

Uklanjanje čvrstih onečišćujućih tvari/suspendiranih čestica suhim postupcima:

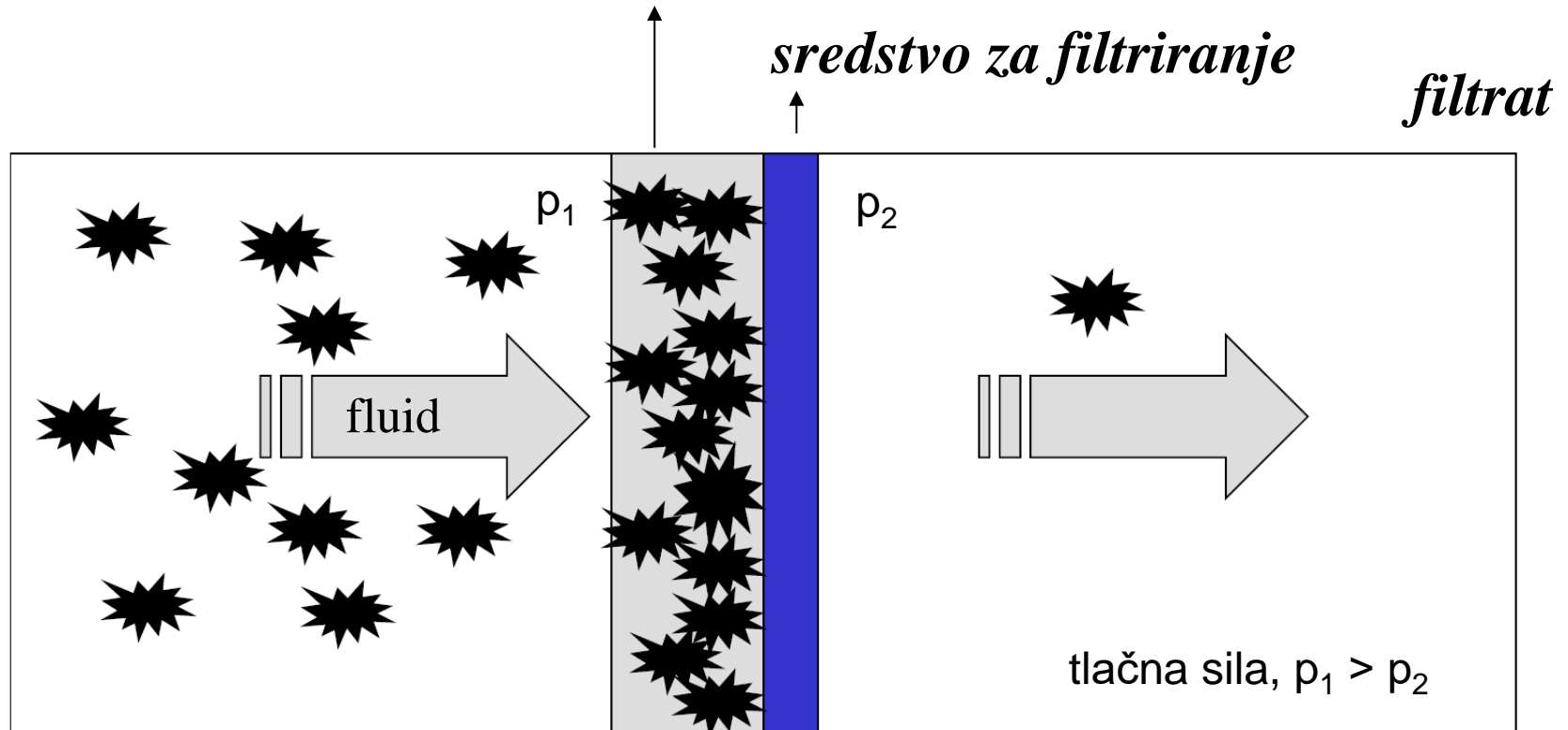
- **Vrećasti filtri**

- 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 filtar



Filtar - membrana sa otvorima manjim od dimenzija čestica koje se trebaju na njoj zadržati (ali ne manjim od dimenzija najsitnijih čestica)

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 i sl.)
- **Filtri s preprekama:**
sinterirana vlakna (staklo, azbest, keramika ili metal (do 230 ° C))
- **Dubinski filtri (filtriranje kroz sloj; zadržavanje čestica unutar fil. sloja), npr. zrnasti filtarski sloj**

Podjela prema namjeni

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

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

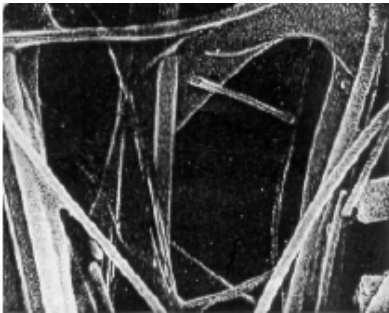
filmovi

- ekstrudirani gusti filmovi

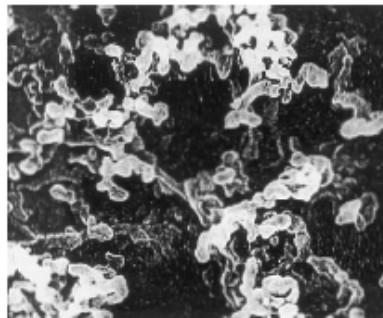
- elektrokem. deponiranje

- ...

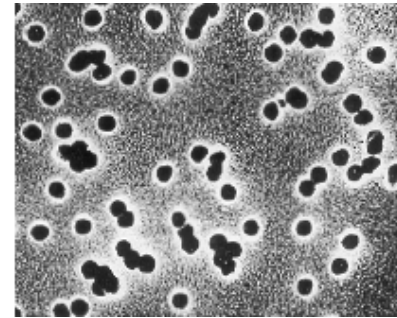
Vrste filtra



vlaknasti filtri



membranski
(porozni) filtri



kapilarni filtri

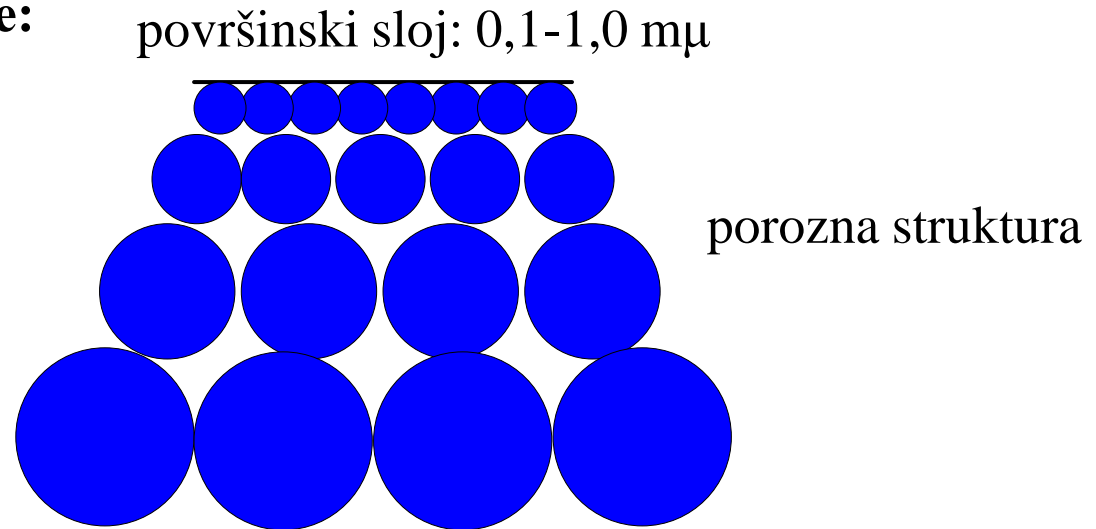
Na izbor filtarskog materijala utječu:

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

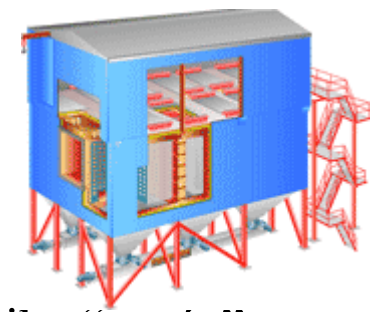
Značajke:

- $Q/A \Rightarrow$ brzina filtriranja , u (m/s)=(m³/s)/(m²)
- $\Delta p \Rightarrow$ potrebna energija (rad ventilatora)
- kemijska i mehanička stabilnost \Rightarrow stabilnost i vijek trajanja filtra

