



---

# KATALITIČKO REAKCIJSKO INŽENJERSTVO

Integralni pristup izvedbi katalizatora i reaktora

Podjela katalitičkih reaktora

Usporedba homogeno- i heterogeno-katalitičkih procesa



# Što je kemijski reaktor?

---

- **procesni uređaj u kojem se svrhovito odigrava i vodi kemijska reakcija u cilju dobivanja korisnog produkta**
- kemijski reaktor je jedan od mnogobrojnih procesnih aparata (ili procesnih jedinica), koji se susreću u kemijskoj procesnoj industriji
- bitna razlika kemijskih reaktora u odnosu na ostale procesne jedinice jeste u tome što se u njima provodi **kemijska reakcija, uz mogućnost istovremenog odigravanja fizičkih procesa prijenosa tvari i energije**
- **kemijski reaktor** je polazna osnova pri dimenzioniranju i projektiranju procesne opreme u okviru kemijskog procesa i **predstavlja “srce” svakog tehnološkog procesa**
- može biti različitih oblika, izvedbi i veličina
- različit način rada zavisno o prirodi reakcijskog sustava i njegovog rada kao funkcije temperature, tlaka, katalitičkih značajki i dr. čimbenika
- *laboratorijski reaktori* – korisni za dobivanje temeljnih informacija o reakcijskom sustavu, te određivanje kinetike reakcije
- *industrijski reaktori* – bitno drugačiji način rada



**art**

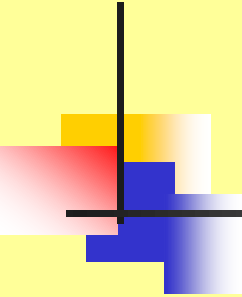


**prošlost...**

**science**



**sadašnjost? budućnost??**

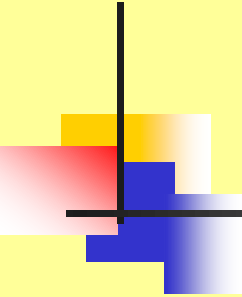
- 
- **Integracija umjetne inteligencije (UI), strojnog učenja (ML) i računalnog modeliranja s eksperimentalnom katalizom** drastično mijenja dizajn katalizatora i razvoj kemijskih katalitičkih procesa;
  - **UI i ML pristupi** omogućavaju *prediktivno modeliranje; primjena naprednih reaktorskih sustava za istovremeno testiranje velikog broja katalizatora (high-throughput screening)*, teorijski mehanistički proračuni i racionalan dizajn katalizatora; povezivanje uvjeta sinteze, strukturnih značajki i dr. oblika metrike katalitičkih performansi na različitim razinama.
  - **Platforme** kao što su PHOTOREAC, QMOF i PhotoCatDB značajno olakšavaju prijelaz s laboratorijskih eksperimenata na procese na reaktorskoj razini.
  - **Hibridne strategije** koje kombiniraju mehanističko razumijevanje s modelima utemeljenim na bazama podataka poboljšavaju interpretabilnost, prediktivnu točnost i optimizaciju procesa.
  - **Pomak paradigme prema katalizi utemeljenoj na bazama podataka** ⇒ ubrzavanje otkrića i inovacija, uz podržavanje održivih kemijskih tehnologija i uz naglašenu ulogu ljudskih kompetencija i odgovornu primjenu UI.



# Katalitičko reakcijsko inženjerstvo

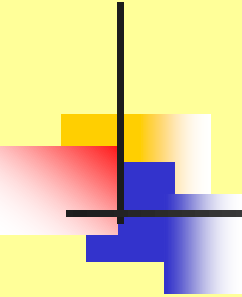
---

- znanstvena disciplina koja se zasniva na povezivanju fundamentalnih znanja iz katalize, industrijske primjene katalize i katalitičkih procesa te znanja vezanih za dizajniranje i rad industrijskih kemijskih reaktora
- *izučavanje stvarne kinetike reakcije*, tj. brzine reakcije u odsutnosti otpora prijenosu tvari i topline
- *izučavanje interakcija između fizičkih procesa prijenosa i same kemijske reakcije*
  - takve interakcije mogu znatno utjecati na ukupnu brzinu kao i na selektivnost katalizatora u industrijskim reaktorima, pa je zbog toga takve utjecaje potrebno poznavati prilikom uvećanja i prenošenja s laboratorijske na industrijsku razinu

