

# Neidealno strujanje u cijevnim reaktorima

---

**Reiter, Ana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:543645>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-09**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ana Reiter

## **ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, srpanj 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ana Reiter

**NEIDEALNO STRUJANJE U CIJEVNIM REAKTORIMA**

## **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada: Izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar

Članovi ispitnog povjerenstva : Izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar

Izv. prof. dr. sc. Ana Lončarić Božić

Dr. sc. Zana Hajdari

Zagreb, srpanj 2016.

*Ovaj završni rad izrađen je na Zavodu za reakcijsko inženjerstvo i katalizu Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu, akademske godine 2015./2016*

*Željela bih se iskreno zahvaliti svom mentoru izv. prof. dr.sc. Vanji Kosaru, na strpljenju, pomoći i trudu tokom izrade ovog rada. Hvala svim kolegama koji su bili uz mene, a najveća hvala mojoj obitelji, prijateljima i svim onima koji su mi tokom studija na bilo koji način pomogli i bili velika podrška.*

## SAŽETAK

U ovom radu istraživano je odstupanje od idealnog strujanja u modelnim cijevima. Rad je zasnovan na eksperimentalnim podacima dobivenim na temelju uvođenja traseera kroz tri različite cijevi (prazna kratka cijev, cijev sa slojem staklenih kuglica i duga spiralna cijev), mjereći njihov odziv na impulsni poremećaj. Dobivene krivulje raspodjele vremena zadržavanja poslužile su za izračunavanje srednjeg vremena zadržavanja i disperzijskog broja. Iz dobivenih i izračunatih vrijednosti može se raspravljati o profilu strujanja u sve tri cijevi.

**Ključne riječi:** idealno strujanje, cijevni reaktor, raspodjela vremena zadržavanja, srednje vrijeme zadržavanja, model aksijalne disperzije.

## **ABSTRACT**

In this work deviation from the plug flow in model tubes were explored. The work is based on experimental data obtained on the basis of the introduction of tracer through three different pipes (empty short tube, tube with the immobilized glass beads and long spiral tube), measuring their response to the impulse disorder. Govern curves for residence time distributions were used to evaluate mean residence time and dispersion number. From governed and evaluated values it can be discussed about the flow profiles in the three tubes.

**Key words:** plug flow, tubular reactor, residence time distribution, mean residence time, axial dispersion model.

# SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	TEORIJSKI DIO.....	2
2.1	CIJEVNI REAKTOR.....	2
2.2	RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA.....	4
2.3	MODELI STRUJANJA.....	9
2.3.1	MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE.....	9
2.3.2	MODEL LAMINARNOG STRUJANJA.....	13
2.3.3	MEHANISTIČKI MODELI STRUJANJA.....	14
3	EKSPERIMENTALNI DIO.....	16
3.1	APARATURA I POSTUPAK MJERENJA.....	16
3.2	EKSPERIMENTALNE METODE ODREĐIVANJA RVZ FUNKCIJA.....	18
3.3	PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA.....	21
4	REZULTATI I RASPRAVA.....	23
4.1	OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA.....	23
4.2	PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA.....	24
4.3	PROCIJENJENE VRIJEDNOSTI PARAMETARA MODELA.....	27
5	ZAKLJUČAK.....	30
	LITERATURA.....	31
	POPIS OZNAKA.....	32
	ŽIVOTOPIS.....	33



## 1 UVOD

Svrha ovog rada je upoznati se s fizičkom slikom strujanja u cijevnim reaktorima. Kao što je poznato, u realnim sustavima uvijek postoji određeno odstupanje od idealnog ('plug-flow') strujanja. Eksperimentalnim određivanjem funkcije raspodjele vremena zadržavanja može se opisati odstupanje od idealnog strujanja kao i od idealnog miješanja za idealni kotlasti i protočno kotlasti reaktor.

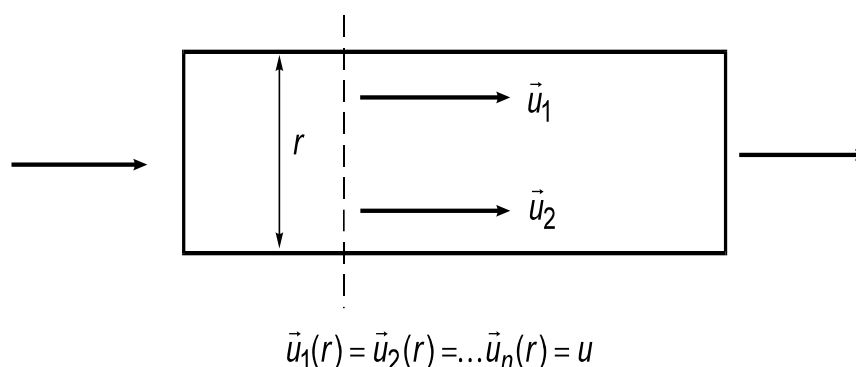
Tijekom izrade ovog rada proučava se odstupanje od idealnog strujanja u cijevima koje predstavljaju idealne cijevne reaktore bez prisutnosti kemijske reakcije. Na taj način na ukupnu hidrodinamiku strujanja utječe isključivo geometrija cijevi odnosno brzina strujanja fluida (vode i trase). Uspoređivanjem eksperimentalnih odziva krivulja s nekim od modela strujanja mogu se procijeniti ključne veličine koje određuju režim strujanja. Također, ova eksperimentalna analiza strujanja u cijevima može nam u praksi poslužiti prilikom modeliranja i dimenzioniranja cijevnih reaktora.

## 2 TEORIJSKI DIO

Od svih vrsta kemijskih reaktora, cijevni reaktori su najzastupljeniji danas u industriji. Sam naziv „cijevni reaktor“ govori o izvedbi reaktora u obliku cijevi. Upravo takva jednostavna konstrukcija razlog je njegove široke primjene u većim industrijskim postrojenjima (anorganske, petrokemijske, industrije organske sinteze) gdje najčešće radi u stacionarnom stanju što ukazuje na nezavisnost temperature i koncentracije o vremenu, te se kao takav koristi za dobivanje velikih količina ujednačenog proizvoda. Mogu se podijeliti na reaktore za homogene reakcije te na reaktore za provedbu katalitičkih reakcija uz kruti katalizator. Pogodni su za smještaj krutog katalizatora pa su katalitički cijevni reaktori s nepokretnim slojem katalizatora ujedno i najvažniji tipovi za provedbu mnogih važnih industrijskih procesa. Drugi važan parametar po kojem se razlikuju cijevni reaktori jest prijenos topline. Dijele se na adijabatske cijevne reaktore, tj. reaktore bez izmjene topline s okolinom te reaktore s izmjenom topline kroz plašt<sup>1,2,3</sup>.

### 2.1 CIJEVNI REAKTOR

U laboratorijskoj i industrijskoj primjeni koriste se tri osnovna idealna tipa reaktora: kotlasti, protočno-kotlasti i cijevni reaktor. Strujanje u cijevnom reaktoru odvija se u aksijalnom smjeru pri čemu teoretski ne dolazi do miješanja reakcijske smjese te poprima obilježja idealnog strujanja. Kod idealnog strujanja uzima se za pretpostavku da je brzina strujanja u cijevnom reaktoru identična u svakoj točki reaktora tj. ima isti iznos i isti smjer, slika 2.1.

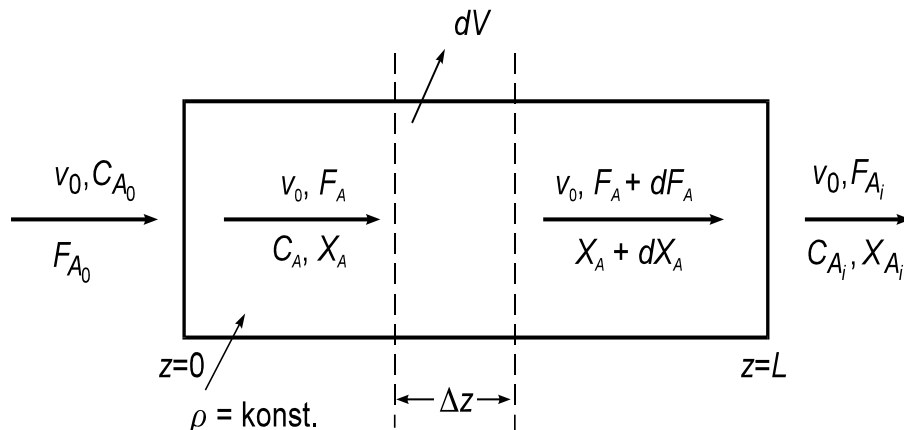


**Slika 2.1** Prikaz idealnog strujanja u cijevnom reaktoru

Matematički model idealnog cijevnog reaktora izvodi se uz sljedeće pretpostavke:

- mijenjaju se veličine stanja u aksijalnom smjeru te se u skladu s tim prilagođavaju i bilance za diferencijalni volumen
- cijevni reaktor je otvoreni sustav (za vrijeme reakcije izmjenjuje se određena količina reakcijske mase s okolinom)
- prolazak reakcijske smjese kroz reaktor idealnim strujanjem (prolaz zamisljen kao konvektivni prijenos samo u aksijalnom, osnom smjeru, tj. definirano je idealnim ne miješanjem po dužini reaktora, vektori brzina strujanja imaju isti iznos i smjer)
- rad reaktora promatra se u stacionarnom stanju (veličine nezavisne od vremena, tj. njihova vremenska promjena jednaka je nuli)
- reaktor je izotermni sustav, dolazi do izmjene topline (temperatura se ne mijenja s položajem unutar reaktora niti nakon određenog vremena)
- gustoća reakcijske smjese za vrijeme prolaza kroz reaktor je stalna<sup>1</sup>

Razlikom određene množine tvari koja uđe u diferencijalni volumen u jediničnom vremenu i množine iste tvari koja izađe, dobiva se osnovna jednadžba bilance množine tvari za idealni cijevni reaktor, slika 2.2, jed.(2.1).



