

## **Uklanjanje čvrstih onečišćujućih tvari/suspendiranih čestica suhim postupcima:**

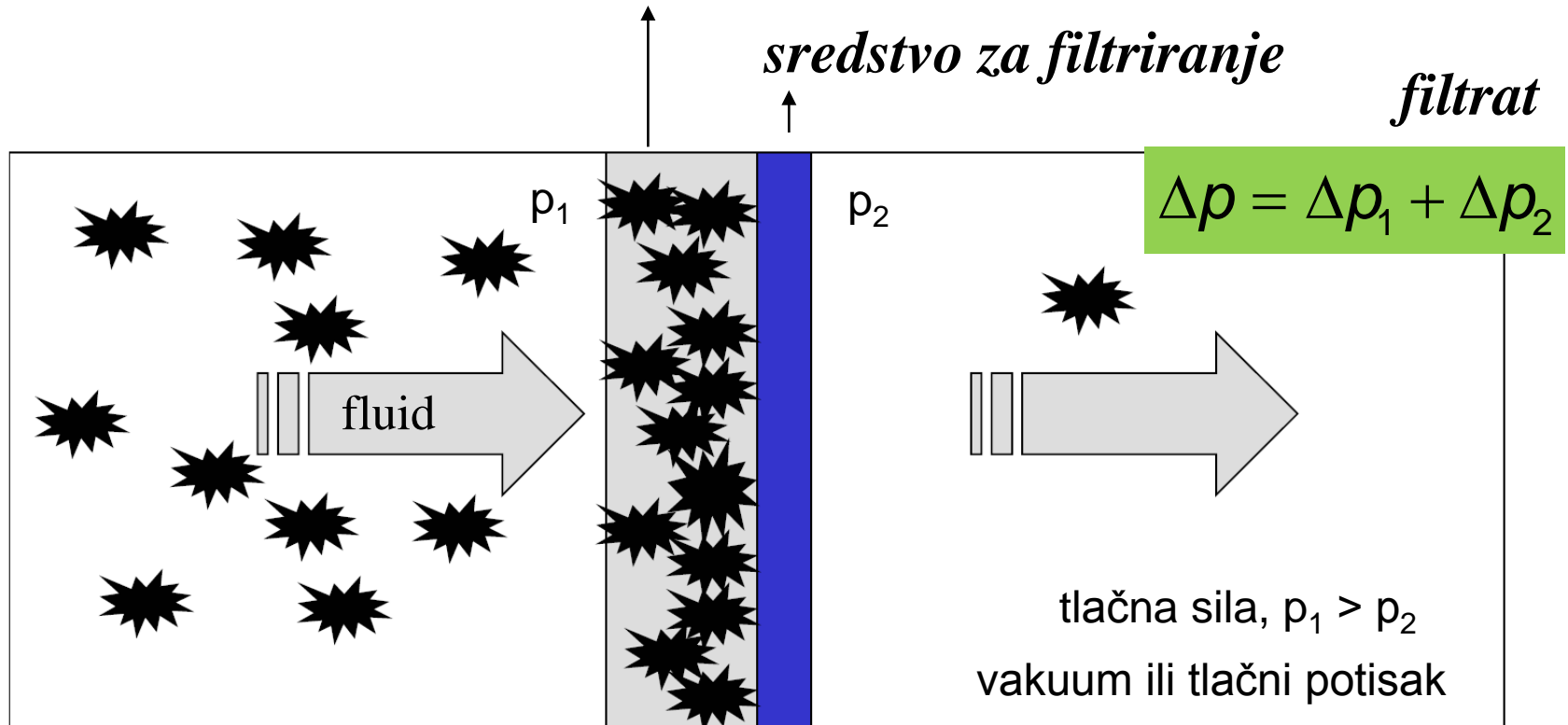
- **Vrećasti filtri**

- primjena poroznog ili rupičastog filtarskog materijala za uklanjanje čvrstih čestica iz plinova (tkanine, žičano tkivo, slojevi vlaknastog ili zrnatog materijala)

# FILTRIRANJE - osnovni princip filtriranja

*razdvajanje heterogenih smjesa pomoću odgovarajućeg filtarskog sredstva*

*filtarski kolač; površinski filter*



**Filtar** - membrana sa otvorima manjim od dimenzija čestica koje se trebaju na njoj zadržati (ali ne manjim od dimenzija najsitnijih čestica); dolaze u različitim veličinama i oblicima zavisno o očekivanom kapacitetu i potrebnoj filtarskoj površini

## *Filtri - glavne vrste i značajke:*

### *Podjela prema izvedbi filtarskog sredstva odn. načina rada*

- **Površinski filtri, npr. vrećasti filtri (zadržavanje čestica na površini filt. sredstva)**  
vlakna (tekstil, npr. vuna (do 95 °C), pamuk, polimeri, porozne keramičke cijevi, guste mreže i sl.
- **Filtri s preprekama/pregradama:**  
sinterirana vlakna (staklena vlakna, azbest, keramika ili metal (do 230 ° C)
- **Dubinski filtri (filtriranje kroz sloj filtarskog sredstva; zadržavanje čestica unutar fil. sloja), npr. zrnasti filtarski sloj**

### *Podjela prema namjeni*

- **industrijski filtri** (vrećasti filtri, cijevni porozni filtri, pločasti filtri) - za pročišćavanje plinova koji sadrže do ca. 50 g m<sup>-3</sup> čvrstih čestica
- **filtri za zrak** - za pročišćavanje plinova koji čestice < 10 g m<sup>-3</sup> čvrstih čestica

### *Značajke koje određuju kvalitetu filtriranja:*

- učinkovitost
- pad tlaka i porast pada tlaka ispred i iza filtarskog sredstva; pad tlaka utječe na brzinu strujanja, brzinu nastajanja filt. kolača, učinkovitost filtriranja; maks. pad tlaka ⇒ čišćenje filtra,
- učin filtra; brzina filtriranja = protok onečišćenog zraka /površina filtriranja (Q/A)
- značajke filter sredstva: održavanje, troškovi, čišćenje
- pročišćavanje filtra/regeneracija (diskontinuirani proces)

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

# Sastav i izvedba filtra i filter materijali

## anorganski

stakla

keramike

metali

polimeri

## anorgansko-organski

polisiloksani

polifosfazeni

## organski

prirodni polimeri

polisaharidi

polipeptidi

sintetički polimeri

....

**visokotemperaturni filtri:** metal, grafit, kvarc, keramika

## Metode pripreme:

### *vlakna*

-metode izvlačenja

-...

### *čestice*

-sol-gel

-kompresija ili sinterir.

-ekstrudiranje

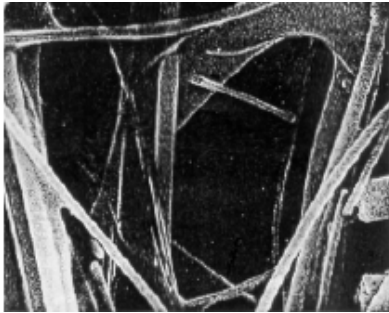
### *filmovi*

- ekstrudirani gusti filmovi

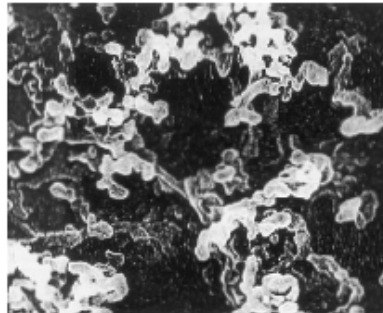
- elektrokem. deponiranje

- ...

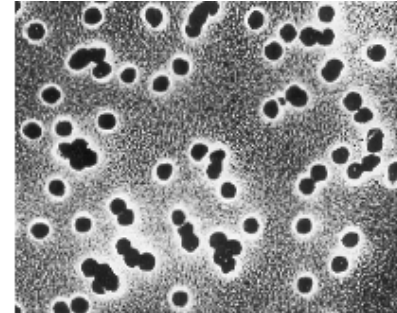
# Vrste filtra



vlaknasti filtri



membranski  
(porozni) filtri



kapilarni filtri

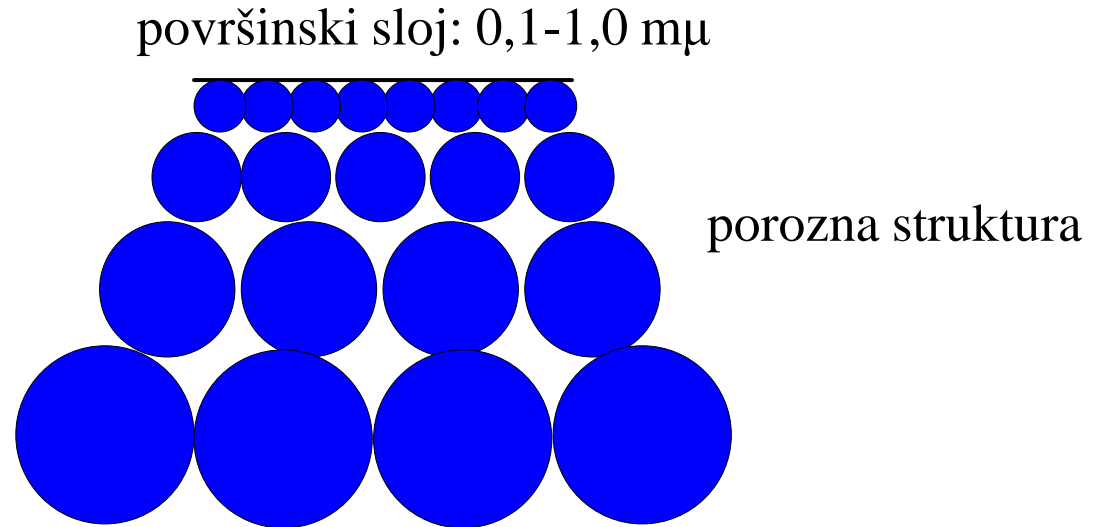
## Na izbor filtarskog materijala utječu:

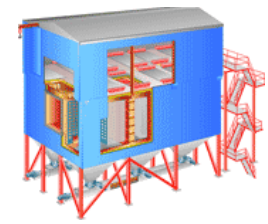
- maksimalno dozvoljena radna temperatura:  
pamuk (95 °C), staklo (290 °C), sintetička vlakna (230 °C), ....
- kemijska otpornost
- otpornost na abraziju i sl.

