



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

*Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo*

# *Procesi prijenosa i separacija*

V. PREDAVANJE

Transport Phenomena and Separation Processes

*Ak. god. 2019./2020.*

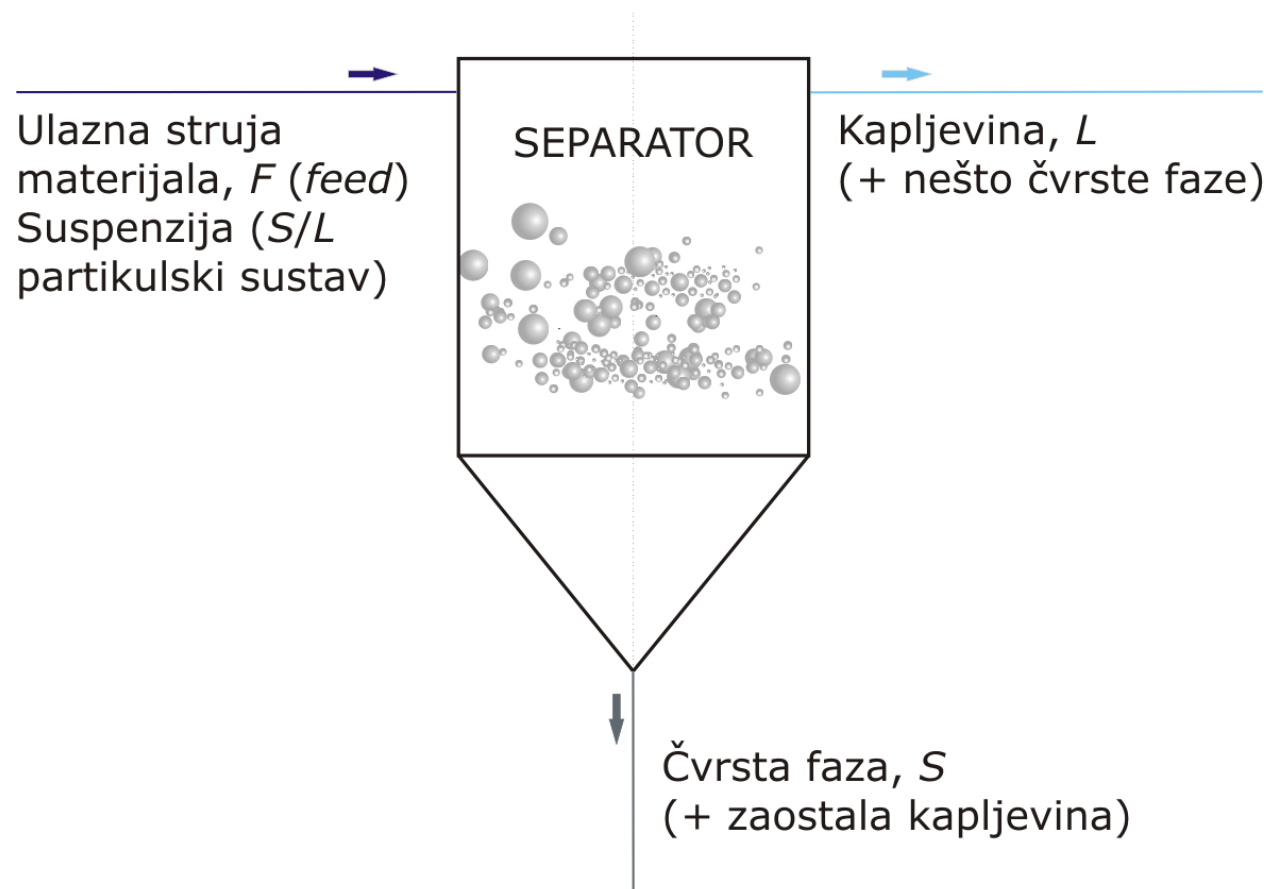
**Zagreb, 26. ožujka 2020.**

Tablica 1. Primjeri partikulskih sustava.

<b>PRAŠKASTI SUSTAVI (PRAŠCI)</b>	<b>Šećer, brašno, škrob, pijesak, pigmenti, prah tonera</b>
<b>KAPLJEVITE MJEŠAVINE: EMULZIJE (L/L) &amp; <b>SUSPENZIJE (S/L)</b></b>	<b>Mlijeko, maslac, krv, boja</b>
<b>MJEŠAVINE ČVRSTOGA (S/S)</b>	<b>Stijene, sedimenti, farmaceutici</b>
<b>AEROSOLI (L/G+S/G)</b>	<b>Magla, sprejevi, inhalatori</b>
<b>PLINOVITI MJEHURIĆI U MEDIJU</b>	<b>Kreme (G/L) i pjene (G/S)</b>
<b>AGLOMERATI – OKRUPNJENE MATRICE</b>	<b>Granule, pelete, itd.</b>

*Procesi separacije u sustavima čvrsto–kapljevito (S/L partikulskim sustavima)* provode se s ciljem odvajanja sadržanih faza ( $S$ ,  $L$ ) iz suspenzije kada nam je potrebna:

- i. Čvrsta faza,
- ii. Kapljevina,
- iii. Obje faze,
- iv. Niti jedna faza (u slučajevima sprječavanja onečišćenja vode).



Slika 1. Shematski prikaz separatora.

Idealno odvajanje S/L partikulskog sustava podrazumijeva da je u jednoj izlaznoj struji materijala prisutna isključivo kapljevita faza, a u drugoj samo čvrsta faza, suhe čvrste jedinice.

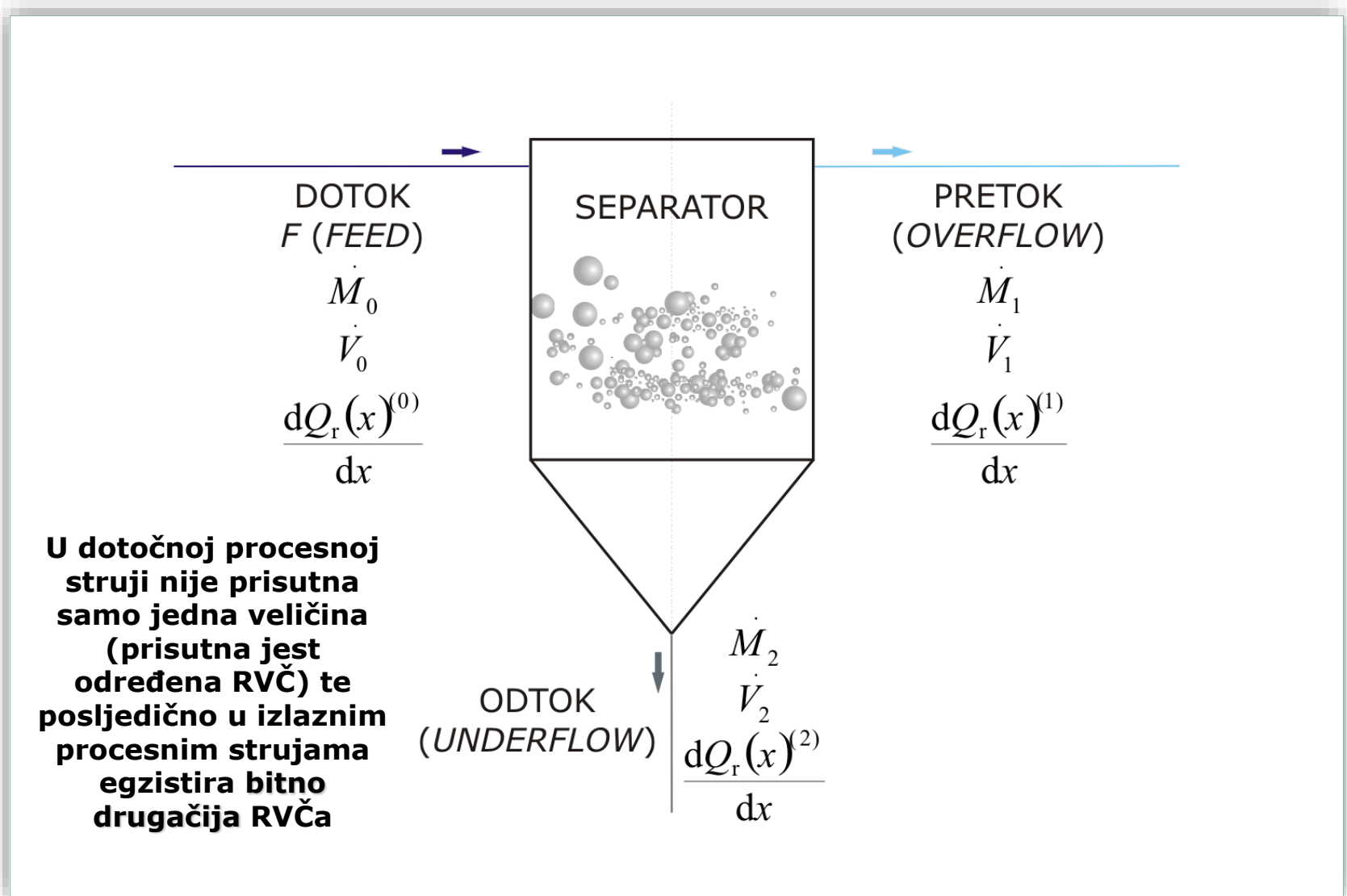
No, niti jedan separacijski uređaj (separator) ne može postići idealno odvajanje. Stoga, u pojedinim izlaznim strujama materijala egzistiraju obje faze (struja čvrstih jedinica + zaostala kapljevina & struja kapljevine + nešto čvrste faze).

Neidealnost separacijskog procesa/separatora iskazuje se:

- i. Djelotvornošću odvajanja – masenim udjelom čvrste faze koja je separirana,
- ii. Udjelom zaostale kapljevine (vlage) u čvrstom dijelu.

Procesi separacije u sustavima čvrsto-kapljevito  
(S/L partikulskim sustavima)





Slika 2. Shematski prikaz separatora s pripadajućim RVČa.

Bilanca tvari za separator

$$\dot{M}_0 = \dot{M}_1 + \dot{M}_2$$

Bilanca tvari za svaku veličinsku frakciju prisutnu u dotoku odnosno  
bilanca tvari za određenu veličinu  $x$

$$(\dot{M}_0)_x = (\dot{M}_1)_x + (\dot{M}_2)_x$$

**Masa svih čvrstih čestica veličine  $x$  u dotoku i u jedinici vremena (protok)**

**Ukoliko ne postoji usporedni proces promjene veličine čestica (proces okrupnjavanja, usitnjavanja)**



Uzevši u obzir da se pripadajuća raspodjela veličina čestica (RVČ) u pojedinim procesnim strujama iskazuje udjelom (masenim, volumnim, brojčanim) čestica određene veličine  $x$  u promatranom kolektivu odnosno da je  $dQ_r(x)$  udio čestica  $u$  promatranom veličinskom razredu (intervalu) slijedi:

$$\dot{M}_0 \frac{dQ_3(x)^{(0)}}{dx} = \dot{M}_1 \frac{dQ_3(x)^{(1)}}{dx} + \dot{M}_2 \frac{dQ_3(x)^{(2)}}{dx}$$

**Masa čestica veličine  $x$  u dotoku  $i$  u jedinici vremena (protok)**

**UKUPNA DJELOTVORNOST SEPARATORA**

Omjer mase separiranih čvrstih čestica u odtoku i mase čestica u dotoku (ulaznoj struji materijala)

$$E_T = \frac{\dot{M}_2}{\dot{M}_0}$$

Ili primjenom osnovne bilančne jednačbe (bilance tvari za separator):

$$E_T = 1 - \frac{\dot{M}_1}{\dot{M}_0}$$

Za pojedini grubodisperzni sustav

Vrijednost ukupne djelotvornosti separatora svojstvena je pojedinom grubodisperznom sustavu budući znatno ovisi o veličini prisutnih čestica odnosno RVČa u ulaznoj struji materijala (dotočnoj suspenziji). Čestice različitih veličina bit će separirane različitom učinkovitošću odvajanja.

