

# Raspodjela vremena zadržavanja

---

Lacko, Ivona

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:149:026355>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivona Lacko

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivona Lacko

RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA

ZAVRŠNIRAD

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

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

prof. dr. sc. Vesna Tomašić

prof. dr. sc. Gordana Matijašić

Zagreb, rujan 2018.

## SAŽETAK

U ovom radu istraživala se raspodjela vremena zadržavanja u tri različite cijevi, ravnoj cijevi, cijevi sa staklenim kuglicama te spiralnoj cijevi koje opisuju hidrodinamiku strujanja u različitim tipovima cijevnih reaktora. Raspodjelu vremena zadržavanja je potrebno odrediti kako bi se na osnovu nje moglo utvrditi odstupanje promatranog sustava od idealnog strujanja. Eksperimentalni podaci dobiveni su unošenjem traseru koji predstavlja impulsni poremećaj u sustav te mjerenjem odziva na impulsni poremećaj. Iz eksperimentalnih podataka dobivene su RVZ krivulje. Obradom eksperimentalnih podataka dobivene su različite vrijednosti vremena zadržavanja i disperzijskog broja u trima cijevima.

**Ključne riječi:** raspodjela vremena zadržavanja (RVZ), cijevni reaktor, idealno strujanje, traser

## **ABSTRACT**

In this experimental work, the distribution of time retention was investigated in three different tubes, flat tube, glass beads tube and spiral tube describing hydrodynamics of flow in various types of tubular reactors. The allocation of the retention time has to be determined in order to determine the deviation of the observed system from the ideal flow. Experimental data were obtained by introducing a tracer, which represents a impulse signal in the system, and by measuring the response to the impulse signal. From experimental data the RVZ curves were obtained. By processing experimental data, different values of retention time and dispersion time were obtained in three tubes.

**Key words:** residence time distribution (RTD), tubular reactor, plug flow, tracer

## SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. CIJEVNI REAKTOR.....	2
2.2. RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA.....	6
2.3. MODELI STRUJANJA .....	10
2.3.1. MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE .....	10
2.3.2. MODEL LAMINARNOG STRUJANJA .....	15
2.3.3. MODEL ČELIJA VEZANIH SLIJEDNO ILI PKR MODEL.....	17
2.3.4. GAMA MODEL .....	18
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	20
3.1. PRINCIP METODE ODREĐIVANJA RVZ KRIVULJA.....	21
3.2. SHEMA APARATURE I IZVEDBA MJERENJA.....	24
3.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA.....	26
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	31
4.1. OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA.....	31
4.2. TABLIČNI PRIKAZ PARAMETARA MODELA.....	33
4.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA.....	35
5. ZAKLJUČAK .....	40
LITERATURA .....	41
POPIS OZNAKA .....	42
ŽIVOTOPIS.....	43

## 1. UVOD

Kemijski reaktor polazna je osnova u dimenzioniranju i projektiranju određenog kemijskog procesa te na neki način predstavlja „srce“ svakog tehnološkog procesa. Raznolikost uvjeta kemijske reakcije i svojstava reakcijskih komponenata uvjetuje i raznolikost tipova kemijskih reaktora. [1]

U realnim kemijsko inženjerskim procesima vladanje reaktora često je vrlo različito od onoga koje je definirano za idealne reaktore (idealno miješanje kotlastog i protočnokotlastog reaktora, odnosno idealno strujanje (eng. "plug flow") u cijevnim reaktorima). [2]

Općenito, tri osnovne ideje ili koncepta koji se koriste za karakterizaciju i modeliranje neidealnih reaktora su: raspodjela vremena zadržavanja u sustavu, učinkovitost miješanja i model strujanja koji se koristi za opis sustava. [3]

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je odrediti raspodjelu vremena zadržavanja u tri različita cijevna reaktora. Budući da u mnogim slučajevima, na temelju fizičke slike, nije moguće predvidjeti ili opisati hidrodinamičko ponašanje fluida koji protječe kroz reaktor, potrebno je eksperimentom potvrditi ili odbaciti model strujanja kojim se može kvalitativno i kvantitativno opisati odstupanje od graničnih načina strujanja, idealnog strujanja, odnosno idealnog miješanja. Gotovo niti jedan reaktor u industriji neće imati karakteristike ova dva granična načina strujanja pa je zbog izvedbe ovih reaktora vrlo važno poznavati utjecaje neidealnog strujanja, odnosno miješanja. Veliki dio informacija o strujanju u reaktoru može se dobiti iz funkcije raspodjele vremena zadržavanja koju je moguće eksperimentalno odrediti. U ovom radu eksperimenti su provedeni u modelnim cijevima bez odvijanja kemijske reakcije što znači da na hidrodinamičko ponašanje fluida koji protječe cijevima utječe samo geometrija cijevi odnosno brzina strujanja fluida.

## 2. TEORIJSKI DIO

U najširem značenju pojam kemijskog reaktora ukazuje na mjesto ili prostor u kome se odigrava neka kemijska reakcija. Takav ograničeni dio prostora općenito se naziva procesnim prostorom. Sa stajališta kemijskog inženjerstva kao tehničke znanosti, kemijski reaktor je procesni aparat u kome se svrhovito odigrava i vodi kemijska reakcija u cilju dobivanja određenog korisnog produkta. [1]

Osnovni tipovi kemijskih reaktora su kotlasti, cijevni i protočno kotlasti reaktor. U ovome radu proučavaju se značajke cijevnih reaktora.

### 2.1. CIJEVNI REAKTOR

Cijevni reaktori su kemijski reaktori izvedeni u obliku cijevi. Zbog svoje jednostavne izvedbe, bez dodatnih uređaja, pogodni su za proizvodnju s velikim kapacitetom pa se većinom koriste u anorganskoj, petrokemijskoj i drugim industrijama organske sinteze. Cijevni reaktor u industrijskoj primjeni obično radi u stacionarnom stanju, a njegov rad se prekida samo prilikom godišnjeg pregleda ili izmjene katalizatora. Stalnost njihovog rada omogućuje dobivanje velikih količina ujednačenog proizvoda. Danas se u njima proizvode najvažnije kemikalije i proizvodi o kojima ovisi gospodarstvo svake zemlje. Pogodni su za smještaj krutog katalizatora (jer nema miješanja) pa su katalitički cijevni reaktori s nepokretnim slojem katalizatora najvažniji tipovi kemijskih reaktora za provedbu mnogih važnih industrijskih procesa kao što su sinteza amonijaka, sumporne i dušične kiseline, oksidacija benzena i naftalena, okso sinteza, sinteza metanola itd. [1]

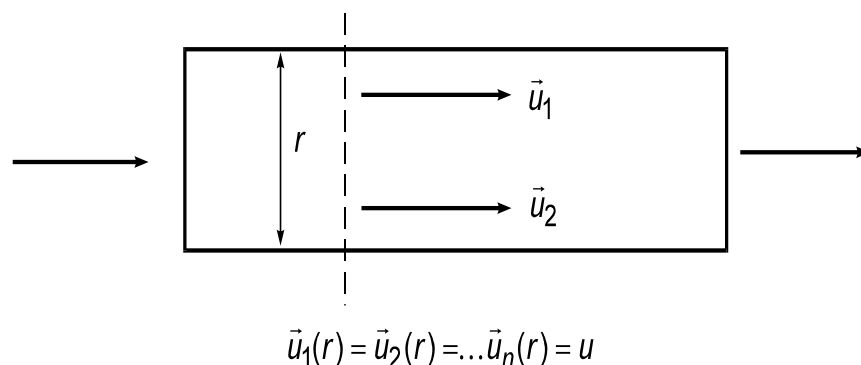
Osnovne značajke cijevnih reaktora su:

- zavisnost parametara o prostornim koordinatama unutar reaktorskog prostora; ova značajka je neposredna posljedica približno idealnog strujanja reakcijske smjese kroz reaktor,
- prisutnost jedne ili više faza; posebnu i važnu grupu cijevnih reaktora čine reaktori s nepokretnim slojem krutog katalizatora,
- stacionarnost rada; nestacionarni rad cijevnih reaktora važan je samo za početak, odnosno kraj rada te za probleme vezane uz vođenje i kontrolu.



Po svojoj izvedbi cijevni reaktor je otvoreni sustav. Njegova važna karakteristika je približno idealno strujanje što znači da u pravcu protjecanja (aksijalnom smjeru) ne postoji miješanje unutar prolazeće reakcijske smjese. Takav reaktor je moguće predočiti nizom elementarnih volumena koji posjeduju svojstva kotlastog reaktora, a koji prolaze kroz reaktor ne izmjenjujući međusobno reakcijsku masu. [1]

Drugim riječima, reakcijska smjesa prolazi kroz reaktor idealnim strujanjem u aksijalnom smjeru koje je, kao suprotnost idealnom miješanju, definirano idealnim nemiješanjem po dužini reaktora pri čemu vektori brzina strujanja imaju isti iznos i smjer kao što prikazuje slika 2.1.



Slika 2.1. Prikaz idealnog strujanja u cijevnom reaktoru

Idealno strujanje u realnim cijevnim reaktorima ne može nikad biti ostvareno, ali može vrlo malo odstupati. Za karakterizaciju cijevnih reaktora koriste se modeli cijevnih reaktora. Model reaktora čine matematički napisane bilance množine tvari (komponente) i topline. Model realnog reaktora ne treba biti pretjerano složen, već pouzdan i prikladan. Najznačajniji problem pri postavljanju matematičkog modela je problem izmjene topline koji također utječe na njegovu izvedbu i upotrebu. Matematički modeli cijevnih reaktora mogu biti jednostavni ili složeni što ovisi o složenosti procesa koji se u njemu odvija.

