



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

*Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo*

# *Procesi prijenosa i separacija*

VI. PREDAVANJE

Transport Phenomena and Separation Processes

*Ak. god. 2019./2020.*

**Zagreb, 2. travnja 2020.**

Procesi separacije u sustavima čvrsto-čvrsto (S/S partikulskim sustavima) - klasifikacija

Mehanički makroprocesi

Procesi kojima se mijenja stanje izmiješanosti

Procesi kojima se mijenja stanje disperznosti

Procesi meh. separacije

Procesi kontaktiranja

Procesi usitnjavanja

Procesi aglomeriranja

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

Procesi separacije u sustavima čvrsto-plinovito

Fluidizacija

Mehaničko miješanje

Drobljenje

Mljevenje

Granuliranje

Aglomeriranje tlačenjem

Otprašivanje

Cikloni

Elektrofiltri

Flitri za plinove

Filtracija

Sedimentacija

Flotacija

Odavanje sitom



Miješanje je proces kontaktiranja pojedinih faza (S, L, G) kojim se postiže jednolikost u sastavu i/ili temperaturi sustava. Dakle, mehaničko miješanje provodi se poradi postizanja željene homogenosti ( $c$ ,  $RVC$ ,  $T$ ) promatranog sustava. Procesom miješanja povećava se stupanj izmiješanosti danog partikulskog sustava.

Miješanje se provodi mehaničkim uzgibavanjem fluida u posudama.

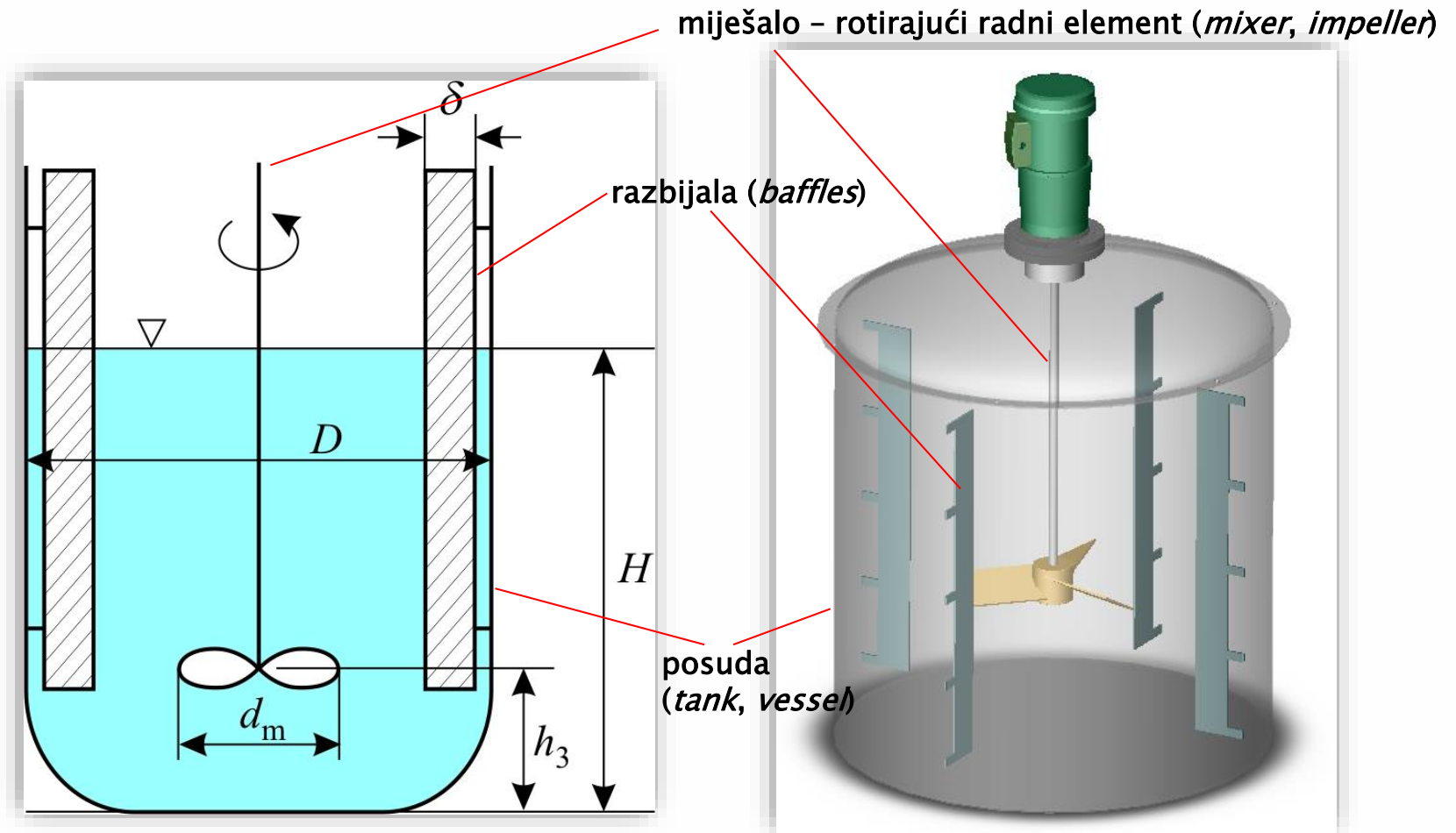
Jednolikost u sustavu je poželjna poradi osiguravanja boljih uvjeta za prijenos topline i tvari te za provedbu kemijske reakcije, otapanja, apsorpcije plina, ekstrakcije, itd.

Proces miješanja zastupljen je u gotovo svim industrijama posebice u kemijskoj procesnoj industriji.

Razlikujemo:

- i. Miješanje u jednofaznim sustavima*
  - podrazumijeva homogeniziranje mješljivih kapljevina (L/L sustavi)
  - rezultira reduciranjem razlike u pripadajućim koncentracijama te viskoznostima,
- ii. Miješanje u sustavima s nemješljivim kapljevinama (L/L sustavi)*
  - provodi se s ciljem uspostave uvjeta pogodnih za bolji prijenos tvari (pri ekstrakciji miješanjem povećavamo međufaznu površinu i time pospješujemo danu separaciju),
- iii. Miješanje u sustavima čvrsto–kapljevito (S/L partikulskim sustavima)*
  - takovo miješanje čvrstih čestica (jedinki) u kapljevinama naziva se suspendiranje
  - suspendiranje se provodi u svrhu sprečavanja sedimentacije čvrstog i osiguravanja pogodnih uvjeta za prijenos tvari i kemijsku reakciju,

- iv. *Miješanje u sustavima plin/kapljevina (G/L partikulskim sustavima)*
  - provodi se u svrhu postizanja boljeg kontakta sadržanih faza te posljedično boljeg prijenosa tvari (pr. apsorpcija),
- v. *Miješanje u trofaznim sustavima,*
- vi. *Miješanje u sustavima čvrstog odnosno miješanje čvrstih čestica/prášaka (S/S partikulskim sustavima)*
  - provodi se u svrhu postizanja jednolike RVČa danog kolektiva te željene homogenosti sastava.



