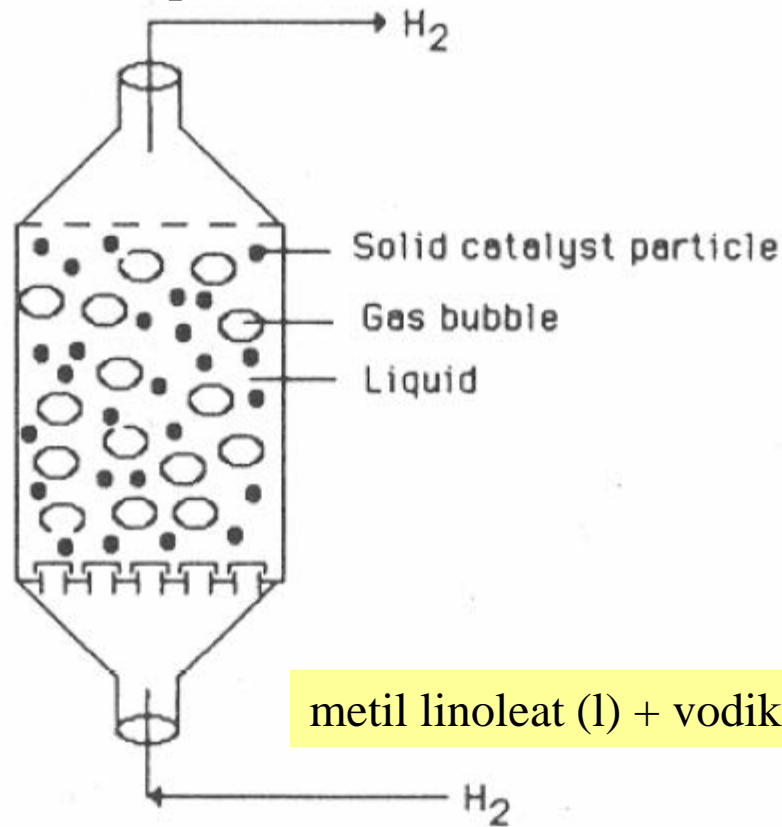


**Reaktori sa suspendiranim slojem katalizatora**  
(engl. *Suspended-bed reactor*)

**Suspenzijski reaktor** - višefazni reaktor u kojem plinoviti reaktant prolazi u obliku mjehurića kroz otopinu (kapljevitu fazu) koja sadrži kruti katalizator.

**Otopina** može biti reaktant (npr. kod reakcija hidriranja) ili inert (npr. kod Fischer-Tropschove sinteze metana).



*Primjer:* Suspenzijski reaktor za hidriranje metil linoleata

# Reaktori sa suspendiranim slojem katalizatora (engl. *Suspended-bed reactor*)

*katalizator je dispergiran u kapljevini (plin-kapljevina-krutina);  
kapljevina je kontinuirana faza, a plin je dispergiran u  
kapljevini u obliku mjehurića*

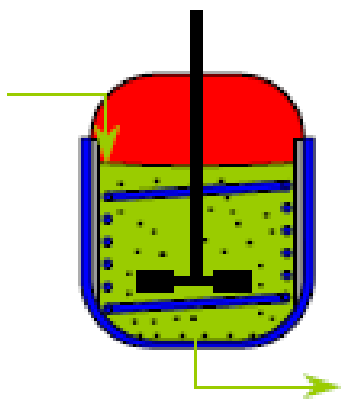
- plin i katalizator raspodijeljeni su u relativno velikom volumenu kapljevine (velik volumen reaktora)
- reaktanti se uvode u donjim dijelovima reaktora zajedno s katalizatorom suspendiranim u kapljevini  $\Rightarrow$  homogena raspodjela temperature (prikladni za provedbu egzotermnih reakcija; velik topl. kapacitet tekuće faze)
- u gornjem dijelu reaktora odvaja se nepotrošeni plin i odvodi zajedno s kapljevitim produktom i suspendiranim katalizatorom (uz mogućnost recikliranja)

*S obzirom na kapljevину moguć je:*

kontinuiran,  
polukontinuiran,  
diskontinuirani rad.

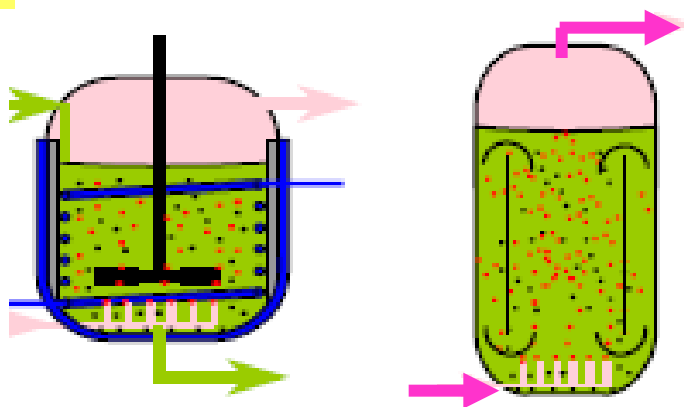
# Različite izvedbe suspenzijskih reaktora

plin ili kapljevina  
+ katalizator



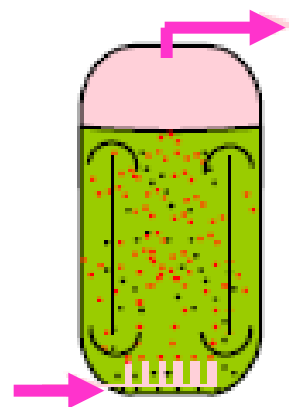
kontinuiran rad  
s obzirom na  
kapljevину

plin/kapljevina/krutina



protočno-kotlasti  
tip (s mehaničkim  
miješanjem)

kolonski tip;  
diskontinuiran s  
obzirom na  
kapljevину



### *Značajke:*

- obično su vrlo veliki, a za postizanje suspenzije je potrebna mala energija
- dimenzije zrna katalizatora: od 0,2 do 0,3 mm
- suspenzijski reaktori mogu se smatrati izotermnim reaktorima, a mogu se aproksimirati kao idealni kotlasti reaktori.
- iza reaktora nalazi se separator u kojem se kapljevina odvaja od katalizatora i plina
- plin i katalizator mogu se djelomično reciklirati.

**Kod modeliranja suspenzijskih reaktora obično se pretpostavlja sljedeće:**

- dobro miješanje u kapljevitoj fazi,
- homogena raspodjela katalizatora, te
- strujanje plinske faze

*Primjena:*

- u kemijskoj,
- petrokemijskoj i
- farmaceutskoj industriji.

## *Prednosti:*

- dobar kontakt reaktanata i katalizatora  
⇒ učinkovito iskorištenje katalizatora koji je potpuno nakvašen kapljevnom,
- mala veličina zrna katalizatora (značajka djelotvornosti  $\approx 1$ )
- dobar prijenos topline, nema lokalnih pregrijavanja,
- dobra selektivnost katalizatora,
- moguća brza zamjena katalizatora ⇒ prikladni za sustave s brzom deaktivacijom katalizatora,
- velika brzina reakcije po jedinici volumena (ako je katalizator dovoljno aktivan)
- 4-5 puta manji pad tlaka nego u reaktoru s nepokretnim slojem katalizatora
- manji kapitalni troškovi (ca. 25 % manji nego za višecijevni reaktor s nepokretnim slojem)



## *Nedostaci:*

- separacija i odjeljivanje katalizatora iz smjese može predstavljati problem i povisiti troškove filtracije (posebno ako se radi s viskoznom kapljevinama),
- opasnost od frakcioniranja i sedimentiranja katalizatora u reaktoru,
- problem sa zadržavanjem katalizatora u reaktoru,
- slabo izmješavanje koje može smanjiti pretvorbu reaktanata,
- manje konverzije nego u reaktoru s nepokretnim slojem katalizatora i dr.

# *Tablica* - Usporedba prokapnog i suspenzijskog reaktora- 1

<b>Značajke</b>	<b>Prokapni reaktor</b>	<b>Suspenzijski reaktor</b>
<i>način rada</i>	kontinuirano	uglavnom diskontinuirano
<i>stupanj automatizacije</i>	visok	nizak
<i>uvjeti (temperatura, tlak)</i>	srednji	blagi
<i>temperatura</i>	zavisi o položaju	jednolika
<i>pad tlaka</i>	visok	nizak
<i>veličina</i>	promjenljiva	ograničena
<i>selektivnost</i>	mala	velika
<i>sadržaj kapljevine</i>	nizak	visok

## *Tablica* - Usporedba prokapnog i suspenzijskog reaktora- 2

<b>Značajke</b>	<b>Prokapni reaktor</b>	<b>Suspenzijski reaktor</b>
<i>vrijeme zadržavanja:</i> - kapljevina - plin	- id. strujanje - id. strujanje	- od id. miješanja do strujanja s aks. disp. - id. strujanje s aks. dis.
<i>značajka djelotvornosti</i>	mala	cca. 1
<i>iskorištenje topline</i>	neprihvatljivo	prihvatljivo
<i>primjenljivost</i>	ograničena (selektivnost)	neograničena
<i>naročito prikladno</i>	velika količina kapljevine	u slučaju brze deaktivacije katalizatora