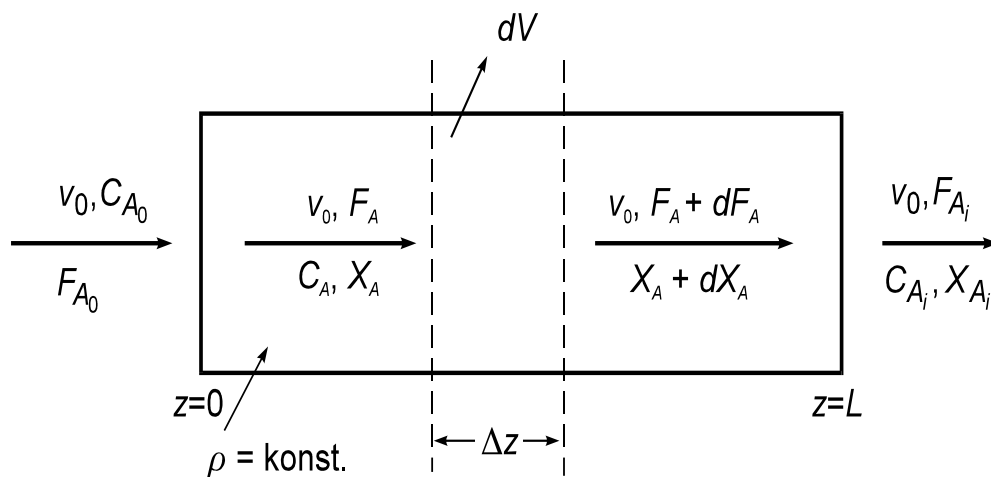
Matematički model idealnog cijevnog reaktora izvodi se uz sljedeće pretpostavke:

- reakcijska smjesa prolazi kroz reaktor idealnim strujanjem,
- reaktor se promatra u stacionarnom radu,
- reaktor je izotermni sustav, temperatura se ne mijenja s položajem unutar reaktora, a niti s vremenom,

- ne postoji promjena gustoće (volumena) reakcijske smjese za vrijeme prolaza kroz reaktor,
- kako se u cijevnom reaktoru duž osi z (aksijalnom smjeru) mijenjaju veličine stanja (npr. brzina reakcija, koncentracije), to se bilance moraju nužno postavljati za diferencijalni volumen.

Pretpostavljaju se idealizirana stanja i procesi u reaktoru koji se mogu lakše matematički formulirati.

Bilanca komponente A u idealnom cijevnom reaktoru definirana je kao razlika određene množine tvari A koja ulazi u diferencijalni volumen u jediničnom vremenu i množine tvari A koja izlazi iz diferencijalnog volumena u jediničnom vremenu, slika 2.2.



Slika 2.2. Model idealnog cijevnog reaktora

Postavljanjem bilance komponente A za diferencijalni volumen reaktora dobiva se:

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

Odnosno

$$dF_A + r_A dV = 0 \quad (2.2.)$$

Jednadžba (2.2.) je osnovna jednadžba bilance množine tvari (komponente) za idealni cijevni reaktor koju je moguće prevesti u druge oblike.

Uzevši u obzir da je

$$F_A = F_{A0} (1 - X_A) \quad (2.3.)$$

i

$$dF_A = -F_{A0} dX_A \quad (2.4.)$$

dobije se izraz (2.5).

$$\frac{dV}{F_{A0}} = \frac{dX_A}{r_A} \quad (2.5.)$$

Lijeva strana jednadžbe može se napisati kao

$$F_{A0} = C_{A0} v_0 \quad (2.6.)$$

i

$$dV = A_s dz \quad (2.7.)$$

Jednadžba (2.5.) može se integrirati na dva načina. Prvim načinom dobiva se uobičajena jednadžba koja prikazuje ovisnost promjene koncentracije komponente A po duljini reaktora (2.8.)

$$r_A = -u \frac{dC_A}{dz} \quad (2.8.)$$

Integriramo li na drugi način dobiva se jednadžba koja prikazuje ovisnost koncentracije komponente A o prostornom vremenu i ukazuje na sličnost modela kotlastog i cijevnog reaktora. (2.9.) [1] [6] [7]

$$r_A = -\frac{dC_A}{d\tau} \quad (2.9.)$$

Matematički modeli realnih reaktora mnogo su složenijih od modela idealnih cijevnih reaktora zbog uvijek prisutnih gradijenata koncentracije i temperature u aksijalnom, ali i radijalnom smjeru.

## 2.2. RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA

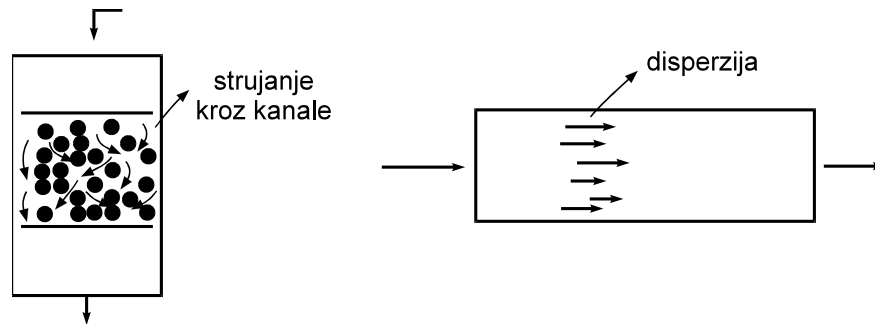
Raspodjela vremena zadržavanja reaktora je karakteristika strujanja medija u kemijskom reaktoru koja nam daje najviše informacija o obilježjima reaktora. [4 – 6,8]

Matematički modeli idealnih tipova reaktora, cijevnih i protočno kotlastih reaktora, opisuju strujanje reakcijske smjese kroz reaktor idealnim. Prolaz reakcijske smjese cijevnim reaktorom opisan je idealnim strujanjem gdje svaka molekula u gibanju ima brzinu istog iznosa i smjera. Prolaz reakcijske smjese kroz protočno kotlasti reaktor pojednostavljuje se idealnim miješanjem kojim se postiže momentalna homogenost što znači da molekule samim ulaskom u reaktor potpuno gube svoj identitet.

U realnim reaktorima prolaz reakcijske smjese često nije idealan. Poznavanje uzroka odstupanja od idealnog strujanja i miješanja posebno je važno za dimenzioniranje, odnosno uvećanje reaktora.

Uzroci odstupanja od idealnog strujanja su:

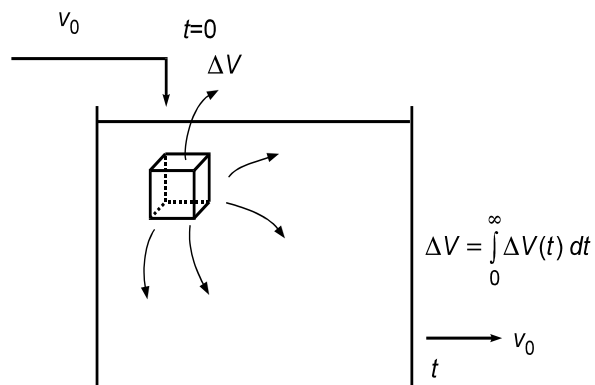
- laminarno strujanje za reakcije u homogenim sustavima,
- prijenos tvari difuzijom (disperzijom) u aksijalnom i radijalnom smjeru,
- promjene puta strujanja unutar reaktora s punilima ili krutim katalizatorima uslijed postojanja obilazaka, postranih tokova ili kraćenja.



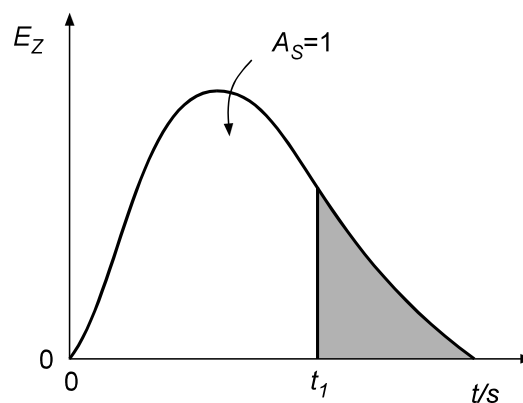
Slika 2.3. Uzroci odstupanja od idealnog strujanja u cijevnim reaktorima

Slika 2.3. prikazuje pojedine situacije do kojih može doći u realnim cijevnim reaktorima, a koje dovode do odstupanja od idealnog strujanja. Kada nije moguće predvidjeti ili opisati hidrodinamičko ponašanje fluida koji struji kroz reaktor, potrebno je eksperimentalno odrediti model strujanja kojim se može opisati odstupanje od graničnih načina strujanja. Zapravo, potrebno je odrediti raspodjelu vremena zadržavanja (RVZ).

Promatra se jedan element fluida na ulazu u reaktor, slika 2.4. RVZ funkcija izražava vjerojatnost s kojom će promatrani element fluida nakon nekog vremena izaći iz reaktora.



Slika 2.4. Raspodjela vremena zadržavanja u reaktoru



Slika 2.5. Funkcija raspodjele vremena zadržavanja, RVZ funkcija

Na slici 2.5. može se uočiti da je RVZ funkcija statistička raspodjela pa je ukupna vjerojatnost dana površinom ispod krivulje koja mora biti jednaka jedinici.

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

Za kvantitativno definiranje RVZ funkcije ( $E_z$  krivulje) koristi se odgovarajuća statistička obrada. Najčešće se koriste srednja vrijednost i varijanca koja opisuje rasipanje vremena zadržavanja oko srednjeg vremena. Vrijeme se zamjenjuje bezdimenzijskim vremenom dijeljenjem sa srednjim vremenom zadržavanja.

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

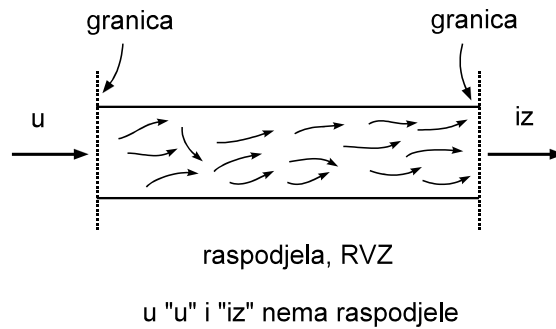
U sustavima sa stalnom gustoćom srednje vrijeme zadržavanja jednako je prostornom vremenu.

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

Dakle, vrijedi relacija između  $E_z$  funkcija definiranih tekućim, odnosno bezdimenzijskim vremenom.