Dimenzioniranje procesnog sustava za miješanje (miješalice) podrazumijeva:

- i. Odabir tipa rotirajućeg radnog elementa odnosno odgovarajućeg miješala te odgovarajuće posude,*
- ii. Definiranje geometrijskih karakteristika procesnog sustava,*
- iii. Određivanje (procjena) broja okretaja miješala potrebnog za postizanje željenog stanja izmiješanosti,*
- iv. Procjena snage potrebne na vratilu miješala.*

Ostvarena primjenom rotirajućeg radnog elementa (miješala)

$n, d_m$

$$\text{Stupanj miješanja} \\ \text{Adekvatno/neadekvatno} \\ \text{gibanje ukupne mase} = \frac{\text{Pokretačka sila fenomena}}{\text{Otpor fenomenu}}$$

Ukupnost otpora pri ovakvom obliku strujanja iskazujemo *Eulerovom* bezdimenzijskom značajkom za miješanje

Također je to iskaz nepovratnog gubitka energije

$$Eu_M = f(Re_M, Fr_M, S_1, S_2, S_3)$$

$$Eu_M = k \cdot Re_M^m \cdot Fr_M^n$$

*Froudeova* bezdimenzijska značajka za miješanje  $Fr_M = \frac{n^2 d_m}{g}$

$$Eu_M = f(Re_M, S_1, S_2, S_3)$$

$$Eu_M = f(\eta_f, \text{geometrija})$$

Simpleksi  
Bezdimenzijski odnosi  
geometrijskih  
karakteristika



Osiguravanjem konvektivnog toka ukupne mase odnosno turbulentnog gibanja tvari u procesnom prostoru postižu se visoki stupnjevi miješanja.

Količina mehaničke energije potrebne za postizanje željenog stanja izmiješanosti ovisi o:

- geometriji procesnog sustava,
- fizikalnim svojstvima partikulskog sustava koji miješamo (viskoznost kapljevite faze, gustoće pojedinih faza, itd.).

Laminarno strujanje obično egzistira u prisutnosti vrlo viskoznih kapljevina. Poradi *velike viskoznosti* kapljevitog sustava otpor fenomenu je izrazito velik. Stoga, potrebne su velike količine mehaničke energije da se ostvari željeni tok odnosno adekvatno gibanje ukupne mase.

Za nadvladavanje tako velikog otpora u hidrodinamskom sustavu valja primijeniti miješalo s velikom kontaktnom površinom koje će zauzeti veliki dio posude za miješanje. Time, osigurat će se adekvatno gibanje ukupne mase te posljedično i željeni stupanj miješanja.

Dolazi do prijenosa količine gibanja s površine koja rotira u masu fluida i to isključivo molekularnim mehanizmom.

Turbulentno strujanje se javlja kod fluida kod kojih je viskoznost manja od 10 mPa s. U slučaju znatno *manjih viskoznosti* (prisutnosti tako malog otpora u hidrodinamskom sustavu) za osiguranje konvektivnog toka ukupne mase (turbulentnog gibanja tvari) nije potrebno koristiti veliko miješalo već i samom regulacijom broja okretaja miješala moguće je ostvariti adekvatno gibanje ukupne mase te posljedično značajnu dobavu i zadovoljavajući stupanj izmiješanosti.

Pri ovakvim hidrodinamičkim uvjetima postižu se visoki stupnjevi miješanja.

Prijenos količine gibanja ostvaruje se vrtložnim mehanizmom prijenosa.

Kriterij:

- $Re_M < 10$  egzistira laminarno strujanje,
- $10 < Re_M < 10\ 000$  egzistira prijelazno područje,
- $Re_M > 10\ 000$  egzistira turbulentno strujanje.

$$Re_M = \frac{nd_m^2 \rho_f}{\eta_f}$$

Dakle, na režim strujanja u miješalici znatno utječe viskoznost kapljevine, ali i geometrijska karakteristika procesnog sustava.

*Tipovi cirkulacije (toka) fluida u posudi za miješanje:*

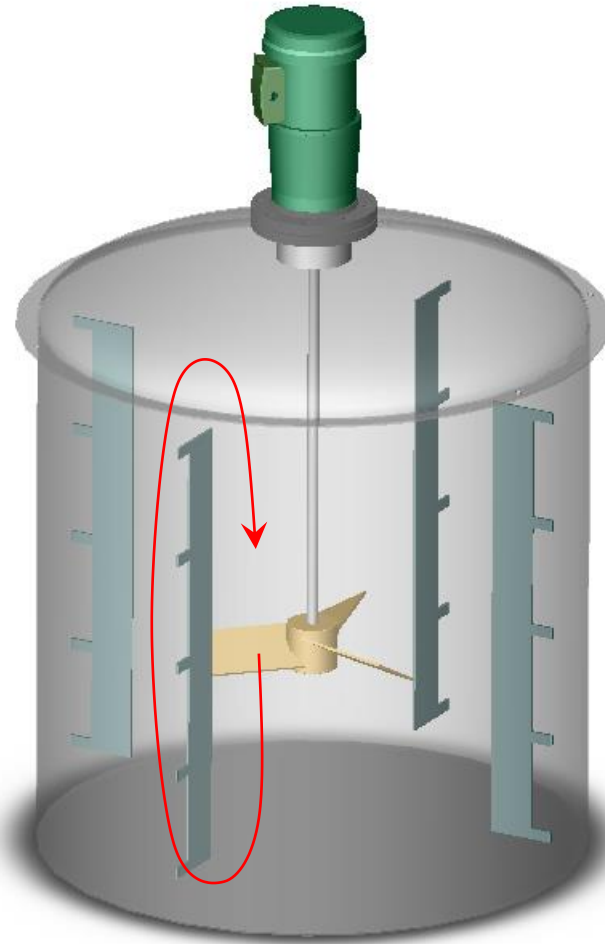
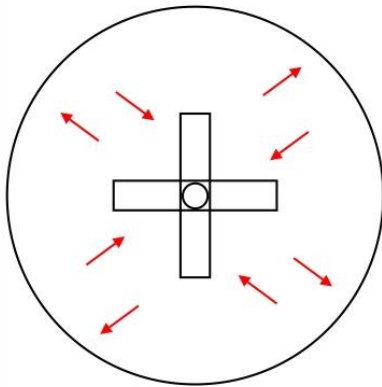
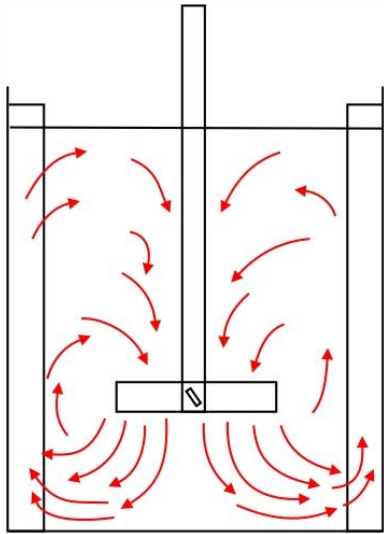
*i. Aksijalni tok*

