

VIŠEFAZNI REAKTORI

akad.god. 2016./17.

Osnovne značajke višefaznih reaktora

- Naziv višefazni reaktori odgovara onim vrstama kemijskih reaktora u kojima reagiraju **reaktanti u različitim agregatnim stanjima**.
- Višefazni reaktori su bili **prvi koje su ljudi koristili**
(*različite peći za taljenje rudača ili fermentacijski procesi pri proizvodnji vina ili piva...*)
- Naglim razvojem kemijske industrije početkom dvadesetog stoljeća za mnoge važne procese kako u anorganskoj tako i u organskoj sintezi počinju se koristiti višefazni reaktori:

***sinteza butadiena iz acetilena,
hidriranje jestivog ulja,
fermentacijski procesi,
metalurgija i sl.***

Osnovne značajke višefaznih reaktora

- **Sinteza znanja** u kemijskom inženjerstvu pri čemu je naglasak na izučavanju prijenosa tvari i topline, ulozi katalizatora, kao i na općim zakonitostima s obzirom na temeljnu podjelu tipova reaktora.
- **Interakcija** mnogih procesa čini izbor i izvedbu odgovarajućeg tipa višefaznog reaktora izuzetno teškom.
- **Neki autori pod nazivom višefaznog reaktora misle na reaktor u kome se odigrava reakcija između plina i kapljevine uz prisutnost krutog katalizatora!**

Pri izboru i izvedbi višefaznih reaktora potrebno je razmotriti sljedeće:

- Prisutnost različitih agregatnih stanja,
- Prisutnost čvrstog katalizatora,
- Prijenos tvari i topline između različitih faza,
- Topljivost plina u kapljevini,
- Površinske pojave (adsorpcija, močenje),
- Kinetiku i vrstu kemijske reakcije,
- Hidrodinamiku (strujanje i miješanje),
- Makrostrujanje (način strujanja/prolaska pojedinih faza kroz reaktor),
- Način rada (prekidni ili kontinuirani).

Osnovna podjela višefaznih reaktora

- Prema broju prisutnih agregatnih stanja:

A) reaktori za dvofazne sustave

S obzirom na moguće kombinacije sudjelujućih sudionika reakcije:

A1) **reaktori za provedbu reakcija plin – krutina:**

- *sva gorenja krutih goriva kao i mnogi metalurški procesi*

A2) **reaktori za reakcije između plina i kapljevine:**

- *velik broj reakcija između reaktivnih plinova i kapljevine, kao npr. pri dobivanju solne, sumporne i dušične kiseline, apsorpcija ugljičnog dioksida u alkalnim otopinama, različite oksidacije*

A3) **reaktori s reakcijom između kapljevine i krutine:**

- *otapanje metala i rudača u kiselinama ili alkalijama, izluživanja iz heterogenog materijala i dr.*

B) reaktori u kojima su prisutna sva tri agregatna stanja

B1) kruta faza je reaktant i/ili produkt ili inert

- reaktori za provedbu nekatalitičkih reakcija,
npr. različita taloženja, izluživanja ili raščinjavanja

B2) kruta faza je katalizator

mnogobrojne reakcije u industrijskoj praksi:

Fischer – Tropsch sinteza,

polimerizacija etena,

katalitička hidriranja nezasićenih ugljikovodika,

hidriranja različitih spojeva (masti, aldehida, ketona),

različite fermentacije i enzimski procesi...

Osnovna podjela višefaznih reaktora i neki značajniji primjeri tipova reaktora - kombinacije reagirajućih faza:

plin – kapljevina, plin – krutina, kapljevina– krutina

Tip reaktora	Reaktori s dvije faze	Reaktori s tri faze
Reaktori s miješanjem	PKR reaktor s mehaničkom miješalicom u stacionarnom i nestacionarnom radu	Suspenzijski reaktor s mehaničkom miješalicom u stacionarnom i nestacionarnom radu
	PKR reaktor s mjehurićima u stacionarnom i nestacionarnom radu	Suspenzijski reaktor s mjehurićima u stacionarnom i nestacionarnom radu
Kolonski reaktori	Istostrujni cijevni reaktor bez mjehurića	Prokapni kolonski reaktor
	Kolonski reaktor s mjehurićima, istostrujni ili protustrujni	Istostrujni ili protustrujni kolonski reaktor s “potopljenim” slojem katalizatora
	Kolonski reaktor s punilima (apsorpcijski reaktor)	Kolonski suspenzijski reaktor
	Kolonski reaktor s pliticama	Kolonski reaktor s uzvitlanim slojem katalizatora
Transportni kolonski reaktor		

Značajke višefaznih reaktora

- Raznolikost reakcija u višefaznim sustavima ima za posljedicu i vrlo različite zahtjeve s obzirom na reakcijske uvjete.
- Najvećim dijelom izvedba višefaznih reaktora je uvjetovana **brzinama prijenosa tvari iz jedne faze do i u drugu**, a zatim i samom **kemijskom reakcijom**.
- Trofazni sustavi su dodatno složeni zbog **složenog reakcijskog puta** kojim se dovode reaktanti u kontakt na površini krutog katalizatora.
- **Makrokontakt**, odnosno **hidrodinamika** u samom reaktoru ima veliku ulogu na izbor višefaznog reaktora.

Izbor reaktora za neku određenu reakciju zavisi od vrlo mnogo činilaca, od kojih su najznačajniji:

- brzina kemijske reakcije,
- topljivost plina u kapljevini,
- kontinuirani ili prekidni rad,
- brzine prijenosa tvari i topline,
- ostali reakcijski uvjeti (temperatura, pritisak i koncentracija)

PRIMJERI REAKCIJA U DVOFAZNIM SUSTAVIMA

Plin – kapljevina	<ul style="list-style-type: none">- Otapanje reaktivnih plinova u vodi (CO₂, H₂S, CO, NO, NO₂, HF, Cl₂ itd.)- Oksidacija Na sulfita- Alkilacija fenola uz homogeni katalizator- Oksidacija kumena kisikom iz zraka- Polimerizacije i polikondenzacije- Biološki procesi (aerobna fermentacija, obrada otpadnih voda)
Plin – krutina	<ul style="list-style-type: none">- Prženje vapnenca- Metalurški procesi- Plinifikacija uglja- Sinteza CS iz elemenata
Kapljevina - krutina	<ul style="list-style-type: none">- Raščinjavanje rudača u agresivnim otapalima- Otapanje metala u kiselinama ili lužinama- Sinteza NaCN iz natrij amida i ugljika- Različite organske sinteze
Kapljevina - kapljevina	<ul style="list-style-type: none">- Sulfoniranje- Hidroliza- Nitiranje (dobivanje nitroglicerina)

- Za industrijsku provedbu spomenutih reakcija postoje **mnogobrojne vrste reaktora**.
- Uslijed složenosti reakcijskog puta i međusobnog utjecaja brzina prijenosa i hidrodinamike, **izbor odgovarajućeg reaktora je težak zadatak**.
- Često puta se nalaze **različite vrste reaktora** koje se koriste za provedbu iste reakcije.

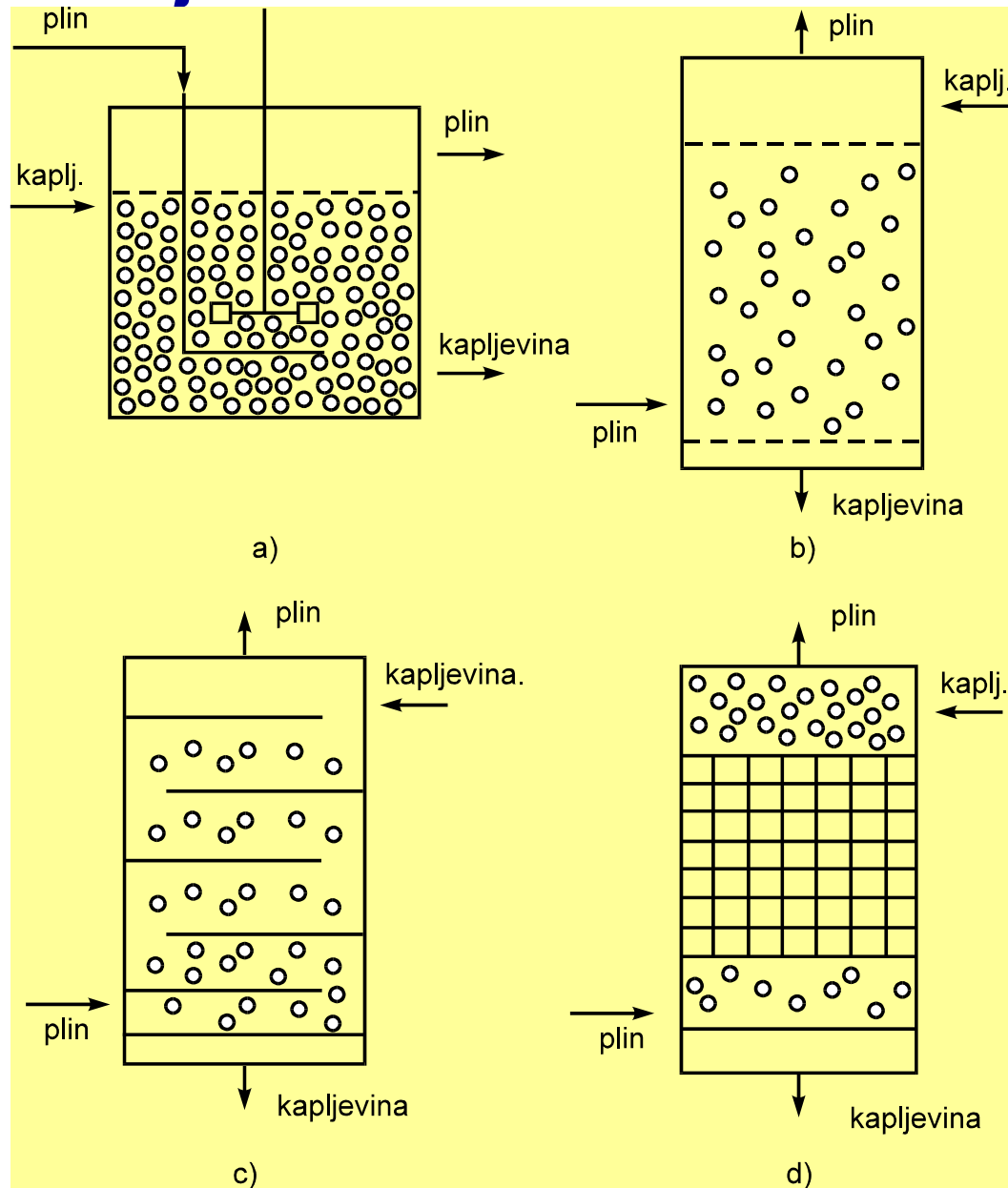
Zavisno od načina kontakta između faza postoje dva tipiska oblika višefaznih reaktora:

- **PKR reaktori s miješanjem faza,**
- **Kolonski reaktori s idealnim strujanjem barem jedne faze.**

Unutar ove dvije osnovne skupine postoji cijeli niz tipova reaktora koji se međusobno razlikuju:

- a) prema načinu miješanja, odnosno prolaza reakcijske smjese,**
- b) s obzirom na način rada (stacionaran ili nestacionaran).**

Primjeri dvofaznih reaktora



a) reaktor s miješanjem,
b) kolonski reaktor s
mjehurićima,

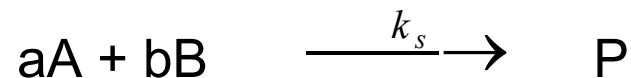
c) apsorber s pliticama,
d) kolonski reaktor s
punilom.

PKR reaktori s miješanjem obje faze

- Ovaj tip reaktora za dvofazne sustave pogodan je za **relativno kemijski spore reakcije** koje zahtijevaju **veliku zadržku obje faze u reaktoru**.
- Dobar su izbor ako su reakcije **egzotermne** odnosno u slučajevima kada je potrebna **dobra kontrola temperature**.
- **Mehaničko miješanje** osigurava **homogenost faza i temperature** unutar reaktorskog prostora.
- Slični zaključci vrijede i za trofazne reaktore istog tipa, uz suspendirani katalizator kao treću fazu.

Rektorski modeli

- Reakcije između plina i kapljevine odigravaju se uglavnom **u masi kapljevine**, odnosno između reaktanta iz plinske faze otopljenog u kapljevini i reaktanta koji se već nalazi u kapljevini.
- Ako se pretpostavi opća reakcija tipa



gdje je **A**- reaktant u plinskoj fazi, a **B** - reaktant u kapljevitoj fazi

mogu se na osnovi različitog protjecanja faza kroz reaktor postaviti bilančne jednačbe.

- Kako se neki **reaktanti** nalaze prisutni **u obje faze**, to je potrebno **postaviti bilance odvojeno za svaku fazu**. Dobiveni sustav algebarskih ili diferencijalnih jednačbi potrebno je tada simultano rješavati.

Reaktor je zatvoreni sustav - kotlasti reaktor

- Bilanca za **reaktant B u kapljevitoj fazi** je tada

$$r_B = \frac{b}{a} r_A = k_s C_A C_B$$

$$\frac{dn_B}{dt} = -V_r (1 - \varepsilon_g) k_s C_A C_B$$

ako je volumen kapljevine stalan, $V_r(1 - \varepsilon_g) = \text{konst.}$, tada vrijedi

$$\frac{dn_B}{dt} = -r_B = -k_s C_A C_B$$

gdje je

V_r - ukupni volumen reaktora (plin + kapljevina),

ε_g - zadržka plina u smjesi (kapljevini).

- **Bilanca za reaktant A u kapljevitoj fazi:**

Brzina prijenosa iz plinske faze u kapljevitu dana je izrazom

$$\frac{dn_A}{dt} = k_g a V_r (p_A - C_A H_A)$$

Koncentracija reaktanta A koji se prenosi iz plinske faze je u stvari rezultanta brzine međufaznog prijenosa tvari i brzine kemijske reakcije u kapljevinu.

$$\frac{dn_A}{dt} = k_g a V_r (p_A - C_A H_A) - k_s V_r (1 - \varepsilon_g) C_A C_B$$

ili

$$(1 - \varepsilon_g) \frac{dC_A}{dt} = k_g a (p_A - C_A H_A) - k_s (1 - \varepsilon_g) C_A C_B$$

Henryjeva konstanta raspodjele, H_A

$$H_A = \frac{p_A^*}{C_A}, \text{ m}^3 \text{ bar kmol}^{-1}$$

- **Bilanca za reaktant A u plinskoj fazi:**

$$\frac{dp_A}{dt} = -k_g a V_r (p_A - C_A H_A)$$

- Uz pretpostavku idealnog miješanja obje faze te poznavanja parametra $k_g a$ (ili $k_l a$), k_s , ε_g i H_A moguće je izračunati koncentracijske profile po vremenu za taj tip reaktora.
- Parametri $k_g a$ (ili $k_l a$), ε_g i k_s moraju se odrediti **eksperimentalno**.
- Konačni izgled bilanci koje se mogu pojednostavniti za granične slučajeve pojedinih sporih procesa zavisi o relativnim brzinama kemijske reakcije te prijenosa tvari iz plinske faze do i u kapljevinu.

PKR reaktor, stacionaran rad

- Ovo je slučaj kada kroz reaktor prolaze stalne struje i kapljevito i plinovito reaktanta.

stacionaran izoterman rad

reaktorski
model

Bilanca reaktanta B u kapljevitoj fazi:

$$V_r (1 - \varepsilon_g) r_B = v_{ol} (C_{B_0} - C_B)$$

v_{ol} – protok/volumna
brzina kaplj.

Bilanca reaktanta A u kapljevitoj fazi:

$$k_g a V_r (p_A - C_A H_A) - r_A V_r (1 - \varepsilon_g) = v_{ol} (C_{A_0} - C_A)$$

Bilanca reaktanta A u plinskoj fazi:

$$v_{og} C_{A_{og}} - v_g C_{A_g} = k_g a V_r (p_A - C_A H_A)$$

Čest je slučaj da je kapljevita faza nepokretna, dok se plin uvodi kontinuirano (kao ispiralica!). U tom slučaju se kombiniraju se bilance za reaktante u kapljevitoj fazi s bilancom za reaktant u plinskoj fazi.

Kolonski reaktori

S obzirom na način prolaza obje faze kroz kolonu:

- **Istostrujni kolonski reaktori bez mjehurića,**
- **Kolonski reaktori s mjehurićima,**
- **Dvofazni kolonski reaktori s punilima**

Istostrujni kolonski reaktori bez mjehurića

- Ovaj se tip reaktora koristi **za relativno brze reakcije s dobrom topljivosti plina i za relativno velike kapacitete.**
- Brzine strujanja obje faze su velike tako da nastaju različite vrste dvofaznog strujanja (udarno, valno itd.). U postavljanju modela takvih reaktora pretpostavlja se u pravilu **idealno strujanje za obje faze.**
- U stacionarnom radu uz navedene pretpostavke bilančne jednačbe su:

Za reaktant A u plinskoj fazi

$$\frac{dC_A}{dz} = -\frac{k_g a A_s}{F_{Ag}} (p_A - C_A H_A)$$

gdje je:

F_{Ag} - molni protok reaktanta u plinskoj fazi,
 A_s - presjek kolone.