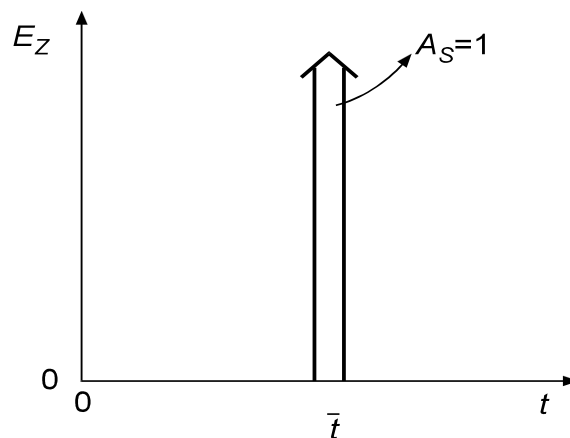
$$E_z(\theta) = \tau E_z(t) = \bar{t} E_z(t) \quad (2.13.)$$

Ovako definirana RVZ funkcija zahtijeva sustave sa zatvorenim granicama, slika 2.6., odnosno pretpostavlja se idealno strujanje što znači da na ulazu i izlazu iz reaktora fluid ne posjeduje raspodjelu vremena zadržavanja.



Slika 2.6. „Zatvoreni“ sustav i definiranje RVZ funkcije

Prema tome, u idealnom cijevnom reaktoru zapravo ne postoji raspodjela vremena zadržavanja, a RVZ funkcija je definirana tzv. Diracovom ili delta funkcijom. RVZ funkcija ima oblik kao na slici 2.7. Kako površina ispod  $E_z$  krivulje mora iznositi jedan, to znači da je ordinata beskonačno velika. Naime, sve čestice fluida imaju jednako vrijeme zadržavanja u sustavu koje je ustvari srednje vrijeme zadržavanja pa na apscisi postoji samo jedna vrijednost. [1]



Slika 2.7. RVZ funkcija za idealno strujanje u cijevnom reaktoru

Ako na ulazu u reaktor označimo jedan elementarni volumen i njegovo vrijeme ulaska uzmemo kao početno, odnosno nulto vrijeme, tada za  $t \neq 0$  vrijedi

$$E_z(t) = \delta(t) = 0 \quad (2.14.)$$

i za  $t = 0$

$$E_z(t) = \delta(t) = 1 \quad (2.15.)$$

## 2.3. MODELI STRUJANJA

Zbog odstupanja od graničnih načina strujanja oblik realnih RVZ funkcija predočava se različitim modelima strujanja koji se provjeravaju eksperimentalno dobivenim  $E_z$  krivuljama te se određuje točnost njihova slaganja. Pri tome se dobivaju brožane vrijednosti odgovarajućih parametara modela pomoću kojih se određuje veličina odstupanja od graničnih načina strujanja. Postoji velik broj modela strujanja koji se razlikuju prema složenosti matematičke funkcije i broju parametara (konstanti). Mogu se podijeliti u dvije veće skupine. Prvu skupinu čine modeli strujanja koji su izvedeni na temelju hidrodinamičkih karakteristika sustava, odnosno koji sadrže više ili manje egzaktan opis strujanja. Kao najčešće primjenjivani u praksi, to su laminarni model i model aksijalne disperzije. U drugu skupinu ulaze mehanistički modeli koji su izvedeni na osnovi određene misaone predodžbe o načinu strujanja kroz reaktor. Takav model je npr. PKR model ili model od  $N$  ćelija vezanih slijedno. Unutar ove skupine posebnu skupinu čine empirijski modeli koji su izvedeni iz matematičkih razmatranja dobivenih  $E_z$  krivulja, a obično su to statističke funkcije. Najvažniji predstavnik ove skupine je gama model čiju osnovu čini statistička gama raspodjela.

U ovom radu primjenjivan je model aksijalne disperzije.

### 2.3.1. MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE

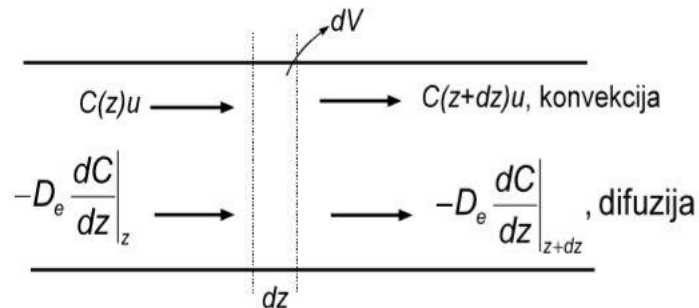
Iako fluid prolaskom kroz reaktor posjeduje konstantnu volumnu brzinu, svi njegovi elementi ne ostaju jednako dugo u reaktoru. Uzrok tome je aksijalna disperzija, a posljedica postojanje raspodjele vremena zadržavanja u reaktoru. Model aksijalne disperzije koristi se za opis strujanja kroz cijevne reaktore koje malo odstupa od idealnog strujanja, a posebno je pogodan za reaktore s nepokretnim slojem krutog katalizatora. Osnova ovog modela je idealno strujanje kojem se pridodaje izvjesno makrostrujanje u smjeru osi, a koje se opisuje difuzijskim prijenosom.

Disperzija (difuzija) je definirana Fickovim zakonom.



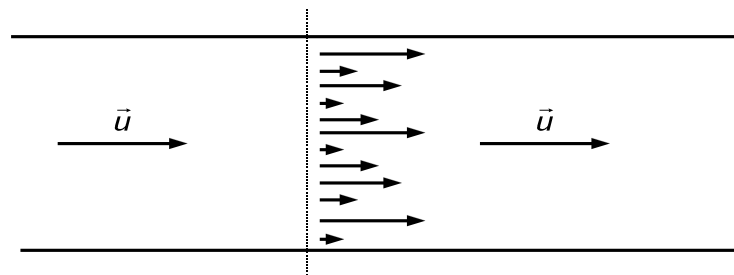
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

(2.16.)



Slika 2.8. Model aksijalne disperzije; postavljanje bilance tvari u elementarnom volumenu

Parametar  $D_e$  naziva se prosječnim koeficijentom difuzije ili koeficijentom disperzije. Slika 2.9. prikazuje strujanje u cijevnom reaktoru prema modelu aksijalne disperzije.



Slika 2.9. Strujanje prema modelu aksijalne disperzije

Modelom aksijalne disperzije pokušalo se aproksimirati realno strujanje u cijevnom reaktoru, ali uz određene pretpostavke:

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

Uvođenjem člana za idealno strujanje u jednadžbu (2.16.) dobiva se matematički model strujanja aksijalnom disperzijom.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.17.)$$

Model se prevodi u bezdimenzijski oblik uvođenjem bezdimenzijskog vremena (2.18.) i bezdimenzijske dužine (2.19.).

$$\theta = \frac{tu}{L} \quad (2.18.)$$

$$x = \frac{z}{L} \quad (2.19.)$$

Izrazi (2.18.) i (2.19.) se deriviraju, a zatim se uvrste u jednadžbu (2.17.).

$$\partial \theta = \frac{u}{L} \partial t \quad (2.20.)$$

$$\partial x = \frac{\partial z}{L} \quad (2.21.)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \theta \frac{L}{u}} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2 L^2} - u \frac{\partial C}{\partial x L} \quad (2.22.)$$

Podijeli li se dobivena jednadžba (2.22) sa u i L dobiva se jednadžba (2.23).

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D_e}{uL} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.23)$$

U izrazu (2.23.) može se nalaziti Pecletova značajka (2.25.), ali se umjesto nje češće koristi disperzijska značajka (2.24.) koja je zapravo recipročna vrijednost Pecletove značajke.

$$DB = \frac{D_e}{uL} \quad (2.24.)$$

$$Pe = \frac{1}{DB} \quad (2.25.)$$

Postoje dva granična slučaja. Ako  $DB \rightarrow 0$  disperzija ne postoji i strujanje je idealno, a ako  $DB \rightarrow \infty$  disperzija je potpuna i prisutno je strujanje uz idealno miješanje. U realnim sustavima disperzijska značajka ima vrijednost između graničnih vrijednosti. Pecletova, odnosno disperzijska značajka je jedini parametar u modelu o kojem ovisi oblik dobivenih  $E_z$  krivulja. Opće rješenje jednadžbe (2.23.) ovisi o pretpostavljenim graničnim uvjetima strujanja na ulazu i izlazu iz sustava. Za mala odstupanja od idealnog strujanja, model aksijalne disperzije daje simetričnu raspodjelu, odnosno Gaussovu krivulju pa se  $E_z$  funkcija može naći iz izraza (2.26.).

$$E_z(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D_B}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4D_B}\right] \quad (2.26.)$$

Varijanca i Pecletova značajka povezane su izrazom (2.27.).

$$\sigma^2 = 2D_B \quad (2.27.)$$

Jedino za sustav „zatvoreno – zatvoreno“, odnosno u slučaju kada na ulazu i izlazu ne postoji disperzija, vrijedi zaključak da  $E_z$  funkcija stvarno predočava RVZ krivulju. Za

takav sustav rješenje je vrlo složeno, ali je varijanca povezana s disperzijskom značajkom znatno jednostavnijim izrazom (2.28.)

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{Pe} \{2Pe - 2 + 2\exp[-Pe]\} \quad (2.28.)$$

Za strujanje u realnom sustavu „zatvoreno – zatvoreno“ s disperzijskom značajkom manjom od 0,05,  $E_z$  funkcija opisana je jednadžbom (2.29.).