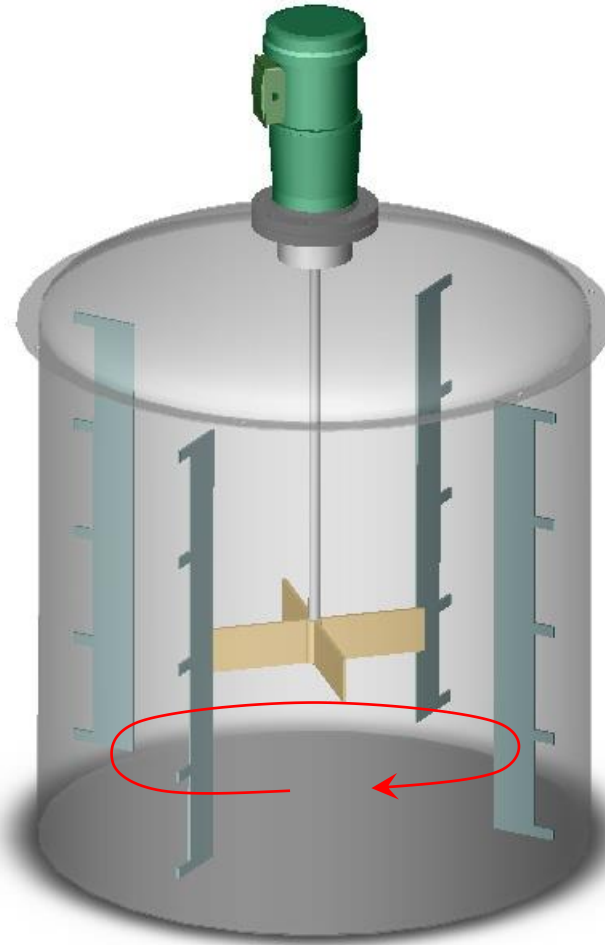
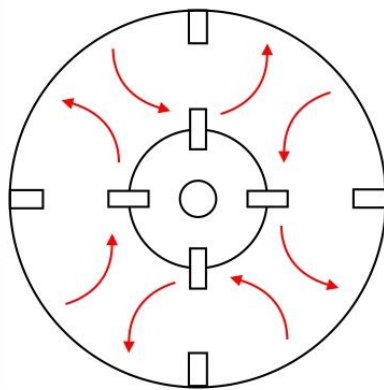
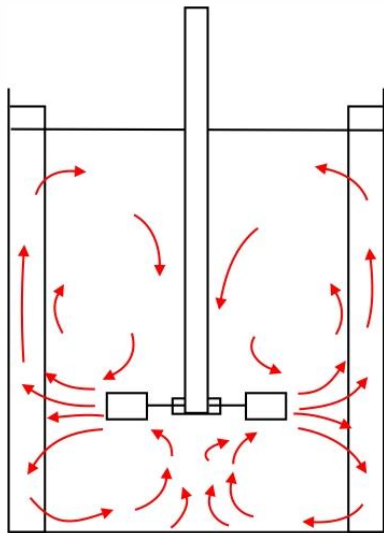
- tok paralelan s osi rotacije miješala (*paralelan s osovinom*)
- primjena miješala s nagnutim lopaticama,

*ii. Radijalni tok*

- tok okomit na smjer rotacije, u *radijalnom* (vodoravnom) smjeru, prema zidu posude
- primjena miješala s ravnim lopaticama,

*iii. Tangencijalni tok.*

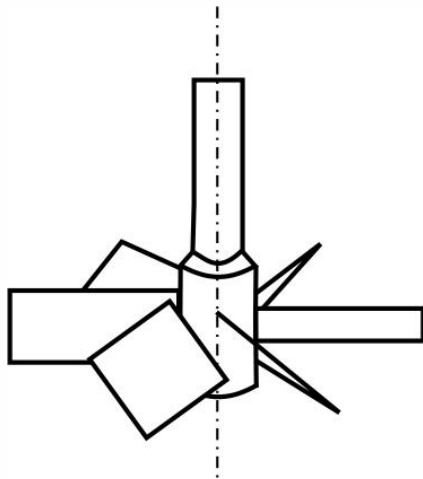




U *miješala za aksijalni tok* kapljevine ubrajamo one rotirajuće radne elemente kod kojih su lopatice nagnute pod kutom manjim od  $90^\circ$  u odnosu na površinu rotacije.

Predstavnici *aksijalnih miješala* su *turbinsko miješalo s nagnutim lopicama* i *propelersko miješalo*.

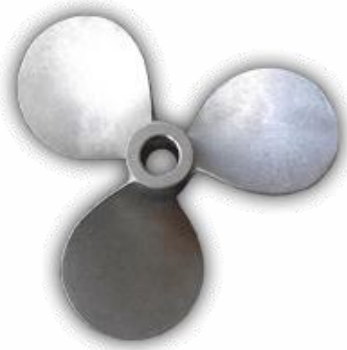
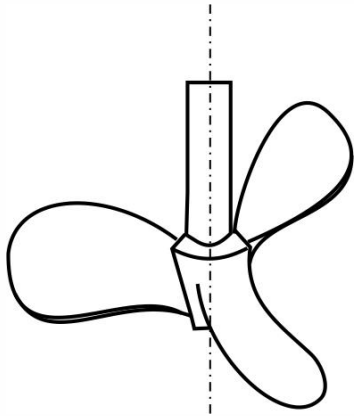
*Turbinsko miješalo s nagnutim lopicama* postavlja se centralno u posudu u slučaju zahtjeva intenzivnog aksijalnog toka, te pri vrhu posude u slučaju postojanja potrebe za učinkovitim “potapanjem” čestica manjih gustoća.