**Slika 2.2** Model idealnog cijevnog reaktora

$$F_A - (F_A + dF_A) - r_A dV = 0 \quad (2.1)$$

Ovu osnovnu jednadžbu bilance množine tvari za idealni cijevni reaktor moguće je prevesti u druge oblike koristeći različite jedinice.

Uzevši u obzir kako je:

$$F_A = F_{A_0} (1 - X_A) \quad (2.2)$$

$$dF_A = -F_{A_0} dX_A \quad (2.3)$$

slijedi izraz :

$$\frac{dV}{F_{A_0}} = \frac{dX_A}{r_A} \quad (2.4)$$

Kako je:

$$F_{A_0} = C_{A_0} v_0 \quad (2.5)$$

$$dV = A_s dz \quad (2.6)$$

slijedi da jednadžbu (2.4) može se integrirati na dva načina. Prvim će se dobiti uobičajenu jednadžbu u kojoj je prikazana zavisnost promjene koncentracije komponente A po duljini reaktora (2.7).

$$r_A = -u \frac{dC_A}{dz} \quad (2.7)$$

Drugim načinom dobiva se zavisnost koncentracije komponente A o prostornom vremenu čime se potvrđuje analogija između diferencijalnog volumena za kojeg se izvodi reaktorski model i idealnog kotlastog reaktora <sup>1,2,3,4</sup>(2.8):

$$r_A = -\frac{dC_A}{d\tau} \quad (2.8)$$

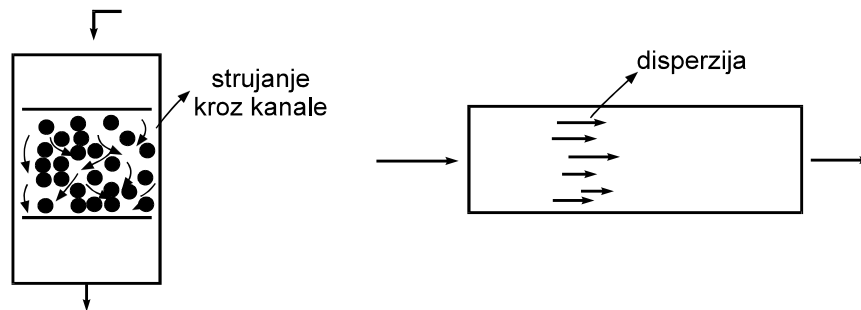
## 2.2 RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA

Predodžba o idealnom strujanju koristi se za prikaz strujanja kroz cijevni reaktor. Osnovna pretpostavka je da svaka molekula u gibanju kroz reaktor posjeduje brzinu istog iznosa i smjera. Prolaz reakcijske smjese kroz PKR reaktor pretpostavlja idealno miješanje. Molekule ulazom u reaktor potpuno gube svoj „identitet“ jer se idealnim miješanjem postiže trenutna homogenost. Na izlazu iz reaktora uvijek postoji određena raspodjela molekula po vremenu prebivanja unutar reaktora.

Uzroci odstupanja od idealnog strujanja kod cijevnog reaktora (slika 2.3) :

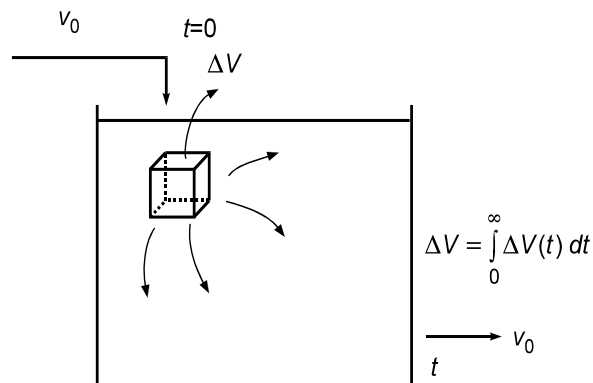
- prijenos tvari difuzijom (disperzijom) u aksijalnom i radijalnom smjeru
- postojanje laminarnog profila strujanja uslijed malih brzina za reakcije u homogenim sustavima
- promjene puta strujanja unutar reaktora s krutim katalizatorima ili punilima zbog postojanja obilazaka, prostranih tokova ili kraćenja<sup>4</sup>

Na slici 2.3 dan je zorni prikaz pojedinih primjera koji mogu postojati u realnim cijevnim reaktorima.



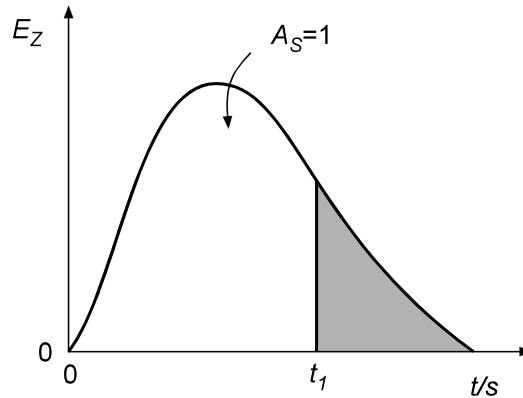
**Slika 2.3** Uzroci odstupanja od idealnog strujanja u cijevnim reaktorima

U slučajevima u kojima se isključuje mogućnost predviđanja ili opisa hidrodinamičkog ponašanja fluida koji protječe kroz reaktor na temelju fizičke slike, model strujanja određuje se pomoću eksperimentalnih podataka, koji se temelje na raspodjeli vremena zadržavanja (RVZ) elemenata fluida u reaktoru.



**Slika 2.4** Prikaz raspodjele vremena zadržavanja u reaktoru

Ako se promatra jedan element fluida ( $dV$ ) na ulazu u reaktor sa slike 2.4., vjerojatnost kojom će taj element nakon nekog vremena izaći iz reaktora izražava se funkcijom raspodjele vremena zadržavanja (RVZ funkcijom). Kako se uočava RVZ funkcija je statistička raspodjela pa je ukupna vjerojatnost dana površinom ispod krivulje, slika 2.5. Površina ispod krivulje mora biti jednaka jedinici<sup>1,5</sup>, prema jednadžbi (2.9).



**Slika 2.5** Funkcija raspodjele vremena zadržavanja, RVZ funkcija

Jednadžba koja odgovara RVZ funkciji glasi:

$$\int_0^{\infty} E_z(t) dt = 1 \quad (2.9)$$

Iz slike 2.5 se uočava da vrijedi:

$$\int_{t_1}^{\infty} E_z(t) dt = 1 - \int_0^{t_1} E_z(t) dt \quad (2.10)$$

Često puta se tekuće vrijeme zamjenjuje bezdimenzijskim, dijeljenjem sa srednjim vremenom zadržavanja,

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (2.11)$$

koje je za sustave sa stalnom gustoćom jednako prostornom vremenu, odnosno:

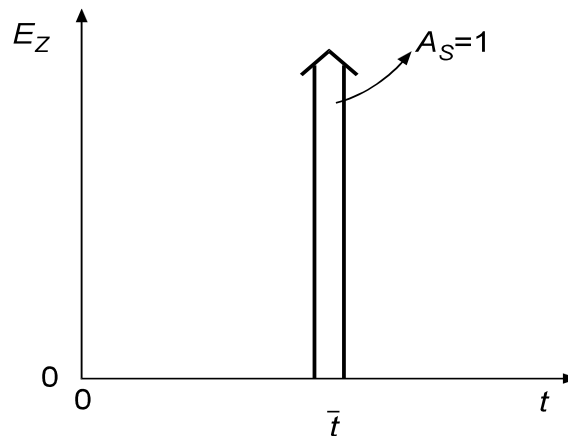
$$\bar{t} = \tau = \frac{V}{v_0} \quad (2.12)$$

Prema tome, vrijedi relacija između  $E_z$  funkcija definiranih sa tekućim, odnosno bezdimenzijskim vremenom,

$$E_z(\theta) = \tau E_z(t) = \bar{t} E_z(t) \quad (2.13)$$

Granični slučajevi prolaza reakcijske smjese kroz reaktor su protjecanje uz idealno strujanje, odnosno idealno miješanje. Idealno strujanje je način potpuno uređenog protjecanja, tj. svaki element fluida ima potpuno istu maksimalnu vjerojatnost ( $p=1$ ) da će se u reaktoru zadržati određeno vrijeme koje je isto za svaki element. Prema tome, u idealnom cijevnom reaktoru ne postoji raspodjela vremena zadržavanja, a RVZ funkcija definirana je tzv. Diracovom ili delta funkcijom.<sup>1,5,6</sup>

RVZ funkcija ima oblik kao što je prikazano na slici 2.6



**Slika 2.6** RVZ funkcija za idealno strujanje u cijevnom reaktoru

Budući da površina ispod  $E_z$  krivulje mora iznositi 1, to znači da je ordinata beskonačno velika. Sve čestice fluida imaju jednako vrijeme zadržavanja u sustavu koje je zapravo srednje vrijeme zadržavanja, stoga na apscisi postoji samo jedna vrijednost. Uzme li se za vrijeme ulaska jednog elementarnog volumena u reaktor nulu, tada slijedi da je:

$$E_z(t) = \delta(t) = 0 \text{ za } t \neq 0 \quad (2.14)$$

$$E_z(t) = \delta(t) = 1 \text{ za } t = 0 \quad (2.15)$$

Iz toga proizlazi jedna od definicija delta funkcije koja odgovara jednadžbi:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.16)$$

Uz idealno strujanje i bez kemijske reakcije vrijedi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