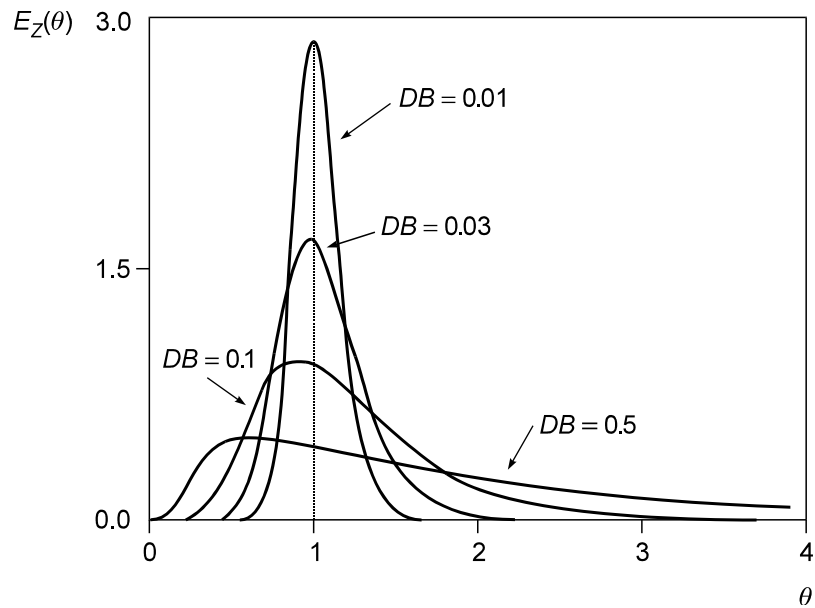
$$E_z(\theta) = \frac{1}{4\pi\theta^3 D_B} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta D_B}\right] \quad (2.29.)$$

Uz pretpostavku da na ulazu i izlazu iz reaktora postoji disperzija u strujanju, odnosno ako je sustav „otvoreno – otvoreno“,  $E_z$  funkcija je dana izrazom (2.30.).

$$E_z(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta D_B}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta D_B}\right] \quad (2.30.)$$

U sustavu „otvoreno – otvoreno“ veza između varijance i Pecletove značajke dana je izrazom (2.31.).

$$\sigma_{\theta}^2 = 2D_B + 8D_B^2 \quad (2.31.)$$

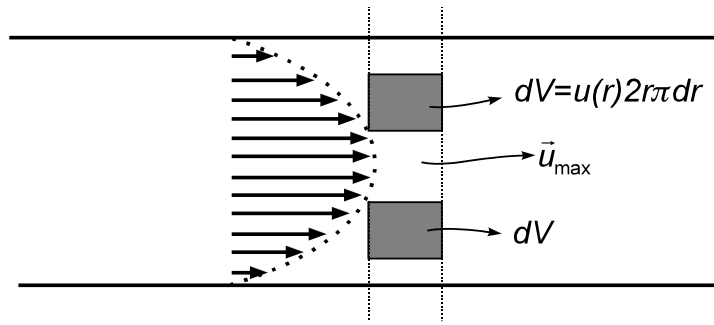


Slika 2.10. Model aksijalne disperzije, RVZ krivulje za sustav „otvoreno – otvoreno“

Model aksijalne disperzije je realna predodžba strujanja u reaktorima s nepokretnim slojem katalizatora gdje se pojavljuju vrlo mala odstupanja od idealnog strujanja uzrokovana različitim procesima kao i u reaktorima za homogene sustave u kojima uz difuziju postoji i vrtložna turbulencija. Kada je disperzijska značajka velika, a strujanje nalik idealnom miješanju, ovaj model može uvelike odstupati od eksperimentalnih krivulja. Glavni razlog tome je miješanje reakcijske smjese ne samo u aksijalnom smjeru, što je glavna pretpostavka modela aksijalne disperzije, nego i po presjeku reaktora.

### 2.3.2. MODEL LAMINARNOG STRUJANJA

Brzina strujanja u cijevnim reaktorima obično nije velika što je glavna karakteristika laminarnog strujanja koje je vrlo često u praksi, posebice kod kapljevutih homogenih sustava. Laminarno strujanje je opisano kao segregirano, slojevito strujanje s profilom brzina po presjeku reaktora što prikazuje i slika 2.11. Ono što je također važno je činjenica da ne postoji vektor brzine u radijalnom smjeru.



Slika 2.11. Model laminarnog strujanja

Brzina strujanja u nekoj točki presjeka reaktora polumjera  $r$  dana je izrazom (2.32.).

$$u(r) = 2u_s \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.32.)$$

U gornjem izrazu  $u_s$  je srednja brzina strujanja, a definirana je jednačbom (2.33.).

$$u_s = \frac{v_0}{r_0^2 \pi} \quad (2.33.)$$

Srednja brzina strujanja u središtu cijevi jednaka je maksimalnoj brzini strujanja. Podijeli li se duljina reaktora  $L$  sa srednjom brzinom strujanja dobiva se srednje vrijeme zadržavanja, odnosno izraz (2.34.).

$$\bar{t} = \frac{L}{u_s} \quad (2.34.)$$

U laminarnom strujanju raspored brzina po presjeku cijevi ima oblik parabole, slika 2.11., iz čega proizlazi da se sve molekule fluida u reaktoru ne zadržavaju jednako dugo. Vrijeme zadržavanja molekula uz stijenku je vrlo veliko dok je u središtu cijevi minimalno. Vrijeme zadržavanja za element fluida u točki polumjera  $r$  dano je relacijom (2.35.).

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

(2.35.)

Parametar modela laminarnog strujanja odnosno srednje vrijeme zadržavanja utječe na oblik  $E_z$  krivulja, no one se uvijek nalaze između graničnih krivulja idealnog strujanja i idealnog miješanja.

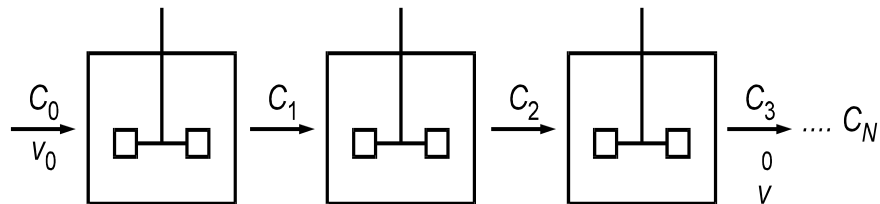
Model laminarnog strujanja u nestacionarnim uvjetima (RVZ) definiran je izrazom (2.36.).

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

(2.36.)

### 2.3.3. MODEL ĆELIJA VEZANIH SLIJEDNO ILI PKR MODEL

Prema ovom modelu strujanje reakcijske smjese kroz reaktor zamišlja se kao prolaz kroz niz protočno kotlastih reaktora istih volumena uz idealno miješanje kao što je prikazano na slici 2.12. Predodžba ovog modela proizašla je iz vizualizacije strujanja kroz idealni cijevni reaktor u kojem se određeni volumen reakcijske smjese kreće od ulaza do izlaza iz reaktora kao diferencijalni kotlasti reaktor. Drugim riječima, reakcijska smjesa u reaktoru prolazi kroz niz diferencijalnih PKR reaktora.



Slika 2.12. Strujanje prema modelu ćelija vezanih u seriju

$E_z$  funkcija prema ovom modelu dobiva se postavljanjem bilance množine tvari koja prolazi kroz niz PKR reaktora uz pretpostavku da nema kemijske reakcije.

Izraz za  $N$  ćelija glasi:

$$E_z(t) = \frac{t^{N-1}}{(N-1)! \bar{t}_i^N} \exp\left[-\frac{t}{\bar{t}_i}\right] \quad (2.37.)$$

Zbog člana u nazivniku  $N$  može biti samo cjelobrojna vrijednost što je nedostatak ovog modela. Broj ćelija, kao parametar PKR modela, utječe na oblik dobivenih  $E_z$  krivulja. PKR model je vrlo jednostavan i primjenjuje se za strujanja koja se postižu uz idealno miješanje. Nije pogodan za strujanja koja se malo razlikuju od strujanja uz idealno miješanje upravo zbog spomenute činjenice da parametar  $N$  mora biti cijeli broj. Za velike vrijednosti parametra  $N$  PKR model se vrlo dobro približava modelu aksijalne disperzije kada su dobivene RVZ krivulje simetrične.

#### 2.3.4. GAMA MODEL

Gama model strujanja nema fizičku osnovu prema kojoj bi se formulirala matematička interpretacija. Matematička razmatranja nedostatka PRK modela, odnosno činjenice da parametar  $N$  mora biti cijeli broj, rezultirala su postavljanjem ovog modela. Postoji nekoliko gama modela koji se razlikuju prema broju parametara.

Opći gama model dan je izrazom,

$$E_z(t) = \frac{1}{d_g \Gamma(p)} (t - D)^p \exp\left[-\frac{t - D}{d_g}\right] \quad (2.38.)$$

a gama funkcija je definirana izrazom

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} x^{p-1} \exp[-x] dx \quad (2.39.)$$



$D$  je parametar koji odgovara vremenu kašnjenja ili inercije sustava.

Za stupanj miješanja u reaktoru odgovoran je parametar  $p$ . Što je manja njegova vrijednost, to je disperzija veća te je prolaz reakcijske smjese sličniji strujanju uz idealno miješanje. Suprotno, ako je parametar  $p$  veći, strujanje se približava idealnom.

Parametar  $d_g$  je funkcija srednjeg vremena zadržavanja.

Opći gama model sadrži tri parametra pa može dobro opisati eksperimentalne  $E_z$  krivulje. Glavni nedostaci ovog modela su pomanjkanje fizičke slike strujanja i nemogućnost predviđanja brojčanih vrijednosti parametara. [1] [9]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada je odrediti raspodjelu vremena zadržavanja trasera kalijeva klorida, KCl u struji vode u tri različite cijevi bez prisutnosti kemijske reakcije. Kao rezultati dobivene su RVZ krivulje ovisno o različitim volumenima, odnosno koncentracijama i protocima u tri različita modela cijevnih reaktora.

