

PROTOČNI KOTLASTI REAKTORI

akad.god. 2025./26.

- Bitna predodžba:

pretpostavka homogene koncentracije i temperature u reaktoru (idealno miješanje)

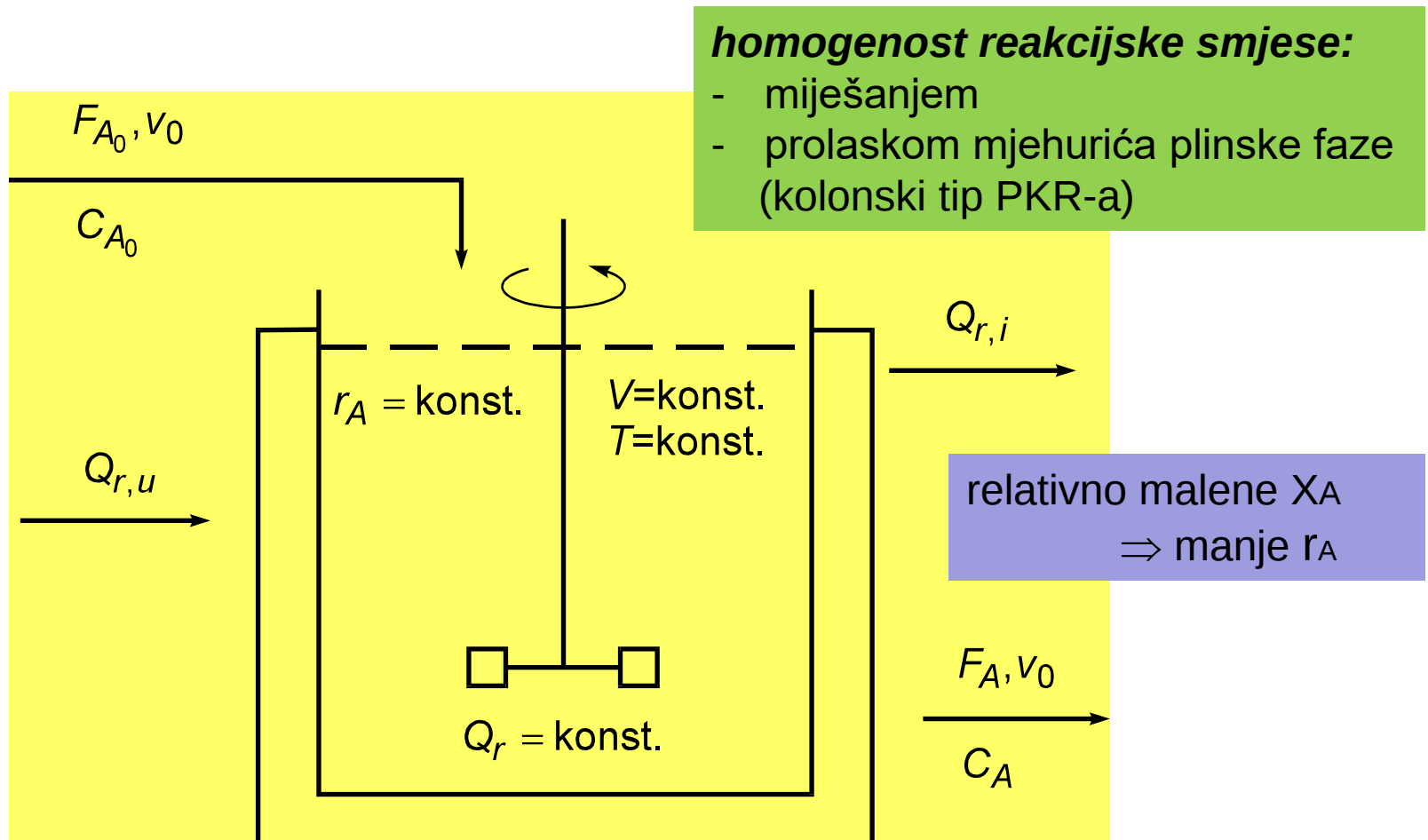
sinonimi za PKR u engl. govornom području:

perfectly mixed flow reactor, PFR (PMFR)

continuous stirred tank reactor, CSTR

continuous flow stirred tank reactor, CFSTR

Model “idealnog” protočnog reaktora (PKR)



Koriste se uglavnom **za provedbu reakcija u kapljevitom sustavu ili za vrlo brze i egzotermne reakcije u plinovitim sustavima** (nisu pogodni za rad na višim pritiscima)

- PKR reaktor je **otvoreni sustav**, što znači da se za vrijeme reakcije sa okolinom izmjenjuje reakcijska masa.
- Reaktor **radi stacionarno** što znači da su **veliĉine stanja unutar reaktora nezavisne o vremenu** (u reaktor stalno ulazi ista koliĉina mase i ista koliĉina izlazi iz njega).
- Sadržaj reaktora se **dobro miješa** što znači da su **vrijednosti veliĉina stanja nezavisne od poloŹaja unutar reaktorskog prostora**.
- Konstruktivno je sliĉan kotlastom reaktoru, a koristi se za provedbu reakcija u kapljevitoj i plinskoj fazi.
- PKR reaktor kao laboratorijski eksperimentalni reaktor **pogodan je za kinetiĉka istraŹivanja sloŹenih reakcija s kompliciranom kinetikom** zbog lakše obrade kinetiĉkih podataka kao i zbog toga što se miješanjem onemogućava pojava koncentracijskih i/ili temperaturnih gradijenata unutar reaktorskog prostora.

Podjela PKR u dvije velike grupe:

- **idealni PKR**, odnosno reaktor u stacionarnom radu
i
- protočni kotlasti reaktor u **nestacionarnom radu (PKRn)**

U industriji se češće primjenjuju ***PKRn reaktori***.

PKRn se u praksi analizira kao uobičajeni kotlasti reaktor, jer njegova nestacionarnost ne uvjetuje značajnu izmjenu bitnih parametara (npr. ***reaktor za polikondenzaciju*** kod kojeg se tijekom reakcije izdvaja voda koja se kontinuirano uklanja iz sustava, pa se prema tome ne može smatrati kotlastim reaktorom; prijelazni oblici rada – reaktor s uzvitlanim slojem katalizatora)

PKR reaktori povezuju se u seriju (približenje cijevnom reaktoru)

- PKR reaktori koriste se za provedbu reakcija u **homogenim** sustavima i to u **kapljevitoj i u plinskoj fazi**.
- Također su podesni za provedbu **katalitičkih** reakcija uz krute katalizatore, koji su tada **suspendirani** u reakcijskoj smjesi.
- Postoje i **prijelazni oblici** –
PKR reaktori s uzvitlanim (fluidiziranim) slojem katalizatora
(nitriranja aromatskih ugljikovodika ili glicerola, kopolimerizacija butadiena i stirena, oksidacija kumena zrakom, polimerizacija etena uz Ziegler-Natta katalizatore, itd.)
- Reakcije koje su vrlo **brze** i imaju veliku **reakcijsku entalpiju** obično se vode u PKR reaktorima *(dobivanje čađe izgaranjem ugljikovodika i dobivanje amonijevog nitrata reakcijom u kaplj. fazi (reak. dušične kis. i amonijaka).*

Značajke koje ukazuju na pogodnost izbora PKR reaktora:

- Kao i kod kotlastog reaktora *temperaturu* u reaktoru je lako kontrolirati.
- Dobro *miješanje* osigurava prosječnu, nižu brzinu reakcije te onemogućava lokalna pregrijavanja (izbjegavanje „vrućih točaka”).
- Za *brze egzotermne* reakcije, PKR reaktori su najbolje rješenje.
- Ako su *reakcije spore*, a uz to se proizvode *veće količine proizvoda*, PKR reaktori su uvijek dobro rješenje.
- ***Polimerizacijske*** reakcije u PKR reaktorima mogu se dobro voditi s obzirom na održavanje željene raspodjele molekulskih masa.
- ***Biokemijske reakcije*** u **PKR reaktorima s prihranjivanjem**, tzv. „fed batch” reaktori
- ***Veliki*** volumeni PKR reaktora i ***nepovoljna*** konverzija mogu se smanjiti ***vezivanjem*** više PKR reaktora u seriju.

Opća bilanca tvari (stacionaran rad)

Množina tvari A unijeta u reaktorski volumen u jediničnom vremenu	–	Množina tvari A iznijeta iz reaktorskog volumena u jediničnom vremenu	=	Množina tvari A nestala kemijskom reakcijom u reaktorskom volumenu i jediničnom vremenu
--	---	--	---	--

REAKTORSKI MODELI

- Osnovna bilanca komponente A u jednoj pojedinačnoj reakciji dana je izrazom

$$F_{A_0} - F_A - Vr_A = -\frac{dn_A}{dt}$$

F- molni protok

ili

$$v_0 C_{A_0} - v_i C_A - Vr_A = -\frac{dn_A}{dt}$$



Bilance su napisane za ***nestacionarni rad reaktora***.

- Za idealni PKR reaktor desne strane u gornjim jednadžbama jednake su nuli.