# Suspenzijski reaktor s mehaničkim miješanjem (engl. *Slurry reactor*)

*Katalizator suspendiran u kapljevinu i plinu*

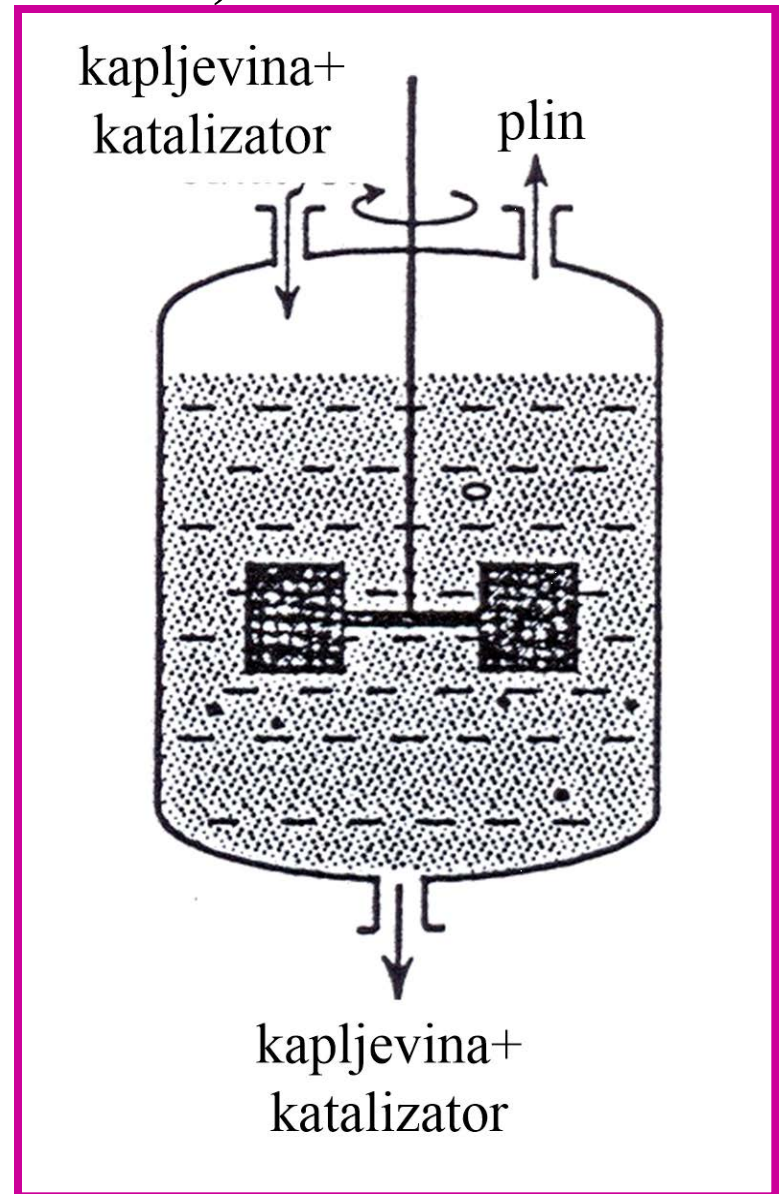
*S obzirom na kapljevinu mogu biti:*

- kontinuirani
- diskontinuirani

***Primjena:***

u industrijskoj praksi u reakcijama:

- hidriranja,
- alkiliranja,
- oksidacije
- biokemijskim reakcijama, itd.



## *Prednosti:*

- dobar kontakt između reaktanata i katalizatora,
- dobar prijenos topline (što pozitivno utječe na selektivnost i omogućava siguran rad),
- mali otpor prijenosu tvari (miješanje i relativno mala veličina zrna katalizatora),
- mogućnost kontinuirane reaktivacije katalizatora (dio suspenzije se odvodi, katalizator se reaktivira i vraća u reaktor)

### *Nedostaci:*

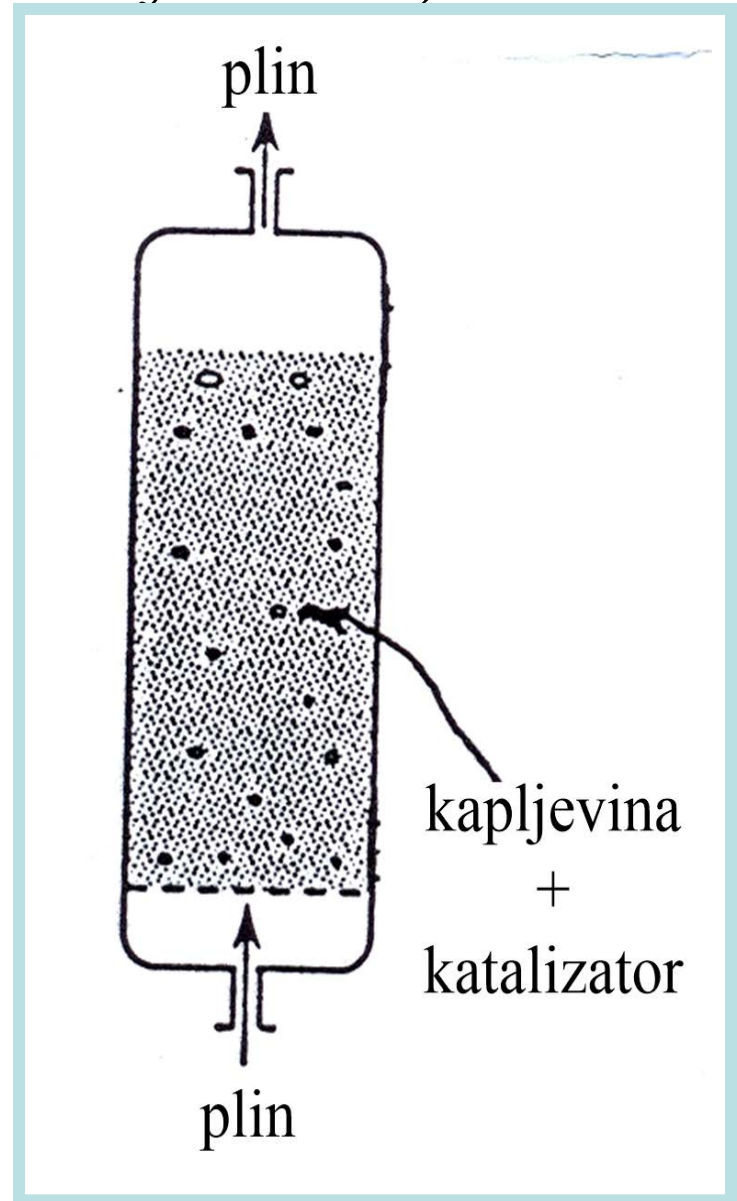
- do sada publicirani podaci teško se primjenjuju pri izvedbi reaktora,
- problem iznalaženja otapala u kojem će reaktanti biti topljivi i koje će biti inertno s obzirom na reaktante, katalizator i produkte



Delft University

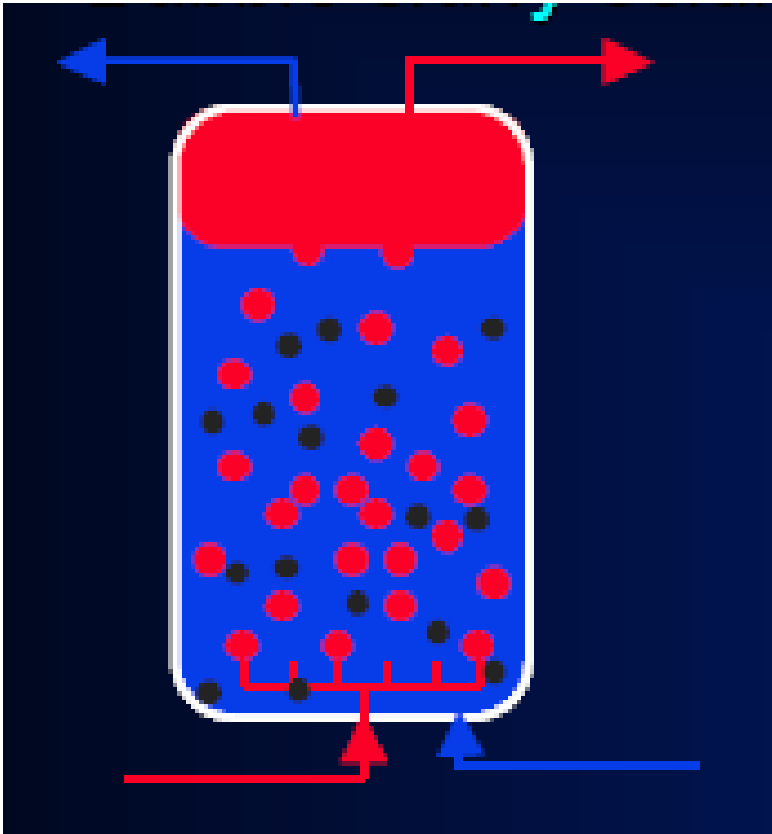
# Suspenzijski kolonski reaktor (engl. *Bubbling slurry reactor*)

- *Katalizator se održava u suspenziji zahvaljujući plinu koji prolazi kroz reaktor od dna prema vrhu reaktora*
- *Reaktor je diskontinuiran s obzirom na kapljevину*
- Uporaba ograničena na dobivanje manjih količina produkata reakcija hidriranja u kemijskoj i petrokem. industriji (npr. hidriranje benzena do cikloheksana i sl.).
- *Veličina zrna katalizatora: 0,2 - 0,3 mm.*



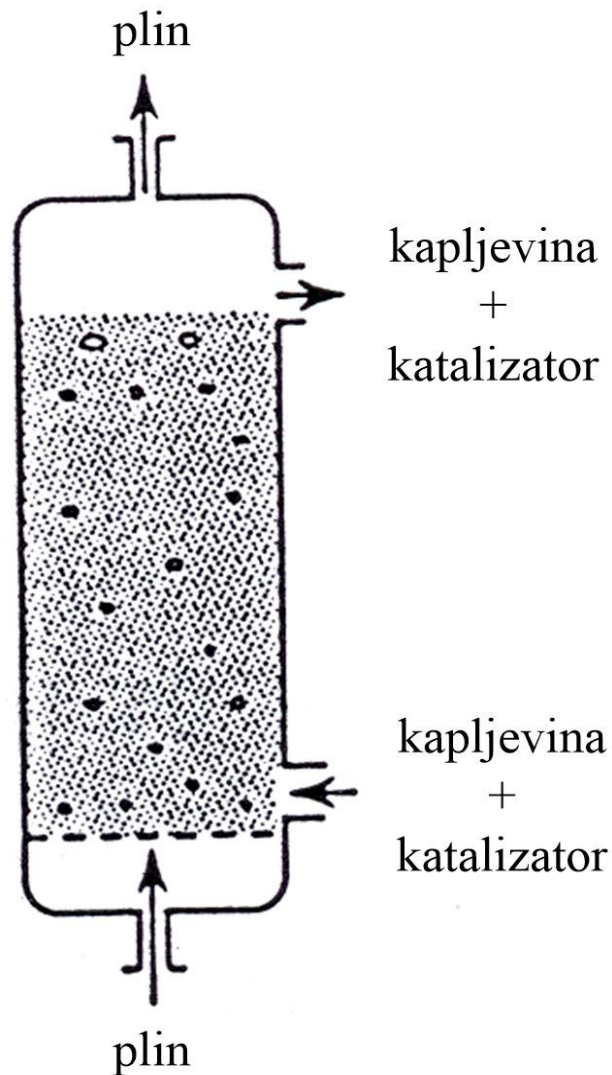


# Suspenzijski kolonski reaktor (engl. *Bubbling slurry reactor*)



- + velika značajka djelotvornosti,  $\eta$
- + izoterman rad
- + dobar prijenos
- + mali pad tlaka
- povratno miješanje
- separacija krutine/katalizatora