Prije provođenja eksperimenta potrebno je baždariti rotametar, odnosno odrediti volumni protok vode u sve tri cijevi. Baždarenje se provodi počevši s najmanjim protokom i nastavlja prema većim vrijednostima protoka. Za svaku oznaku protoka na rotametu vrše se tri mjerenja i računa srednja vrijednost izmjenjenog protoka kako bi podaci bili što točniji. Odabire se oznaka protoka na rotametu na način da protok bude konstantan tijekom mjerenja. Mjeri se količina vode koja je istekla iz cijevi u menzuru u vremenu od jedne minute, a kao rezultat dobiven je protok vode koja protječe sustavom. Eksperimentalne vrijednosti sustava prikazane su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Izmjereni volumni protoci vode i izračunate njihove srednje vrijednosti

Oznaka na rotametu	Mjerenje 1 mL/min	Mjerenje 2 mL/min	Mjerenje 3 mL/min	Srednji protok mL/min
1	59	60	58	59
2	141	139	140	140
3	206	208	207	207

### 3.1. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE RVZ FUNKCIJE

Osnova svih eksperimentalnih metoda jest određivanje raspodjele vremena zadržavanja čestica u elementarnom (diferencijalnom) volumenu u reaktoru. Diferencijalni volumen u kojem se želi odrediti RVZ potrebno je obilježiti i razlikovati od ostatka reakcijske smjese. To se postiže na način da se u struju reakcijske smjese unosi određena količina tvari nazvana traserom koja se na izlazu iz sustava lako detektira pogodnom analitičkom metodom. Unošenje traseru predstavlja impulsni poremećaj sustava. Dakle, određena količina traseru predstavlja diferencijalni volumen, a mjerenjem raspodjele količine traseru na izlazu iz reaktora dobiva se  $E_z$  funkcija za strujanje reakcijske smjese u cjelini. Da bi traser bio upotrebljiv mora posjedovati određene značajke:

- potrebno je njegovu koncentraciju na izlazu analitički lako i precizno odrediti
- ne smije promijeniti hidrodinamičke karakteristike ispitivanog fluida,
- ne smije kemijski reagirati s okolnim fluidom.

Bilo koja tvar koja posjeduje navedene značajke može se koristiti kao traser. U kapljevitim sustavima i vodenim otopinama kao traser se obično koristi otopina vodljivih soli, npr. KCl. Mjerenjem vodljivosti na izlazu iz sustava može se pratiti promjena koncentracije te otopine tijekom vremena. Eksperimentalno određivanje  $E_z$  ili RVZ funkcije svodi se na analizu odziva što ga uzrokuje poremećaj, odnosno unošenje traseru u sustav.

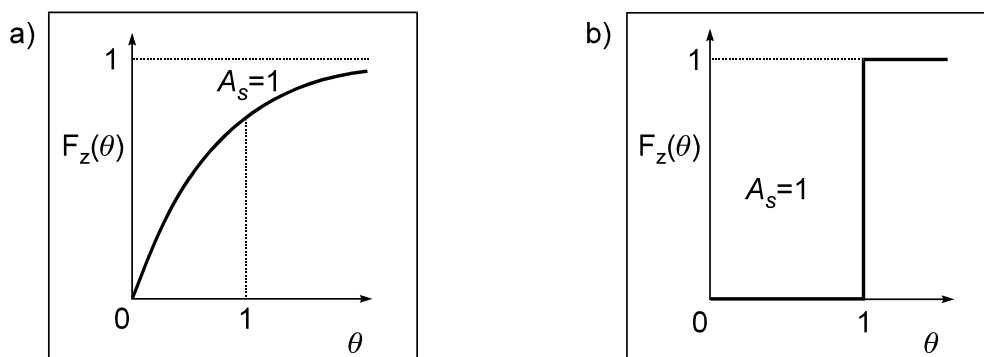
Za analizu je potrebno:

- pogodnom eksperimentalnom metodom utvrditi ovisnost količine traseru o vremenu na izlazu iz reaktora, odnosno dobiti funkciju odziva,

- pretpostaviti model strujanja fluida kroz reaktor i provjeriti ga s eksperimentalno dobivenom  $E_z$  krivuljom, odnosno odzivom,
- poznavati funkciju poremećaja, odnosno ovisnost količine traseru o vremenu tijekom unošenja u sustav,
- na osnovi usporedbe zaključiti o primjenjivosti modela i mogućem odstupanju stvarnog strujanja kroz reaktor od idealnih graničnih oblika.

Za provedbu analize potrebno je poznavati krivulje odziva za poznate funkcije poremećaja i pretpostavljene modele strujanja, posebno za granične oblike strujanja. Najjednostavniji poremećaj je aproksimacija impulsa ili Diracova funkcija. Budući da je RVZ funkcija u reaktoru definirana raspodjelom tvari u diferencijalnom volumenu po vremenu na izlazu, impulsnim poremećajem će se aproksimirati ta predodžba. Iz toga proizlazi da će odziv na impulsni poremećaj biti upravo  $E_z$  funkcija ili RVZ krivulja ispitivanog sustava. Za analizu strujanja, uz impulsni poremećaj, često se koristi i poremećaj u obliku skokomične ili step funkcije prikazane na slici 3.1. i definirane izrazom

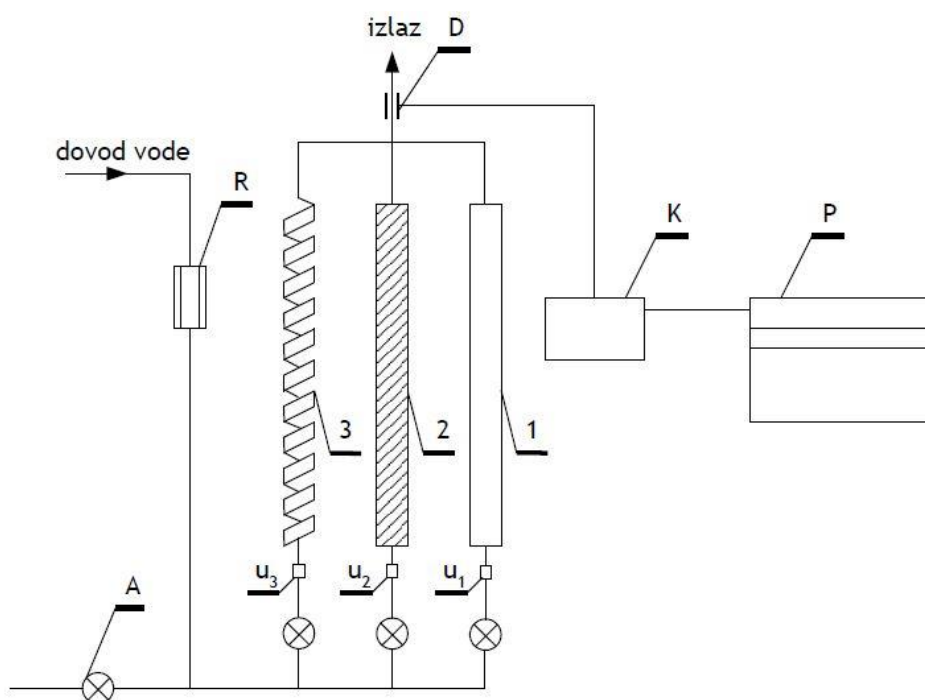
$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (3.1.)$$



Slika 3.1. Funkcija odziva, na skokomični poremećaj u a) sustavu s idealnim miješanjem  
i b) sustavu s idealnim strujanjem

Skokomični poremećaj se ostvaruje uvođenjem stalne količine traseira od nekog nultog vremena te praćenjem promjene koncentracije na izlazu do stacionarnog stanja. Odziv na skokomični poremećaj je  $F_z$  funkcija. Eksperimentalne vrijednosti  $E_z$  funkcije dobivaju se kao diskretni izrazi količina ili koncentracija traseira u ovisnosti o vremenu. Analiza i testiranje izabranog modela provodi se nalaženjem veze između parametara modela i statističkih momenata dobivenih obradom eksperimentalne krivulje. Budući da je  $E_z$  funkcija statistička funkcija, podaci se normaliziraju radi međusobne usporedbe eksperimentalnih rezultata. Normalizacija je jednostavni postupak kojim se utvrđuje da je površina ispod eksperimentalne krivulje jedinična što znači da je zbroj svih pojedinačnih vrijednosti RVZ funkcije jednak jedinici. Nakon normalizacije računaju se statistički momenti, srednje vrijeme zadržavanja i varijanca. [1]

### 3.2. SHEMA APARATURE I IZVEDBA MJERENJA



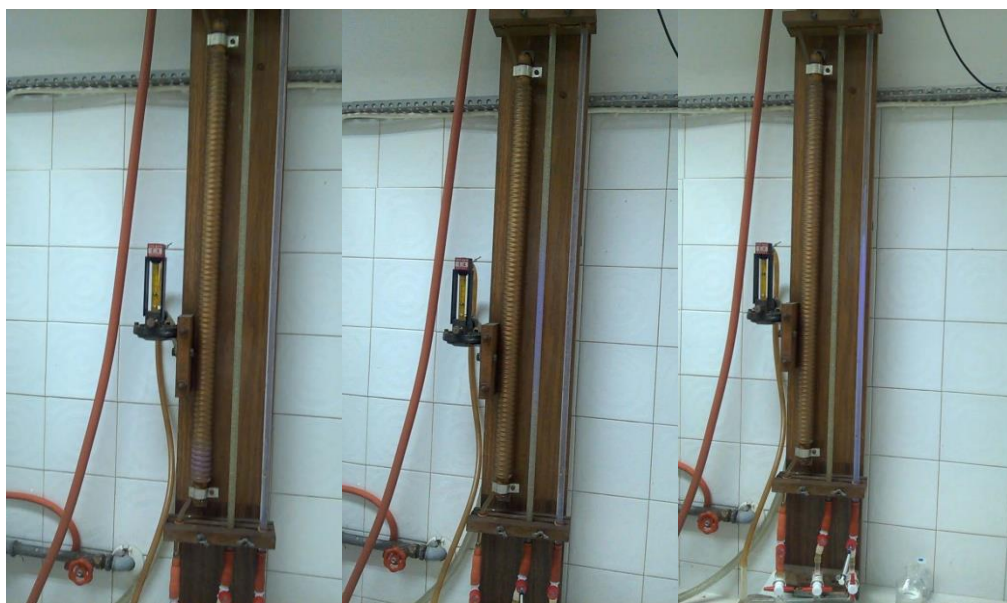
Slika 5. Shema eksperimentalne aparature za određivanje RVZ funkcija

R	rotametar	1, 2, 3	cijevi
A	pipac za ispuštavanje vode iz sustava	D	detektor- konduktometrijska ćelija
K	konduktometar	$u_1, u_2, u_3$	mjesto za unos traseru
P	PC računalo-akvizicija		

Aparaturu čine tri različite cijevi, a to su ravna cijev (1), ravna cijev ispunjena staklenim kuglicama (2) i spiralna cijev (3). Vodovodna voda struji kroz rotametar kojim se određuje željeni protok i ulazi u cijev jedan, dva ili tri ovisno o tome u koju od cijevi se namjerava injektirati traser. Pritom je pipac za ispuštavanje vode (A) zatvoren. Na izlazu iz cijevi se nalazi uređaj za očitavanje količine traseru (D). Traser se injekcijom uštrcava kroz gumeni septum na mjestima  $u_1$ ,  $u_2$  i  $u_3$ . Uređaj za detekciju je protočna konduktometrijska ćelija koja se sastoji od Pt elektroda kojima se mjeri promjena vodljivosti uzrokovana traserom. Izlazni signal se preko konduktometra vodi do računala

koji ga pretvara u naponski signal i prikazuje RVZ krivulju u programu NI SignalExpress. Rezultati mjerenja obrađuju se u Microsoft Excel programu.