Opća bilanca topline

Toplina unijeta u reaktor u jediničnom vremenu		Toplina iznijeta iz reaktora u jediničnom vremenu.
+	=	+
Toplina oslobođena kemijskom reakcijom u jediničnom vremenu		Toplina prenijeta u okolinu u jediničnom vremenu

Opća bilanca topline:

nestac. rad

$$\frac{(T - T_u)(Q_{r_i} - Q_{r_u})}{G(t)c_p} + \frac{(-\Delta H_r)r_A}{\rho(t)c_p} + \frac{UA_p(t)}{G(t)c_p}(T_0 - T) = \frac{dT}{dt}$$

- Q_{r_i} i Q_{r_u} - maseni protoci na izlazu, odnosno na ulazu u reaktor,
 $G(t)$ - masa reakcijske smjese u nekom vremenu u reaktoru,
 $A_p(t)$ - površina prijenosa topline, npr. plašt koja se također može mijenjati s vremenom,
 $\rho(t)$ - gustoća reakcijske smjese također napisana kao funkcija vremena

F (mol s⁻¹) se uglavnom zamjenjuje s masenim protokom, Q (kg s⁻¹)

- Osnovne bilance množine tvari i topline mogu se pojednostavniti ili transformirati, npr.

a) uz korištenje konverzije kao jedinice umjesto broja molova

$$F_A = F_{A_0} (1 - X_A)$$

$$n_{A_0} \frac{dX_A}{dt} = F_{A_0} X_A + V r_A$$

b) u stacionarnom stanju,

$$r_A = \frac{F_{A_0} - F_A}{V} = \frac{F_{A_0} X_A}{V} = \frac{C_{A0} v_0 X_A}{V} = \frac{C_{A0} X_A}{\tau}$$

c) ako je gustoća stalna, tada vrijedi

$$\left(\frac{v_0}{V} \right) (C_{A_0} - C_A) - r_A = - \frac{dC_A}{dt}$$

$$\tau = \frac{V}{v_0}$$

u stacionarnom stanju, $\tau = \frac{V}{v_0}$

$$r_A = \frac{C_{A_0} - C_A}{\tau} = \frac{C_{A_0} X_A}{\tau} = \frac{v_0 C_{A_0} X_A}{V}$$

d) **bilanca topline reaktora u stacionarnom stanju je dana izrazom**

$$Q_{m_0} c_p (T_u - T) + V (-\Delta H_r) r_A + UA_s (T - T_0) = 0$$

ili uz jedinice volumnog protoka i gustoće, $Q_{m_0} = v_0 \rho$

$$v_0 \rho c_p (T_u - T) + V (-\Delta H_r) r_A + UA_s (T - T_0) = 0$$

e) ako se reakcija vodi adijabatski, tada nema prijenosa topline u okolinu,

$$T - T_u = \frac{(-\Delta H_r)}{v_0 \rho c_p} V r_A = \frac{(-\Delta H_r) \tau}{\rho c_p} r_A = \frac{(-\Delta H_r)}{Q_{m0} c_p} V r_A \quad (i)$$

f) ako se brzina reakcije napiše kao

$$r_A = \frac{C_{A0} X_A}{\frac{V}{v_0}} = \frac{C_{A0} X_A}{\tau}$$

i uvrsti u (i) dobiva se

$$T = T_u + \frac{(-\Delta H_r) X_A C_{A0}}{\rho c_p}$$

$$T = T_u + \frac{(-\Delta H_r) \tau r_A}{\rho c_p}$$

temperatura **linearno** zavisi o konverziji
- uz $X_A = 100\% \Rightarrow$ adijabatska značajka

$$C_{A0} X_A = \tau r_A$$

$$\cancel{Q_{m_0} c_p (T_u - T)} + V(-\Delta H_r) r_A + UA_s (T - T_0) = 0$$

g) u izotermnom radu temperature ulazne i izlazne reakcijske smjese su jednake, pa je tada

$$(-\Delta H_r) r_A V = UA_p (T - T_0)$$



$$r_A = \frac{C_{A0} X_A}{\frac{V}{v_0}}$$



$$r_A V = v_0 C_{A0} X_A$$

PKR reaktori (a također i kotlasti) uvijek rade izotermno s obzirom na reaktorski prostor, s time da se u PKR-u u stac. radu temp. ne mijenjaju ni s vremenom, ni po prostoru!

ili

$$T = T_0 + \frac{(-\Delta H_r) v_0 C_{A0} X_A}{UA_p}$$

$$T = T_0 + \frac{F_{A0} (-\Delta H_r) X_A}{UA_p}$$

➡ izraz omogućava izračunavanje temperature reakcijske smjese unutar reaktora, pri čemu je to i temperatura izlazne smjese.

Općenit izraz za toplinsku bilancu za PKR u stacionarnom radu

$$T - T_u = \frac{(-\Delta H_r) \tau}{\rho c_p} r_A - \frac{UA_c}{v_0 \rho c_p} (T - T_0)$$

ili ako se u sustavu provodi više reakcija

$$T - T_u = \tau \sum_{i=1}^R \frac{(-\Delta H_{r,i})}{\rho c_p} r_{A,i} - \frac{UA_c}{v_0 \rho c_p} (T - T_0)$$

Bilanca topline za medij koji prenosi toplotu

- Prijenos topline sa ili na reakcijsku smjesu može biti kroz **plašt** reaktora ili **zmijaču** unutar reaktora, a neki put i kroz **vanjski izmjenjivač** topline.
- Strujanje prijenosnog medija može biti na način **idealnog miješanja (plašt)** ili **idealnog strujanja (zmijača)**.

Bilanca medija:

a) za **plašt** vrijedi:

razlika entalpije
medija (npr. vode)
od ulaza do izlaza

akumulacija
topline

$$Q_m c_p (T_u - T_p) + Q_r = G_u c_p \frac{dT_p}{dt}$$

u nestac. radu!

- Q_m - maseni protok medija za prijenos topline,
 T_p - temperatura medija u plaštu,
 G_u - ukupna masa medija u plaštu,
 Q_r - toplota koja se prenosi kroz stijenkuplašta i zajednička je s bilancom topline za reaktor

= 0, za stacionaran rad

$$Q_r = UA_p (T_p - T_r)$$

- **U izotermnom radu** toplina prenijeta kroz plašt mora u svakom trenutku biti jednaka reakcijskoj entalpiji:

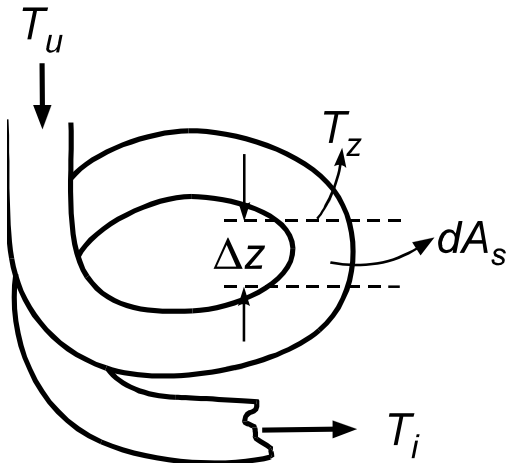
$$Q_m c_p (T_u - T_p) = UA_p (T_p - T_r) = (-\Delta H_r) V r_A$$

- **U stacionarnom radu izmijenjena toplina je stalna**, a mijenja se s vremenom jedino ako reaktor radi nestacionarno.

b) za **zmijaču** vrijedi:

- **idealno strujanje medija** za prijenos topline kroz zmijaču,

*Prijenos topline kroz zmijaču;
pretpostavlja se idealno strujanje*



$$\frac{\partial T_z}{\partial t} = u \frac{\partial T_z}{\partial z} + \frac{2U}{r \rho c_p} (T_z - T_r)$$

ili

$$Q_{mz} c_p \frac{\partial T_z}{\partial z} + q_r = G_z c_p \frac{\partial T_z}{\partial t}$$



Q_{mz} - maseni protok
medija za prijenos topline

q_r - toplina prenijeta kroz jediničnu površinu zmijače dužine dz

**Ukupna toplina prenijeta na medij
u zmijači je dana izrazom:**

$$Q_r = \int_0^L q_r dz = \int_0^L U A_s (T_z - T_r) dz$$

T_z - temperatura zmijače u odsječku z

Ako je PKR u stacionarnom radu, vrijedi bilanca topline za zmijaču kao zaseban sustav:

$$\cancel{\frac{\partial T_z}{\partial t}} = u \frac{\partial T_z}{\partial z} + \frac{2U}{r \rho c_p} (T_z - T_r)$$

$$u \frac{\partial T_z}{\partial z} = \frac{2U}{r \rho c_p} (T_z - T_r)$$

Isto tako, ako se ta bilanca poveže s bilancom topline za reaktor u izotermnom radu:

$$(-\Delta H_r) r_A V = U A_s (T - T_0)$$

tada se može doći do sljedeće relacije: $(-\Delta H_r) r_A V = Q_r = \int_0^L q_r dz$

prema kojoj se vidi da se toplina razvijena kemijskom reakcijom mora u svakom trenutku sva odvesti kroz zmijaču (kao kod kotlastog reaktora)

PKR REAKTORI U NESTACIONARNOM RADU (PKR_n)

- U industrijskoj praksi reakcije se često vode u PKR reaktorima koji rade nestacionarno.
- Pri tome, nestacionarnost rada može biti **primarni** način rada (čitav proces je diskontinuiran) ili je nestacionarnost **prijelazni** način rada, npr. pri početku ili završetku rada inače stacionarnog procesa u PKR-u

Nestacionarnost je posljedica:

- promjene volumena ili mase reakcijske smjese tijekom rada, npr. reakcije plin – kapljevina, višefazni sustavi

⇒ jedan reaktant (npr. kapljevina) nalazi se početno u reaktoru, a drugi (npr. plin) se kontinuirano uvodi u kapljevinu s kojom reagira (ukupna masa mijenja se s vremenom)

Prijelazni način rada

- Prijelazni rad PKR reaktora nastaje u početnom periodu rada ***(punjenje)*** ili pak u završnom periodu ***pražnjenja*** PKR-a
- Prijelazno stanje nastaje i ***promjenom koncentracije*** za vrijeme stacionarnog perioda

⇒ Modeli prijelaznih stanja važni su zbog ***vođenja*** procesa u PKR reaktorima

- promjene koncentracije ili protoka na ulazu mogu se smatrati pobudama, a njihova vremenska zavisnost funkcijama poremećaja

Opći model PKRn reaktora - uzima u obzir uzroke nestacionarnosti:

$$F_{Au}(t) - F_{Ai}(t) - r_A V(t) = dn_A/dt$$

Zavisno od vremenskih funkcija pojedinih veličina, te početnih uvjeta ***opći model se svodi na posebne oblike*** koji odgovaraju pojedinom uzroku nestacionarnosti.

Početak rada PKR reaktora

Pri početku rada inače stacionarnog PKR reaktora, period punjenja je ***nestacionaran***:

Pretpostavke:

- Na početku rada, reaktor je prazan.
- U vremenu $t = t_0$, reaktor se počinje puniti stalnim protokom ulazne smjese, $v_0 = \text{konst.}$

tada je

$$F_{A0} - r_A v_0 t = dn_A/dt$$

ili uz sređivanje

$$dC_A/dt + r_A = (C_{A0} - C_A)/\tau$$

Kako na optimalan način dovesti PKR reaktor u stacionarni rad?

