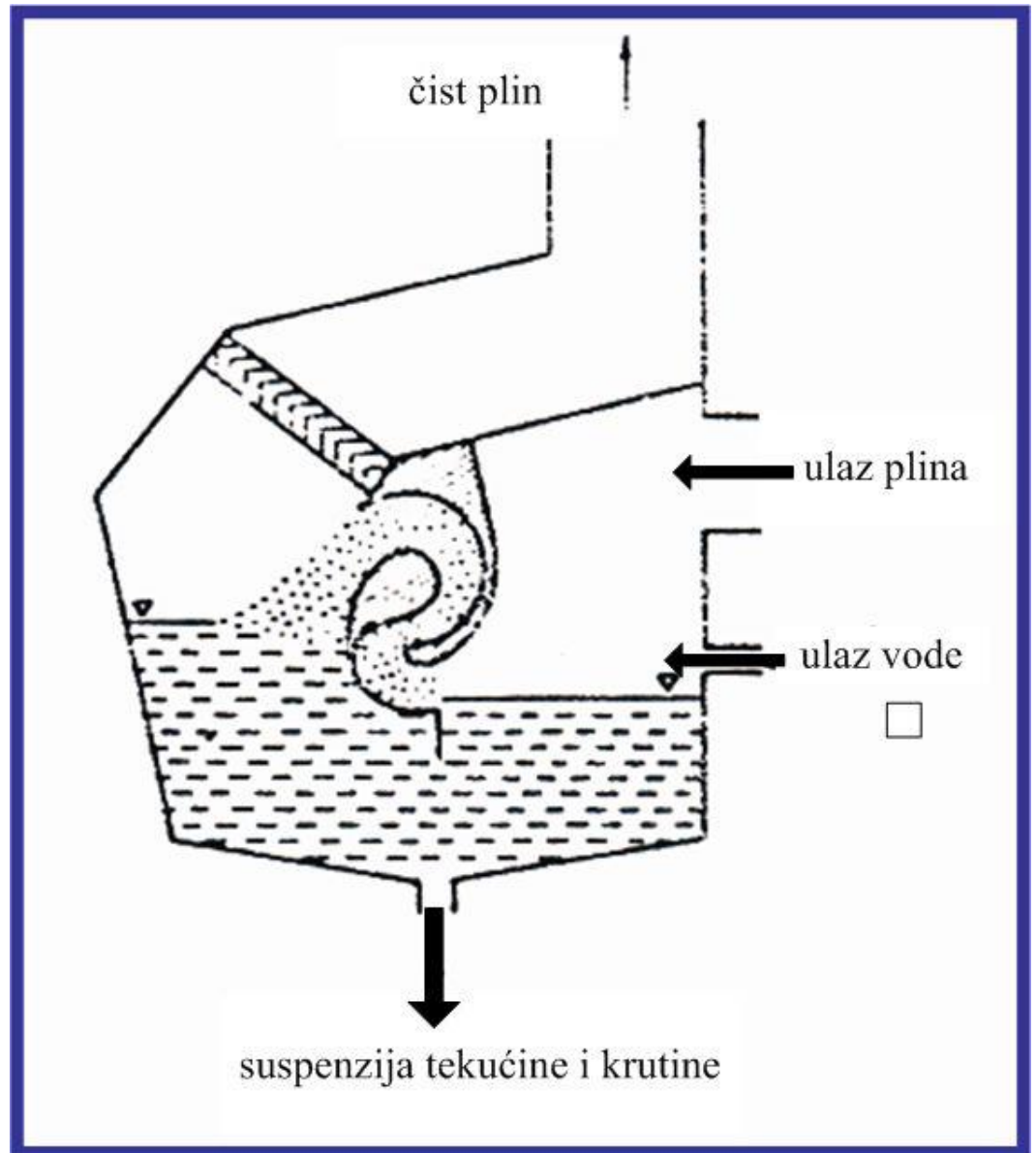
Skruber s pokretnim (fluidiziranim) slojem