## Značajke:

- $Q/A \Rightarrow$  brzina filtriranja ,  $u$  (m/s)=(m<sup>3</sup>/s)/(m<sup>2</sup>)
- $\Delta p \Rightarrow$  potrebna energija (rad ventilatora)
- kemijska i mehanička stabilnost  $\Rightarrow$  stabilnost i vijek trajanja filtra

## Asimetrične filtarske membrane:





## Vrećasti filtri – princip rada

- Ulazni plin prolazi kroz filtarsko sredstvo – najčešće tkanine oblika “vreće” (nanesene na metalni kostur);
- Na mjestu ulaza dolazi do smanjenja brzine strujanja i do taloženja krupnijih čestica djelovanjem gravitacije.
- Sitnije čestice nošene strujom zraka (koji prolazi kroz filtarske vreće) talože se na filtarskim vrećama (pri čemu nastaje filtarski kolač), a čist zrak putem ejektora izlazi iz komore, tj. filtarskog uređaja.
- Poroznost filtarskog sredstva omogućava odgovarajuću propusnost za onečišćeni plin uz dozvoljeni maksimalni pad tlaka u sustavu.
- U određenim vremenskim intervalima filtarski kolač se mora protresti i ukloniti iz sustava (čišćenje filtra). Dovodom komprimiranog zraka sa suprotne strane filtarskih vreća, vreće se propuhuju, a istaložen prah pada na dno kućišta gdje se ispušta ili ovisno o konstrukciji filtra transportira pužnim transporterom do mjesta za izlaz krutih čestica.
- Periodički se izmjenjuju periodi nakupljanja čestica (formiranja filtarskog kolača) i periodi njihovog uklanjanja iz sustava (čišćenje filtra).
- ***Ključni dijelovi sustava:***  
svi filtarski uređaji sastoje se od: ***ventilatora za protok zraka,***  
***filtarskog sredstva i***  
***uredaja za uklanjanje izdvojenih čestica.***



## ***Prednosti:***

- ***velika učinkovitost*** (> 99 %) čak i pri uklanjanju vrlo malih čestica (> 99,9 %);
- ***mogućnost ponovne uporabe uklonjenih čestica***  
(ukoliko ne dolazi do miješanja različitih vrsta čestica)
- uklanjanje čestica ***u suhom obliku*** pogodnom za odlaganje
- mogu se koristiti za ***uklanjanje različitih vrsta krutih čestica***
- ***modularna izvedba*** (veći broj filtarskih elemenata)  
⇒ fleksibilnost rada
- mogu raditi ***pri različitim volumnim protocima***
- prihvatljivo ***mali pad tlaka*** u sustavu

## *Područja primjene*

- vakuumsko čišćenje,
- sustavi za kondicioniranje zraka,
- električne centrale,
- cementare, itd.

## *Nedostaci:*

- potrebno je puno prostora za instaliranje
- vlakna se mogu oštetiti pri visokim temperaturama ili pri radu s korozivnim tvarima (potrebni posebni materijali koji su još u razvoju)
- *ne mogu raditi u mokrim uvjetima rada*
- nemogućnost uklanjanja higroskopskih čestica koje pri visokim temperaturama (300-600 °C) postaju ljepljive i teško ih je ukloniti (primjena ultrazvučnih vibracija)
- mogućnost izbijanja požara ili eksplozije kod uklanjanja pojedinih materijala

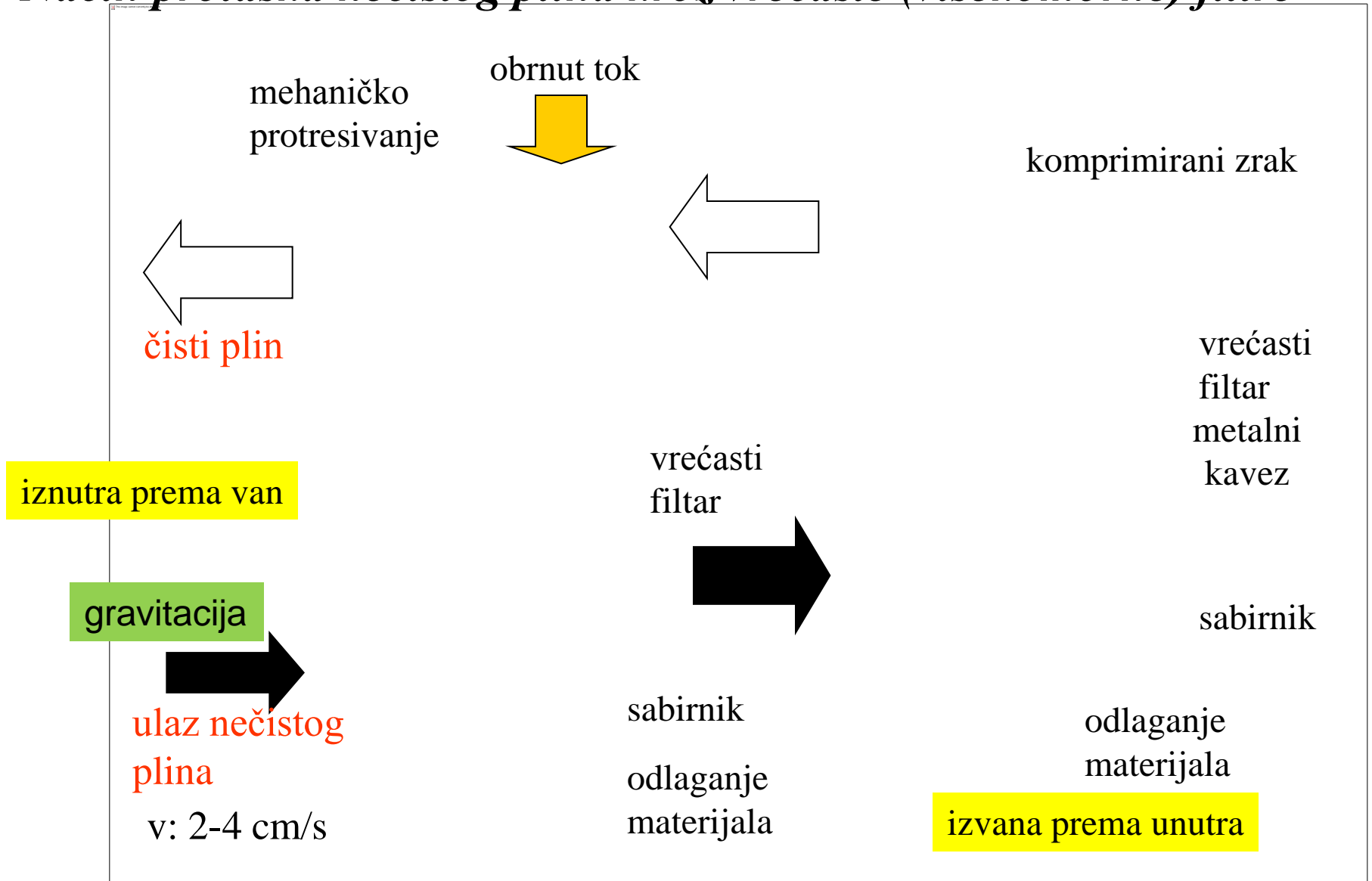
***Prednost dominiraju nad nedostacima!***

***⇒ 50 % industrijskih procesa pročišćavanja plinova***

## *Dijelovi:*

- kućište,
- filtarski elementi (moduli) - filtarske vreće,
- nosači vreća,
- instrument za mjerenje otpora,
- uređaj za pneumatsko čišćenje vreća

# Način prolaska nečistog plina kroz vrećaste (višekomorne) filtre



**promjer: 0,1-0,3 m; visina: do 10 m**  
**broj pojedinih elemenata: 100- nekoliko 1000**

*filtarski kolač s unutarnje  
ili vanjske strane filtra*

# Primjer filtra zraka

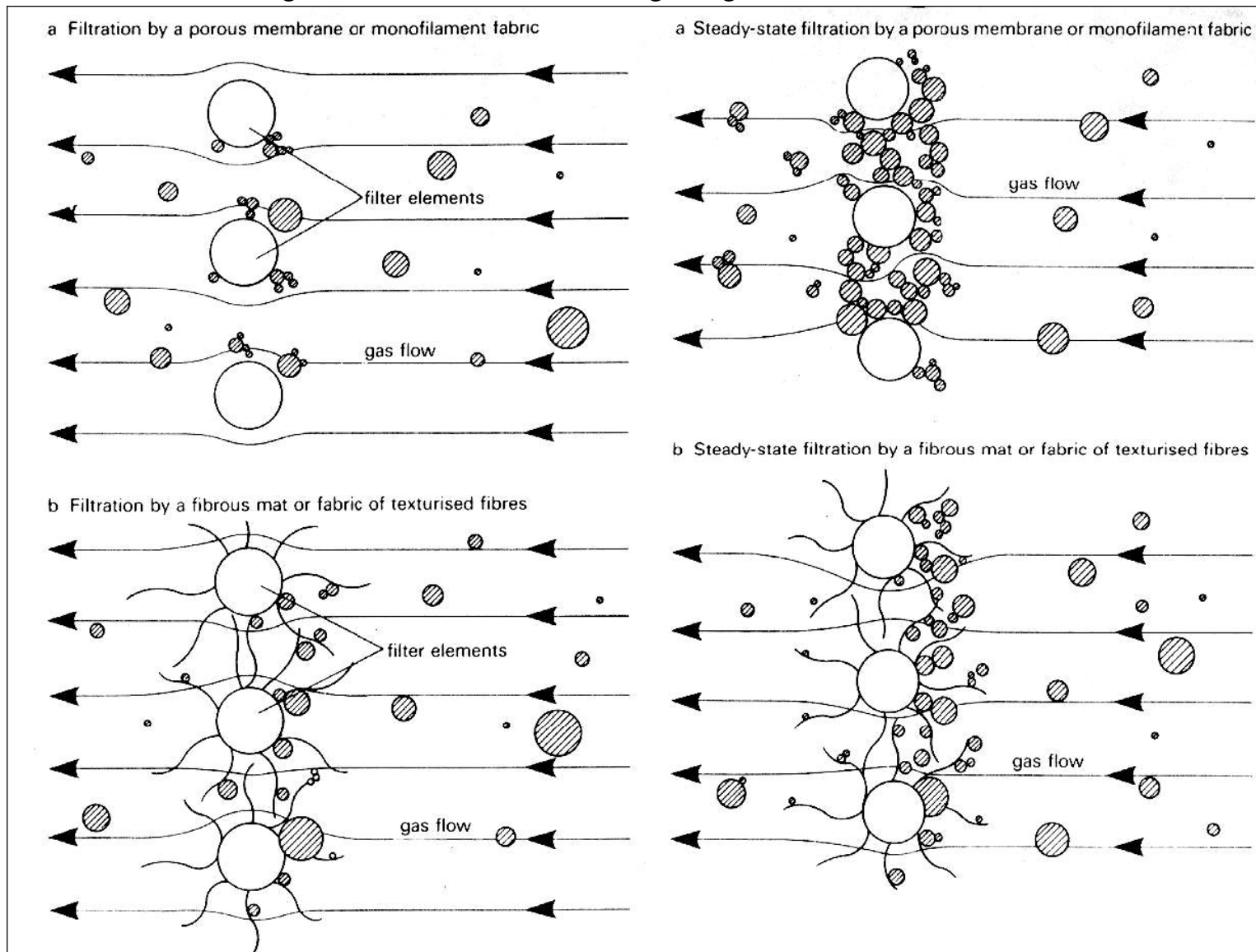


- velika učinkovitost za čestice  $< 5 \mu\text{m}$ ; učinkovito uklanjanje čestica od ca.  $0,5 \mu\text{m}$  i značajna udio uklanjanja čestica dimenzija  $0,1 \mu\text{m}$

Tijekom procesa filtracije razlikuju se dvije faze:

- **u prvoj fazi** zadržava se dio čestica manjih od veličine pora uslijed djelovanja privlačnih sila između samih čestica, te između čestica i filtarskog sredstva,
- **u drugoj fazi**, kad se istaloži određena količina čestica i počne formirati filtarski kolač, filter propušta samo čestice manje od veličine pora.