Stoga, ovako definirana ukupna djelotvornost istinu je nepogodna za generalnu ocjenu djelotvornosti separacijske jedinice.

Valja uzeti u obzir koncept frakcijske djelotvornosti.

U dotočnoj procesnoj struji nije prisutna samo jedna veličina već egzistira određena RVČa. Neke jedinice bit će separirane i završit će u odtoku (veće), a one manje neće te završavaju u pretoku.

Posljedično, u izlaznim procesnim strujama egzistira bitno drugačija RVČa od one prisutne u dotoku.

Jedinice istih veličina  $x$  završavaju u različitim izlaznim strujama!!!

Kako je moguće da jedna jedinica veličine  $x$  završi u odtoku, a druga iste te veličine  $x$  završi u pretoku (odnosno ne bude separirana)???

Frakcijska djelotvornost,  $\mathcal{T}(x)$  jest djelotvornost odvajanja pojedine veličine  $x$  odnosno to je vjerojatnost kojom će čestica točno određene veličine  $x$  u ulaznoj struji materijala biti separirana (završiti u odtoku).

Za slučaj dovoljno velikog broja jedinki jednake veličine  $x$  u ulaznoj struji materijala,  $\mathcal{T}(x)$  odgovara vjerojatnoj vrijednosti brojčanog udjela separiranih jedinki (onih u odtoku).

Frakcijska djelotvornost,  $T(x)$  izračunava se iz ukupne djelotvornosti separatora i raspodjela veličina čestica sadržanih u pojedinim strujama materijala (dotoku, pretoku, odtoku).

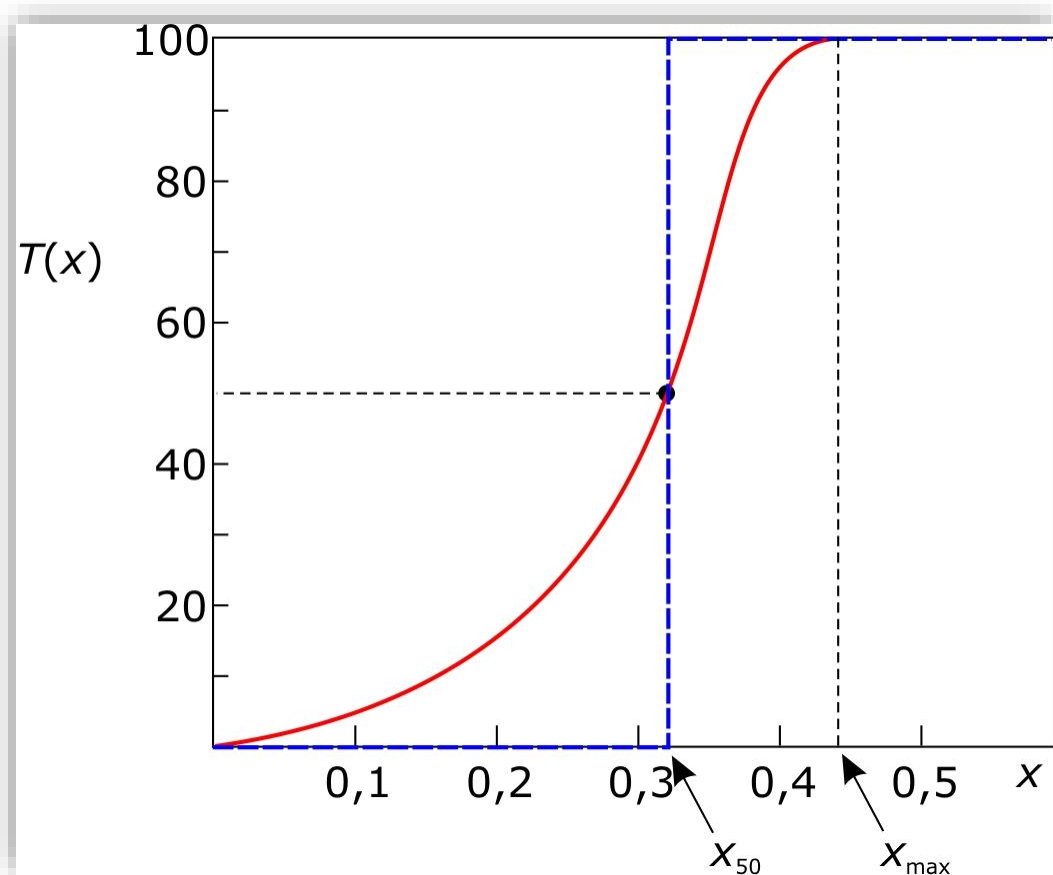
$$T(x) = \frac{(\dot{M}_2)_x}{(\dot{M}_0)_x}$$

$$T(x) = \frac{\dot{M}_2}{\dot{M}_0} \frac{\frac{dQ_3(x)^{(2)}}{dx}}{\frac{dQ_3(x)^{(0)}}{dx}}$$

$$T(x) = E_T \frac{dQ_3(x)^{(2)}}{dQ_3(x)^{(0)}}$$

$$T(x) = 1 - (1 - E_T) \frac{dQ_3(x)^{(1)}}{dQ_3(x)^{(0)}}$$

Krivulja frakcijske djelotvornosti jest funkcija vjerojatnosti (probability function) odvajanja pojedine veličine  $x$  iz ulazne struje materijala (suspenzije). Tipična krivulja je  $S$  oblika.

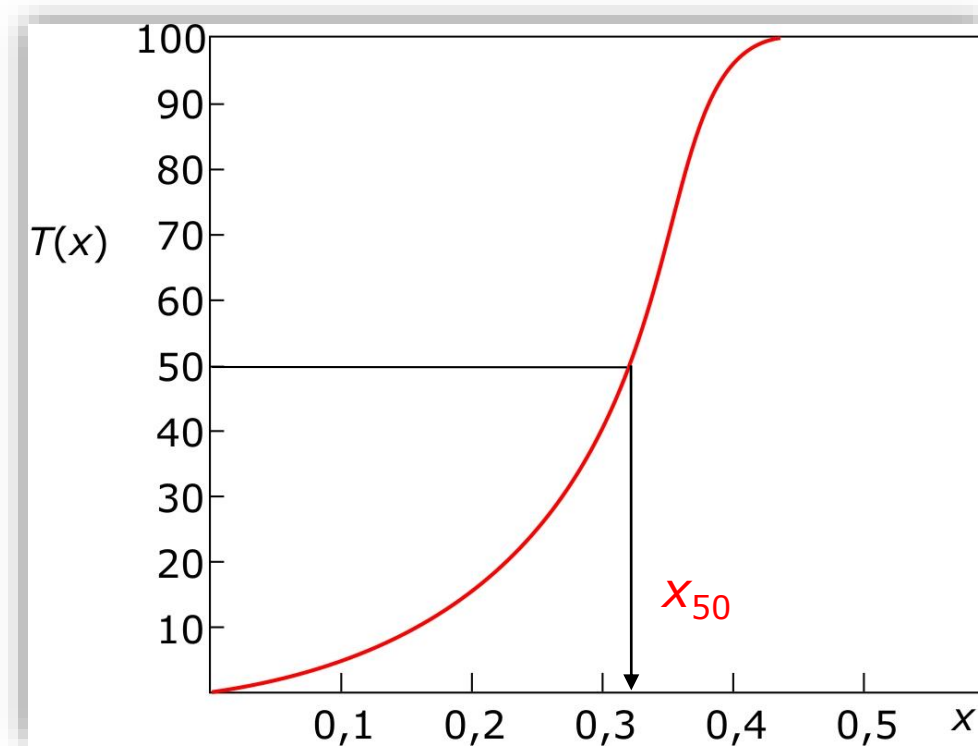




- i. Značajka razdvajanja,  $x_{50}$  (*Cut size*),
- ii. Granica razdvajanja,  $x_{gr.}$  (*Limit of separation*),
- iii. Oštrina razdvajanja,  $\kappa_{25/75}$ ,  $\kappa_{10/90}$  (*Sharpness of cut*).

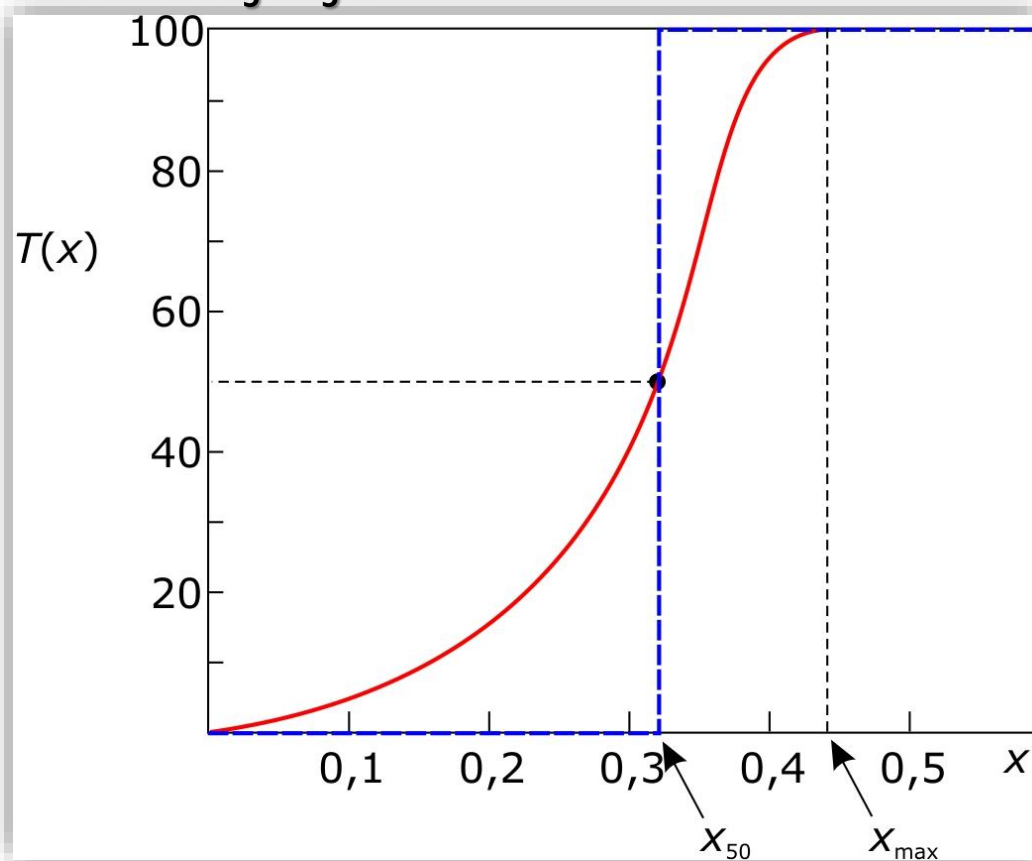
## Značajka razdvajanja (*Cut size*)

- veličina koja odgovara 50%-tnoj vjerojatnosti odnosno vrijednosti frakcijske djelotvornosti 50% – jednakovjerojatna veličina (*equiprobable size*),  $x_{50}$
- koristi se kao značajka razdvajanja određene separacijske jedinice