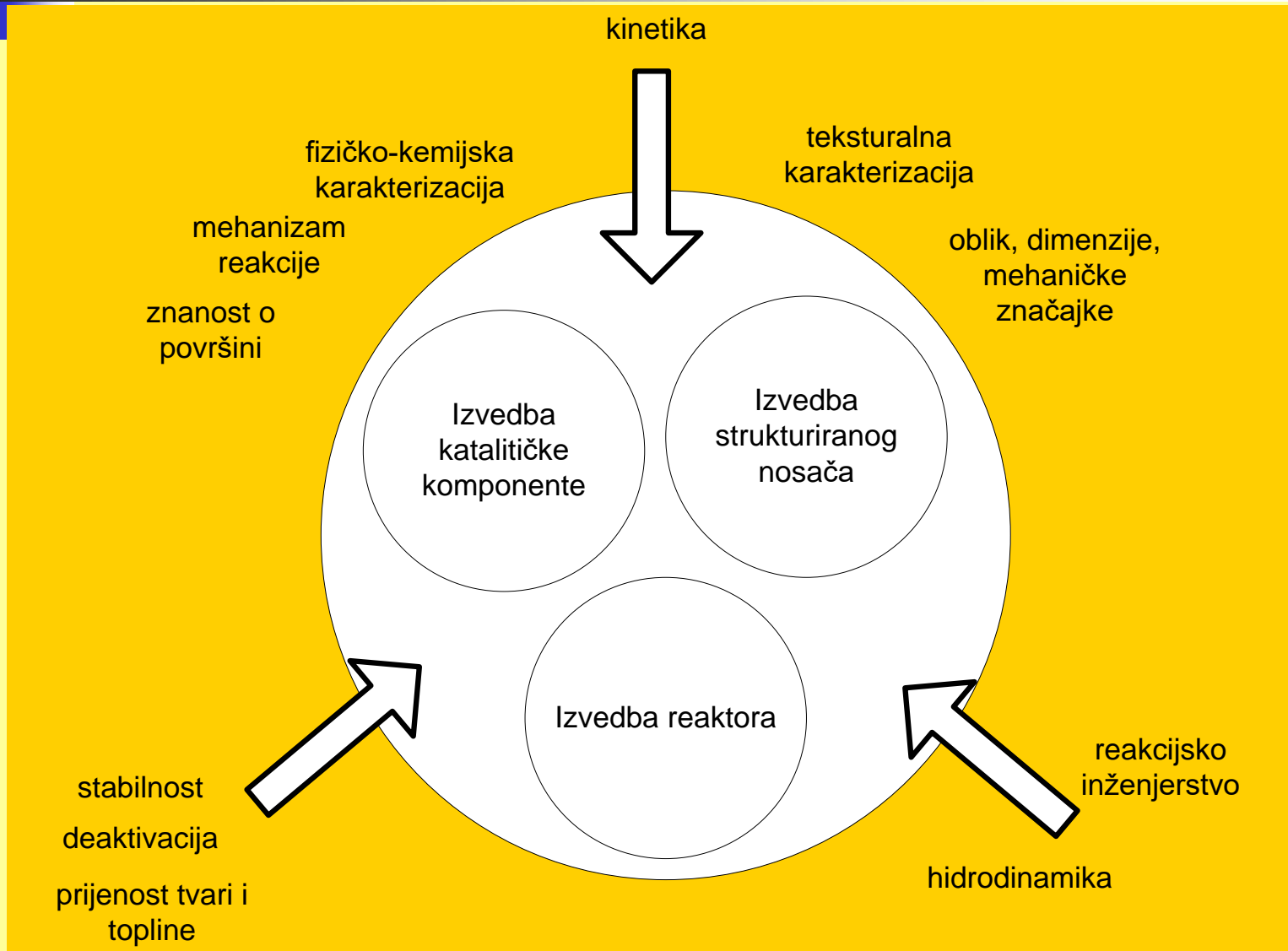


---

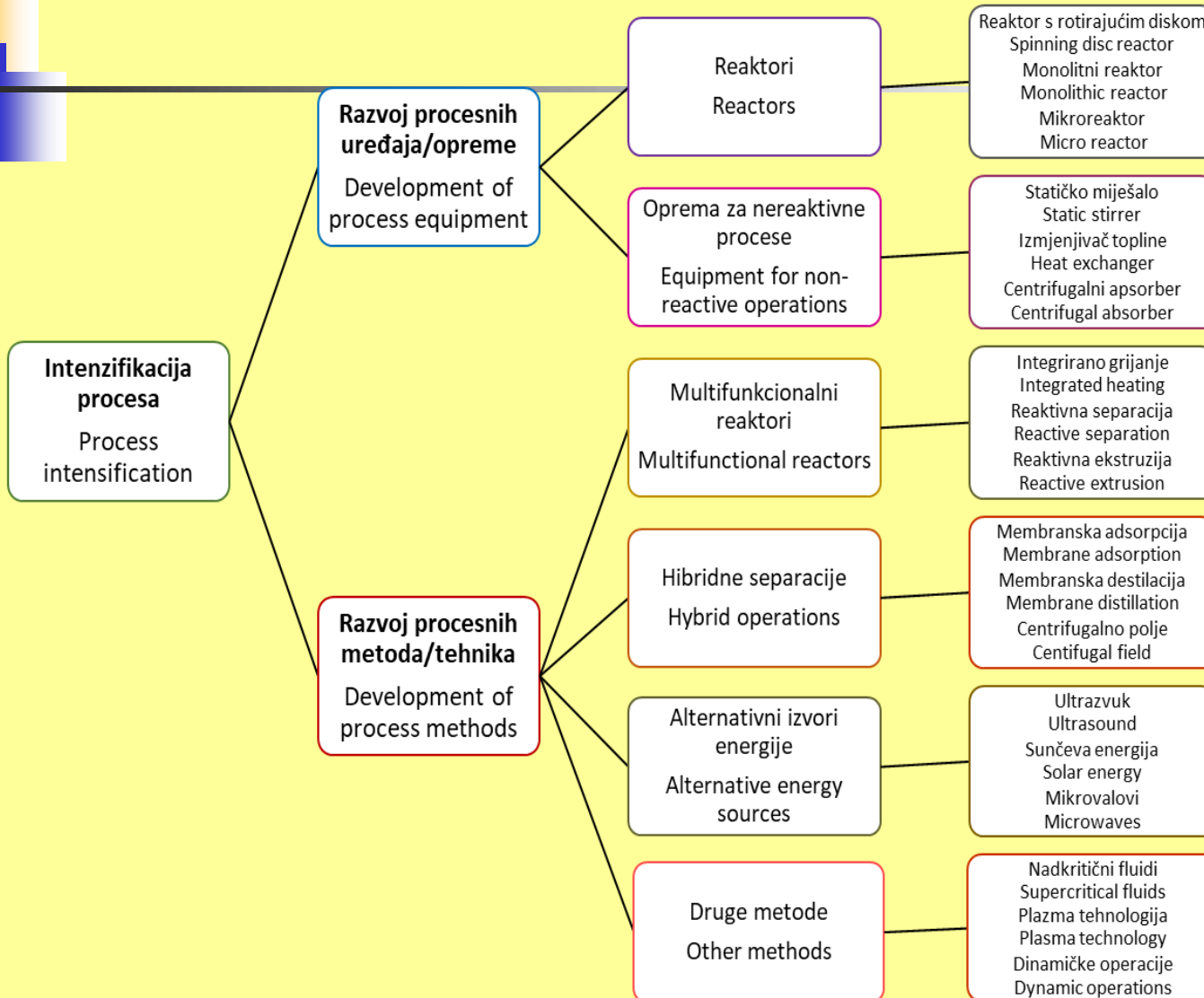
Ispitivanja obično započinju u laboratorijskim reaktorima  
⇒ na temelju dobivenih rezultata te primjenom odgovarajućih zakona očuvanja (mase, energije i količine gibanja odnosno impulsa) moguće je **dimenzionirati reaktor** koji će omogućiti postizanje maksimalne brzine reakcije te zadovoljavajuće selektivnosti s obzirom na željeni produkt kod optimalnih reakcijskih uvjeta.