- najjednostavnije je **brzo napuniti reaktor**, a zatim izvjesno vrijeme reakciju voditi kao da je reaktor kotlasti (ne postoji izlazni protok!), sve do trenutka postizavanja one koncentracije produkta koja će biti stacionarna vrijednost za PKR reaktor; poželjno je da kontinuirani rad počne nakon što je reaktor potpuno pun
- neki procesi upravo rade u takvom prijelaznom načinu rada PKR reaktora, npr. tzv. **reaktor s prihranjivanjem** ("fed batch reactor")
 - ⇒ *masa se unosi u reaktor, ali se ne iznosi za vrijeme proizvodnog ciklusa* (npr. fermentacijski procesi)
 - ⇒ na osnovi modela PKR-a za konačni (radni) volumen uz poznavanje kinetičkog modela moguće je izračunati vrijeme potrebno za punjenje, t_p odnosno **protok punjenja** iz relacije:

$$v_0 = \frac{V}{t_p}$$

Prekid rada PKR reaktora

- Ako se želi završiti proces iz stacionarnog rada PKR reaktora, potrebno ga je isprazniti, a **za to vrijeme pražnjenja reaktor je u nestacionarnom radu**
 - **Uz uvjet da je nakon prekida ulaznog protoka, izlazni protok ostao isti kao prije, odnosno da je: $v_i = v_0$**
- ⇒ vrijedi izraz koji omogućava **izračunavanje konačnih koncentracija u reakcijskoj smjesi nakon pražnjenja**

$$-\frac{dn_A}{dt} = Vr_A + v_i C_A$$

Promjena ulazne koncentracije

- Prijelazno stanje PKR reaktora je u ovom slučaju uzrokovano **naglom promjenom ulazne koncentracije** (npr. zbog pogreške operatera ili vođenja procesa).
- Promjena koncentracije se može dobro aproksimirati ***skokomičnom funkcijom poremećaja***, a odziv odnosno vremenska promjena izlazne koncentracije bit će prikazana eksponencijalnom funkcijom.
- Model reaktora dan je općim izrazom za **PKRn**, ali uz uvjet da je volumni protok stalan prije i poslije promjene koncentracije te da se volumen reaktora ne mijenja:

$$\tau dC_A/dt = C_{A0} - C_A \tau r_A$$

Stabilnost rada PKR reaktora

- Reaktor radi **stabilno** ako se radna točka (stanje) nakon što se poremećaj ukloni - vrati u stanje koje je jednako stanju prije poremećaja.
- Npr. mala promjena ulazne koncentracije reaktanata će dovesti do novog stacionarnog stanja.
- Ako se reaktor vrati **natrag u početno stanje** nakon što se ulazna koncentracija vratila na svoju staru vrijednost, govori se o **stabilnom radu**.
- U slučaju da se reaktor **ne vrati** u početno stanje nakon što koncentracija postigne prvobitnu vrijednost, reaktor **nije** stabilan.
 *Nije poželjno da reaktor radi u okolišu nestabilne radne točke!*
- Da se utvrdi **područje** nestabilnog rada potrebno je rješavati bilance za množinu tvari i bilance topline.

- Bilanca množine tvori :

idealni PKR

$$r_A = \frac{C_{A_0} X_A}{\tau}$$

- Bilanca topline:

$$T = T_0 + \frac{V(-\Delta H_r) r_A}{Q_m c_p} - \frac{UA_p}{Q_m c_p} (T_p - T_r)$$

stacionaran
rad

$$Q_m = v_0 \rho$$

- U **stacionarnom radu** toplina **nastala** kemijskom reakcijom jednaka je toplini koja se **odvede** reakcijskom smjesom plus toplina koja se **prenese** kroz stijenku reaktora u okolinu,

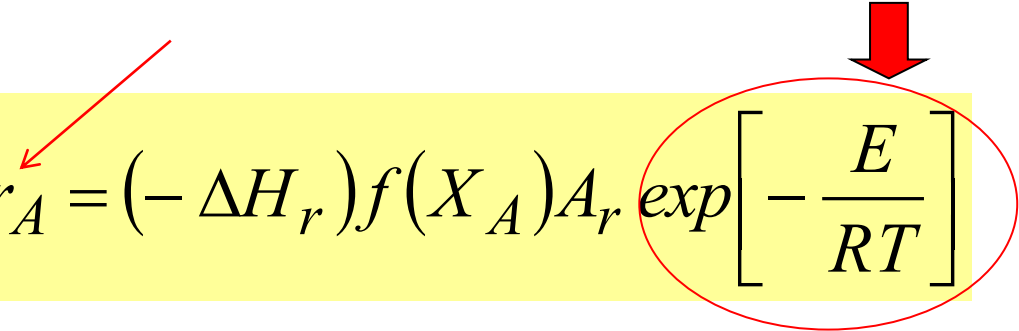
$$V(-\Delta H_r)r_A = Q_m c_p (T - T_0) + UA_s (T_p - T)$$

toplina koja se stvara
kemijskom reakcijom

toplina koja se odvede
reakcijskom smjesom

toplina koja se prenese
kroz stijenku reaktora
u okolinu

- Općenito, reakcijska entalpija **eksponencijalno** zavisi o promjeni temperature,

$$Q_r^r = V(-\Delta H_r)r_A = (-\Delta H_r)f(X_A)A_r \exp\left[-\frac{E}{RT}\right]$$


- Ostale topline na desnoj strani jednadžbe su **linearna funkcija** temperature, tj.



$$Q_r^p = Q_m c_p (T - T_0) + UA_s (T_p - T) = K' T + B$$

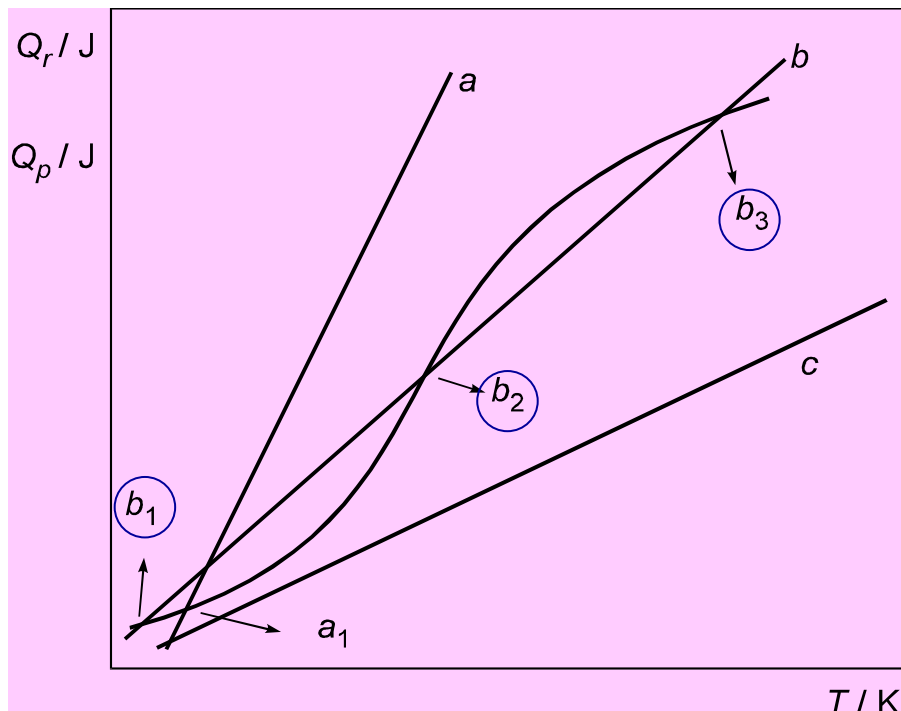
gdje je

$$K' = Q_m c_p - UA_s \quad \text{i} \quad B = Q_m c_p T_0 + UA_s T_p$$

- T_0 - temperatura ulazne smjese,
- T - temperatura unutar reaktora
- T_p - temperatura u plaštu, odnosno T okoline.

Stabilnost PKR reaktora; stabilne i nestabilne radne točke

- egzotermna nepovratna reakcija

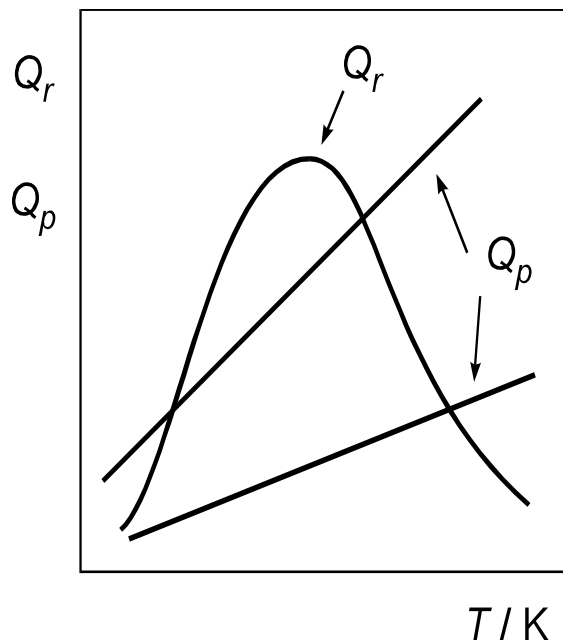


- pravac a – jedno rješenje: a_1
- pravac b – tri rješenja: b_1 , b_2 i b_3
- pravac c - nema rješenja

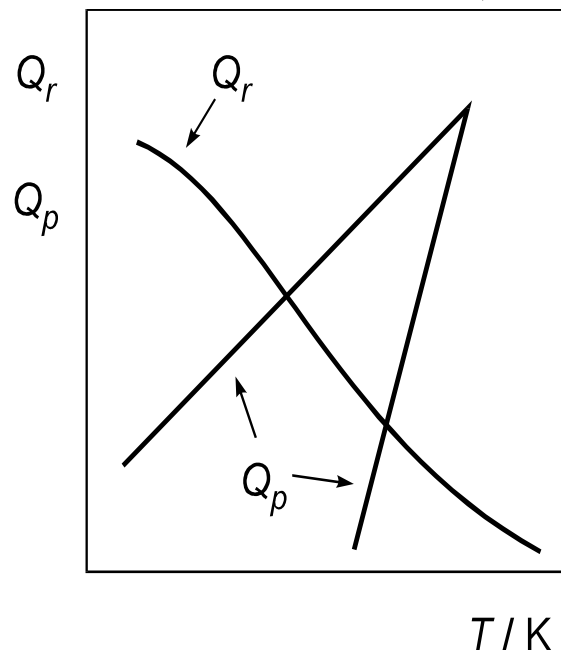
- Točke b_1 , b_2 i b_3 su moguća stacionarna stanja, odnosno **radne točke**.
- Zavisno od radnih uvjeta može postojati ili samo **jedna** točka ili **više njih**.
- Tako su točke b_1 i b_3 **stabilne** dok je točka b_2 **nestabilno** radno stanje PKR reaktora.
- Malim pomakom temperature ili nekih drugih uvjeta, stacionarna nestabilna radna točka b_2 premjestit će se do stabilnih stanja prikazanih radnim točkama b_1 ili b_3 .
- I u slučaju **povratnih i egzotermnih reakcija**, moguća su **višestruka** radna stanja.