Asimetrične membrane:



Vrećasti filtri – princip rada



- Ulazni plin prolazi kroz filtarsko sredstvo – najčešće tkanine oblika “vreće”;
- 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

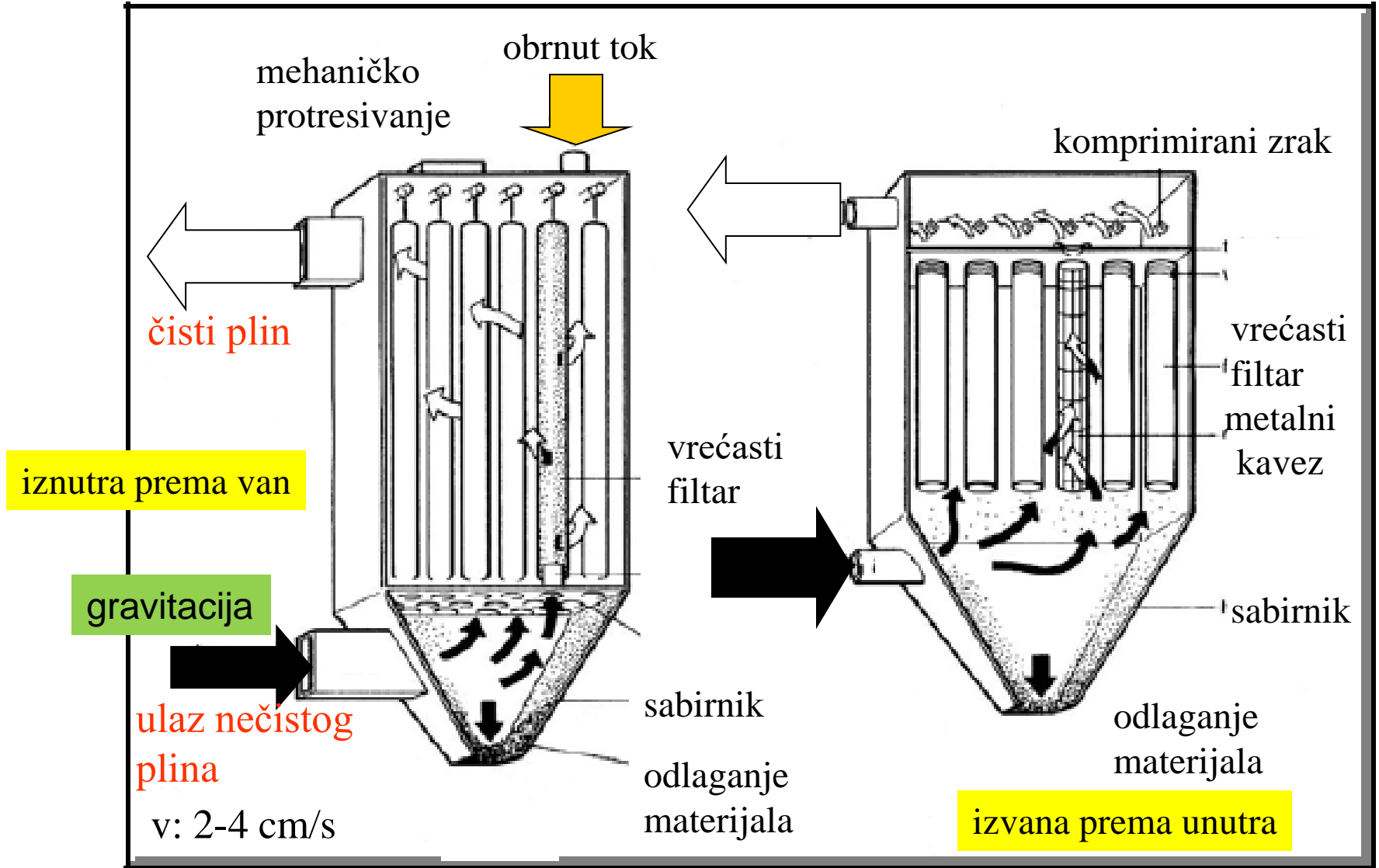
Prednost dominiraju nad nedostacima!

⇒ 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

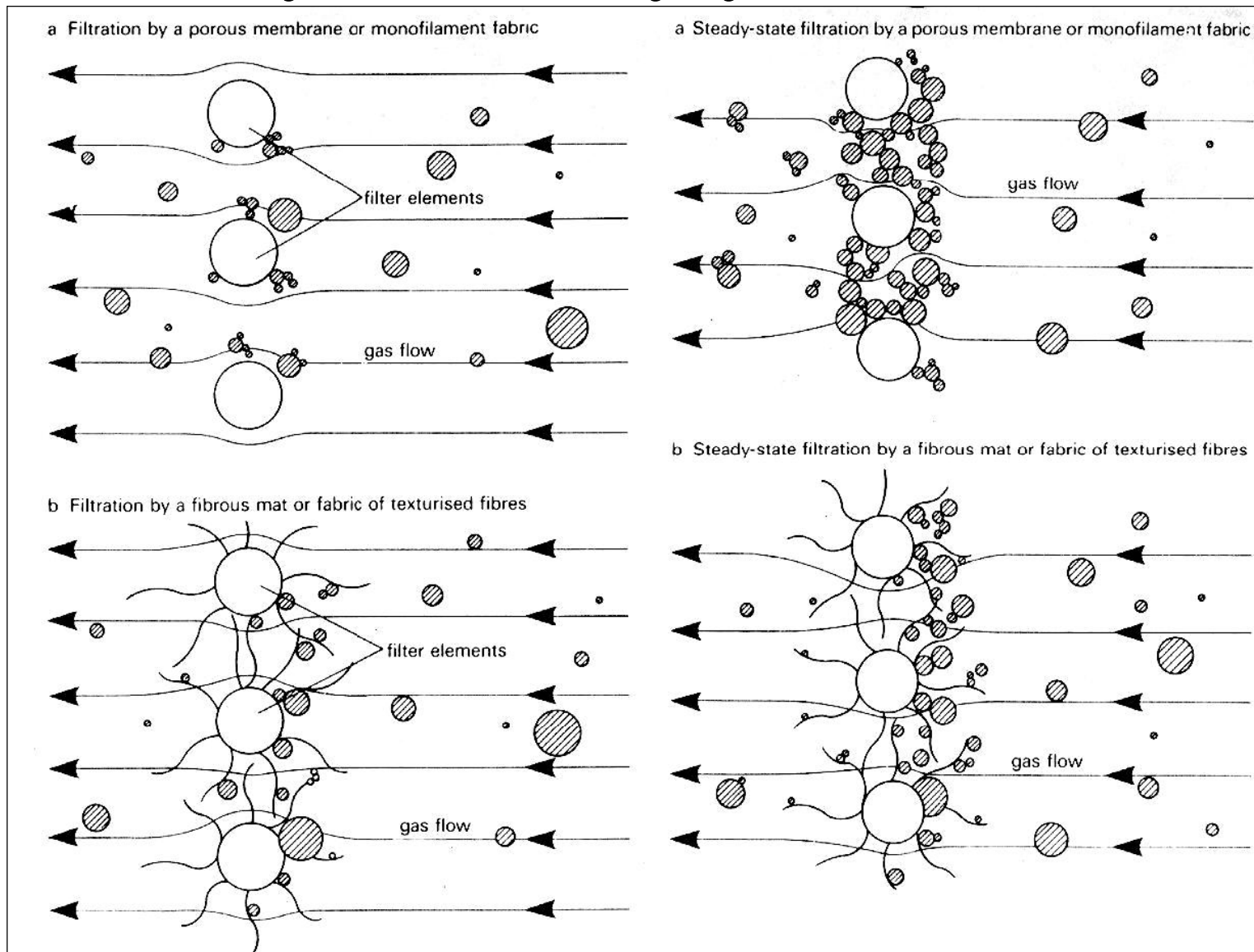


- velika učinkovitost za čestice $< 5 \mu\text{m}$; učinkovito uklanjanje čestica od ca. $0,5 \mu\text{m}$ i značajna udio uklanjanja čestica dimenzija $0,1 \mu\text{m}$

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.