Iz rješenja slijedi da je:

$$C(t, z) = C_0 \left( t - \frac{z}{u} \right) = C_0(t - \bar{t}z) \quad (2.18)$$

$$C_{iz}(t) = C(t, L) = C_0(t - \bar{t}L) \quad (2.19)$$

Količinu tvari na ulazu, odnosno diferencijalni volumen može se interpretirati delta funkcijom pa je:

$$C_0(t) = \delta(t) \quad (2.20)$$

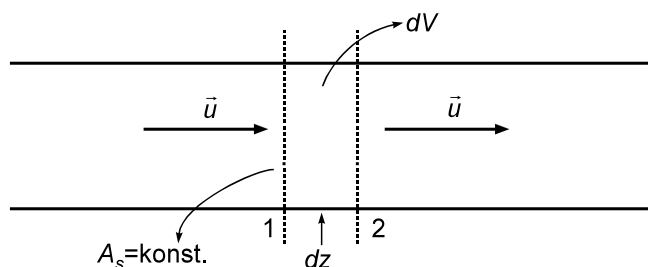
$$C_{iz}(t) = \delta(t - \bar{t}) \quad (2.21)$$

Srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$ , jednako je prostornom vremenu  $\tau$ , uz uvjet da se u reaktoru ne mijenja gustoća. Iz slike 2.7 se može uočiti kako je:

$$\bar{t} = \int_1^2 \frac{dV}{v_0} = \frac{1}{A_s} \int_1^2 \frac{dV}{u(V)} \quad (2.22)$$

Budući da je  $u(V) = konst.$ , to je:

$$\bar{t} = \frac{V}{A_s u} = \frac{V}{v_0} = \tau \quad (2.23)$$



**Slika 2.7** Srednje vrijeme zadržavanja u cijevnom reaktoru

Može se pokazati kako je srednje vrijeme zadržavanja fluida u reaktoru jednako srednjoj vrijednosti  $E_z$  funkcije postavljajući bilancu tvari za ukupni volumen u vremenu  $t$ . Tako je:

$$V = \int_0^\infty (v_0 dt) \int_t^\infty (E_z dt) \quad (2.24)$$

iz čega slijedi:

$$\bar{t} = \frac{V}{v_0} = \int_{t_1}^\infty t E_z(t) dt = \bar{t}_{E_z} \quad (2.25)$$



Prema tome, za idealno strujanje uz stalnu gustoću vrijedi:

$$\tau = \bar{t} = \bar{t}_{Ez} \quad (2.26)$$

Ako se uvede bezdimenzijsko vrijeme  $\theta = t/\bar{t}$ , to je:

$$\bar{\theta}_{Ez} = 1 \quad (2.27)$$

$$\sigma_t^2 = \sigma_{\theta}^2 = 0 \quad (2.28)$$

## 2.3 MODELI STRUJANJA

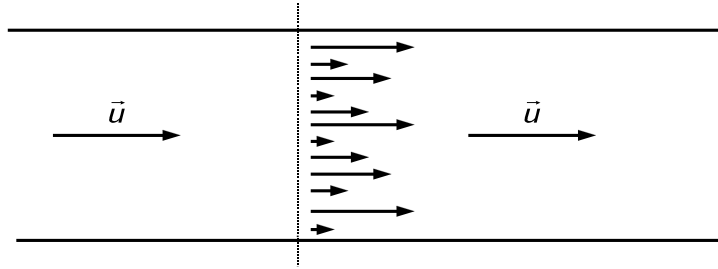
Uslijed neidealnog strujanja i miješanja u realnom sustavu, RVZ funkcije ne poprimaju oblike graničnih načina strujanja. Oblik realnih RVZ funkcija predočava se različitim modelima strujanja. Ovisno o broju parametara i složenosti matematičke funkcije, primjenjuju se modeli strujanja za određivanje odstupanja od graničnih oblika strujanja. Modeli strujanja dijele se u dvije skupine. Prvu skupinu čine modeli strujanja koji su izvedeni na osnovi hidrodinamičkih značajki sustava od kojih su najprimjenjiviji model aksijalne disperzije i laminarni model. Drugu skupinu čine mehanistički modeli izvedeni ovisno o načinu predodžbe strujanja kroz reaktor kao npr. PKR model i gama model. Zajedničke značajke navedenih modela strujanja je njihovo slaganje s eksperimentalno dobivenim  $E_Z$  funkcijama.

### 2.3.1 MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE

Model aksijalne disperzije najpogodniji je za opis strujanja kroz reaktore koji sadrže nepokretan sloj krutog katalizatora. Realistično prikazuje strujanja kod cijevnih reaktora u kojima se javljaju mala odstupanja od idealnog strujanja, slika 2.8. Difuzijski prijenos se zasniva na idealnom strujanju kojemu se dodaje makrostrujanje u smjeru osi, te se opisuje Fickovim zakonom.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.29)$$

Kod Fickovog zakona parametar  $D_e$  označava prosječan koeficijent difuzije ili koeficijent disperzije.



**Slika 2.8** Strujanje prema modelu aksijalne disperzije

Modelom aksijalne disperzije pokušava se aproksimirati realno strujanje uz pretpostavke:

- disperzija uzrokovana difuzijom i drugim procesima nezavisna je o položaju unutar reaktora i svugdje je ista
- linearna brzina fluida i koncentracija reaktanata po presjeku reaktora je stalna
- u reaktoru ne postoje mjesta sa stagnantnim strujanjem niti sa obilascima

Raspodjela vremena zadržavanja (RVZ krivulja) nalazi se pomoću bilance množine tvari unutar elemenata volumena  $\Delta V$  koji je jednak  $\Delta V = A_s \Delta z$ . Uz određene jednostavne matematičke manipulacije dolazi se do jednadžbe izvedene za prijenos tvari konvekcijom i difuzijom u nestacionarnom stanju (bilanca za  $\Delta V$ ):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} u \quad (2.30)$$

Navedena jednadžba (2.30) prevodi se u bezdimenzijski oblik:

- bezdimenzijskog vremena

$$\theta = \frac{tu}{L} \quad (2.31)$$

- bezdimenzijske dužine

$$x = \frac{z}{L} \quad (2.32)$$

Dobiva se jednadžba koja glasi,

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D_e}{uL} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.33)$$

iz čega proizlazi da je disperzijski broj jednak,

$$DB = \frac{D_e}{uL} \quad (2.34)$$

U slučaju da nema disperzije,  $DB \rightarrow 0$ , strujanje je idealno. Ako se radi o potpunoj disperziji  $DB \rightarrow \infty$ , strujanje se odvija uz idealno miješanje. U slučaju realnog strujanja, disperzijska značajka je između navedenih graničnih vrijednosti. Opće rješenje jed. (2.33) zavisi od pretpostavljenih rubnih uvjeta strujanja na ulazu i izlazu iz sustava. Jedino za slučaj kada na ulazu i na izlazu ne postoji disperzija, vrijedi zaključak da  $E_z$  funkcija stvarno predočava RVZ krivulju. Za takav je sustav rješenje vrlo složeno, međutim varijanca je povezana s disperzijskom značajkom znatno jednostavnijim izrazom,

$$\sigma_\theta^2 = \frac{1}{Pe} \{2Pe - 2 + 2\exp[-Pe]\} \quad (2.35)$$

Važno je napomenuti da za mala odstupanja od idealnog strujanja, model aksijalne disperzije daje simetričnu raspodjelu, pa je  $E_z$  funkciju za simetričnu raspodjelu moguće dobiti preko izraza:

$$E_z(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D_B}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4D_B}\right] \quad (2.36)$$

Povezanost varijance s Pecletovim brojem i disperzijske značajke za navedeni slučaj,

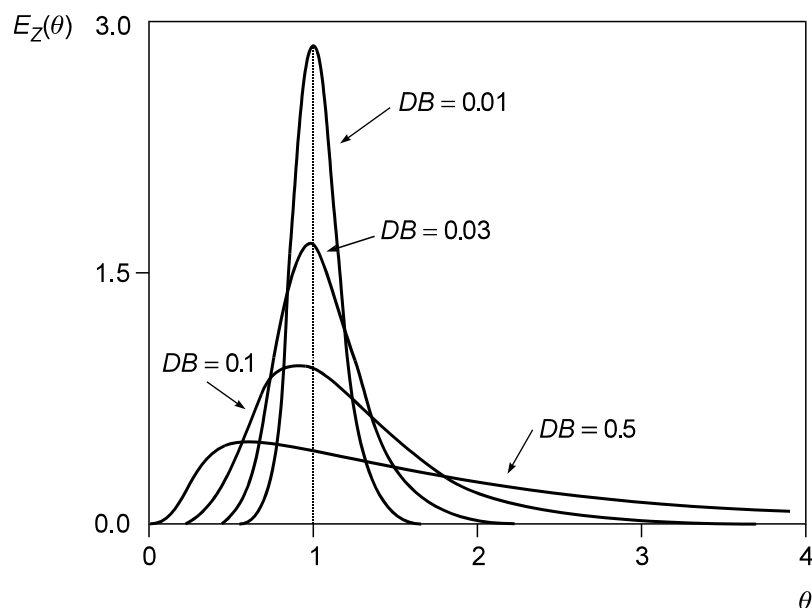
$$\sigma_\theta^2 = 2D_B \quad (2.37)$$

Kada nema disperzije na ulazu i na izlazu, odnosno kada je riječ o zatvorenom sustavu, a disperzijska značajka za realno strujanje iznosi manje od 0,05;  $E_z$  funkcija u tom slučaju se dobiva iz sljedeće jednadžbe<sup>3,5</sup>,

$$E_z(\theta) = \frac{1}{4\pi\theta^3 D_B} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta D_B}\right] \quad (2.38)$$

$E_z$  funkcija za otvoreni sustav u kojem na izlazu i ulazu postoji disperzija u strujanju, što za različite vrijednosti disperzijske značajke ujedno prikazuje i slika 2.9

$$E_z(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta D_B}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta D_B}\right] \quad (2.39)$$