- 
- 
- 60 % svih produkata dobiveno je u nekom od katalitičkih procesa,
  - 90 % svih modernih kemijskih procesa su katalitički procesi,
  - u 80 % slučajeva rabe se čvrsti katalizatori

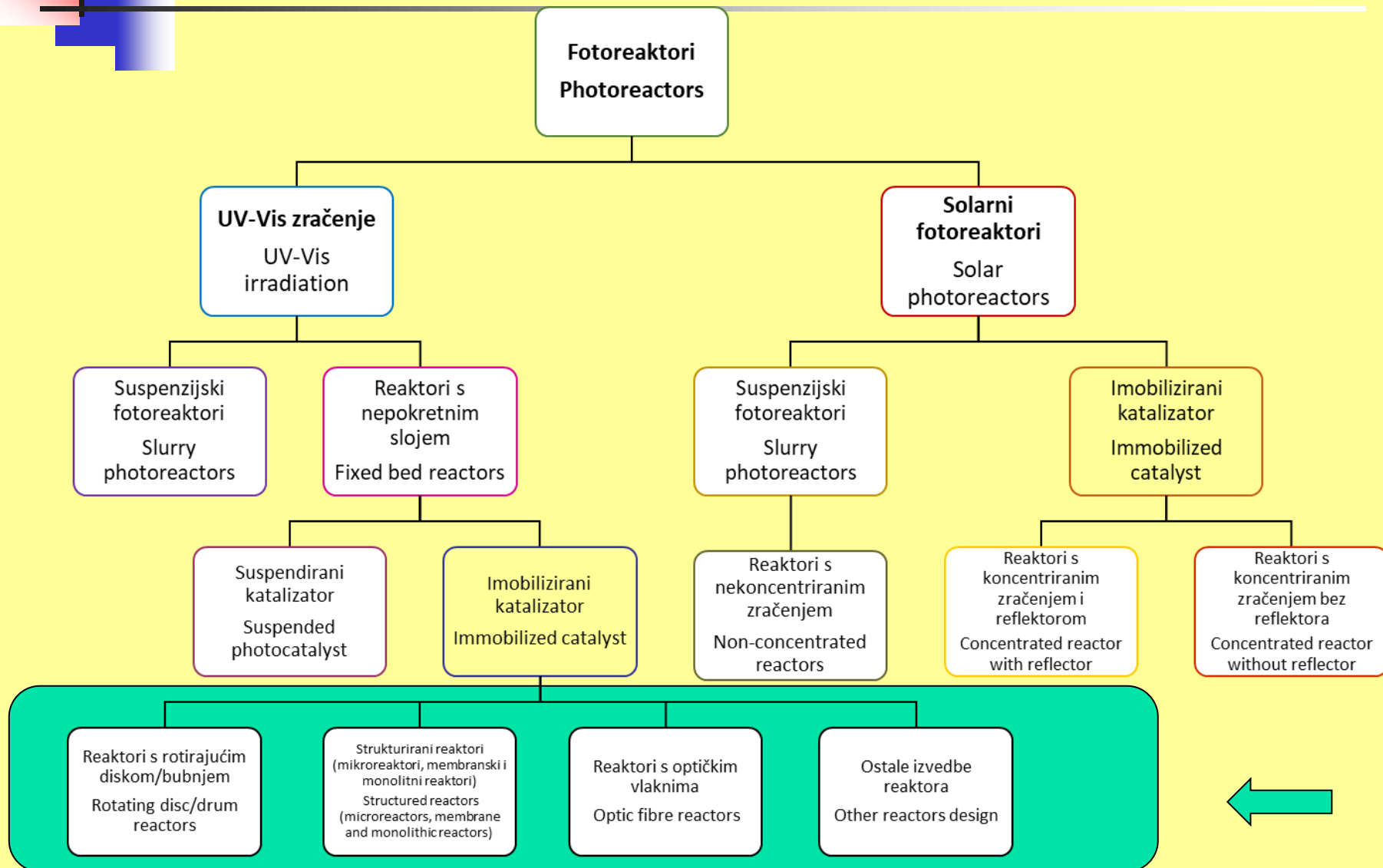
# Integralni pristup razvoju katalizatora i reaktora



# Sadašnji i budući izazovi – primjena metodologije intenzifikacije procesa (PI)



# Primjena metodologije intenzifikacije procesa (PI) u fotokatalizi





# Reakcijsko inženjerstvo fotokemijskih procesa

---

Tijekom posljednjeg desetljeća fotokemijski procesi ponovno su u centru pažnje nakon razdoblja smanjene popularnosti.

## **Važna područja primjene fotokemijskih procesa su:**

- sinteza kemikalija i proizvoda,
- pretvorba i skladištenje energije,
- obrada vode i zraka...

## **Glavni pokretači renesanse fotokemijskih procesa su:**

- mogućnost korištenja sunčeve svjetlosti kao održivog izvora energije,
- blagodati povezane s kontinuiranim (protočnim) mikro- i mezo – reaktorima,
- komercijalna dostupnost LED izvora velike snage za širok raspon valnih duljina...

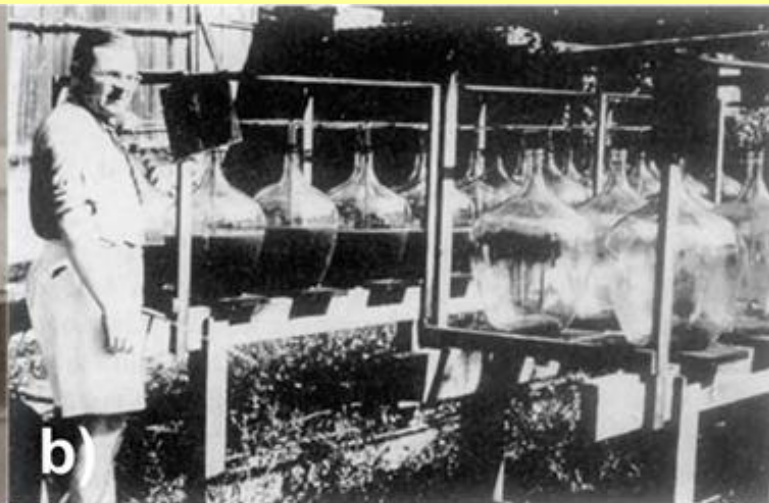
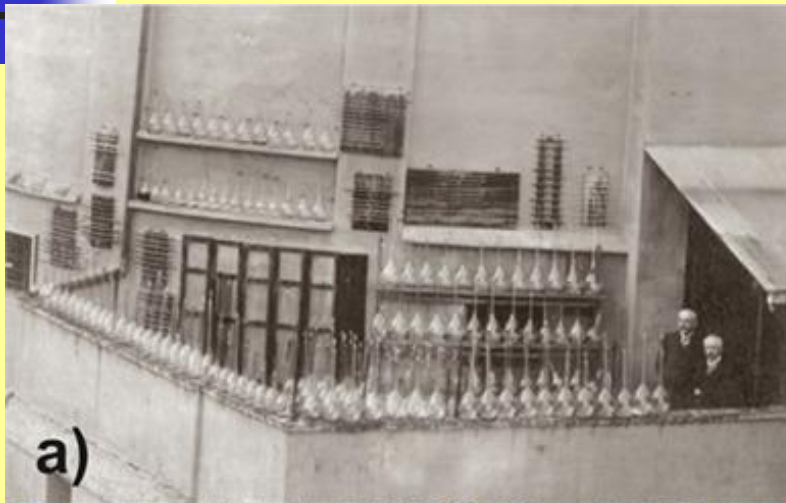