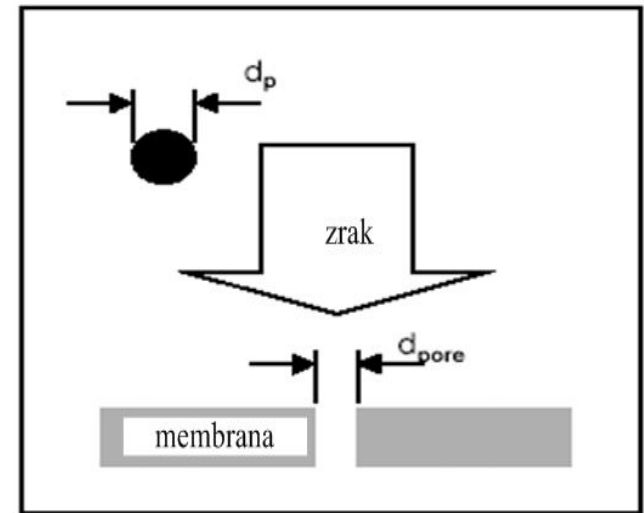
Akumulacija čestica i nastajanje filter kolača



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:

$$d_p < d_{pore}$$

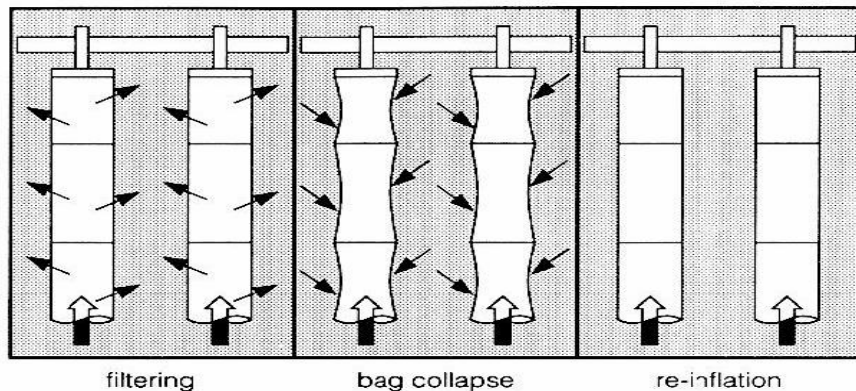


Slučaj D:

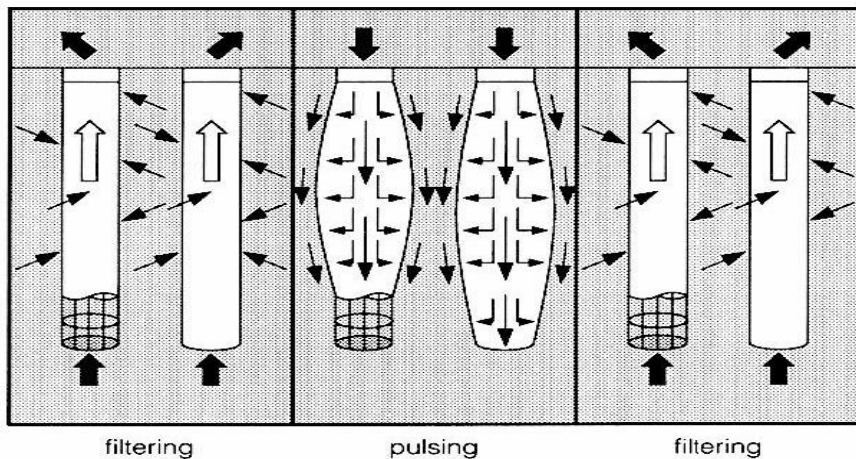
$$d_p < d_{pore}$$



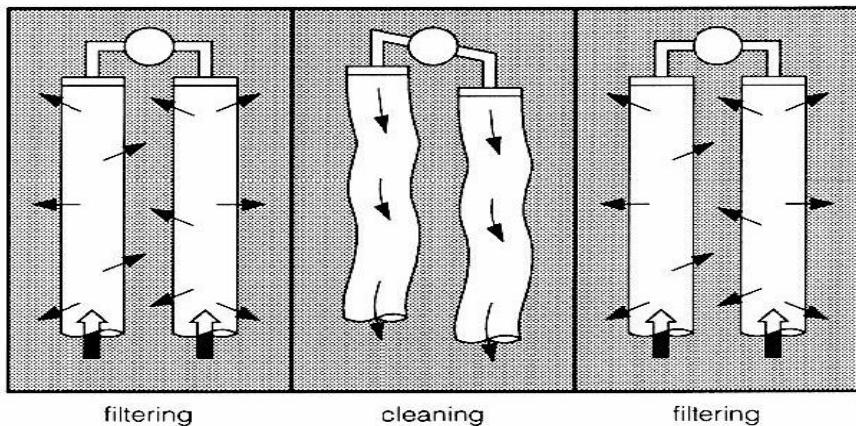
a)



b)



c)



Metode čišćenja vrećastog filtra:

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

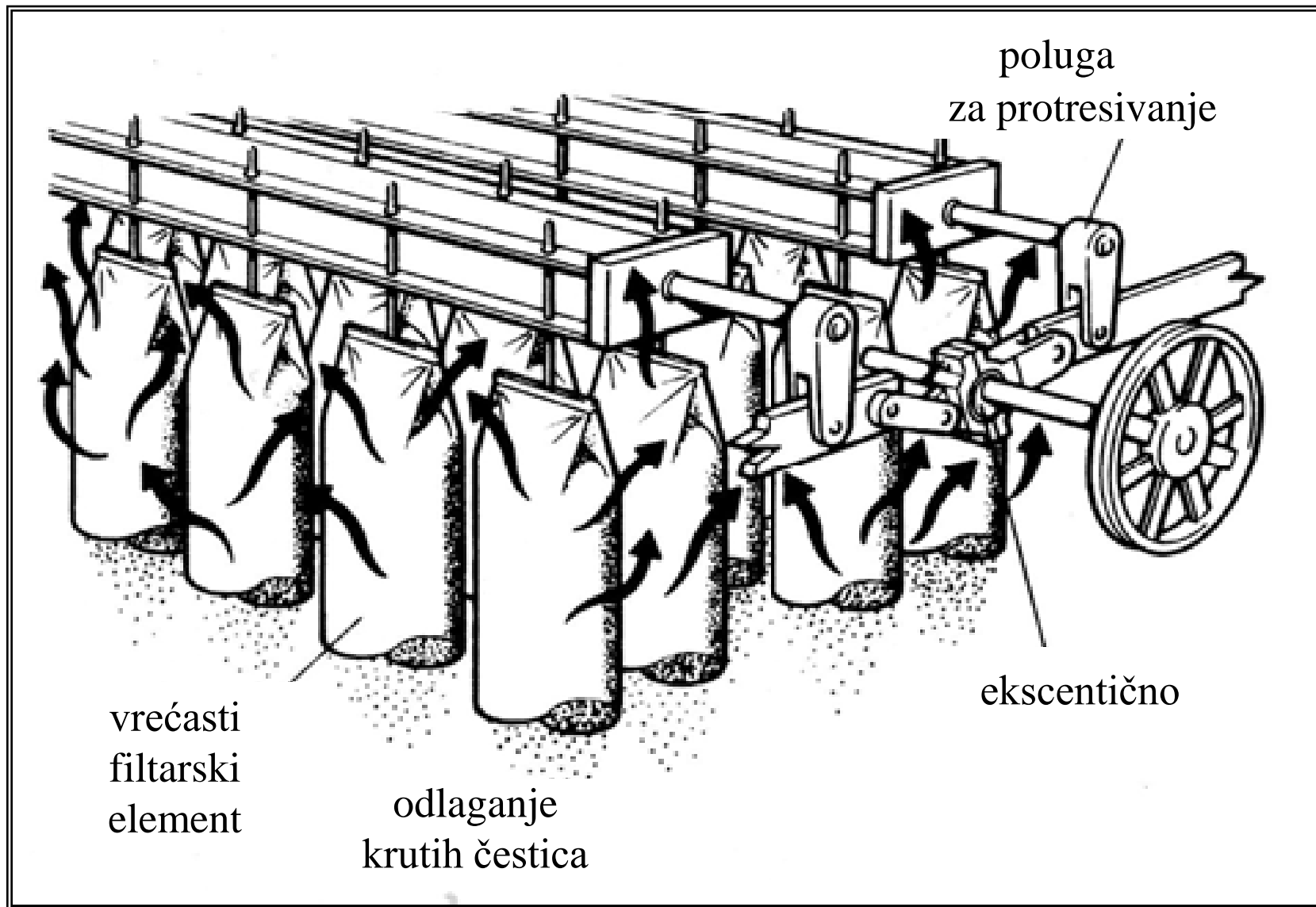
pulsiranje se provodi *on-line*:

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

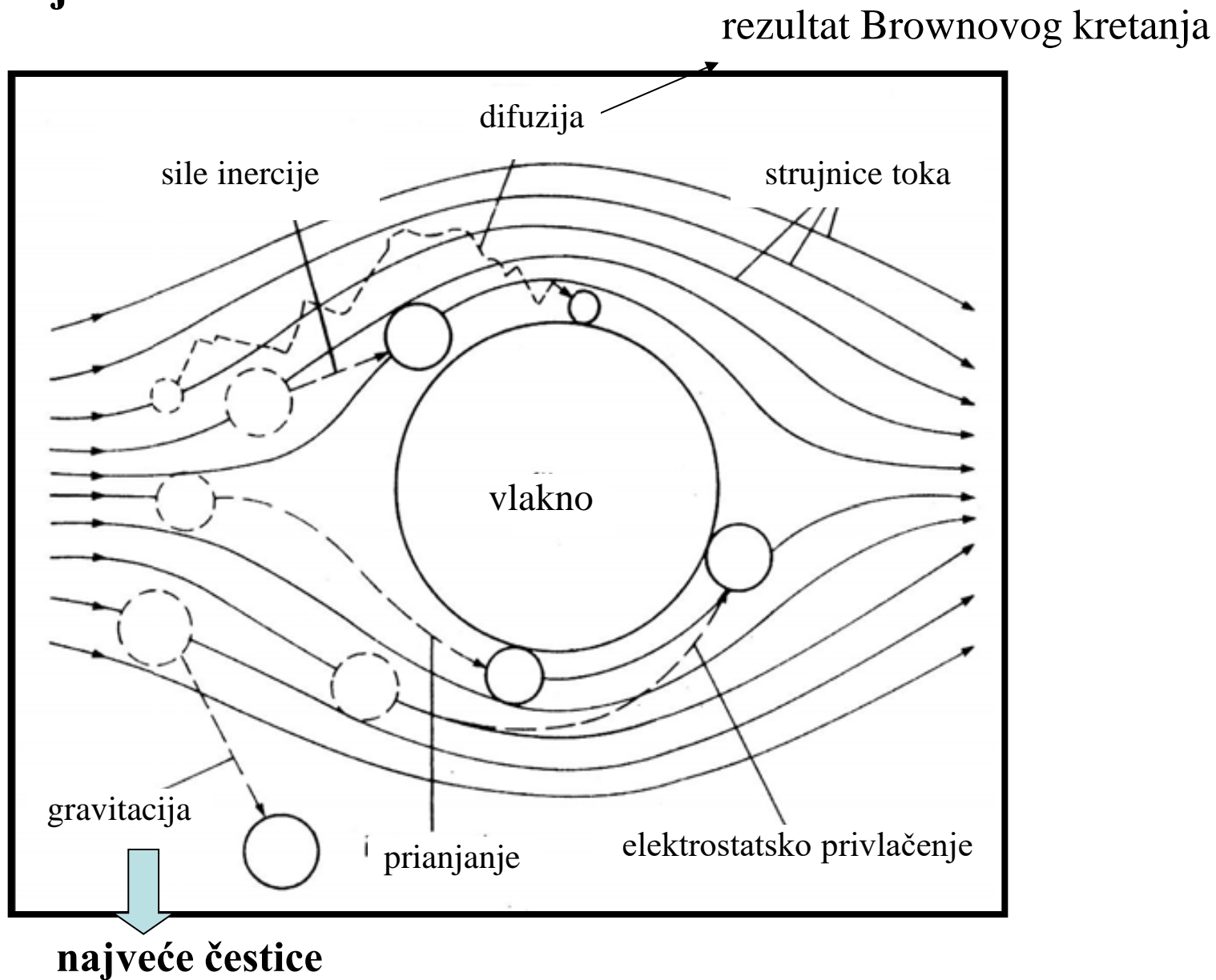
b) *puls srednjeg tlaka*
(1-2 bara)

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

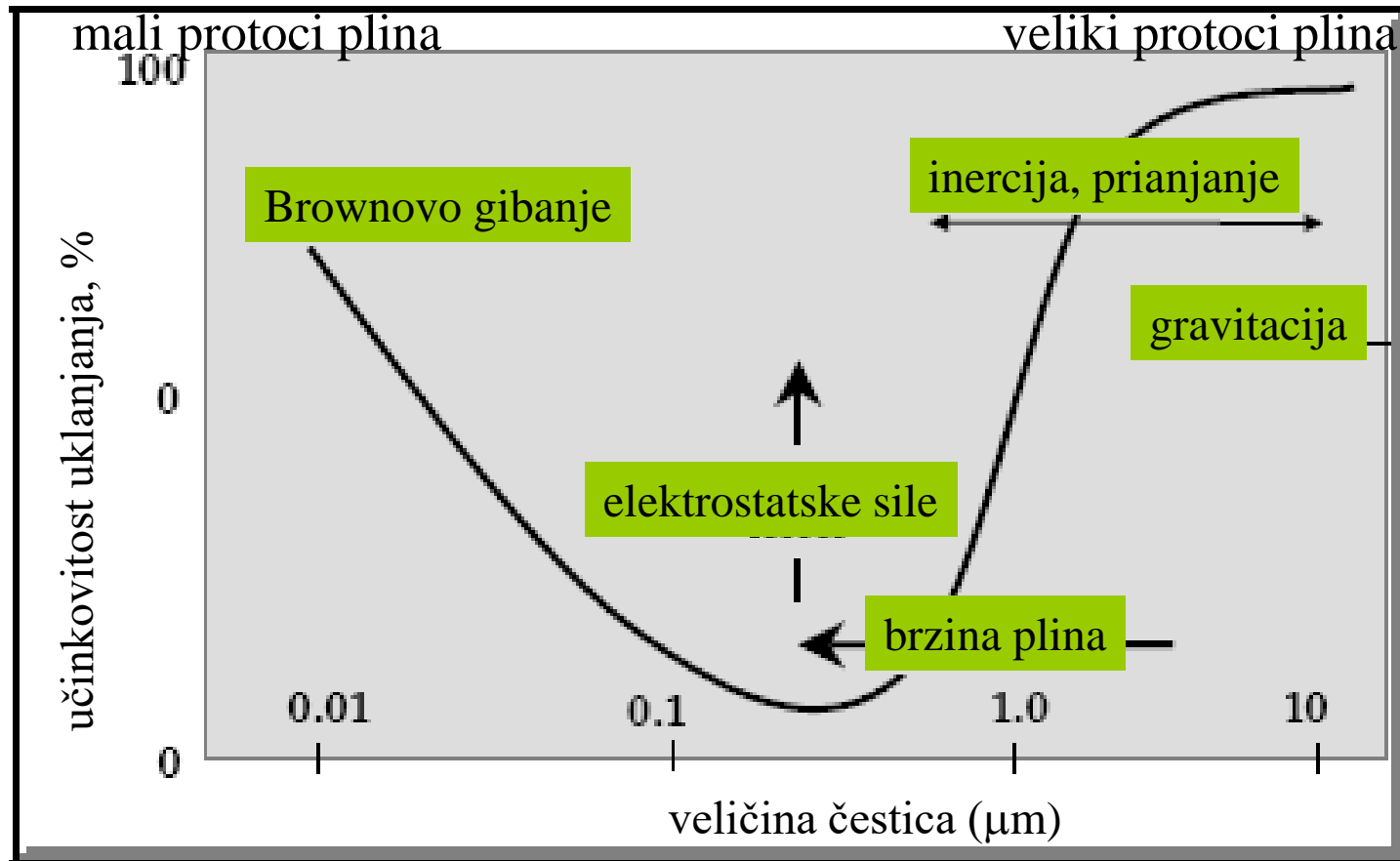
Metoda protresivanja - *mehanički sustav*



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 , α
- određivanje maksimalnog pada tlaka zavisno o načinu rada, Δp

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:

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

Δp_1 = otpor filtarskog sredstva; Δp_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

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

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

$$dw = \rho_c (1 - \varepsilon) dx$$

x - debljina filt. kolača

u – linearna brzina filtriranja, m/s
 K- permeabilnost (propusnost), m²
 η_F - dinamička viskoznost fluida, Pa·s
 L- debljina filteranskog kolača, m
 Δp – pad tlaka, N/m²

