

# Raspodjela vremena zadržavanja u modelnim cijevima

---

Čutura, Iva

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:149:323470>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Iva Čutura

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, rujan 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Iva Čutura

**RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA U MODELNIM CIJEVIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

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

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

Prof. dr. sc. Vesna Tomašić

Andrej Vidak, mag. educ. phys. et inf

Zagreb, rujan 2016.

## SAŽETAK

U ovome eksperimentalnom radu istraživala se raspodjela vremena zadržavanja u cijevnim reaktorima. Do eksperimentalnih podataka se došlo uvođenjem trasea u tri različite vrste cijevi, ravnoj cijevi, cijevi sa staklenim kuglicama i spiralnoj cijevi te mjerenjem odziva na impulsni poremećaj. Na temelju podataka dobiju se krivulje raspodjele vremena zadržavanja iz kojih se mogu izračunati podaci kao što su srednje vrijeme zadržavanja i disperzijski broj potrebni za usporedbu eksperimentalnih rezultata. Na temelju tih rezultata mogu se primijetiti razlike u vremenu zadržavanja u različitim cijevima.

**Ključne riječi:** raspodjela vremena zadržavanja (RVZ), cijevni reaktor, idealno strujanje, model aksijalne disperzije

## **ABSTRACT**

This experiment researched residence time distribution in tubular models of chemical reactors. The data was gathered by measuring the signal of impulse distortion. Tracer was inserted in three different kinds of tubes, straight tube, tube with glass balls and spiral tube. Residence time distribution curves are derived from the data, and make possible to calculate mean residence time and dispersion number necessary for comparison of the data for different tubes.

**Key words:** residence time distribution (RTD), tubular reactor, plug flow, axial dispersion model

## 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 .....	11
2.3.2. MODEL LAMINARNOG STRUJANJA .....	14
2.3.3. MODEL ČELIJA VEZANIH SLIJEDNO ILI PKR MOD.....	16
2.3.4. GAMA MODEL .....	17
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	18
3.1. PRINCIP METODE ODREĐIVANJA RVZ KRIVULJA .....	19
3.2. SHEMA APARATURE I IZVEDBA MJERENJA.....	21
3.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA.....	23
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	26
4.1. OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAK.....	26
4.2. TABLIČNI PRIKAZ PARAMETARA MODELA.....	28
4.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA.....	30
5. ZAKLJUČAK .....	34
LITERATURA .....	35
POPIS OZNAKA .....	36
ŽIVOTOPIS.....	37

## 1. UVOD

Svrha ovoga rada bila je odrediti raspodjelu vremena zadržavanja u različitim cijevnim reaktorima. Kako u mnogim slučajevima nije moguće predvidjeti ili opisati na osnovi fizičke slike hidrodinamičko ponašanje fluida koji protječe kroz reaktor, potrebno je stoga na osnovi eksperimentalnih podataka odrediti model strujanja kojim se može kvalitativno i kvantitativno opisati odstupanje od graničnih načina strujanja, idealnog strujanja, odnosno idealnog miješanja. Model strujanja se određuje na temelju raspodjele vremena zadržavanja (RVZ) elemenata fluida u reaktoru.

U ovome radu eksperimenti su provedeni u modelnim cijevima bez prisutnosti kemijske reakcije čime na ukupnu hidrodinamiku sustava utječe isključivo geometrija cijevi, odnosno brzina strujanja fluida. Uspoređivanjem eksperimentalnih odzivnih krivulja s modelima strujanja fluida mogu se procijeniti ključne veličine koje određuju režim strujanja.

Kemijski reaktor je jedan od mnogih procesnih aparata koji je susreću u kemijskoj procesnoj industriji. Polazna je osnova u dimenzioniranju i projektiranju određenog kemijskog procesa te na neki način predstavlja “srce” svakog tehnološkog procesa. Upravo zbog toga je izuzetno važno poznavati karakteristike reaktora koje uključuju hidrodinamiku sustava i raspodjelu vremena zadržavanja.[1]

Analiza podataka raspodjele vremena zadržavanja je vrlo korisna za proučavanje strujanja fluida u svrhu određivanja stupnja miješanja i problema u strujanju kao što su recirkulacija, promjena smjera ili stagnacija. Ta tehnika se koristi u širokoj primjeni, posebice za evaluaciju kemijskih reaktora. U prehrambenoj industriji, određivanje raspodjele vremena zadržavanja se primjenjuje za utvrđivanje karakteristika raznih proizvodnih procesa. Brojni prehrambeni proizvodi su podvrgnuti termičkoj obradi, grijanju i hlađenju. Pri tome je raspodjela temperature i vremena zadržavanja u cijevima bitna za adekvatnu obradu u cilju postizanja zahtijevane kvalitete proizvoda. Anaerobna biotehnologija obrade otpadne vode značajno je napredovala evolucijom novih reaktora sa imobiliziranom biomasom. Takvi reaktori su korišteni za procjenu učinaka trasera na RVZ krivulje i hidrodinamičke parametre.[4][5][6]