**Turbinska miješala s nagnutim lopicama**



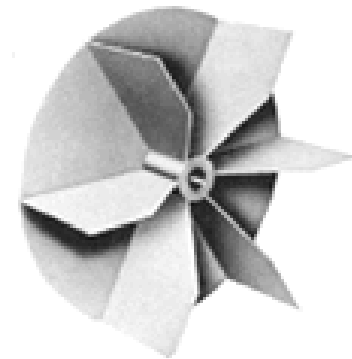
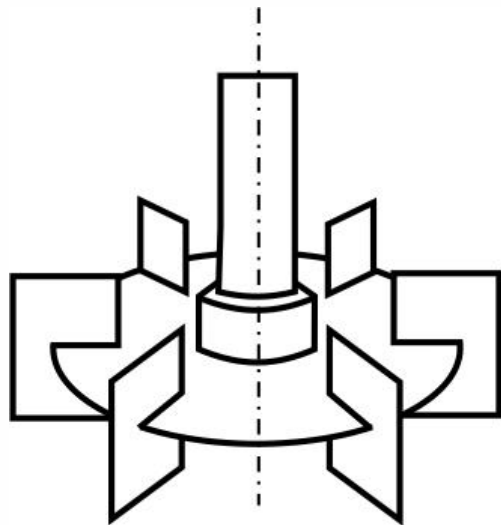
*Propelerska miješala* smještaju se centralno u posudu ili s bočne strane u slučaju postojanja potrebe za intenzivnim aksijalnim tokom. Obično, koristi se za miješanje kapljevina manje viskoznosti.



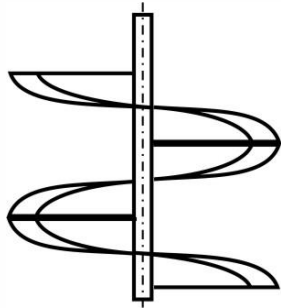
**Propelerska miješala**

U *miješala za radijalni tok* ubrajamo one rotirajuće radne elemente kod kojih je površina lopatica paralelna s osi miješala (s osovinom).

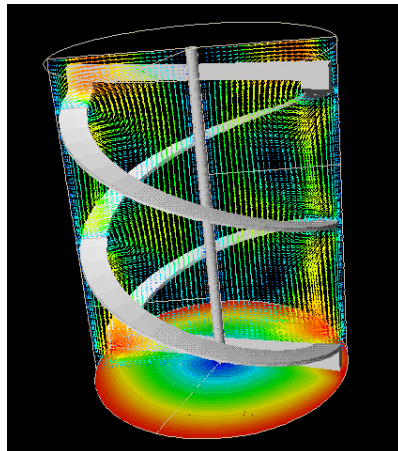
Klasičan primjer *radijalnog miješala* jest *turbinsko miješalo s ravnim lopaticama*.

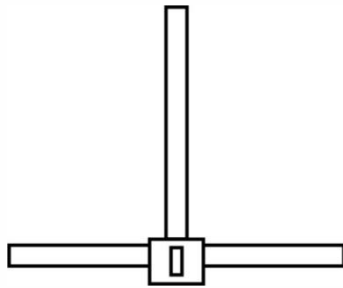


*Miješala velikih površina* koriste se za vrlo viskozne kapljevine ( $>20 \text{ Pa s}$ ) te za miješanje kapljevina *nenevtonova* reološkog ponašanja.