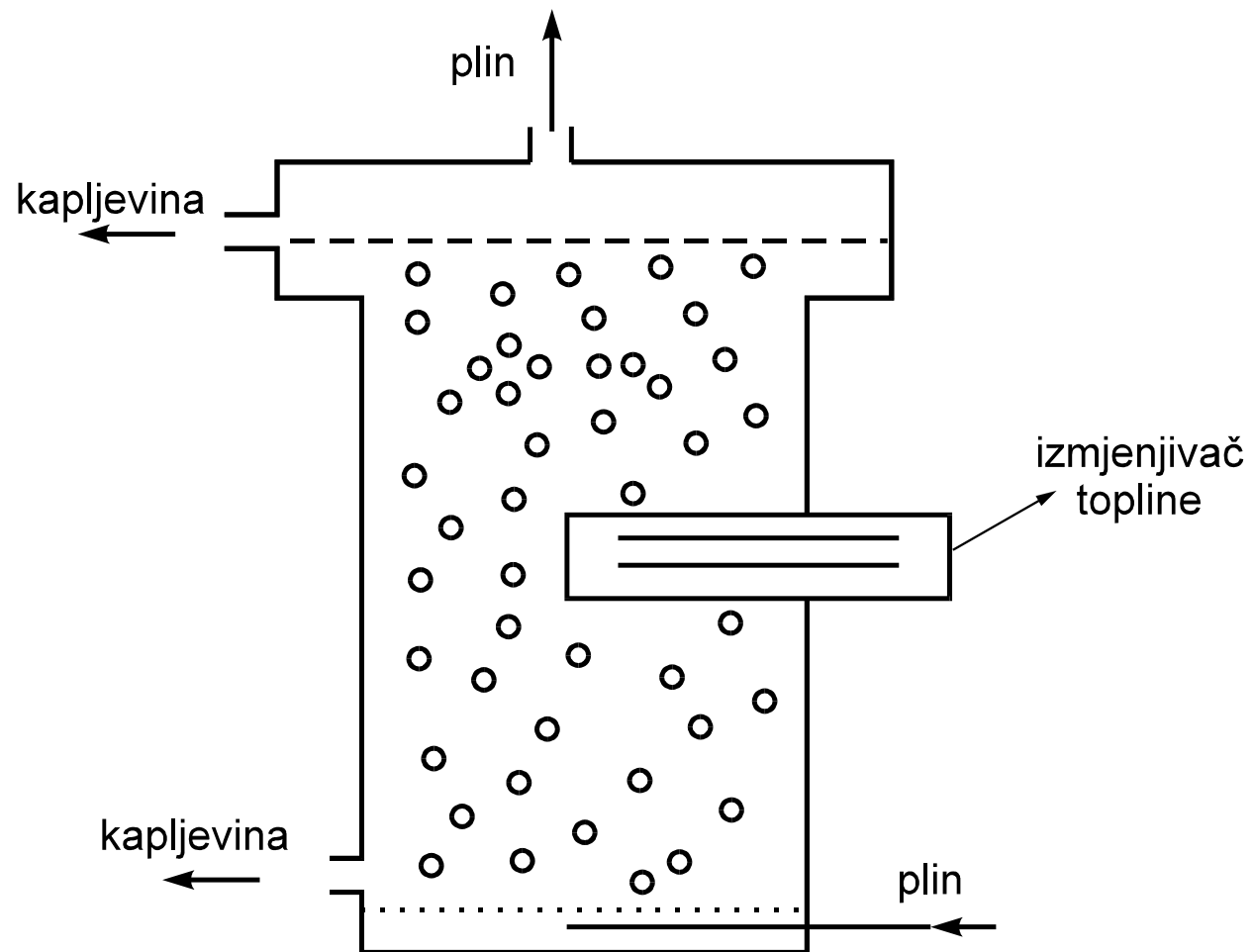
Za reaktant A u kapljevitoj fazi:

$$\frac{dC_A}{dz} = \frac{k_g a A_s (p_A - C_A H_A)}{v_1} - \frac{(1 - \varepsilon_1) A_s r_A}{v_1}$$

Za reaktant B u kapljevitoj fazi:

$$\frac{dC_B}{dz} = - \frac{(1 - \varepsilon_1) r_B}{v_1}$$

Kolonski reaktor s mjehurićima



Kolonski reaktori s mjehurićima

- Kolonski reaktori s **mjehurićima pogodni su za provedbu reakcija koje su kontrolirane brzinom kemijske reakcije** (treba dovoljno dugo vrijeme zadržavanja kapljevine).
- Najbitnija je značajka tih reaktora što **ne postoji mehaničko miješanje**, već se ono ostvaruje **prolazom mjehurića plina kroz kapljevinu**
- Zbog jednostavne izvedbe često se koriste u praksi i mogu imati vrlo **velike dimenzije**, npr. kolone za pročišćavanje otpadnih voda do 20000 m³.
- Često se koriste kao biokemijski reaktori, fermentori.
- Osnovna izvedba zavisi od mogućnosti **izračunavanja koeficijenata k_g , k_l i ε_g na osnovi poznate brzine strujanja plina kroz kolonu, u** . Te su brzine u praksi oko 0.05 m/s pa do 1 m/s.

Izračunavanje k_l i ε_g

- Postoje brojne korelacije na osnovi kojih se računaju k_l i ε_g .
- **Veličina mjehurića** je funkcija mnogih parametara, kao što su ***promjer rupica na raspodjeljivačima plina, volumna brzina plina, zadržka plina***, itd.
- Jedna od korelacija ima oblik:

$$d_B = 1.7 \left(\frac{Q}{\pi N} \right)^{0.2} N_{CA}$$

gdje je:

$$N_{CA} = \frac{1}{\left[\frac{P''}{V_r (1 - \varepsilon_g)} \right]^{0.4}} \frac{\sigma^{0.6}}{\rho_L^{0.2}}$$

σ - površinska napetost
kapljevine, kg s⁻²

P'' - potrebna snaga

d_b - promjer mjehurića plina

- **Potrebna snaga, P''**

$$P'' = Q_m \rho_g \left(0.03u^2 + \frac{R_g T}{M} \ln \frac{P^0}{P} \right)$$

P^0 - tlak plina na rupicama,

P - tlak plina iznad kapljevine u koloni,

Q_m – maseni protok,

u - brzina protjecanja plina kroz rupice,

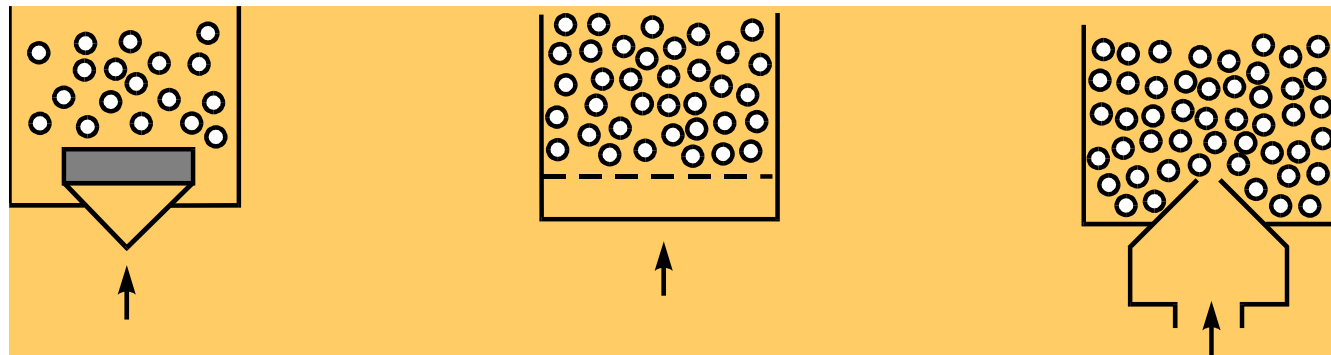
M - molna masa plina.

Slične se korelacije mogu izvesti i za prijenos topline!

- **U industrijskim reaktorima se može općenito pretpostaviti dobro miješanje kapljevite faze, dok se prolaz plina prikazuje idealnim strujanjem.**
- **U osnovi tada vrijede iste izvedbene jednadžbe kao i za miješani reaktor s mjehurićima.**
- **Za proračun potrebnog volumena reaktora i njegovih dimenzija potrebno je poznavanje niza dodatnih parametara, npr. brzine strujanja, vremena zadržavanja, koeficijenata prijenosa itd.**

Izvedba kolonskog reaktora treba omogućiti:

- dobru raspodjelu plinske faze,
- dobar prijenos tvari i topline,
- dobro miješanje kapljevite faze i
- dobro i potpuno odvajanje plina od kapljevine.



Različite izvedbe raspodjeljivača plina u kolonskim reaktorima

- Poznate su i mnogobrojne izvedbe **unutrašnjih izmjenjivača topline te nepokretnih pregrada** smještenih u koloni koje služe **za bolju cirkulaciju kapljevine**.
- **Vršni dijelovi kolone** (*head of column*) su obično **prošireni** radi lakšeg odvajanja plina iz kapljevine, jer se na taj način smanjuje brzina plina.
- **Fermentori** su zasebna vrsta kolonskih reaktora s mjehurićima, a specifični su zbog **prisutnosti živih organizama, nestacionarnosti rada i promjena reakcijskih uvjeta**.

Dvofazni kolonski reaktori s punilima

- Od kolonskih reaktora s mjehurićima ova se grupa reaktora razlikuje po **prisutnoj inertnoj krutoj fazi, punilu** te su to u osnovi **apsorpcijske kolone u kojima se uz apsorpciju odigrava i kemijska reakcija**. Posebna podvrsta ovih reaktora su **kolone s pliticama umjesto s punilima**.
- Za izvođenje odgovarajućih bilančnih jednažbi, kao i za izvedbu reaktora bitno je poznavanje procesa prijenosa čija je brzina uvećana postojanjem kemijske reakcije (*enhancement factor*).
- **Punilo ili plitice** imaju ulogu da dobro **raspodijele plinsku i kapljevitu fazu** i time **povećaju graničnu površinu plin - kapljevina** uz **što manji pad tlaka kroz kolonu**.