## 2. TEORIJSKI DIO

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

Kemijski reaktori dijele se na kotlaste, protočno kotlaste i cijevne reaktore. U ovome radu proučavaju se modeli cijevnih reaktora. [1]

### 2.1. CIJEVNI REAKTOR

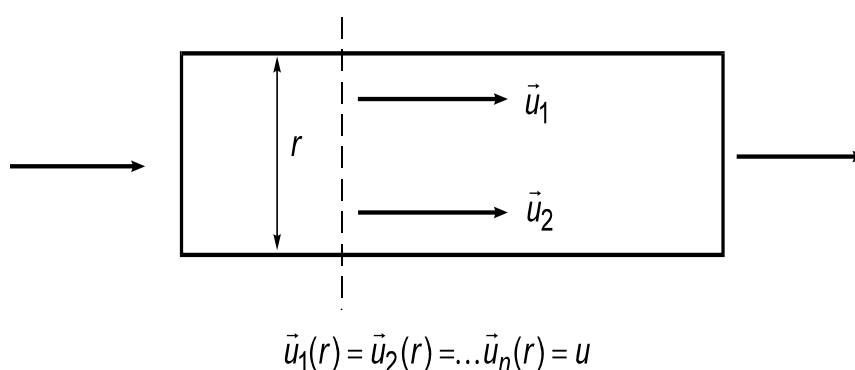
Cijevni reaktori su kemijski reaktori izvedeni u obliku cijevi. Zbog takve jednostavne izvedbe pogodni su za razne kemijske reakcije. Oni čine vrlo veliku i raznovrsnu skupinu reaktora koji se u industriji često koriste. Danas se u cijevnim reaktorima proizvode najvažnije kemikalije i proizvodi bitni za gospodarstvo svake zemlje. Učestali su upravo zbog toga što omogućuju dobivanje velikih količina ujednačenog proizvoda jer u pravilu rade u stacionarnom stanju. Nadalje, cijevni reaktori su pogodni za smještaj krutog katalizatora pa su katalitički cijevni reaktori s nepokretnim slojem katalizatora najvažniji tipovi za provedbu mnogih važnih industrijskih procesa, npr. sinteze amonijaka, sumporne kiseline, dušične kiseline, oksidacija benzena i naftalena, hidrobrada nafte, sinteza metanola itd.

Osnovne značajke cijevnih reaktora su:

- zavisnost parametara o prostornim koordinatama unutar reakcijskog 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 definiciji, odnosno izvedbi cijevni reaktor je otvoreni sustav. Bitna je njegova značajka približno idealno strujanje što znači da u pravcu protjecanja (aksijalnom smjeru) ne postoji miješanje unutar polazeće reakcijske smjese. Takav je reaktor moguće predočiti nizom elementarnih volumena koji posjeduju svojstva kotlastoga reaktora, a koji prolaze kroz reaktor ne izmjenjujući međusobno reakcijsku smjesu. Dakle, reakcijska smjesa prolazi kroz reaktor idealnim strujanjem u aksijalnom smjeru. Prolaz smjese definiran je idealnim nemiješanjem po dužini cijevnog reaktora pri čemu vektori brzine strujanja imaju isti iznos i smjer kao što prikazuje slika 2.1. [1][2]



Slika 2.1. Prikaz idealnog strujanja u cijevnom reaktoru

Idealno strujanje u cijevnim reaktorima ne može nikada biti ostvareno, ali može vrlo malo odstupati. U cijevnim reaktorima za provedbu reakcija u homogenim sustavima i uz male protoke reakcijske smjese, predodžba o idealnom strujanju nije moguća. Obično se tada koristi model laminarnog strujanja.

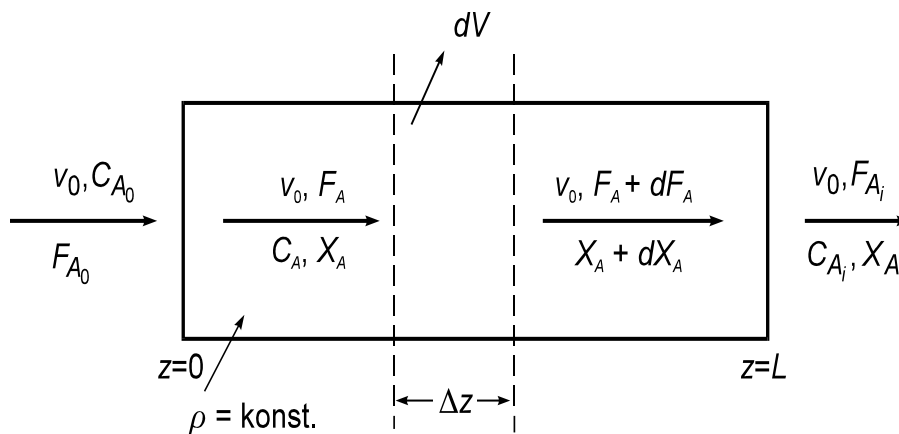
Cijevni reaktori u industrijskoj primjeni pretežito rade u stacionarnom stanju, vremenski vrlo dugo. Stalnost njihovog rada omogućuje ujednačenu kvalitetu produkta. Koriste se za provedbu reakcija u homogenim i heterogenim sustavima. Posebno treba istaknuti grupu reaktora s nepokretnim slojem krutog katalizatora.