Specifični (lokalni) otpor kolača, α_f (m/kg)

$$\alpha_f = \frac{1}{K(1 - \varepsilon) \rho_c}$$

gdje je ε – poroznost kolača

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

V – volumen filteranskog kolača
 V_p – volumen krutih čestica

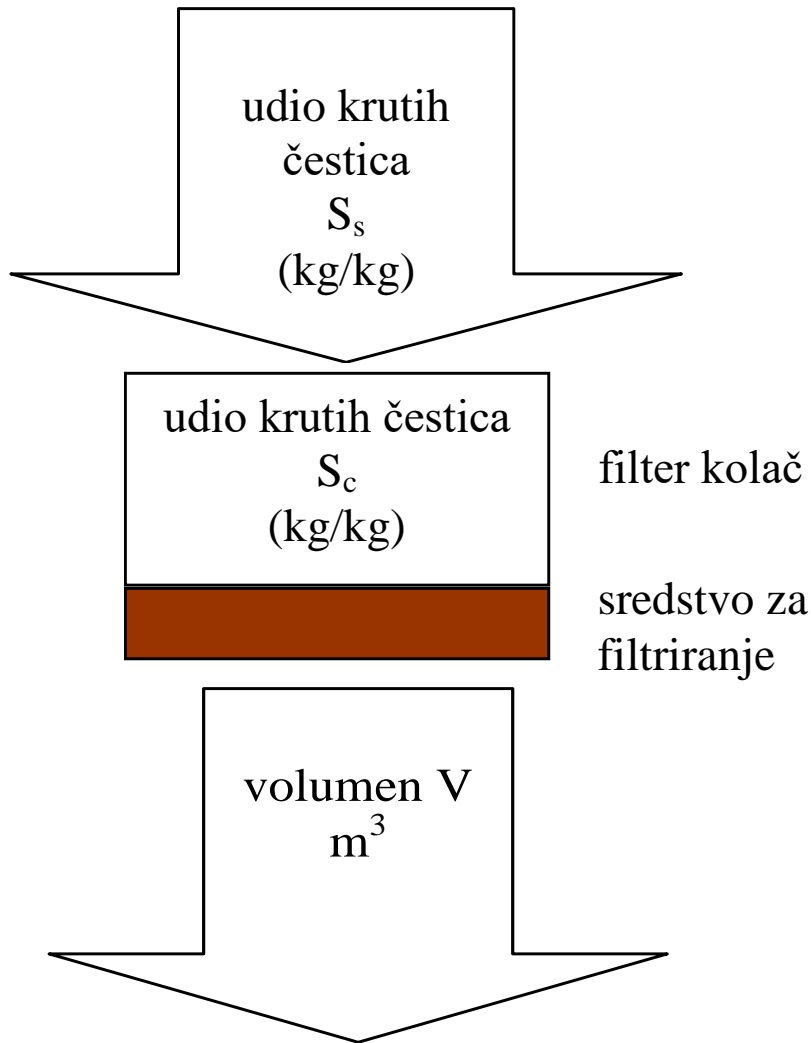
Ruthova jednađba - za izrađunavanje otpora filtarskog sredstva, R:

- Ako pretpostavimo da filtar kolač ima **masu w po jedinici površine filtra (kg/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/m²])

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

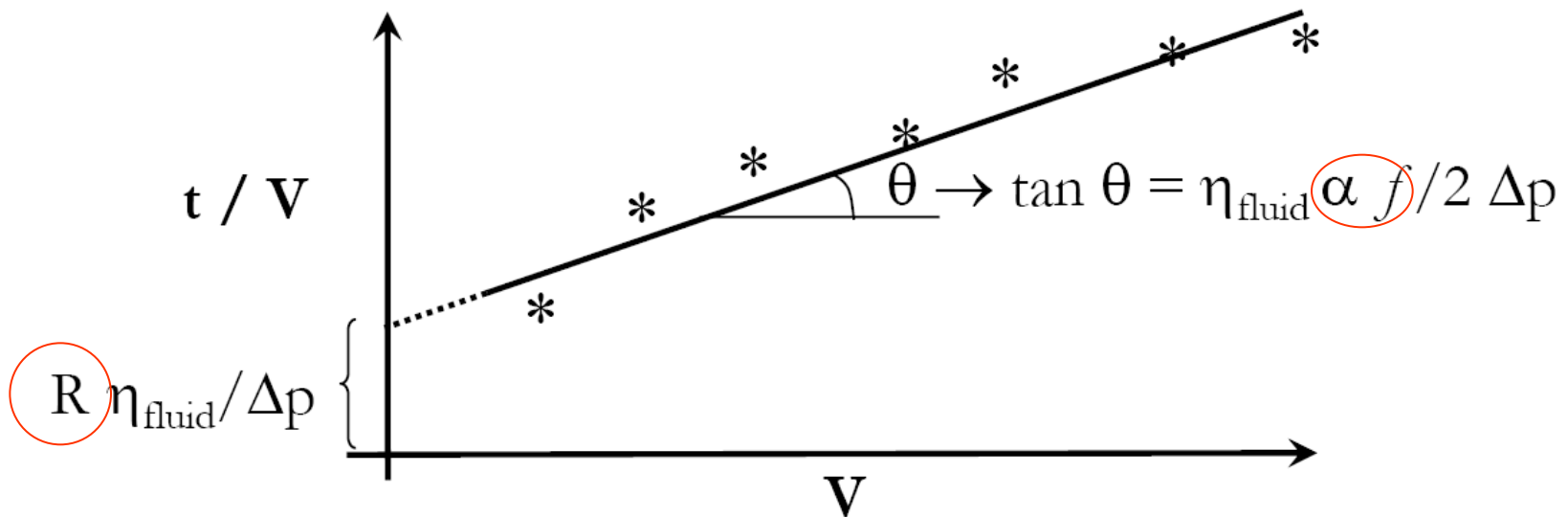
Filtriranje u uvjetima konstantnog tlaka ($\Delta p = \text{konst.}$):

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

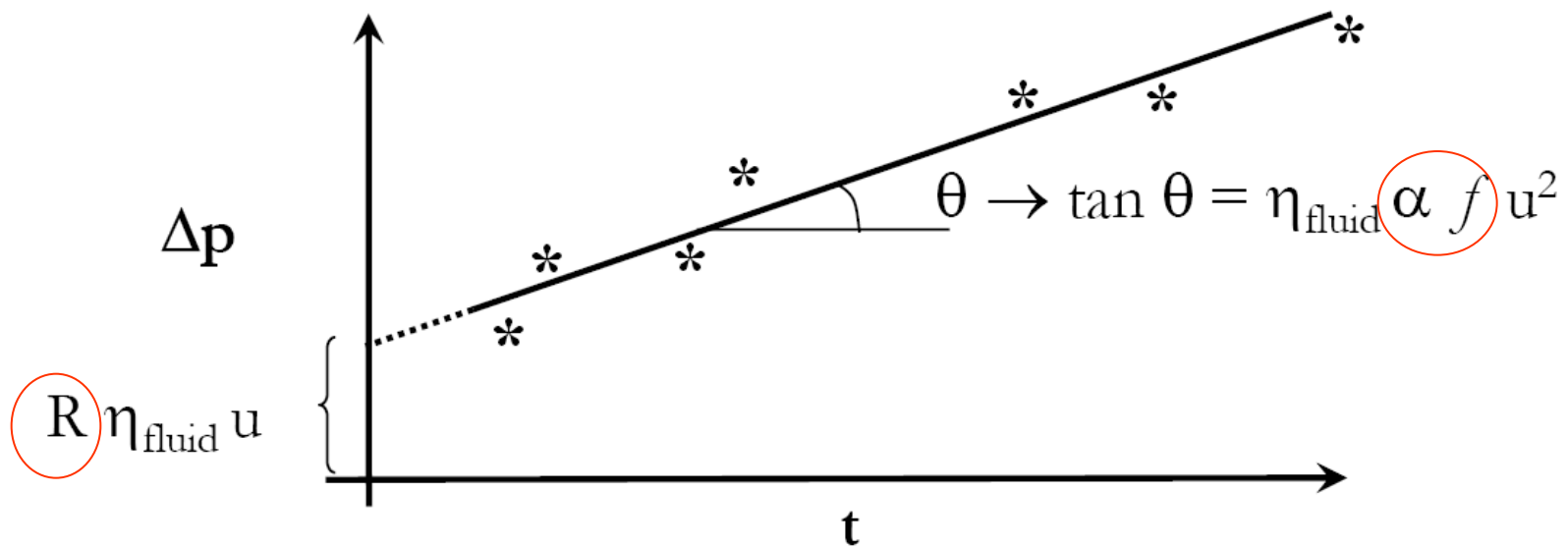
Prikazivanjem zavisnosti t/V o V dobiva se pravac iz čijeg nagiba se može odrediti **specifični otpor kolača, α** , a iz odsječka **otpor filtarskog sredstva, R** .