- Bilančne jednačbe se obično postavljaju **uz pretpostavku idealnog strujanja i plina i kapljevine** (jednostavni model idealnog cijevnog reaktora).
- Tako npr. **bilanca za komponentu A u plinskoj fazi** uz pretpostavku stalne brzine strujanja plina jeste:

$$\frac{Q_{m_g}}{M_g} dy_A = k_g a (y_A - y_A^*) p dz$$

gdje je: y^* - molni udjel reaktanta A u plinu, koji je u ravnoteži s koncentracijom reaktanta A u kapljevini.

Formalnim integriranjem dolazi se do izraza po kojem se može izračunati **visina sloja punila u koloni, z**:

$$z = \frac{Q_{m_g}}{k_g a P M_g} \int_{y_{A_2}}^{y_{A_1}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} \quad *$$

- Pretpostavka o stalnoj brzini plina kroz kolonu ne mora uvijek vrijediti, jer se uz brze reakcije mogu apsorbirati znatne količine plina pri prolazu kroz sloj punila. Praktičnu primjenu jed. * obično ograničava nepoznavanje parametra $k_g a$.
- Izvedba kolona s pliticama identična je uobičajenom pristupu proračuna apsorpcijskih kolona uzimajući u obzir izmijenjene (povećane!) vrijednosti parametra $k_g a$ uslijed kemijske reakcije.
- **U dvofaznim reaktorima s punilima koriste se uobičajene vrste punila, čiji izbor zavisi od mnogih faktora:**
 - priroda kapljevine i plina,*
 - cijena,*
 - pad tlaka,*
 - temperatura.*

Izbor i značajke dvofaznih reaktora

- S obzirom na način rada pojedinih tipova dvofaznih reaktora moguće je spomenuti osnovne značajke prema kojima bi se mogao izabrati odgovarajući reaktor za neku posebnu reakciju.
- Preporuke su posve općenite, a stvarni **izbor zavisi od mnogih dodatnih ograničenja** (kapacitet, ekonomičnost itd.). Spomenute značajke služe više kao putokaz pri izboru i procjeni alternativnih prednosti i mana reaktora koji se dimenzionira za konkretni proces.
- **PKR reaktori s mehaničkim miješanjem** dobar su izbor ako postoje problemi s prijenosom topline (egzotermne reakcije). Pogodni su za relativno spore reakcije s velikom zadržkom kapljevine. Mogu raditi u stacionarnom ili nestacionarnom radu.

Izbor i značajke dvofaznih reaktora

- **PKR reaktor s mjehurićima** ima slične značajke kao i prethodni, što se tiče izmjene topline. Međutim, ne može se postići veća fleksibilnost u radu. **Ekonomičan** je, posebice ako se radi uz povećani pritisak, jer **nema mješalice**.
- **Kolonski reaktori s pliticama** u protustruji **pogodni su za spore reakcije** kojima pogoduje dulje vrijeme kontakta plina i kapljevine na plitici.
- **Kolonski reaktori s punilima** imaju prednost pred kolonama s pliticama, jer mogu ostvariti **veću zadržku plina, kao i manji pad tlaka kroz sloj punila**. Danas je moguć odabir raznovrsnih i prikladnih punila za sve korozivne medije.

TROFAZNI REAKTORI - ČVRSTA JE FAZA KATALIZATOR

- Često se puta pod nazivom višefazni reaktori upravo misli na reaktore u kojima reagiraju reaktanti iz plinske i kapljevite faze na **čvrstom katalizatoru**.
- Koriste se u nizu važnih procesa (npr. različite organske sinteze...).
- U industrijskoj praksi koristi se mnogo tipova ovih reaktora, koji se razlikuju po načinu unošenja reaktanata u reaktor te po smještaju katalizatora.

Najpoznatija su sljedeća dva tipa reaktora:

- ❖ **suspenzijski reaktor,**
- ❖ **prokapni reaktor.**

Osim ovih postoji cijeli niz drugih tipova!

Primjeri reakcija u trofaznom sustavu

Različita hidriranja	aldehida i ketona, benzojeve kiseline i nezasićenih estera masnih kiselina
Hidrodosulfurizacija, hidrokreking	pri obradi nafte
Oksidacije	mravlje kiseline, kumena
Hidratacija	olefina i nitrosojeka
Fischer - Tropsch sinteza	
Polimerizacija	etena
Alkilacije	aromata
Fermentacije i biološki filteri	

Podjela višefaznih reaktora uz katalizator kao čvrstu fazu

- Zbog mnogobrojnih čimbenika koji mogu utjecati na ukupnu brzinu reakcije u trofaznom sustavu s krutim katalizatorom, **konstruktivne izvedbe ovih reaktora su vrlo raznolike.**
- Cijeli niz kriterija koji se odnose uglavnom na **brzine pojedinih procesa prijenosa i kemijske reakcije s obzirom na hidrodinamiku (strujanje i miješanje)** uvjetuje konačni izbor.
- Raznolikost kriterija, odnosno ključnih čimbenika dovodi do različitih podjela tih reaktora.

Podjela prema Shahu (1979):

A) Reaktori s nepokretnim slojem katalizatora

- A1) Prokapni kolonski reaktor (*trickle – bed reactor*),
- A2) Istostrujni ili protustrujni kolonski reaktor s “potopljenim slojem katalizatora (*submerged fixed bed reactor with gas bubbling*).

B) Reaktori s pokretnim katalizatorom

- B1) Suspenzijski reaktor s mehaničkim miješanjem ili miješanjem protokom plinske faze (*slurry reactor*)
- B2) Kolonski suspenzijski reaktor (*bubbling slurry reactor*)
- B3) Kolonski reaktor s uzvitlanim slojem katalizatora (*fluidized bed slurry reactor*)
- B4) Transportni reaktor (*transport reactor*)

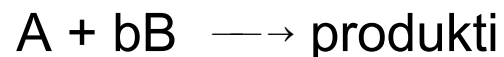
Opće značajke

- Reaktori u grupi A obično rade kontinuirano, dok u grupi B mogu biti u stacionarnom i nestacionarnom radu.
- Svi navedeni tipovi nalaze svoju primjenu u industriji.
- Od nabrojanih tipova, tipičan predstavnik grupe reaktora s pokretnim katalizatorom je **suspenzijski reaktor**, dok se iz grupe s nepokretnim slojem katalizatora često koristi **prokapni reaktor**.

Osnovne značajke i reakcijski put u katalitičkom višefaznom reaktoru

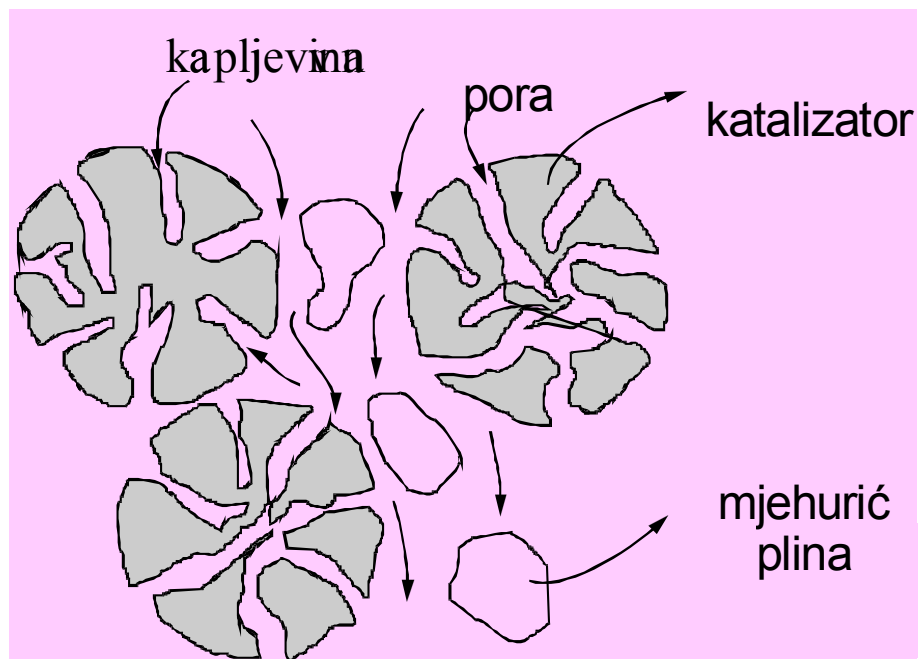
- Bitna značajka reakcije u višefaznom sustavu jeste **prisutnost mnogih fizičkih procesa prijenosa tvari** koji su nužni u reakcijskom putu od reaktanata do produkata.
- Prisutnost krute faze – katalizatora dovodi do još složenije slike u usporedbi s dvofaznim sustavom.
- Kako se **reaktanti** uvode u reaktor u **različitim agregatnim stanjima**, to u njemu uvijek dolazi do **više procesa prijenosa tvari i topline**, što bitno utječe na izvedbu i svojstva reaktora kao cjeline.

