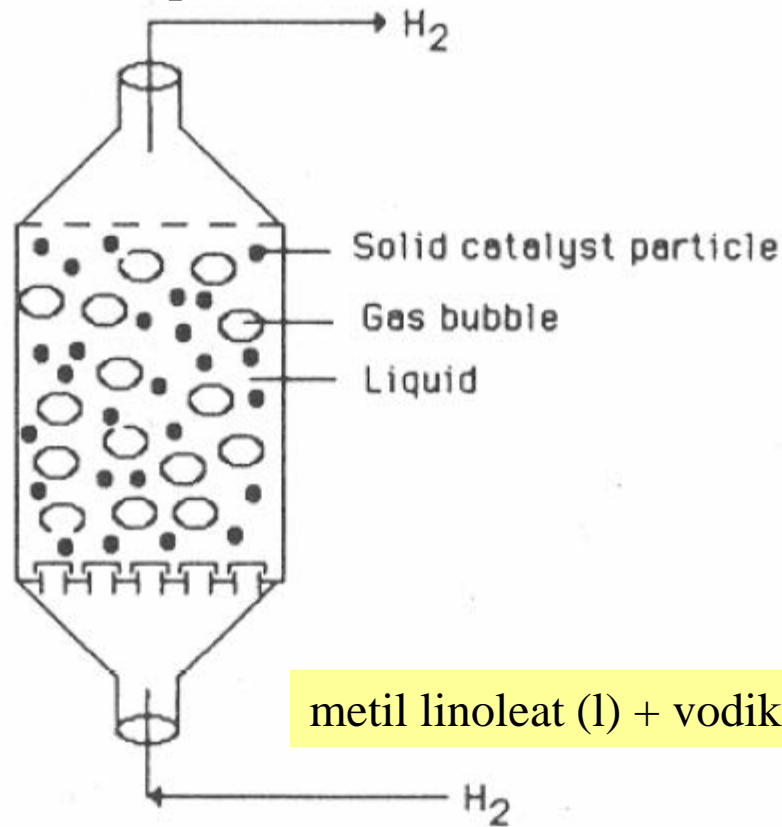


Reaktori sa suspendiranim slojem katalizatora
(engl. *Suspended-bed reactor*)

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*

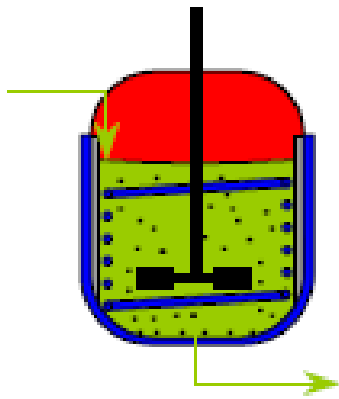
- plin i katalizator raspodijeljeni su u relativno velikom volumenu kapljevine (velik volumen reaktora)
- reaktanti se uvode u donjim dijelovima reaktora zajedno s katalizatorom suspendiranim u kapljevini \Rightarrow homogena raspodjela temperature (prikladni za provedbu egzotermnih reakcija; velik topl. 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 kapljevinu moguć je:

kontinuiran,
polukontinuiran,
diskontinuirani rad.

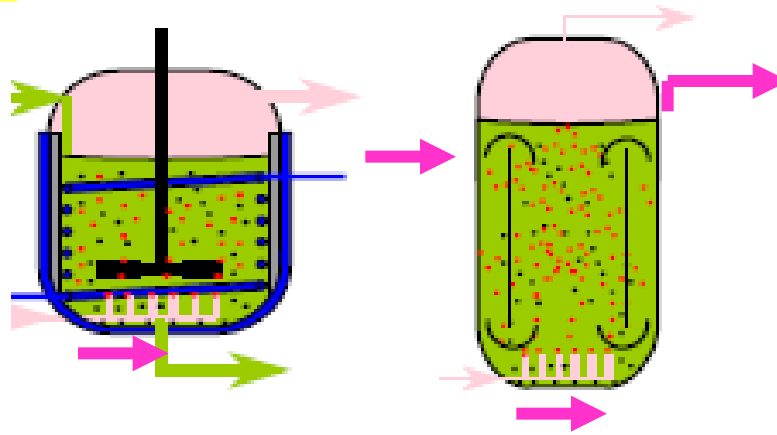
Različite izvedbe suspenzijskih reaktora

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 ≈ 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 kapljevina),
- 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

Značajke	Prokapni reaktor	Suspenzijski reaktor
<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

Značajke	Prokapni reaktor	Suspenzijski reaktor
<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

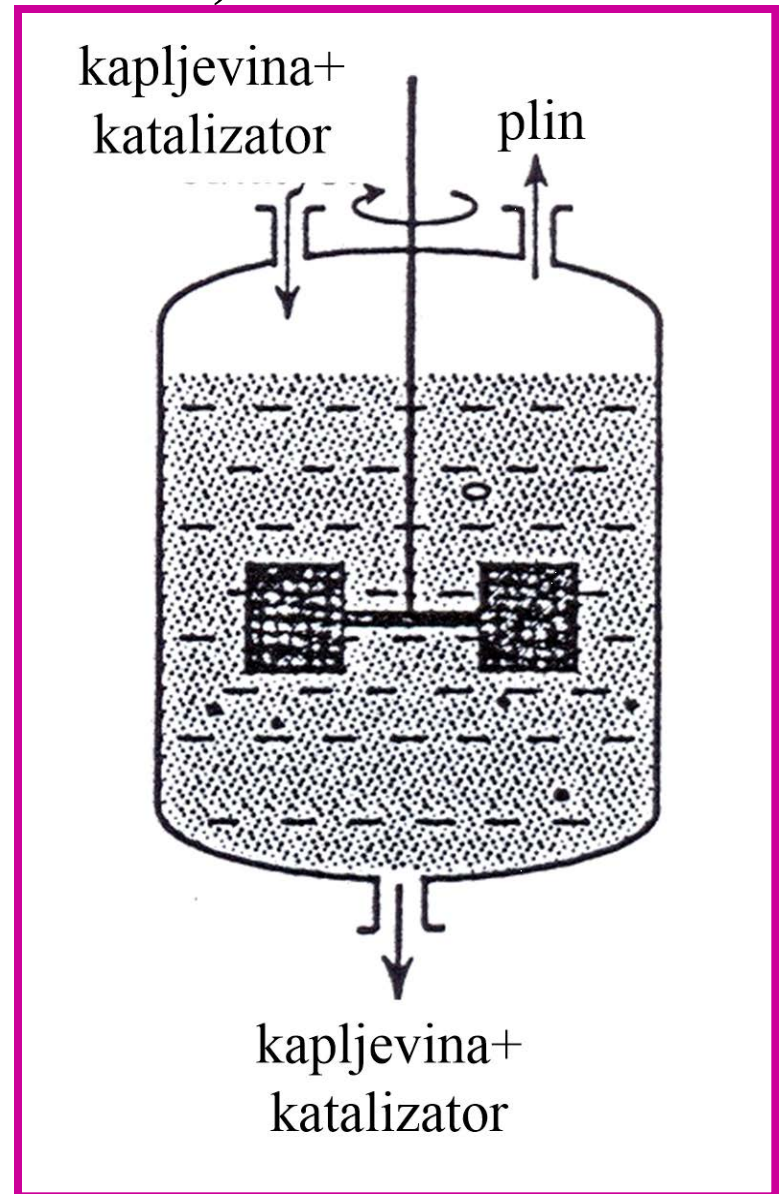
S obzirom na kapljevinu mogu biti:

- 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 regeneracije katalizatora (dio suspenzije se odvodi, katalizator se regenerira i vraća u reaktor)

Nedostaci:

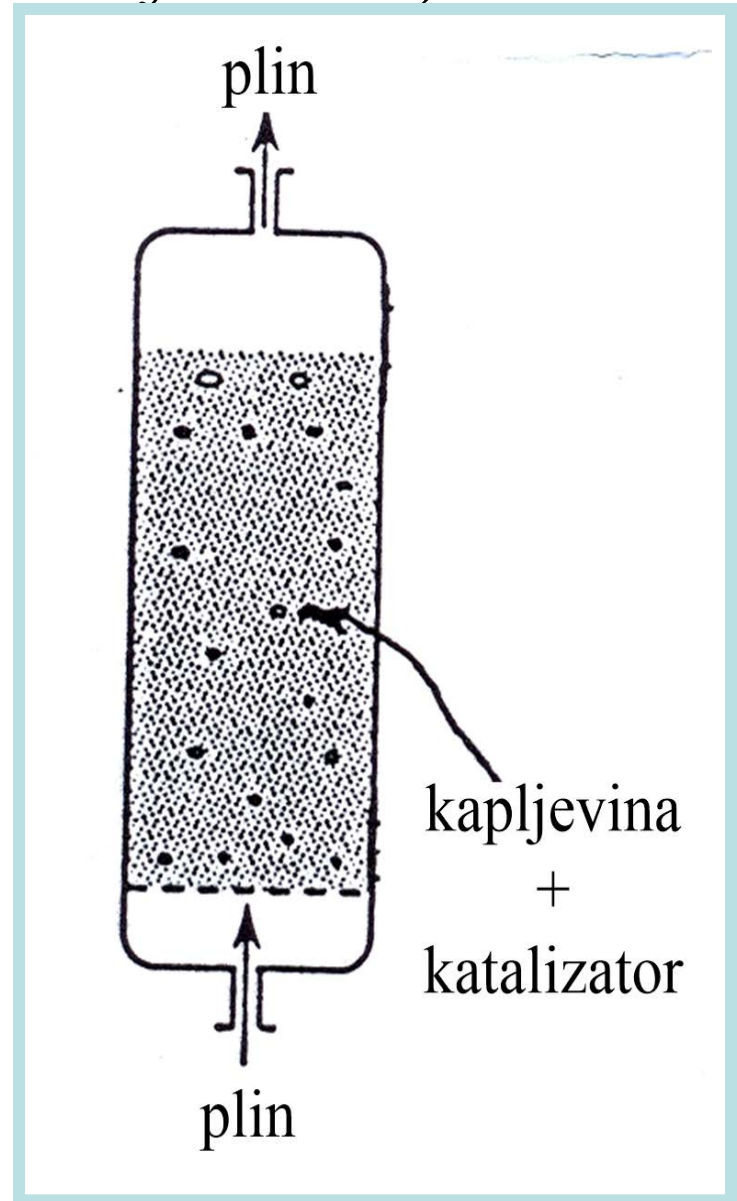
- do sada publicirani podaci teško se primjenjuju pri izvedbi reaktora,
- problem iznalaženja otapala u kojem će reaktanti biti topljivi i koje će biti inertno s obzirom na reaktante, katalizator i produkte



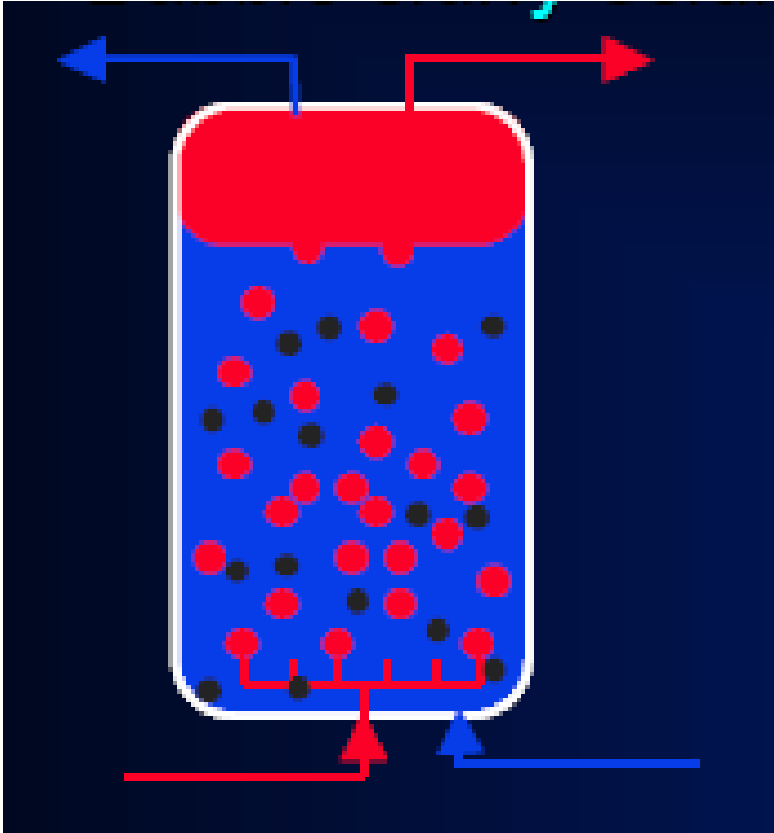
Delft University

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.*

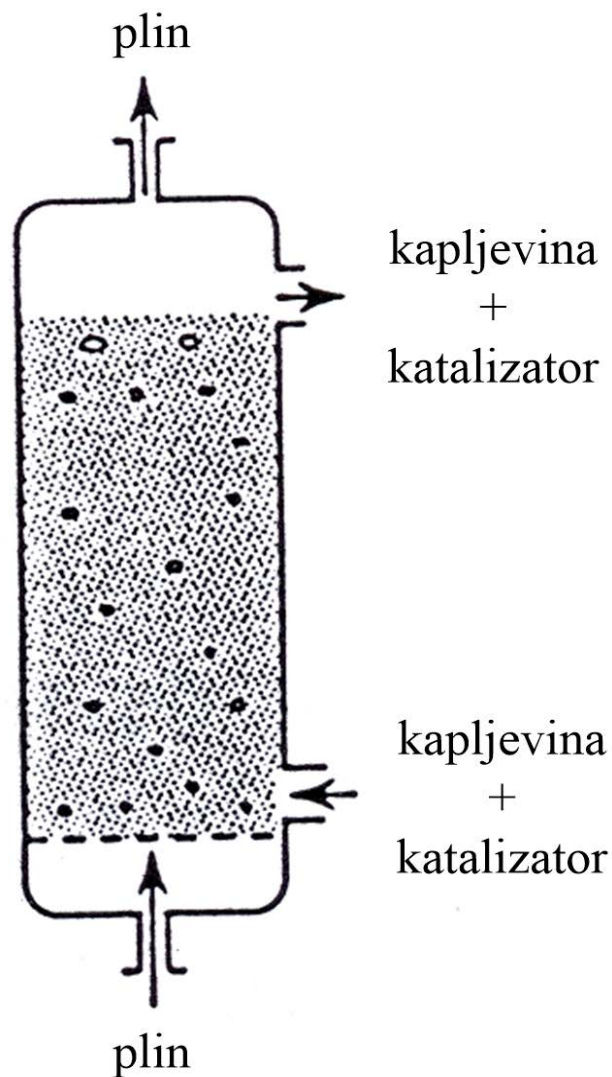


Suspenzijski kolonski reaktor (engl. *Bubbling slurry reactor*)