**Slika 2.9** Model aksijalne disperzije, RVZ krivulje za otvorene sustave,(2.39)

U ovom slučaju varijancu i disperzijsku značajku povezuje izraz:

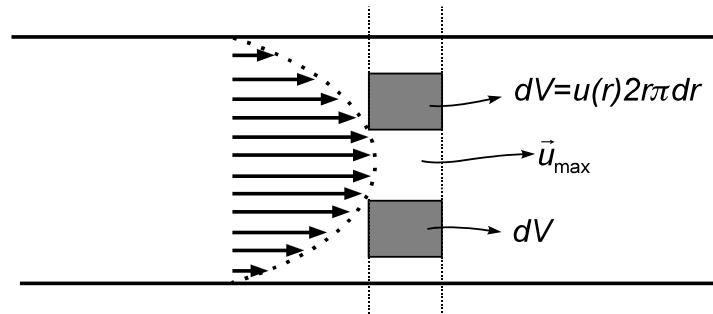
$$\sigma_{\theta}^2 = 2D_B + 8D_B^2 \quad (2.40)$$

Disperzijsku značajku nije moguće teorijski izračunati, nego se za neki sustav određuje uvijek iz eksperimentalno dobivenih  $E_z$  funkcija. Kao što se vidi iz gornjih razmatranja, varijanca je za niz modela aksijalne disperzije jednoznačno povezana s disperzijskom značajkom. Prema tome, varijanca se izračunava na temelju eksperimentalne krivulje, a slaganje s pretpostavkom može se provjeriti uvrštavanjem tako određene varijance u model te usporedbom s eksperimentalnom krivuljom.

Model aksijalne disperzije realna je predodžba strujanja u reaktorima s nepokretnim slojem katalizatora gdje su mala odstupanja od idealnog strujanja uzrokovana različitim procesima kao i u reaktorima za homogene sustave u kojima osim difuzije postoji i vrtložna turbulencija. Međutim, kada je disperzijska značajka velika, a strujanje bliže onom uz idealno miješanje, model može znatno odstupati od eksperimentalnih krivulja.

### 2.3.2 MODEL LAMINARNOG STRUJANJA

Kako je u cijevnim reaktorima brzina strujanja mala, najčešće se pojavljuje laminarni oblik strujanja. Laminarno strujanje karakterizira parabolični profil strujanja pri čemu ne dolazi do miješanja između slojeva, slika 2.10.



**Slika 2.10** Model laminarnog strujanja

Brzina strujanja koja se javlja u određenoj točki presjeka reaktora čiji je polumjer  $r$ , opisana je sljedećom jednačinom,

$$u(r) = 2u_s \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.41)$$

U središtu cijevi brzina strujanja je maksimalna i jednaka je  $2u_s$ .  $u_s$  označava srednju brzinu strujanja koja je opisana izrazom,

$$u_s = \frac{v_0}{r_0^2 \pi} \quad (2.42)$$

dok srednje vrijeme zadržavanja dobivamo iz jedn. (2.43) gdje je  $L$  duljina reaktora,

$$\bar{t} = \frac{L}{u_s} \quad (2.43)$$

Iz slike 2.10 vidljivo je da se brzina strujanja smanjuje od središta prema stjenkama reaktora, što rezultira većim vremenom zadržavanja uz stjenku reaktora.

Vrijeme zadržavanja za element fluida u točki  $r$ ,

$$t = \frac{L}{u(r)} = \frac{\bar{t}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right]} \quad (2.44)$$

Omjerom elemenata protoka fluida u točki  $r$  i srednjeg protoka dobiva se  $E_z$  funkcija,

$$E_z(t) = \frac{\Delta v(r)}{v_0} \quad (2.45)$$

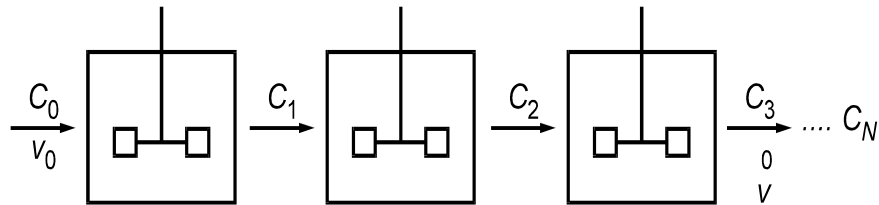
Ovisno o vremenu zadržavanja kod laminarnog strujanja, razlikuje se oblik  $E_z$  krivulje. On se uvijek nalazi između graničnih krivulja idealnog miješanja i idealnog strujanja. Raspodjela vremena zadržavanja dobiva se pomoću bilance množine tvari uz pretpostavku o laminarnom strujanju trasera  $\Delta V$  u cijevi.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u(r) \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (2.46)$$

### 2.3.3 MEHANISTIČKI MODELI STRUJANJA

#### a) Model ćelija vezanih slijedno ili PKR model

PKR model je jednostavan model utemeljen na strujanju reakcijske smjese kroz niz međusobno povezanih diferencijalnih PKR reaktora uz idealno miješanje, slika 2.11.



**Slika 2.11** Strujanje prema modelu ćelija vezanih u seriju

Za prikazani model  $E_z$  funkcija dobiva se postavljanjem bilance množine tvari koja prolazi kroz niz PKR reaktora, uz pretpostavku da ne dolazi do kemijske reakcije.

Izraz  $E_z$  za  $N$  ćelija:

$$E_z(t) = \frac{t^{N-1}}{(N-1)! \bar{t}_i^N} \exp\left[-\frac{t}{\bar{t}_i}\right] \quad (2.47)$$

Kako  $N$  može biti samo cjelobrojna vrijednost, model nije pogodan pri testiranju strujanja koja se uvelike ne razlikuju od strujanja uz idealno miješanje.

b) Gama model

Ovaj je model proizašao iz korekcije nedostataka PKR modela uzevši u obzir cjelobrojnu vrijednost parametara  $N$ . Poznato je više gama modela koji se međusobno razlikuju brojem parametara.

Izraz općeg gama modela

$$E_z(t) = \frac{1}{d_g \Gamma(p)} (t-D)^p \exp\left[-\frac{t-D}{d_g}\right] \quad (2.48)$$

$D$  je parametar koji bi odgovarao vremenu kašnjenja ili inercije. Parametar  $p$  odgovoran je za stupanj miješanja u reaktoru, dok parametar  $d_g$  predstavlja funkciju srednjeg vremena zadržavanja.

Gama funkcija dana je izrazom

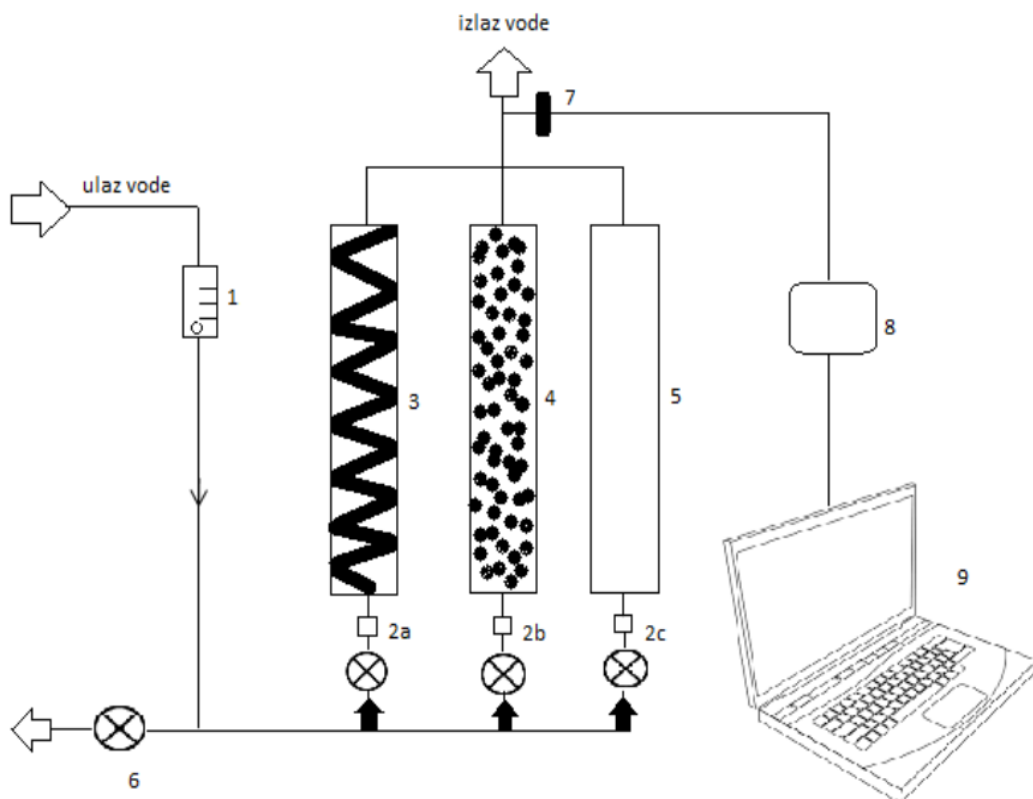
$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} x^{p-1} \exp[-x] dx \quad (2.49)$$

Kao glavni nedostatak ovog modela smatra se pomanjkanje fizičke slike strujanja te nije moguće predvidjeti brojčanu vrijednost parametara<sup>1,5,7</sup>.

### 3 EKSPERIMENTALNI DIO

Svrha ovog rada temelji se na dobivenim eksperimentalnim RVZ krivuljama uz pomoć kojih određujemo koliko naš sustav odstupa od idealnog strujanja, koristeći odziv na impulsni poremećaj kao mjeru približenja idealnom strujanju. Za svaku cijev provedeni su eksperimenti za tri različita protoka, svaki eksperiment je ponovljen tri puta (nakon čega se računa srednja vrijednost), također svi eksperimenti su provedeni s tri volumena trasera, 1 mL, 0,75 mL i 0,35 mL.