# Suspenzijski kolonski reaktor s vrtložnim slojem (engl. *Fluidized slurry reactor*)

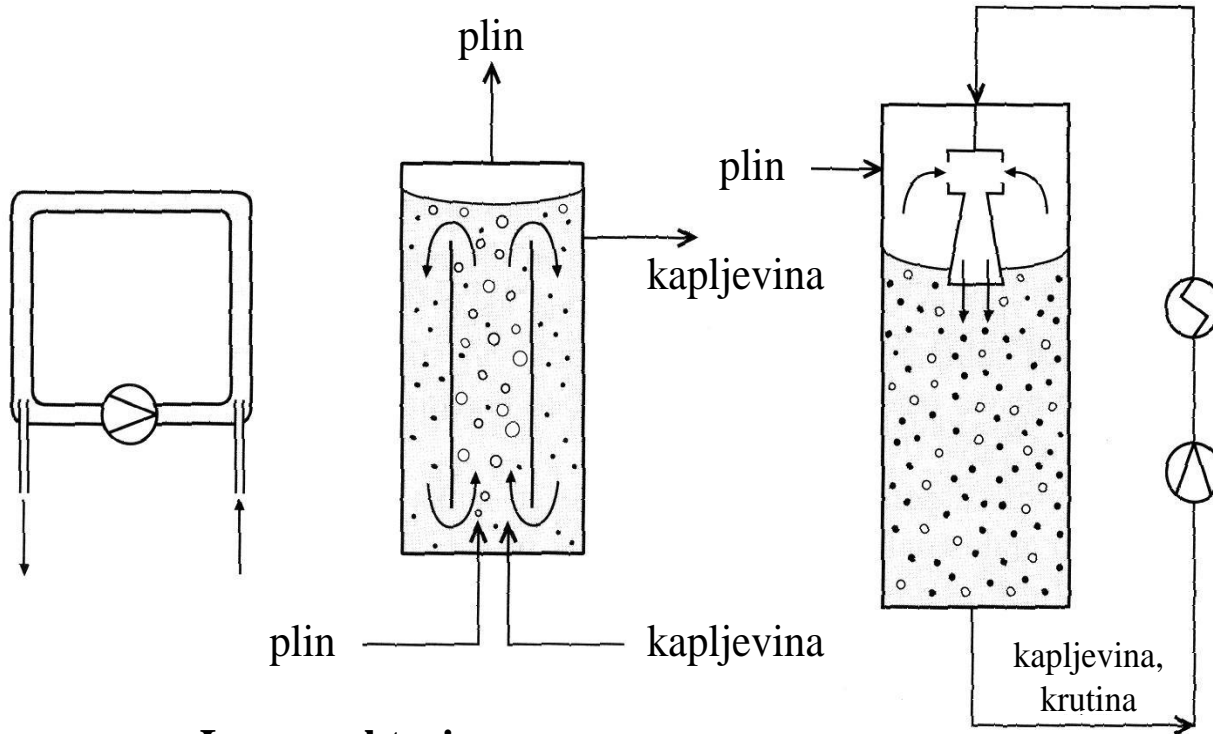


- *Katalizator suspendiran u kapljevini zahvaljujući plinu i kapljevini koji prolaze kroz reaktor od dna prema vrhu*
- *Kapljevita faza odgovorna je za održavanje suspenzije*
- Reaktor radi isključivo **kontinuirano s obzirom na obje faze.**
- *Brzina strujanja kapljevine ne smije biti veća od brzine taloženja katalizatora uslijed sile teže da se katalizator ne bi iznosio iz reaktora.*
- Ako je potrebna reaktivacija katalizatora brzina strujanja kapljevite faze se povećava.

## *Primjena:*

selektivno hidriranje olefina, heteroaromata, biokemijski procesi i dr.

# Suspenzijski reaktor s recikliranjem



**Loop reaktori s**

vanjskom                      unutrašnjom  
cirkulacijom

**Buss (jet) loop  
reaktor**

# Suspenzijski reaktor s recikliranjem

Mogu doći u različitim izvedbama:

- U tzv. „*Loop*” *reaktorima* kapljevina je potpuno izmiješana u relativno malom volumenu reaktora ⇒ omogućava dobru izmjenu topline (npr. odvođenje topline razvijene reakcijom).
- U „*Buss loop*” *reaktoru* velike brzine strujanja dovode do intenzivne turbulencije ⇒ omogućava veliku međufaznu površinu na granici između malih mjehurića i suspenzije.

⇒ vanjski izmjenjivač topline omogućava *izoterman rad* i *učinkovito uklanjanje topline razvijene u sustavu* (čak i kod jako egzotermnih reakcija)

⇒ mogu raditi samo *diskontinuirano* te uz *specijalne katalizatore otporne na abraziju*.

# Opće značajke suspenzijskih kotlastih reaktora

Višefazni reaktori koji se rabe u:

- *kemijskoj,*
- *biokemijskoj i*
- *farmaceutskoj industriji*

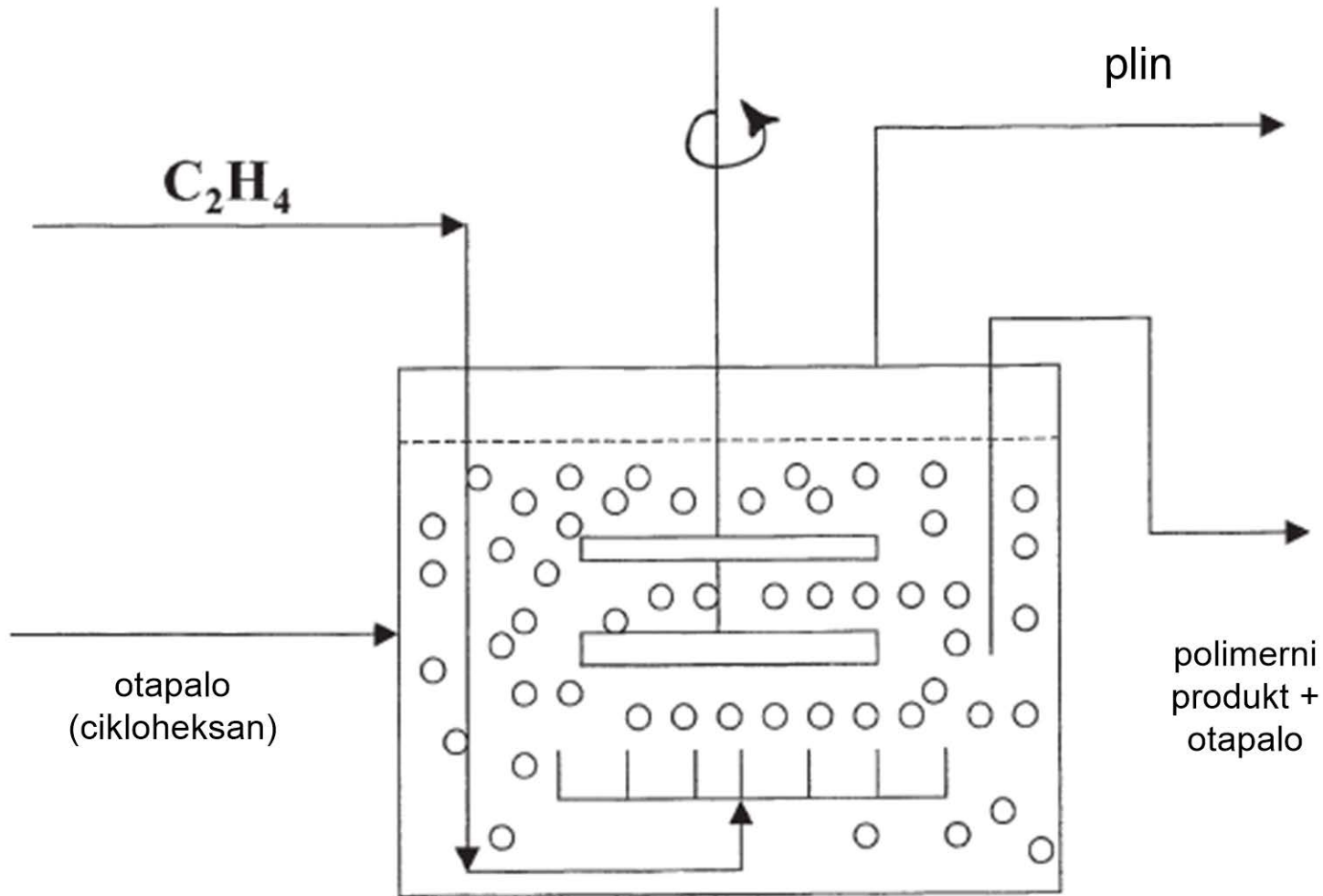
za provedbu reakcija (*hidriranja, oksidacija, halogeniranja, fermentacija* i sl.)

*Mogu raditi:*

- kontinuirano,
- polukontinuirano i
- diskontinuirano

⇒ *pogodni za masovnu proizvodnju kemikalija*

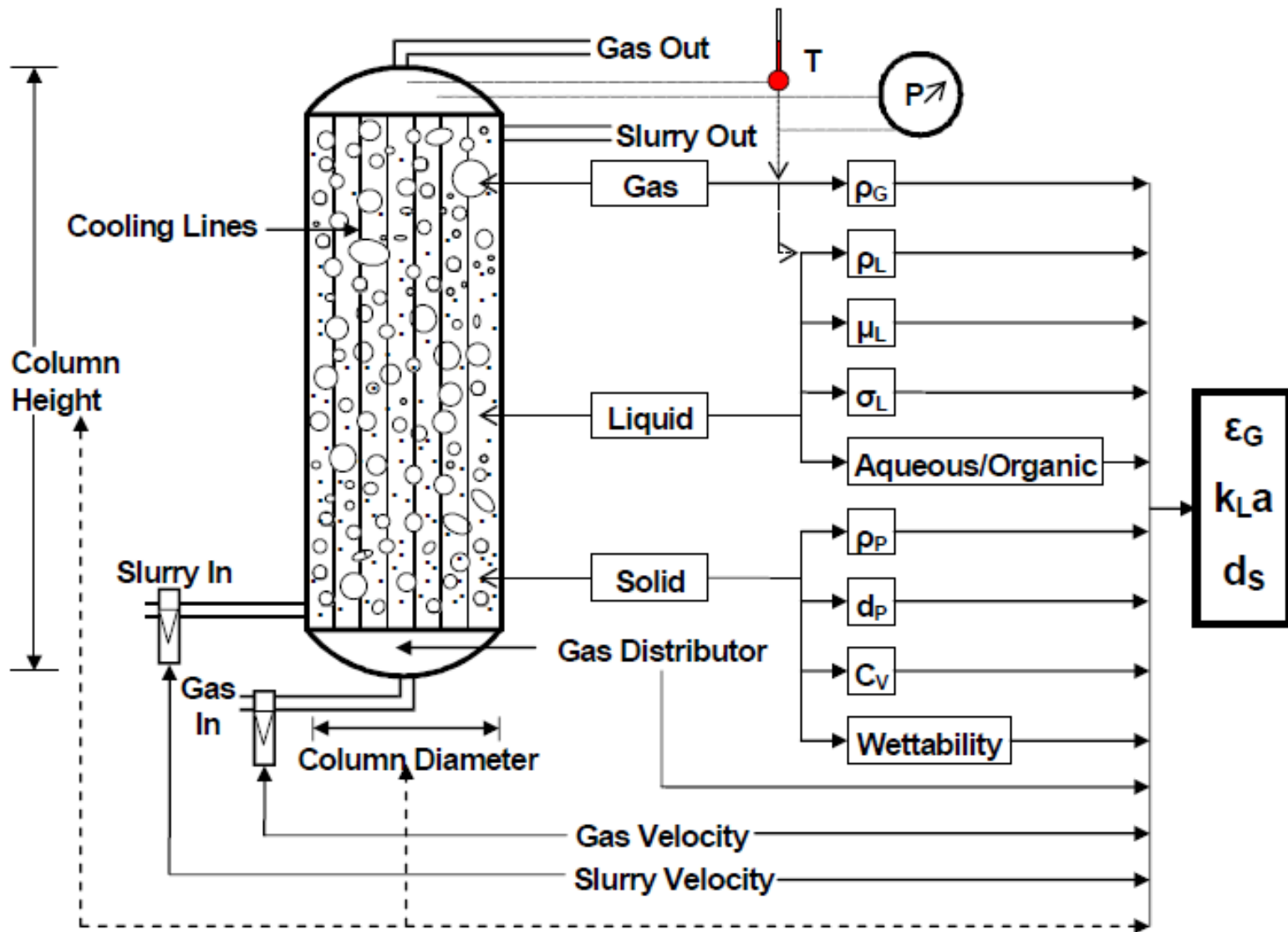
# *Primjer primjene: polimerizacija etilena*