# Akumulacija čestica i nastajanje filter kolača

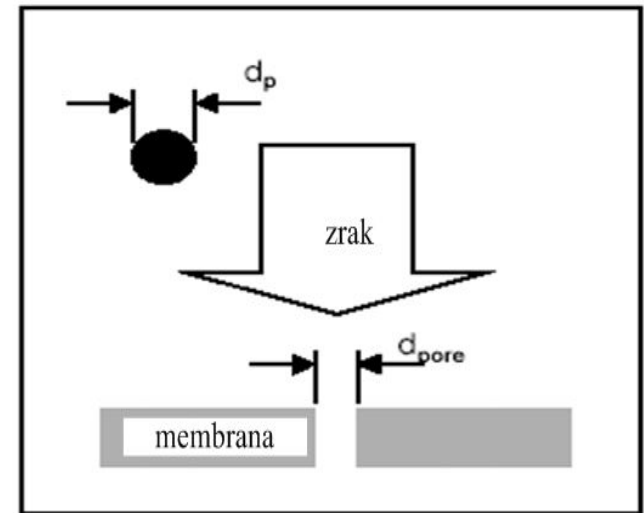


prije nastajanja filter kolača

nakon nastajanja filter kolača



- Slučaj A: blokiranje pore
- Slučaj B: začepljenje pore
- Slučaj C1: suženje pore
- Slučaj C2: suženje pore/  
gubitak pore
- Slučaj D: premoštenje pore



- uslijed nastajanja filtarskog kolača (djelomično preuzima ulogu filtarskog sredstva) i pojave premoštenja/suženja pora nije neophodno da dimenzije pora filtarskog materijala budu manje od dimenzija čestica koje će se ukloniti, a da istovremeno učinkovitost separacije bude prihvatljiva)

Slučaj A:

$$d_p > d_{pore}$$



Slučaj B:

$$d_p = d_{pore}$$



Slučaj C1:

$$d_p < d_{pore}$$



Slučaj C2:

$$d_p < d_{pore}$$

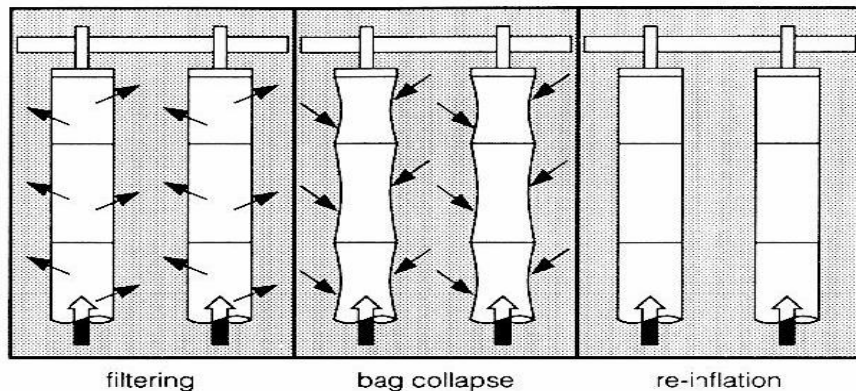


Slučaj D:

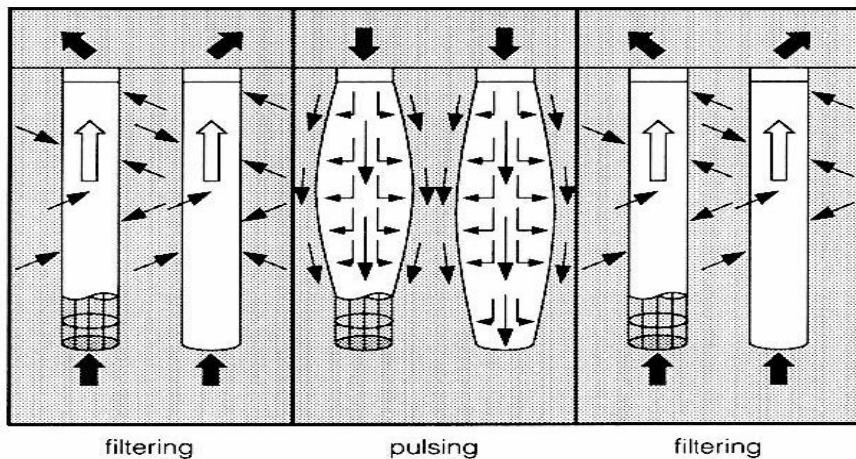
$$d_p < d_{pore}$$



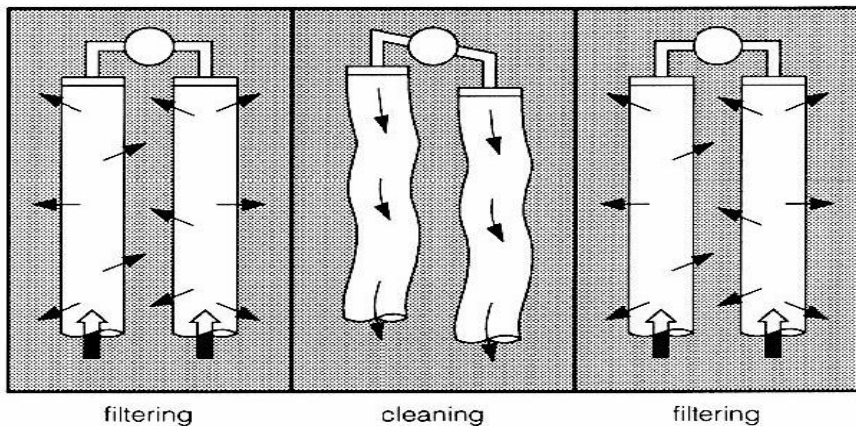
a)



b)



c)



## Metode čišćenja vrećastog filtra:

- a) obrnutim strujanjem zraka (propuhivanjem)
- b) pulsiranjem (impulsna trešnja)
- c) protresivanjem (vibracijska trešnja)

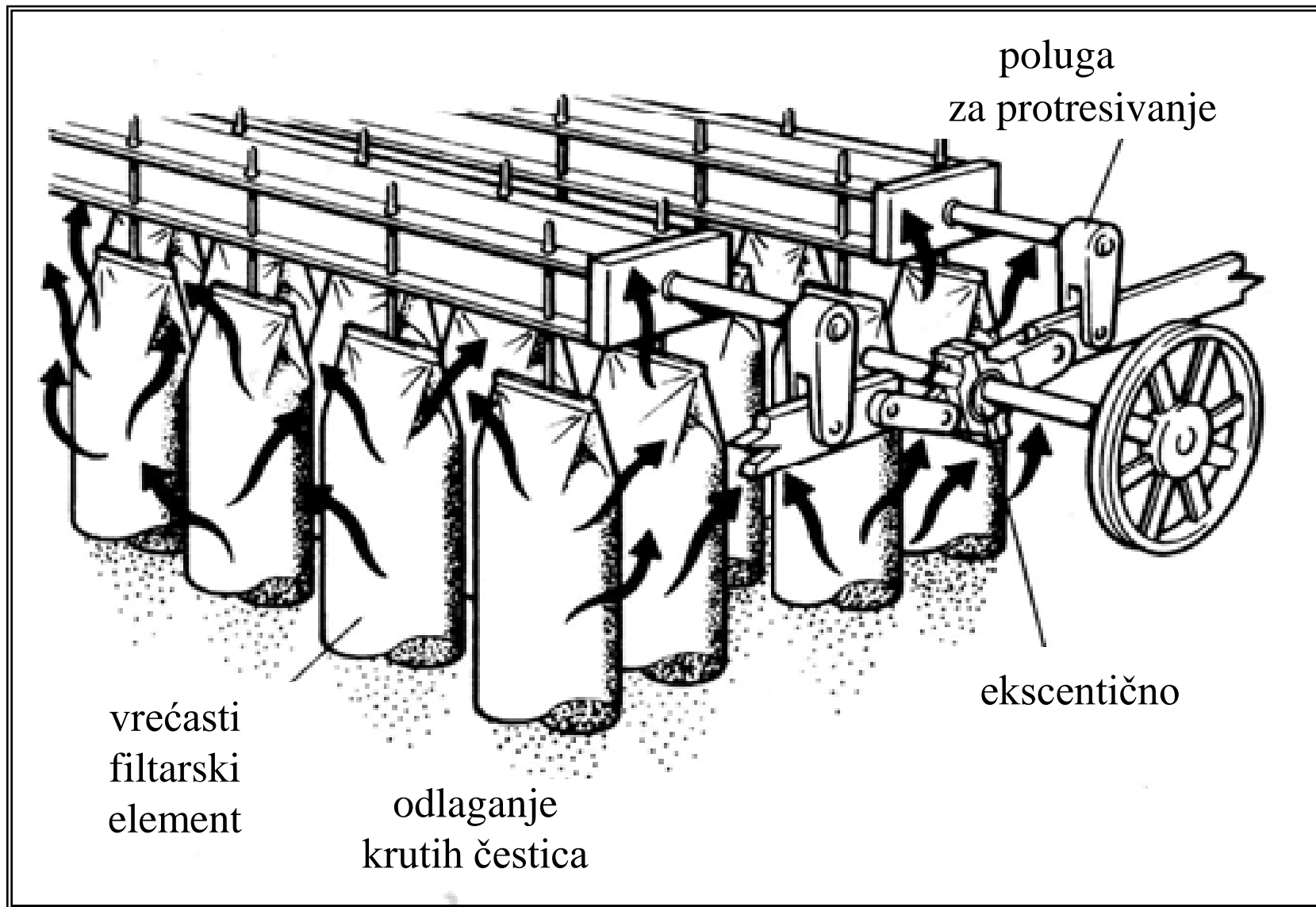
pulsiranje se provodi *on-line*:

a) *puls velikog tlaka*  
(nadtak 3-7 bara)