eksperimentalno određivanje α_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

η_{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, Δp 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

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

Primjer – dizajniranje filtra

Potrebno je dizajnirati vrećasti filter, tj. izračunati broj filtarskih vreća, ako je zadano sljedeće:

$$Q = 4,72 \cdot 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$u = 4 \text{ cm/s}$$

$$d = 0,203 \text{ m}$$

$$\underline{H = 3,66 \text{ m}}$$

$$N = ?$$

$$u = \frac{Q}{A_{uk}} \Rightarrow A_{uk} = \frac{Q}{u} = \frac{4,72 \cdot 10^6}{4} = 118 \text{ m}^2$$

$$A(\text{jedne vreće}), A_b$$

$$A_b = \pi dL = 3,14 \cdot 0,203 \text{ m} \cdot 3,66 \text{ m} = 2,33 \text{ m}^2$$

$$N = \frac{A_{uk}}{A_b} = \frac{118 \text{ m}^2}{2,33 \text{ m}^2} = 51$$

Kondicioniranje filtra

- Slično kao i kod elektrofiltra rad filtra može se poboljšati kondicioniranjem plina (sa SO_3/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)

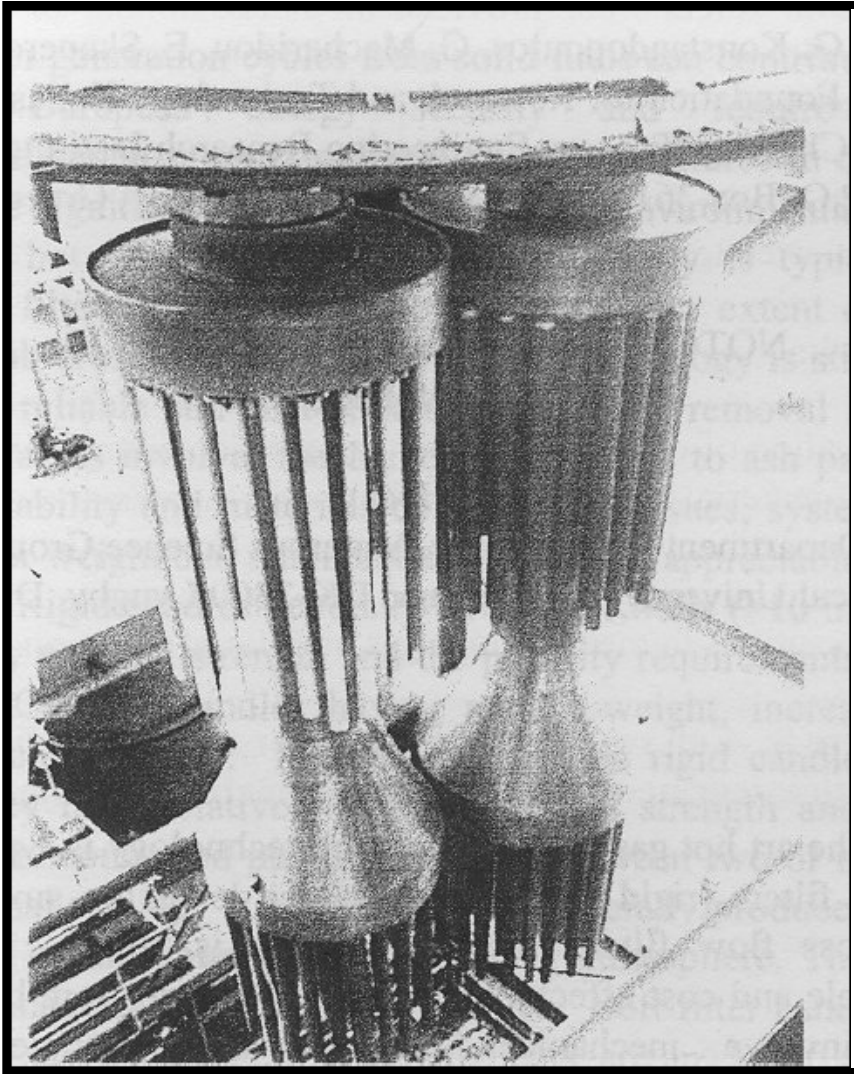
- oblik svijeće
- oblik cijevi
- pločasti poprečni/paralelni filtri

Materijal: Al_2O_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)

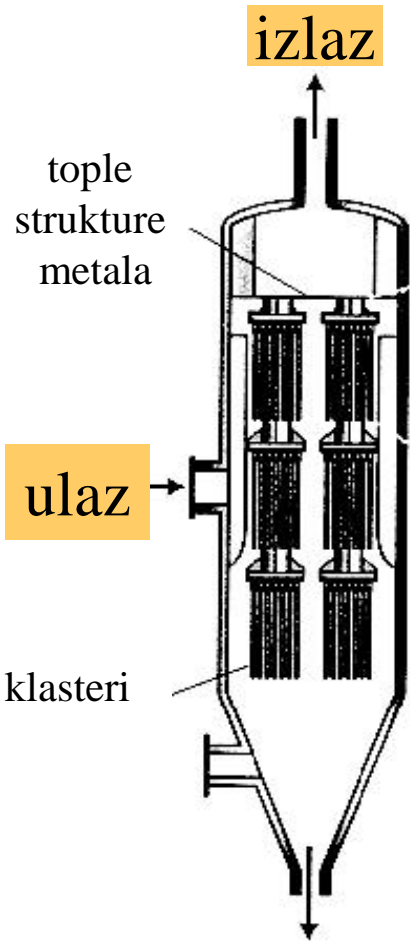


Dužina: 1-1,5 m

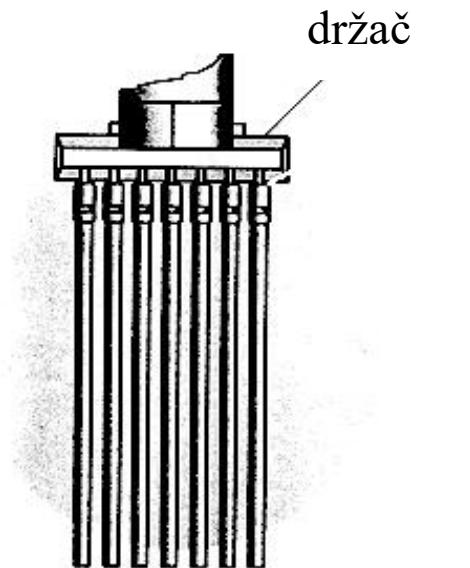
Promjer: 5-10 cm

Brzine: 1- 4 cm/s (do 10 cm/s)