#### 3.1 APARATURA I POSTUPAK MJERENJA



**Slika 3.1** Shematski prikaz eksperimentalne aparature

Legenda:

- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1-rotametar                    | 6-pipac za ispust vode iz sustava |
| 2a,2b,2c- mjesta unosa trasera | 7-konduktometrijska ćelija        |
| 3-spiralna cijev               | 8-konduktometar                   |
| 4-cijev sa staklenim kuglicama | 9-prijenosno računalo             |
| 5-ravna prazna cijev           |                                   |



Osnovni dio aparature čine tri cijevi, odnosno tri cijevna reaktora kroz koje struji voda. Eksperimentalna mjerenja provode se za svaku cijev tri puta koristeći tri različita volumena pri tri različita protoka. U ovom slučaju kao traser koristile su se vodene otopine KCl-a volumena 1mL, 0,75mL i 0,35mL. Injekcijom se traser određene koncentracije i volumena injektira u što kraćem vremenskom periodu u cijev pri čemu se istodobno pokreće program na računalu NI SignalExpress. Konduktometrijska ćelija svake sekunde mjeri vodljivost koja se znatno mijenja dolaskom traser na vrh cijevi. Konduktometar izlazni signal vodi na računalo koji ga pretvara u naponski signal i prikazuje RVZ krivulju u programu NI SignalExpress. Praćenjem konduktivnosti vode, koja najčešće iznosi između 0,55 i 0,65 mS, može se uočiti da li je sav traser izašao iz sustava. Nakon što vodljivost dosegne željenu vrijednost, obustavlja se mjerenje. Tako prikupljeni mjerni podaci obrađuju se u Microsoft Excel programu. Provedbom eksperimenta sa obojenim traserom, čiji se prolaz kroz sustav može vizualno pratiti, uočavaju se razlike strujanja u pojedinim cijevima što je dokaz različitog stupnja miješanja.



**Slika 3.2** Provedba eksperimenta obojenim traserom u a) ravnoj cijevi, b) cijevi sa staklenim kuglicama, c) spiralnoj cijevi

### 3.2 EKSPERIMENTALNE METODE ODREĐIVANJA RVZ FUNKCIJA

Sve eksperimentalne metode omogućavaju određivanje raspodjele vremena zadržavanja čestica u elementarnom, diferencijalnom volumenu u reaktoru. Podrazumijeva se da je broj čestica statistički mjerodavan za čitav sustav i da na ulazu u reaktor ne postoji raspodjela molekula po vremenu. Pri određivanju RVZ funkcije u diferencijalnom volumenu nužno je dodavanje određene količine trasea kako bi se promatrani diferencijalni volumen razlikovao od ostatka reakcijske smjese. Određena količina trasea prema tome predstavlja diferencijalni volumen te se mjerenjem raspodjele količine trasea na izlazu iz reaktora može odrediti  $E_z$  funkcija za strujanje reakcijske smjese u cjelini. Prisutnost trasea od ulaza do izlaza iz reaktorskog prostora očitava se promjenom koncentracije.

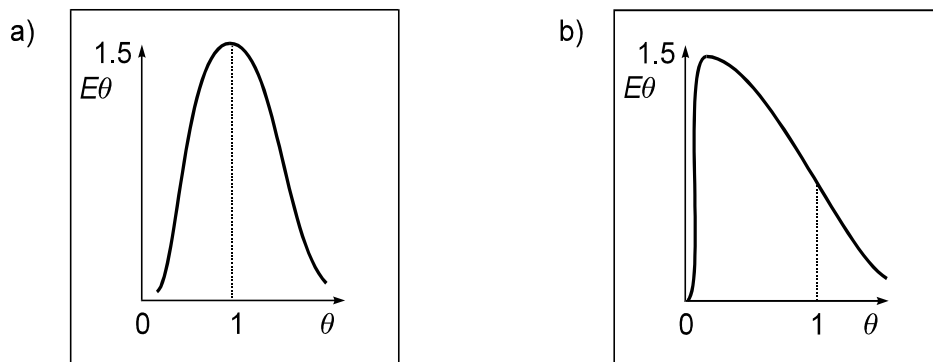
Prilikom odabira trasea važno je da on ne mijenja hidrodinamička svojstva ispitivanog fluida, da kemijski ne reagira s njim, te da se može precizno i lako odrediti njegova koncentracija na izlazu.

Za analizu strujanja koristi se impulsni poremećaj i poremećaj u obliku skokomične ili step funkcije. Impulsni poremećaj aproksimira se Diracovom funkcijom, što znači da je u što kraćem vremenu potrebno unijeti traser u sustav. Analizom odziva, što ga uzrokuje poremećaj nastao dodavanjem trasea u sustav, moguće je eksperimentalno odrediti  $E_z$  ili RVZ funkciju<sup>5,8</sup>. Za tu je analizu potrebno:

- poznavati funkciju poremećaja, odnosno zavisnost količine trasea o vremenu tijekom unošenja u sustav
- pogodnom eksperimentalnom metodom utvrditi zavisnost količine trasea o vremenu na izlazu iz reaktora, tj. dobiti funkciju odziva
- pretpostaviti model strujanja fluida kroz reaktor i provjeriti ga s eksperimentalno dobivenom  $E_z$  krivuljom, odnosno odzivom
- na osnovi usporedbe zaključiti o primjeni modela i mogućem odstupanju stvarnog strujanja kroz reaktor od idealnih graničnih oblika

Kako bi se ta analiza mogla provesti potrebno je poznavati krivulje odziva za poznate funkcije poremećaja i pretpostavljene modele strujanja, posebno za granične oblike idealnog strujanja i idealnog miješanja. Taj se poremećaj eksperimentalno aproksimira unošenjem određene količine trasea na ulaz ispitivanog sustava u što kraćem vremenu. Budući da je RVZ funkcija u reaktoru definirana upravo raspodjelom tvari u diferencijalnom volumenu po vremenu na izlazu, to će se impulsnim poremećajem upravo aproksimirati ta predodžba. Prema tome, odziv na impulsni poremećaj bit' će upravo RVZ krivulja ili  $Ez$  funkcija ispitivanog sustava. Zato se impulsni poremećaj vrlo često koristi za hidrodinamičku analizu.

Odziv na impulsni poremećaj uz slučaj idealnog strujanja identičan je samom poremećaju. U realnim sustavima, uz mala odstupanja od idealnog strujanja, odziv se obično transformira u funkciju oblika kao na slici 3.3 a). Ako su odstupanja od strujanja uz idealno miješanje malena, odziv se u realnim sustavima transformira u oblik prikazan na slici 3.3 b).



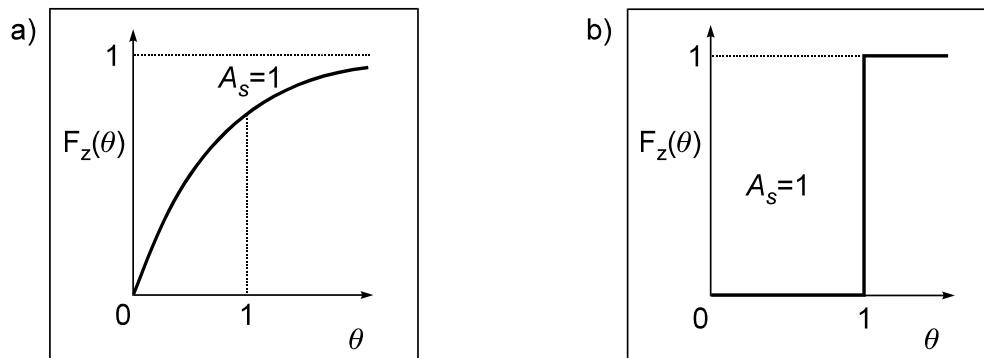
**Slika 3.3.** a) Odziv na impulsni poremećaj za strujanje koje malo odstupa od idealnog i b) odziv za slučaj kada strujanje malo razlikuje od strujanja uz idealno miješanje

Osim impulsnog poremećaja često se za analizu strujanja koristi i poremećaj u obliku skokomične ili step funkcije. Skokomična ili step funkcija eksperimentalno se dobiva uvođenjem konstantne količine trasea koji uzrokuje promjenu koncentracije na izlazu do stacionarnog stanja a prati se od nultog vremena, slika 3.4. Tako nastala odzivna krivulja naziva se  $Fz$  funkcija. Eksperimentalne vrijednosti  $Ez$  funkcije dobivaju se obično kao diskretni iznosi količina ili koncentracija trasea u zavisnosti o vremenu.

Skokomičnu ili step funkciju definirana izraz<sup>11</sup>:

$$F(t) = 0 \quad t < 0 \quad (3.1)$$

$$F(t) = 1 \quad t > 0 \quad (3.2)$$



**Slika 3.4** Funkcija odziva  $F_z$  na skokomičan poremećaj u a) sustavu s idealnim miješanjem i b) sustavu s idealnim strujanjem

#### ODREĐIVANJE VOLUMNOG PROTOKA

Za preciznu provedbu eksperimenta potrebno je provesti i baždarenje rotametra. Baždarenje se provodi počevši s najmanjom oznakom protoka na rotametri prema većim. Nakon odabrane vrijednosti protoka, pusti se vodovodna voda kroz sustav te se otvori jedna cijev i ventil za ispušt, dok su preostale dvije zatvorene. U vremenu od jedne minute menzurom se mjeri volumen vode koja je prošla kroz sustav. Mjerenje se provodi tri puta kako bi se izračunala srednja vrijednost. Zatim se ponovi isto sa otvorenom drugom cijevi, te sa trećom. Nakon toga na rotametri se odabere slijedeća vrijednost protoka te se postupak ponavlja. Izmjerene vrijednosti prikazane su Tablica 3.1.