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

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

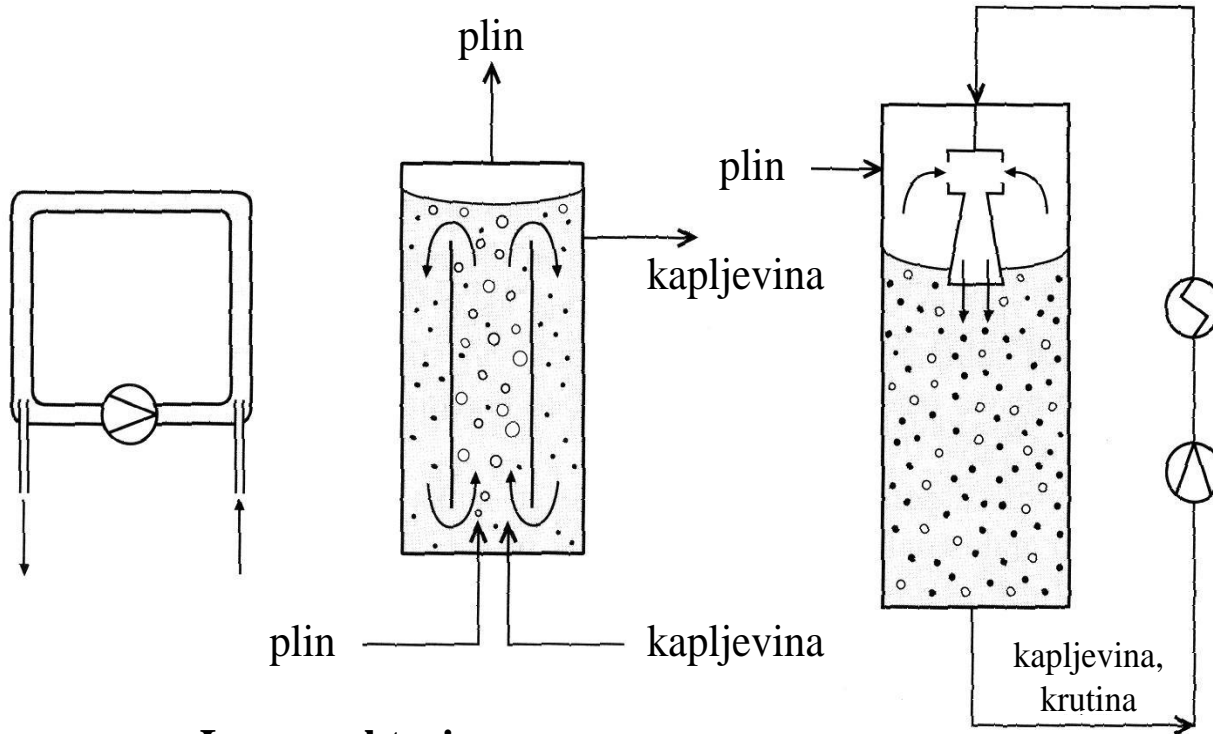


- *Katalizator suspendiran u kapljevini zahvaljujući plinu i kapljevini koji prolaze kroz reaktor od dna prema vrhu*
- *Kapljevita faza odgovorna je za održavanje suspenzije*
- Reaktor radi isključivo kontinuirano s obzirom na obje faze.
- Brzina strujanja kapljevine ne smije biti veća od brzine taloženja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

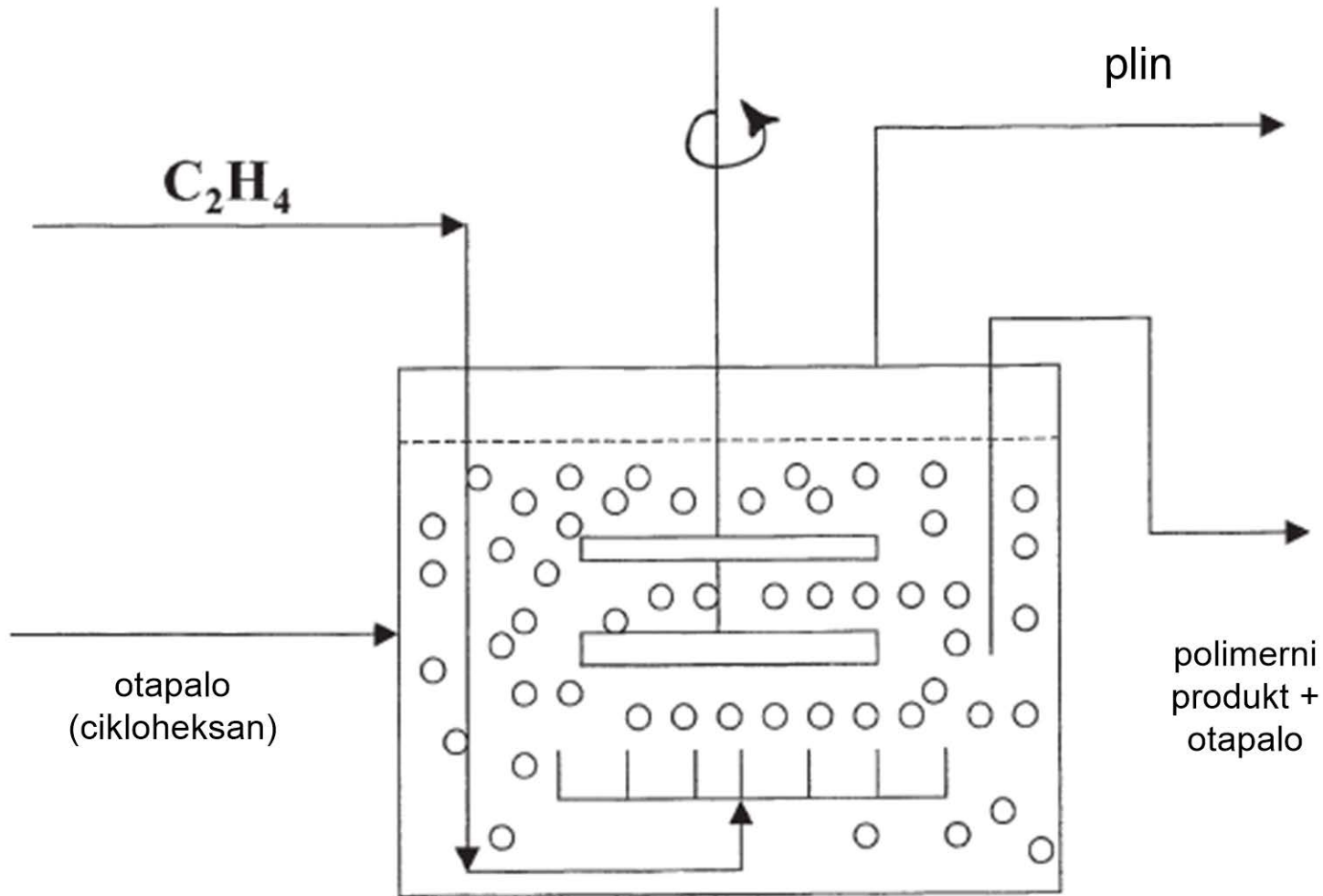
za provedbu reakcija (*hidriranja, oksidacija, halogeniranja, fermentacija* i sl.)

Mogu raditi:

- kontinuirano,
- polukontinuirano i
- diskontinuirano

⇒ *pogodni za masovnu proizvodnju kemikalija*

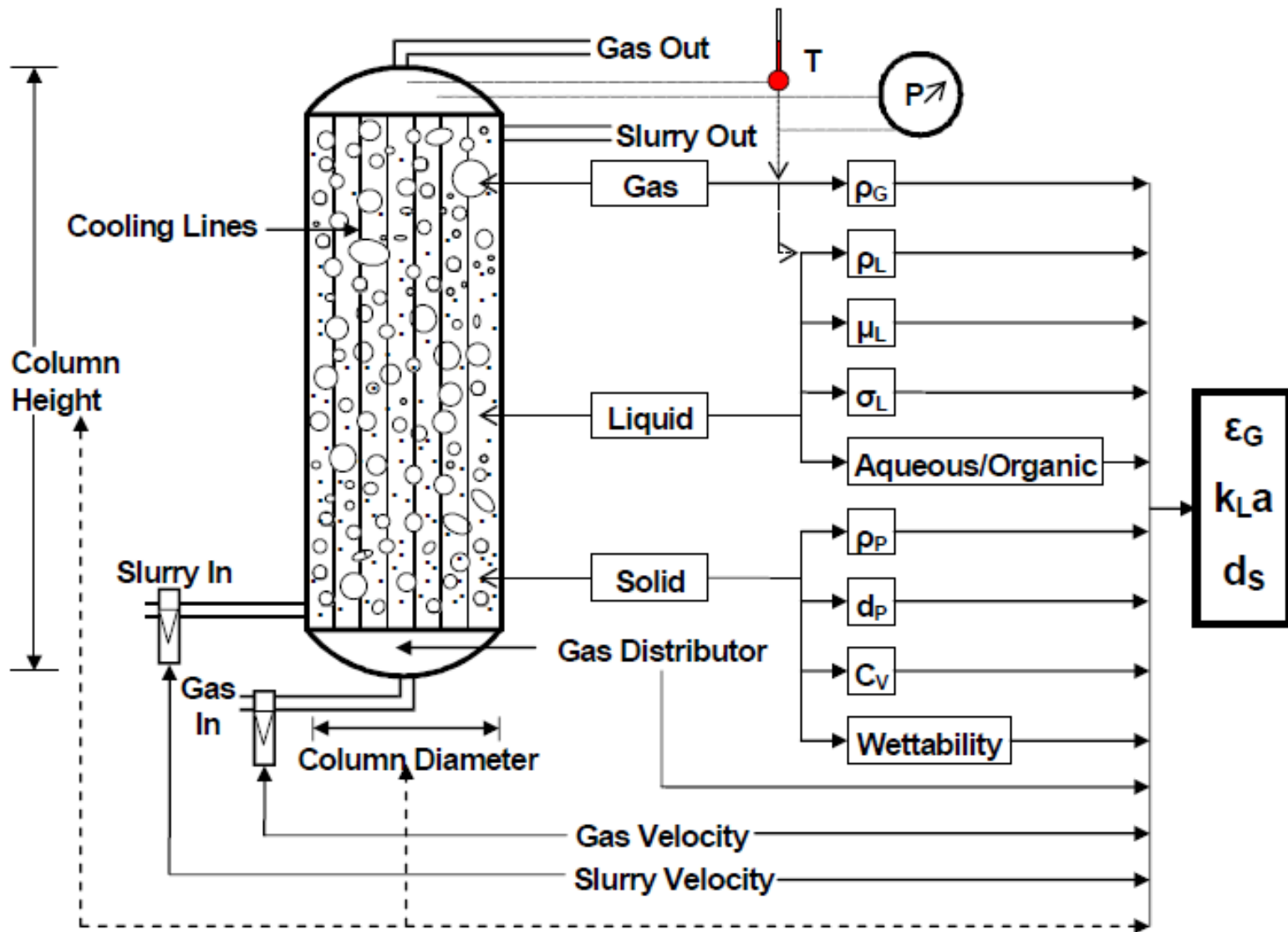
Primjer primjene: polimerizacija etilena



Tablica - Primjeri industrijskih reakcija koje se provode u suspenzijskim reaktorima

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

Utjecaj ključnih parametara i varijabli na rad suspenzijskih reaktora



Procesi prijenosa u suspenzijskim reaktorima

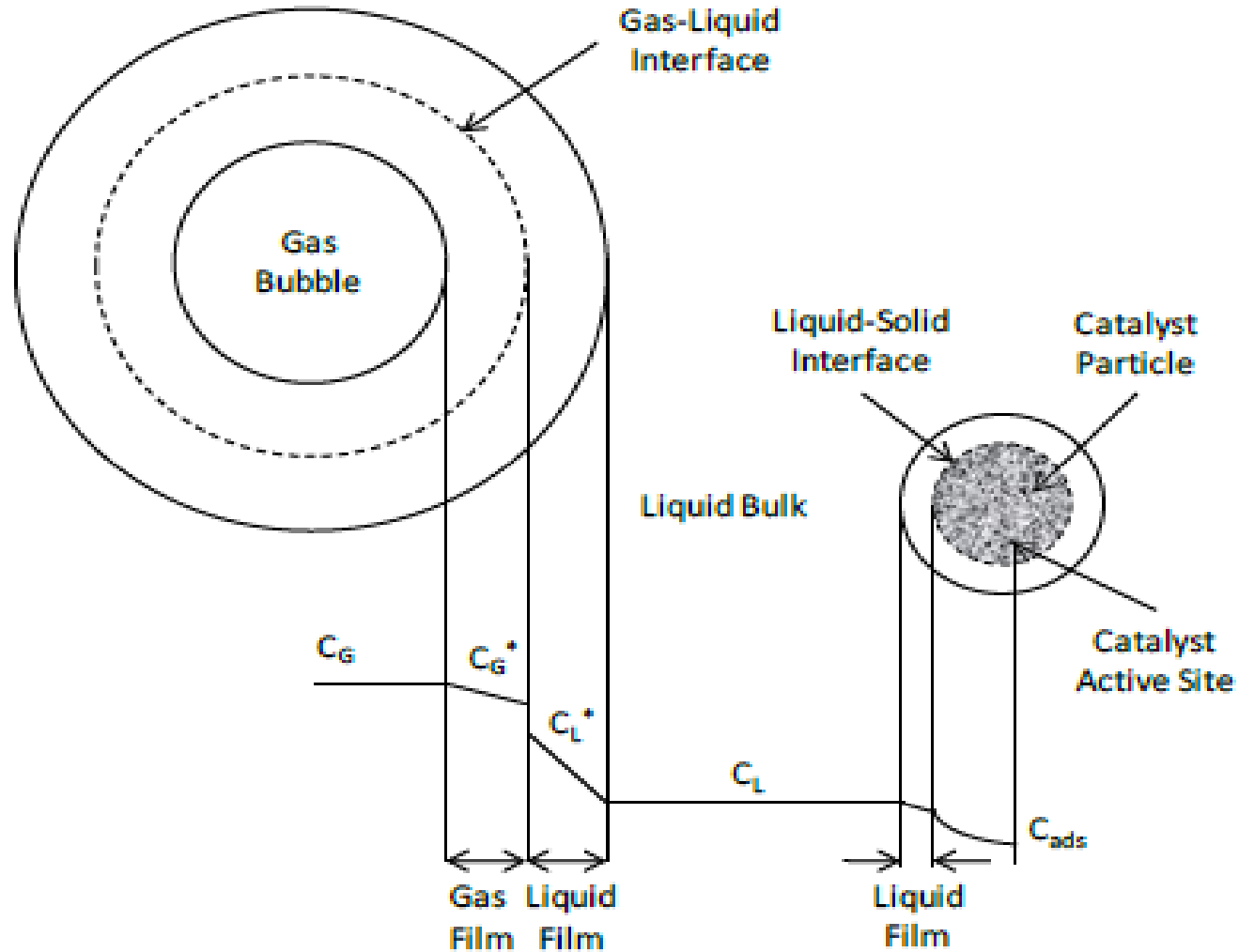
Proces prijelaza iz reaktanata u produkte odvija se u sljedećih pet koraka:

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 kapljevinu, odnosno film plina (dm/s)

H - Henryjeva konstanta,

a_b - površina međufaznog prijenosa tvari plin-kapljevina (dm²/dm³ 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/ (dm³ 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 (dm²/g),
 m - masa katalizatora po jedinici volumena reaktora (g kat/dm³ otopine),
 d_p - promjer zrna katalizatora
 ρ_s - gustoća zrna katalizatora

R_A - mol/ (dm³ otopine · s)

rds? Difuzija i reakcija u zrnu katalizatora

Utjecaj difuzije na brzinu reakcije - *definiranje značajke djelotvornosti katalizatora, η*

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/ (dm³ otopine ·s)

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

m - masa katalizatora po
jedinici volumena otopine

Značajka djelotvornosti, η

- Za izotermno sferično zrno katalizatora značajka djelotvornosti je funkcija **Thielovog modula, ϕ**

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

ϕ - 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:

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

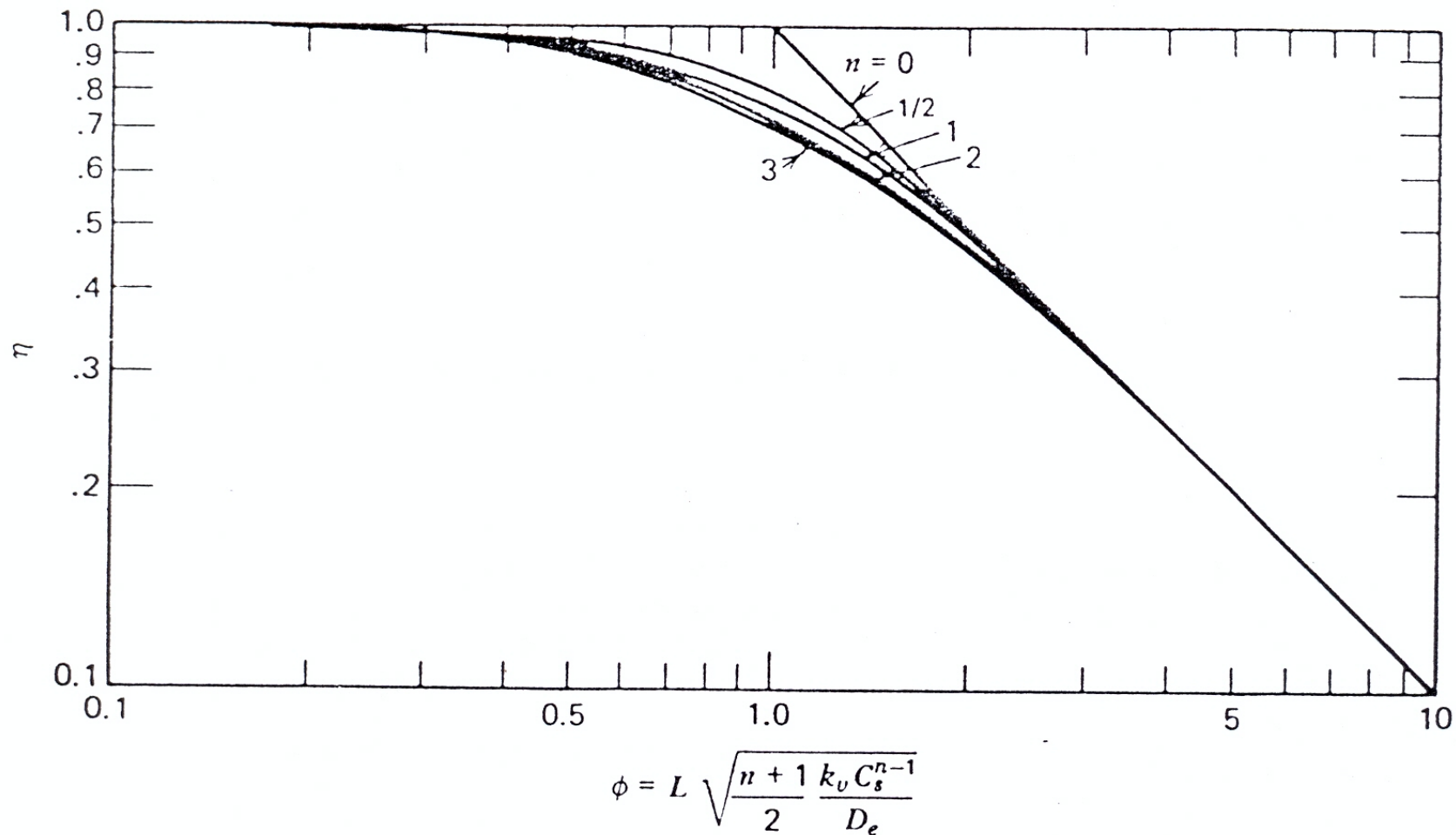
za reakciju n-tog reda:

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

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:

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

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

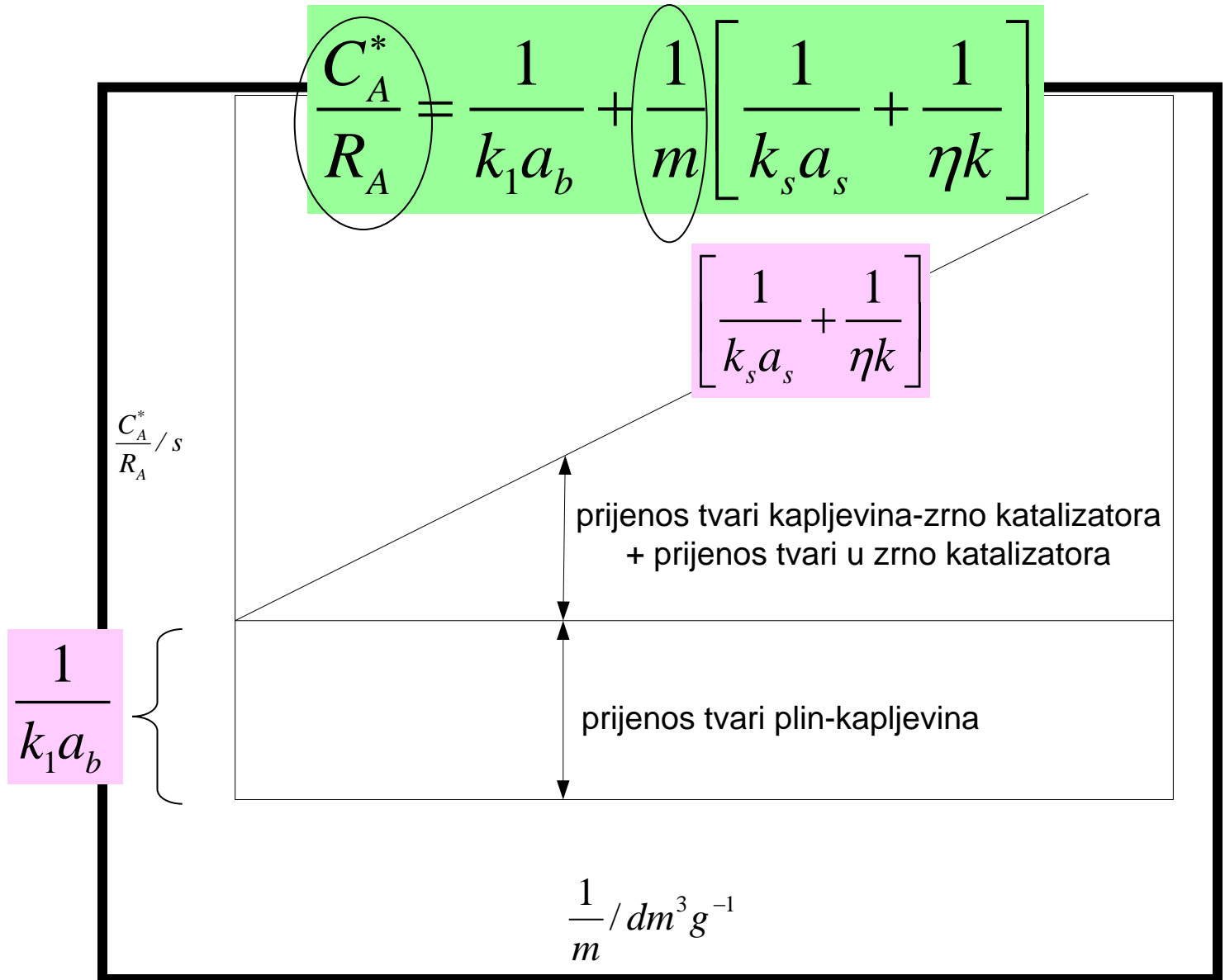
$$\frac{R_A}{\eta m k} = C_{As}$$

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



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

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
	PRIJENOS TVARI PLIN-KAPLJEVINA
<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	
	PRIJENOS TVARI KAPLJEVINA-KRUTINA (PLINOVITI REAKTANT)	PRIJENOS TVARI KAPLJEVINA-KAPLJEVINA (KAPLJEVITI REAKTANT)
<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