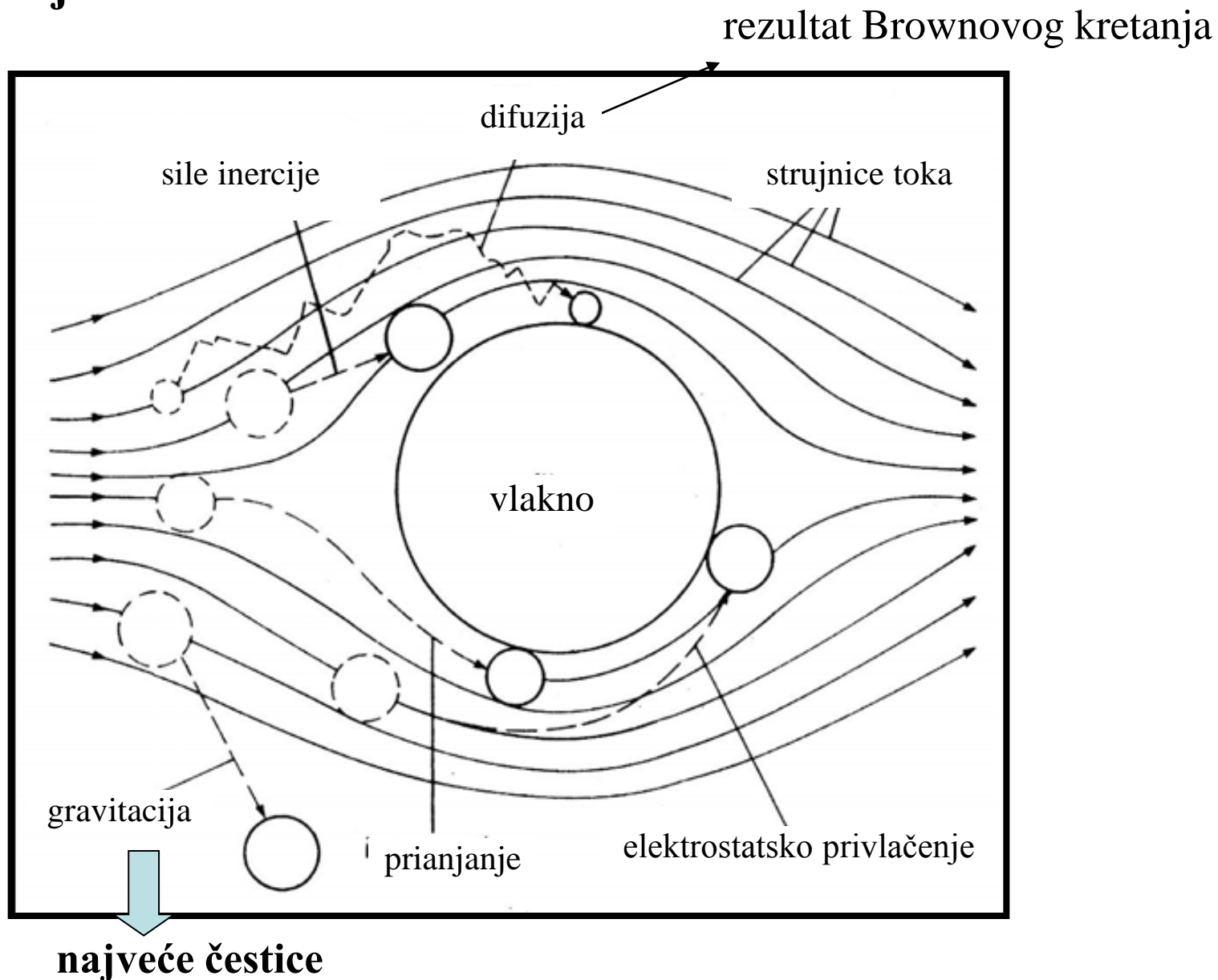
b) *puls srednjeg tlaka*  
(1-2 bara)

c) *puls malog tlaka*  
(0,5-0,7)

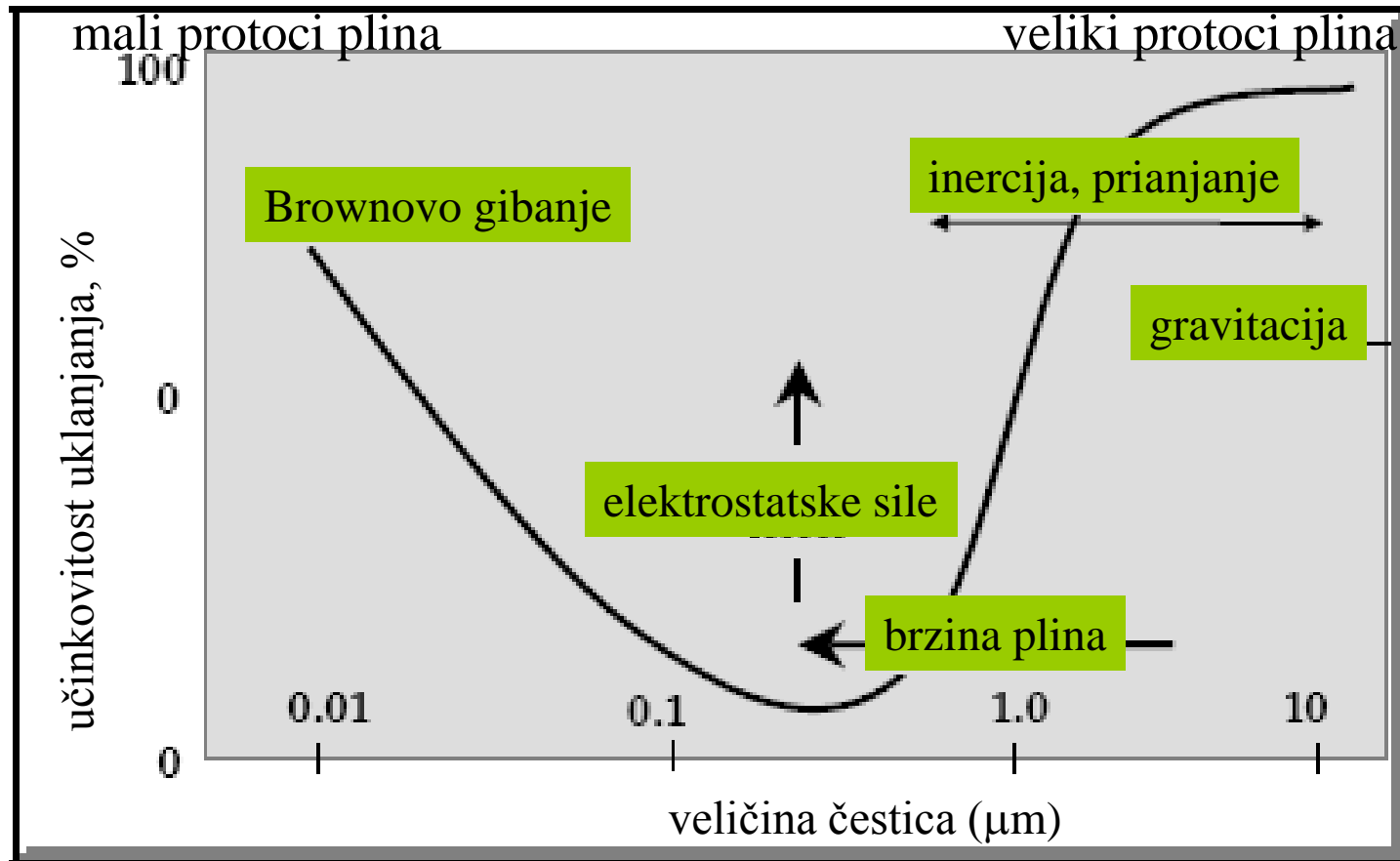
# Metoda protresivanja - *mehanički sustav*



# Zadržavanje čestica na vlaknima filtra



# Učinkovitost filtra kao funkcija veličine čestica



## Proračun filtra

- proračun ukupne površne filtriranja,  $A$
- određivanje otpora filtarskog sredstva i filtarskog kolača,  $R$ ,  $\alpha$
- određivanje maksimalnog pada tlaka zavisno o načinu rada,  $\Delta p$

### *Filtriranje se obično provodi:*

- uz konst. tlak ( $\Delta p = konst.$ )
- uz konst. brzinu filtriranja ( $u = konst.$ )
- uz promjenljivi  $p$  i  $u$  (situacija najbliža ind. praksi, ali najmanje informacija u literaturi)

### *Ukupan pad tlaka:*

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

$\Delta p_1$  = otpor filtarskog sredstva;  $\Delta p_2$  = otpor filtarskog kolača

*Brzina strujanja fluida po jedinici površine filter kolača (Re < 2), (m/s)*

$$u = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta p}{L \eta_F}$$

Darcyeva jednačba

$$\frac{dp_L}{dx} = \frac{\eta_F}{K} u$$

$$\frac{dp_L}{dw} = \frac{\eta_F u}{K \rho_{\check{c}} (1 - \varepsilon)} = \eta_F \alpha u$$

$$dw = \rho_{\check{c}} (1 - \varepsilon) dx$$

x - debljina filt. kolača

- u – linearna brzina filtriranja, m/s
- K- permeabilnost (propusnost), m<sup>2</sup>
- η<sub>F</sub>- dinamička viskoznost fluida, Pa·s
- L- debljina filtera, m
- Δp – pad tlaka, N/m<sup>2</sup>