- Promotrimo opću reakciju između reaktanata iz plinske i kapljevite faze,



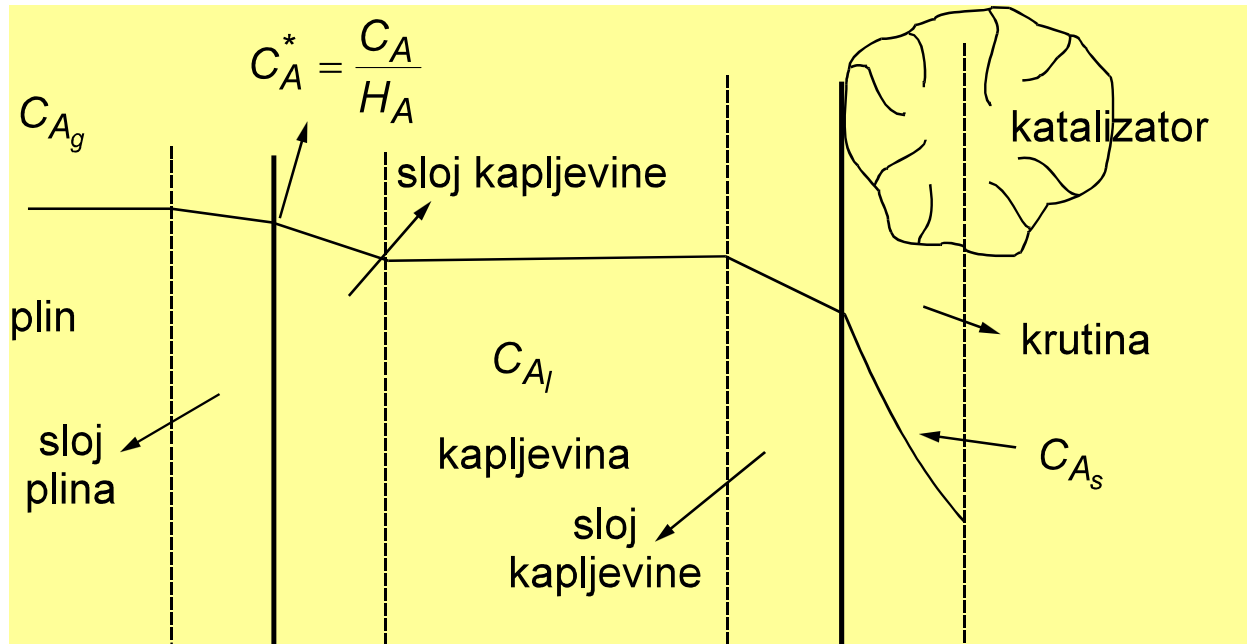
gdje je **A- reaktant u plinu**, a **B- reaktant u kapljevini**.

- **Reakcija između reaktanata A i B odigrava se na površini katalizatora (i onoj vanjskoj, geometrijskoj i unutarnjoj u porama). Čestica katalizatora okružena je plinom i kapljevinom, a pore su u većini slučajeva ispunjene kapljevinom (vidi sliku).**



*Trofazni sustav
plin - kapljevina - kruti katalizator.*

U reakcijski put je uključen cijeli niz fizičkih procesa:



Koncentracijski profili za reakciju u trofaznom sustavu

- A {
- prijenos tvari A iz plina u kapljevinu,
 - prijenos tvari A iz kapljevine do površine katalizatora,
 - unutarfazna difuzija reaktanta A,
- B {
- prijenos tvari B iz kapljevine do površine katalizatora,
 - unutarfazna difuzija reaktanta B u pore katalizatora,
 - kemijska reakcija u pori katalizatora između reaktanta A i B.

- U slučaju da je reaktant B (koji se nalazi u kapljevini) u suvišku s obzirom na koncentraciju otopljenog reaktanta A, može se zanemariti otpor prijenosu tvari za reaktant B, odnosno tada je koncentracija B u porama katalizatora jednaka onoj u masi kapljevine.
- **Brzina prijenosa reaktanta A iz plina u kapljevinu** obično se izražava uz pomoć **ukupnog koeficijenta prijenosa tvari, K_l** ,

$$r_A = K_l a (C_A^* - C_{A_l})$$

gdje je r_A ukupna brzina reakcije, mol s⁻¹m³, dok je

$$\frac{1}{K_l a} = \frac{1}{k_l a} + \frac{1}{H_A k_g a} \quad , \text{ s}^{-1}$$

gdje su:

$k_l a$ i $k_g a$ - pojedinačni koeficijenti prijenosa kroz sloj kapljevine, odnosno sloj plina.

- Na sličan se način može definirati i **brzina prijenosa tvari iz kapljevine na površinu čestice katalizatora**,

$$r_A = k_s a (C_{A_1} - C_{A_s})$$

gdje je:

k_s - koeficijent prijenosa tvari iz tekućine do krutine (katalizatora), cm s^{-1} ,

a - specifična vanjska (geometrijska) površina katalizatora, $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ (vol. kat.).

- **Specifična vanjska površina čestica katalizatora** se u cijevnom reaktoru može izračunati iz izraza

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d_p}$$

gdje je:

ε - poroznost sloja katalizatora,

d_p - promjer čestice

Za suspenzijski reaktor vrijedi

$$a = \frac{6G}{\rho_k d_p}$$

gdje je:

G - masa katalizatora po jediničnom volumenu reaktora,

ρ_k - gustoća katalizatora.

- **Utjecaj unutarfazne difuzije** ocjenjuje se na uobičajeni način sa značajkom djelotvornosti. Tako npr. za kuglaste čestice vrijedi

$$\eta = \frac{1}{\phi} \left(\coth 3\phi - \frac{1}{3\phi} \right)$$

gdje je:

ϕ - Thieleov modul, koji npr. za reakciju prvog reda glasi:

$$\phi = \frac{R}{3} \left(\frac{\rho_k k_1}{D_e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- Reaktant A iz plinske faze mora se otopiti u kapljevini i prenijeti do aktivnog centra na katalizatoru na kojemu tada reagira s reaktantom B koji se tu nalazi iz kapljevite faze.
- **Da se procijeni ukupna brzina procesa potrebno je načelno poznavati brzine kemijske reakcije na površini katalizatora kao i brzine prijenosa za sve reaktante.**
- Nadalje, **temperatura i sastav ulaznih reakcijskih komponenata** bitno utječu na brzine svih spomenutih procesa.
- S obzirom na rečeno, izvedba odgovarajućeg višefaznog reaktora zahtijeva poznavanje reakcijskih uvjeta, koji se odabiru na osnovi uvida u **bitne značajke odgovarajućeg procesa.**

Bitne značajke odgovarajućeg procesa:

- **hidrodinamika i vrsta strujanja**

Miješanje reakcijske smjese i procesi prijenosa između pojedinih faza unutar reaktora zavise uglavnom **od načina strujanja faza kroz reaktor.**

Oblik strujanja zavisi od:

- brzine strujanja pojedinih faza,
- njihove orijentacije (istosmjerno odozgo ili odozdo, protustrujno), vrste, veličine i stanja čestica katalizatora (suspenzija, nepokretni sloj, uzvitlani sloj),
- o prirodi plina i kapljevine te
- o konstruktivnim elementima za unos faza u reaktor (sapnice, mlaznice, itd.)

- **pad tlaka kroz reaktor**

Pad tlaka plinske faze kroz reaktor ima važnost zbog **troškova uzrokovanim tlačanjem plina (pumpe)**, a što posebice dolazi u obzir kod reaktora s nepokretnim slojem katalizatora.

Bitne značajke odgovarajućeg procesa:

- **Zadržka faza i međufazna površina**

- Zadržka faze definira se kao **volumen faze po jediničnom volumenu reaktora**.

- Ponekad, osobito za reaktore s nepokretnim slojem katalizatora zadržka plina i kapljevine definira se **s obzirom na prazni volumen reaktora**.

- Zadržke pojedinih faza imaju **velik utjecaj na rad reaktora** kao cjeline, npr. većom zadržkom kapljevite faze može se utjecati na ukupnu brzinu promjenom reakcijskog puta (heterogeni ili homogeni).

Bitne značajke odgovarajućeg procesa:

- **otpori prijenosu tvari i topline**

Važnost pojedinih otpora prijenosu tvari na značajke reaktora zavisi poglavito o **prirodi reakcijskog sustava te uvjetima (obliku) strujanja faza unutar reaktora.**

Prijenos tvari iz plinske u kapljevitu fazu definiran je s dva parametra: **ukupnim koeficijentom prijenosa, K , te međufaznom površinom, a_g .**

Slično, **prijenos iz kapljevite faze do površine katalizatora** karakterizira se s **ukupnim koeficijentom prijenosa, k_s i međufaznom površinom, a_s (specifična vanjska-geometrijska površina katalizatora).**

Bitne značajke odgovarajućeg procesa:

- **disperzija i stupanj izmiješanosti**

Elementi fluida (plina i kapljevine) prolazeći kroz reaktor izmjenjuju međusobno tvari procesima prijenosa, kako **na mikro razini**, tako i **na makrorazini**.

Miješanje na makrorazini karakterizira se **raspodjelom vremena zadržavanja fluida** (RVZ funkcija), a to miješanje ima presudan utjecaj na značajke reaktora.