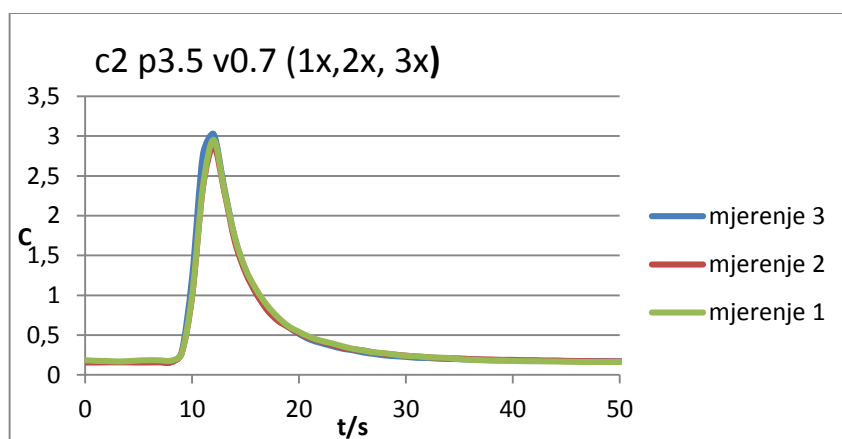
**Tablica 3.1** Izmjerene vrijednosti i srednja vrijednost volumnog protoka ( $v_0$ )

oznaka na rotametri	mjerenje 1 mL/min	mjerenje 2 mL/min	mjerenje 3 mL/min	srednji protok mL/min
2,0	121	113	118	117
3,0	186	178	176	180
3,5	213	211	215	213
4,0	246	228	236	237
5,0	295	275	270	280

### 3.3 PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA

Nadalje prikazane eksperimentalne RVZ krivulje (C-krivulje) prikazuju odziv na impulsni poremećaj. One omogućavaju pregled vremenskog perioda u kojem se traser zadržavao u sustavu kao i njegovu koncentraciju. Koncentracija traseru proporcionalna je vodljivosti izmjerene pomoću konduktometra.

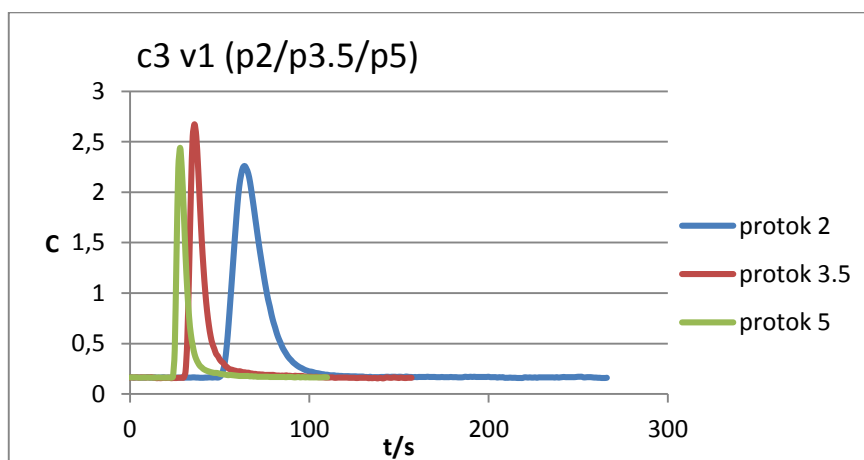
- a) Usporedba RVZ krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta tri puta pri istim uvjetima



**Slika 3.5** Provedba eksperimenta tri puta pri istim protocima

Prethodna slika prikazuje tri krivulje dobivene ponavljanjem u istoj cijevi pri istom protoku, volumenu traseru i koncentraciji. Uočava se postojanje veoma malih odstupanja između dobivenih krivulja koja možemo pripisati greškama prilikom izvođenja mjerenja.

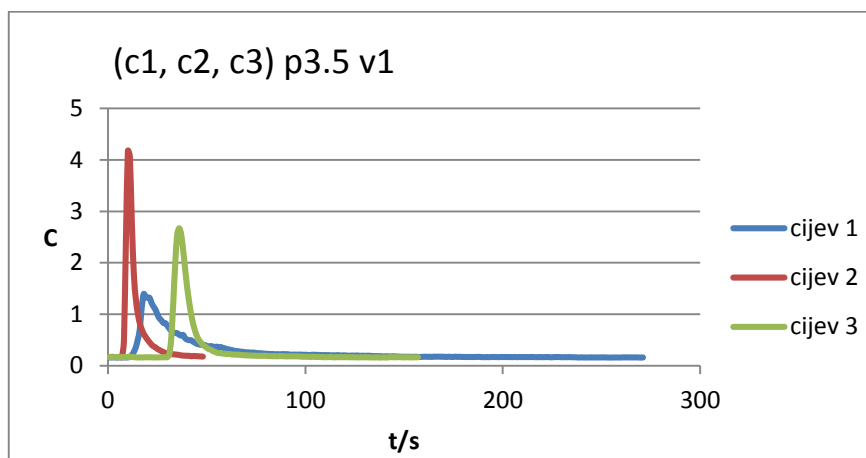
- b) Usporedba RVZ krivulja dobivenih povećavanjem protoka u istoj cijevi



**Slika 3.6** Promjena protoka u cijevi

Slika 3.6 prikazuje usporedbu krivulja dobivenih u istoj cijevi povećavanjem protoka. Trebali bismo uočiti da je pri najvećem protoku (protok 5) vodljivost najveća, dok pri najmanjem protoku (protok 2) najmanja, no zbog nedefiniranih pogrešaka prikazani rezultati nisu najuvjerljiviji. Razlika u rezultatima bi trebala biti uvjetovana sporijem strujanju trasera pri manjem protoku.

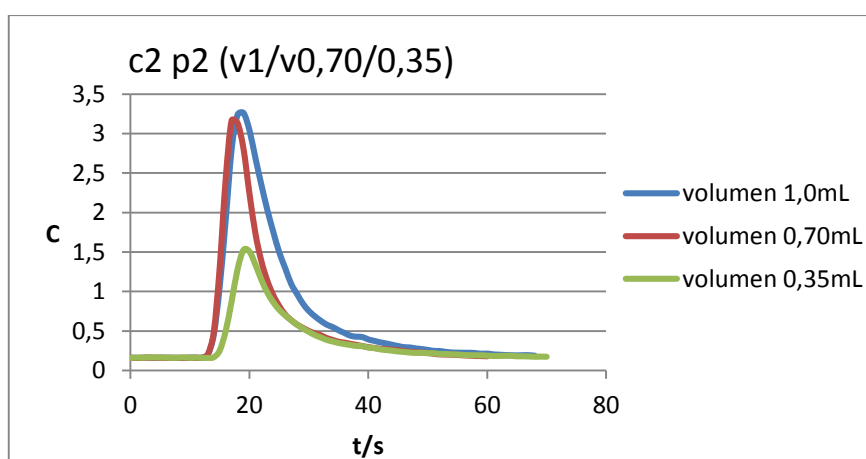
c) Usporedba RVZ krivulja dobivenih za različite cijevi uz konstantan protok



Slika 3.7 Različite cijevi uz konstantan protok

Usporedbom sve tri cijevi koristeći istu koncentraciju, volumen trasera i protok, iz slike 3.7. vidljivo je da je kod prve cijevi najmanja vodljivost, dok je kod druge najveća.

d) Usporedba RVZ krivulja dobivenih za različite volumene, cijev ostaje ista, protok konstantan



Slika 3.8 Promjena volumena trasera (KCL)

Slika 3.8 prikazuje krivulje dobivene na temelju različitih volumena trasera. Vidimo da se vodljivost povećava povećanjem volumena trasera.

## 4 REZULTATI I RASPRAVA

Prije računске obrade svake pojedine eksperimentalne RVZ krivulje potrebno je svesti sve vrijednosti koncentracija traseri na os apscisu kako bi prilikom računanja površine ispod krivulje  $C_i = f(\Delta t)$  bila prava vrijednost. U nastavku se prikazuju izračunate vrijednosti za srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$  i disperzijski broj  $DB$  kao i usporedan prikaz bezdimenzijski RVZ krivulja ( $E_z(\theta) = f(\theta)$ ).

### 4.1 OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

Eksperimentalno dobiveni rezultati koncentracije traseri  $c_i$  vremenskog intervala  $\Delta t$  (1s) potrebni su za daljnji izračun koji se odvija u sljedećim koracima<sup>7,8</sup>.

a) iz eksperimentalno dobivenih vrijednosti koncentracije traseri određuje se najmanja vrijednost  $\rightarrow C_{imin}$

b) provodi se normalizacija koncentracija prema izrazu:

$$C_{inorm} = C_i - C_{imin} \quad (4.1)$$

c) zatim se određuje približna površina  $Q$  ispod krivulje:

$$Q = \sum_{i=1}^n C_{inorm} \Delta t_i \quad (4.2)$$

d) srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$  jednako je

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{inorm} t_i}{\sum_{i=1}^n C_{inorm}} \quad (4.3)$$

e) bezdimenzijsko vrijeme  $\theta$

$$\theta = \frac{t_i}{\bar{t}} \quad (4.4)$$

f) varijancu  $\sigma^2$ , eksperimentalno određene krivulje

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 C_{inorm}}{\sum_{i=1}^n C_i} - \bar{t}^2 \quad (4.5)$$

g) bezdimenzijsku varijancu,  $\sigma_\theta^2$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} \quad (4.6)$$

h) disperzijski broj,  $DB_1$

$$DB_1 = \frac{\sigma_\theta^2}{2} \quad (4.7)$$

i)  $E_z$  funkcija definirana je bezdimenzijskim vremenom  $\theta$  te glasi

$$E_z(\theta) = \bar{t}E_z(t) \quad (4.8)$$

j) uzimajući u obzir jednadžbu (2.40) može se izračunati  $DB_2$ , koja je nakon sređivanja jednaka