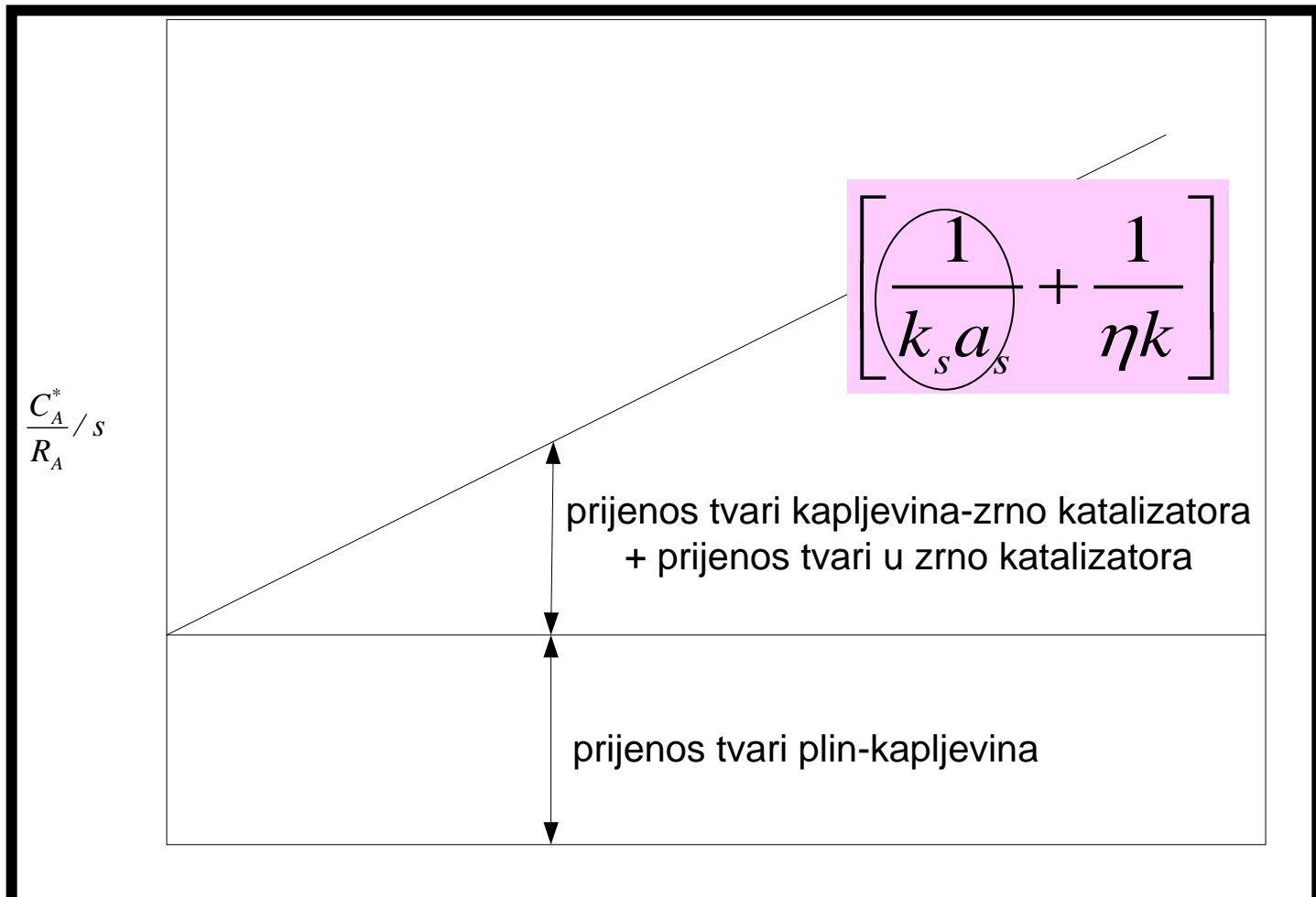
Varijable koje imaju	Stupanj koji kontrolira brzinu reakcije	
	KEMIJSKA REAKCIJA (NEZNATAN OTPOR DIFUZIJI U PORE)	KEMIJSKA REAKCIJA (ZNATAN OTPOR DIFUZIJI U PORE)
<i>velik utjecaj</i>	Temperatura Masa katalizatora Koncentracija reaktanta Konc. aktivne komp. na kat.	Masa katalizatora Koncentracija reaktanta 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