Stabilnost rada PKR reaktora

- Ako su reakcije **nepovratne i endotermne**, u osnovi **nisu moguća višestruka radna stanja** (povišenje T uzrokuje bržu reakciju te se toplina više "troši").



a - egzotermna povratna reakcija



b - endotermna nepovratna reakcija

Postojanje više stacionarnih stanja za iste reakcijske uvjete eksperimentalno je potvrđeno za egzotermne reakcije!

Adijabatske (autotermičke) reakcije

- Egzotermne brze reakcije često se u praksi vode **autotermički - velika brzina reakcija i istovremeno velik iznos oslobođene topline!**

Primjer: gorenje plina na plinskom plameniku ili baklji.

- Adijabatski način provedbe procesa je jedino moguć, jer toplina nema vremena da se prenese u okolinu.
- Prema tome, toplina reakcije se nalazi u porastu entalpije izlazne smjese i jednaka je reakcijskoj entalpiji,

$$Q_r^r = (-\Delta H_r) r_A V \rho$$

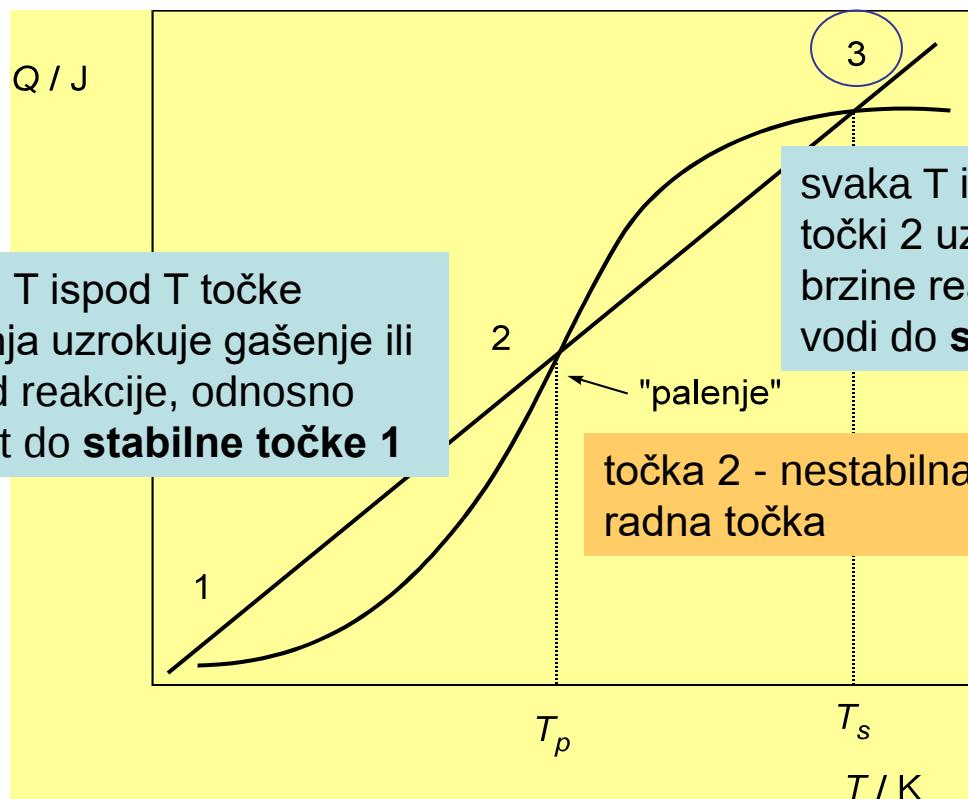
$$Q_r^p = G c_p (T - T_0)$$

Tada je:

$$Q_r^r = Q_r^p$$

Autotermička reakcija; moguća radna stanja i točka "paljenja"

- Te se reakcije **usporavaju** kod većih konverzija, jer se povećava temperatura reakcijske smjese uslijed oslobođene reakcijske entalpije (*oksidacije, sinteza HCl...*)



radna T ispod T točke paljenja uzrokuje gašenje ili prekid reakcije, odnosno povrat do **stabilne točke 1**

točka 2 - nestabilna radna točka

svaka T iznad T koja odgovara točki 2 uzrokuje nagli porast brzine reakcije i temperature što vodi do **stabilne radne točke 3**

u praksi se reakcija pokušava održati u području radne točke 3 koja mora biti u granicama dopustivih radnih uvjeta

- kod brzih egzotermnih reakcija potrebna je pažljiva izvedba načina odvođenja topline, jer postoji realno samo jedna radna točka koja odgovara maksimalnoj konverziji!!!

Uvjet stabilnosti rada PKR-a

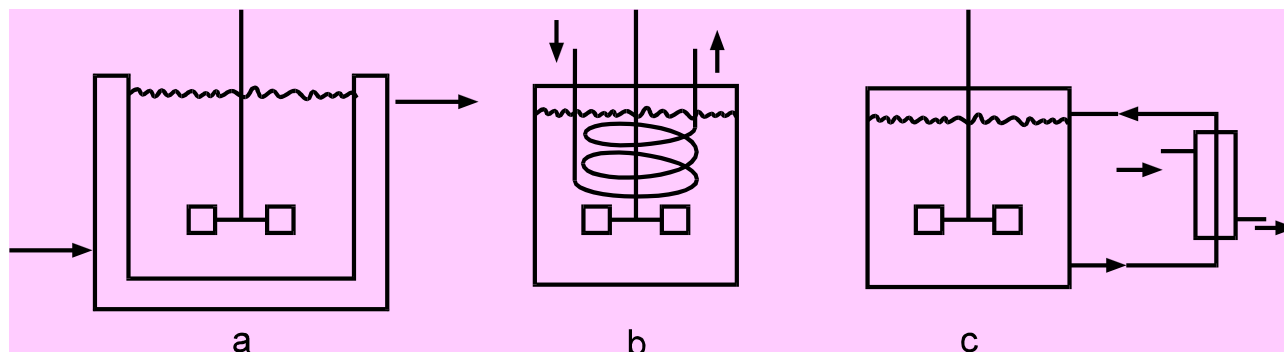
- **Rješavanjem bilančnih jednadžbi** može se ustanoviti postojanje nestabilnih, odnosno stabilnih područja rada PKRa
- **Osnovni uvjet stabilnosti rada PKR reaktora:**

Količina topline koja se **može odvesti** iz reaktora mora biti veća od količine topline koja se u isto vrijeme **oslobodi** reakcijom.
Matematički izraženo to znači:

$$\frac{Q_r^p}{dT} > \frac{dQ_r^r}{dT}$$

PRIJENOS TOPLINE U REAKTORIMA S MIJEŠANJEM

- Dimenzioniranje PKR i kotlastog reaktora zahtijeva i proračun **prijenosa topline** s reakcijskog medija na medij za grijanje, odnosno hlađenje.
- Prijenos topline ostvaruje se kroz **stijenku reaktora** (izmjena u plaštu), kroz **stijenku izmjenjivača** smještenog unutar reaktorskog prostora (zmijača) ili **cirkulacijom reakcijske smjese** kroz vanjski izmjenjivač topline.



Prijenos topline u reaktorima s miješanjem (PKR i kotlasti):

a - kroz plašt reaktora,

b - zmijačom i

c - vanjskim izmjenjivačem

- Najčešće se toplina prenosi kroz plašt koji može biti različitih izvedbi.
- Zmijače se često koriste kao dodatni izmjenjivač (posebice za reakcije koje su jako egzotermne ili endotermne).
- Prijenos topline zavisi od izbora *mješala, geometrije* reaktora i izbora *medija za prijenos topline*
- Reakcijska entalpija se oslobađa u čitavom **volumenu** reaktora, dok se prijenos može ostvariti samo kroz **površinu**.
- Dimenzioniranje prijenosa topline moguće je uz **poznavanje potrebnih parametara i korelacija** (općenito *nije moguće dimenzionirati veći reaktor iz podataka dobivenih za reaktor manjeg volumena*).

Prijenos topline kroz stijenku dan je uobičajenim izrazom

$$Q_r = UA_s(T - T_0)$$

- Uz dobro miješanje temperatura PKR reaktora, ***T nije zavisna o prostoru.***
- Ako su reaktori u nestacionarnom stanju (kotlasti je to uvijek!) temperature (T, T_0) i površina prijenosa (A_s) su ***funkcije vremena.***
- U stacionarnom radu PKR reaktora T i A_s su ***stalne***, dok temperatura medija za prijenos topline može biti i ***funkcija prostora*** (npr. kod zmijače).