# *Tablica* - Primjeri industrijskih reakcija koje se provode u suspenzijskim reaktorima

Reakcije	Reaktanti		Katalizatori
	<i>plin</i>	<i>kapljevina</i>	
<b>hidriranje</b>	H <sub>2</sub> H <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	masne kiseline 2-butin-1,4-diol glukoza	Ni na nosiocu Pd-CaCO <sub>3</sub> Raney Ni
<b>oksidacija</b>	O <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	inert inert (voda)	PdCl <sub>2</sub> /C aktivni ugljen
<b>hidroformilacija</b>	H <sub>2</sub> , CO	viši olefini	Co ili Rh kompleksi vezani na polimeru
<b>etnilacija</b>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	formaldehid	CaCl <sub>2</sub> na nosiocu

# Utjecaj ključnih parametara i varijabli na rad suspenzijskih reaktora





# Procesi prijenosa u suspenzijskim reaktorima

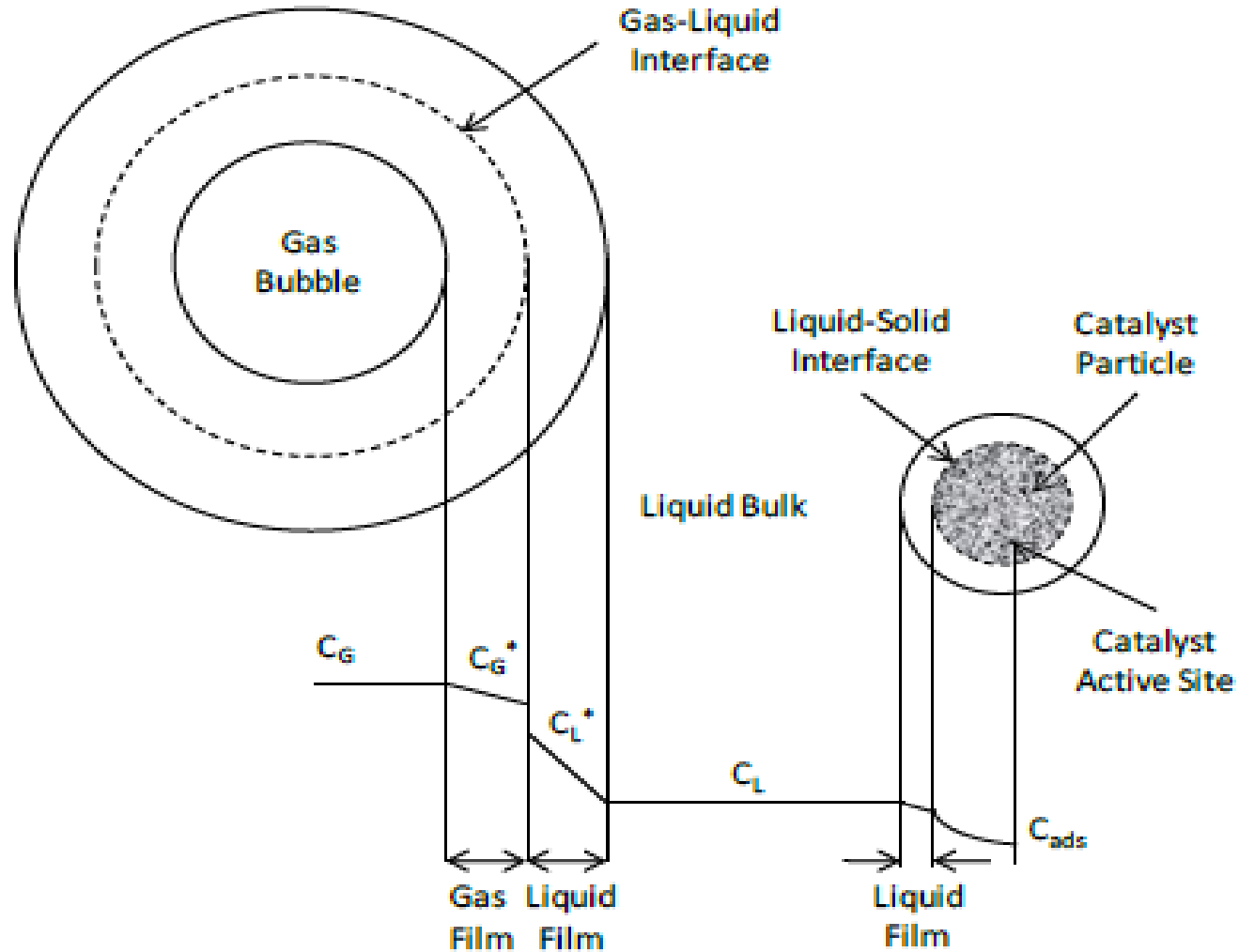
*Proces prijelaza iz reaktanata u produkte odvija se u sljedećih pet koraka:*

1. prijenos reaktanata iz plinske faze do granice faza plin-kapljevina,
2. prijenos reaktanata sa granice faza plin-kapljevina u masu kapljevine,
- ~~3.~~ miješanje i difuzija u masi kapljevine,
4. prijenos reaktanata iz mase kapljevine do vanjske površine zrna katalizatora,
5. difuzija reaktanata u unutrašnjost zrna katalizatora i kemijska reakcija.

*rds*  
*?*

**Zbog prolaska plina kroz kapljevinu i mehaničkog miješanja može se pretpostaviti homogenost u glavnoj masi kapljevine pa se korak 3 može zanemariti.**

# Procesi prijenosa u suspenzijskim reaktorima



*Koncentracijski profil u sustavu s tri faze*

## *rds?* Prijenos tvari plin - kapljevina

Prijenos tvari plin-kapljevina rezultat je difuzije odnosno konvekcije nakon što je plin došao u kontakt s kapljevinom:

$$R_A = K_L a_b [C_A^* - C_{Al}]$$

$k_l, k_g$  - koeficijenti prijenosa tvari za kapljevину, odnosno film plina (dm/s)

H - Henryjeva konstanta,

$a_b$  - površina međufaznog prijenosa tvari plin-kapljevina (dm<sup>2</sup>/dm<sup>3</sup> otopine)

$C_A^*$  - koncentracija otopljenog plina u kapljevini koja je u ravnoteži s koncentracijom u plinskoj fazi

**$K_L$  - ukupni koeficijent prijenosa tvari**

$R_A$  - mol/ (dm<sup>3</sup> otopine · s)

$$\frac{1}{K_L a_b} = \frac{1}{k_l a_b} + \frac{1}{H k_g a_b}$$

# *rds?* Prijenos tvari kapljevina – vanjska površina katalizatora

Brzina prijenosa tvari iz mase kapljevine do površine katalizatora izražava se pomoću izraza:

$$R_A = k_s a_s [C_{Al} - C_{As}] \quad R_A = k_s a_s m [C_{Al} - C_{As}]$$

$$a_s = \frac{6m}{d_p \rho_s}$$

$$\left[ \frac{1}{dm} \right]$$

$k_s$  – koeficijent prijenosa tvari iz mase kapljevine do površine katalizatora (dm/s),

$a_s$  - vanjska površina zrna katalizatora (dm<sup>2</sup>/g),

$m$  - masa katalizatora po jedinici volumena reaktora (g<sub>kat</sub>/dm<sup>3</sup><sub>otopine</sub>),

$d_p$  - promjer zrna katalizatora

$\rho_s$  - gustoća zrna katalizatora

$$R_A - \text{mol} / (\text{dm}^3_{\text{otopine}} \cdot \text{s})$$

# *rds?* Difuzija i reakcija u zrnu katalizatora

Utjecaj difuzije na brzinu reakcije - *definiranje značajke djelotvornosti katalizatora,  $\eta$*

**Opažena brzina reakcije po jedinici mase katalizatora,  $R_A$ :**

$$R_A = \eta R_{As}$$

$R_{As}$ - mol/ (g kat·s)

značajka djelotvornosti  
katalizatora

stvarna brzina reakcije određene  
pri uvjetima koji vladaju na  
vanjskoj površini katalizatora

**Opažena brzina reakcije po jedinici volumena kapljevine:**

$R_A$ - mol/ (dm<sup>3</sup> otopine ·s)

$$R_A = \eta m R_{As}$$

$m$ - masa katalizatora po  
jedinici volumena otopine

# Značajka djelotvornosti, $\eta$

- Za izotermno sferično zrno katalizatora značajka djelotvornosti je funkcija **Thielovog modula,  $\phi$**

$$\eta = \frac{1}{\phi} \left[ \coth 3\phi - \frac{1}{\phi} \right]$$

$\phi$  - Thielov modul  
 $D_e$  - djelotvorni (prosječni)  
koeficijent difuzije

$$\begin{aligned} \phi < 0,2 &\Rightarrow \eta \sim 1, \\ \phi > 5 &\Rightarrow \eta \sim 1/\phi. \end{aligned}$$