## Granica razdvajanja (*Limit of separation*)

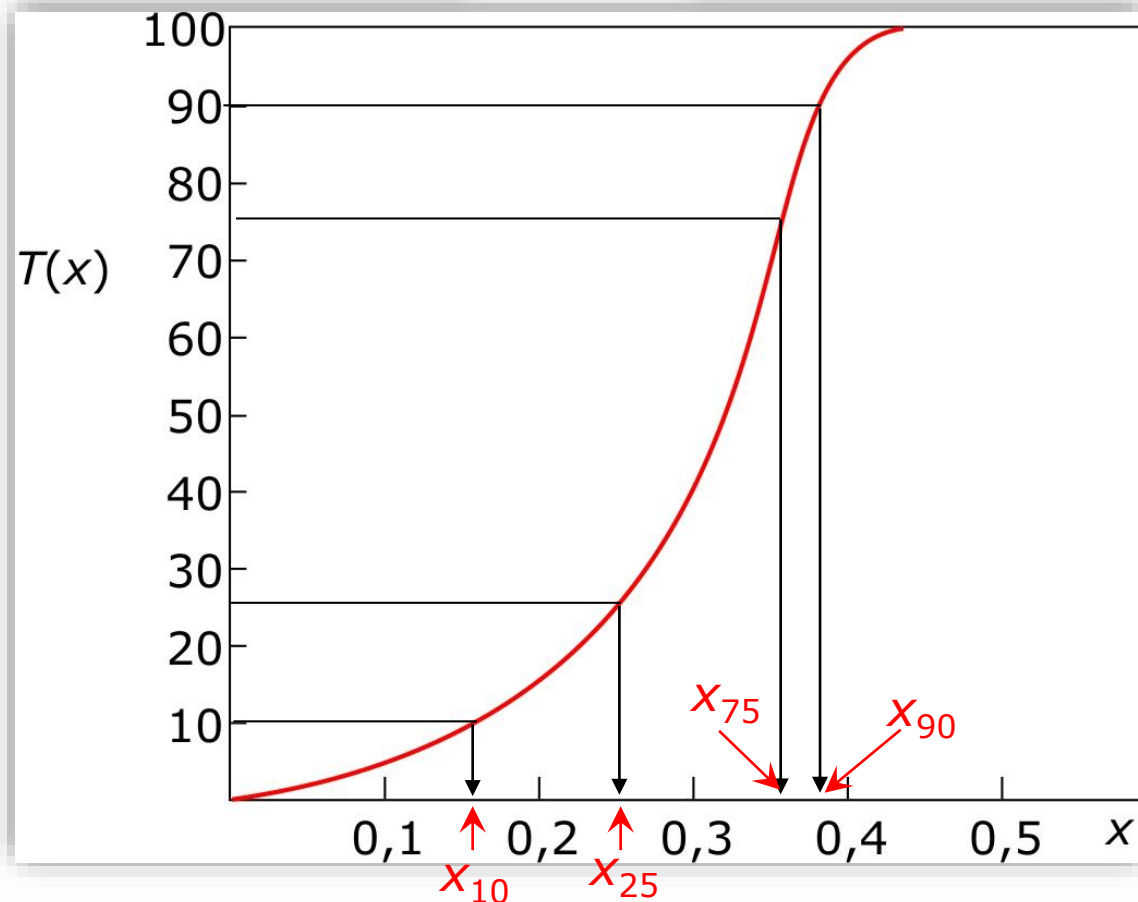
- veličina iznad koje je frakcijska djelotvornost 100% za sve preostale veličine,  $x_{gr.}$  odnosno  $x_{max}$
- u praksi uzima se veličina koja odgovara 98%-tnoj djelotvornosti – približna granica razdvajanja



Oštrina razdvajanja (*Sharpness of cut*)

$$\mathcal{K}_{25/75} = \frac{x_{25}}{x_{75}}$$

$$\mathcal{K}_{10/90} = \frac{x_{10}}{x_{90}}$$

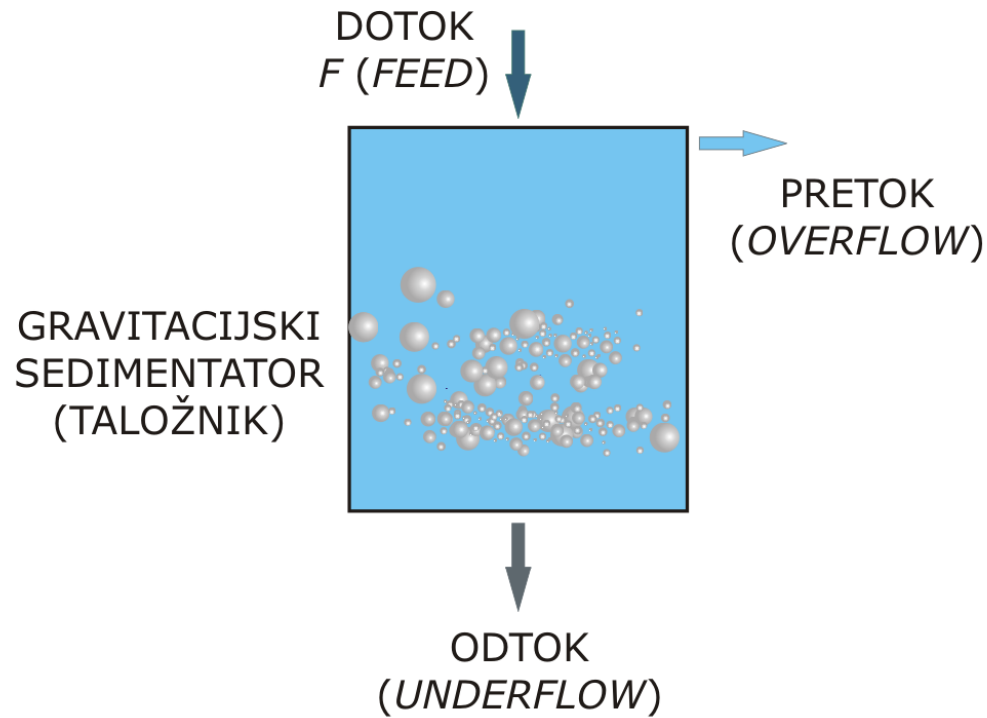


Sedimentacija jest proces odvajanja čvrste i kapljevite faze na osnovu sadržane razlike u gustoćama pojedinih faza. Stoga, i razliku u gustoći čvrste i kapljevite faze nazivamo pokretačkom silom procesa sedimentacije. Ovisno o tome koje polje sile se primjenjuje u ostvarivanju ovakve pokretačke sile razlikujemo *gravitacijsku sedimentaciju (taloženje)* & *centrifugalnu sedimentaciju*.

Karakteristika svake sedimentacije jest da je kapljevina ograničena, a čvrste jedinice slobodne u kretanju.

Gravitacijskom sedimentacijom (taloženjem) se čvrsta faza odvaja od kapljevite poradi djelovanja polja sila teže (pokretačka sila jest gravitacija) s ciljem da se osigura visoki efekt zgušnjavanja u odtoku (ugušćivanje) i visoki stupanj izbistrenja u pretoku (bistrenje).

Shodno tome, odgovarajuće procesne jedinice (*šaržne* ili *kontinuirane*) nazivaju se gravitacijskim sedimentatorima (taložnicima), te ugušćivaćima (dizajnirani u svrhu dobivanja mulja – taloga) & bisticima (posebno dizajnirani za dobivanje pretoka sa što manjim udjelom čvrstog).





## GRAVITACIJSKI SEDIMENTATORI (TALOŽNICI)



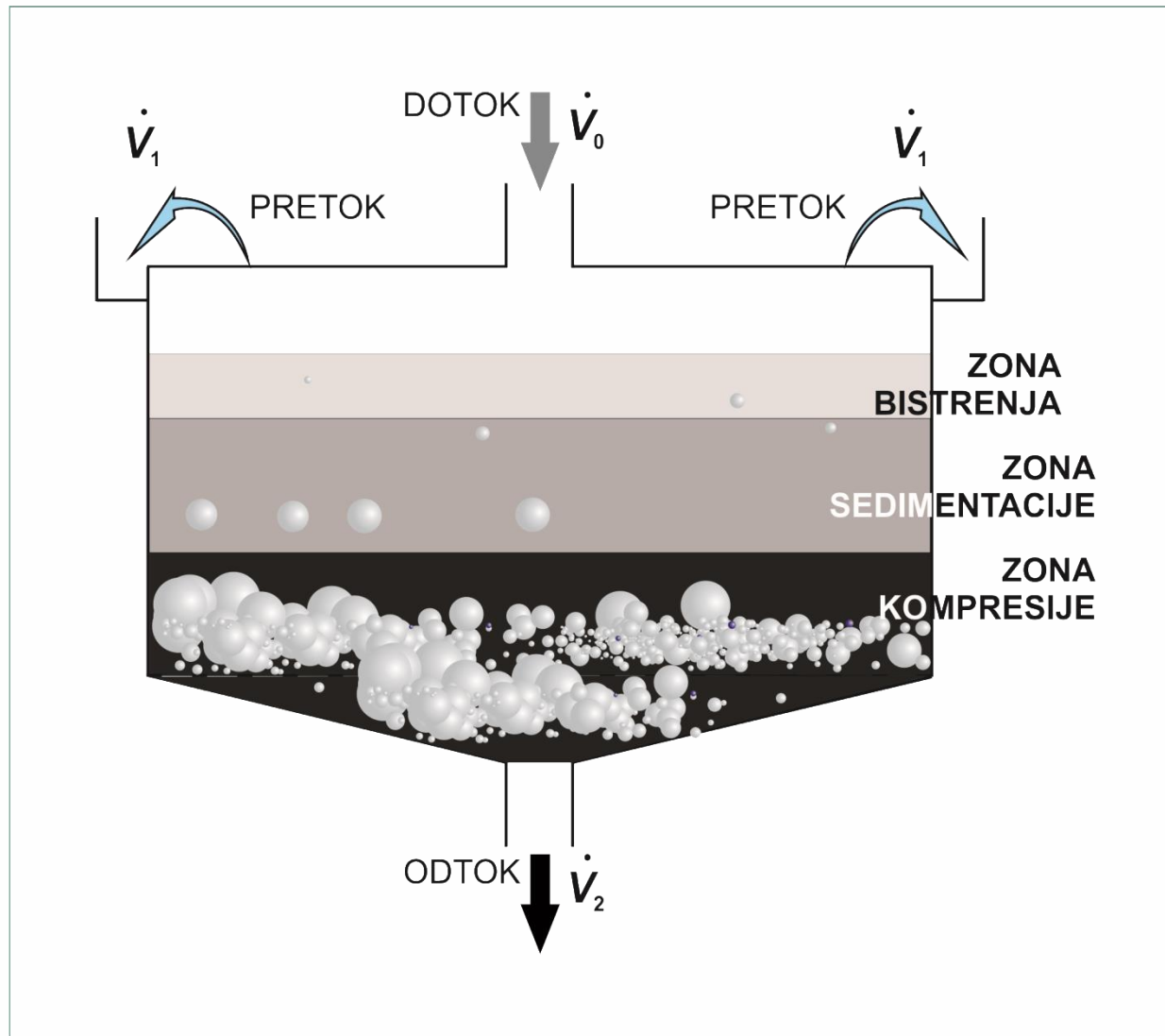


## GRAVITACIJSKI SEDIMENTATORI (TALOŽNICI)

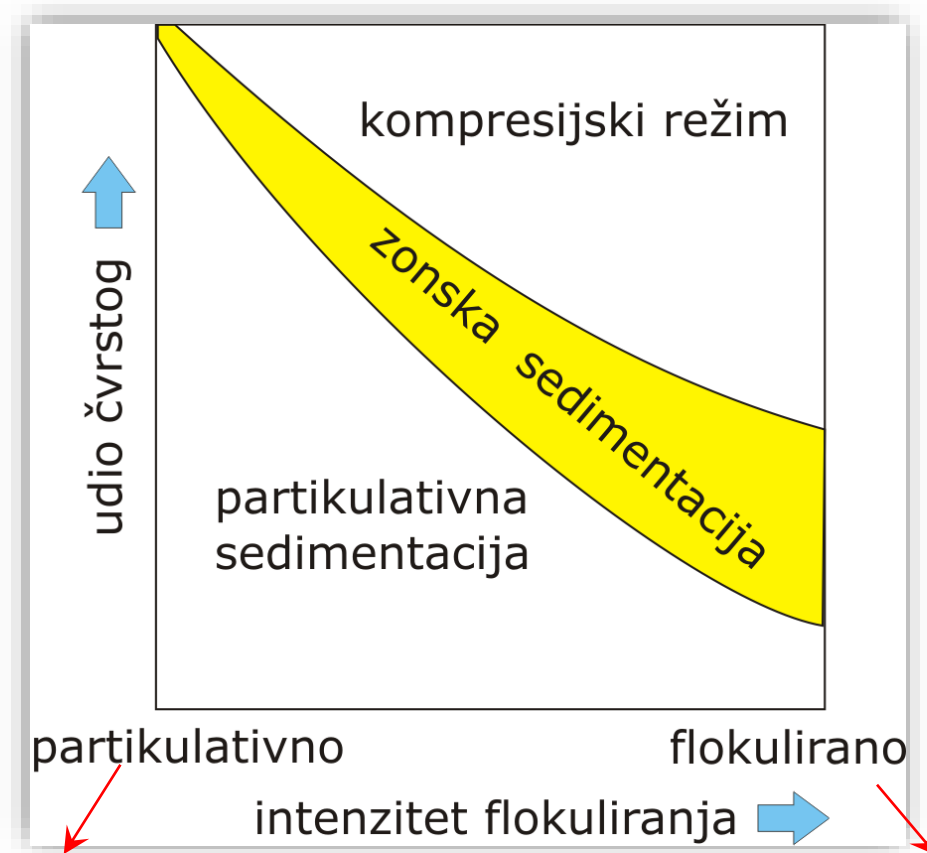








U gravitacijskom sedimentatoru (taložniku) formiraju se tri karakteristične zone: bistra, sedimentacijska te kompresijska zona. U svakoj od njih prevladava određeni režim sedimentiranja.