- Ukupni koeficijent prijenosa topline (koeficijent prolaza topline) računa se za svaku pojedinačnu konfiguraciju reaktora.
- **Ukupni koeficijent prijenosa, U**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_0} + \frac{d}{\lambda}}$$

Opaska: h ili α !

h_1 - koeficijent prijenosa topline kroz reakcijski medij

h_0 - koeficijent prijenosa topline kroz medij za hlađenje, odnosno grijanje

d - debljina stijenke reaktora (ili zmijače)

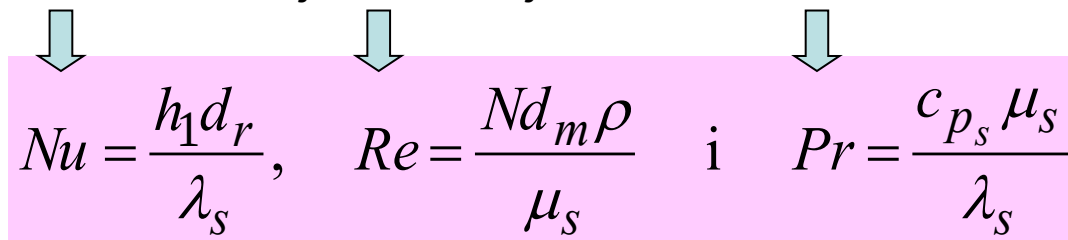
λ - toplinska vodljivost stijenke

Način izračunavanja koeficijenata prijenosa topline

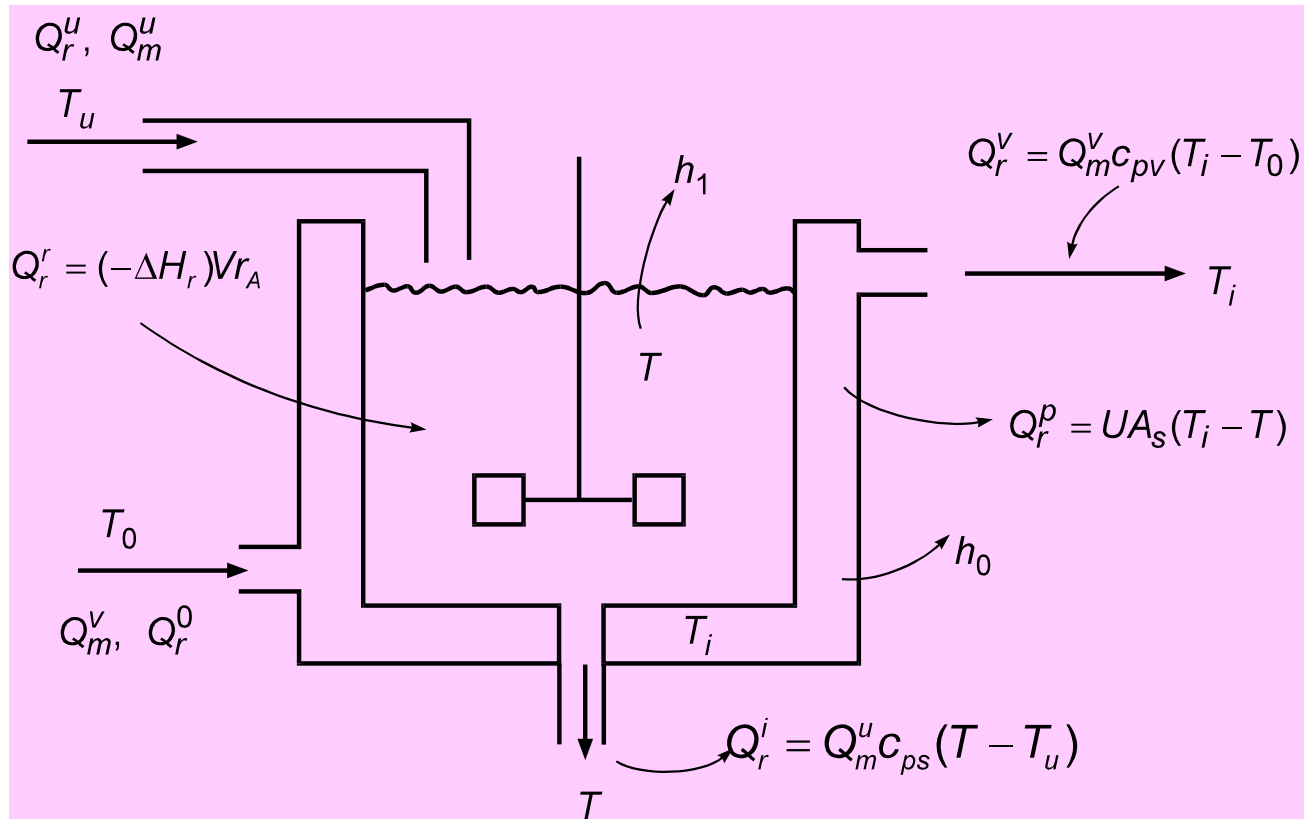
- Koeficijenti h_1 i h_0 računaju se pomoću **empirijskih korelacija** za koje su potrebni podaci o reaktoru i reakcijskoj smjesi.
- Za prijenos topline **kroz** reakcijsku smjesu vrijedi korelacija uz **standardnu Rushtonovu turbinsku mješalicu** i standardni oblik reaktora:

$$Nu = 0.73 Re^{0.65} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_s}{\mu_p} \right)^{0.24}$$

Nu , Re i Pr su bezdimenzijske značajke


$$Nu = \frac{h_1 d_r}{\lambda_s}, \quad Re = \frac{N d_m \rho}{\mu_s} \quad \text{i} \quad Pr = \frac{c_{p_s} \mu_s}{\lambda_s}$$

Prijenos topline u PKR reaktoru



- Koeficijent prijenosa h računa se iz Nusseltove značajke.
- Potrebni su dodatni **podaci o fizičkim svojstvima reakcijske smjese i geometriji reaktora**, a to su:

d_r - promjer reaktora, m

d_m - promjer mješalice, m

N - broj okretaja mješalice, o/h

ρ_s - gustoća reakcijske smjese, kg/m³

c - specifični toplinski kapacitet smjese, kJ/(kg K)

$\mu_s^{p_s}$ - dinamička viskoznost smjese na temperaturi smjese, Pa/s

μ_p - din. viskoznost smjese na temperaturi stijenke, Pa/s

λ_s - spec. toplinska vodljivost smjese, kJ/(s m K)

- **Za sidrastu mješalicu** vrijedi druga korelacija

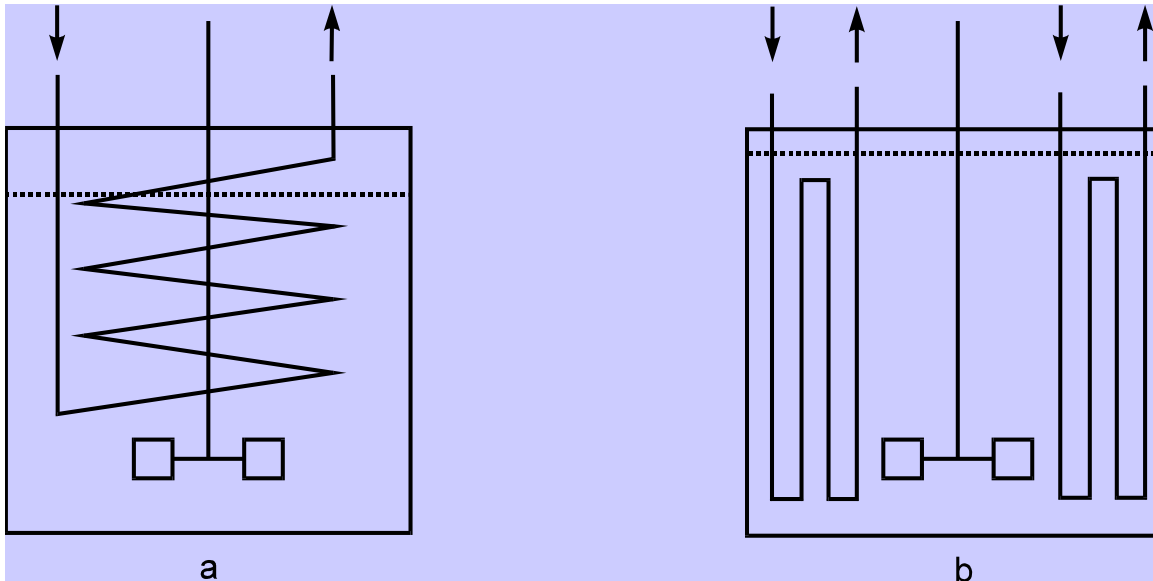
$$Nu = 0.38 Re^{0.67} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_s}{\mu_p} \right)^{0.18}$$

- Uz **prijenos topline zmijačom** postoje zasebne korelacije. Ako je u reaktoru **turbinska mješalica** i vrijedi da je **400 < Re < 1 500 000** korelacija glasi:

$$Nu = 0.17 Re^{0.67} Pr^{0.33} \left(\frac{d_m}{d_t} \right)^{0.1} \left(\frac{d_z}{d_t} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_s}{\mu_p} \right)^{0.18}$$

d_z - promjer zmijače

Vrste zmijača: a) standardna izvedba, b) vertikalni oblik



- Korelacije za prijenos topline kroz plašt reaktora ili zmijaču koja je smještena unutar reaktorskog prostora, izabiru se na osnovi **vrste prijenosa, tipa mješalice** te **iznosa Re značajke**.
- **Turbinske mješalice povećavaju koeficijent prijenosa, h_1 , za oko 30 %** u usporedbi s drugim tipovima.
- **Koeficijent prijenosa topline u reaktorima s plaštem i bez ugrađenih lopatica je samo 65% od onog u reaktorima sa zmijačama.**

- Turbinsko mješalo bolje je smjestiti u blizini centra reaktora nego blizu dna.
- **Nepokretne lopatice (pregrade)** u reaktoru poboljšavaju prijenos topline, a posebice uz turbinska mješala kada je $Re > 1000$.
- Kao **sredstvo za prijenos topline** koriste se različiti mediji.

Obično se, gdje je to moguće

- za **hlađenje** koristi **voda**,
- za **grijanje**: **voda**, razne **organske kapljevine** (npr. difenil) te **para**.