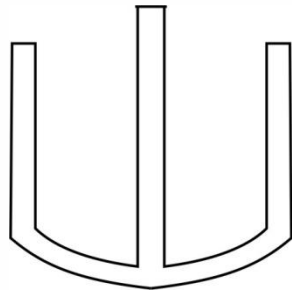


**Spiralna miješala**

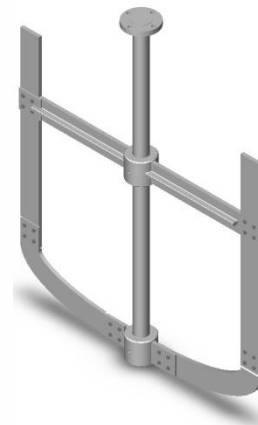


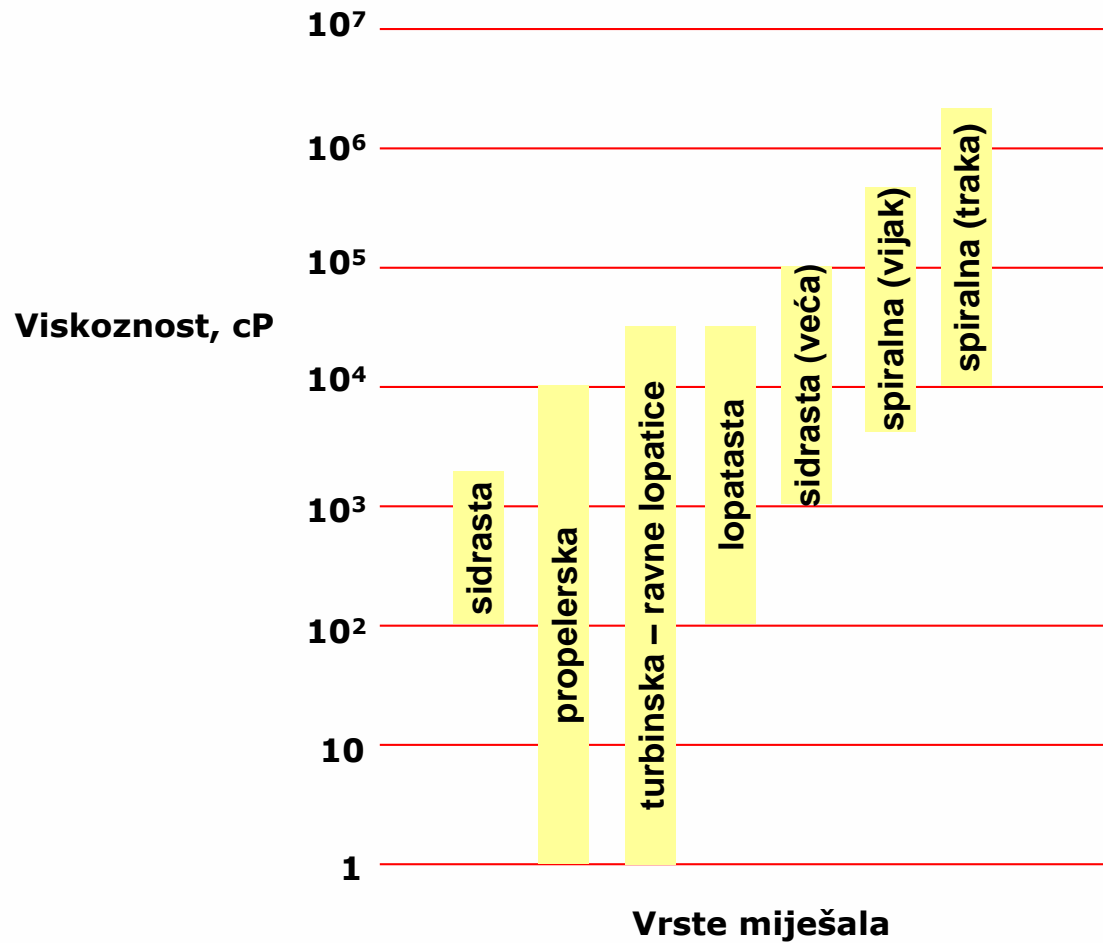


**Lopatasta miješala**

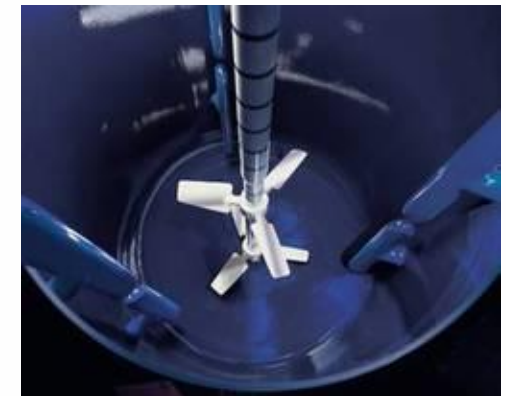
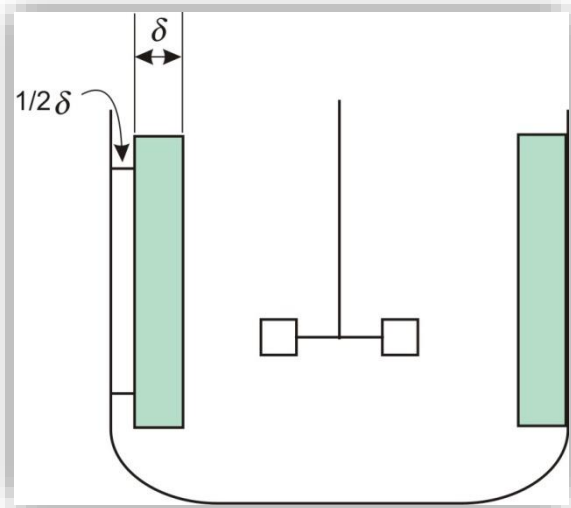


**Sidrasta miješala**





*Razbijala* su okomiti elementi koji se postavljaju radialno u miješalici. Njihova prisutnost onemogućava/sprječava nastajanje nepovoljnih virova (vrtloga). Debljine su  $1/10$  ili  $1/12$  od promjera posude za miješanje. Kod miješanja suspenzija smještaju se na udaljenosti od stijenke posude koja je jednaka polovici debljine pojedinog razbijala kako bi se spriječila akumulacija čvrstih jedinki uz njihovu površinu.



Postoji predložena procedura za dimenzioniranje miješalice u jednofaznim sustavima te u sustavima čvrsto–kapljevito.

Takva procedura uključuje definiranje:

i. Volumena koji se miješa,

ii. Primarne varijable koja određuje uvjete miješanja

– viskoznost za jednofazne sustave,

– brzina sedimentiranja ili veličine koju ju određuju za suspenzije,

iii. Odgovarajućeg i pogodnog dinamičkog odziva procesa

– dobava ostvarena miješalom za jednofazne sustave,

– stanje suspenzije za sustave čvrsto–kapljevito.

*Procjena broja okretaja miješala ( $n$ ) potrebnog za postizanje željenog stanja izmiješanosti (za postizanje željene dobave kod jednofaznih sustava) ostvaruje se primjenom općeg hidrodinamskog izraza:*