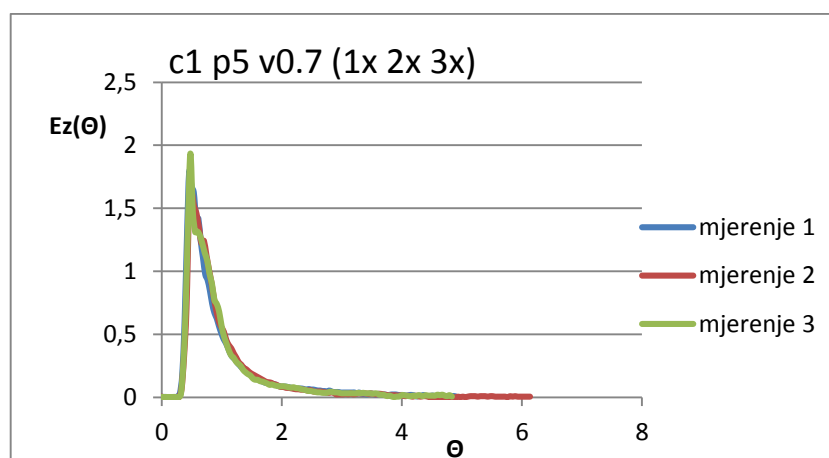
$$DB_2 = -\frac{1}{8} \pm \frac{\sqrt{4 + 32 * 2\sigma_\theta^2}}{16} \quad (4.9)$$

## 4.2 PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA

Uobičajeno je za interpretaciju RVZ krivulja prikazivati ih u bezdimenzijskom obliku kao  $E_z(\theta) = f(\theta)$

$$E_z(\theta) = \frac{\bar{t}c_{inorm}(t)}{Q} \quad (4.10)$$

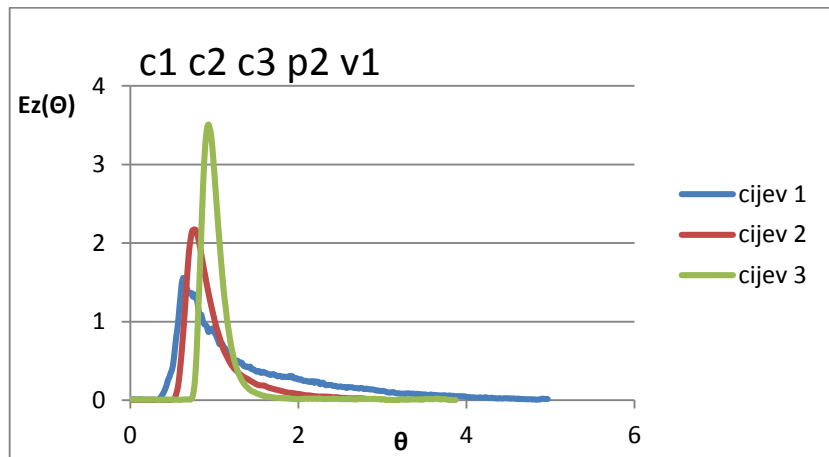
Na slici 4.1 prikazana je raspodjela vremena zadržavanja pri kratkoj cijevi i protoku 5, ali s tri uzastopna ponavljanja mjerenja. Uočavamo kako su krivulje više manje jednake, mala odstupanja su rezultat odstupanja u pojedinim segmentima izvođenja eksperimenta.



**Slika 4.1** Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcije dobivene za tri različita mjerenja u istoj cijevi pri istom protoku.

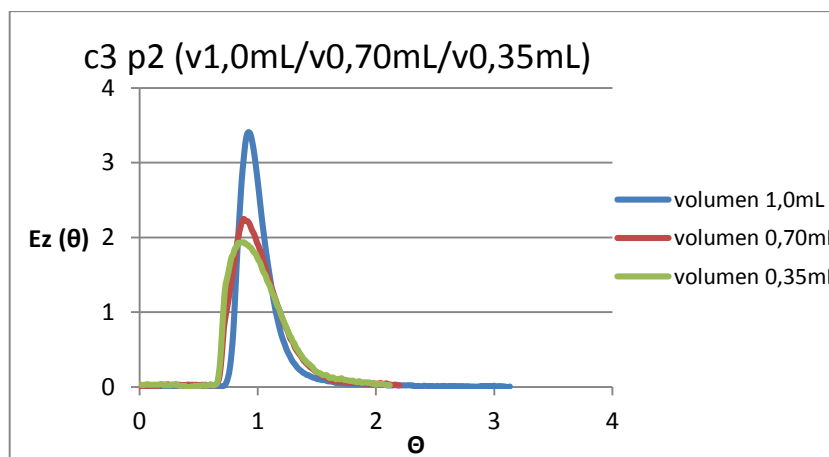


Slika 4.2 prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja u različitim cijevima, ali pri istom protoku i volumenu trasera. Za spiralnu cijev najidealnija je dobivena krivulja, što možemo pripisati njezinoj najvećoj duljini i najmanjem promjeru što pogoduje idealnom strujanju. U cijevi napunjenoj staklenim kuglicama idealniji je odziv zbog manjeg slobodnog volumena za strujanje trasera. Najnepovoljniji rezultat prikazuje krivulja dobivena u ravnoj praznoj cijevi, što se i vizualno može primijetiti.



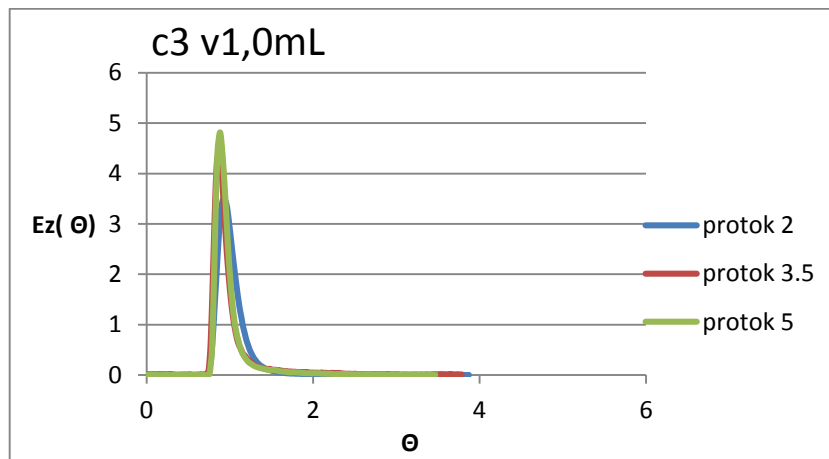
**Slika 4.2** Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcije dobivene za tri različite cijevi

Slika 4.3 prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja dobivenu pri različitim volumenima trasera, ali u istoj cijevi i istom protoku. Dobiveni rezultati bi trebali pokazivati da manji volumen pogoduje približavanju idealnom impulsnom poremećaju.

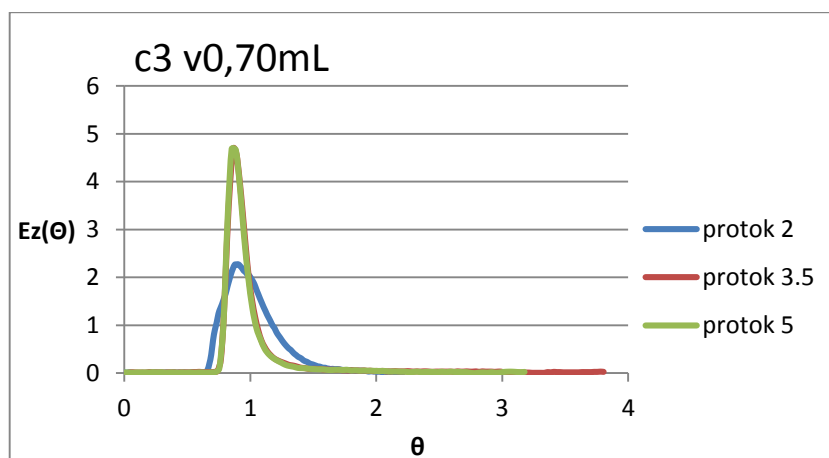


**Slika 4.3** Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcije dobivene pri različitim volumenima trasera

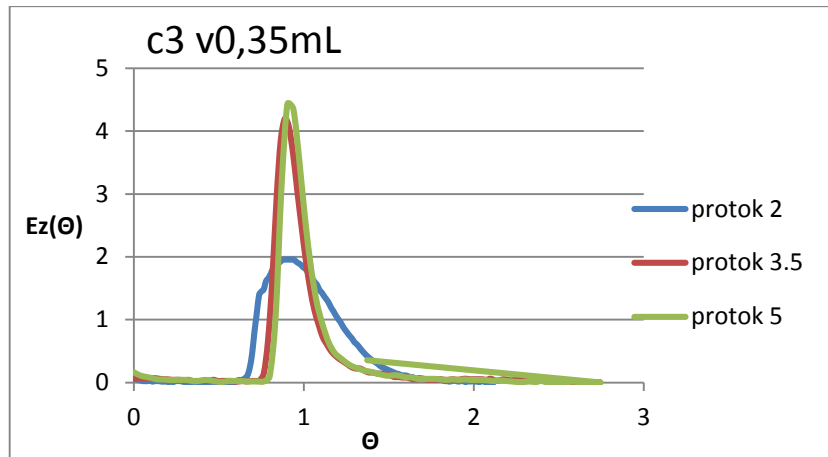
Na sljedeće tri slike prikazane su krivulje raspodjele vremena zadržavanja u istoj cijevi i koristeći isti volumen trasera, ali pri različitim protocima. Najveći protok označava zelena krivulja, dok je najmanji protok označen plavom krivuljom. Možemo uočiti da je strujanje idealnije pri većem protoku, što se vidi i po „najidealnijem“ obliku krivulje, dok smanjenje protoka rezultira i lošijem odzivu. Razlika između najmanjeg i preostala dva protoka je uočljiva, što pripisujemo boljem strujanju pri većim protocima. Također usporedbom slika vidljivo je da poželjnije rezultate dobivamo koristeći manji volumen trasera. Razlog tomu je lakše i brže injektiranje trasera čime se približavamo idealnom impulsnom poremećaju.