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 reaktora (aksijalnom smjeru) mijenjaju veličine stanja (npr. brzina reakcije, koncentracija), to se bilance moraju nužno postaviti za diferencijalni volumen.

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 daje bilancu komponente A u idealnom cijevnom reaktoru, slika 2.2.



Slika 2.2. Model idealnog cijevnog reaktora

Postavljajući bilancu komponente A za diferencijalni volumen cijevnog reaktora dobiva se :

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

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

Uzevši u obzir kako je:

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

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

dobije se izraz:

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

Kako je:

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

i:

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

Jednadžbu (2.4.) moguće je integrirati na dva načina. Prvim ćemo dobiti uobičajenu jednadžbu u kojoj je prikazana zavisnost promjene koncentracije komponente A po duljini reaktora (2.7.).

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

Kada integriramo na drugi način, dobijemo zavisnost koncentracije komponente A o prostornom vremenu čime se potvrđuje analogija između diferencijalnog volumena za kojeg se izvodi reaktorski model i, idealnog kotlastog reaktora (2.8.). [1] [8] [9]

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

## 2.2. RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA

Raspodjela vremena zadržavanja reaktora je karakteristika strujanja medija koja se odnosi na kemijski reaktor i daje važne informacije o vremenu zadržavanja raznih tvari i elemenata koji se nalaze u reaktoru.[3]

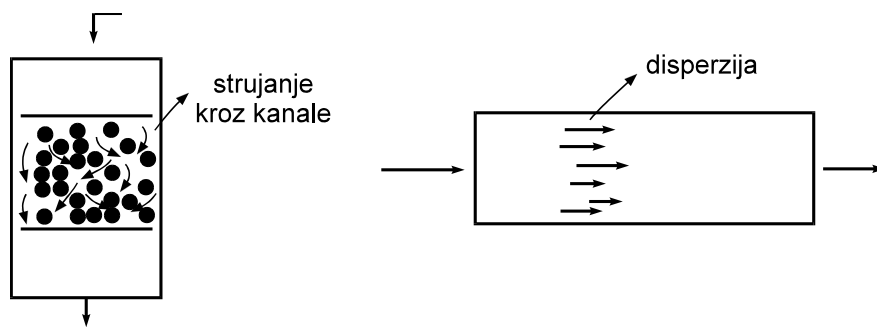
Matematički modeli idealnih tipova reaktora prikazuju se na temelju dva idealna načina prolaza reakcijske smjese, idealno strujanje i idealno miješanje. Strujanje kroz cijevni reaktor se objašnjava pretpostavkom o idealnom strujanju. U osnovi takvo idealno strujanje pretpostavlja da svaka molekula u gibanju kroz reaktor posjeduje brzinu istog iznosa i smjera. S druge strane, prolaz reakcijske smjese kroz protočno kotlasti reaktor pojednostavljuje se idealnim miješanjem gdje molekule svojim ulaskom u reaktor potpuno gube svoj identitet jer se postiže homogenost sustava. Na izlasku iz reaktora uvijek postoji određena raspodjela molekula po vremenu prebivanja unutar reaktora.

U realnim sustavima često nisu ispunjene ove pretpostavke, odnosno strujanje ili miješanje nije idealno. Odstupanja sustava od idealnosti može utjecati na značajke reaktora, posebice na konverziju. Bitno je shvatiti i spoznati uzroke neidealnosti sustava. Poznavanje utjecaja neidealnog strujanja, odnosno miješanja posebno je značajno za dimenzioniranje, odnosno uvećavanje reaktora.

Uzroci odstupanja od idealnog strujanja ili miješanja mogu biti različiti i brojni. Za cijevne reaktore značajni uzroci 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.

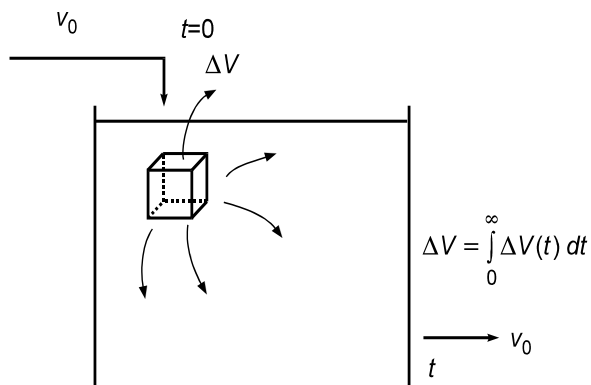
Na slici 2.3. dan je prikaz pojedinih situacija do kojih može doći u realnim cijevnim reaktorima.