$$n = \frac{\dot{V}}{N_V \cdot d_m^3}$$

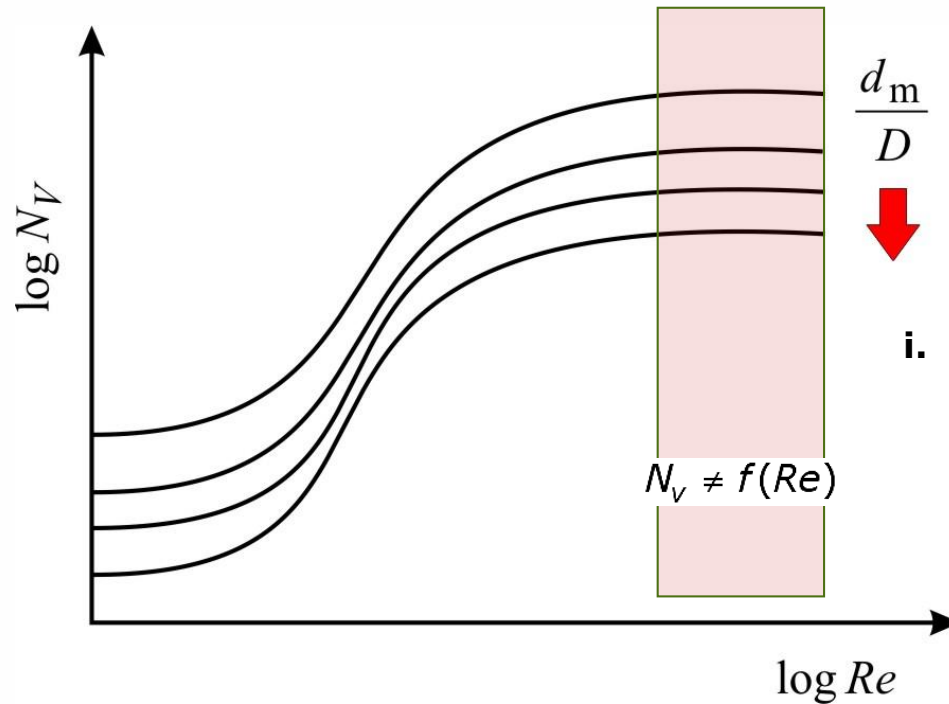
Karakteristična značajka  
dobave

$$\dot{V} = v_A A$$

Brzina u masi fluida  
primjenom *mjerila  
uzgibavanja*



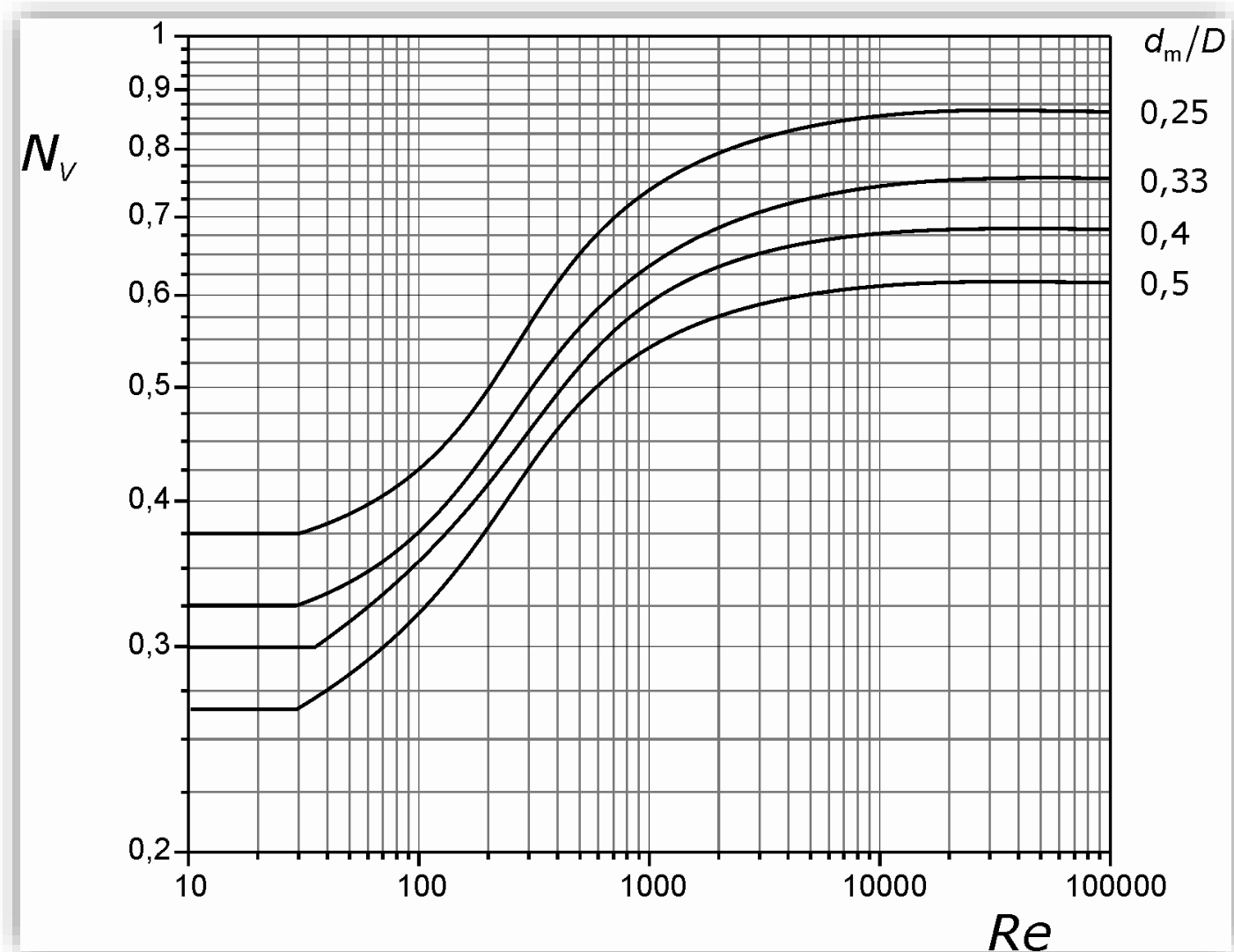
Bezdimenzijski dijagram dobave



i. korak – pretpostavka  
turbulentnog  
strujanja

$N_V$  jest konstantna  
(neovisna o broju  
okretaja) za danu  
geometriju

$$Re_M = \frac{nd_m^2}{v_f}$$



Bezdimenzijski dijagram dobave

*Procjena snage na vratilu miješala ( $P$ ) potrebne za miješanje temelji se na primjeni sljedeće bezdimenzijske korelacije:*

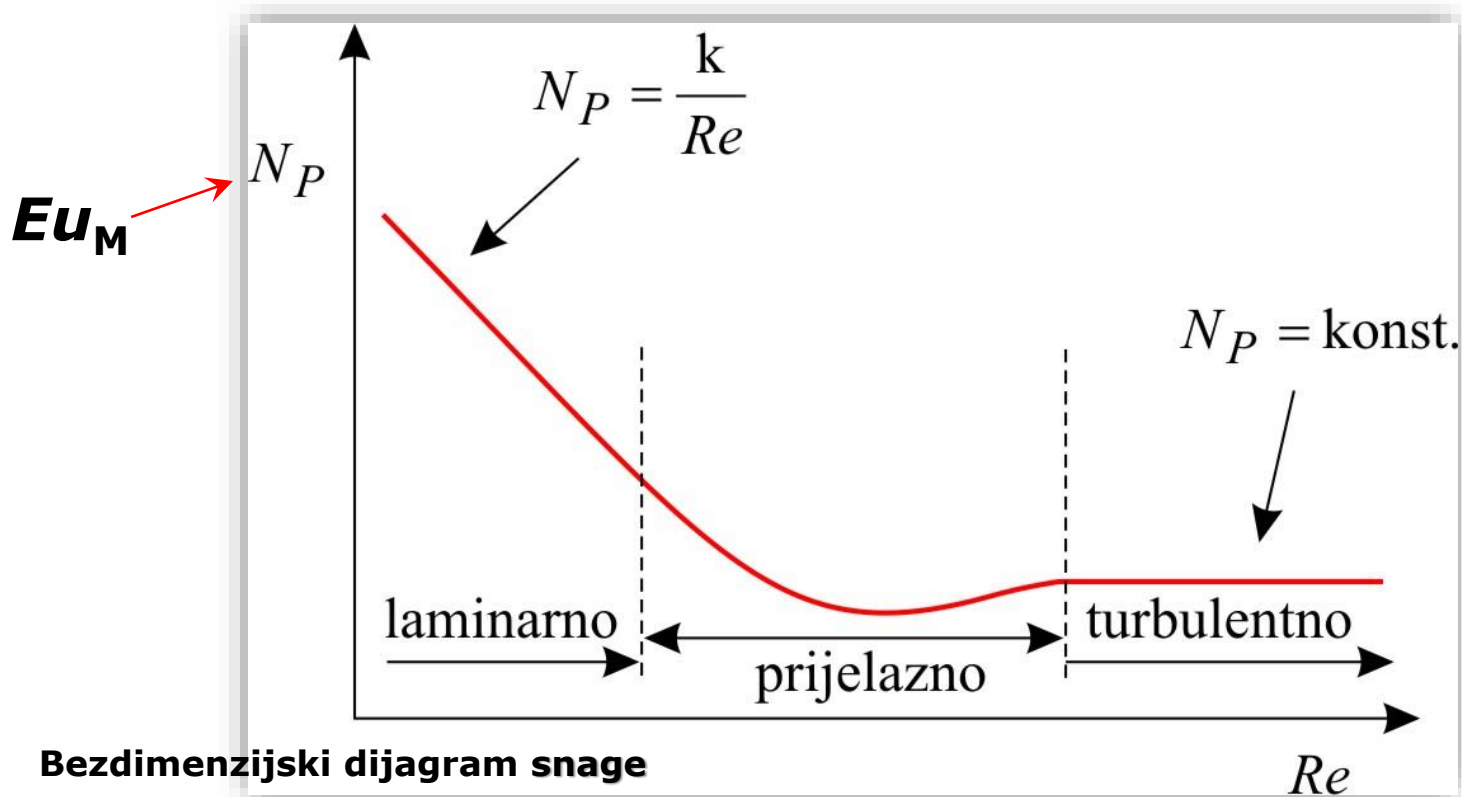
$$N_P = f \left( Re_M, Fr_M, \frac{D}{d_m}, \frac{H}{d_m}, \frac{h_3}{d_m} \right) \quad Eu_M = k \cdot Re_M^m \cdot Fr_M^n$$