Kada je postignut željeni protok na rotametri, u odabranu cijev unosi se određena količina traser. Kao traser, u ovom eksperimentu, korištena je otopina kalijeva klorida koja je prethodno pripremljena otapanjem 30,0 g KCl u 100 mL vode. Eksperiment se provodi unošenjem dva različita volumena traser (1 mL i 0,5 mL). Nakon što bržeg i preciznijeg injektiranja traser u cijevi na konduktometru se prati vodljivost vode koja obično ima vrijednost između 0,55 i 0,65 mS. Tijekom izvođenja eksperimenta vodljivost je najčešće iznosila 0,63 mS. Kada je postignuta navedena vrijednost vodljivosti mjerenje se prekida jer ona upućuje na to da je traser izašao iz sustava. Rezultati mjerenja pohranjuju se u računalo. Prije provedbe samog eksperimenta napravljen je pokus sa obojenim traserom da se dobije uvid u njegovo strujanje kroz cijevi. Vidljive su razlike u putovanju traser ovisno o vrsti cijevi. U prvoj, ravnoj praznoj cijevi traser je putovao nejednoliko s velikim vremenom zadržavanja, a u drugoj, ravnoj cijevi s kuglicama strujanje traser je bilo nešto brže. U trećoj, spiralnoj cijevi, strujanje traser je bilo najjasnije. Strujanje obojenog traser u sve tri cijevi prikazano je na slici 3.3.



Slika 3.3. Strujanje obojenog traser u spiralnoj cijevi, ravnoj cijevi ispunjenoj staklenim kuglicama i ravnoj cijevi

### 3.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA

Eksperimentalno dobivene RVZ krivulje prikazuju ovisnost koncentracije trasera o vremenu.

#### 1) Usporedba RVZ krivulja za različite protoke u istoj cijevi

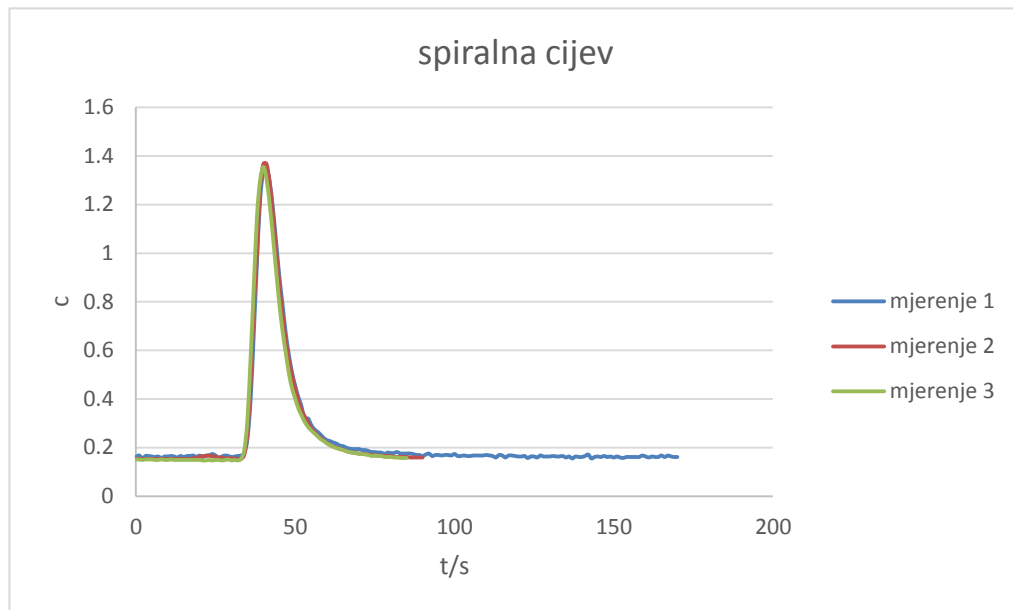


Slika 3.4. Promjena protoka u cijevi sa staklenim kuglicama pri volumenu trasera 0,5 mL

Slika 3.4. prikazuje promjenu protoka u cijevi sa staklenim kuglicama pri konstantnom volumenu trasera (0,5 mL). Iz slike je vidljivo da je pri većim protocima veća koncentracija, odnosno vodljivost trasera, a njegovo vrijeme zadržavanja u cijevi manje.



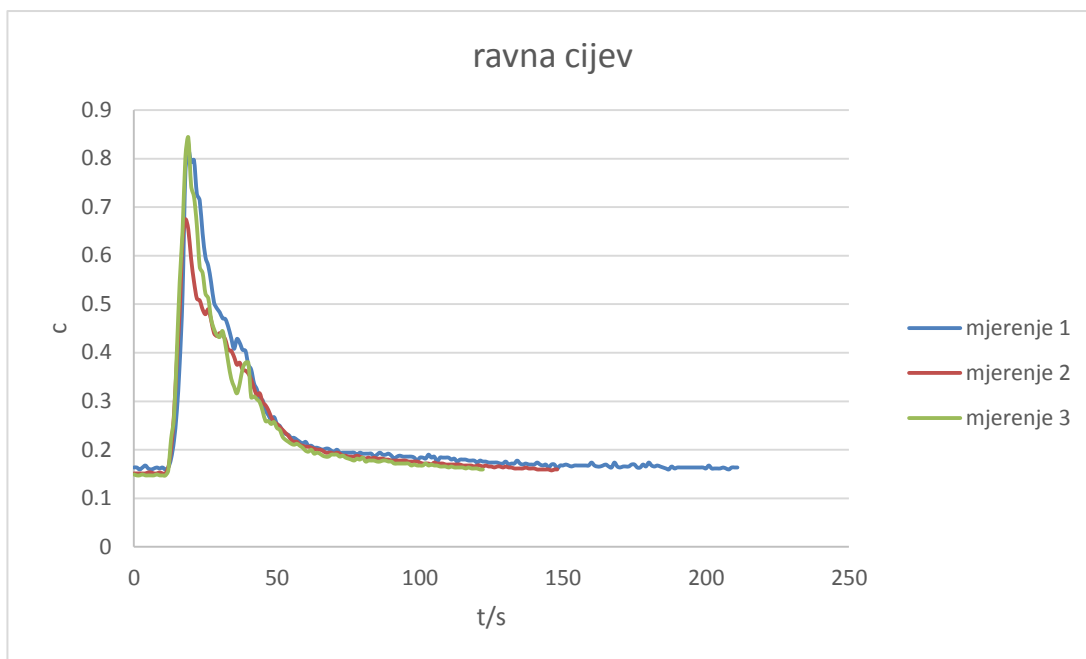
2) Usporedba RVZ krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta u istim uvjetima



Slika 3.5. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 0,5 mL i protoka 3 u spiralnoj cijevi



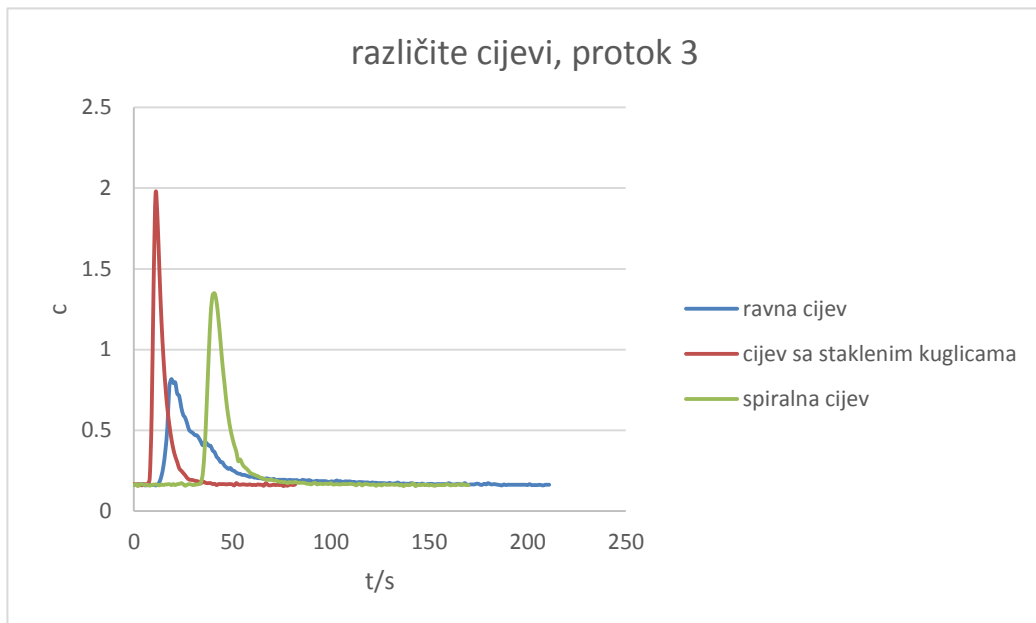
Slika 3.6. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 0, 5 mL i protoka 3 u cijevi sa staklenim kuglicama



Slika 3.7. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena traseru 0,5 mL i protoka 3 u ravnoj cijevi

Ove tri slike prikazuju krivulje dobivene ponavljanjem mjerenja u istoj cijevi pri istim uvjetima mjerenja. Može se uočiti da su sva tri mjerenja približno ista, a veća odstupanja su vidljiva jedino u ravnoj cijevi.