**za reakciju prvog reda:**

$$\phi = \frac{d_s}{3} \left[ \frac{\rho_p k_l}{D_e} \right]^{1/2}$$

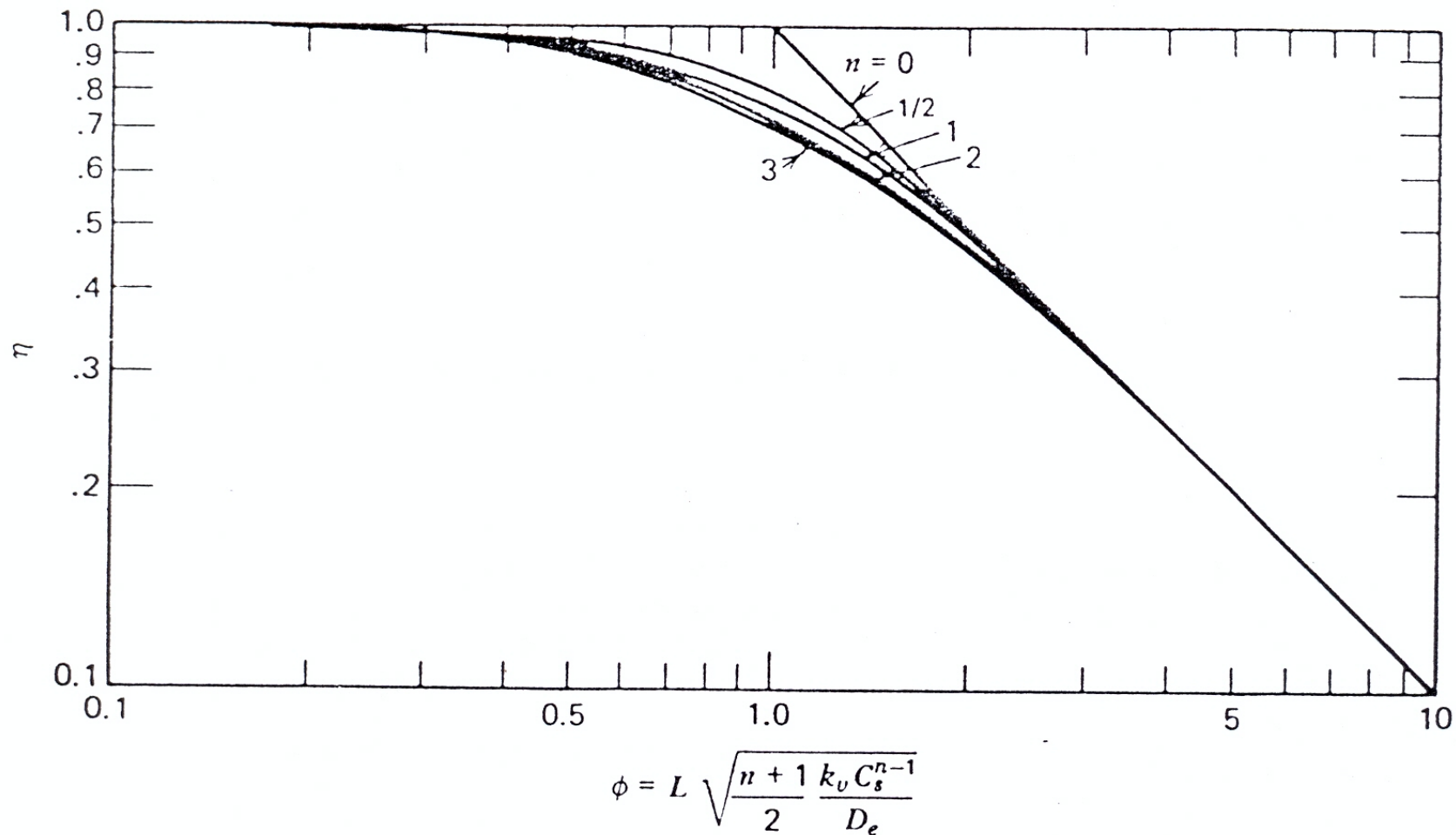
**za reakciju n-tog reda:**

$$\phi = \frac{d_p}{3} \left[ \frac{(n+1)\rho_s k_n c_{As}^{n-1}}{2D_e} \right]^{1/2}$$

$n$ - red reakcije

$k_n$  - konstanta brzine reakcije  $n$ -tog reda

# Ovisnost značajke djelotvornosti o Thielovom modulu za različite redove reakcija



## Određivanje stupnja koji određuje brzinu reakcije

- U stacionarnom stanju brzina prijenosa tvari i brzina kemijske reakcije su jednake:

$$R_A = k_1 a_b [C_A^* - C_{Al}] = k_s a_s [C_{Al} - C_{As}] = \eta m r_{As}$$



brzina prijenosa  
tvari plin-  
kapljevina



brzina prijenosa  
tvari iz mase  
kapljevine do  
površine kat.



opažena brzina reakcije  
po jedinici volumena  
kapljevine

$$r_{As} = kC_{As}$$



sređivanjem:

$$\frac{R_A}{k_l a_b} = C_A^* - C_{Al}$$

$$\frac{R_A}{k_s a_s m} = C_{Al} - C_{As}$$

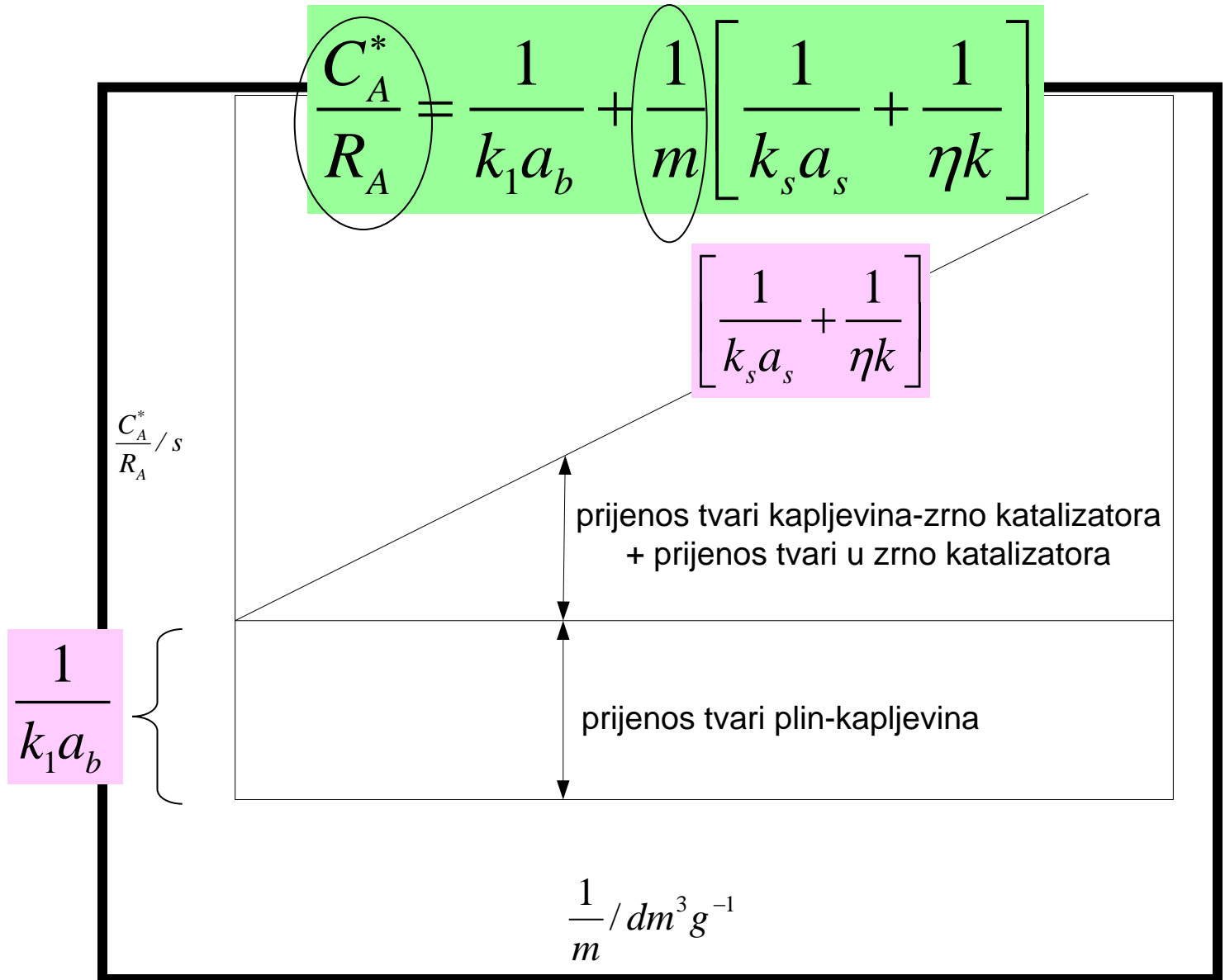
$$\frac{R_A}{\eta m k} = C_{As}$$

$$R_A \left( \frac{1}{k_l a_b} + \frac{1}{k_s a_s m} + \frac{1}{\eta k m} \right) = C_A^*$$



$$\frac{C_A^*}{R_A} = \frac{1}{k_l a_b} + \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{k_s a_s} + \frac{1}{\eta k} \right]$$

# Određivanje utjecaja otpora prijenosu tvari na brzinu reakcije



# *Tablica* - Varijable koje utječu na opaženu brzinu reakcije u suspenzijskom kotlastom reaktoru - 1

Varijable koje imaju	Stupanj koji kontrolira brzinu reakcije
	<b>PRIJENOS TVARI PLIN-KAPLJEVINA</b>
<i>velik utjecaj</i>	Brzina miješanja Izvedba reaktora (mješalo, raspršivač plina, razbijači, itd.) Koncentracija reaktanta u plinskoj fazi
<i>malen utjecaj</i>	Temperatura
<i>neznatan utjecaj</i>	Koncentracija reaktanta u kapljevitoj fazi Masa katalizatora Veličina zrna katalizatora Koncentracija aktivne komponente na katalizatoru

# *Tablica* - Varijable koje utječu na opaženu brzinu reakcije u suspenzijskom kotlastom reaktoru - 2

Varijable koje imaju	Stupanj koji kontrolira brzinu reakcije	
	<b>PRIJENOS TVARI KAPLJEVINA-KRUTINA (PLINOVITI REAKTANT)</b>	<b>PRIJENOS TVARI KAPLJEVINA-KAPLJEVINA (KAPLJEVITI REAKTANT)</b>
<i>velik utjecaj</i>	Masa katalizatora Veličina zrna katalizatora Konc. reaktanta u pl. fazi	Masa katalizatora Veličina zrna katalizatora Konc. reaktanta u kaplj. fazi
<i>malen utjecaj</i>	Temperatura Brzina miješanja Izvedba reaktora Viskoznost Relativna gustoća	Temperatura Brzina miješanja Izvedba reaktora Viskoznost Relativna gustoća
<i>neznatan utjecaj</i>	Koncentracija reaktanta u kaplj. fazi Koncentracija akt. komp. na kat.	Koncentracija reaktanta u pl. fazi Koncentracija akt. komp. na kat.