## Izazovi vezani uz provođenje fotokemijskih procesa

---

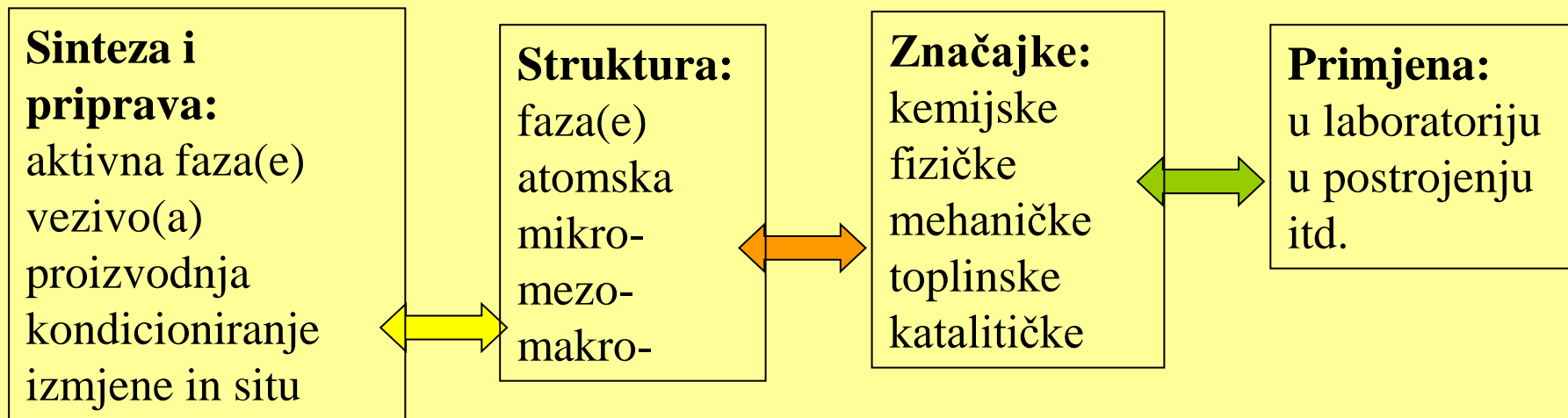
- ***Nelinearna interakcija svjetlosti s materijom*** rezultira snažnim gradijentima intenziteta svjetlosti, uzrokujući jake gradijente brzina reakcije duž svjetlosnog puta. To može dovesti do smanjene učinkovitosti ili do sve većeg nastajanja sporednih proizvoda.
- ***Zračenje reaktanata neodgovarajućim valnim duljina*** može imati slične posljedice.
- ***Apsorbirani broj fotona*** je upravljačka varijabla za sve fotokemijske procese koja diktira brzinu reakcije i time izravno utječe na zahtjeve za sve povezane procese, kao što su prijenos mase i topline.
- Da bi se iskoristio potencijal fotokemijskih reakcija, buduća istraživanja moraju se nositi s tim izazovima reakcijskog inženjerstva, a posebice s učinkovitim ***vođenjem fotona do reaktanata***, jer to je ključni element za dizajniranje učinkovitijih fotokemijskih procesa.

Evolucija fotoreaktora od jednostavnih staklenih tikvica koje su postavljene na krovove (a), preko staklenih reaktora velikog volumena (b) do specijaliziranih uređaja (c) ilustrativan je primjer primjene PI:



- **Primjer industrijske fotokem.**  
**Primjene** - sinteza artemisinina, antimalarijskog lijeka. Utvrđeno je da je fotokemijska sinteza superiornija od uobičajenog, ima veću selektivnost i izbjegava upotrebu teških metala tijekom reakcije.
- Daljnja intenzifikacija fotokem. procesa može se postići primjenom reaktora s kontinuiranim tokom...

# Klasičan pristup - sagledavanje međudjelovanja različitih elemenata izvedbe katalizatora

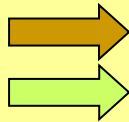


# KATALITIČKI PROCES

## - izbor i dimenzioniranje reaktora

**EKONOMIKA**

REAKTANTI

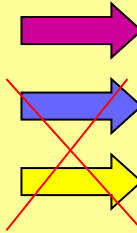


ZAHTJEVI  
PROCESA

REAKTOR

?

minimalni troškovi  
ukupnog procesa



željeni produkti  
neželjeni produkti  
neizreagirani reaktanti

- maksimalna selektivnost
- maksimalna konverzija
- jednostavno uvećanje
- mali pad tlaka
- ....

- sigurnost
- ....