- sastoji se od zone punila, obično plastičnih kuglica koje su fluidiziranom stanju
- primjenjuju se za uklanjanje para SO_2 , HF i dr.
- manja mogućnost pojave začepjenja
- manji pad tlaka u sustavu



Vorteks skruber

- uvođenje onečišćenog plina i kapljica vode u vorteks kanal
- učinkovitost odvajanja ovisi o relativnoj brzini reakcije između kapljice vode i prašine



Proračun skrubera

Proračun se zasniva na određivanju **penetracije** za zadani promjer čestice

$$Pt_d = 1 - \eta_d$$

Penetracija - udjel čestica odgovarajućeg promjera koje zaostaju nakon procesa skrubiranja

Pt_d - penetracija (udjel čestica odgovarajućeg promjera)

η_d - frakcijska učinkovitost za čestice promjera d_p

Ukupna penetracija:

$$Pt_0 = \sum (Pt_d M_d)$$

M_d - maseni udjel čestica odgovarajućeg promjera

Skruber s raspršivanjem

Calvert (1977):

$$Pt_d = \exp\left(-\frac{3Q_L V_{td} z \eta_d}{4Q_G r_d (V_{td} - V_G)}\right) = \exp\left(-\frac{A_d V_{td} \eta_d}{Q_G}\right)$$

$$A_d = \frac{3Q_L z}{4r_d (V_{td} - V_G)}$$

$$\eta_d = \left(\frac{K_p}{K_p + 0.7}\right)^2$$

$$K_p = \frac{C \rho_p d_p^2 V_{pd}}{9 \mu_G d_d} = \frac{\rho_w d_a^2 V_{pd}}{9 \mu_G d_d}$$

Pt_d – penetracija za danu veličinu čestice (od 0 do 1)

Q_L – volumetrijski protok kapljevine, m^3/s

Q_G – volumetrijski protok plina, m^3/s

V_G – linearna brzina, cm/s

V_{td} – brzina taloženja kapi, cm/s

η_d – frakcijska učinkovitost za pojedinu kap (0-1)

r_d – radius kapi, cm

z – dužina kontaktne zone skrubera, cm

A_d – poprečna površina svih kapi u skruberu, cm^2

C – Cunninghamov faktor, bezdim.

ρ_p – gustoća čestica, g/cm^3

d_p – promjer čestice, cm

V_{pd} – brzina čestica (u odnosu na kapi), cm/s

d_d – promjer kapi, cm


μ_G – viskoznost plina, P

d_a – aerodinamički promjer čestice, cm

ρ_w – gustoća vode, g/cm^3

Skruber s raspršivanjema

- Langmuir i Blodgett (1946):
 - **frakcijska učinkovitost za pojedinu kap, η_d** može se opisati **bezdimenzijskom grupom**:

$$\eta_d = \frac{k V_{pd} V_{tp}}{g d_d}$$


k – empirijska konstanta

V_{tp} – brzina taloženja čestica, cm/s

V_{pd} – brzina čestica (u odnosu na kapi), cm/s

g – gravitacijska konstanta, cm/s²

d_d – promjer kapi, cm

- **izraz pokazuje da smanjenjem veličine kapi raste učinkovitost; zapravo postoji optimalna veličina kapi, a učinkovitost ne raste smanjenjem veličine kapi ispod optimalne vrijednosti**

Venturijev skruber

Pt_d – penetracija za zadanu veličinu čestice

$$Pt_d = \exp\left(\frac{Q_L V_G \rho_L d_d}{55 Q_G \mu_G} \left(-0.7 - K_p f + 1.4 \ln\left(\frac{K_p f + 0.7}{0.7}\right) + \frac{0.49}{0.7 + K_p f}\right) \frac{1}{K_p}\right)$$