**Individualne jedinke**

**Klasteri manjih jedinki**

**(diskretne sastavnice materijala)**

**(aglomerati)**

Partikulativna sedimentacija je karakteristika suspenzija kod kojih nema granične plohe između bistrice i sedimentacijske zone.

Brzina takve sedimentacije određena je primarnim svojstvima grubodisperznog sustava: veličinom, gustoćama faza te oblikom čvrstih čestica (sferične jedinice daleko brže talože).

Matematički opis fenomena počiva na zakonitosti optjecanja u laminarnom hidrodinamičkom režimu – Stokesova zakonitost:

$$v_s = \frac{g(\rho_{\check{c}} - \rho)x_{St}^2}{18\mu}$$

**Brzina nesmetanog taloženja sferičnih jedinica u laminarnim hidrodinamičkim uvjetima pod djelovanjem sile teže**

$$v_{SS} = \frac{x_{gr.}^2 (\rho_d - \rho) g}{18\eta} K_\psi K_\phi$$

Brzina *smetanog taloženja* čestica nepravilnog oblika

Dinamički faktor oblika

$$K_\psi = \left( \frac{x_V}{x_{St}} \right)^2$$

Faktor smetanog sedimentiranja

$$K_\phi = \varepsilon^2 f(\varepsilon)$$

$$f(\varepsilon) = \varepsilon^{2,65}$$

*Richardson i Zaki*

**Potrebna površina sedimentatora**

$$A_s = \frac{\dot{V}_1}{v_{SS}}$$

No, realni uvjeti u sedimentatoru razlikuju se od idealnih pa je tako dobivenu površinu potrebno uvećati za 50 %.

Sedimentacija u zoni je karakteristika suspenzija kod kojih postoji izrazita granična ploha između gornje bistre i donje sedimentacijske zone.

Brzina takve sedimentacije određena je lokalnom koncentracijom suspenzije.

Matematički opis fenomena počiva na zakonitosti strujanja kroz poroznu strukturu – Carman–Kozenyjeva zakonitost:

$$v_A = \frac{1}{150} \cdot \frac{x_{3,2}^2 \cdot \varepsilon_{sl.}^3}{\eta (1 - \varepsilon_{sl.})^2} \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

Površinska brzina kapljevine

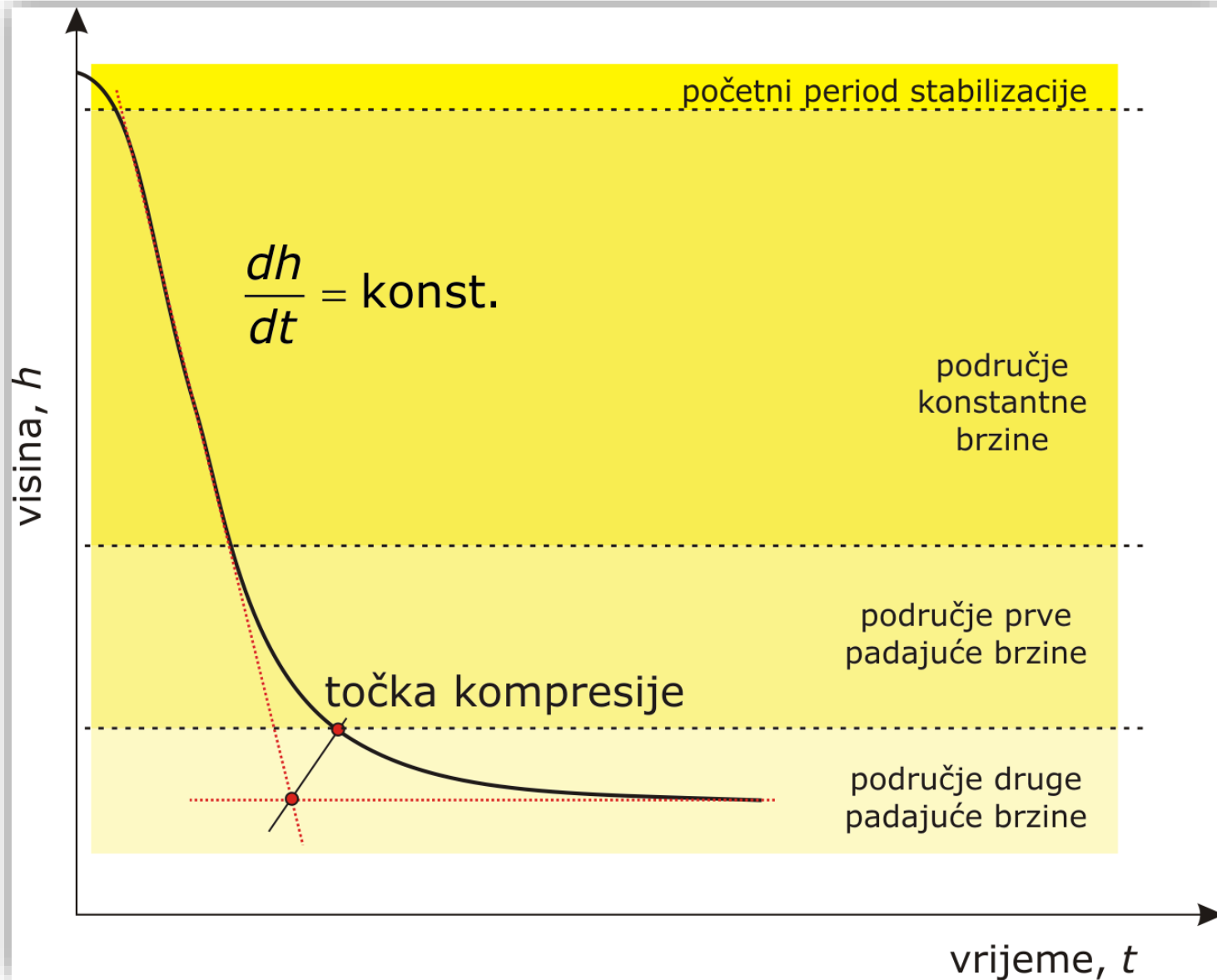
$$v_{SS} = -v_A$$

Brzina smetanog sedimentiranja (taloženja)

Budući se radi o sustavima izrazito kompleksne unutrašnje geometrije, brzina sedimentiranja za ovakve S/L partikulske sustave određuje se eksperimentom, odnosno provedbom sedimentacijskog testa.

Temeljem zavisnosti  $v_s = f(c_s)$  provodi se *dimenzioniranje procesne jedinice* za provedbu gravitacijske sedimentacije (određuje se *potrebna površina sedimentatora*).





Procesi separacije u sustavima čvrsto-kapljevito  
(S/L partikulskim sustavima)





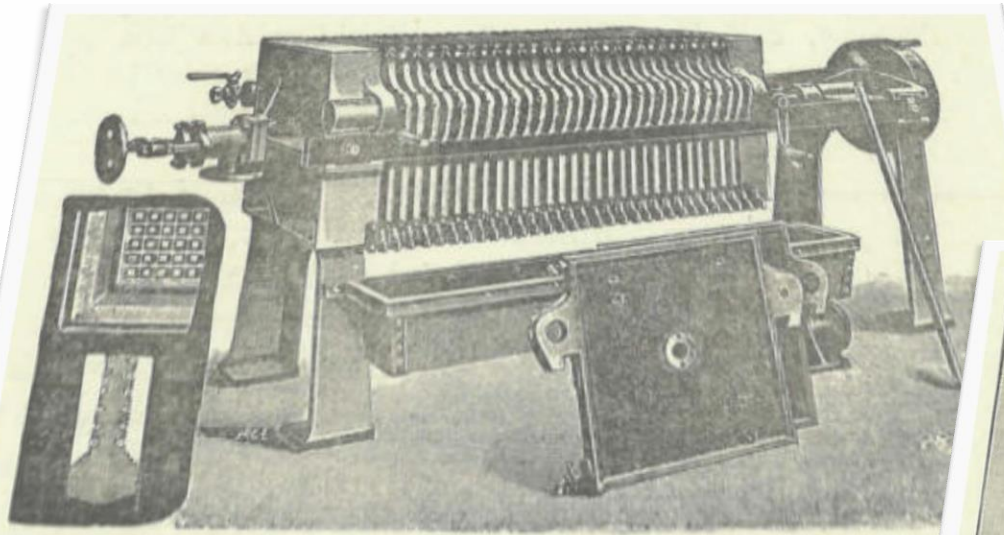


FIG. 8.

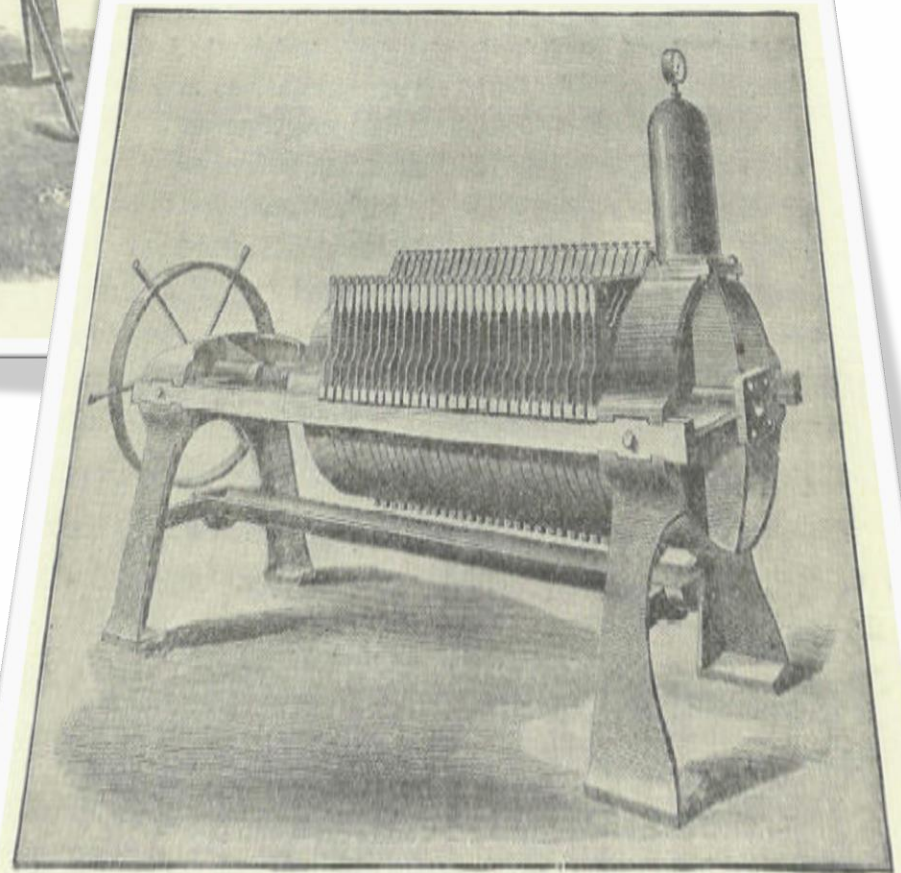


FIG. 8a.