---

## **Izbor i izvedba katalitičkog reaktora općenito zavise o:**

- vrsti procesa i osnovnim procesnim varijablama: vrijeme zadržavanja, temperatura, tlak, prijenos tvari između različitih faza, značajke reaktanata i dostupnost katalizatora,
- specifičnim potrebama procesa (sigurnost, ekološki zahtjevi, mogućnost prenošenja na veće mjerilo, itd.)
- specifični zahtjevi procesa (postizanje zadovoljavajuće konverzije, selektivnosti, velikog iskorištenja)
- ekonomika (minimalni ukupni troškovi procesa)

# Izvedba reaktora kao rezultat djelovanja različitih čimbenika





# Izbor i proračun reaktora za određeni kemijski proces

---

*rješavanje sljedećih ključnih problema:*

- izbor reaktora s obzirom na način strujanja fluida,
- uklanjanje/dovođenje topline,
- prijenos tvari i energije,
- dinamiku fluida i
- ostalo (deaktivacija katalizatora, vijek trajanja katalizatora, mogućnost regeneracije katalizatora, itd.)



## Podjela katalitičkih reaktora

---

- Prema broju prisutnih faza
- Prema prirodi katalize
- Prema kretanju katalizatora i/ili načinu smještaja u reaktoru
- Prema raspodjeli temperature u reaktoru
- Prema izmjeni topline s okolinom

## Podjela katalitičkih reaktora s obzirom na broj prisutnih faza:

- **Reaktori s dvije faze**, npr. sustav plin/krutina i kapljevina/krutina
- **Reaktori s tri faze**, npr. sustav plin/krutina/kapljevina.

*Broj i vrsta prisutnih faza (G/S, G/L, G/L/S, L/L/S) neposredno utječu na procese međufaznog prijenosa tvari i topline između faza u kontaktu.*

*višefazni reaktori – najmanje 2 reaktanta, a kruta faza je uglavnom katalizator*

## Reaktori u sustavima s dvije faze (G-S, L-S)

- ***Najčešće reakcije u plinskoj fazi***, koje se odigravaju u prisutnosti čvrstog katalizatora (reaktori s nepokretnim slojem katalizatora)  
⇒ imaju brojne tehničke prednosti u odnosu na druge sustave.
- ***Mogu se provoditi kontinuirano kod niskog do srednjeg tlaka***
- U usporedbi s procesima u kapljevitoj fazi, ***zahtijevaju nešto više temperature reakcije i zbog toga toplinski stabilnije polazne materijale, produkte i katalizatore.***
- ***Selektivnost procesa često je znatno niža od selektivnosti procesa koji se provode u kapljevitoj fazi.***
- Od posebne važnosti za takav tip reakcija je ***velika površina***. Zavisno o vrsti katalizatora (veličina zrna, poroznost i sl.), potrebnom vremenu zadržavanja, načinu masenog toka i prijenosu topline, mogu se koristiti različite izvedbe reaktora s nepokretnim i pokretnim slojem katalizatora.



## Najznačajniji čimbenici pri izvedbi ovih reaktora su:

---

- *raspodjela vremena zadržavanja* (utjecaj na konverziju i selektivnost)
- *temperatura* (održavanje temperature unutar zadanih temperaturnih intervala u aksijalnom i radijalnom smjeru; minimalna temperaturna razlika između reaktanata i površine katalizatora, kao i unutar sloja, odnosno zrna katalizatora)
- *vijek trajanja katalizatora i mogućnost regeneracije katalizatora*
- *pad tlaka*, kao funkcija oblika i dimenzija katalizatora te brzine strujanja

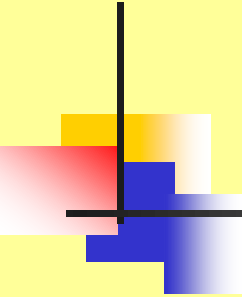
Najčešće primjenjivani reaktori za katalitičke reakcije u heterogenim sustavima u kemijskoj i petrokemijskoj industriji su reaktori s nepokretnim slojem i reaktori s pokretnim slojem. Međutim, najčešće se koriste upravo **reaktori s nepokretnim slojem**.



## Reaktori u sustavima s tri faze

---

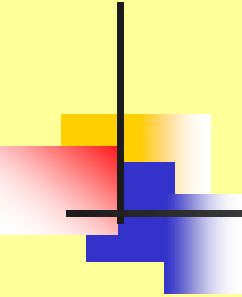
- *Reakcije reaktanata u plinovitom ili kapljevitom stanju na krutim katalizatorima* (u sustavima s tri faze) zahtijevaju **intenzivno miješanje ili drugi način ostarivanja dobrog kontakta između faza** da bi se omogućio zadovoljavajući prijenos tvari iz plinske faze do kapljevite faze i iz kapljevite faze do površine katalizatora.
- Višefazne reakcije česte su u industrijskoj praksi u kem. i petrokem. industriji
- Primjer značajnijih reakcija: *reakcije hidriranja kapljevina na plemenitim metalima, reakcije aminacije, oksidacije i sl.*
- Uobičajeni plinovi: vodik, kisik, vodena para, amonijak



# Prednosti trofaznih u odnosu na dvofazne reaktorske sustave

---

- mogućnost rada pri nižim T
- postizanje veće selektivnosti (zbog izbjegavanja sporednih reakcija ili zbog upotrebe kapljevite faze kao otapala)
- veća učinkovitost katalizatora i duže vrijeme zadržavanja
- izbjegavanje lokalnih pregrijavanja (tzv. “vruće točke”) zbog bolje toplinske vodljivosti i toplinskog kapaciteta kapljevina
- različite mogućnosti izvedbe i geometrije sustava



## Nedostaci trofaznih u odnosu na dvofazne reaktorske sustave

---

- povećanje otpora prijenosu tvari kroz sloj (film) kapljevine koja okružuje zrno katalizatora
- smanjenje brzine kemijske reakcije zbog rada pri nižim temperaturama



## Usporedba procesa u kapljevitoj fazi i procesa u pl. fazi

---

- Procesi u kapljevitoj fazi daju *veće konverzije* s obzirom na prostorno vrijeme u odnosu na procese u plinskoj fazi
- Veća toplinska vodljivost kapljevina omogućava *bolji prijenos topline*
- Kod provođenja reakcija u kapljevitoj fazi *na brzinu reakcije se može utjecati sprječavanjem sekundarne reakcije u kapljevitoj fazi te modifikacijom aktivnih centara na katalizatoru*



## Nedostaci procesa u kapljevitoj fazi

---

- *otežana separacija i pročišćavanje produkata reakcije* (dodatni troškovi vezani uz naknadne separacijske procese)
- *otežana separacija suspendiranog katalizatora od produkata reakcije*
- *prijenos tvari je otežan* zbog prisutnosti kapljevite faze, zbog toga je neophodno intenzivno miješanje što podrazumijeva i potrebu za mehanički stabilnim katalizatorom odnosno nosačima katalitički aktivnih centara.