Prijenos topline medijem u plaštu

- Veći koeficijenti prijenosa u plaštu postižu se **turbulentnim protokom medija**, a to se omogućuje ugradnjom **usmjerivača** ili **pregrada** te **postranih ulaza**.
- **Različite izvedbe plašta**, npr. tzv. "dimple" plašt omogućuju bolji prijenos topline.
- Od mnogih korelacija pomoću kojih se računa h_0 u plaštu navodi se ona koja vrijedi za **turbulentno strujanje medija u plaštu**, odnosno kada je $Re > 10\,000$

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14}$$

d_p - promjer plašta, m

d_r - promjer reaktora, m

u - brzina strujanja fluida u plaštu, m s^{-1}

d_e - tzv. ekvivalentni promjer plašta

$$Re = \frac{d_e u \rho}{\mu}$$

$$d_e = \frac{d_P^2 - d_r^2}{d_r^2}$$

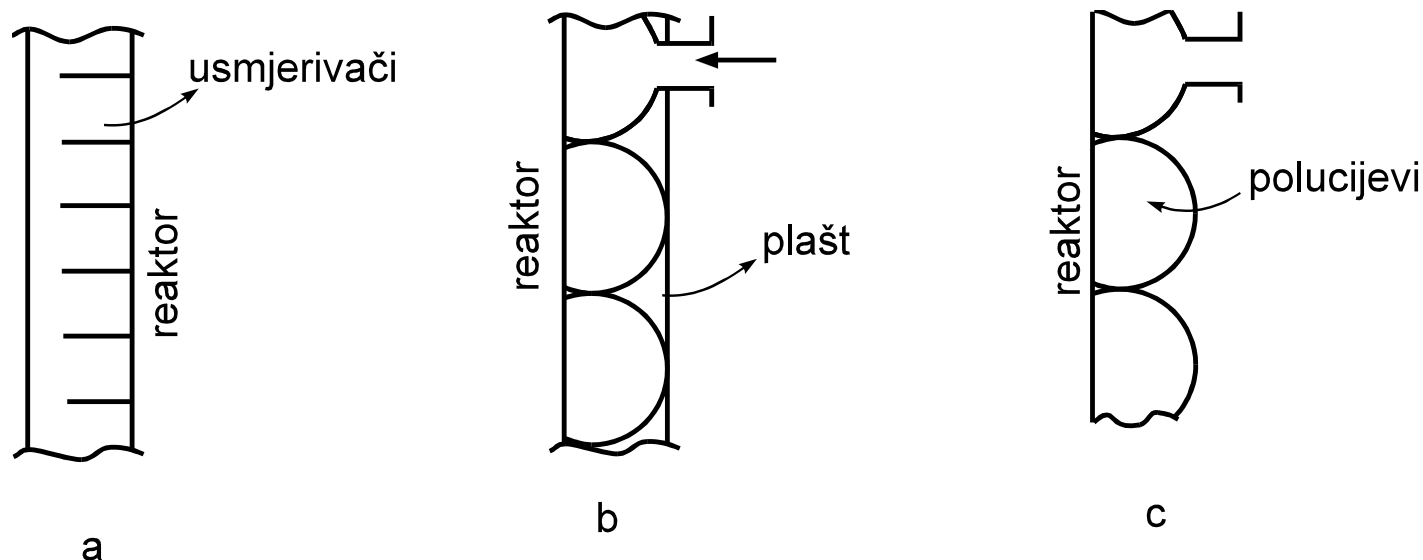
$$u = \frac{v_0}{A_s}$$

$$A_s = \left(d_P^2 - d_r^2 \right) \frac{\pi}{4}$$

v_0 - volumni protok fluida, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

A_s - površina presjeka strujanja, m^2

Razne izvedbe prijenosa topline kroz plašt



- a) uobičajeni plašt s ugrađenim usmjerivačima,
b) tzv. "dimple" plašt,
c) plašt izveden kao navarene polucijevi.

Izbor vrste plašta zavisi od **medija za prijenos topline**, odnosno **maksimalno dozvoljenog pritiska**.

dozvoljeni pritisci: a) do 7 bara, b) do 25 bara, c) do 50 bara.

MIJEŠANJE U PKR I KOTLASTIM REAKTORIMA

- Treba postići osnovnu značajku PKR i kotlastog reaktora, a to je ***homogenost reakcijske smjese*** (zahvaljujući odgovarajućoj izvedbi miješanja).
- Dobrim miješanjem ujedno se postiže i ***izotermnost s obzirom na reaktorski prostor***.
- ***"Dobrota" miješanja*** može se provjeriti ***eksperimentalno određivanjem RVZ funkcija***.

- Za PKR reaktor potrebno je obratiti pažnju na ***odnos ulaznog protoka i brzine cirkulacije mješala***.
- **Jedan od pouzdanih kriterija za dobro umješavanje jeste:**

$$\frac{v_m}{v_0} > 10$$

v_m - brzina miješanja

- brzina miješanja, v_m može se procijeniti na osnovi različitih korelacija, npr.

$$N_m = \frac{v_m}{Nd_m^3}$$

N_m - **bezdimenzijska značajka i zavisi od tipa mješala**

N - broj okretaja mješala, o s^{-1}

d_m - promjer mješala, m

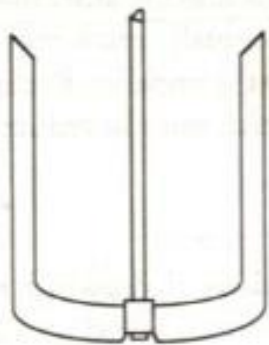
S dobrim miješanjem se postiže:

- dobra raspodjela ulaznih struja materijala (makromiješanje),
- dobra izmiješanost i na mikro razini, RVZ krivulja što sličnija idealnoj,
- što veći koeficijent prijenosa topline kroz reakcijsku smjesu, jer on zavisi od dobrote miješanja.

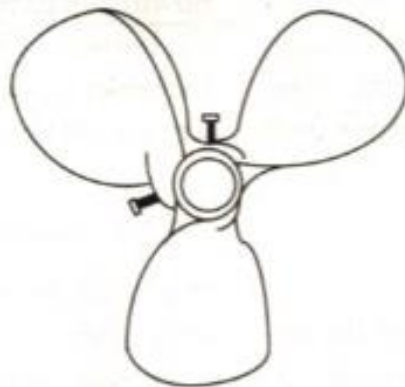
Dobro miješanje osigurano je pravilnim

*izborom mješala,
njegovim dimenzijama i
smještajem u reaktoru.*

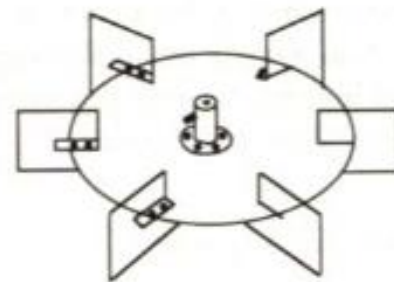
- Izbor se često osniva na kvalitativnim i iskustvenim pravilima.
- U praksi postoji velik broj izvedbi i tipova mješala.