# Tablica - Varijable koje utječu na opaženu brzinu reakcije u suspenzijskom kotlastom reaktoru - 3

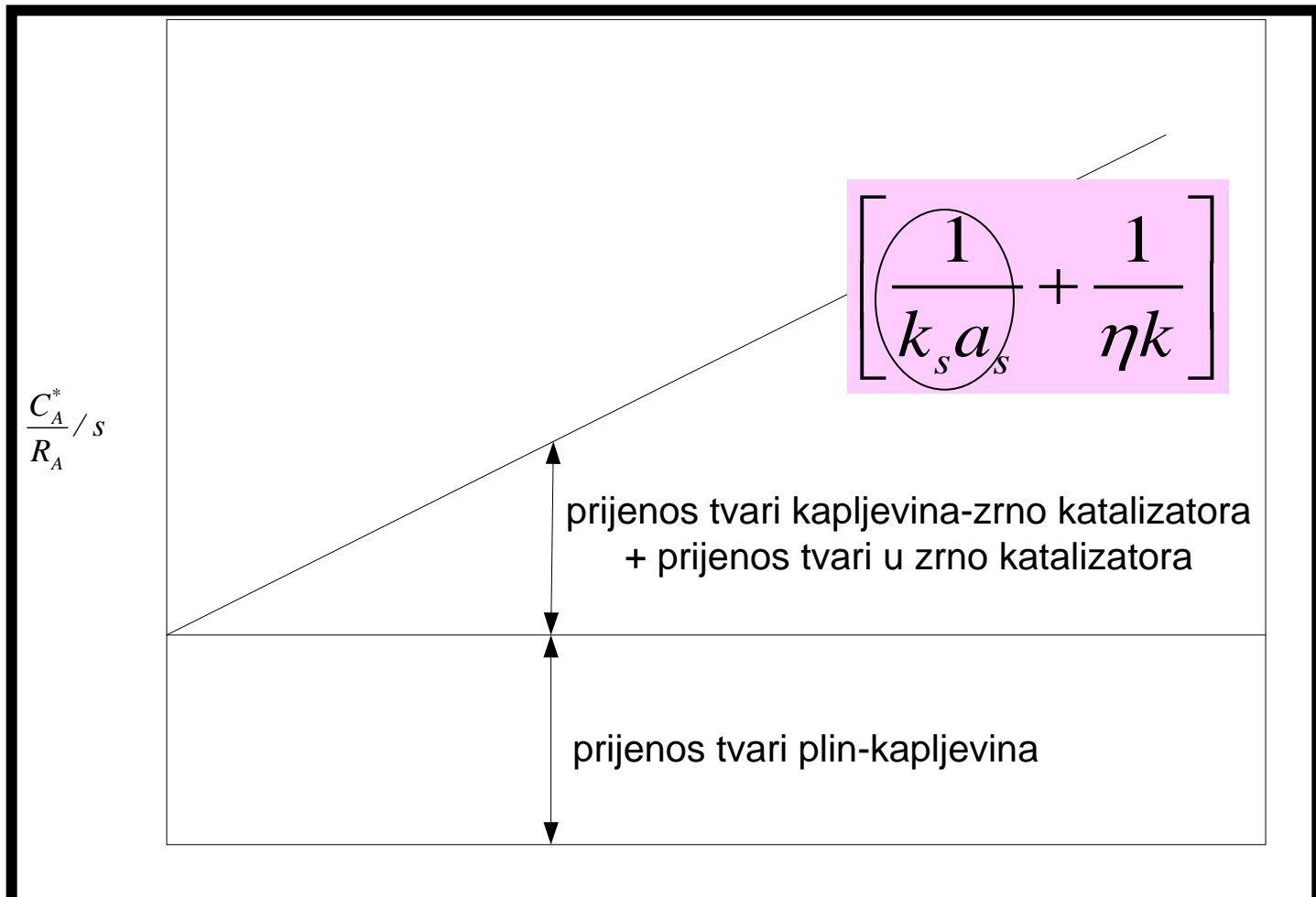
Varijable koje imaju	Stupanj koji kontrolira brzinu reakcije	
	<b>KEMIJSKA REAKCIJA (NEZNATAN OTPOR DIFUZIJI U PORE)</b>	<b>KEMIJSKA REAKCIJA (ZNATAN OTPOR DIFUZIJI U PORE)</b>
<i>velik utjecaj</i>	Temperatura Masa katalizatora Koncentracija reaktanta Konc. aktivne komp. na kat.	Masa katalizatora Koncentracija reaktanta Temperatura Veličina zrna katalizatora Konc. aktivne komp. na kat.
<i>malen utjecaj</i>		Struktura pora
<i>neznatan utjecaj</i>	Brzina miješanja Izvedba reaktora Veličina zrna katalizatora	Brzina miješanja Izvedba reaktora

# Eksperimentalne metode i korelacije za izračunavanje koeficijenata prijenosa tvari

*Da bi se razdvojio otpor prijenosa tvari do površine katalizatora od otpora difuziji reaktanta u unutrašnjost zrna katalizatora mogući su sljedeći pristupi:*

1. Koeficijent prijenosa tvari kapljevina-zrno katalizatora odredi se pomoću odgovarajuće korelacije. Vrijednost za konstantu brzine reakcije ( $k$ ) dobije se oduzimanjem vrijednosti koeficijenta prijenosa tvari do površine katalizatora ( $k_s$ ) od ukupne vrijednosti nagiba pravca

# Određivanje utjecaja otpora prijenosu tvari na brzinu reakcije

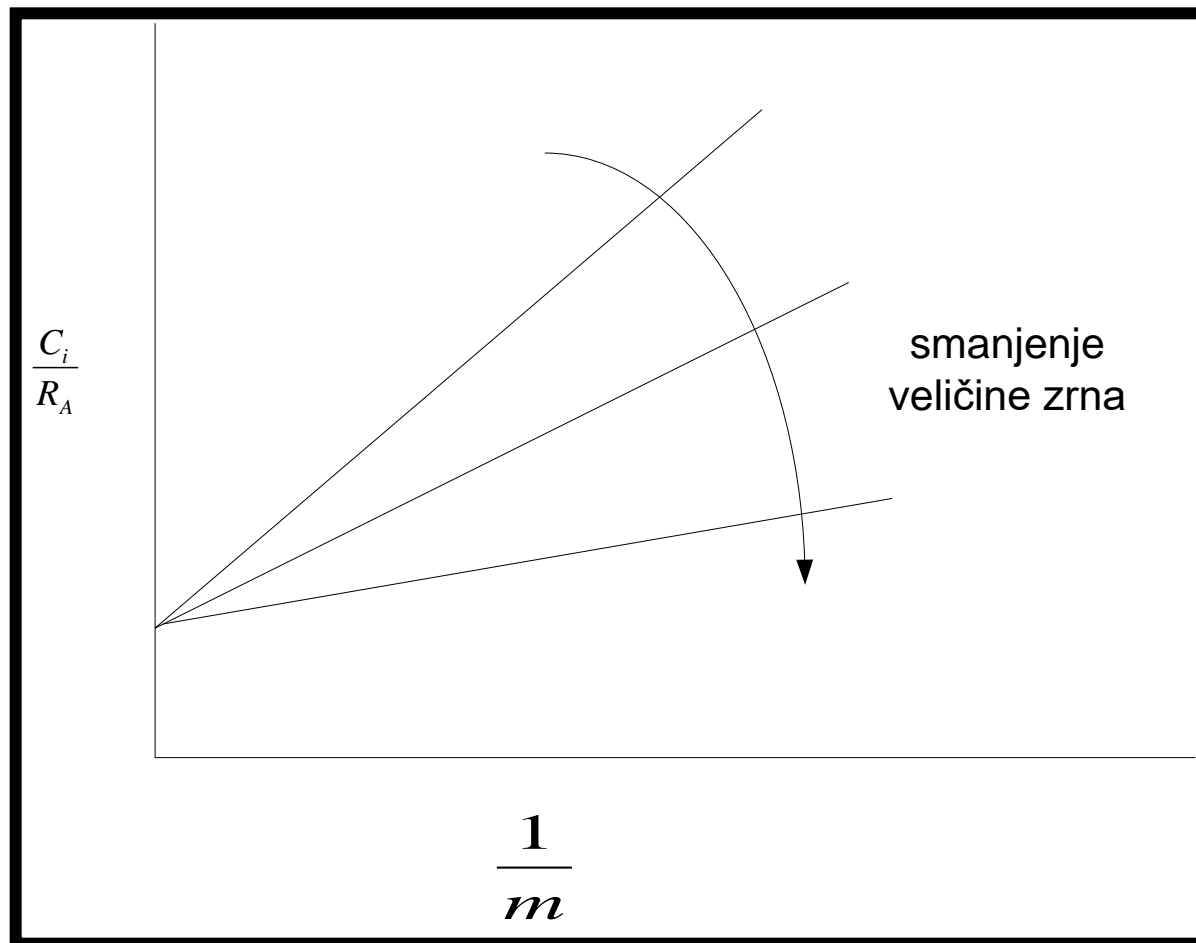


$$\frac{C_A^*}{R_A} = \frac{1}{k_1 a_b} + \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{k_s a_s} + \frac{1}{\eta k} \right]$$