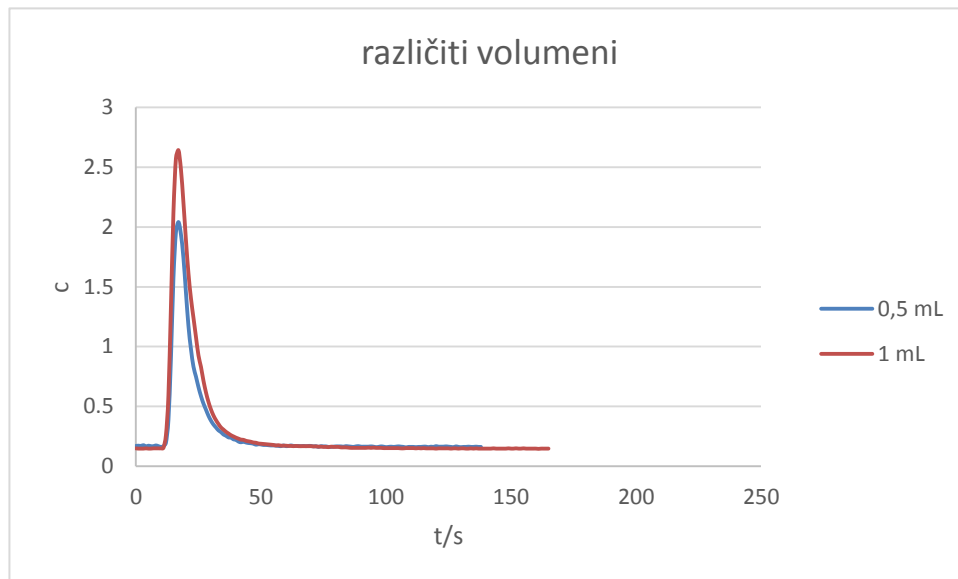
3) Usporedba RVZ krivulja dobivenih u različitim cijevima pri konstantnom protoku



Slika 3.8. RVZ krivulje dobivene pri konstantnom protoku 3 i volumenu traseera 0,5 mL u tri različite cijevi

Na slici 3.8. prikazane su RVZ krivulje dobivene pri konstantnom protoku i volumenu traseera u sve tri cijevi. U cijevi sa staklenim kuglicama koncentracija, odnosno odziv je najveći dok je vrijeme zadržavanja najmanje. Suprotno je u ravnoj cijevi.

4) Usporedba RVZ krivulja s obzirom na volumene trasera



Slika 3.9. Promjena volumena trasera u cijevi sa staklenim kuglicama pri protoku 2

Na ovoj slici prikazane su krivulje dobivene unošenjem dva različita volumena trasera u cijev sa staklenim kuglicama pri konstantnom protoku. Porastom volumena raste vodljivost i vrijeme zadržavanja trasera.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Iz eksperimentalno dobivenih RVZ krivulja vidljivo je odstupanje strujanja od graničnih načina strujanja. Za kvantitativno određivanje odstupanja strujanja potrebno je eksperimentalno dobivenu RVZ krivulju testirati pogodnim modelom strujanja. Potrebno je provesti normalizaciju dobivenih podataka i dobivene RVZ krivulje prevesti u bezdimenzijski oblik.

### 4.1. OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

Iz eksperimentalno dobivenih vrijednosti koncentracije trasera  $c_i$  i vremenskog intervala  $\Delta t$  od jedne sekunde korištenjem programa Microsoft Excel računaju se sljedeće veličine:

- 1) minimalna koncentracija trasera  $c_{imin}$
- 2) normalizirana koncentracija prema izrazu (4.1.)

$$c_{inorm} = c_i - c_{imin} \quad (4.1.)$$

- 3) približna površina  $Q$  ispod krivulje korištenjem jednadžbe (4.2.)

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

- 4) srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$  iz jednadžbe (4.3.)

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

- 5) bezdimenzijsko vrijeme  $\theta$  prema izrazu (4.4.)

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

6) varijanca  $\sigma^2$  iz jednadžbe (4.5.)

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

7) bezdimenzijska varijanca  $\sigma_\theta^2$  korištenjem jednadžbe (4.6.)

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

8) disperzijski broj  $DB_1$  prema izrazu (4.7.)

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

9) Pecletova značajka  $Pe_1$  koristeći izraz (4.8.)

$$Pe_1 = \frac{1}{DB_1} \quad (4.8.)$$

10)  $E_z$  funkcija definirana bezdimenzijskim vremenom  $\theta$  iz jednadžbe (4.9.)

$$E_z(\theta) = \bar{t} E_z(t) \quad (4.9.)$$

11)  $DB_2$  iz izraza (4.10.)

$$DB_2 = -\frac{1}{8} \pm \frac{\sqrt{4 + 32 * 2\sigma_\theta^2}}{16} \quad (4.10.)$$

12) te  $Pe_2$  iz gore navedenog izraza (4.8.)

## 4.2. TABLIČNI PRIKAZ PARAMETARA MODELA

### a) Ravna cijev

Tablica 4.1. Ravna cijev pri volumenu trasera 0,5 mL

Protok, mL/min	t/s	DB1	DB2	Pe1	Pe2
59	108,6	0,033	0,054	30,400	18,519
140	58,1	0,128	0,158	7,783	6,329
207	40,4	0,255	0,254	3,916	3,921

Tablica 4.2. Ravna cijev pri volumenu trasera 1 mL

Protok mL/min	t/s	DB1	DB2	Pe1	Pe2
59	106,0	0,034	0,056	29,261	17,857
140	62,9	0,119	0,149	8,413	6,711
207	45,4	0,227	0,234	4,409	4,274

### b) Ravna cijev sa staklenim kuglicama

Tablica 4.3. Ravna cijev sa staklenim kuglicama pri volumenu trasera 0,5 mL

Protok mL/min	t/s	DB1	DB2	Pe1	Pe2
59	58,9	0,115	0,145	8,709	6,897
140	23,1	0,192	0,209	5,196	4,785
207	15,6	0,181	0,201	5,527	4,975

Tablica 4.4. Ravna cijev sa staklenim kuglicama pri volumenu trasera 1 mL

Protok mL/min	t/s	DB1	DB2	Pe1	Pe2
59	67,5	0,104	0,135	9,656	7,407
140	23,3	0,163	0,187	6,135	5,348
207	14,2	0,097	0,128	10,330	7,813

c) Spiralna cijev

Tablica 4.5. Spiralna cijev pri volumenu trasera 0,5 mL

Protok mL/min	t/s	DB1	DB2	Pe1	Pe2
59	131,4	0,015	0,027	65,532	37,037
140	70,0	0,059	0,087	17,033	11,494
207	48,7	0,081	0,112	12,272	8,929

Tablica 4.6. Spiralna cijev pri volumenu trasera 1 mL

Protok mL/min	t/s	DB1	DB2	Pe1	Pe2
59	140,6	0,006	0,012	158,283	83,333
140	68,2	0,028	0,047	35,848	21,277
207	44,3	0,022	0,038	46,168	26,316

Iz prikazanih tablica vidljivo je da se povećanjem protoka smanjuje srednje vrijeme zadržavanja. Traser se najduže zadržava u spiralnoj cijevi, a najkraće u ravnoj cijevi ispunjenoj staklenim kuglicama. U cijevi sa staklenim kuglicama manji je slobodan volumen strujanja fluida pa da bi se održao stalan protok, brzina strujanja mora biti veća. Nadalje, što je veća brzina strujanja to je vrijeme zadržavanja manje i sustav se približava idealnome. Porastom protoka disperzijski broj raste, a Pecletova značajka se smanjuje (obrnuto proporcionalne veličine). Disperzijski broj je veći kod većeg volumena trasera. Ovisi i o vrsti cijevi pa je najveći u ravnoj, a najmanji u spiralnoj cijevi.



### 4.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA

Kako bi se dobio što bolji uvid u odstupanje od idealnog strujanja, eksperimentalno dobivene RVZ krivulje prevode se u bezdimenzijski oblik jer je pri idealnom strujanju površina ispod krivulje jednaka jedinici:

$$E_z(\theta) = \frac{\bar{t}c_{inorm}(t)}{Q} \quad (4.11.)$$

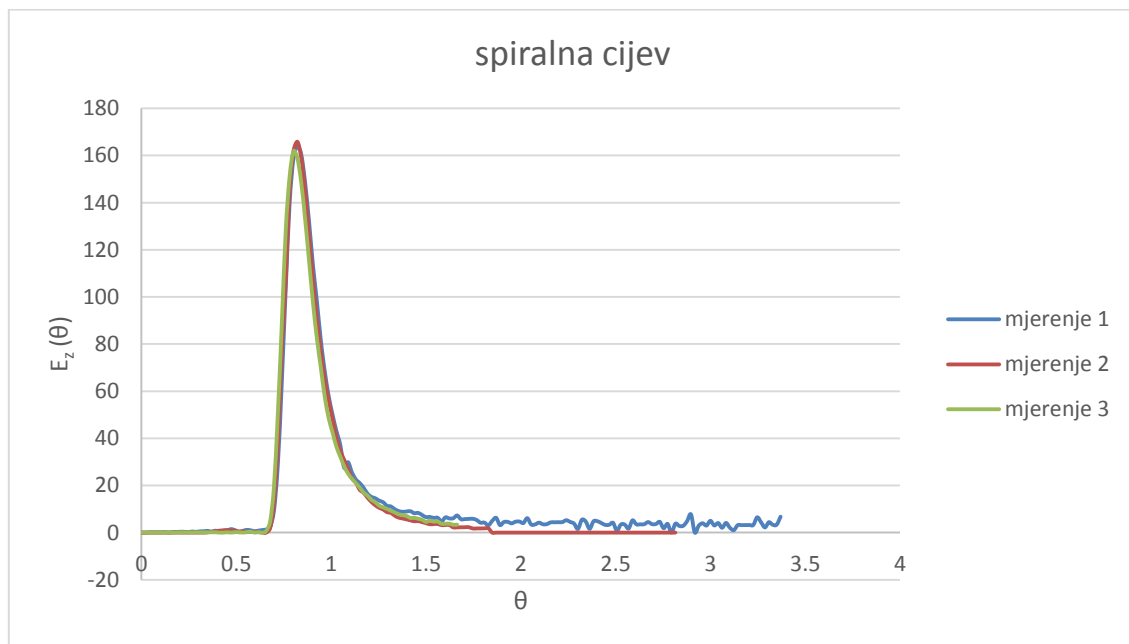
- 1) Usporedba  $E_z(\theta)$  krivulja za različite protoke u istoj cijevi



Slika 4.1. Promjena protoka u cijevi sa staklenim kuglicama pri volumenu trasera 0,5 mL

Pri protoku 1 odziv na impulsni poremećaj je najveći i vrijeme zadržavanja trasera u cijevi najduže. Porastom protoka smanjuje se vrijeme zadržavanja.