*Značajka snage*

Ugradnjom razbijala onemogućuje se nastanak nepovoljnih virova te se time i eliminira doprinos *Frouдове* značajke.

$$N_P = f \left( Re_M, \frac{D}{d_m}, \frac{H}{d_m}, \frac{h_3}{d_m} \right) \quad Eu_M = k \cdot Re_M^m$$

**Navedene bezdimenzijske korelacije vrijede za sve sustave Newtonova reološkog ponašanja (većina jednofaznih sustava te suspenzija s manjim udjelom čvrstog!!!)**

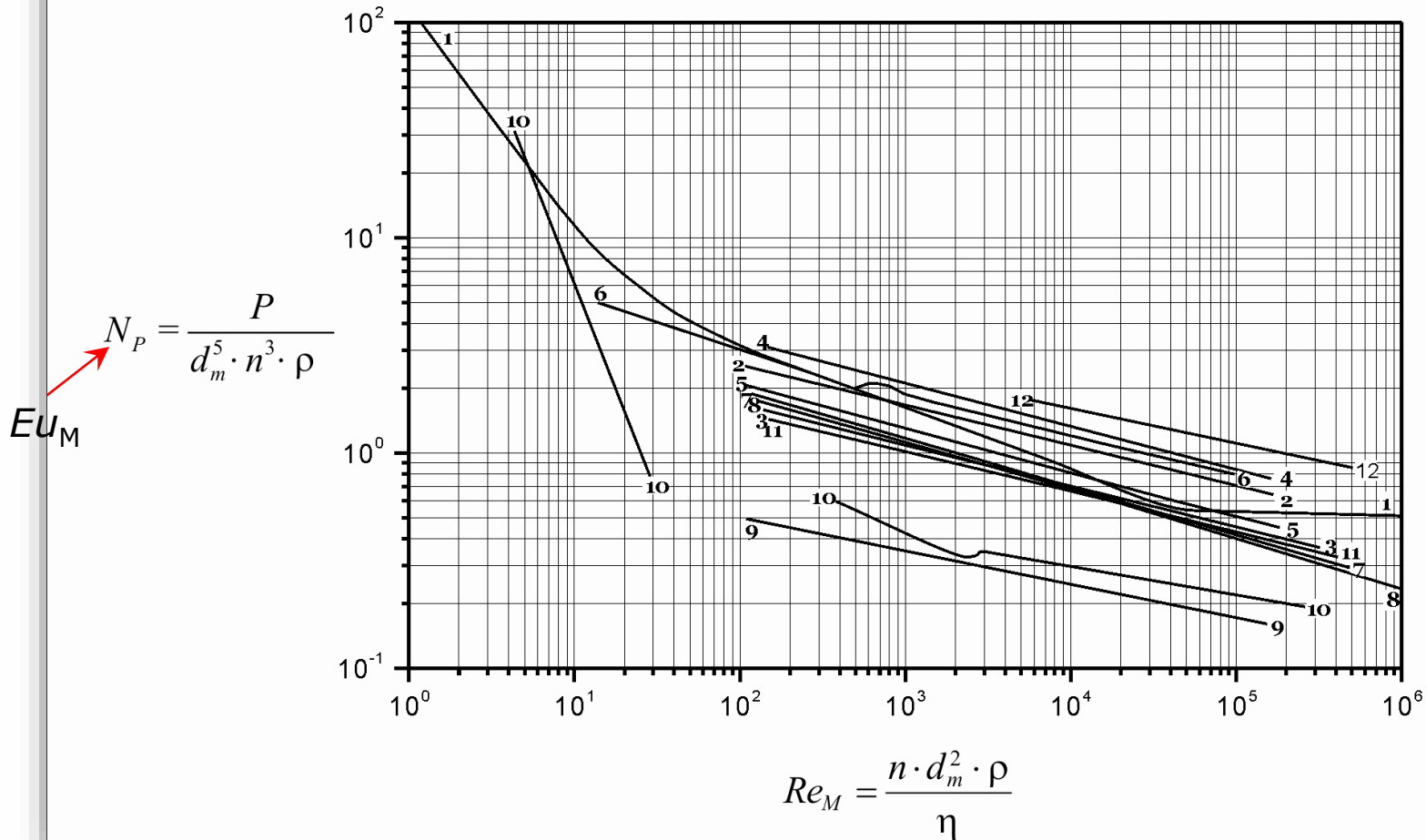


Bezdimenzijski dijagram snage

$$P = N_P \cdot n^3 \cdot d_m^5 \cdot \rho_f$$

Procijenjena snaga na vratilu miješala

Bezdimenzijski dijagram snage



Miješanje u sustavima čvrsto–kapljevito (*suspendiranje* čvrstih čestica u fluidu) najuspješnije se provodi u *procesnom sustavu* (miješalici) koji se sastoji od:

- posude za miješanje *Rushtonovih* dimenzija ( $H = D$ ) s oblikom dna koje osigurava najpovoljnije strujanje bez stvaranja mrtvih prostora (zdelasto, okruglasto) te s 4 ugrađena razbijača ( $\delta = D/16$  i  $\delta = D/12$ ) koji sprečavaju nastajanje vira,
- miješala ( $d_m = D/3$ ) koje uzrokuje aksijalni tok fluida prema dnu posude za miješanje.

Granična *stanja suspenzije*:

*i.* Potpuna suspenzija

- javlja se kada su sve čvrste čestice u gibanju i nijedna ne zaostaje duže na dnu posude
- utvrđuje se *kriterijem 1s* (vizualno praćenje),