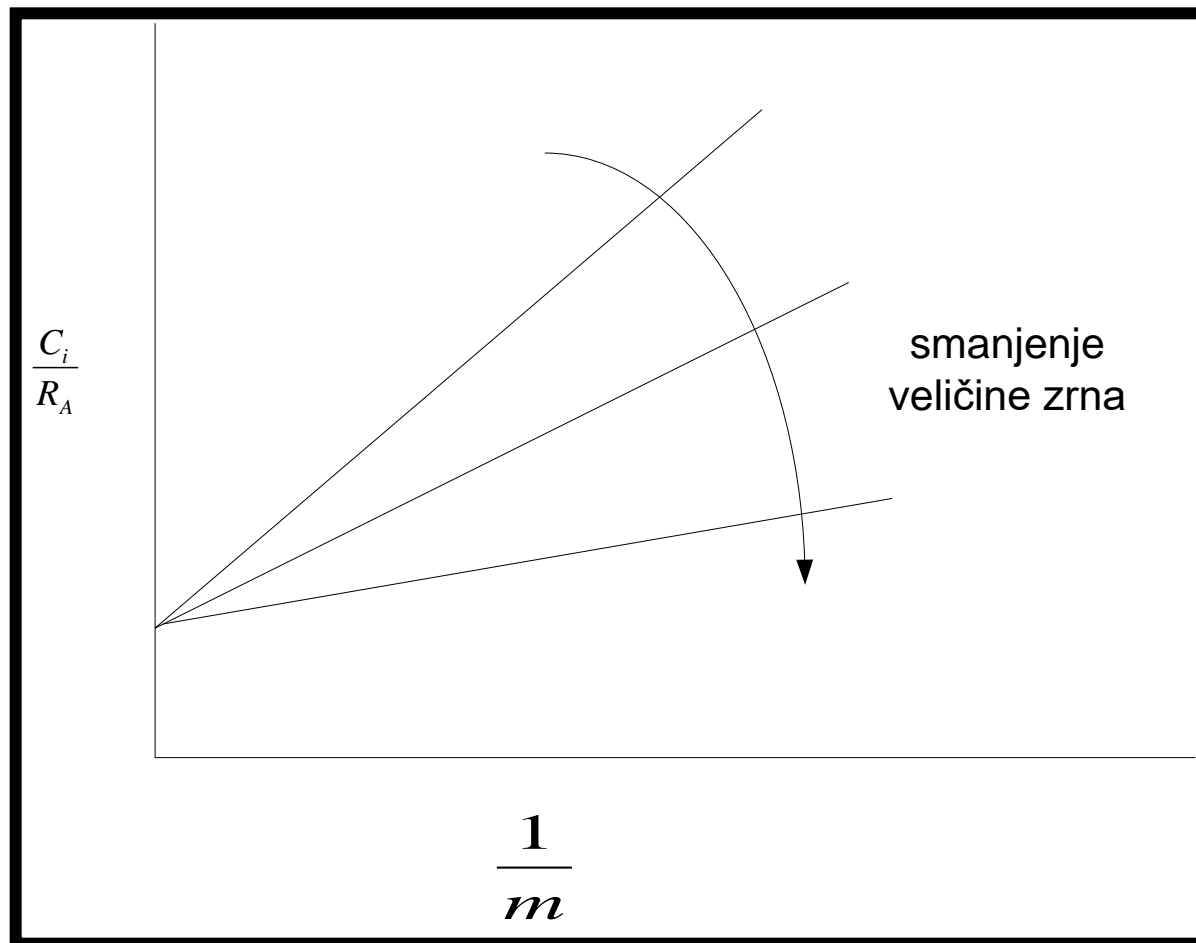


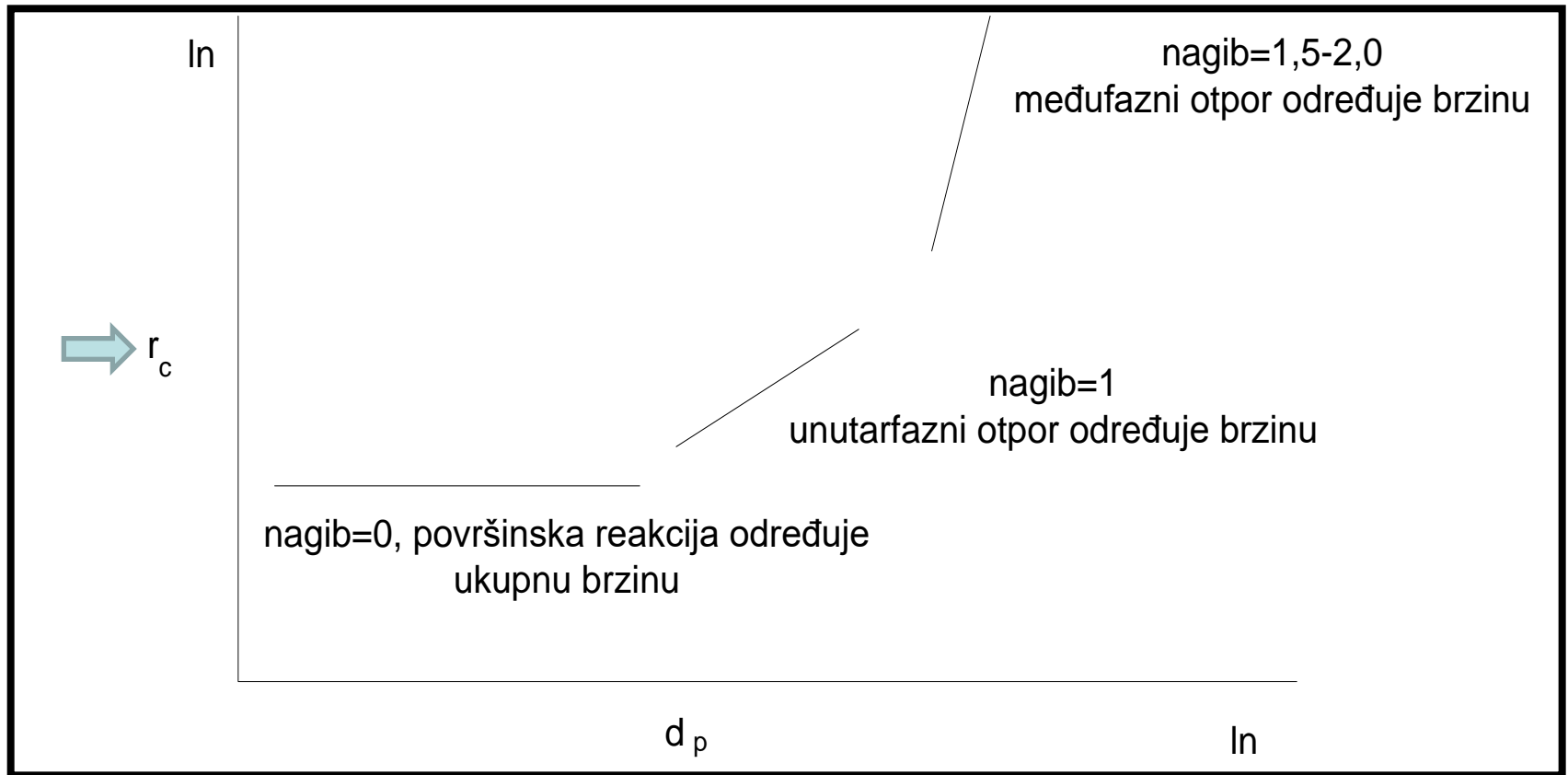
$$\frac{C_A^*}{R_A} = \frac{1}{k_1 a_b} + \frac{1}{m} \left[\frac{1}{k_s a_s} + \frac{1}{\eta k} \right]$$

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

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,
 $r_c = f(d_p)$

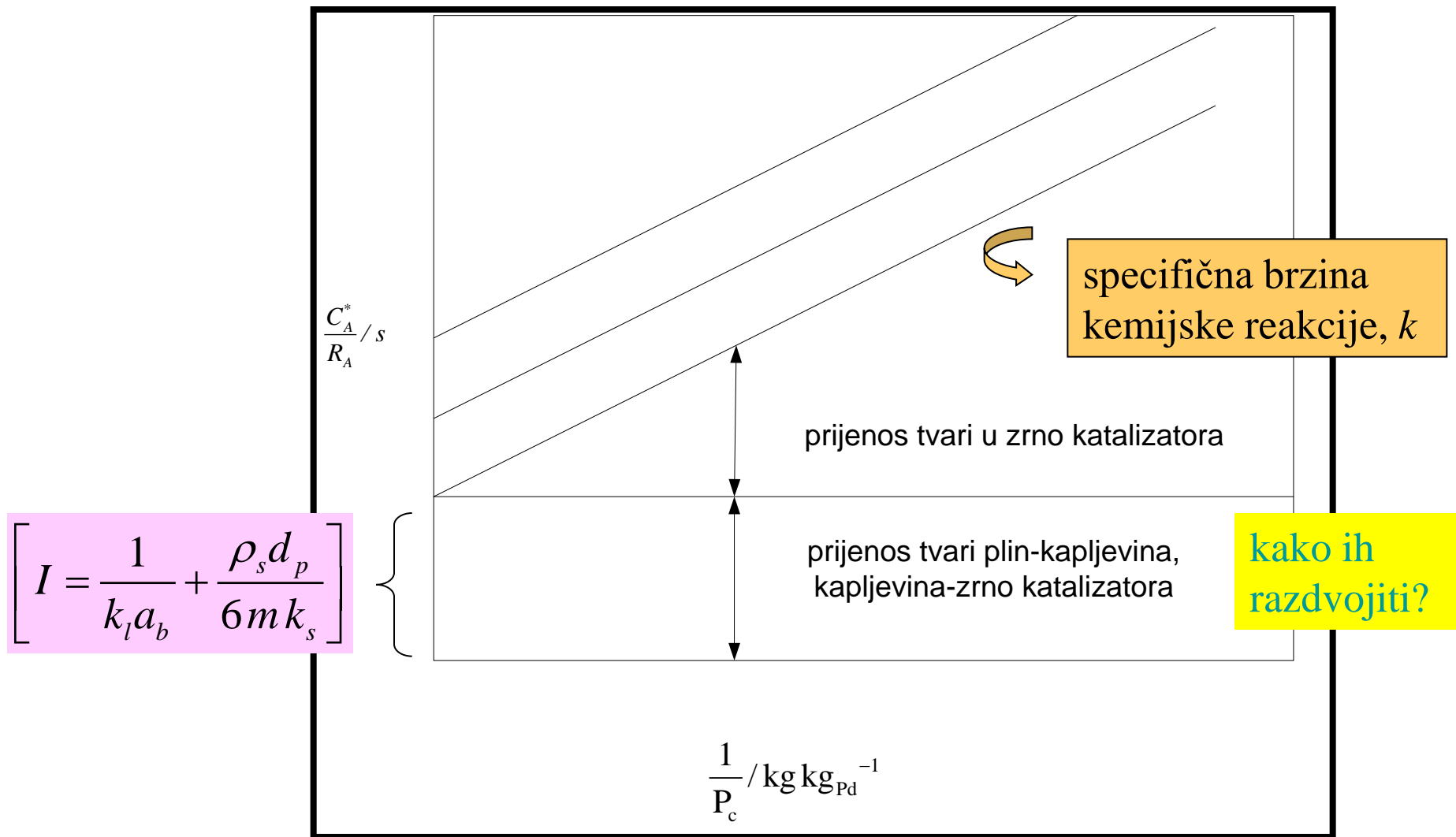
$$a_s = 6m/d_p \rho_s$$

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.