K_p - inercijski parametar privlačenja izračunat pomoću izraza za brzinu plina na ulazu u ždrijelo, bezdim. parametar

$$K_p = \frac{C \rho_p d_p^2 V_{pd}}{9 \mu_G d_d} = \frac{\rho_w d_a^2 V_{pd}}{9 \mu_G d_d}$$

f – empirijski faktor ($f= 0.25$ za hidrofobne čestice; $f=0.5$ za hidrofilne čestice)

d_d – Sauterov srednji promjer kapi, μm

(Nukiyama-Tanasawa (1938))

$$d_d = \frac{58,000}{V_G} \left(\frac{\sigma}{\rho_L}\right)^{0.5} + 597 \left(\frac{\mu_L}{(\sigma \rho_L)^{0.5}}\right)^{0.45} \left(1000 \frac{Q_L}{Q_G}\right)^{1.5}$$

d_d – Sauterov srednji promjer kapi

ρ_L – gustoća kapljevine

σ – površ. napetost kaplj.

μ_L – viskoznost kaplj.

Pad tlaka u Venturijevim skruberima

- do pada tlaka dolazi uslijed naglog ubrzanja kapljica

Yung. et al. (1977)

$$\Delta P = 2\rho_L V_G^2 \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) (1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2})$$

$$X = \frac{3l_t C_D \rho_G}{16d_d \rho_L} + 1$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}$$

ΔP – pad tlaka

V_G – brzina strujanja plina, cm/s

X – bezdimenzijska dužina ždrijela

l_t – dužina venturi ždrijela, cm

C_D – faktor otpora za kapi sa

Sauterovim srednjim promjerom, bezdimenz.

Re – Re značajka za kapljice, bezdimenz.

Lapple i Kamack (1955) – *učinkovitost skrubera može se dovesti u korelaciju s energijom potrebnom za ostvarenje stvarnog kontakta plin-kapljevina*

⇒ skruberi različite geometrije mogli bi osigurati sličnu učinkovitost ukoliko rade uz istu razinu energije kontaktiranja plin-kapljevina

Snaga kontaktiranja, P_t – energija raspršena po jedinici volumena plina koji se obrađuje