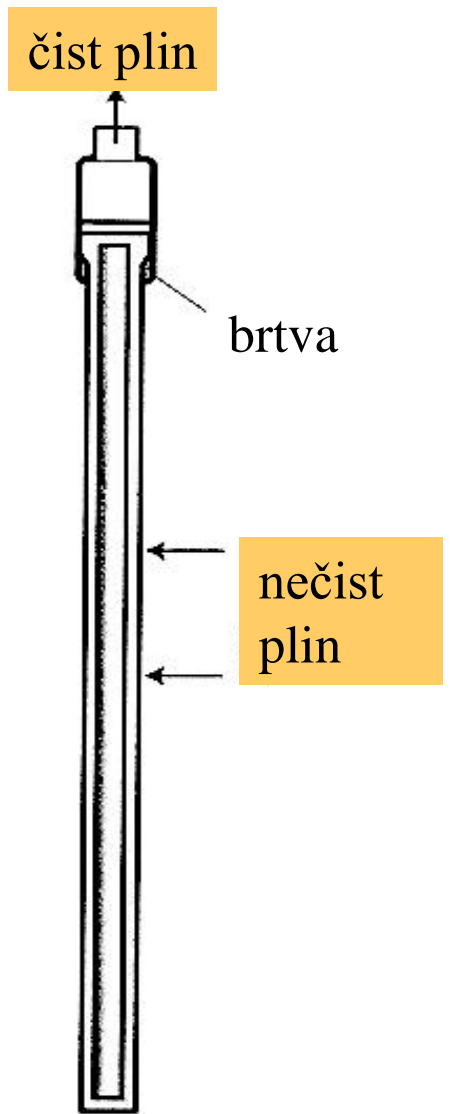
T: 300 - 550 °C



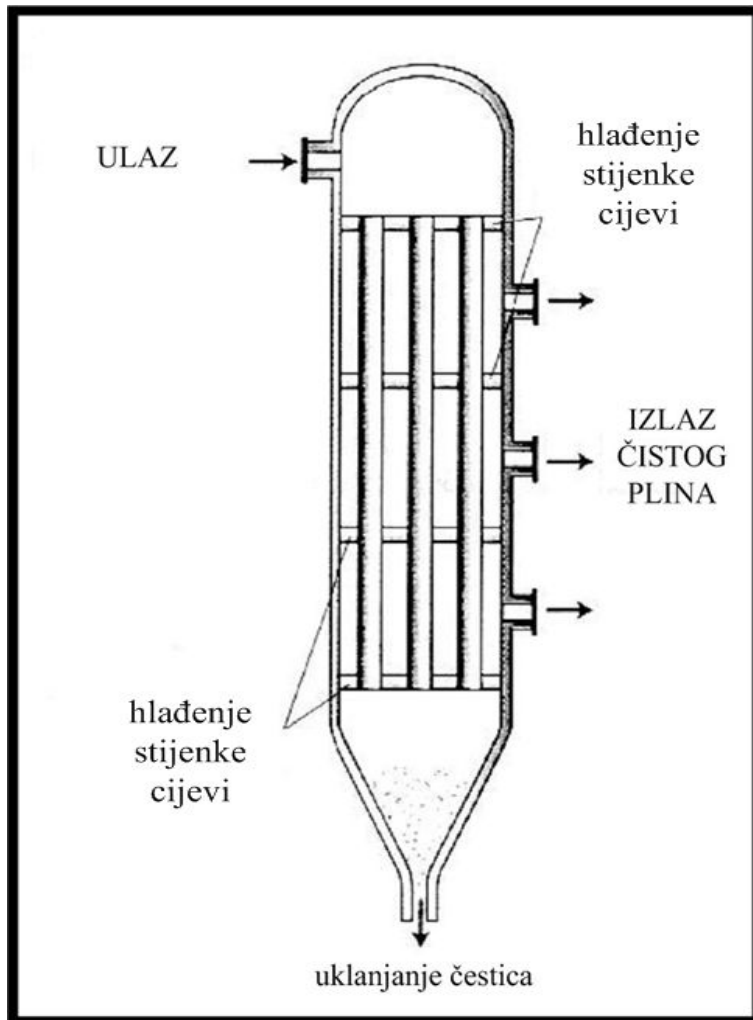
odlaganje krutih čestica



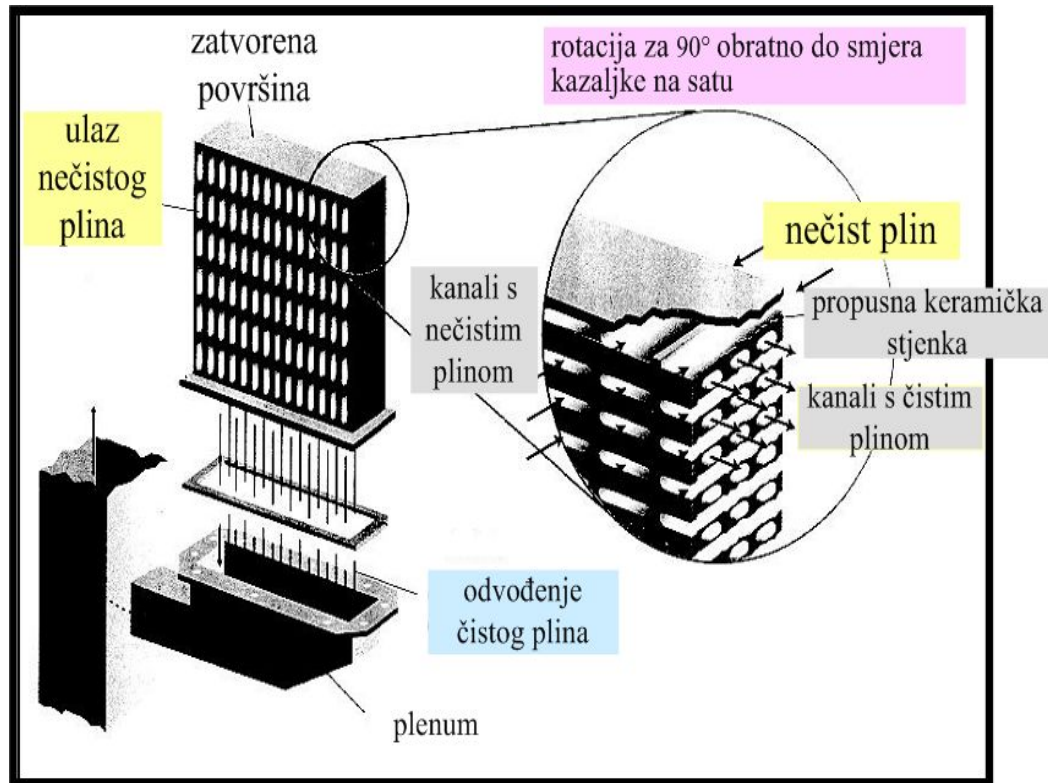
snop filtara
u obliku svijeća
broj svijeća: 800-1000



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

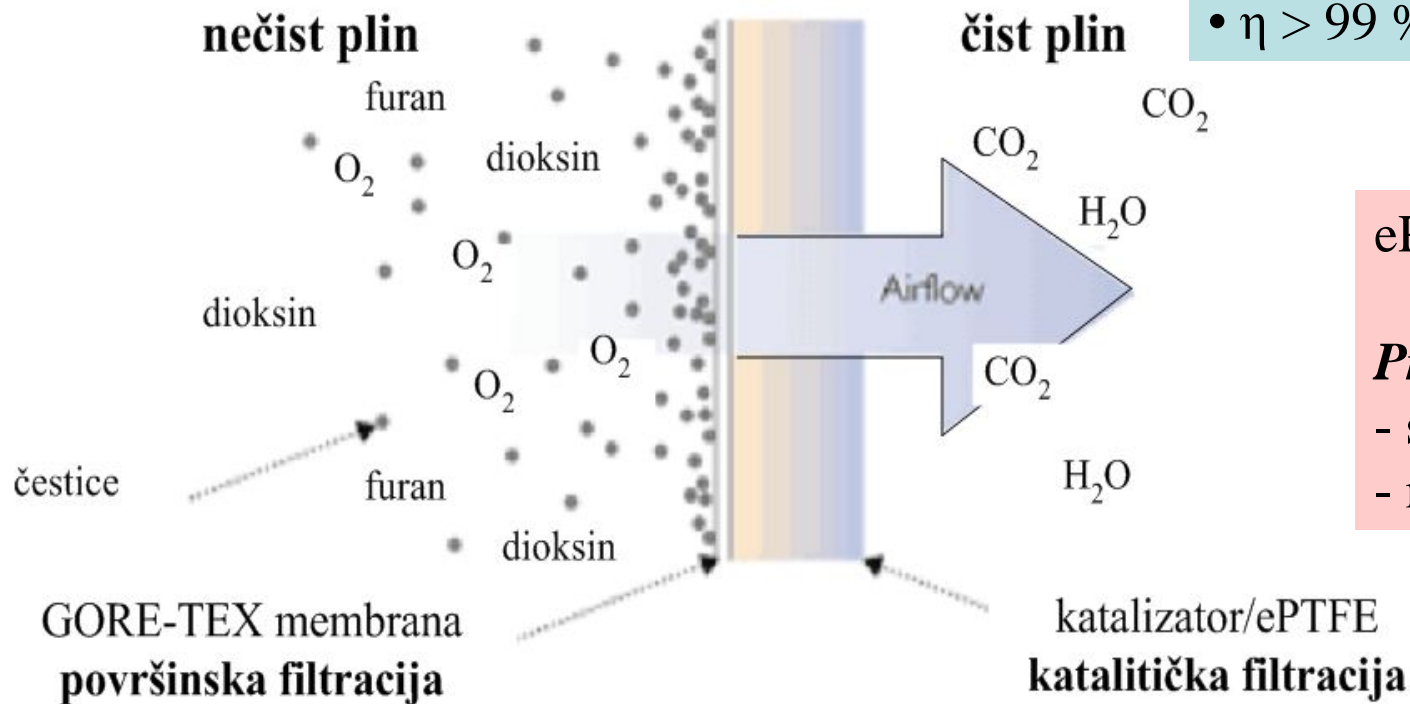
⇒ integracija procesa: kombinacija površinske filtracije i katalize