*Specifični (lokalni) otpor kolača, α<sub>f</sub> (m/kg)*

$$\alpha_f = \frac{1}{K(1 - \varepsilon) \rho_{\check{c}}}$$

gdje je ε – poroznost kolača

$$\varepsilon = \frac{V - V_p}{V}$$

V – volumen filtera

V<sub>p</sub> – volumen krutih čestica

## *Ruthova jednađba - za izrađunavanje otpora filtarskog sredstva, R:*

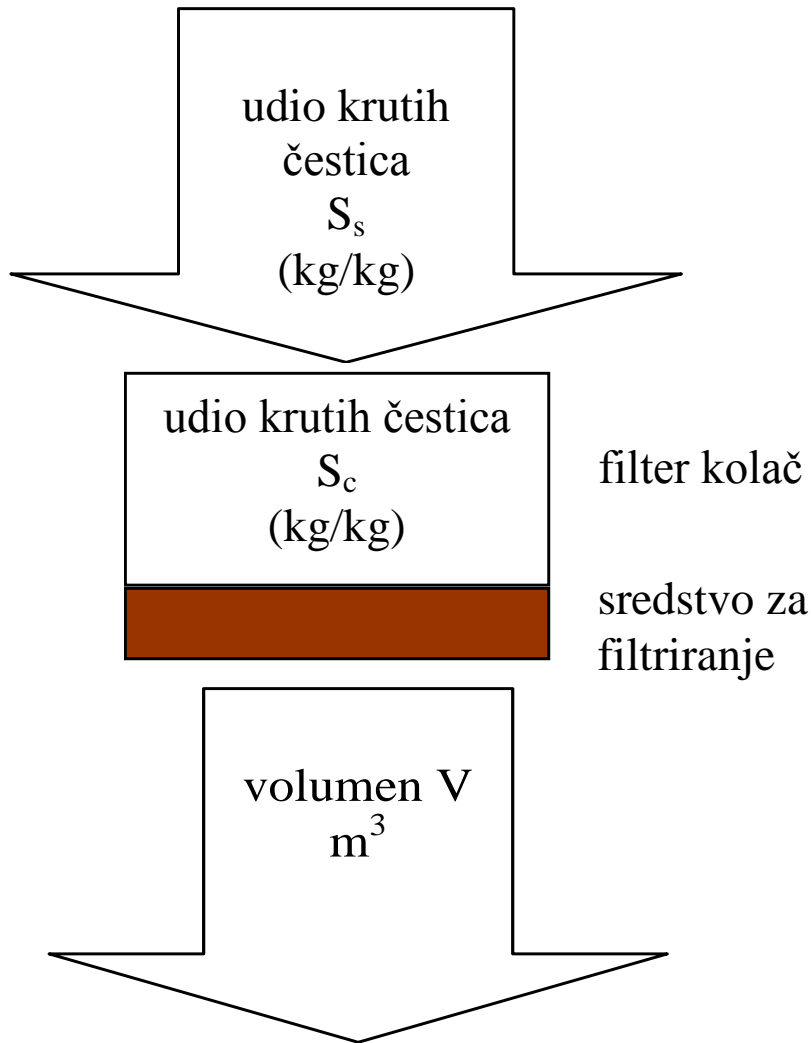
- Ako pretpostavimo da filtar kolač ima **masu  $w$  po jedinici površine filtra ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )** - tada se može primijeniti Ruthova jednađba za filtriranje u smjeru osi  $x$  (debljina kolača) za **otpor filtarskog sredstva,  $R$** :

*Darcyeva jednađba*

$$u = \frac{1}{\alpha_f(1-\varepsilon)\rho_{\check{c}}} \frac{\Delta p}{L\eta_F} = \frac{\Delta p}{(\alpha_f w + R)\eta_F}$$
$$dw = (1-\varepsilon)\rho_{\check{c}} dx$$

*U većini slučajeva otpor  $R$  je beznačajan u odnosu na otpor filtarskog kolača!*





## ***Bilanca tvari za proces filtracije***

## Bilanca tvari ( $w$ : [kg/m<sup>2</sup>])

**Masa kolača**,  $w$  zavisi o volumenu fluida koji se filtrira po jedinici površine, gustoći fluida te udjelu krutih čestica u dolazećem fluidu i kolaču, kako je prikazano na slici:

$$W = \left( \rho_F V + \frac{W}{S_C} (1 - S_C) \right) \left( \frac{S_S}{1 - S_S} \right)$$

$$= V f(\rho_F, S_C, S_S)$$

$$f(\rho_F, S_C, S_S) = \frac{\rho_F}{\left( \frac{1 - S_S}{S_S} \right) - \left( \frac{1 - S_C}{S_C} \right)}$$

gdje je:

$V$ - volumen fluida po jedinici površine, m/s

$f()$ - funkcijska zavisnost

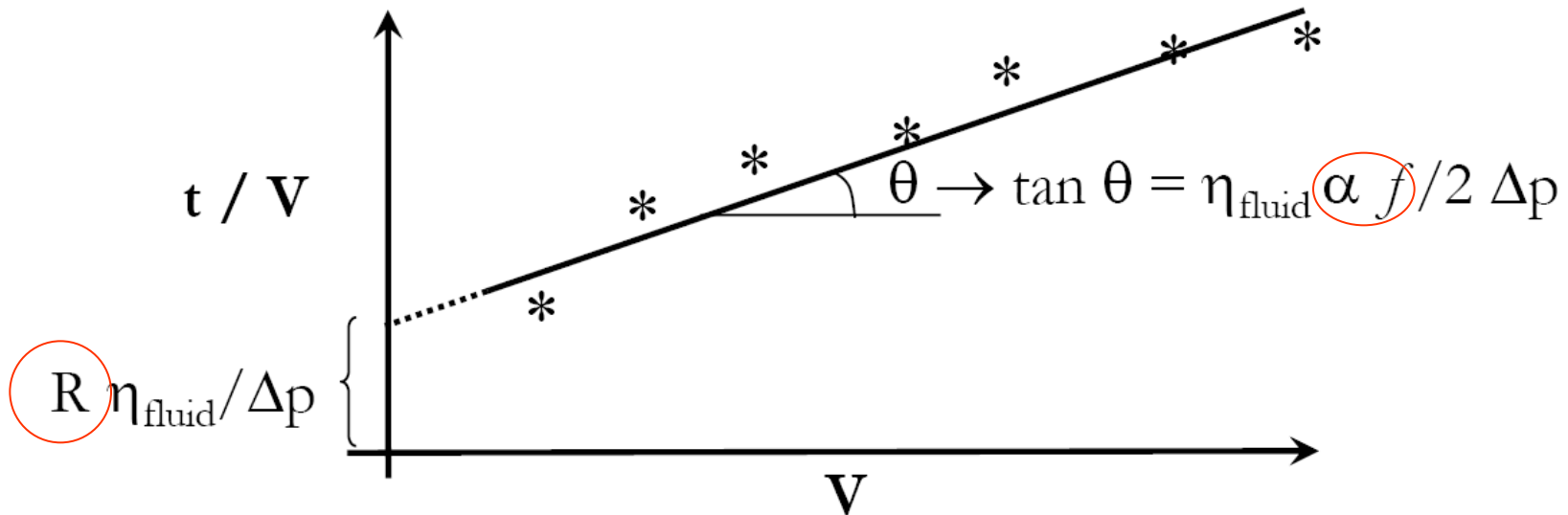
## Filtriranje u uvjetima konstantnog tlaka ( $\Delta p = \text{konst.}$ ):

modifikacija Carmanove jednadžbe

$$u = \frac{dV}{dt} \rightarrow \frac{\eta_F \alpha_f}{2\Delta p} V^2 + \frac{\eta_F R}{\Delta p} V = t \quad / :V$$

vrijeme potrebno za obradu određenog volumena  $V$

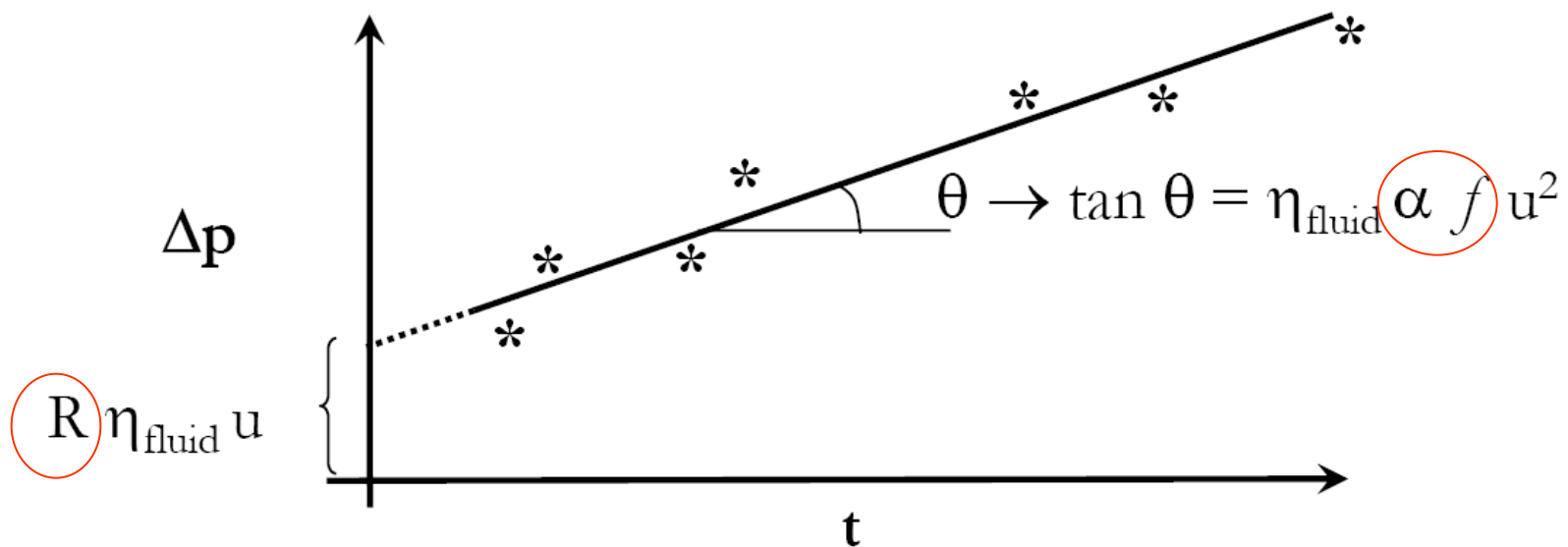
Prikazivanjem zavisnosti  $t/V$  o  $V$  dobiva se pravac iz čijeg nagiba se može odrediti **specifični otpor kolača,  $\alpha$** , a iz odsječka **otpor filtarskog sredstva,  $R$** .



eksperimentalno određivanje  $\alpha_f$  i  $R$ !