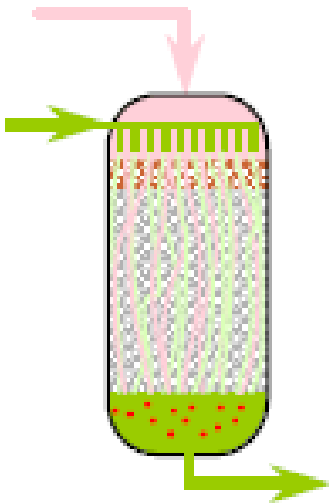
*S obzirom na izvedbu katalizatora višefazni reaktori se mogu podijeliti na sljedeći način:*

- reaktore s nepokretnim slojem katalizatora i
- suspenzijske reaktore u kojima je katalizator fino dispergirani u kapljevini.

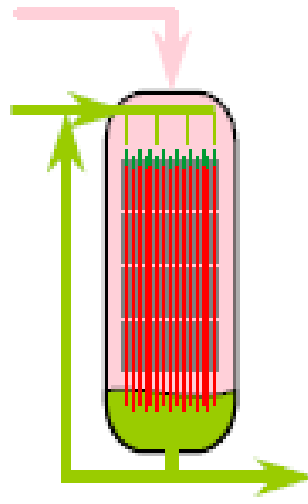
# Primjeri različitih izvedbi reaktora za sustav plin-kapljevina-krutina (G-L-S)

## Nepokretni sloj

prokapni sloj

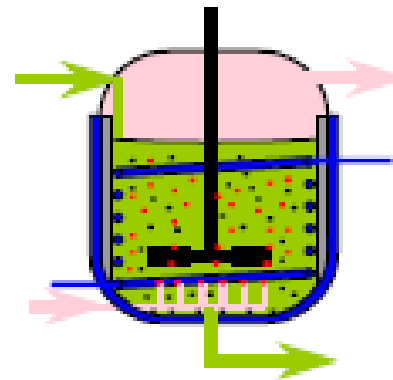


monolit

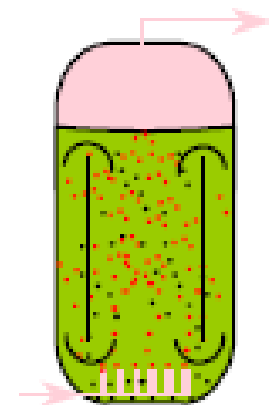


## Suspenzijski

mehaničko  
miješanje



kolonski  
tip



# Industrijski primjeri katalitičkih višefaznih katalitičkih reaktora – 2 faze

## ■ Katalitički reaktori s nepokretnim slojem katalizatora:

Parcijalna oksidacija o-ksilena do ftalnog anhidrida

Hidriranje aromata do olefina

Dehidriranje etilbenzena do stirena

## ■ Katalitički reaktori plin/kapljevina u vrtložnom sloju:

Katalitički kreking (FCC)

Proizvodnja alil klorida

Proizvodnja ftalnog anhidrida

Proizvodnja akrilonitrila (Sohio proces)



# Industrijski primjeri katalitičkih višefaznih katalitičkih reaktora – 3 faze

## **Prokapni reaktor (G-L-S)**

- Katalitička hidrodesulfurizacija
- Katalitičko hidriranje
- Katalitičko hidrokreiranje...

## **Reaktor s uronjenim slojem**

- Fischer-Tropsch
- Likvefakcija ugljena

## **Suspenzijski reaktor s mehaničkim miješanjem**

- Hidriranje masnih kiselina i nezasićenih masti
- Hidriranje acetona

## **Suspenzijski kolonski reaktor**

- Katalitička oksidacija olefina
- Izomerizacija ksilena u kapljevitoj fazi

## **Reaktor s vrtložnim slojem (G-L-S)**

- Proizvodnja kalcijevog sulfita
- Likvefakcija ugljena, SRC process



## Temeljne značajke višefaznih trofaznih reaktora

---

-Višefazni reaktori su jako *heterogeni*, a zbog činjenice da reaktanti mogu dolaziti u različitim fazama u sustavu su prisutni *različiti stupnjevi prijenosa tvari i topline* koji mogu utjecati na rad reaktora

*- otpori prijenosu - pojava koncentracijskih profila reaktanata i produkata*

Reaktant A je obično apsorbiran u kapljevini; on reagira na površini katalizatora s reaktantom koji je tamo prisutan.

Ako je katalizator porozan oba reaktanta difundiraju prema aktivnim centrima unutar katalizatora, a produkti difundiraju u suprotnom pravcu.

Ako je kvašenje katalizatora nepotpuno reaktant A izravno se adsorbira u kapljevini koja ispunjava pore katalizatora



## Temeljne značajke višefaznih trofaznih reaktora

---

- Da bi se procijenila opažena brzina reakcije potrebno je znati *stvarnu brzinu kemijske reakcije* i *brzine fizičkih procesa prijenosa reaktanata (unutarfazna i međufazna difuzija)*
- Ako je uključena kemijska ravnoteža potrebno je znati i *brzine prijenosa produkata*
- ***Brzine prijenosa zavise o:***
  - tipu, geometriji i veličini reaktora,
  - veličini katalizatora i načinu njegovog pakiranja u katalitičkom sloju,
  - radnim uvjetima



## Detaljan dizajn trofaznih reaktora podrazumijeva poznavanje:

---

- Hidrodinamike i načina strujanja
- Pada tlaka
- Zadržke faza i međufaznih površina
- Otpora prijenosu tvari i topline
- Disperzije i povratnih miješanja
- Raspodjele vremena zadržavanja faza i pojava vezanih uz segregaciju katalizatora, reaktanata i/ili produkata



## Podjela katalitičkih reaktora – s obzirom na prirodu katalize

---

- **Homogeno-katalitički reaktori**
- **Heterogeno-katalitički reaktori**

Kataliza može biti:

**a) *Homogena***

ako su svi učesnici reakcije uključujući i katalizator u istoj fazi (plinskoj ili kapljevitoj)

**b) *Heterogena***

ako se učesnici reakcije uključujući i katalizator nalaze u različitim fazama

*Doprinos homogeno-katalitičkih procesa u kem. ind.: 17-20 %  
(farmaceutska ind. i ind. polimera)*



## Homogeno - katalitički reaktori

---

*Homogeni katalizatori - topljivi u odg. otapalu (reakcijska smjesa sadrži katalitički kompleks u otopini - veća disperzija katalizatora)*

- mogu je precizno pratiti promjene na ligandima i/ili s reakcijskim uvjetima
  - selektivnost se može mijenjati promjenom liganda
  - jednostavno vođenje topline u tekućoj fazi
  - rad u ograničenom području temperature (blagi uvjeti rada)
  - nisu prikladni za jako endotermne reakcije (npr. krekiranje C-C veza kod FCC)
- 
- **Primjer:** alkilacija izobutana s alkenima *uz uporabu kiselina*, kao što su HF i  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kao katalizatora.
  