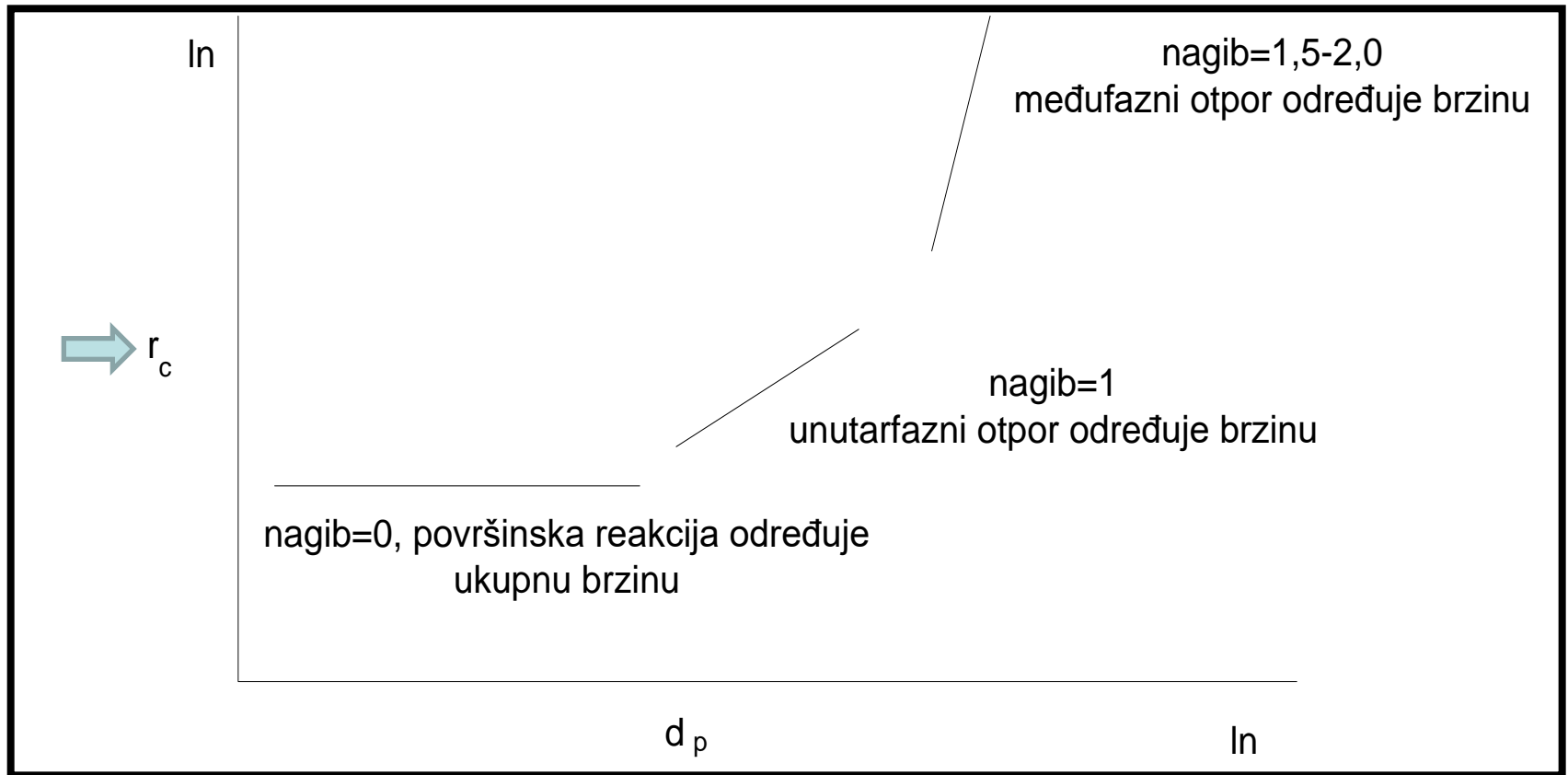
$$\frac{1}{m} / dm^3 g^{-1}$$

# Eksperimentalne metode i korelacije za izračunavanje koeficijenta prijenosa tvari

2. Eksperimentalno se odredi vrijednost nagiba pravca za različite veličine zrna katalizatora







Ovisnost nagiba pravca,  $r_c = 1/k_s a_s + 1/\eta k$  o veličini zrna katalizatora,  
 $r_c = f(d_p)$

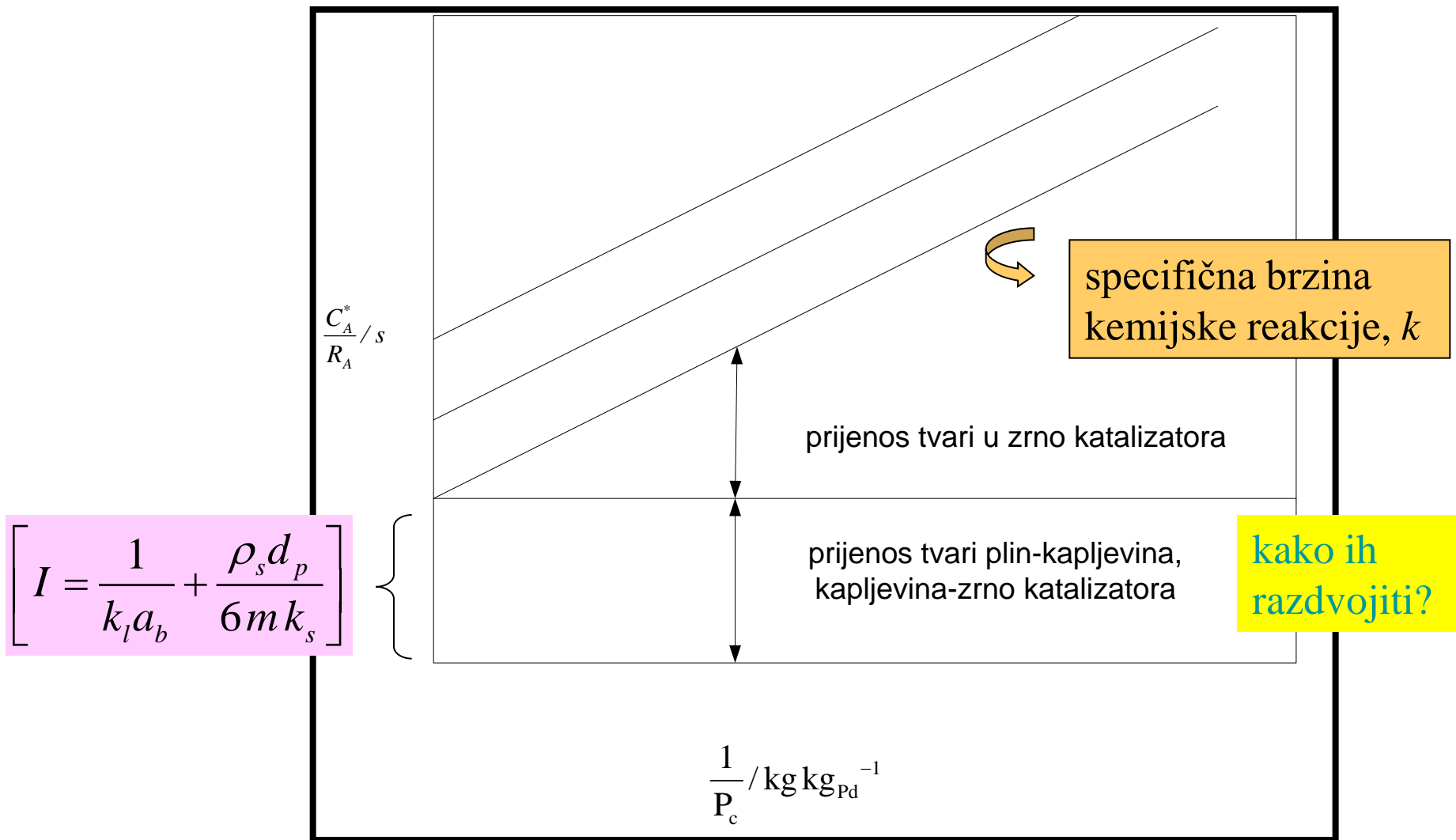
$$a_s = 6m/d_p \rho_s$$

# Eksperimentalne metode i korelacije za izračunavanje koeficijenata prijenosa tvari

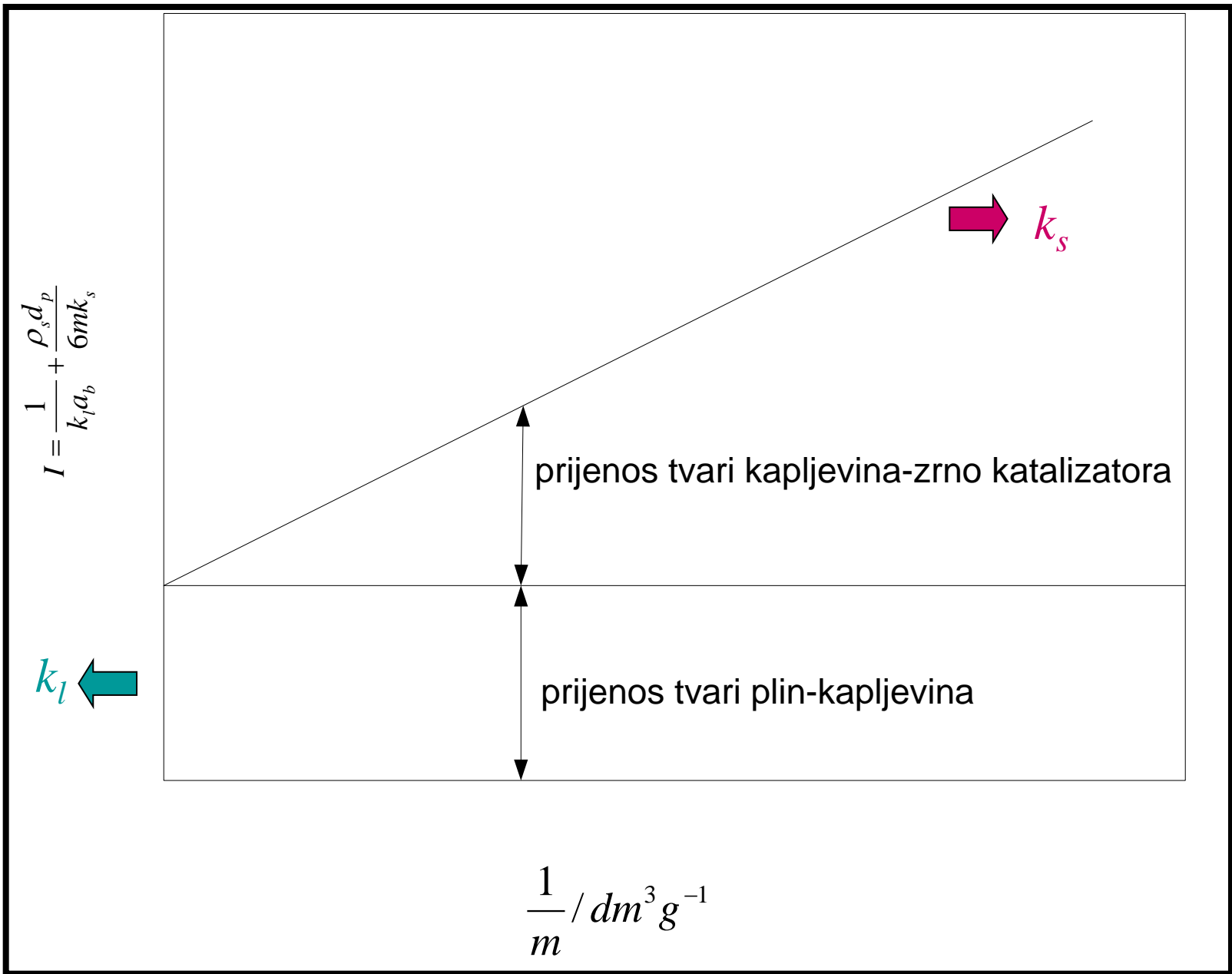
3. Prati se ovisnost nagiba pravca  $r_c = 1/k_s a_s + 1/\eta k$  o temperaturi:

- ako je otpor prijenosu tvari kapljevina-zrno značajan  $\Rightarrow$  energija aktivacije je mala (4,2-12,5 J/mol),
- ako je energija aktivacije velika  $\Rightarrow$  kemijska reakcija je najsporiji proces.