## *Filtriranje u uvjetima konstantne brzine protjecanja fluida:*

$$u = \frac{dV}{dt} = \text{konstantno} \Rightarrow \Delta p = \eta_F (\alpha_f u^2 t + uR)$$



$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

$$\Delta p = \frac{1}{B_1} \eta_F L_1 u + \frac{1}{B_2} \eta_F L_2 u$$

Darcy

(obično: 0,75-1,5 kPa)

$L_1$  – debljina filtarskog sredstva

$L_2$  – debljina filtarskog kolača

$B_1$  – propusnost/permeabilnost filtarskog sredstva

$B_2$  – propusnost /permeabilnost filtarskog kolača

$u$  – linearna brzina filtriranja

$L_2$  se može izračunati iz masene bilance uz pretpostavku da je otprašivanje potpuno:

$$L_2 = \frac{c u t \eta_{uk}}{\rho_{\check{c}} (1 - \varepsilon)} = \frac{w}{\rho_{\check{c}} (1 - \varepsilon)}$$

$c$  – koncentracija krutih čestica

$\eta_{uk}$  - ukupna djelotvornost filtriranja

$t$  – vrijeme filtriranja

$w$  – masa kolača izražena po jedinici površine

$$\begin{aligned}
\Delta p &= \frac{\eta_F L_1}{B_1} u + \frac{\eta_F}{B_2} \frac{c t \eta_{uk}}{\rho_{\check{c}} (1 - \varepsilon)} u^2 \\
&= \frac{\eta_F L_1}{B_1} u + \frac{\eta_F}{B_2} \frac{w}{(1 - \varepsilon)} u \\
&= K_1 \eta_F u + K_2 \eta_F w u = K_1' u + K_2' w u
\end{aligned}$$

$K_1$  – preostali otpor filtarskog sredstva s nakupljenim česticama nakon čišćenja filtra

$K_2$  – specifični otpor filtarskog kolača

$B_1$  – propusnost filtarskog sredstva

$B_2$  – propusnost filtarskog kolača

*$B_1$ ,  $B_2$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  odn.  $K_1'$  i  $K_2'$  – određuju se eksperimentalno!*

*Mjeri se uz konstantnu brzinu filtriranja promjena pada tlaka,  $\Delta p$  tijekom jedne faze filtriranja u ovisnosti o masi čestica,  $w$  sakupljenih na jedinicu površine filtra.*

U višekomornom filtru računa se srednji pad tlaka za srednju brzinu filtriranja (uz konstantnu koncentraciju čestica,  $c$  i  $\eta_{uk}=1$ ):

$$\Delta p_m = K_1' u + \frac{1}{2} K_2' T c u^2$$

*T – faza filtriranja*

$$w = \int_0^T \eta_{uk} c u(t) dt$$

## *Kondicioniranje filtra*

- Slično kao i kod elektrofiltra rad filtra može se poboljšati kondicioniranjem plina (sa  $\text{SO}_3/\text{NH}_3$ ), a to također može utjecati na uklanjanje filter kolača tijekom čišćenja, tj. na preostali pad tlaka nakon čišćenja

## *Filtarska sredstva*

Podjela:

### *A) kruta*

- rastresita (čestice nisu u dodiru jedna s drugom)
- kompaktna (npr. perforirane ploče)

### *B) savitljiva*

- tekstilna vlakna (pamuk, sintetika, vuna, lan, juta), sredstva od netkanih vlakana, sredstva istkana od metalnih žica ili od mineralnih vlakana i dr.

**Pri  $T < 80$  °C** dobar izbor materijala za filtarske vreće je **pamuk**, dok je **pri višim T** dobro koristiti **polimere (najlon, poliester) i staklo**, a pri još višim T **teflon (ograničena meh. stabilnost) i nerđajući čelik**.



## *Filtri sa rastresitim materijalom – dubinski filtri*

- filtarski kolač se ne stvara na površini filtra nego kroz cijeli filter (npr. filter na cigaretama)
- dobro iskustvo u radu pri  $T$  do ca.  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$
- relativno mala jedinična veličina filtra uslijed relativno velike brzine strujanja kroz filter
- relativno velik utjecaj značajki krutih čestica: oblik čestica, adhezija krutih čestica na filtarski sloj i dr.

### ***Različite vrste filtra:***

Filtri s nepokretnim slojem, učinkovitost ~ 99 %

Filtri s pokretnim slojem, učinkovitost ~ 95 %

Filtri s vrtložnim slojem, učinkovitost ~ 80 %

## *Zaključno o dubinskim filtrima:*

učinkovitost filtra s rastresitim slojem zavisi o:

- raspodjeli veličina i obliku čestica koje se trebaju filtrirati,
  - adhezijskoj sili između čestica koje se uklanjaju i zrna filtarskog materijala
- 
- osobito pogodni za filtriranje pri povišenim temperaturama

## Usporedba učinkovitosti i ekonomičnosti različitih uređaja za otprašivanje

	Učinkovitost, %	Kapitalni troškovi, USD (1982)	Troškovi rada, USD/toni uklonjenih čestica
ciklon	87	10500	1,68
elektrofilar (ESP)	98,3	96500	2,83
reverzni vrećasti filter	99,9	49000	3,14

## **Uklanjanje suspendiranih čestica pri visokim temperaturama i visokom tlaku**

- a) keramički filtri
- b) visokotemp. cikloni
- c) visokotemp. elektrofiltri
- d) visokotemp. vrećasti filtri
- e) visokotemp. metalni filtri
- f) visokotemp. filtri s nasutim slojem

## Keramički filtri (filtri s preprekama)

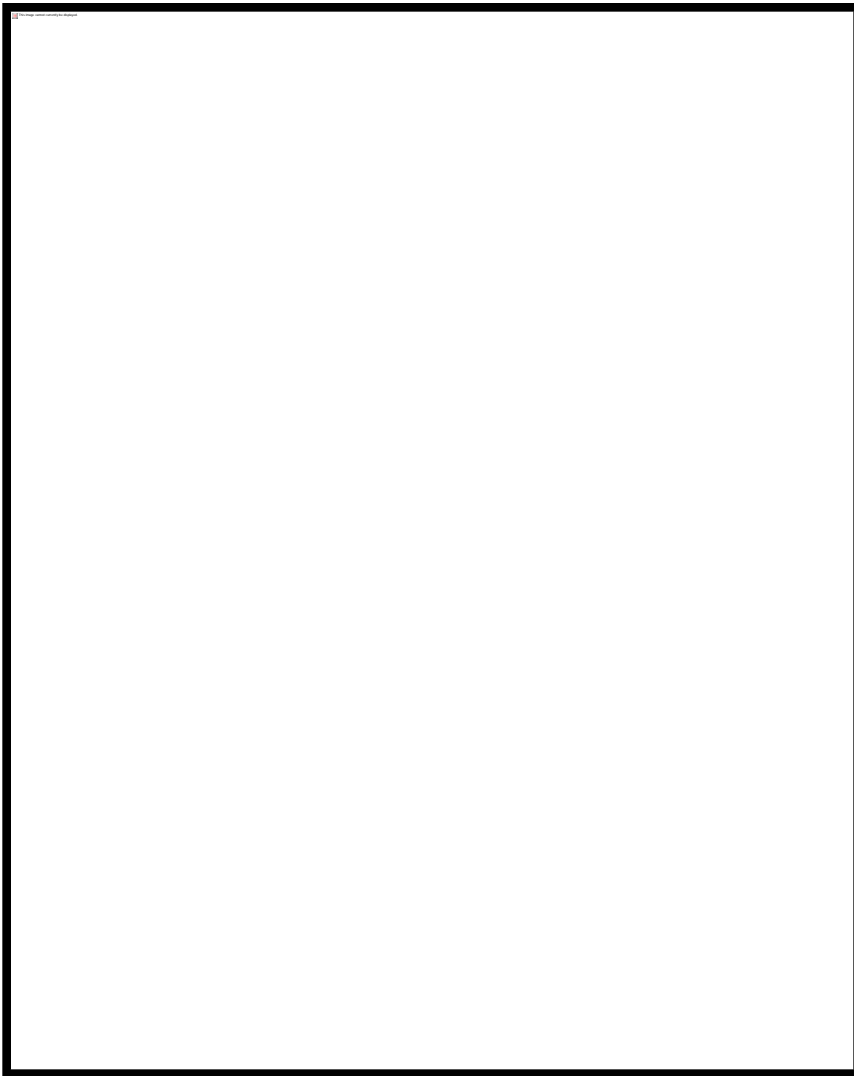
- oblik svijeće
- oblik cijevi
- pločasti poprečni/paralelni filtri

**Materijal:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ili alumosilikatna vlakna  
SiC, SiN i dr.

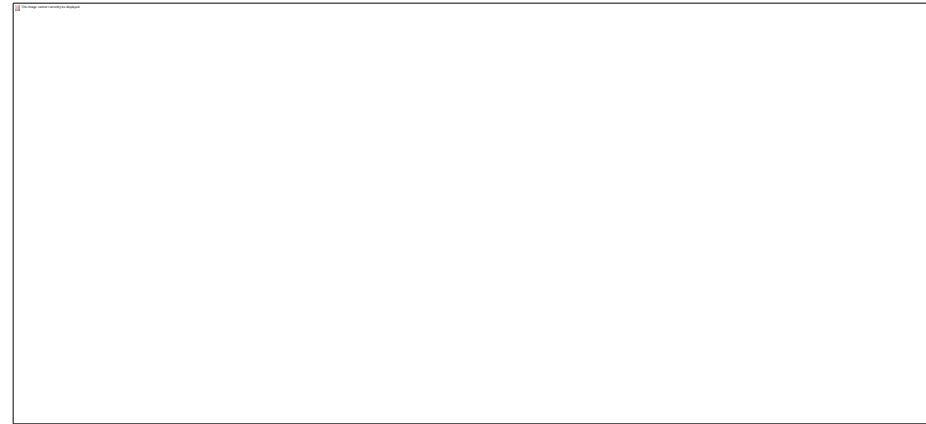
**Primjena:**

- pri visokim temperaturama
- u prisutnosti alkalija, S i vodene pare

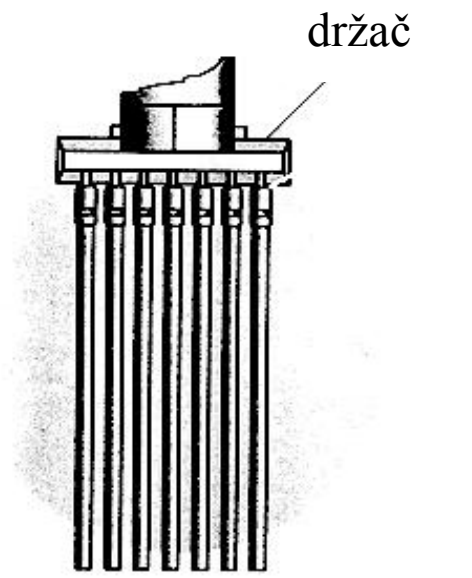
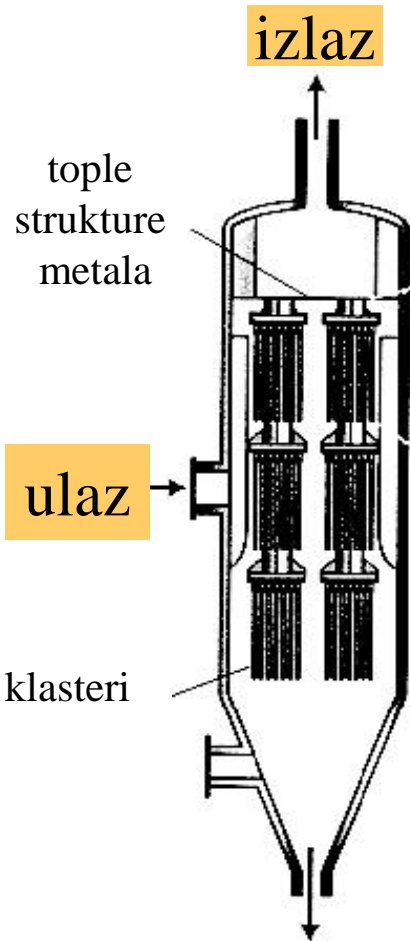
## Keramički filtri (oblik cijevi)