- **kemijska reakcija na površini katalizatora**

Brzina katalitičke reakcije na površini katalizatora modelira se uobičajenim izrazima, tj. Hougen-Watsonovim modelima ili empirijskim modelima potencijuskog oblika.

Utjecaj unutarfaznih otpora u porama katalizatora izražava se značajkom djelotvornosti.

Reaktorski modeli

- Zavisno od složenosti realne situacije reaktorski modeli **mog**u uključivati **sve spomenute značajke**.
- **Sa stupnjem složenosti modela raste i broj parametara** koji se trebaju poznavati, a i sam model postaje matematički vrlo složen.
- **U kolonskim reaktorima koncentracije reaktanata A i B mogu se mijenjati s položajem, odnosno po dužini, a u nestacionarnom radu mijenjaju se i s vremenom.**

Suspenzijski reaktor (engl. *Slurry reactor*)

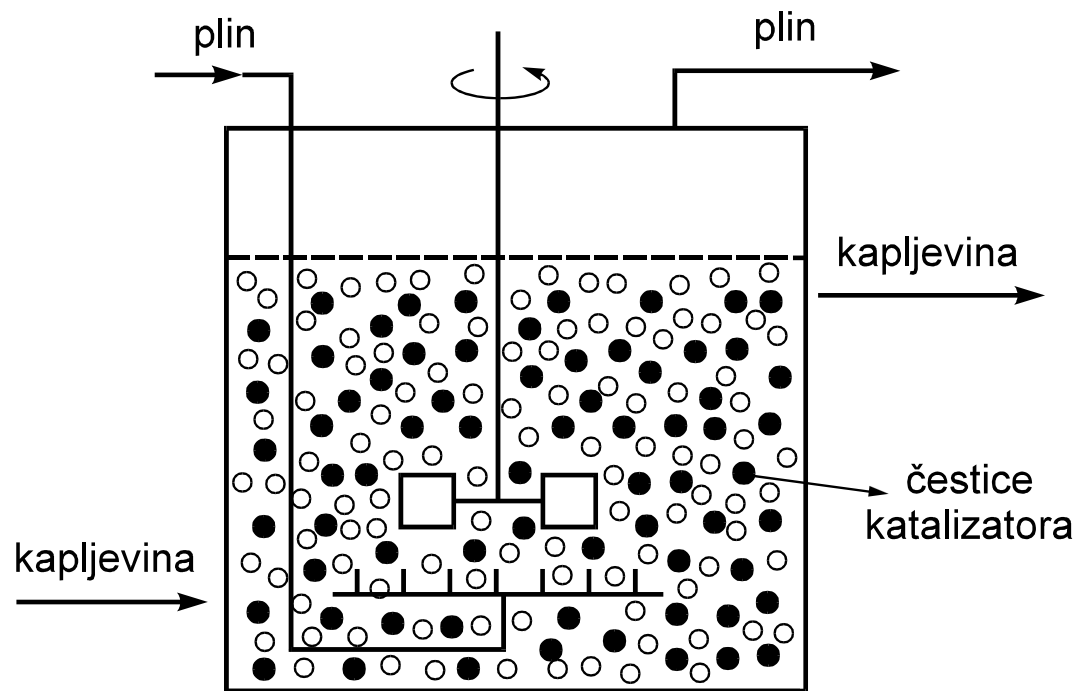
Suspenzijski reaktor često se koristi u industriji za hidriranja, oksidacije i dr. reakcije u kojima se dovode u kontakt plin i kapljevina uz prisutnost vrlo sitnih čestica suspendiranog katalizatora.

Postoji niz mogućih tipova suspenzijskih reaktora **zavisno od načina miješanja pojedinih faza**:

- reaktori s mehaničkim miješanjem,
- reaktori s miješanjem plinskom fazom,
- reaktori s uzvitlanim slojem katalizatora,
- pulzirajući reaktori.

Suspenzijski reaktori **s obzirom na način rada** mogu biti: *u stacionarnom ili nestacionarnom radu.*

Suspenzijski reaktor s mehaničkim miješanjem



- Uz uvjet da je miješanje kapljevine idealno, **koncentracije u kapljevitoj fazi su prostorno identične.**
- Nasuprot tome, **prolaz plina**, odnosno mjehurića kroz reaktor obično se pretpostavlja **idealnim strujanjem**, tako da se koncentracija reaktanta A u plinu mijenja po vertikalnom položaju.
- Ukupna je brzina rezultanta svih prisutnih procesa i prijenosa tvari te brzine kemijske reakcije.
- **U stacionarnom su stanju** sve brzine pojedinačnih procesa međusobno jednake te je na taj način moguće odstraniti **nepoznate koncentracije na granicama faza izražavajući ih s koncentracijama u plinu odnosno kapljevini.**

Tako npr, za nepovratnu reakciju prvog reda vrijedi:

- **reakcija na površini katalizatora:**

$$r_{A_u} = \eta k a_s C_l^s$$

gdje je:

a_s - vanjska površina katalizatora po jediničnom volumenu kapljevine bez mjehurića.

- **prijenos reaktanta iz plina do kapljevine:**

$$r_{A_u} = k_g a (C_g - C_g^*)$$

- **prijenos reaktanta od granice kapljevine kroz granični sloj:**

$$r_{A_u} = k_1 a (C_l^* - C_l)$$

- **prijenos reaktanta iz kapljevine do površine čestice katalizatora:**

$$r_{A_u} = k_s a_s (C_l - C_l^s)$$

Ravnoteža na granici plin – kapljevina dana je Henryjevim zakonom raspodjele:

$$C_g^* = H_A C_l^*$$

Konačni oblik jednadžbe, uz eliminaciju nepoznatih koncentracija

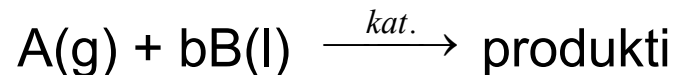
$$C_g^*, C_l^*, C_l \text{ i } C_l^s$$

$$r_{A_u} = K_0 a_s C_g$$

gdje je **ukupni koeficijent prijenosa, K_0** - funkcija tri koeficijenta prijenosa, specifične brzine reakcije i omjera površina:

$$\frac{1}{K_0} = \frac{a_s}{a_g} \frac{1}{k_g} + \frac{a_s}{a_g} \frac{H_A}{k_1} + H_A \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k\eta} \right)$$

- **Nisu uvijek značajni svi otpori prijenosu tvari.** Npr. pri hidriranju se obično koristi čisti vodik kao reaktant, te prema tome ne postoji otpor difuziji iz plina (vodika) do granične površine kapljevine.
- Isto tako **za slabo topljive plinove** najveći je otpor prijenosu sa strane kapljevine, pa je tada $C_l = C_g$
- Općenito su brzine prijenosa reaktanata mjerodavne i u plinu i u kapljevini, pa reakcije nisu prvog reda.
- Ako reakcija ima jednadžbu općeg oblika



te ako se pretpostavi:

- **idealno miješanje kapljevine i idealno strujanje plina**
- **najveći otpor prijenosu tvari kroz granični sloj kapljevine** (koncentracija reaktanta A sa strane plina na graničnoj površini s kapljevinom jednaka je koncentraciji tog reaktanta u masi plina)

- tada je **bilanca za tvar A u mjehuriću** dana izrazom

$$\varepsilon_g u_g \frac{dC_{A_g}}{dz} = -\varepsilon_s r_{Au} = k_l a_l \left(\frac{C_{A_g}}{H_A - C_{Al}} \right) \quad *a$$

gdje je

ε_g i ε_s - dio volumena kapljevine zauzet mjehurićima, odnosno katalizatorom.

- Bilance za tvar A i B u kapljevini**, uz idealno miješanje su:

$$a_l (C_{B_{lu}} - C_{B_l}) = b r_{A_g} V_l \varepsilon_s \quad *b$$

$$\frac{V}{z} \int_0^z k_l a_l \left(\frac{C_{A_g}}{H_A - C_{Al}} \right) dz = v_l C_{Al} + V_l \varepsilon_s r_{A_g} \quad *c$$

gdje je:

b – steh. koef.

V_l - volumen kapljevine u reaktoru,

v_l - volumni protok kapljevine,
 $C_{B_{lu}}$ - koncentracija reaktanta B na ulazu u reaktor.

- U jed. ***b** ulazna koncentracija reaktanta A u kapljevitoj fazi jednaka je nuli. Ukupna brzina r_{A_u} računa se s obzirom na koncentracije reaktanta A i B u kapljevini.

U praksi se pojavljuju uglavnom dva tipa reakcija:

- Brzina uklanjanja reaktanta A iz plina je bitna, npr. kao kod odstranjenja onečišćenja iz zraka.
- Bitna je brzina pretvorbe reaktanta B u kapljevini kao npr. kod hidriranja ili oksidacija.

- Za prvi tip reakcija bitna je jedino reakcija u kojoj nestaje reaktant A iz plinske faze. Jed. ***a** se tada može napisati kao

$$\varepsilon_g u_b \frac{dC_{A_g}}{dz} = \frac{1}{\frac{1}{k_c a_s} + \frac{\varepsilon_s}{k_l a_l}} \left(\frac{C_A^s}{H_A - C_A^s} \right)$$

gdje je:

a_s - specifična vanjska površina katalizatora po jediničnom volumenu katalizatora.