Slika 2.3. Uzroci odstupanja od idealnog strujanja u cijevnim reaktorima

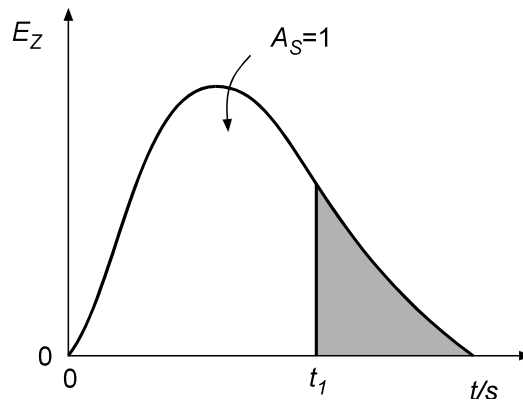
U mnogobrojnim slučajevima za koje nije moguće predvidjeti ili opisati hidrodinamičko ponašanje fluida koji struji kroz reaktor, potrebno je eksperimentalno odrediti model strujanja kojim se može odrediti odstupanje od graničnih načina strujanja. To se određuje pomoću raspodjele vremena zadržavanja (RVZ).

Na ulazu u reaktor promatramo jedan element fluida, diferencijalni volumen kao što je prikazano na slici 2.4. Vjerojatnost s kojom će taj element nakon nekog vremena izaći iz reaktora izražava se s funkcijom raspodjele vremena zadržavanja (RVZ funkcija).



Slika 2.4. Raspodjela vremena zadržavanja u reaktoru

Uočava se da je RVZ funkcija statistička raspodjela, odnosno vjerojatnost te je ukupna vjerojatnost dana površinom ispod krivulje koja mora biti jednaka jedinici kao što je prikazano na slici 2.5. [10]



Slika 2.5. Funkcija raspodjele vremena zadržavanja, RVZ funkcija

Jednadžba koja odgovara RVZ funkciji i kojom se dobije da je iznos površine jednaka jedinici :

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

Iz slike 2.5. može se uočiti da vrijedi:

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

Vrijeme se zamjenjuje bezdimenzijskim vremenom, dijeljenjem sa srednjim vremenom zadržavanja:

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

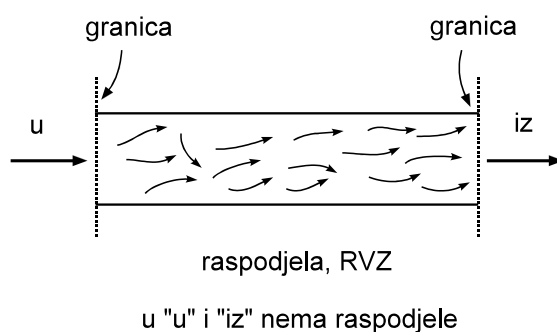
Srednje vrijeme zadržavanja za sustave sa stalnom gustoćom jednako je prostornom vremenu:

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

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

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

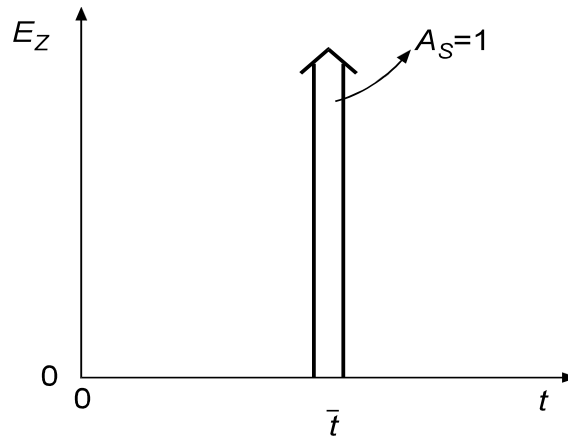
Ovako definirana RVZ funkcija zahtjeva sustave sa zatvorenim granicama („closed-closed systems“), slika 2.6. Pretpostavlja se da na ulazu i izlazu iz sustava fluid ne posjeduje raspodjelu vremena zadržavanja, drugim riječima fluid ulazi i izlazi iz sustava idealnim strujanjem.



Slika 2.6. „Zatvoreni“ sustav i definiranje RVZ funkcije

Granični slučajevi prolaza reakcijske smjese kroz reaktor su protjecanje idealnim strujanjem te protjecanje uz idealno miješanje. Idealno strujanje je način potpuno uređenog protjecanja, odnosno svaki element fluida ima potpuno novu maksimalnu vrijednost, ( $p=1$ ) 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. [11]

RVZ funkcija ima oblik kakav je prikazan na slici 2.7.