Vlakna: ekspanzirani politetrafluoroeten (ePTFE)

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

Značajke:

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

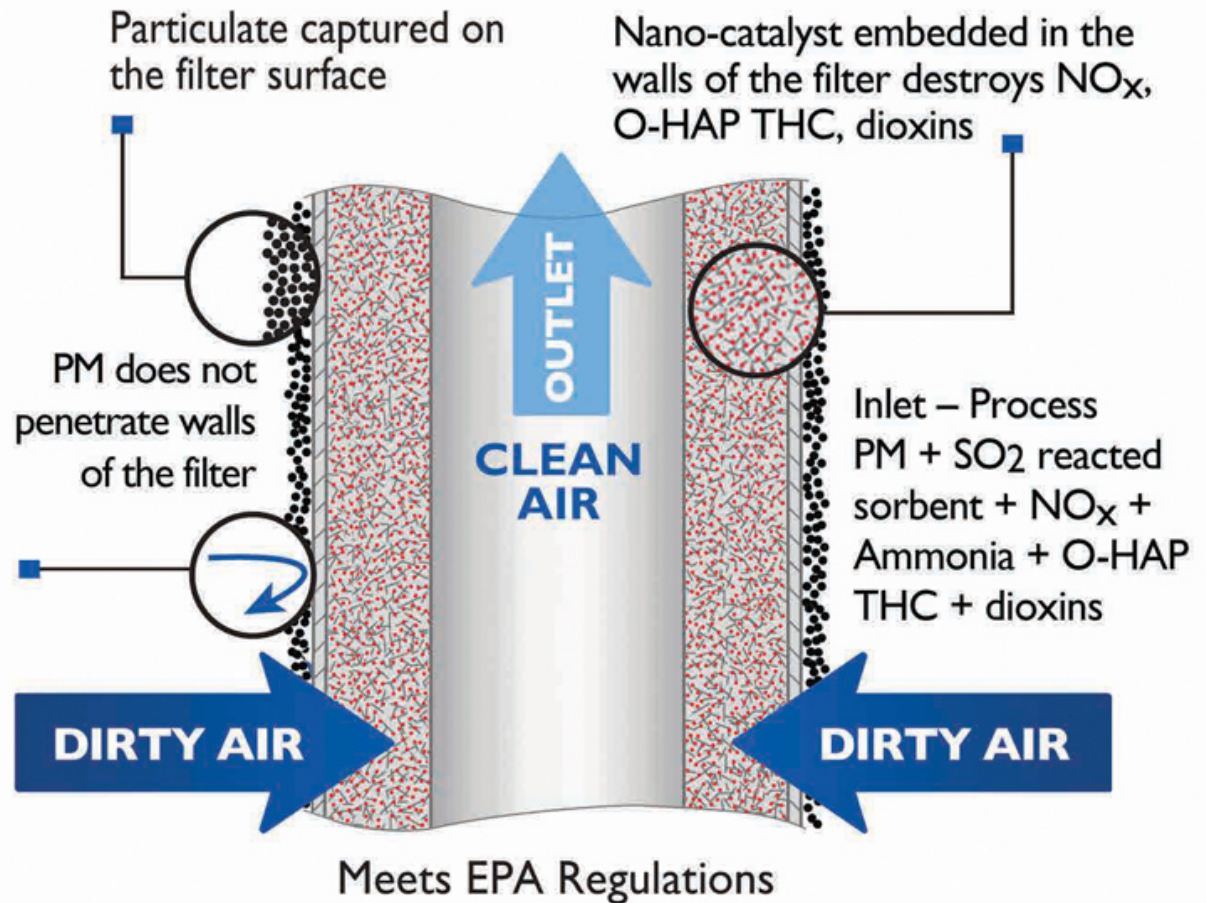


ePTFE- jako skup

Primjena:

- spalionice
- metalna ind.

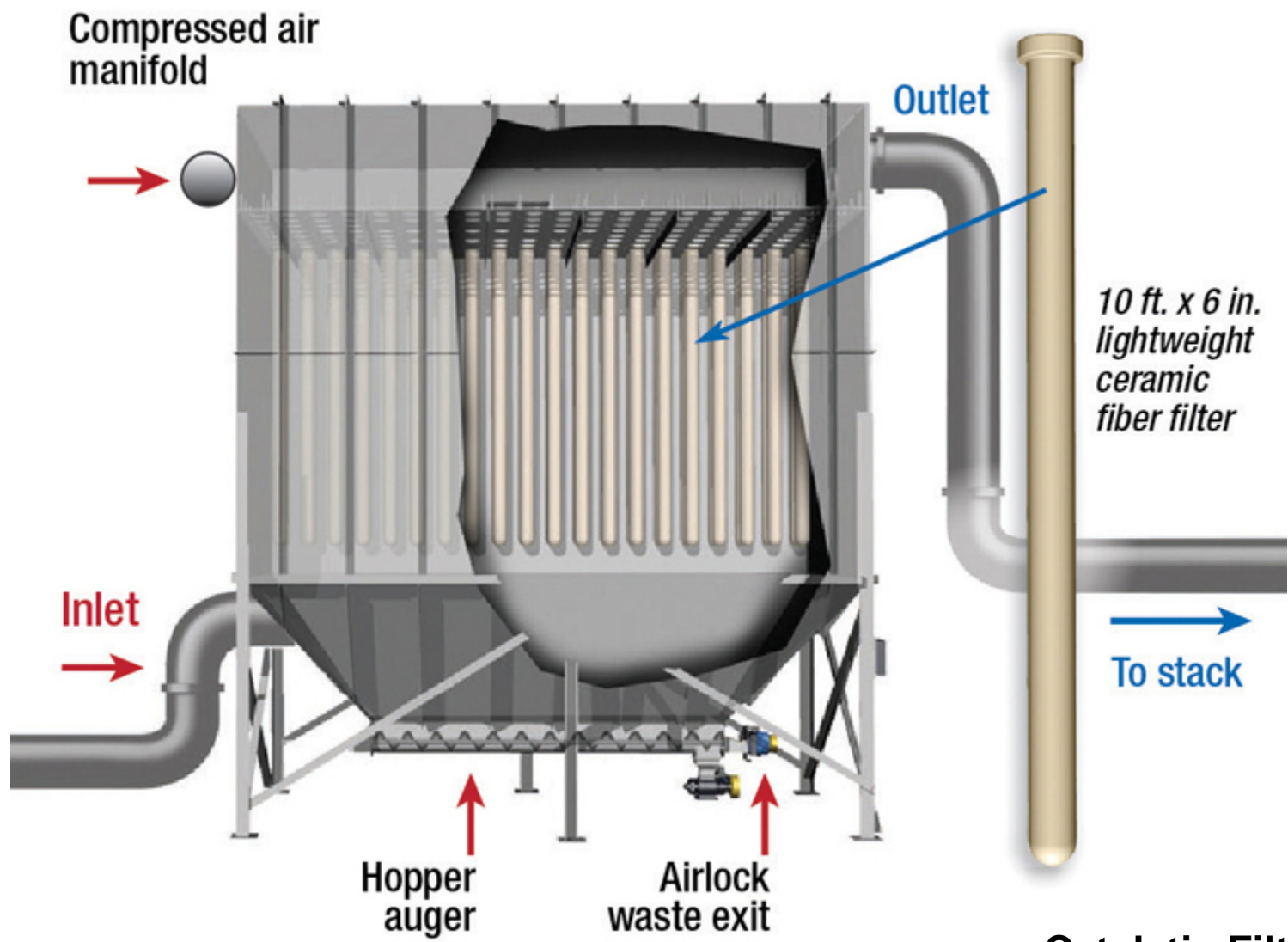
https://www.pollutiononline.com/doc/catalytic-filters-destroy-air-pollutants-0001?vm_tld=2064796&user=81325313-851D-4F66-A74D-2FF159157D97&utm_source=et_6214185&utm_medium=email&utm_campaign=POL_05-02-2018&utm_term=81325313-851D-4F66-A74D-2FF159157D97&utm_content=Catalytic+Filters+Destroy+Air+Pollutants
(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.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/ESP_Steag%20session%201%20part%201.pdf