- **Koncentracija reaktanta A na površini katalizatora**, C_A^s može se izračunati iz bilance:

$$\frac{1}{\frac{1}{k_s a_s} + \frac{\varepsilon_s}{k_l a_l}} \left(\frac{C_A^s}{H_A - C_A^s} \right) = r_{A_u} (C_A^s, C_B^s)$$

i

$$k_{s_B} a_s (C_{B_l} - C_B^s) = b r_{A_u} = b k_f (C_A^s, C_B^s)$$

Pri postavljanju ovih bilanci pretpostavlja se da **ne postoji unutarfazna difuzija u česticu katalizatora** te da **koncentracija reaktanta B u kapljevini ostaje stalnom**.

- Za drugi slučaj, **kada su bitne konverzije reaktanta B u kapljevini**, jed. *c nije potrebna ako se pretpostavi da je reaktant A u plinu u suvišku. To je npr. vodik u reakciji hidrodosulfurizacije. Tada je potrebna samo jed. *b koja se može napisati kao

$$v_{0l} a_s (C_{B_{lu}} - C_{B_l}) = k_s a_s (C_{B_l} - C_B^s) V \varepsilon_s$$

- **Koncentracije reaktanta B na površini katalizatora**, C_B^s mogu se dobiti iz bilanci

$$k_{s_B} a_s (C_{B_l} - C_B^s) = b k_f (C_A^s, C_B^s)$$

$$k_{s_A} a_s \left(\frac{C_{A_g}}{H_A - C_A^s} \right) = k_f (C_A^s, C_B^s)$$

Prethodne 3 jednačbe dostatne su za proračun reaktora uz poznavanje odgovarajućih parametara.

- Opći problem kada je potrebno uzeti u obzir promjene koncentracija oba reaktanta, jed. $*a - *c$ moguće je riješiti postavljanjem svih bilanci. Rješenje jed. $*a$ jeste:

$$C_{Ag_i} = C_{Ag_u} \exp[-K] + C_{A_l} \{1 - \exp[-K]\}$$

gdje je:

$$K = \frac{k_l a_l}{H_A \varepsilon_B V_B}$$

C_{Ag_i} - koncentracija A na izlazu iz reaktora,

C_{Ag_u} - ulazna koncentracija istog reaktanta.

- Jed. *b rješava se istovremeno sa sljedećim algebarskim jednažbama, odnosno bilancama:

$$v_l (C_{B_{lu}} - C_{B_l}) = b k f (C_A^s, C_B^s) V \varepsilon$$

$$\frac{V}{Z} \varepsilon_B (C_{A_{gu}} - C_{A_{gi}}) = v_l C_{A_l} + b f (C_A^s, C_B^s) V \varepsilon_s$$

$$k_{s_A} a_s (C_{B_l} - C_B^s) = b k f (C_A^s, C_B^s)$$

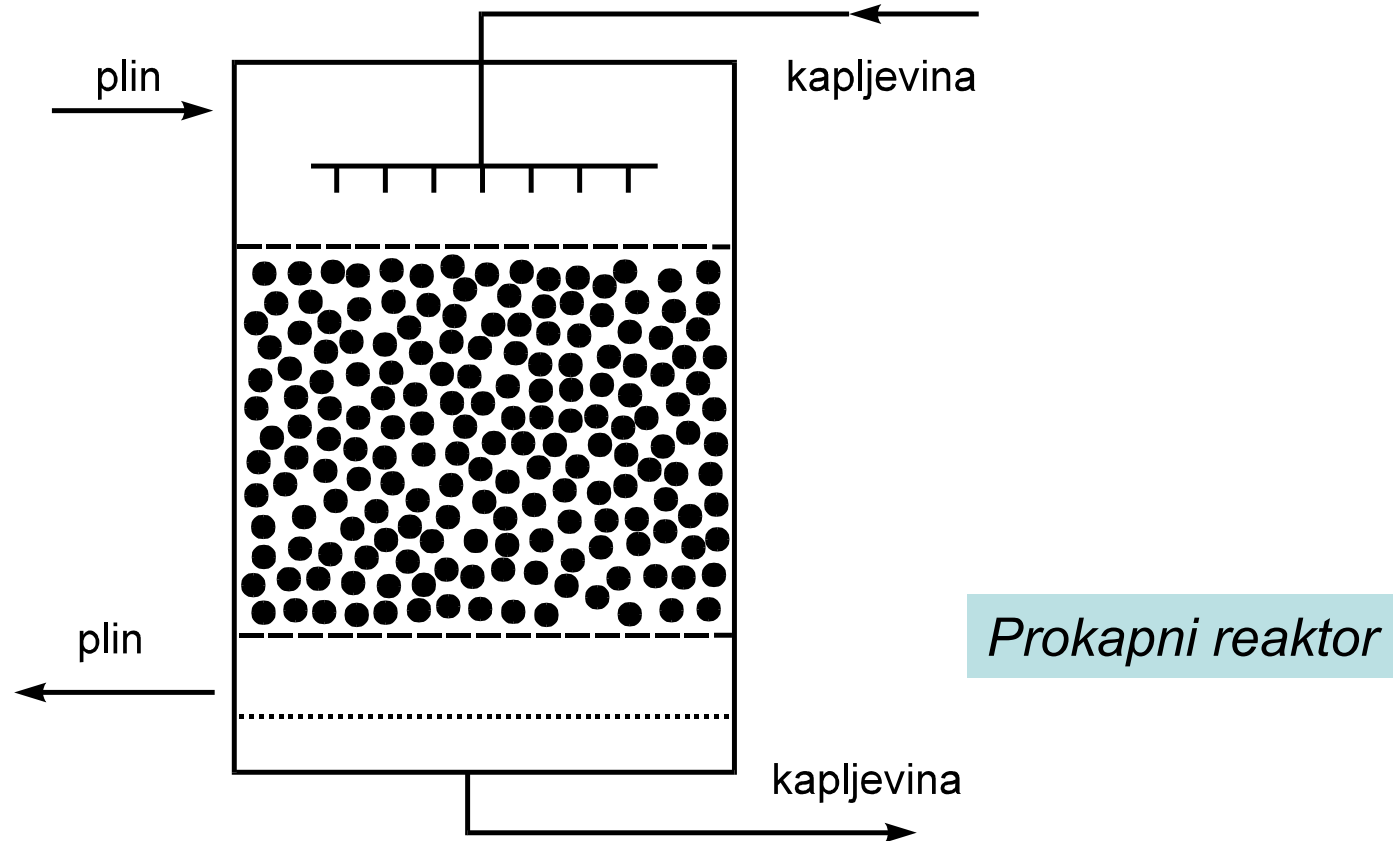
$$k_{s_A} a_s (C_{A_l} - C_A^s) = k f (C_A^s, C_B^s)$$

- Ako se utvrdi da ja prisutna **unutarfazna difuzija** potrebno je brzinu površinske reakcije **množiti značajkom djelotvornosti, η** .

Najvažniji zaključci koji su izvedeni ispitujući dinamičko ponašanje suspenzijskog reaktora promjenom neke od varijabli:

- Disperzija plinske faze nema veliki utjecaj niti na stacionarno niti na prijelazno stanje rada reaktora.
- Može se uvijek pretpostaviti da plin prolazi kroz reaktor idealnim strujanjem.
- **Odzivi na ulazne poremećaje su brži:**
 - ✓ ako su veći protoci plinske faze,
 - ✓ ako je veća masa katalizatora,
 - ✓ ako su čestice katalizatora manjeg promjera,
 - ✓ ako su veće dimenzije reaktora i
 - ✓ ako je brža kemijska reakcija.

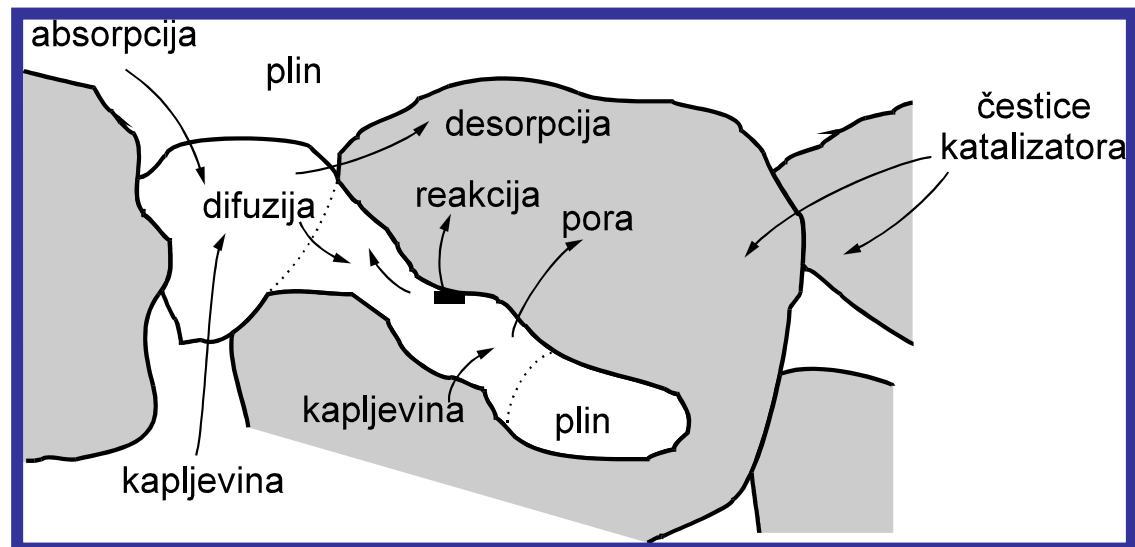
Prokapni reaktori



Izvedba prokapnih reaktora slična je izvedbi katalitičkih reaktora s nepokretnim slojem katalizator!