Slika 2.7. RVZ funkcija za idealno strujanje u cijevnom reaktoru

Površina ispod  $E_Z$  krivulje prikazane na slici 2.7. mora iznositi jedan što znači da je ordinata beskonačno velika. Naime, sve čestice fluida imaju jednako vrijeme zadržavanja u sustavu, što zapravo predstavlja srednje vrijeme zadržavanja pa na apscisi postoji samo jedna vrijednost.

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

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

i za  $t=0$  vrijedi :

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

### 2.3. MODELI STRUJANJA

U realnim sustavima ne dolazi do idealnog strujanja ili idealnog miješanja nego se javljaju odstupanja od graničnih oblika gibanja fluida. Takva odstupanja se interpretiraju različitim modelima koji se provjeravaju s eksperimentalno nađenim  $E_Z$  funkcijama. Postoji veliki broj tih modela koji se razlikuju prema složenosti matematičke funkcije te prema broju parametara. Mogu se podijeliti u dvije grupe. U prvu grupu ulaze modeli strujanja koji su izvedeni na osnovi hidrodinamičkih značajki sustava, odnosno koji sadrže



više ili manje potpuni opis strujanja. U toj grupi se nalaze laminarni model te model aksijalne disperzije kao najčešće primjenjivani u praksi. U ovome radu se primjenjivao model aksijalne disperzije. Drugu grupu čine modeli koji se mogu svrstati u mehanističke modele koji su izvedeni na osnovi određene teorijske predodžbe o načinu strujanja kroz reaktor. Takav je model npr. PKR model ili model od  $N$  ćelija vezanih slijedno. Unutar ove grupe posebnu grupu čine empirijski modeli koji su izvedeni iz matematičkih razmatranja dobivanja  $E_z$  krivulja, a obično su to statističke funkcije. Od takvim modela bitan je gama model čiju osnovu čini statistička gama raspodjela.

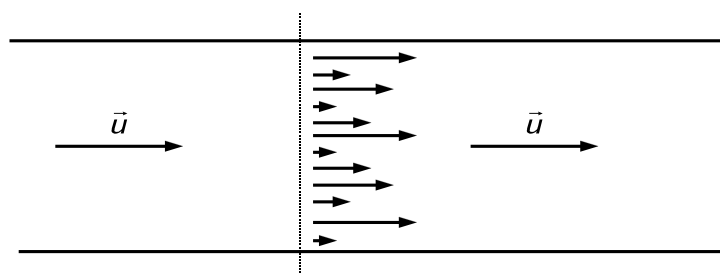
Modeli se testiraju s eksperimentalnim  $E_z$  krivuljama te se određuje točnost slaganja. Na taj način se dobivaju i nalaze brojčane vrijednosti odgovarajućih parametara u modelima. Iz veličina tih parametara može se zaključiti i o veličini odstupanja od graničnih oblika strujanja.

### 2.3.1. MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE

Model aksijalne disperzije koristi se za opis strujanja kroz cijevne reaktore koje malo odstupa od idealnoga strujanja, a posebno je pogodan za reaktore s nepokretnim spojem katalizatora. U osnovi tog modela je idealno strujanje kojem se pridodaje izvjesno makrostrujanje u smjeru osi, a koje se opisuje difuzijskim prijenosom. Difuzijski prijenos dan je Fickovim zakonom

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.16.)$$

Parametar  $D_e$  naziva se prosječnim koeficijentom difuzije ili koeficijentom disperzije. Na slici 2.8. prikazano je kako se zamišlja strujanje u cijevnom reaktoru prikazano prema modelu aksijalne disperzije.



2.8. Strujanje prema modelu aksijalne disperzije

Modelom aksijalne disperzije pokušalo se je aproksimirati realno strujanje uz određene pretpostavke:

- linearna brzina strujanja 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.

Izvedena jednadžba za prijenos tvari difuzijom i konvekcijom u nestacionarnom stanju (2.17.) prevodi se u bezdimenzijski oblik uvođenjem novih varijabli, bezdimenzijskog vremena (2.18.) i bezdimenzijske dužine (2.19.) i tada ona poprima novi oblik (2.20.)