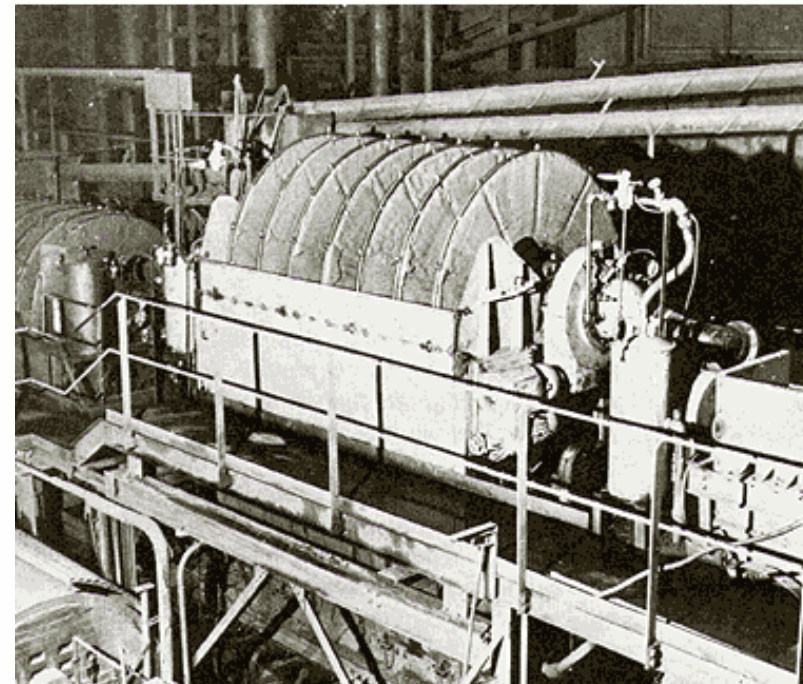


**Rotary Drum Vacuum Filter**

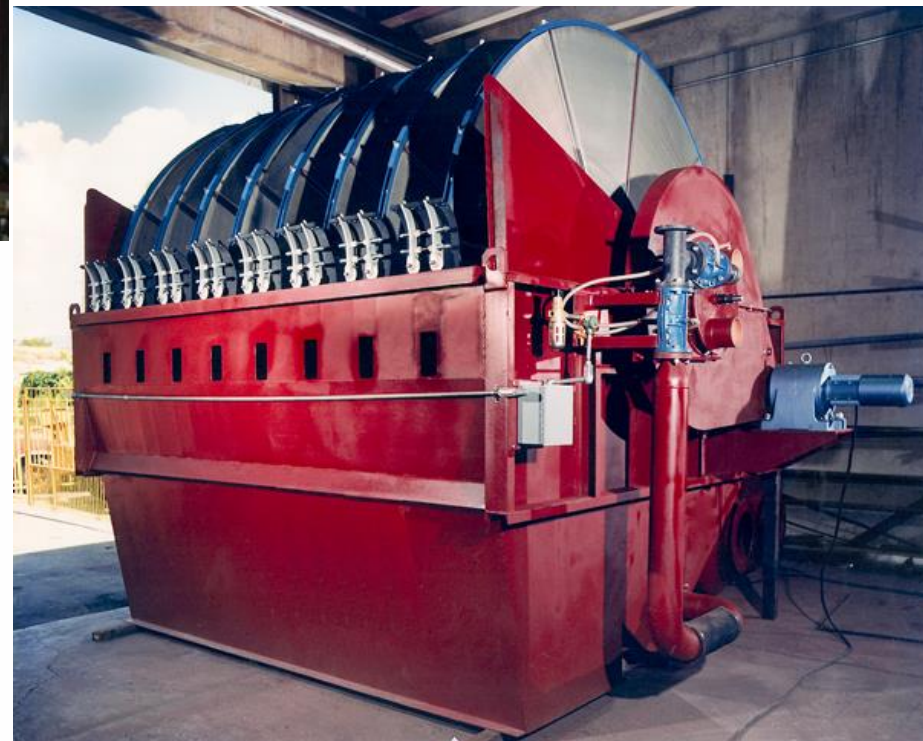


*Click the Back button to return*

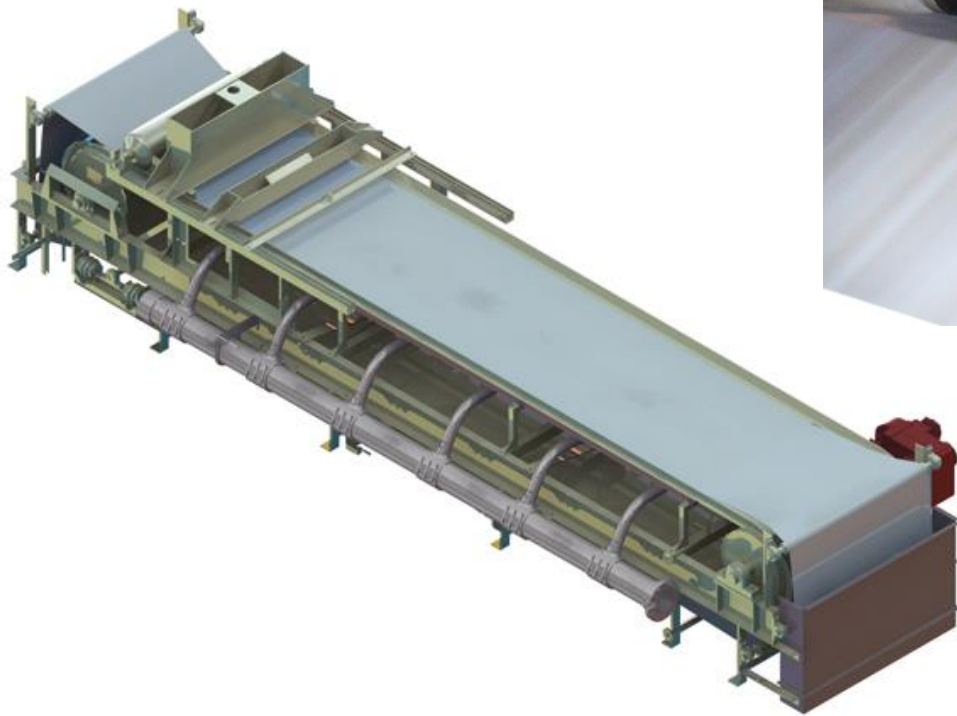
**Rotary Disc Vacuum Filter**

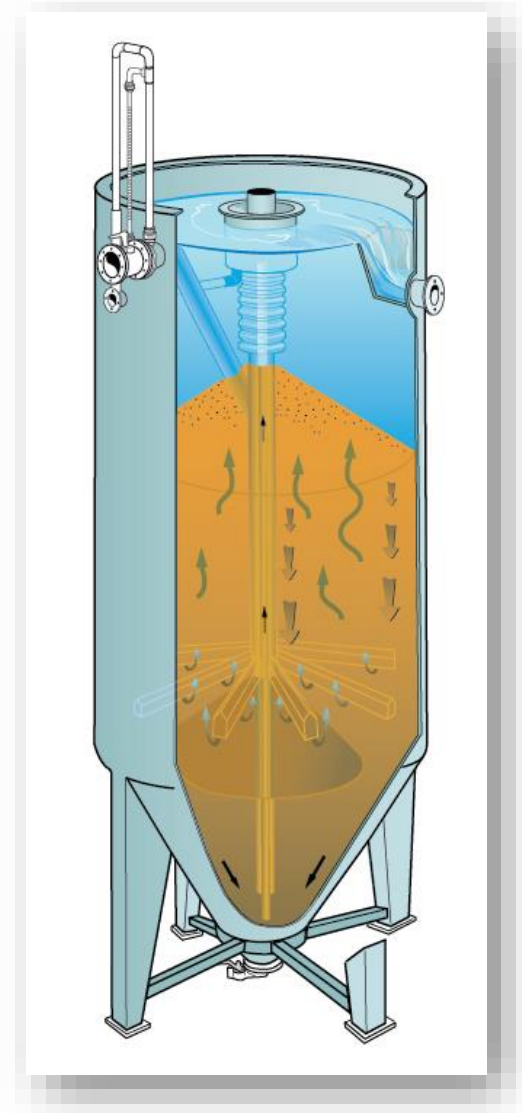


*Click the Back button to return*

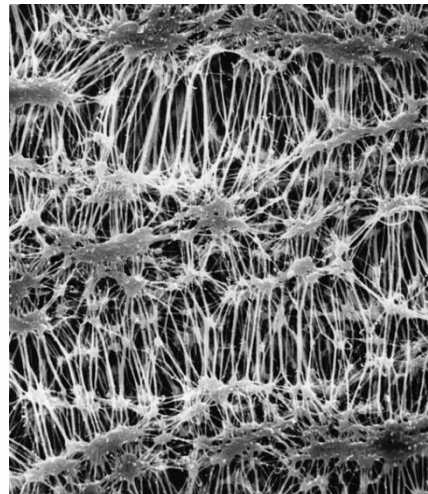
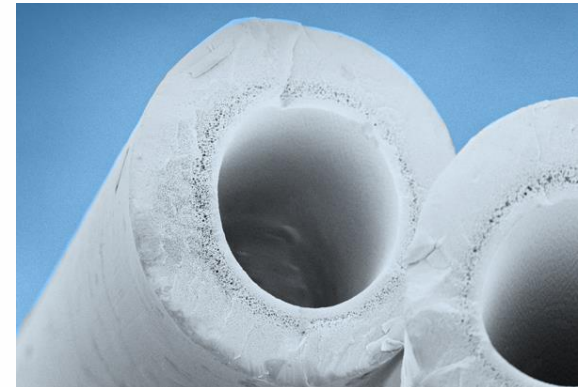
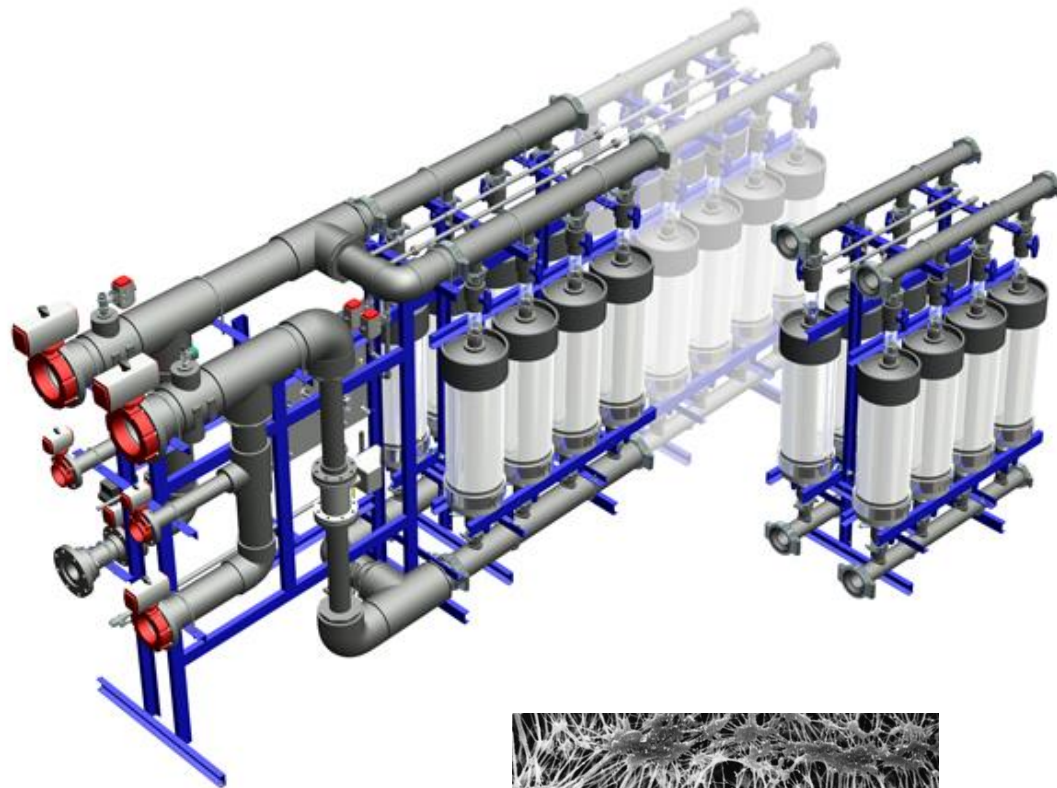