Broj jedinica prijenosa, N_t : $N_t = \alpha P_t^\beta$ **Semrau (1963, 1980)**

N_t – broj jedinica prijenosa, bezdimenzijski

P_t – snaga kontaktiranja, kWh/1000 m³

α – koeficijent koji prevodi N_t u bezdimenzijski broj

β – bezdimenzijski eksponent

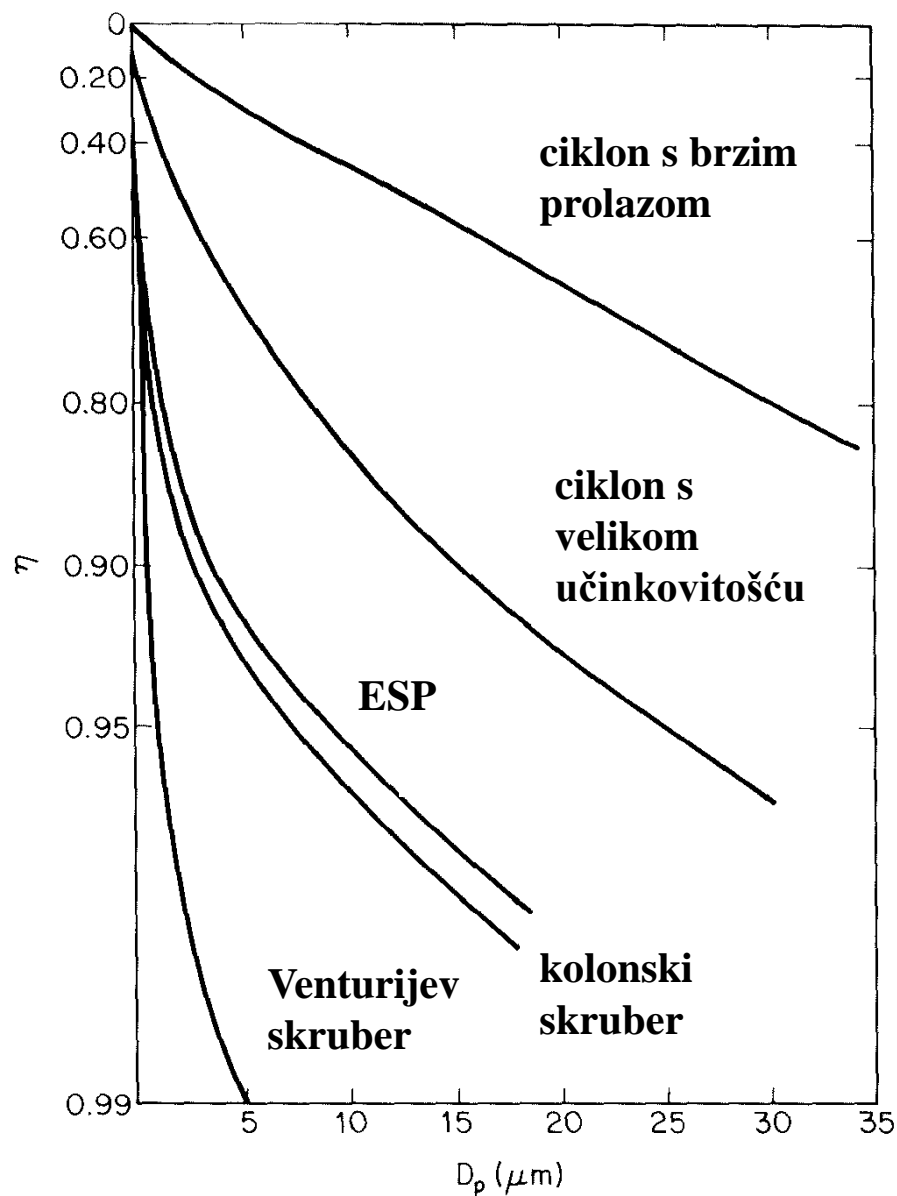
Ukupna učinkovitost, η_o : $\eta_o = 1 - \exp(-N_t)$

Usporedba različitih izvedbi skruberera

Skruber	tip skruberera	br. stupnjeva	pad tlaka po stupnju, Pa	omjer kapljevina/plin (l/m ³)
Skruber s raspršivanjem	- standardni tip - ciklonski skruber	1	800-1100 1000-2000	1,3-1,7 0,7-1,3
Skruber s punjenim slojem	- nepokretan sloj - pokretan sloj - poprečan tok - sloj s vlaknima	1 3-5 4	1300-1600 800-1300 ca. 2500 50-800	1,3-2,0 2,0-8,0 ca. 2,5
Skruber s pliticama	- ploče s otvorima - ploče s pregradama		ca. 400 250-2000	0,4-0,7
Mehanički skruber	- mokri ventilatori	1	1000-2000	
Venturijev skruber i skruber s otvorima	- standardni venturi skruber - izmijenjeni venturi - skruber s otvorima	1 1 1	1000-18000 800-400	0,8-2,0

Učinkovitost različitih sustava za otprašivanje s obzirom na veličinu čestica

Uređaj	Učinkovitost			
	< 1 μm	1-3 μm	3-10 μm	> 10 μm
Elektrostatski taložnik, ESP	96,5	98,25	99,1	99,5
Vrećasti filter	100	99,75	>99,95	>99,95
Venturijev skuber	> 70	99,5	>99,8	>99,98
Multiciklon	11	54	85	95



Usporedba učinkovitosti različitih uređaja za uklanjanje krutih čestica iz otpadnih plinova s obzirom na veličinu čestica 5-30 μm