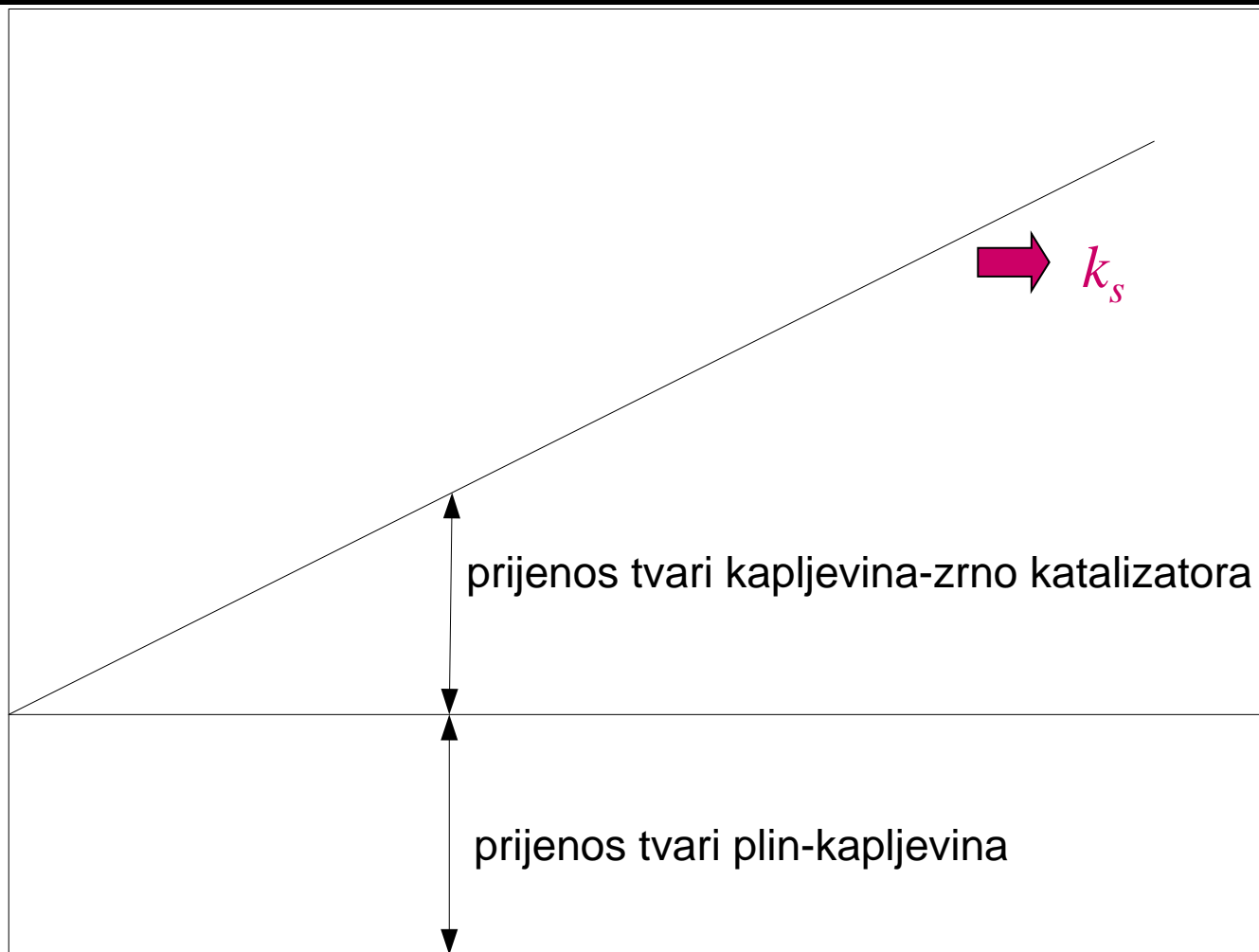
Eksperimentalno određivanje fizičkih i kinetičkih parametara



Ovisnost brzine reakcije o koncentraciji katalitički aktivne tvari

$$I = \frac{1}{k_l a_b} + \frac{\rho_s d_p}{6mk_s}$$

k_l ←



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

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 (dm^2/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

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

ρ_l, ρ_g - gustoća kapljevine i plina

μ_l - viskozitet kapljevine

D - molekularni koeficijent difuzije

Površina međufaznog prijenosa plin-kapljevina, a_b

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

σ - 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
 ε - 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)

ψ - korekcijski faktor



Izračunavanje korekcijskog faktora:

vrijedi ako je:

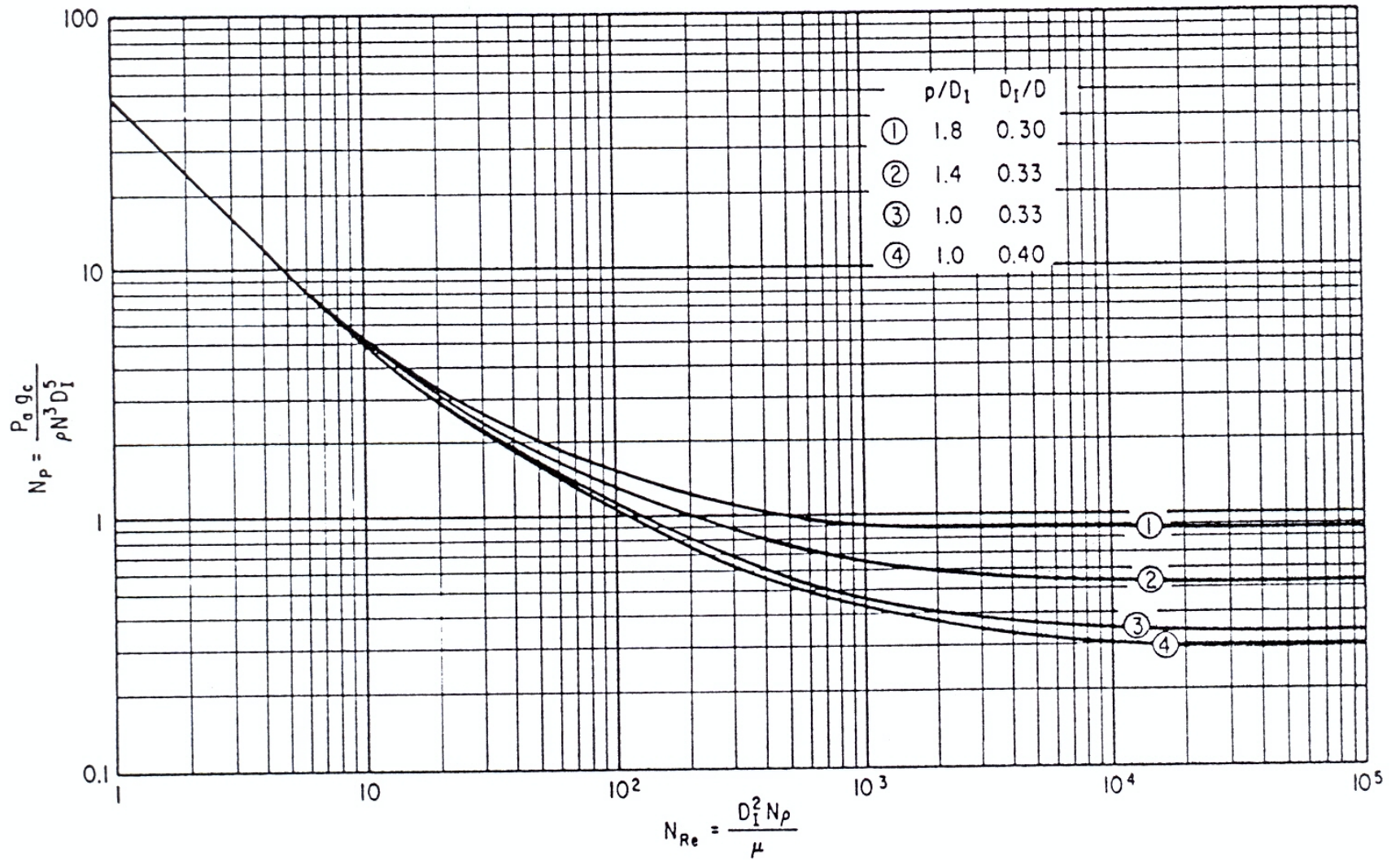
$$\psi = 1,0 - 1,26 \left[\frac{\nu}{Nd_M^3} \right]$$

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

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

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

ν - 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:

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

$$Re = 0,0016-55$$

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

$$Re = 55-1500$$

ε - 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 kapljevine - 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.)