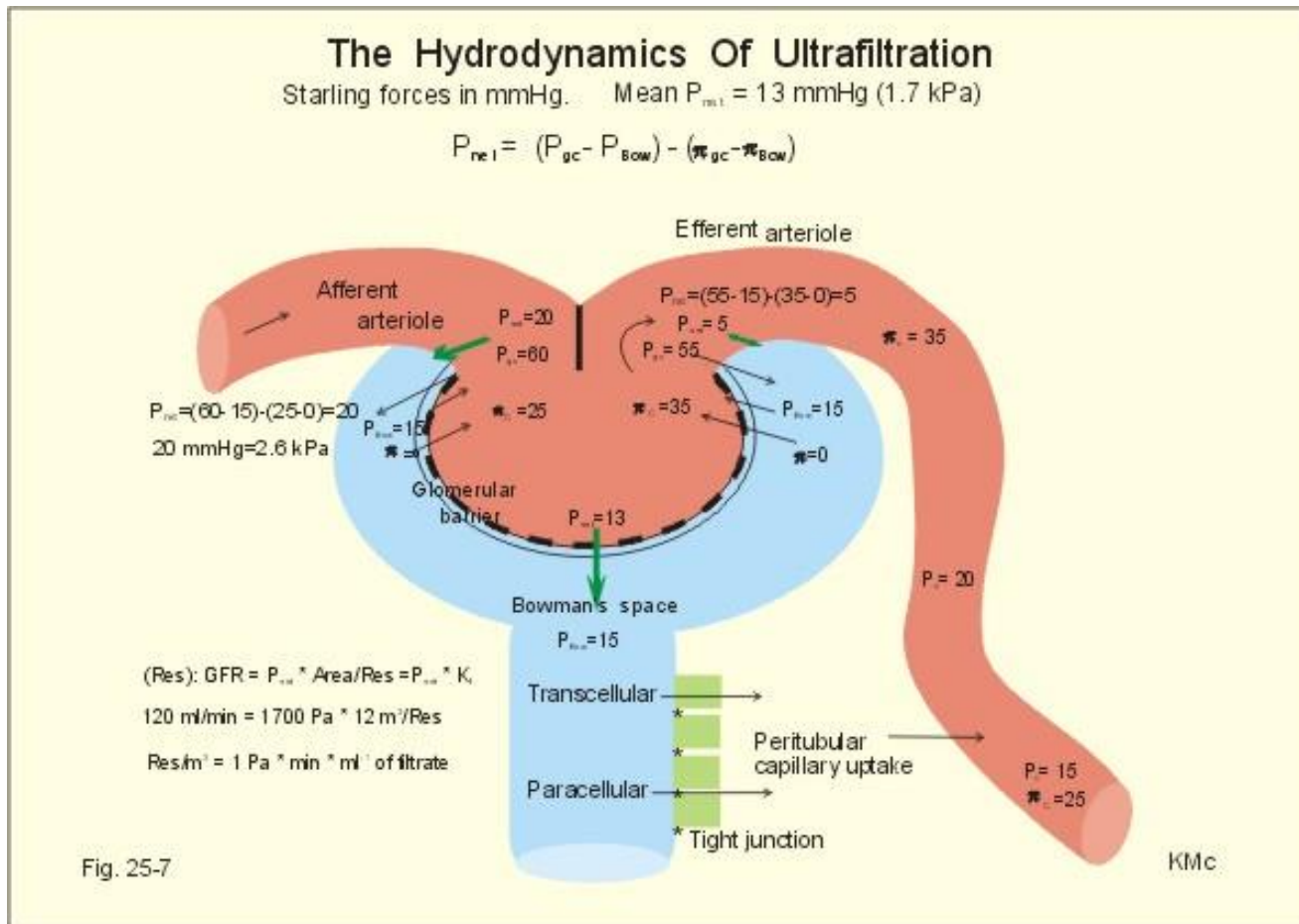












# *Filtracija*

*Proces odvajanja (separacije) disperzne faze od disperznog sredstva primjenom poroznog medija (filtarsko sredstvo, membrane).*

Tablica 1. Razine procesa filtracije.

RAZINA FILTRACIJE	DISPERZNA FAZA ZADRŽANA PRIMJENOM POROZNOG SREDSTVA	POKRETAČKA SILA	PRINCIP SEPARACIJE/ INTRINZIČKO SVOJSTVO	POROZNO SREDSTVO
<b>MAKRO-</b>	<i>Suspendirane čestice</i>	<i>Razlika tlaka ("pressure driven")</i>	<i>Veličina disperzne faze (mehanizam "size exclusion")</i>	<i>Filtarsko sredstvo, filtarski kolač</i>
<b>MIKRO-</b>	Izrazito sitne suspendirane čestice, kapljice, bakterije, makromolekule	Razlika tlaka	Veličina disperzne faze	MF membrane (veličina pora: 0,1-10 $\mu\text{m}$ )
<b>ULTRA-</b>	+ virusi	Razlika tlaka	Veličina disperzne faze (dominirajući mehanizam)	UF membrane (MWCO = $10^3$ - $10^6$ Da)
<b>NANO- te REVERZNA OSMOZA</b>	+ viševalentni ioni te za RO + monovalentni ioni	Razlika tlaka te za RO eksterni tlak za reverzibilnost prirodnog toka (osmoze)	Sprega: i. Veličina disp. faze, ii. Naboj disp. faze, iii. Različitosti u fiz.-kem. karakteristikama pojedinih faza te membrane.	NF/RO membrane (veličina pora: 1 nm i manje odnosno iskazano MWCO < $10^3$ Da)

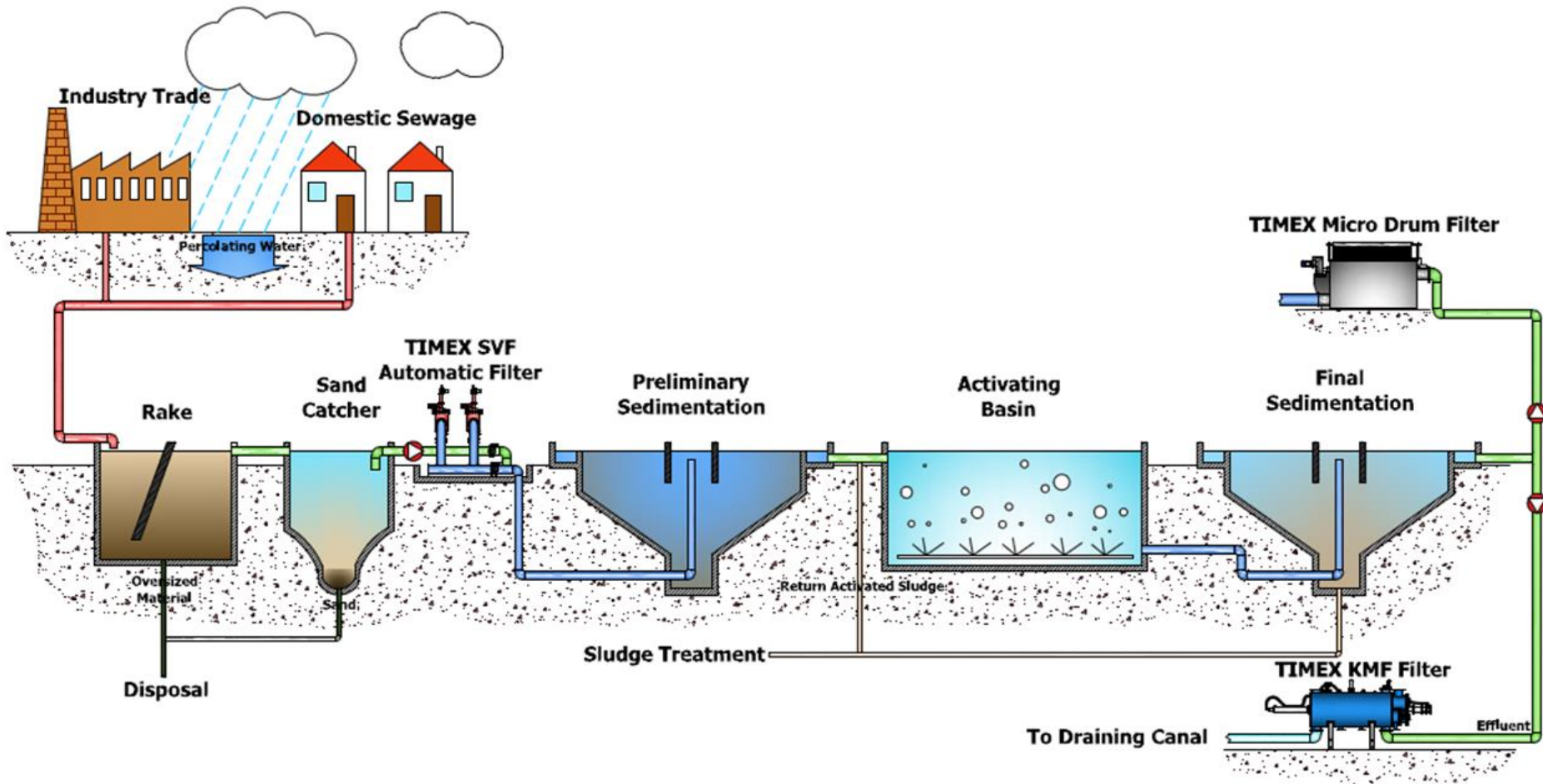
## *Filtracija*

*Mehanička operacija razdvajanja mješavina kapljeviti i čvrstih tvari (suspenzija) pomoću šupljikave pregrade (filtarskog sredstva) koja propušta samo kapljevину (filtrat).*

*Neizostavna je jedinična operacija kemijskog inženjerstva.*



*Nerijetko se kombinira s drugim jediničnim operacijama u procesuiranju (ukupnoj separaciji) ulazne struje materijala.*



## ***Zabluda!!!***

*Nerijetko, mnogi poistovjećuju  
odvajanje sitom i filtraciju.*

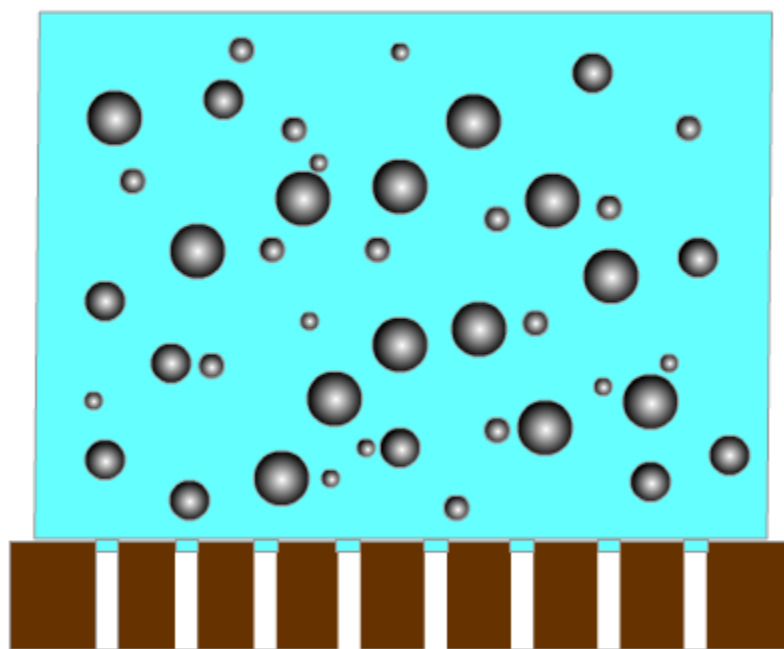
*Za provedbu procesa filtracije nužna primjena  
višeslojnog poroznog medija ("multilayer lattice").*