  - Velik dio istraživanja u homogenoj katalizi temelji se *na uporabi prijelaznih metala i njihovih kompleksa* kao katalizatora, *primjena organometalnih kompleksa, enzimska kataliza*. Ovi katalizatori postaju sve važniji i imaju brojne industrijske primjene.



## Primjena homogene katalize

---

Homogena kataliza - reakcija plinovitog i tekućeg reaktanta u prisutnosti katalizatora otopljenog u tekućoj fazi

Gotovo u svim područjima u kemijskoj procesnoj industriji, a posebice:

- *u reakcijama polimerizacije,*
- *pri proizvodnji različitih kemikalija (otapala, deterdženti, plastifikatori i sl.)*
- *u proizvodnji finih kemikalija...*

**Primjer:** proizvodnja octene kiseline (polazna sirovina za proizv. vinil acetata, celuloznog acetata, koristi se kao otapalo...):

- a) oksidacijom acetaldehida;
- b) izravnom oksidacijom ugljikovodika (npr. n-butana),
- c) karbonilacijom metanola ...

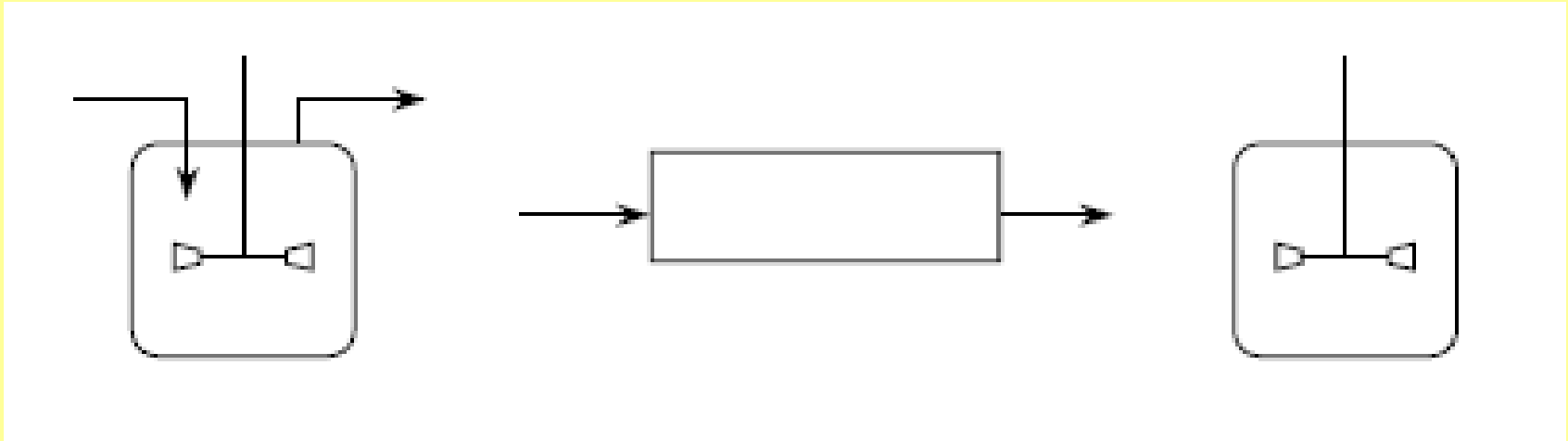


## Industrijski značajni homogeno-katalitički procesi

---

- **Kiselinsko-bazna kataliza** (kondenzacija, dehidriranje, hidroliza, halogeniranje) – katalizatori: kiseline, baze, fenol
- **Kataliza metalnim ionima** ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )(različite reakcije hidrolize)
- **Kataliza organometalnim kompleksima** (prijelazni Me ion vezan na ligande:  $\text{R}_2\text{C}=\text{CR}_2$ ,  $\text{RCO}$ ,  $\text{R}_3\text{P}$ ,  $\text{CO}\dots$ )
- **Reakcije karbenijevog iona** (alkilacije, kreiranje, hidrogenoliza, izomerizacija, disproporcioniranje, oligomerizacija) – katalizatori:  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{SbF}_5$
- **Reakcije koje uključuju CO**: karbonilacija, dekarbonilacija, hidroformilacija – katalizatori: Co, Pd, Rh karbonili, fosfini, Rh fosfin (Oxo proces)
- **Reakcije pregradnje ugljikovodika** (izomerizacija, alkilacija, disproporcioniranje) – katalizatori: organometalni kompleksi, metalni klasteri, makromolekule
- **Reakcije hidriranja** (npr. sinteza L-dopa na kiralnim Rh-fosfin kompleksima)
- **Reakcije parc. oksidacije** – npr. primjenom  $\text{Mo}(\text{CO})_6$
- **Reakcije polimerizacije** – katalizatori: Ziegler katalizatori,  $\text{TiCl}_4 + (\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{Al}$

## Homogeno - katalitički reaktori



Dijele se slično kao i nekatalitički reaktori u 3 karakteristične skupine:

- protočno kotlasti reaktori
- cijevni reaktori
- kotlasti reaktori



## Kontakt između plinovitog i tekućeg reaktanta

---

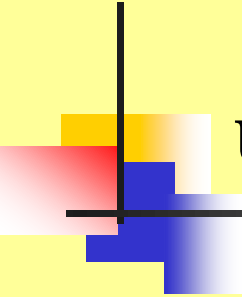
- Mjehurići plina dispergirani u kontinuiranoj tekućoj fazi (kolone s mjehurićima i uređajima za disperziju plina)
- Kapljice tekuće faze dispergirane u kontinuiranoj plinskoj fazi (tzv. *spray* kolone)
- Padajući film tekućine u kontaktu s plinom (punjene kolone, kolone s močenjem stijenki)



## Izbor reaktora zavisi o:

---

- željenom omjeru volumena plina i kapljevine,
- brzini reakcije (brza ili spora) u odnosu na fizičke procese prijenosa,
- kinetici (pozitivna, negativna, nultog reda),
- lakoći uklanjanja topline,
- održavanju temperature u reaktoru, itd.