Anchor



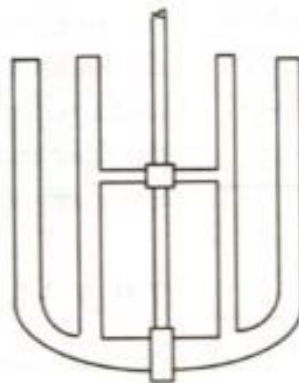
Propeller



6-flat-blade disc-turbine



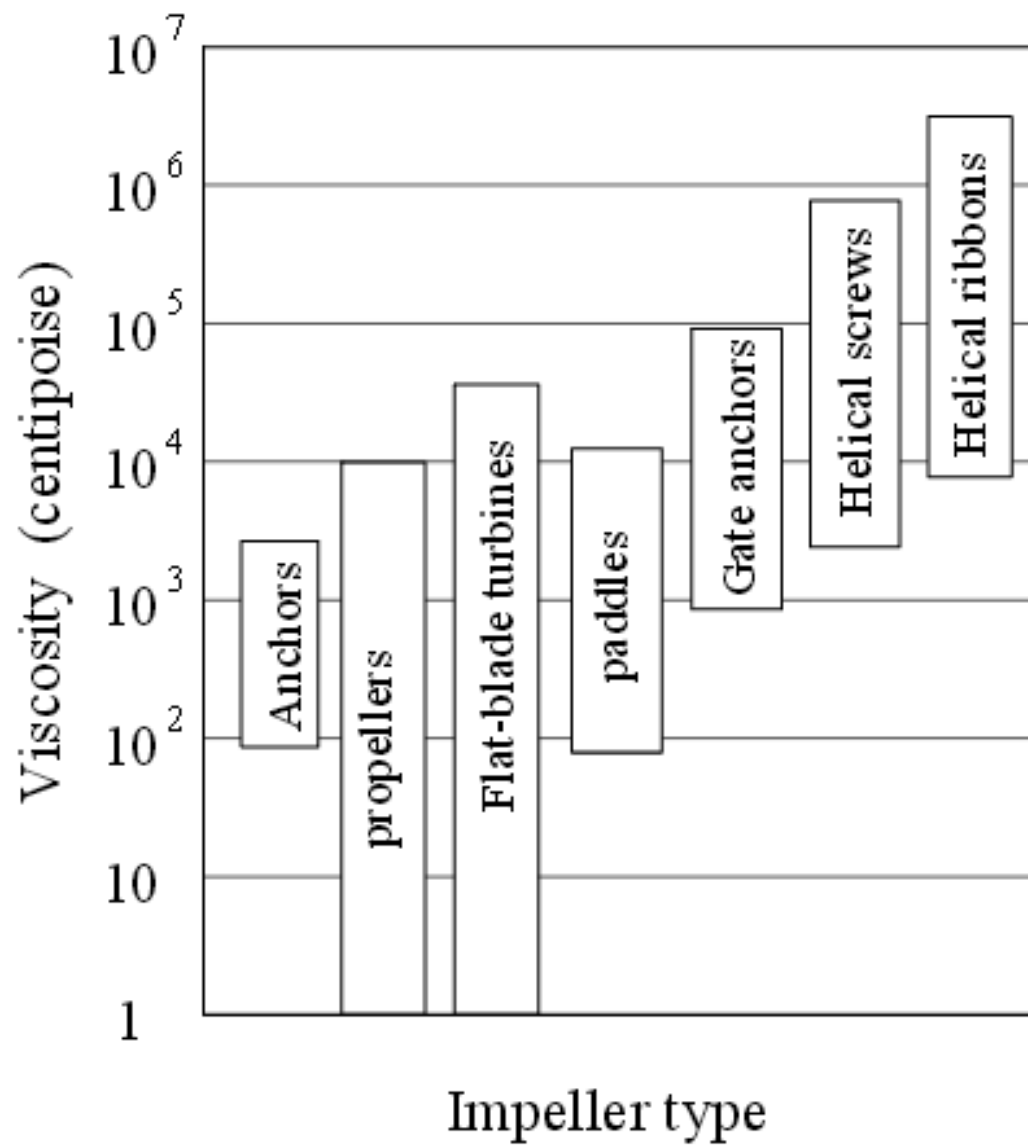
Paddle



Gate anchor

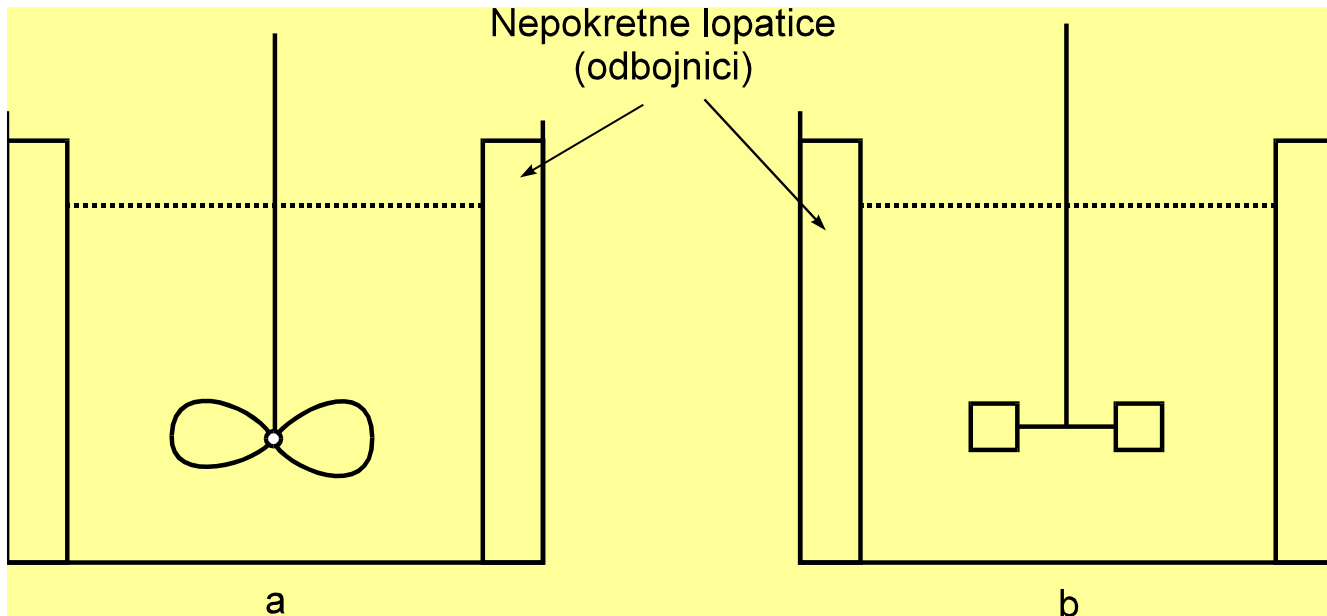


Helical screw



Propelerska mješala

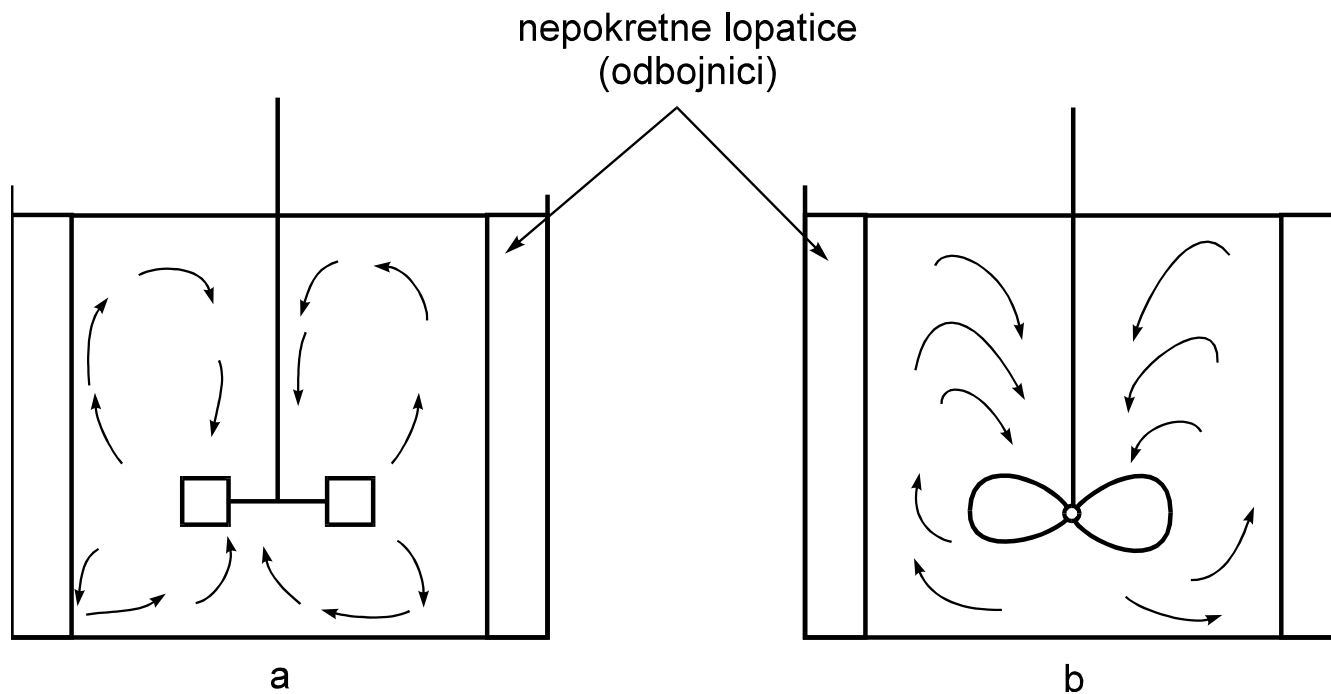
- pogodna su za miješanje kapljevina s manjom viskoznošću
- postiže se aksijalno strujanje i dobra cirkulacija
- u reaktor se ugrađuju i nepokretne lopatice (odbojnici)



Turbinska mješala

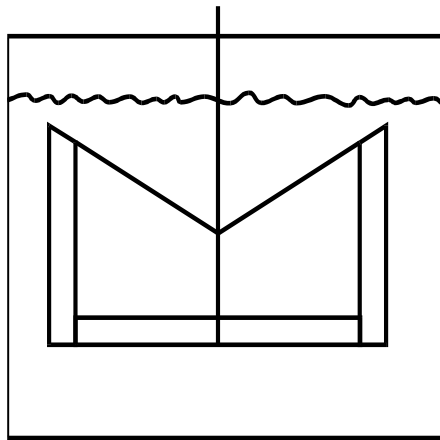
- Najčešća su u praksi.
- Pogodna za miješanje svih kapljevina i rijetkih suspenzija, izuzev vrlo viskoznih sustava.
- Ima ih različitih vrsta i oblika, s ravnim lopaticama, zakrivljenim lopaticama ili unutar kućišta.
- Snaga miješanja ne mijenja se značajno s porastom viskoznosti u turbulentnom području strujanja ($Re > 1000$).
- Turbinska mješala, pogotovo s ravnim lopaticama, omogućuju radijalno miješanje fluida u posudi, za razliku od propelerskih koja uglavnom miješaju u osnom smjeru,

Ostale vrste miješala

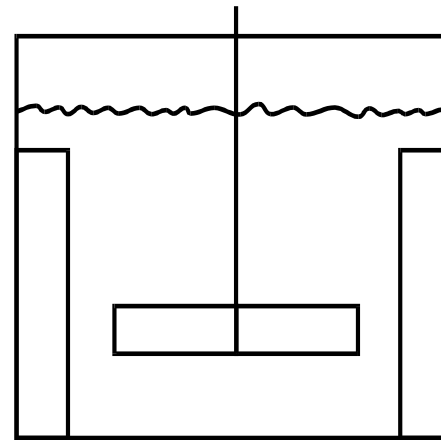


Tok fluida uz miješanje:

a) turbinskom miješalicom i b) s propelerom



a

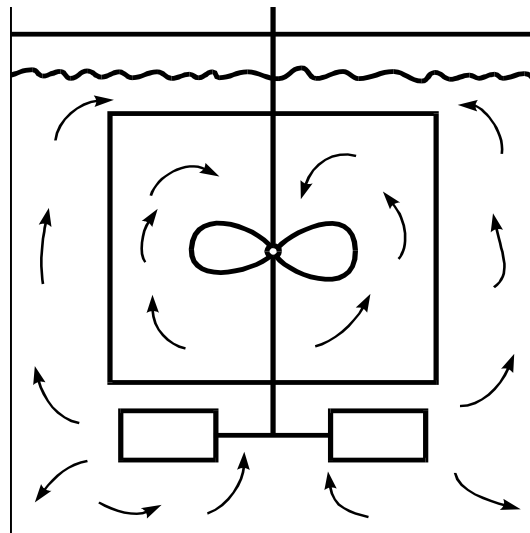


b

Vrste miješala: a) sidrasto miješalo i b) lopatasto miješalo

- Velik broj različitih tipova mješala koristi se za posebne namjene.
- Npr. **sidrasta mješala** (za viskozne kapljevine), **lopatasta** i **pužna mješala** (za vrlo viskozne sustave i smjese kapljevina – krutina)
- U reaktor se često puta ugrađuju tzv. **nepokretne lopatice** (“baffle”) koji imaju ulogu **spriječiti nastajanje vrtloga ili rotacije cijele reakcijske smjese unutar reaktora** (za manje posude obično se ugrađuje četiri, a za veće šest odbojnika).

- Širina nepokretnih lopatica (odbojnika) je obično $1/10$ promjera posude.
- Bolje miješanje postiže se neki put i ugradnjom **tuljka** ("draft tube"). Mješalo se smještava tik ispod tuljka i unutar njega.



*Miješanje uz ugradnju
tuljka u reaktor*

- Smještaj mješala unutar reaktora također ima utjecaja na strujanje fluida unutar reaktora.

Energija potrebna za postizanje dobrog miješanja
utječe na ekonomičnost procesa (radne troškove)
⇒ **proračun snage miješanja**

Proračun snage miješanja

- Ekonomski pokazatelj kod izvedbe reaktora s miješanjem je proračun potrebne **snage motora mješala**.
- **Snaga miješanja** računa se iz korelacija koje povezuju Re i Fr značajke s geometrijskim veličinama reaktora i mješala,

$$N_p = \frac{P_s}{\rho N^3 d_r^5} = K Re^a Fr^b f(g)$$

K, a, b – konstante (eksp.)