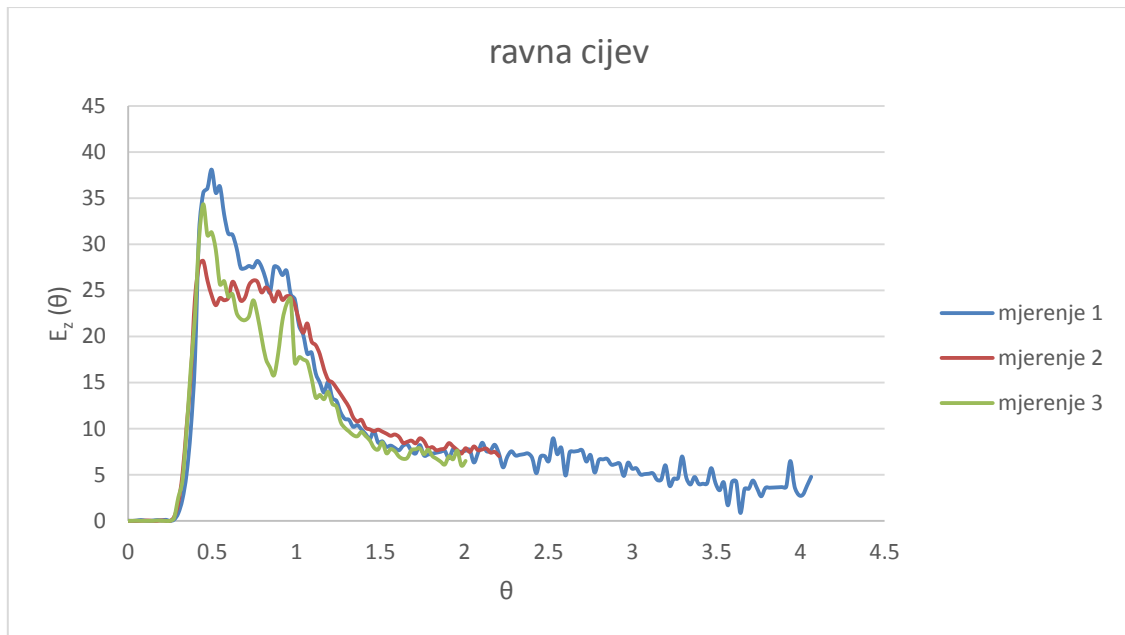
- 2) Usporedba  $E_z(\theta)$  krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta u istim uvjetima



Slika 4.2. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 0,5 mL i protoka 3 u spiralnoj cijevi



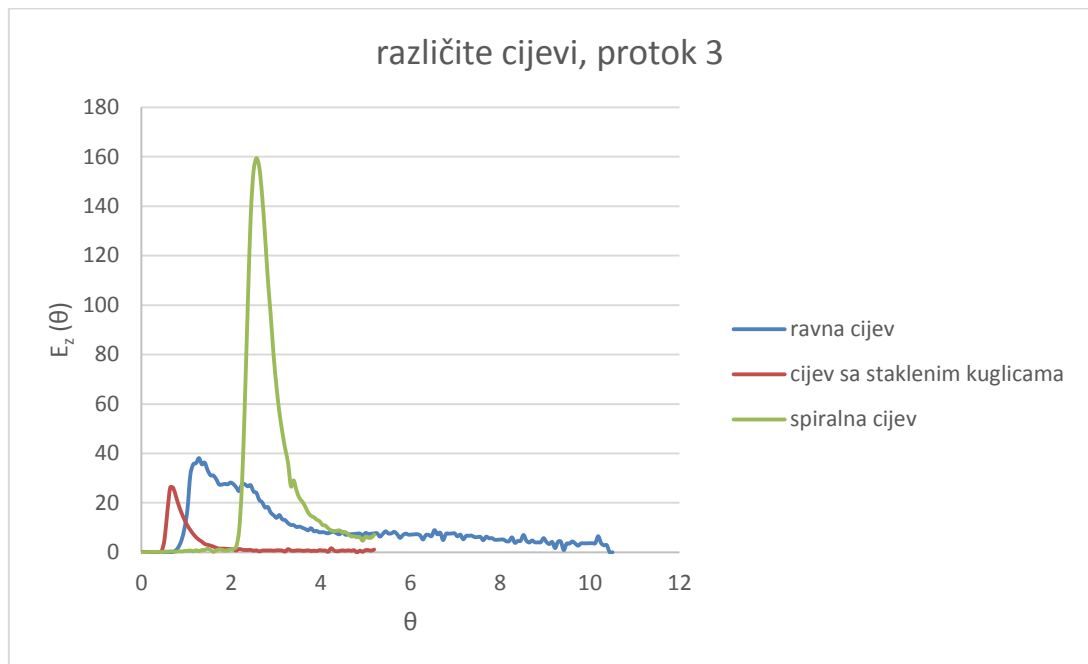
Slika 4.3. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 0,5 mL i protoka 3 u cijevi sa staklenim kuglicama



Slika 4.4. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 0,5 mL i protoka 3 u ravnoj cijevi

Ove tri slike pokazuju kako su sva mjerenja približno točna dok su oscilacije najuočljivije kod mjerenja u ravnoj cijevi. Strujanje u cijevi sa staklenim kuglicama teži idealnome.

3) Usporedba  $E_z$  krivulja dobivenih u različitim cijevima pri konstantnom protoku



Slika 4.5.  $E_z$  krivulje dobivene pri konstantnom protoku 3 i volumenu traseru 0,5 mL u tri različite cijevi

U ravnoj cijevi strujanje je najmanje idealno dok je u spiralnoj cijevi ono najbliže idealnom.

#### 4) Usporedba $E_z$ krivulja s obzirom na volumen



Slika 4.6. Promjena volumena traseru u cijevi sa staklenim kuglicama pri protoku 2

Odziv na impulsni poremećaj je bolji unošenjem manjeg volumena traseru koji pogoduje idealnom strujanju.

## 5. ZAKLJUČAK

- 1) Eksperimentalno su određene RVZ krivulje u svrhu usporedbe strujanja u tri različite cijevi.
- 2) Eksperimentalni podaci testirani su modelom aksijalne disperzije pri čemu je dobiveno srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$  i disperzijski broj  $DB$ .
- 3) Srednje vrijeme zadržavanja najmanje je u cijevi sa staklenim kuglicama zbog velike brzine strujanja trasera, a najveće u spiralnoj cijevi.
- 4) Disperzijski broj je parametar koji ovisi o značajkama cijevnih reaktora, odnosno načinu strujanja u njima.
- 5) Ove tri cijevi razlikuju se međusobno prema duljini, brzini strujanja i disperzijskom broju. Spiralna cijev je znatno duža (3 m) u odnosu na druge dvije cijevi. U cijevi sa staklenim kuglicama brzina strujanja je puno veća nego u druge dvije cijevi zbog smanjenog slobodnog volumena. Najmanje vrijednosti disperzijskog broja dobivene su za spiralnu cijev, a najveće za ravnu praznu cijev. Dužina spiralne cijevi rezultira većim omjerom duljine i polumjera što omogućuje formiranje idealnog strujanja.
- 6) Promjena volumena trasera značajno ne utječe na izgled RVZ krivulja.

## LITERATURA

1. Z. Gomzi, Kemijski reaktori, Hinus, Zagreb, 1998
2. M. Gavrilescu, R. Z. Tudose, Residence Time Distribution of the Liquid Phase in a Concentric- Tube Airlift Reactor, Chemical Engineering and Processing, 38 (1999) 225-238
3. H. Blenke, in: T.K. Ghose, A. Fiechter, N. Blackebrough (Eds.), Advances in Biochemical Engineering, vol. 13, Springer, Berlin, 1979, pp. 120 – 214
4. O. Levespiel, „Chemical Reaction Engineering, third edition, John Wiley & Sons, New York, 1999
5. D. E Swaine, A.J. Daugulis, Review of liquid mixing in packed bed biological reactors, Biotech. Progress 4 (1988) 134 – 148
6. Fogler S. H., Elements of Chemical Reaction Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
7. Nauman, E. B., Buffham, B. A., Mixing in Continuous Flow Systems, J. Wiley, New York, 1983.
8. M. Gavrilescu, R. Z. Tudose, Residence Time Distribution of the Liquid Phase in a Concentric- Tube Airlift Reactor, Chemical Engineering and Processing, 38 (1999) 225-238
9. K. Ekambara, J.B. Joshi, Axial mixing in laminar pipe flows, Chemical Engineering Science, 59 (2004) 3929-3944

## 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 eksperimenta  
 $n$  - red reakcije  
 $p$  - 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)  
 $\Gamma(p)$  - 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:

Ivona Lacko

[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]

## Obrazovanje:

2014. – 2018. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, smjer Kemijsko inženjerstvo

2010. – 2014. Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, smjer Biologija i kemija

2006. – 2010. Opća gimnazija Varaždin, Varaždin

1998. – 2006. Osnovna škola Trnovec, Trnovec Bartolovečki

## Osobne vještine i sposobnosti:

Strani jezici: engleski jezik (B2), njemački jezik (B2)

Računalne vještine: Microsoft Office

Socijalne vještine: komunikativnost, snalažljivost, odgovornost, timski rad

Vozačka dozvola "B" kategorije

## Studentski posao:

Vindija d.d.

dm-drogeriemarkt Hrvatska

## Stručna praksa:

Varkom d.d.