*Postoje dva osnovna tipa makrofiltracije:*

- i. Filtracija kroz kolač ("cake filtration")  
– odvija se u površinskim filtrima ("surface filters"),*
  
- ii. Dubinska filtracija ("deep-bed filtration")  
– odvija se u dubinskim filtrima ("deep-bed filters").*

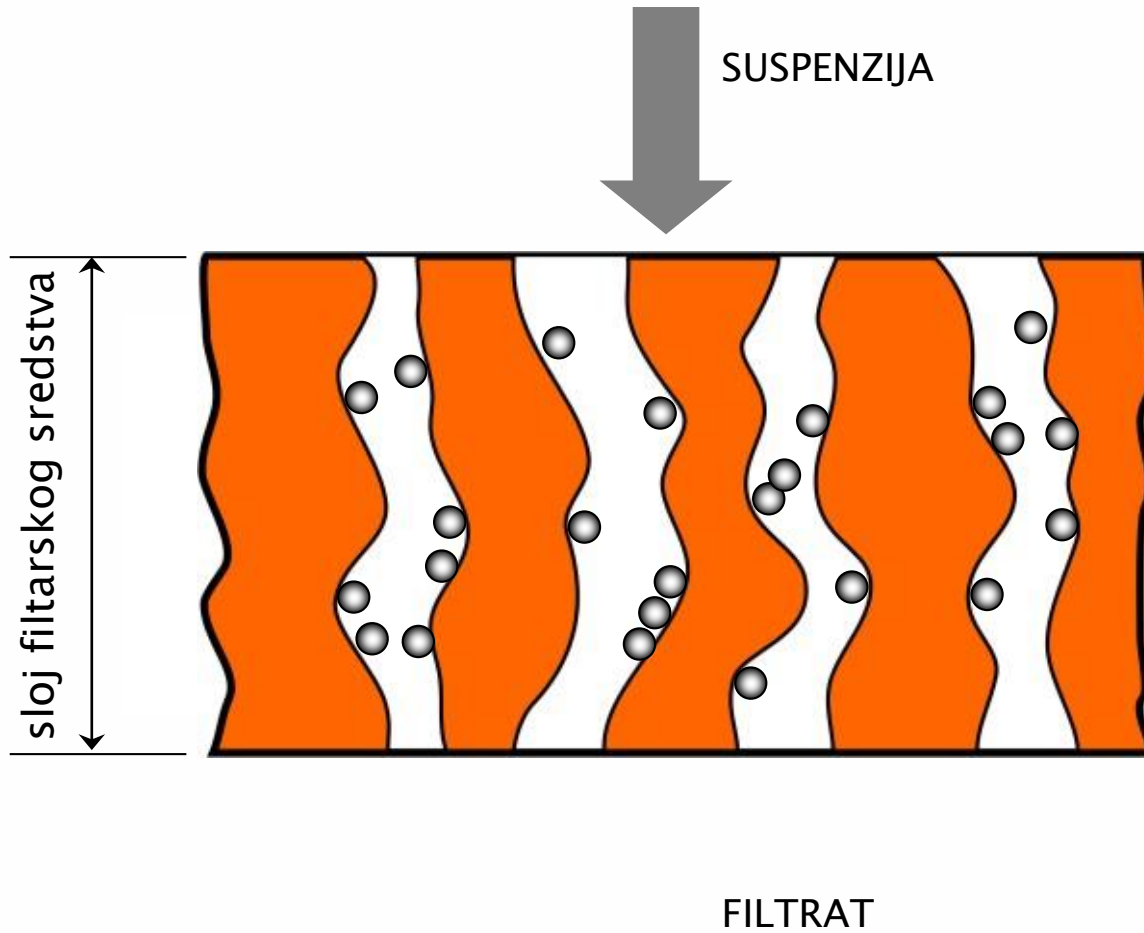


# FILTRACIJA KROZ KOLAČ

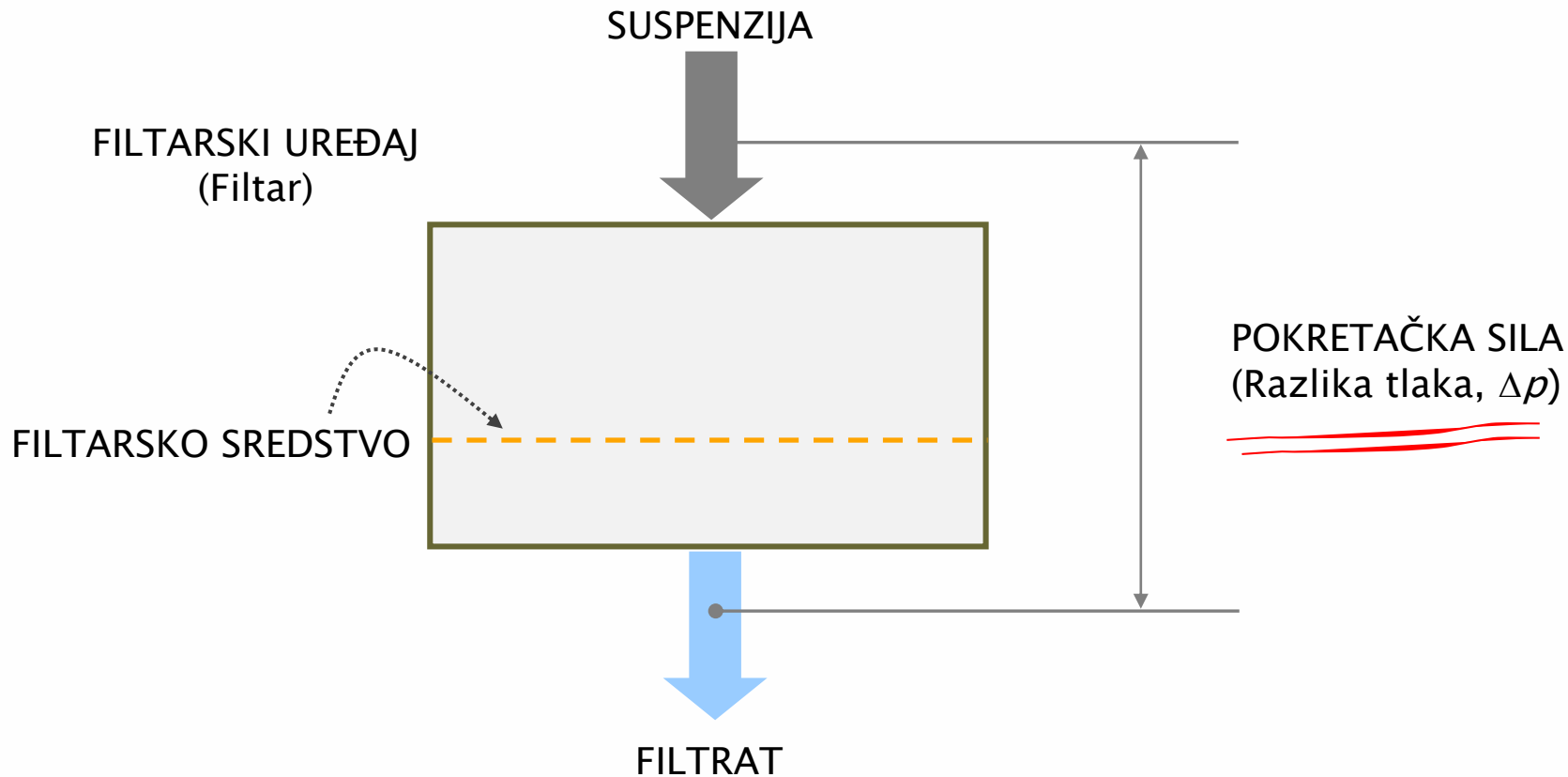


← FILTARSKI KOLAČ

← FILTRAT



# Shematski prikaz makrofiltracije



# Filtracija kroz kolač zastupljena u sljedećim oblicima:

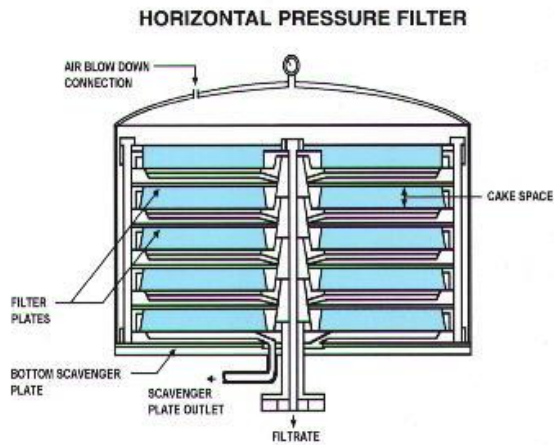
## Filtracija kroz kolač

### Gravitacijska filtracija

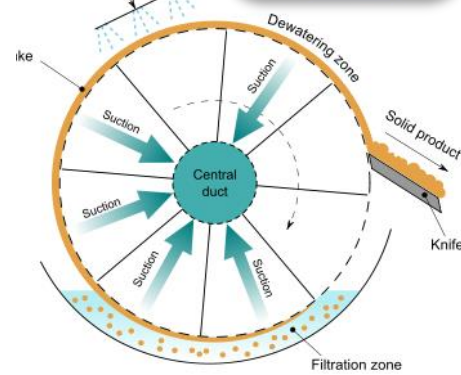
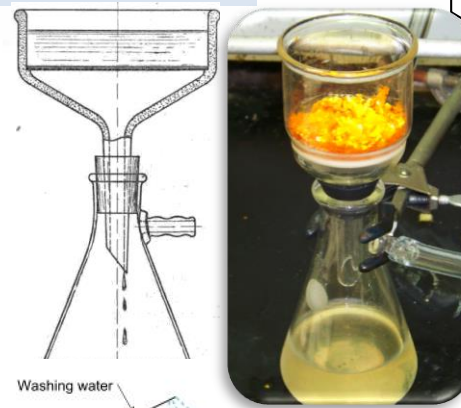


Gravitacijski filter

### Tlačna/Vakuumska filtracija

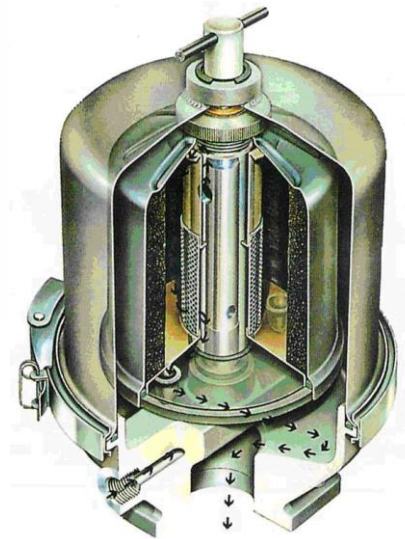


Tlačni filter



Vakuumski filtri

### Centrifugalna filtracija



Filtracijska centrifuga

*Dva parametra koji ukazuju na uspješnost filtracije kroz kolač:*

*i. Učin filtra*

*– količina filtrata iskazana volumenom koja se u jedinici vremena može razdvojiti po jedinici filtarske površine*