*ii.* Homogena suspenzija

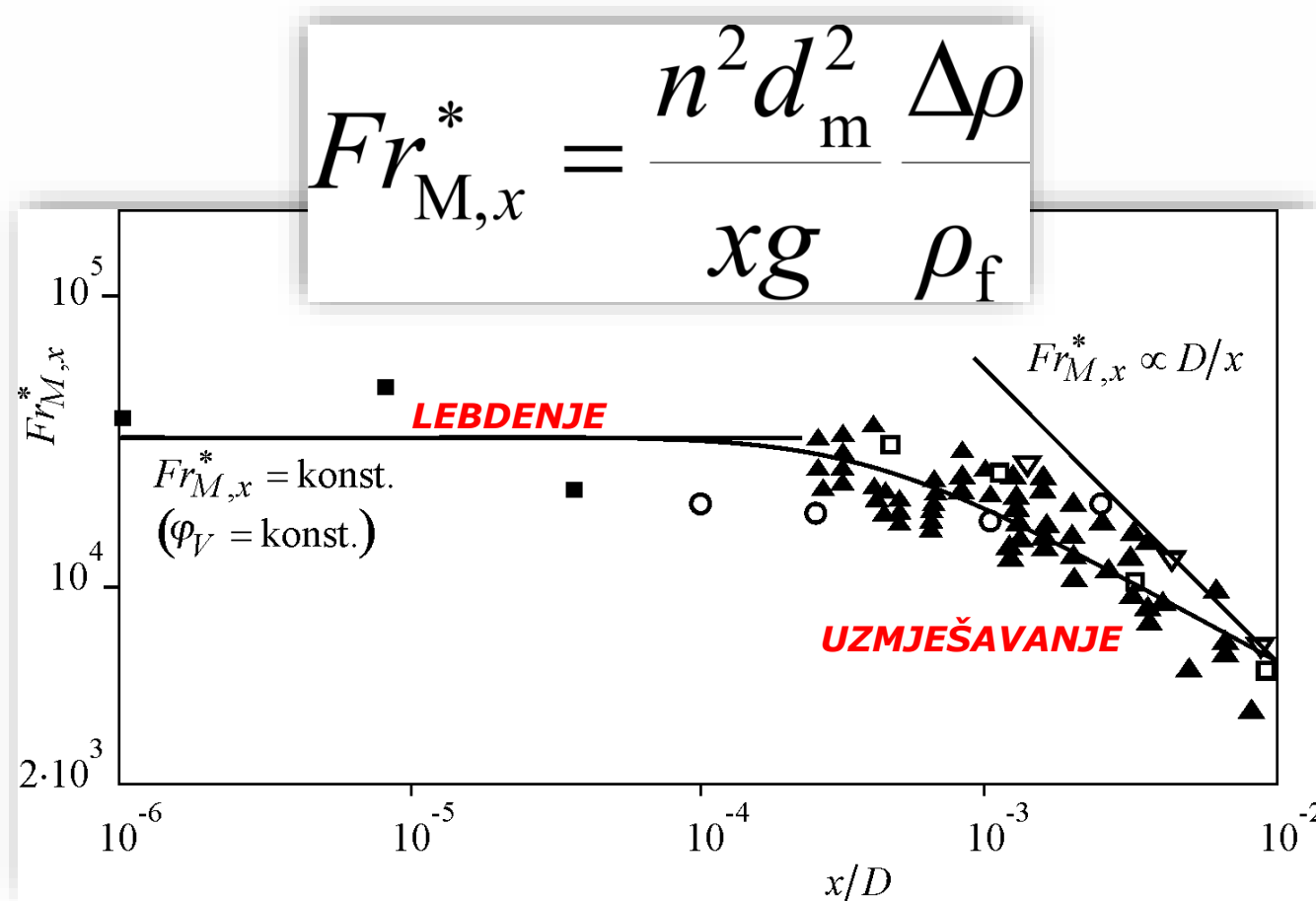
- javlja se kada je koncentracija čvrstih čestica, bez obzira na njihovu veličinu, *jednoliko* raspodijeljena u posudi za miješanje
- iskazuje se *stupnjem homogenosti suspenzije* odnosno primjenom statistike/varijance - odstupanjem lokalne koncentracije od srednje vrijednosti).

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \varphi_{sr.})^2$$

**Manja varijanca upućuje na veću homogenost promatranog partikulskog sustava**

*Minimalni* broj okretaja miješala potreban za postizanje stanja potpune suspenzije ovisi o režimu suspendiranja.

Režim suspendiranja određen je odnosom promjera čvrstih čestica i promjera posude za miješanje.





*Minimalni* broj okretaja miješala ( $n_{\min.}$ ) potreban za postizanje stanja potpune suspenzije procjenjuje se primjenom karakteristike suspendiranja odnosno odgovarajuće *bezdimenzijske korelacije*.

$$Re_{kr.} = f \left( Ar, \frac{x}{d_m}, \varphi_m \right)$$

ILI

$$Re_{kr.} = f \left( Fr^*, \frac{v_{ss}}{v_o}, \varphi_V \right)$$

**Koju bezdimenzijsku  
korelaciju koristiti???**

**Ovisi o režimu  
suspendiranja!!!**

*Režim uzmjешavanja*

$$Re_{kr.} = f \left( Ar, \frac{x}{d_m}, \varphi_m \right)$$

**Veličina jedinki**  
**Maseni udio čvrstog u suspenziji**  
**Promjer miješala**

**Arhimedova bezdimenzijska značajka**

$$Ar = \frac{d_m^3 \cdot g \Delta\rho}{v_f^2 \rho_f}$$

$$Re_M = \frac{nd_m^2 \rho_f}{\eta_f}$$

**Minimalni broj okretaja miješala**

*Turbulentni hidrodinamički režim*

Kriterij

$$Ar \left( \frac{x}{d_m} \right)^2 \varphi_m^{0,5} > 10^5$$

$$Re_{kr.} = a Ar^{0,5} \varphi_m^{0,25}$$

**Karakteristika suspendiranja  
za turbulentno područje u  
režimu uzmješavanja!!!**

**Vrijedi za masene udjele  
čvrstog 0,1-20,0 %**

$$Re_M = \frac{nd_m^2 \rho_f}{\eta_f}$$

**Minimalni broj okretaja  
miješala**

*Laminarni hidrodinamički režim*

Kriterij

$$Ar \left( \frac{x}{d_m} \right)^2 \varphi_m^{0,5} < 10^4$$

$$Re_{kr.} = b Ar^{0,4} \left( \frac{d_m}{x} \right)^{0,2} \varphi_m^{0,2}$$

**Karakteristika suspendiranja  
za laminarno područje u  
režimu uzsmješavanja!!!**

**Vrijedi za masene udjele  
čvrstog 0,1-20,0 %**

$$Re_M = \frac{nd_m^2 \rho_f}{\eta_f}$$

**Minimalni broj okretaja  
miješala**

*Režim lebdenja*

$$Re_{kr.} = f \left( Fr^*, \frac{v_{ss}}{v_o}, \varphi_V \right)$$

Brzina smetanog sedimentiranja kolektiva čestica

Volumni udio čvrstog u suspenziji

Obodna brzina

*Proširena Froudova*  
bezdimenzijska značajka

$$Fr^* = \frac{n^2 d_m \Delta \rho}{g \rho_f}$$

$$Re_M = \frac{nd_m^2 \rho_f}{\eta_f}$$

Minimalni broj okretaja miješala

Procjena snage na vratilu miješala ( $P$ ) potrebne za miješanje sustava čvrsto–kapljevito (suspencija) s *manjim* udjelom čvrstoga (važna održivost Newtonova reološkog ponašanja) također se temelji na primjeni dijagrama snage odnosno bezdimenzijske korelacije:

$$N_P = f \left( Re_M, \frac{D}{d_m}, \frac{H}{d_m}, \frac{h_3}{d_m} \right)$$

$$P = N_P \cdot n^3 \cdot d_m^5 \cdot \rho_f$$

**Procijenjena snaga na vratilu miješala**