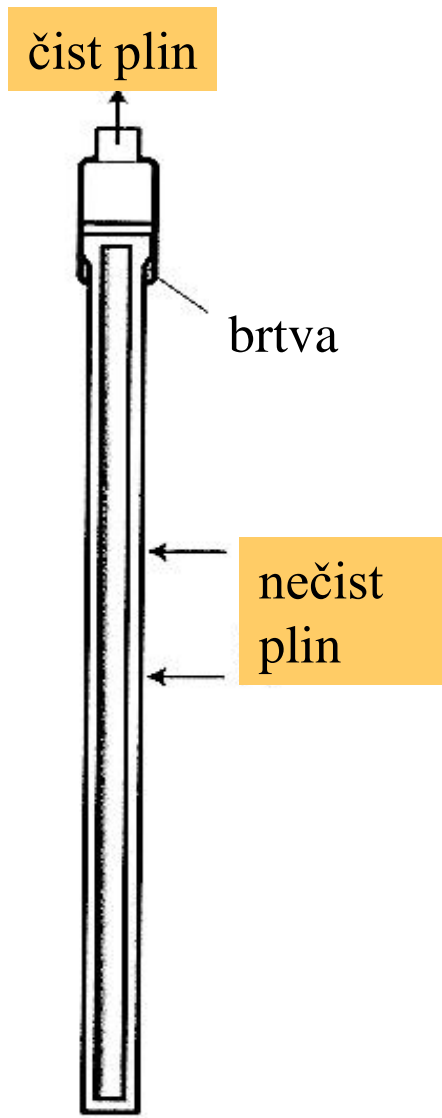
## Keramički filtri (oblik svijeće)



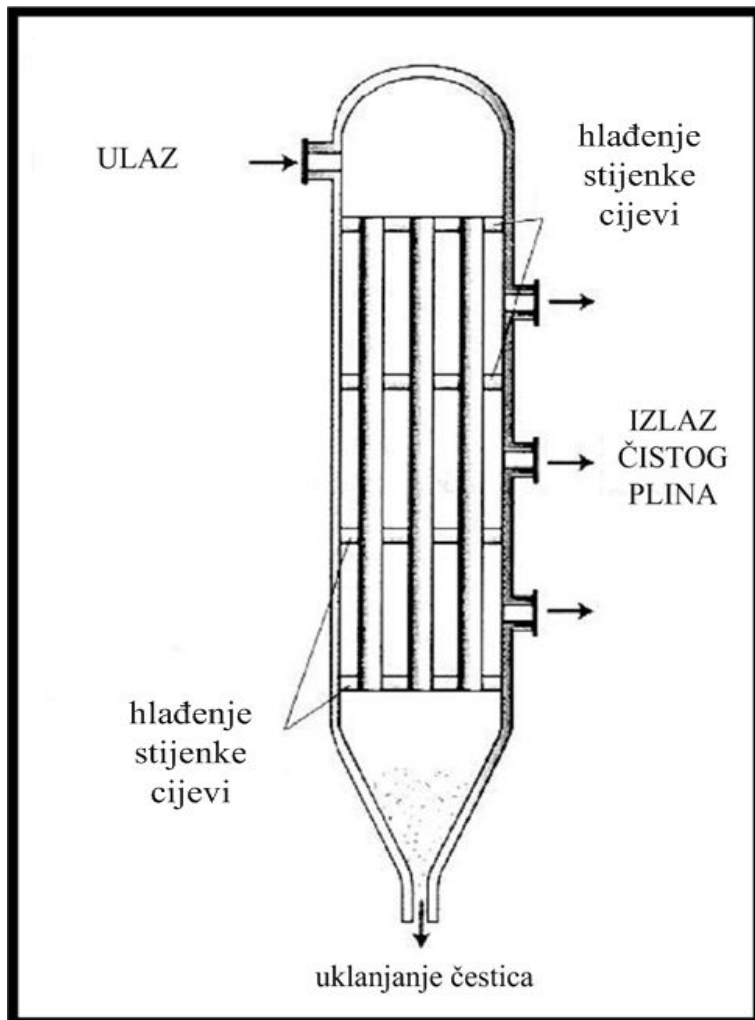
Dužina: 1-1,5 m  
Promjer: 5-10 cm  
Brzine: 1- 4 cm/s (do 10 cm/s)  
T: 300 - 550 °C



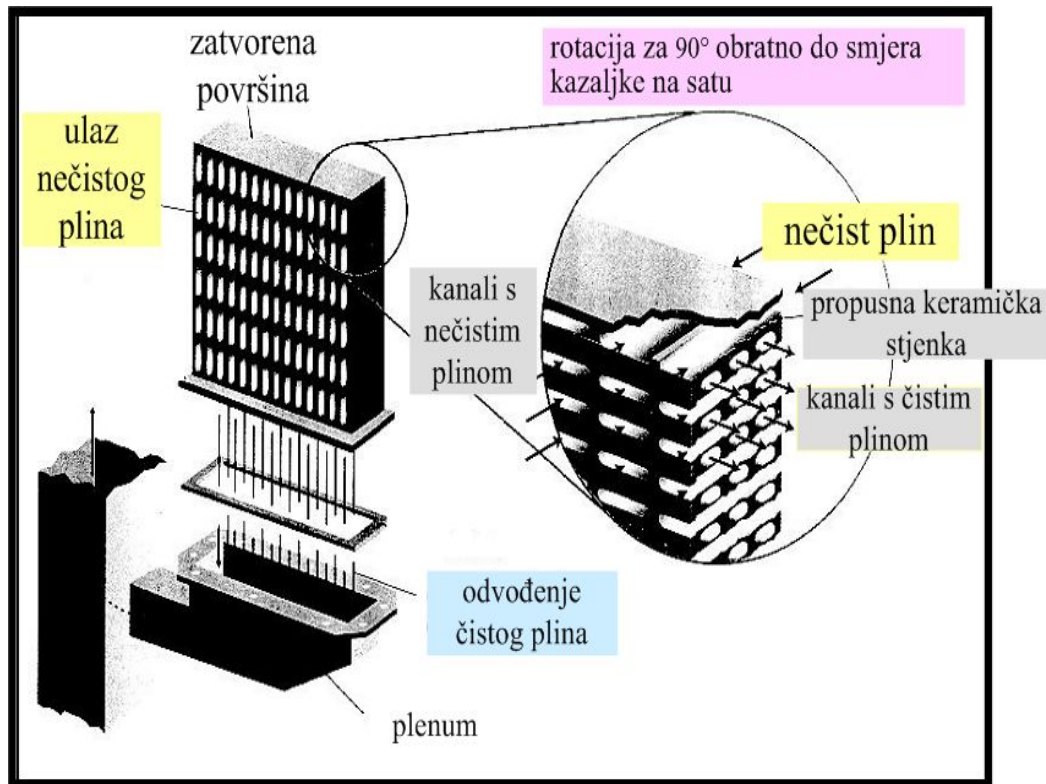
snop filtera  
u obliku svijeća  
broj svijeća: 800-1000



## Keramički cijevni filter



## Keramički pločasti filter



- mogućnost čišćenja reverznim pulsom čistog zraka
- ca. 5 puta veća površina filtriranja po jediničnom volumenu od filtra u obliku svijeće



# Katalitičko filtriranje

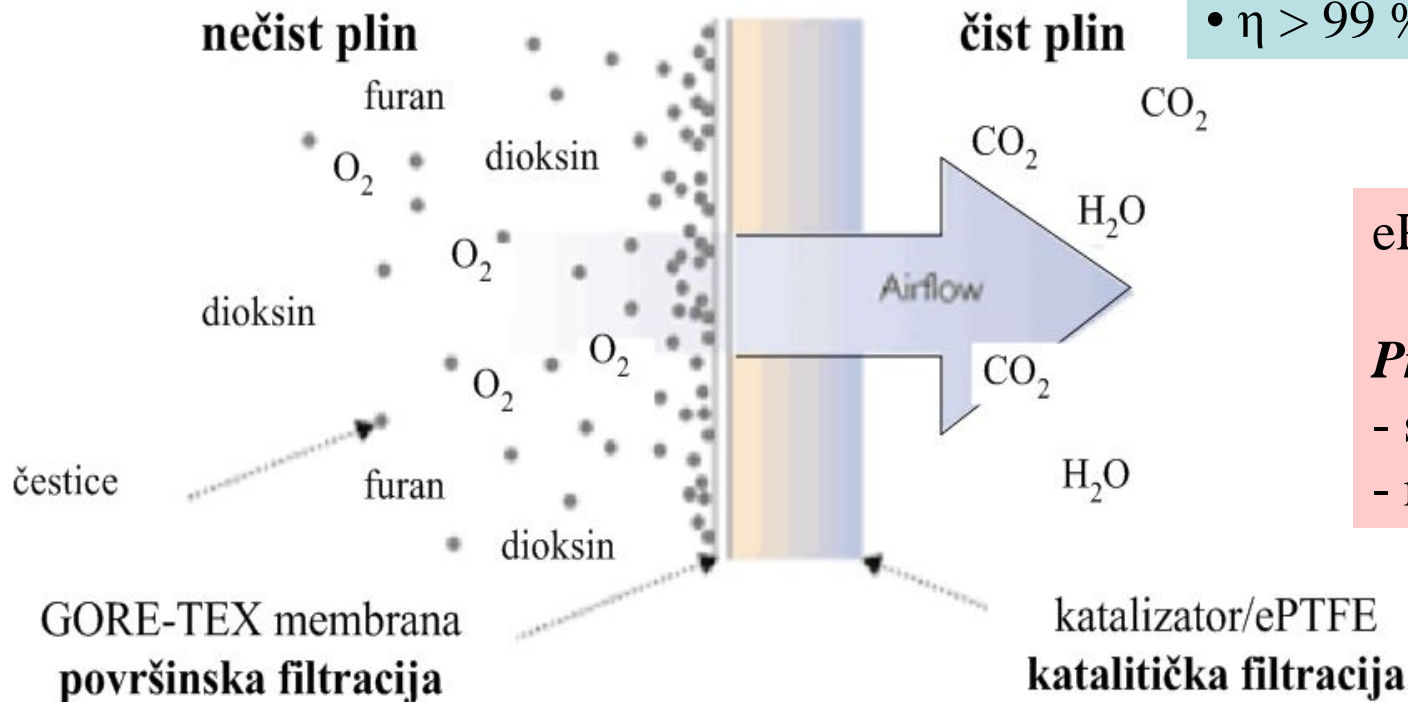
⇒ integracija procesa: kombinacija površinske filtracije i katalize