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

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D_e}{uL} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.20.)$$

U izrazu (2.20.) može se nalaziti i Pecletova značajka (2.21.), a umjesto nje često se koristi disperzijska značajka  $DB$  koja je recipročna vrijednosti  $Pe$ , izraz 2.22.

$$Pe = \frac{uL}{D_e} \quad (2.21.)$$

$$DB = \frac{D_e}{uL} \quad (2.22.)$$

Ako  $DB \rightarrow 0$ , disperzija ne postoji i u tom slučaju strujanje je idealno. U drugom slučaju kada  $DB \rightarrow \infty$ , disperzija je potpuna, odnosno strujanje je tada uz idealno miješanje. Iz toga slijedi da realna strujanja imaju disperzijsku značajku između navedenih

graničnih vrijednosti. Pecletova značajka, odnosno disperzijska značajka jedini je parametar u modelu o kojem zavisi oblik dobivenih  $E_z$  krivulja. Opće rješenje jednadžbe 2.20. ovisi o pretpostavljenim graničnim uvjetima strujanja na ulazu i izlazu iz sustava. Jedino za sustav „zatvoreno – zatvoreno“, odnosno kada na ulazu i izlazu ne postoji disperzija, vrijedi zaključak da  $E_z$  funkcija stvarno predočava RVZ krivulju. Takvo rješenje je vrlo kompleksno, međutim, varijanca je povezana s disperzijskom značajkom znatno jednostavnijim izrazom 2.23.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{Pe} \{2Pe - 2 + 2\exp[-Pe]\} \quad (2.23.)$$

Za malena odstupanja od idealnoga strujanja, model aksijalne disperzije daje simetričnu raspodjelu, odnosno Gaussovu krivulju te se  $E_z$  funkcija može naći iz izraza 2.24.

$$E_z(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D_B}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4D_B}\right] \quad (2.24.)$$

Varijanca i Pecletova značajka povezani su izrazom 2.25.

$$\sigma_{\theta}^2 = 2D_B \quad (2.25.)$$

Aproksimacija složenog rješenja, odnosno izraz 2.26., predložen je za realna strujanja s disperzijskom značajkom manjom od 0.05 i za prethodno spomenuti sustav „zatvoreno-zatvoreno“.

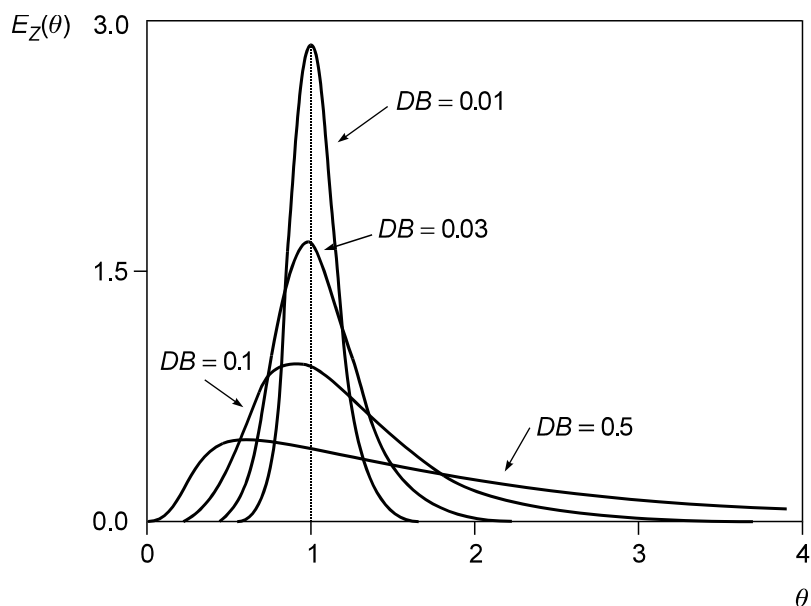
$$E_z(\theta) = \frac{1}{4\pi\theta^3 D_B} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta D_B}\right] \quad (2.26.)$$

Ako se radi o sustavu „otvoreno – otvoreno“, slika 2.9., odnosno ako na ulazu i izlazu iz reaktora postoji disperzija u strujanju,  $E_z$  funkcija dana je izrazom 2.27.

$$E_z(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta D_B}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta D_B}\right] \quad (2.27.)$$

Varijanca i Pecletova značajka u ovome slučaju za otvoreni sustav su povezani relacijom 2.28.

$$\sigma_{\theta}^2 = 2D_B + 8D_B^2 \quad (2.28.)$$

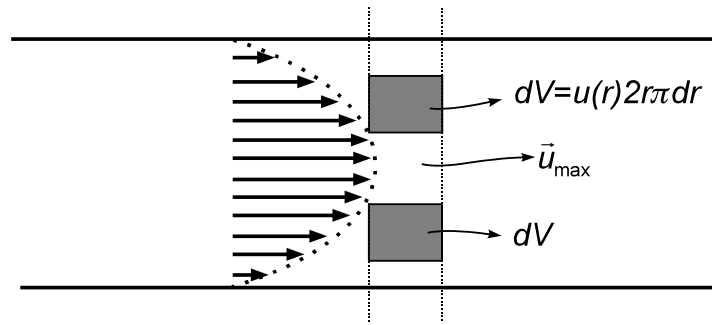


Slika 2.9. Model aksijalne disperzije, RVZ krivulje za sustav „otvoreno – otvoreno“

Model aksijalne disperzije realna je predodžba strujanja u reaktorima s nepokretnim slojem katalizatora gdje se javljaju mala odstupanja od idealnog strujanja uzrokovana različitim procesima kao i u reaktorima za homogene sustave u kojima osim difuzije postoji i vrtložna turbulencija. Kada je disperzijska značajka velika, a strujanje bliže idealnom miješanju, model može znatno odstupati od eksperimentalnih krivulja. Glavni uzrok tome je miješanje reakcijske smjese u aksijalnom smjeru kako se i pretpostavlja modelom aksijalne disperzije te istovremenim miješanjem po presijeku reaktora.