**Slika 4.4** . Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcije dobivene za volumen trasera 1 mL povećavanjem protoka



**Slika 4.5** . Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcije dobivene za volumen trasera 0,7mL povećavanjem protoka



**Slika 4.6** Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcije dobivene za volumen traseru 0,35mL povećavanjem protoka

#### 4.3 PROCIJENJENE VRIJEDNOSTI PARAMETARA MODELA

##### 1. Cijev (prazna cijev):

##### a) Rezultati za volumen traseru 1,0 mL

**Tablica 4.1** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	56,7	0,210	0,136
3,5	213	42,9	0,149	0,104
5	280	25,6	0,066	0,054

##### b) Rezultati za volumen traseru 0,70 mL

**Tablica 4.2** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	57,9	0,255	0,157
3,5	213	35,4	0,175	0,119
5	280	25,1	0,076	0,061

c) Rezultati za volumen traseru 0,35 mL

**Tablica 4.3** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	53,5	0,265	0,161
3,5	213	34,0	0,191	0,127
5	280	25,0	0,083	0,065

2. Cijev (cijev sa staklenim kuglicama):

a) Rezultati za volumen traseru 1,0 mL

**Tablica 4.4** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	24,5	0,138	0,099
3,5	213	14,5	0,103	0,079
5	280	13,8	0,065	0,053

b) Rezultati za volumen traseru 0,70 mL

**Tablica 4.5** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	23,4	0,120	0,088
3,5	213	15,5	0,084	0,066
5	280	13,8	0,068	0,055

c) Rezultati za volumen traseru 0,35 mL

**Tablica 4.6** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	25,1	0,133	0,096
3,5	213	15,0	0,096	0,074
5	280	13,3	0,071	0,058

### 3. Cijev (spiralna):

#### a) Rezultati za volumen trasera 1,0 mL

**Tablica 4.7** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	68,9	0,047	0,040
3,5	213	40,1	0,045	0,039
5	280	31,2	0,013	0,013

#### b) Rezultati za volumen trasera 0,70 mL

**Tablica 4.8** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	70,4	0,049	0,042
3,5	213	40,3	0,043	0,037
5	280	30,1	0,020	0,019

#### c) Rezultati za volumen trasera 0,35 mL

**Tablica 4.9** Izračunate vrijednosti disperzijskog broja DB

rotametar	protok (mL/min)	$t_{SR}(s)$	DB1	DB2
2	117	73,0	0,057	0,048
3,5	213	41,6	0,036	0,032
5	280	30,5	0,024	0,022

Iz prikazanih rezultata uočava se da je srednje vrijeme zadržavanja najmanje kod cijevi napunjene staklenim kuglicama što je i logično jer ona ima najmanji slobodni volumen od ispitivane tri cijevi (volumenom kuglica smanjen je volumen protjecanja fluida). Pri određivanju vrijednosti disperzijskog broja uočavamo da bitnu ulogu ima vrsta cijevi u kojoj je proveden eksperiment. Vidljivo je da je disperzijski broj pretežno najveći u praznoj cijevi, a najmanji u spiralnoj dugoj cijevi. Veoma nizak disperzijski broj u spiralnoj cijevi ukazuje na najmanje odstupanje od idealnog strujanja.

## 5 ZAKLJUČAK

Modelom aksijalne disperzije provedeni su eksperimenti u tri različite cijevi, pri tri različita protoka i tri volumena, čime je određeno srednje vrijeme zadržavanja i disperzijski broj (DB). Eksperiment se svodi na impulsni poremećaj unošenjem traseru u cijevne reaktore.

Krivulje raspodjele vremena zadržavanja se odnose na tri cijevi različitih karakteristika. Dobivene vrijednosti srednjeg vremena zadržavanja pokazuju kako je najduže vrijeme zadržavanja traseru u praznoj ravnoj cijevi, a najkraće u cijevi ispunjenoj staklenim kuglicama, jer prisutnost kuglica predstavlja nepokretni sloj što uzrokuje izravnavanje profila brzina po presjeku cijevi, a samim time i manju disperziju, te je srednje vrijeme zadržavanja manje nego u ostalim dvjema cijevima. Vrijednost disperzijskog broja (DB) za ravnu cijev pokazuje najviše vrijednosti, a najmanja je u dugoj spiralnoj cijevi. U usporedbi s praznom cijevi, u cijevi napunjenoj staklenim kuglicama volumen je manji, a time i disperzijski broj što ukazuje da prazna cijev svakako pokazuje najveća odstupanja od idealnog strujanja.

Najbolje rezultate od svih pokazuje upravo duga spiralna cijev, jer je disperzija traseru u njoj znatno manja nego u preostale dvije čemu pogoduje njena tri put veća dužina i manji promjer. To je vidljivo i u tablicama iz disperzijskog broja koji je najmanji u usporedbi s ostalim cijevima, što ujedno upućuje i na najmanje odstupanje od idealnog strujanja.

## LITERATURA

1. Gomzi, Z., *Kemijski reaktori*, Hinus, Zagreb, 1998. (281-321)
2. Fogler S. H., *Elementsof Chemical ReactionEngineering*, Ptentice-Hall, EnglewoodCliffs, New Jersey, 1986.
3. Levenspiel O., *Chemical Reaction Engineering*, 2nd ed. J. Wiley, New Tork, 1972.
4. Nauman, E. B., Buffham, B. A., *Mixingin Continous Flow Systems*, J. Wiley, New York, 1983.
5. Wen C. Y. and Fan L. T., *Models for Flow Systems and Chemical Reactors*, Marcel Dekker, New York, 1975.
6. Danckwerts P. V., *Gas-Liquid Reactions*, McGraw-Hill, New York, 1970.
7. Danckwerts P. V., *Chem. Eng. Sci.*, 2 (1953.) 78-94
8. Danckwerts P. V., *A. I. Ch. E. J.*, 1, 4 (1955.) 56-62
9. Gomzi, Z., Vasič-Rački, Đ., Zrinčević, S., Matijašević, Lj., Priručnik za vježbe iz „Reakcijskog inženjerstva“, Zagreb, 1978.
10. Magistarski rad, Elke Kotur, *Strujanje i miješanje kapljevite i plinske faze u koloni s punilom*, Zagreb, 1988.
11. Himmelblau, D. M., *Process Analysisby Statistical Methods*, J. Wiley, New York, 1970

## POPIS OZNAKA

- $C$  - koncentracija, mol dm<sup>-3</sup>  
 $C_A$  - koncentracija tvari A, mol dm<sup>-3</sup>  
 $D$  - parametar u gama modelu strujanja  
 $D_e$  - prosječna (efektivna) difuznost u osnom smjeru, m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>  
 $DB$  - značajka disperzije = 1/Pe  
 $d_g$  - parametar u gama modelu strujanja  
 $E_z$  - funkcija vremena zadržavanja, razne jedinice  
 $E_\theta$  - funkcija vremena zadržavanja u bezdimenzijskom obliku  
 $F_A$  - molni protok tvari A, mol s<sup>-1</sup>  
 $F$  - ukupni molni protok, mol s<sup>-1</sup>  
 $L$  - duljina reaktora, m  
 $N$  - broj eksperimenata  
 $n$  - red reakcije  
 $\rho$  - parametar u gama modelu  
 $Pe$  - Pecletova značajka  
 $Re$  - Reynoldsova značajka  
 $r$  - udaljenost u smjeru polumjera, m  
 $r_A$  - brzina reakcije s obzirom na tvar A, mol m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>  
 $t$  - vrijeme, s  
 $\bar{t}$  - srednje vrijeme zadržavanja, s  
 $u$  - linearna brzina, m s<sup>-1</sup>  
 $u_s$  - srednja linearna brzina, m s<sup>-1</sup>  
 $V$  - volumen, m<sup>3</sup>  
 $v$  - volumna brzina, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>  
 $v_0$  - brzina na početku reakcije  
 $z$  - prostorna koordinata u smjeru osi, m  
 $X_A$  - konverzija reaktanta A  
 $x$  - prostorna koordinata, m  
 $\delta(t)$  - delta (Diracova funkcija)  
 $\Gamma(\rho)$  - gama funkcija  
 $\eta$  - dinamička viskoznost  
 $\theta$  - bezdimenzijsko vrijeme  
 $\rho$  - gustoća, kg m<sup>-3</sup>  
 $\sigma^2$  - varijanca  
 $\sigma_\theta^2$  - varijanca u bezdimenzijskom obliku  
 $\tau$  - prostorno vrijeme, s



# ŽIVOTOPIS

## Osobni podaci:

Ana Reiter

Bektež 44, 34343 Bektež

Telefon: 034/224-093

Mobitel: 098/9019185

E-mail: ana.reiter11@gmail.com

Datum rođenja: 11.08.1992.

Mjesto rođenja: Požega

## Obrazovanje:

2011.-2015. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb

2007.-2011. Prirodoslovno-matematička gimnazija Požega, Požega

1999.-2007. Osnovna škola Zdenka Turkovića, Kutjevo

## Osobne vještine i sposobnosti:

Strani jezici: Engleski jezik (aktivno), Njemački jezik (osnovno)

Računalne vještine: Microsoft Office paket, Matlab, Scientist

Socijalne vještine: komunikativnost, odgovornost, timski rad

## Ostale vještine i sposobnosti:

2010. vozačka dozvola „B“ kategorije, babysitting, odbojka, crossfit

## Stručna praksa: Sanitacija d.o.o.

(jedna od vodećih tvrtki u RH za dezinfekciju, dezinsekciju, i deratizaciju).