- Cijeli je sustav ipak **složeniji**, jer sudjeluju mnogi procesi, a potrebno je poznavati i mnogo parametara da bi se na osnovi bilančnih jednadžbi proračunao reaktor. **Složenost se ogleda u prirodi reakcija, raspodjeli pojedinih faza u reaktoru te kvašenju katalizatora kapljevnom.**
- Kod egzotermnih reakcija može se pojaviti i **neizoternost rada**, a poneki put dolazi i do **isparavanja kapljevitoeg reaktanta**.
- Kemijska se reakcija odigrava u porama katalizatora koje su ispunjene kapljevnom, pa je time znatno **povećan otpor prijenosu tvari, odnosno reaktanta**.
- Općenito je **reakcijski put složeniji** u usporedbi s reakcijom vođenom u suspenzijskom reaktoru.

Procesi koji su prisutni pri provedbi reakcije u prokapnom reaktoru



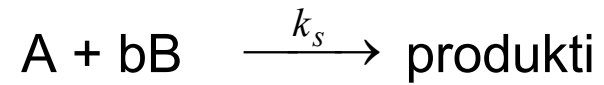
- Smatra se da je postignuta **jednolična raspodjela plina i kapljevina** kada je **omjer $d_r/d_p > 1$**
- **Problem nepotpunog moćenja zrna katalizatora** pojavljuje se **kada su brzine protjecanja kapljevine male**. U nekim slučajevima nije moguće zanemariti niti **aksijalnu disperziju**.

Prema tome, ukupna brzina je funkcija:

- ✓ ulaznih veličina (protoci plina i kapljevine),
- ✓ svojstava sustava, kao npr. prijenosu tvari i topline,
- ✓ značajki katalizatora,
- ✓ geometrije reaktora,
- ✓ tlaka i
- ✓ temperature.

Sve te značajke utječu na **hidrodinamičko ponašanje sustava** u cjelini. Opći model koji uzima u obzir sve navedene značajke sastoji se iz niza bilanci za množinu tvari i topline u plinu, kapljevini i unutar katalizatora.

- Ako se promotri opća reakcija



odgovarajuće bilance su:

- **Za reaktant A u plinskoj fazi:**

$$-D_{A_g} \frac{d^2 C_{A_g}}{dz^2} + v_g \frac{dC_{A_g}}{dz} + (k_l a_l)_A (H_A C_{A_g} - C_{A_l}) = 0$$

- **Za reaktant A u kapljevini:**

$$-D_{A_l} \frac{d^2 C_{A_l}}{dz^2} + v_l \frac{dC_{A_l}}{dz} + (ka_s)_A (C_{A_l} - C_A^s) - (k_l a_l)_A (H_A C_{A_g} - C_{A_l}) = 0$$

- **Za reaktant B u kapljevini:**

$$-D_{B_l} \frac{d^2 C_{B_l}}{dz^2} + v_l \frac{dC_{B_l}}{dz} + (ka_s)_B (C_{B_l} - C_B^s) = 0$$

- **Za reaktante u porama katalizatora:**

$$(ka_s)_A (C_{A_l} - C_A^s) = (ka_s)_B (C_{B_l} - C_B^s) (1 - \varepsilon_0) k_s n_c \eta C_A^s b C_B^s$$

- **Bilanca topline:**

$$-\lambda_e \frac{d^2 T}{dz^2} + \left(v_{0_l} \rho_l c_{p_l} + v_{0_g} \rho_g c_{p_g} \right) \frac{dT}{dz} = (1 - \varepsilon_0) k_s n_c \eta C_A^s b C_B^a$$

Opći model može se znatno pojednostaviti ako se uzmu u obzir razne pretpostavke, npr. ako se pretpostavi:

- idealno strujanje plina i kapljevine kroz reaktor,
- ravnoteža između plina i kapljevine je postignuta,
- međufazni je prijenos brz,
- kapljevina ne isparava i postignuto je potpuno kvašenje zrna katalizatora,
- izotermnost rada,

mogu se izvesti sljedeće bilančne jednadžbe:

- **Bilanca za reaktant A u plinu:**

$$u_g \frac{dC_{A_g}}{dz} = -(k_l a_l) \frac{C_{A_g}}{H_A - C_{A_l}}$$

- **Bilanca za reaktant A u kapljevini:**

$$u_l \frac{dC_{A_l}}{dz} = -(k a_s) (C_{A_l} - C_A^s) + (k_l a_l) \frac{C_{A_g}}{H_A - C_{A_l}}$$

Kako se vidi iz zadnje jed., reaktant A koji se izvorno nalazi u plinu nadomještava se prijenosom iz plinske faze u kapljevinu, a troši se prijenosom iz kapljevine do površine katalizatora.

- **Bilanca za reaktant B:**

$$u_l \frac{dC_{B_l}}{dz} = -(k a_s)_B (C_{B_l} - C_B^s) \quad *d$$

- Početni, odnosno rubni uvjeti pri rješavanju gornjih jednažbi su ulazne koncentracije reaktanata A i B na ulazu u reaktor.
- Potrebna **veza između koncentracija reaktanata na površini katalizatora (vanjskoj i unutrašnjoj) i koncentracija u kapljevitoj fazi** dobije se izjednačavanjem brzina prijenosa do površine i ukupne kemijske reakcije na površini:

$$(ka_s)_A (C_{A_l} - C_A^s) = r_{A_u} = k_s \eta f(C_A^s, C_B^s) \quad *e$$

$$(ka_s)_B (C_{B_l} - C_B^s) = br_{A_u} = bk_s \eta f(C_A^s, C_B^s) \quad *f$$

- Uz poznate parametre i početne uvjete, sustav jednažbi ***d - *f** moguće je riješiti numeričkim metodama.

Usporedba i primjena trofaznih reaktora

- opće značajke višefaznih reaktora

A.

Suspenzijski reaktori (reaktori s pokretnim česticama katalizatora)	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none">• Pogodnost za kontinuirani i prekidni rad• Posjeduju velik toplinski kapacitet; omogućen je dobar prijenos topline kao i vođenje procesa• Uz dobar izbor mješala može se raditi i s vrlo viskozim kapljevina• Ostvaren je vrlo dobar kontakt između kapljevine i čestica katalizatora• Mogu se koristiti vrlo aktivni katalizatori, a brzine su općenito velike jer su čestice katalizatora male• Postoji mogućnost zamjene i regeneracije katalizatora• Brzina miješanja može se mijenjati u širokim granicama	<ul style="list-style-type: none">• Uz mehaničko miješanje potreban je dodatni utrošak energije• Nije moguće postići veći pritisak u reaktoru zbog konstruktivnih razloga• Općenito je manja prosječna brzina reakcije zbog suštine rada kao PKR reaktora• Kako je omjer kapljevina - plin uvijek velik, postoji opasnost za usporedo odigravanje postranih reakcija, a to također vodi i do značajnih otpora prijenosu tvari (otopljenog reaktanta u kapljevitoj fazi)• Odvajanje katalizatora iz reakcijske smjese je u pravilu otežano

B.

Prokapni reaktori (reaktori s nepokretnim slojem katalizatora)	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none">• Prolaz reakcijske smjese je približan idealnom strujanju te se mogu postići veće konverzije• Omjer kapljevine prema plinskoj fazi je malen, tako da se mogu izbjeći reakcije u homogenoj fazi (bez katalizatora)• Kapljevina struji kao sloj (film) oko čestica katalizatora tako da je difuzijski otpor reaktanata iz plinske faze do površine čestice malen• Pad tlaka je niži u usporedbi s drugim izvedbama kolonskih reaktora s nepokretnim slojem katalizatora• Ako je reakcija egzotermna, temperatura se može regulirati recikliranjem kapljevine ili ugradnjom međuhlađenja (<i>quench</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Uslijed većih čestica katalizatora iskorištenje je katalizatora općenito manje, a unutarfazna difuzija može smanjiti iskorištenje katalizatora• Kolonski reaktori nisu općenito pogodni za reakcije u kojima sudjeluje viskozna kapljevina• Kod prokapnih reaktora postoji dodatni problem nepotpunog močenja katalizatora kapljevinom• Prijenos topline u radijalnom smjeru općenito je loš• Uz manje brzine protoka kapljevine može doći do postranih protjecanja i nepotpunog kvašenja zrna katalizatora

B. nastavak

Prokapni reaktori (reaktori s nepokretnim slojem katalizatora)	
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none">• Zbog većih čestica, gubitak katalizatora je malen• Kako nema pokretnih dijelova, maleni su troškovi održavanja	