**Vlakna:** ekspanzirani politetrafluoroeten (ePTFE)

**Katalizator:**  $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$

## Značajke:

- mali  $\Delta p$
- temperatura 150-250 °C
- vlakna inertna do 260 °C
- $\eta > 99 \%$

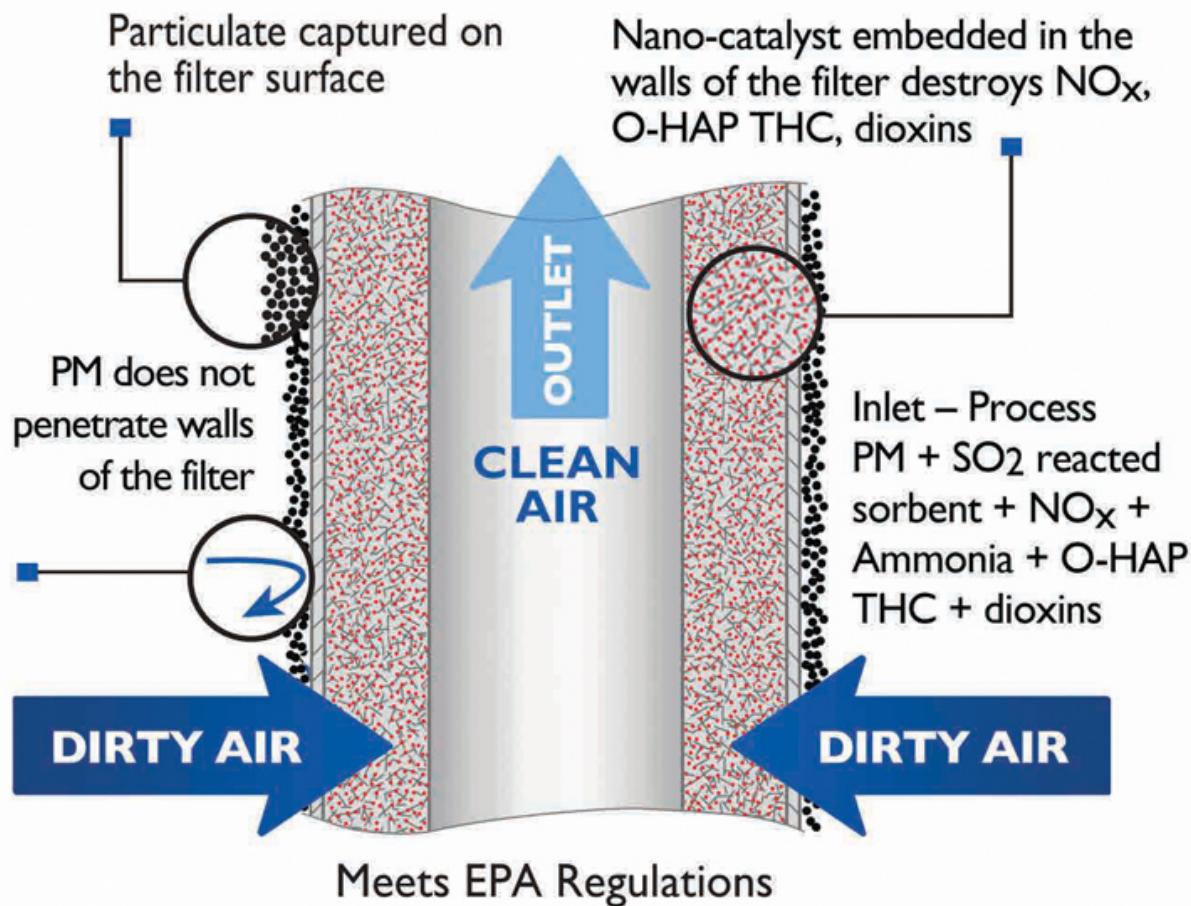


ePTFE- jako skup

## Primjena:

- spalionice
- metalna ind.

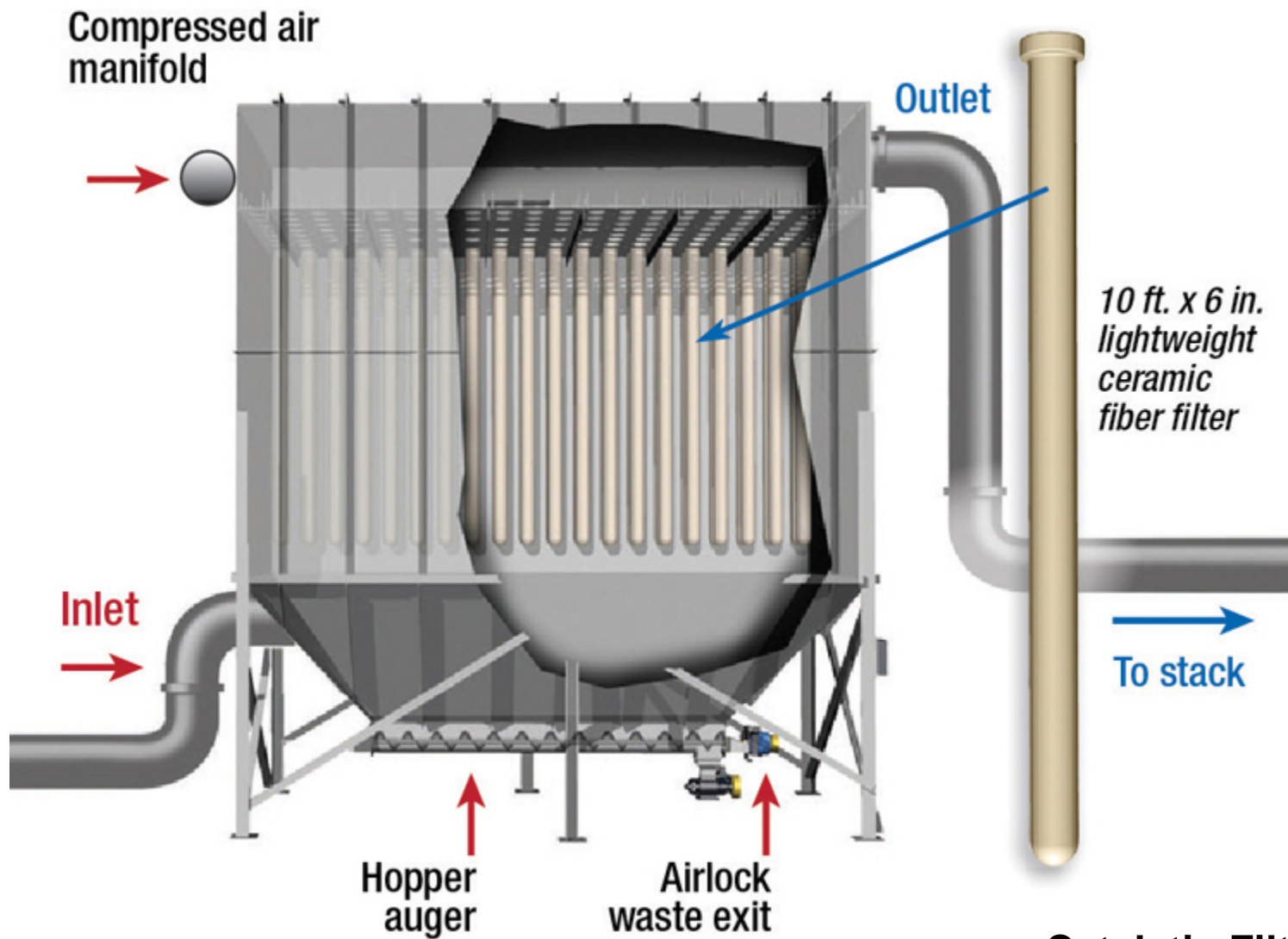
[https://www.pollutiononline.com/doc/catalytic-filters-destroy-air-pollutants-0001?vm\\_tld=2064796&user=81325313-851D-4F66-A74D-2FF159157D97&utm\\_source=et\\_6214185&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=POL\\_05-02-2018&utm\\_term=81325313-851D-4F66-A74D-2FF159157D97&utm\\_content=Catalytic+Filters+Destroy+Air+Pollutants](https://www.pollutiononline.com/doc/catalytic-filters-destroy-air-pollutants-0001?vm_tld=2064796&user=81325313-851D-4F66-A74D-2FF159157D97&utm_source=et_6214185&utm_medium=email&utm_campaign=POL_05-02-2018&utm_term=81325313-851D-4F66-A74D-2FF159157D97&utm_content=Catalytic+Filters+Destroy+Air+Pollutants)  
(katalitičko filtriranje)



## Catalytic Filters Destroy Air Pollutants

Source:

[Tri-Mer Corporation](http://www.trimer.com)



Kućište u kojem su smješteni 3m dugački filtarski elementi; impulsna metoda čišćenja

**Catalytic Filters  
Destroy Air Pollutants**  
Source:  
[Tri-Mer Corporation](http://www.trimer.com)

Dodatne informacije o filtriranju (značajke filter materijala, usporedba filtriranja s ESP i sl.):

[https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/air\\_quality/baghouses](https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/baghouses)

[https://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/ESP\\_Steag%20session%20part.pdf](https://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/ESP_Steag%20session%20part.pdf)