- **Fr** – Froudova značajka (važna kod stvaranja virova!);
 - **N_p** - bezdimenzijska značajka snage miješanja
 - **P_s** - potrebna snaga motora, kW
 - **ρ** - gustoća fluida, kg m⁻³
 - **N** - broj okretaja mješala, o s⁻¹
 - **d_r** - promjer mješala, m
 - **$f(g)$** - funkcija pojedinih geometrijskih značajki reaktora i mješala.
- $$Fr = \frac{N^2 d_r}{g}$$
- $$Re = \frac{N d_r^2 \rho}{\eta}$$

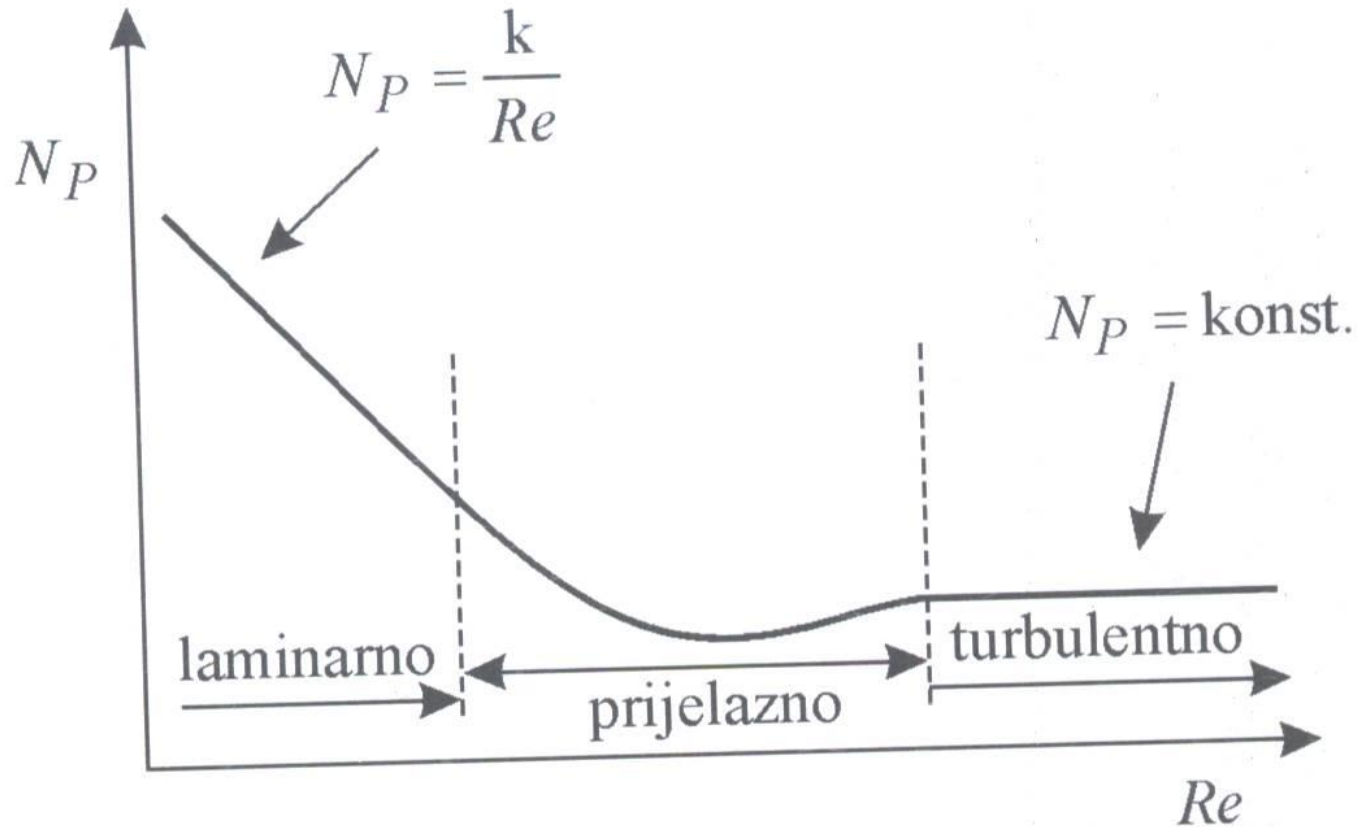
- Konstante ***K***, ***a*** i ***b*** određuju se eksperimentalno.
- **Ako postoji geometrijska sličnost između eksperimentalnog uređaja i predviđenog reaktora moguće je pojednostavljenje:**

$$N_p = K Re^m$$

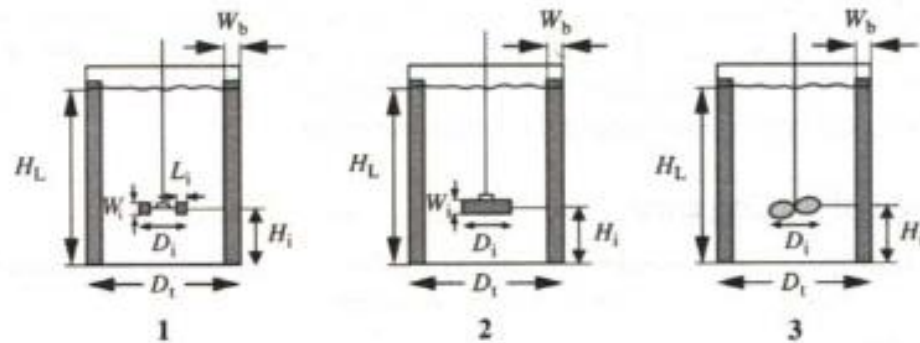
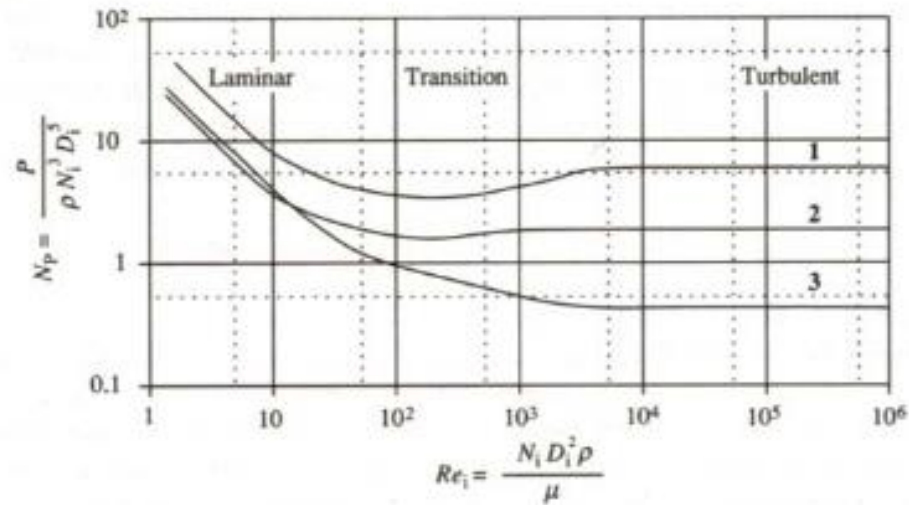
- Za svaki tip i oblik mješala postoji određena zavisnost N_p o Re značajki (grafovi iz kojih se očitava N_p).
- Potrebna snaga miješanja se izračunava prema

$$P = N_p \rho N^3 d_r^5$$

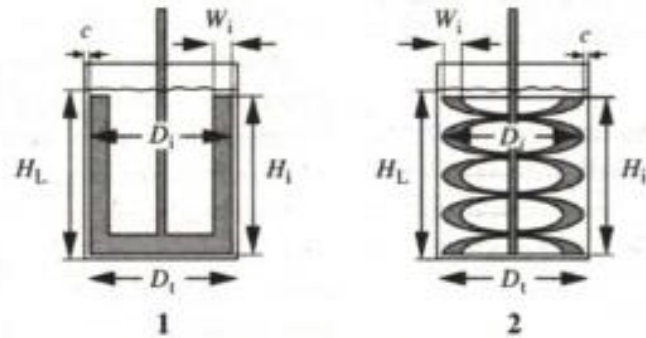
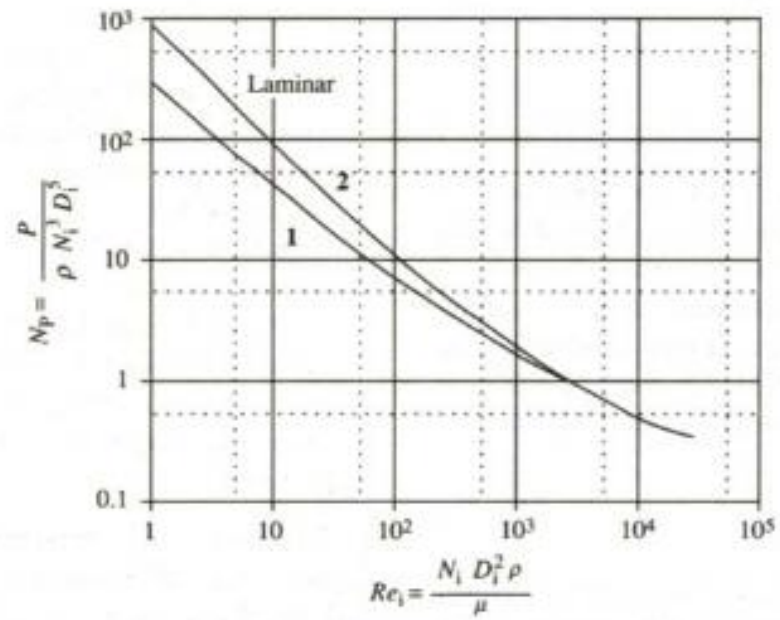
Korelacija vrijedi za obične kapljevine koje nisu jako viskozne, dok se za ne-Newtonovske kapljevine snaga miješanja obično određuje eksperimentalno.



N_p za turbinski tip mješala značajno je veći nego kod ostalih mješala, što ukazuje da **turbine prenose znatno veću snagu na fluid**



Impeller	D_t/D_i	H_L/D_i	H_i/D_i	Baffles	
				W_b/D_t	Number
1. Rushton turbine $W_i/D_i = 0.2, L_i/D_i = 0.25$	3	3	1	0.1	4
2. Paddle $W_i/D_i = 0.25$	3	3	1	0.1	4
3. Marine propeller Pitch = D_i	3	3	1	0.1	4



Impeller	D_i/D_i	c/D_i	H_i/D_i	w_i/D_i
1. Anchor	1.02	0.01	1	0.1
2. Helical ribbon	1.02	0.01	1	0.1