### 2.3.2. MODEL LAMINARNOG STRUJANJA

U cijevnim reaktorima brzina strujanja nije velika te je stoga u praksi često laminarno strujanje fluida, posebice kapljevitih homogenih sustava. Upravo laminarno strujanje i karakteriziraju male brzine strujanja medija. Također, laminarno strujanje je segregirano, slojevito, a definirano je profilom brzina po presjeku reaktora kao što je prikazano na slici 2.10. Ne postoji vektor brzine usmjeren u radialnom smjeru.



Slika 2.10. Model laminarnog strujanja

Brzina strujanja u nekoj točki presjeka reaktora, polumjera  $r$ , jednaka je izrazu 2.29.

$$u(r) = 2u_s \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.29.)$$

U prethodnom izrazu  $u_s$  je srednja brzina strujanja, dana je izrazom 2.30. Srednja brzina strujanja u središtu cijevi jednaka je maksimalnoj brzini strujanja.

$$u_s = \frac{v_0}{r_0^2 \pi} \quad (2.30.)$$

Srednje vrijeme zadržavanja dano je sljedećim izrazom gdje je  $L$  duljina reaktora.

$$\bar{t} = \frac{L}{u_s} \quad (2.31.)$$

U laminarnome strujanju raspored brzina po presjeku je paraboličan, slika 2.10., iz čega se može zaključiti da se sve molekule u reaktoru ne zadržavaju jednako dugo. Uz stijenku je vrijeme zadržavanja vrlo veliko dok je u centru cijevi minimalno.

Vrijeme zadržavanja za element fluida u točki polumjera  $r$  dano je relacijom 2.32.

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

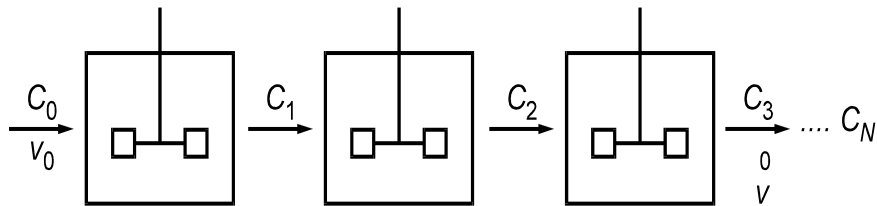
Oblik  $E_z$  krivulja razlikuje se ovisno o vremenu zadržavanja kod laminarnog strujanja. Uvijek se nalaze između graničnih krivulja idealnog strujanja i idealnog miješanja.

Raspodjela vremena zadržavanja dobiva se pomoću bilance množine tvari uz pretpostavku o laminarnom strujanju trasera  $\Delta V$  u cijevi.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u(r) \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (2.33.)$$

### 2.3.3. MODEL ĆELIJA VEZANIH SLIJEDNO (PKR MODEL)

Prema modelu ćelija vezanih slijedno ili PKR modelu strujanje kroz reaktorski sustav se zamišlja kao prolaz kroz niz protočno kotlastih reaktora (PKR) istih volumena uz idealno miješanje. PKR model prikazan je na slici 2.11. Predodžba ovog modela proizašla je iz vizualizacije strujanja kroz idealni cijevni reaktor u kojem se određeni element volumena reakcijske smjese kreće od ulaza do izlaza iz reaktora kao diferencijalni kotlasti reaktor ili reakcijska smjesa u reaktoru prolazi kroz niz diferencijalnih PKR reaktora.



Slika 2.11. Strujanje prema modelu ćelija vezanih u seriju

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

Izraz za  $N$  ćelija glasi

$$E_z(t) = \frac{t^{N-1}}{(N-1)! \bar{t}_i^N} \exp\left[-\frac{t}{\bar{t}_i}\right] \quad (2.34.)$$

Nedostatak ovoga modela je to što  $N$  može biti samo cjelobrojna vrijednost radi člana u nazivniku.

PKR model je jednostavan i primjenjuje se za strujanja koja se postižu uz idealno miješanje. Za velike vrijednosti  $N$ , model se dobro približava modelu aksijalne disperzije kada su dobivene RVZ krivulje simetrične.

### 2.3.4. GAMA MODEL

Gama model strujanja nema fizičku osnovu prema kojoj se formulirala matematička interpretacija. Taj model je izveden na temelju matematičkih razmatranja nedostataka PKR modela uzevši u obzir cjelobrojnost broja  $N$ . Postoji više gama modela koji se razlikuju ovisno o broju parametara.