## Usporedba homogene i heterogene katalize:

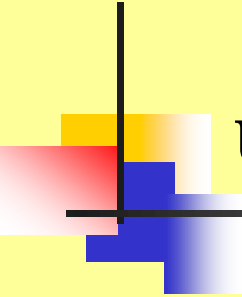
---

### Homogena kataliza:

- Reakcijska smjesa sadrži katalitički aktivnu komponentu (kompleks) u otopini - katalizator je u potpunosti izložen i dostupan reaktantima
- Velika disperzija aktivnih centara – smanjen utjecaj neželjenih spojeva na aktivnost katalizatora (smanjena mogućnost trovanja), npr. jedna molekula otrova blokira samo jedan aktivni centar

### Heterogena kataliza:

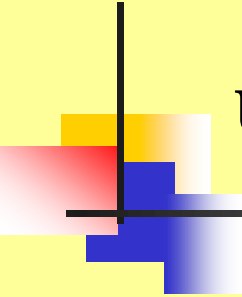
- Katalitički aktivna komponenta (npr. metal) uglavnom se nanosi na odgovarajući nosač – samo atomi na površini su izloženi reaktantima
- Jedna molekula otrova blokira ulaz u poru katalizatora (koja može sadržavati puno aktivnih centara)



## Usporedba homogene i heterogene katalize

---

	<b>Homogena</b>	<b>Heterogena</b>
<b><i>Učinkovitost</i></b>		
<b>aktivni centri</b>	svi metalni ioni	samo atomi na površini
<b>koncentracija</b>	niska	visoka
<b>selektivnost</b>	visoka	niska
<b>difuzijski problemi</b>	gotovo odsutni	prisutni
<b>reakcijski uvjeti</b>	blagi (50-200 °C)	različiti (često > 250 °C)
<b>primjenljivost</b>	ograničena	široka
<b>pad aktivnosti</b>	ireverzibilne reakcije sa produktima; trovanje	sinteriranje kristalita metala; trovanje



# Usporedba homogene i heterogene katalize

---

## Homogena

## Heterogena

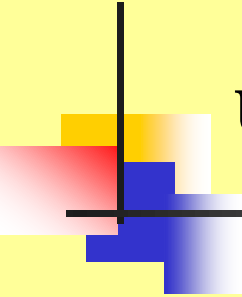
### *Katalitičke značajke*

---

**struktura/stehiometrija**  
**mogućnost modifikacije**  
**termička stabilnost**

definirana  
velika  
niska

ndefinirana  
mala  
visoka



# Usporedba homogene i heterogene katalize

---

## Homogena

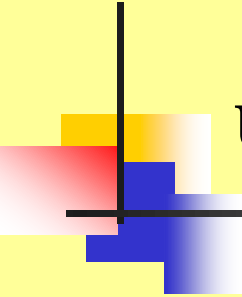
## Heterogena

### *Separacija katalizatora*

---

ponekad otežana  
(kemijska razgradnja,  
destilacija, ekstrakcija)

filtracija



## Usporedba homogene i heterogene katalize

---

### Homogena

### Heterogena

---

*Recikliranje katalizatora*

moguće

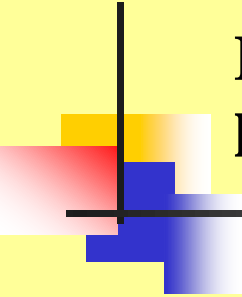
nije neophodno  
(nepokretan sloj)  
ili je olakšano

*Troškovi gubitaka  
katalizatora*

veliki

mali

---



# Pregled metoda za separaciju katalizatora/produkata u homogenoj katalizi

---

- *problem separacije katalizatora i nastalih produkata*

⇒ jedan od značajnijih problema vezanih uz uporabu homogeno- katalitičkih procesa

*Uklanjanje katalizatora iz struje produkata važno zbog više razloga:*

- katalizator je često vrlo skup (posebice Rh)
- liganadi su skupi (npr. fosfini)
- metalni katalizator ili ko-katalizator je opasan za okoliš (npr. Co, MeI- jako toksičan)
- metali djeluju kao katalizatori za oksidaciju
- katalitičke komponente nisu dozvoljene u sastavu produkata.

Često je važna i regeneracija katalizatora!

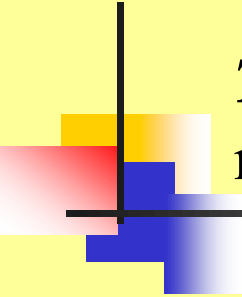


## Pročišćavanje produkata

---

**Pročišćavanje produkata ne uključuje samo uklanjanje katalizatora nego i:**

- uklanjanje ko-katalizatora (npr. u proizvodnji octene kiseline metil jodid djeluje kao ko-katalizator; vrlo je toksičan),
- razgradnju produkata liganada,
- *razgradnji neizreagiranih reaktanata,*
- *razgradnju sporednih produkata reakcije.*



**Tablica** - Podjela homogeno-kataliziranih procesa s obzirom na način separacije katalizatora i produkata reakcije

---

**Način separacije**

*Nema separacije*

*Kruti produkt, katalizator u otopini*

*Plinoviti produkt, katalizator u otopini*

*Destilacija*

*Kapljevina-kapljevina separacija*

**Proces**

Polipropenski proces u plinskoj fazi

Tereftalna kiselina

Acetaldehid

Hidroformilacija propena sa konvencionalnim Rh kompleksom

Octena kiselina

Hidroformilacija s modificiranim

Co kompleksom

Dimetiltereftalat

Hidroformilacija propena sa Rh kompleksom topljivim u vodi

Hidroformilacija s nemodificiranim

Co kompleksom

**Izazov:** Heterogenizacija homogenih katalizatora – npr. postupkom imobilizacije