# Eksperimentalno određivanje fizičkih i kinetičkih parametara



Ovisnost brzine reakcije o koncentraciji katalitički aktivne tvari



**Kriteriji pomoću kojih se može odrediti da li se reakcija odigrava u kinetičkom području (tj. kod uvjeta koji vladaju na vanjskoj površini katalizatora)**

**Weisz-Praterov kriterij:**

$$\phi = \frac{d_H^2}{D_H} \left( -\frac{1}{V} \frac{dn}{dt} \right) \frac{1}{C_A} < 0,1$$

**Chaudhari-Chandrashekarovi kriteriji:**

$$\alpha_1 = \frac{r_A}{k_l a_b C_A^*} < 0,1$$

$$\alpha_2 = \frac{r_A \rho_s d_p}{k_l a_b C_A^*} < 0,1$$

# KORELACIJE - koeficijent prijenosa tvari plin – kapljevina, $k_l$

***K. van't Riet:***

$$k_l a_b = c \left( \frac{P}{V} \right)^\alpha u_g^\beta$$

$$k_l a_b = c N^\alpha d_M^\beta u_g$$

$P$  - snaga miješanja

$V$  - volumen kapljevine

$u_g$  - linearna brzina plina

$a_b$  - površina međufaznog prijenosa tvari plin-kapljevina ( $\text{dm}^2/\text{dm}^3$  otopine)

$P/V$  - snaga miješanja po jedinici volumena kapljevine/suspenzije

$N$  - broj okretaja mješala

$d_M$  - promjer mješala

Vrijednost koeficijenata:

$$0,4 < \alpha < 1$$

$$0 < \beta < 0,7$$

$$c=1 \text{ (uglavnom)}$$

## *Chalderbank i Moo-Young:*

- za promjer mjehurića plina  $> 2,5$  cm

$$k_l = 0,42 \left[ \frac{(\rho_l - \rho_g) \mu_l g}{\rho_l^2} \right]^{1/3} \left[ \frac{D \rho_l}{\mu_l} \right]^{1/2}$$

$\rho_l, \rho_g$  - gustoća kapljevine i plina

$\mu_l$  - viskozitet kapljevine

$D$  - molekularni koeficijent difuzije

## Površina međufaznog prijenosa plin-kapljevina, $a_b$

$$a_b = 1,44 \frac{(P/V)^{0,4} \rho_l^{0,2}}{\sigma^{0,6}} \left( \frac{u_g}{u_t} \right)^{0,5}$$

$\sigma$  - površinska napetost kapljevine

$u_t$  - brzina uspona mjehurića kroz kapljevinu

*Gornji izraz vrijedi ako je:*

$$\left[ \frac{d_M^2 N \rho_l}{\mu_l} \right]^{0,7} \left[ \frac{N d_b}{u_g} \right] < 20000$$

$d_b$  – promjer mjehurića plina



## Površina međufaznog prijenosa plin-kapljevina, $a_b$

$$a_b = 6\varepsilon / d_b$$

$d_b$  – promjer mjehurića plina  
 $\varepsilon$  - zadržka plina



*Izračunavanje promjera mjehurića plina:*

$$d_b = 4,15 \frac{\sigma^{0,6}}{\left(\frac{P}{V}\right)^{0,4} \rho_l^{0,2}} \varepsilon^{1/2} + 0,09$$



snaga miješanja

## *Izračunavanje zadržke plina:*

$$\varepsilon = \left[ \frac{u_g \varepsilon}{u_t} \right]^{1/2} + 0,0216 \frac{\left[ \frac{P}{V} \right]^{0,4} \rho_l^{0,2}}{\rho^{0,6}} \left[ \frac{u_g}{u_t} \right]^{1/2}$$

## *Izračunavanje snage miješanja po jedinici volumena suspenzije:*

$$\frac{P}{V} = \frac{N_p N^3 d_M^5 \psi}{V}$$

$N_p$  - broj snage izražen kao funkcija rotirajućeg Reynoldsa ( $N d_M^2 \rho_l / \mu_l$ ) (iz grafičkog prikaza)

$\psi$  - korekcijski faktor



## *Izračunavanje korekcijskog faktora:*

vrijedi ako je:

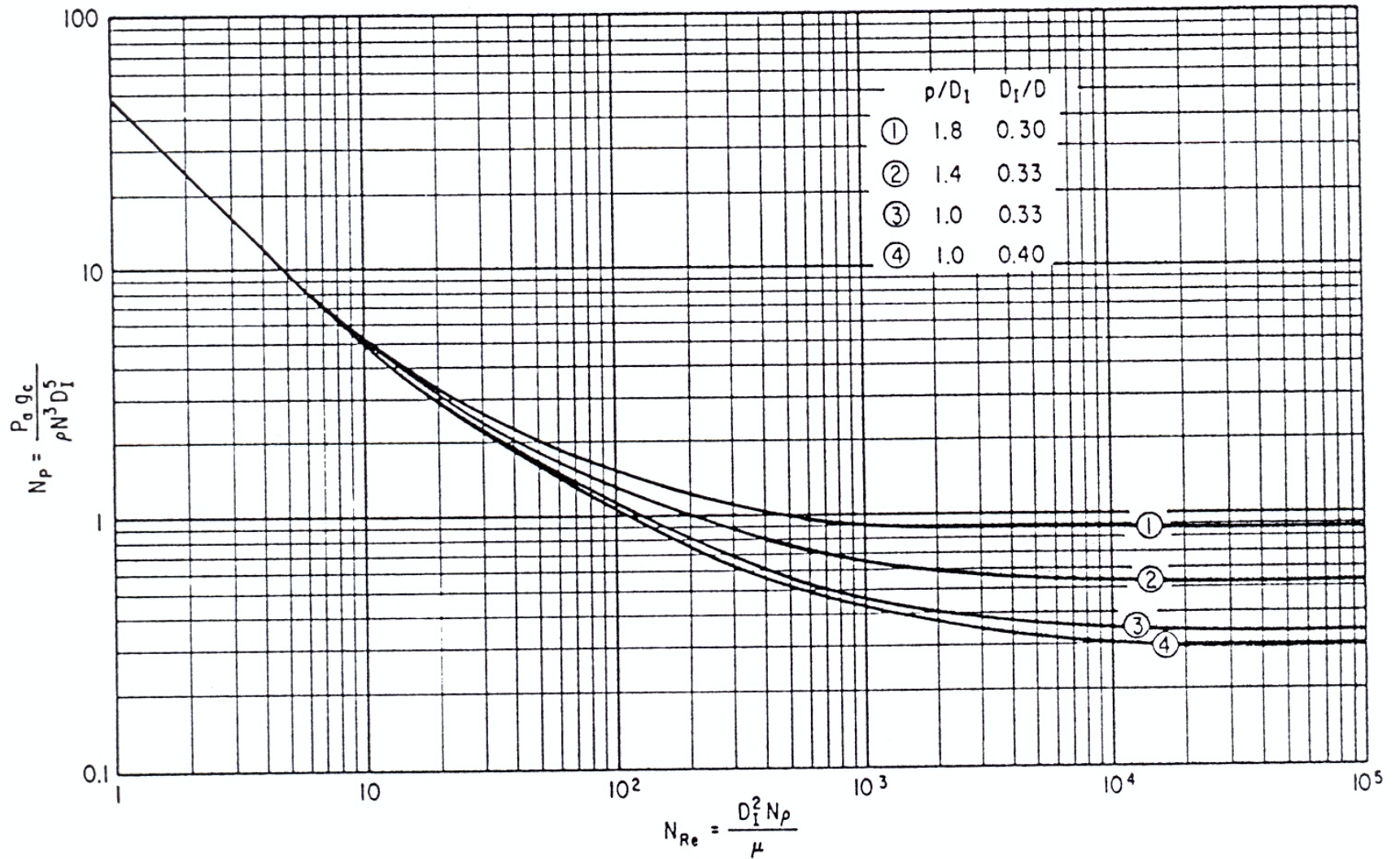
$$\psi = 1,0 - 1,26 \left[ \frac{\nu}{Nd_M^3} \right]$$

$$\nu / Nd_M^3 < 0,035$$

$$\psi = 0,62 - 1,85 \left[ \frac{\nu}{Nd_M^3} \right]$$

$$\nu / Nd_M^3 > 0,035$$

$\nu$  - volumna brzina



Ovisnost broja snage,  $N_p$  o rotirajućem Reynoldsu,  $Re$ .

# ***KORELACIJE – izračunavanje koeficijenta prijenosa tvari kapljevina - zrno katalizatora, $k_s$***

Minimalna vrijednost za koeficijent prijenosa tvari kapljevina-krutina,  $k_{s, min}$

$$k_s = \frac{2D}{d_p}$$

$$Sh = 2 = \frac{k_s d_p}{D}$$

Za zrno katalizatora oblika kugle:

$$a_s = \frac{6m}{\rho_s d_p}$$

$$(k_s a_s)_{\min} = \frac{12mD}{\rho_s d_p^2} \quad (\text{grubi proračun!})$$

Uobičajene korelacije u literaturi imaju sljedeći oblik:

$$Sh = \frac{k_s d_p}{D} = 2 + c Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad 0,3 < c < 1$$

*Satterfield:*

$$Sh = \frac{1,09}{\varepsilon} Re^{1/3} Sc^{1/3}$$

$$Re = 0,0016-55$$

$$Sh = \frac{0,25}{\varepsilon} Re^{0,69} Sc^{1/3}$$

$$Re = 55-1500$$

$\varepsilon$  - poroznost kat. sloja

**Brian i Hales** (odnos Sherwoodovog,  $Sh = k_s d_p / D$  i Pecletovog broja,  $Pe = U d_p / D$ ):



$$\left( \frac{k_s d_p}{D} \right)^2 = 4,0 + 1,2 Pe^{2/3}$$

$U$  - relativna brzina kapljevina - čvrsta čestica:

**Stokes:**

$$U = \frac{g d_p^2 \Delta \rho}{18 \mu_l}$$

$$Pe = \frac{g d_p^3 \Delta \rho}{18 \mu_l D}$$

? *Parametri:* viskoznost, površinska napetost, gustoća, koef. difuzije i sl.

⇒ iz tablica (npr. **R.C. Reid i sur.**, The Properties of Gases and Liquids, McGraw Hill, N.Y., 1977.)