*– ovisi o karakteristikama suspenzije i filtarskog sredstva,*

$$\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

*ii. Stupanj potpunosti razdvajanja faza*

*– udjel zaostale kapljevine u masi mokrog kolača.*

# *Matematički opis fenomena*

*Darcyjev zakon – strujanje kroz porozni sloj*



*Henry P.G. Darcy  
(1803.–1858.)*

*"The man who saved Dijon."*

$$\frac{dp_L}{dl} = \frac{\eta}{K} v_A$$

dobiven eksperimentalnim razmatranjima fenomena

Darcy (1856)<sup>1</sup>

1 darcy

$$1 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ D} \cdot (1 \text{ cm}^2 \cdot 1 \text{ atm/cm}) / 1 \text{ cP}$$

$$\dot{V} = K \cdot \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot L}$$

volumni protok  
kapljevine (filtrata) ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot R_M} \rightarrow L/K$$

*U slučaju prisutnosti  
samo filtarskog sredstva!!!*

- $\rho_L$  – hidrodinamički tlak kapljevine (Pa)
- $L$  – debljina porozne strukture/poroznog medija (sloja) (m)
- $\eta$  – dinamička viskoznost kapljevine (Pa s)
- $K$  – permeabilnost (propusnost) porozne strukture ( $\text{m}^2$ )
- $v_A$  – brzina protjecanja kapljevine ( $\text{m s}^{-1}$ )
- $A$  – površina filtracije ( $\text{m}^2$ )
- $\Delta p$  – pokretačka sila procesa, pad tlaka, filtracijski tlak (Pa)
- $R_M$  – otpor filtarskog sredstva ( $\text{m}^{-1}$ )



*Pri formiranju filtarskog kolača kapljevina nailazi na dodatni otpor, otpor filtarskog kolača ( $R_C$ ):*

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot (R_M + R_C)}$$

*Otpor kolača direktno je proporcionalan količini stvorenog kolača (kod nestlačivih kolača)*

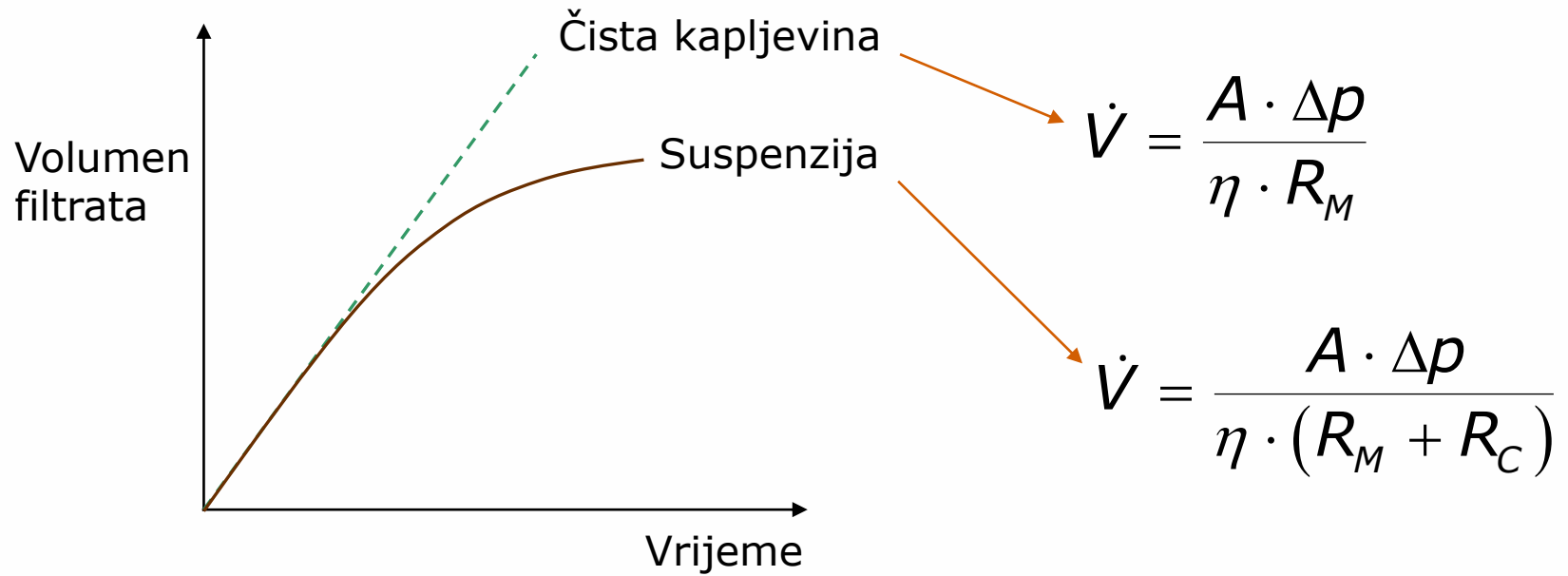
$R_C$  – otpor filtarskog kolača ( $m^{-1}$ )

$\alpha$  – specifični otpor filtarskog kolača ( $m \text{ kg}^{-1}$ )

$w$  – masa kolača po jediničnoj površini ( $\text{kg m}^{-2}$ )

$$R_C = \alpha \cdot w$$

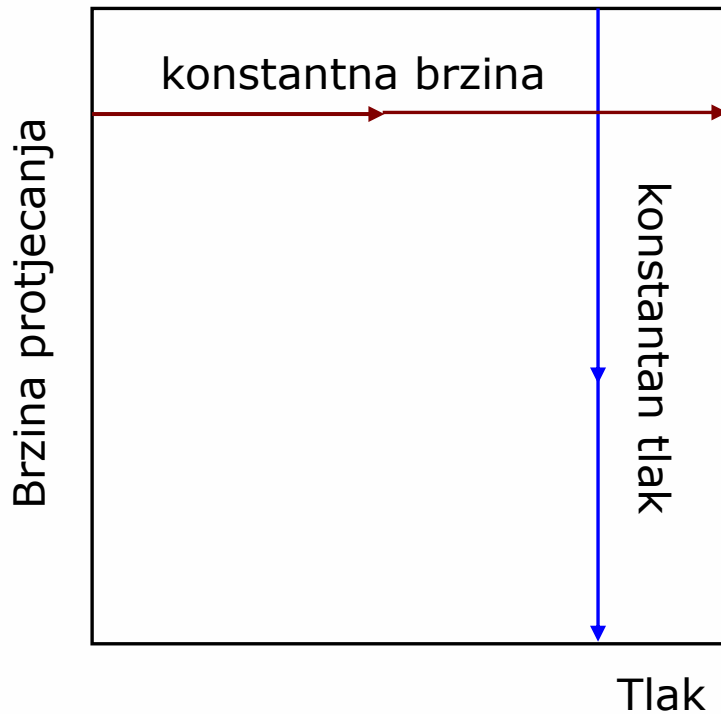
$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot (\alpha \cdot w + R_M)}$$



*pri  $\Delta p = const.$*

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot (\alpha \cdot w + R_M)}$$

$$v_A = \frac{\Delta p}{\eta \cdot (\alpha \cdot w + R_M)}$$



- i. Filtracija uz konstantni tlak,*
- ii. Filtracija uz konstantnu brzinu filtracije,*
- iii. Filtracija uz promjenjivi tlak i brzinu filtracije.*

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot (\alpha \cdot w + R_M)}$$

*Masa kolača po jediničnoj površini, w*

*Bilanca čvrste tvari u kolaču:*

$$l \cdot A \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_d = G \cdot (V + \varepsilon \cdot l \cdot A)$$

*udio zaostale  
kapljevine  
u kolaču  
(zanemaruje se)*

- $\varepsilon$  – poroznost sloja
- $\rho_d$  – gustoća disperzne faze (kg m<sup>-3</sup>)
- $G$  – masa čvrste tvari po jediničnom volumenu filtrata (kg m<sup>-3</sup>)
- $V$  – volumen filtrata (m<sup>3</sup>)

$$w = \frac{G \cdot V}{A}$$

## PROTOK KAPLJEVINE

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot (\alpha \cdot w + R_M)}$$

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot \left( \frac{\alpha \cdot G \cdot V}{A} + R_M \right)}$$

## BRZINA PROTJECANJA KAPLJEVINE

$$v_A = \frac{\Delta p}{\eta \cdot (\alpha \cdot w + R_M)}$$

$$v_A = \frac{\Delta p}{\eta \cdot \left( \frac{\alpha \cdot G \cdot V}{A} + R_M \right)}$$

*Vrijedi za najjednostavniji model nestlačivog filtarskog kolača.  
Idealizirani slučaj!!!*

## Carman–Kozenyjeva jednadžba

Osnova: teorija prijenosa količine gibanja/strujanje fluida kroz poroznu sredinu

$$\frac{\Delta p}{l} = 180 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta v_A}{x^2}$$

$\varepsilon$  – poroznost sloja

$x$  – veličina čestica (iskazana promjerom) koje čine porozni sloj (m)

Predložena: Kozeny (1927)<sup>2</sup>

Modificirana: Carman (1937)<sup>3</sup>, (1956)<sup>4</sup>

2. J. Kozeny, Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden, Sitzungsber Akad. Wiss., Wien, **136(2a)** (1927) 271–306.
3. P.C. Carman, Fluid flow through granular beds, Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, **15** (1937) 150–166.
4. P.C. Carman, Flow of gases through porous media, Butterworths, London (1956).

$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot \left( \frac{\alpha \cdot G \cdot V}{A} + R_M \right)}$$

### **OTPOR FILTARSKOG SREDSTVA**

*Otpor filtarskog sredstva obično je konstantan, ali se može mijenjati s vremenom kao posljedica ulaska čestica unutar pora filtarskog sredstva ili stlačivanja filtarskog sredstva uslijed povećanja tlaka.*



$$\dot{V} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot \left( \frac{\alpha \cdot G \cdot V}{A} + R_M \right)}$$

### *SPECIFIČNI OTPOR FILTARSKOG KOLAČA*

*Specifični otpor filtarskog kolača je gotovo uvijek konstantan kod nestlačivih kolača (idealizirani slučaj!!!), ali se može mijenjati s vremenom kao posljedica pregrupiranja čestica u kolaču, ili u slučaju promjenjive brzine filtracije.*

## ***Realnost!!!***

*Gotovo svi kolači su u manjoj ili većoj mjeri stlačivi.*

*Njihov specifični otpor nije konstantan, te se mijenja s prostornim koordinatama promatranog sustava čvrstog (kolača) kao posljedica postojanja profila pseudo tlaka kompresije po visini kolača.*

*Stoga, u matematički opis fenomena valja ugraditi srednji specifični otpor filtarskog kolača odnosno njegovu zavisnost o padu tlaka kroz kolač (razni filtracijski testovi).*

## *Carmanova jednađba*

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot \left( \frac{\alpha_{sr} \cdot G \cdot V}{A} + R_M \right)}$$

*S pomoću Carmanove jednađbe (prikladno modificirane) predviđa se tijekom filtracije u industrijskom mjerilu.*

$\alpha_{sr}$  – srednji specifični otpor  
filtarskog kolača ( $\text{m kg}^{-1}$ )  
 $t$  – vrijeme filtracije (s)

### *Filtracija uz konstantni tlak*

$$t = \frac{\eta \cdot \alpha_{\text{sr.}} \cdot G \cdot V^2}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta p} + \frac{\eta \cdot R_M \cdot V}{A \cdot \Delta p}$$

*vrijeme potrebno da se dobije određeni volumen filtrata*

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta \cdot \alpha_{\text{sr.}} \cdot G}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta p} \cdot V + \frac{\eta \cdot R_M}{A \cdot \Delta p}$$

*Eksperimentalno određivanje otpora filtarskog kolača i otpora filtarskog sredstva provedbom filtracijskog testa na laboratorijskim ili poluindustrijskim uređajima!!!*