Opći gama model dan je izrazom

$$E_z(t) = \frac{1}{d_g \Gamma(p)} (t-D)^p \exp\left[-\frac{t-D}{d_g}\right] \quad (2.35.)$$

Gama funkcija je definirana izrazom

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} x^{p-1} \exp[-x] dx \quad (2.36.)$$

$D$  je parametar koji bi odgovarao vremenu kašnjenja ili inercije sustava.

$P$  je parametar koji je odgovoran za stupanj miješanja u reaktoru. Što je manja njegova vrijednost, to je veća disperzija te je prolaz smjese bliži strujanju uz idealno miješanje. U suprotnom slučaju, ako parametar poprimi veće vrijednosti, strujanje se približava idealnome.

Parametar  $d_g$  je funkcija srednjeg vremena zadržavanja.

Nedostatak gama modela je pomanjkanje fizičke slike strujanja i mogućnosti predviđanja brojčanih vrijednosti parametara. Ovaj model se koristi za opis višefaznih strujanja. [1][4][5] [12]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovome radu proveden je niz eksperimenata sa ciljem određivanja raspodjele vremena zadržavanja u cijevnim reaktorima. Eksperimenti su provedeni na tri različite cijevi koje imaju i različita hidrodinamička svojstva. Određivala se raspodjela vremena zadržavanja trasera kalijeva klorida, KCl u struji vode. Kao rezultati su dobivene RVZ krivulje ovisno o različitim volumenima, odnosno koncentracijama i različitim protocima u tri vrste cijevnih modela reaktora. Važno je napomenuti da kemijska reakcija nije bila prisutna.

Prije samog eksperimentalnog rada potrebno je provesti baždarenje rotametra, odnosno odrediti protoke vode. Baždarenje se provodi počevši s najmanjom oznakom protoka na rotametu prema najvećoj. Da bi dobili točne podatke, mjerenje se provodi tri puta i računa se srednja vrijednost protoka. Prvo se odabire oznaka na rotametu te se kontrolira da protok bude konstantan tijekom mjerenja. Mjeri se protok u odabranoj cijevi čiji ventil za ulaz vode je ispust je otvoren, a na ostalim cijevima zatvoren. U vremenu od jedne minute mjeri se količina vode koja je istekla iz cijevi u menzuru. Dobije se protok vode koja prolazi kroz sustav kao vrijednost u mL/min. Mjerenje se ponavlja još dva puta, a zatim se provodi i na ostalim cijevima. Izmjerene vrijednosti prikazuje Tablica 3.1.

Tablica 3.1. Izmjereni protoci i srednja vrijednost volumnog protoka

Oznaka na rotametu	Mjerenje 1 mL/min	Mjerenje 2 mL/min	Mjerenje 3 mL/min	Srednji protok mL/min
2	117	117	118	117
2,5	151	153	152	152
3	182	182	182	182
3,5	210	215	213	213
4	236	241	245	241
4,5	264	264	262	263



### 3.1. PRINCIP METODE ODREĐIVANJA RVZ KRIVULJE

Diferencijalni volumen u kojem se želi odrediti RVZ potrebno je obilježiti na neki način i razlikovati od ostatka reakcijske smjese. Određena količina tvari koja se unosi u struju reakcijske smjese i može se pratiti i detektirati pogodnom analitičkom metodom, naziva se traser. Količina traseira koja se unosi predstavlja diferencijalni volumen. Mjerenjem raspodjele količine traseira na izlazu iz reaktora može se dobiti  $E_z$  funkcija za strujanje reakcijske smjese u cjelini. Bitno je da traser karakteriziraju određene značajke da bi bio upotrebljiv:

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

Bilo koja tvar koja zadovoljava ove uvjete može se koristiti kao traser. U kapljevitim sustavima i vodenim otopinama kao traser se često koristi otopina vodljivih soli, npr. KCl. Tako se mjerenjem vodljivosti na izlazu može pratiti promjena koncentracije te otopine tijekom vremena.

Za analizu je potrebno:

- poznavati funkciju poremećaja, odnosno zavisnosti količine traseira o vremenu tijekom unošenja u sustav,
- pogodnom eksperimentalnom metodom utvrditi zavisnost količine traseira 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,
- na osnovi usporedbe zaključiti o primjenljivosti modela i mogućem odstupanju stvarnog strujanja kroz reaktor od idealnih graničnih oblika.

Da bi se analiza mogla provesti, treba poznavati krivulje odziva za poznate funkcije poremećaja i pretpostavljene modele strujanja, a posebno za granične oblike.

Odziv za impulsni poremećaj je upravo  $E_z$  funkcija ili RVZ krivulja ispitivanog sustava. Najjednostavniji poremećaj je aproksimacija impulsa ili Diracova funkcija već definirana. Kako je RVZ funkcija u reaktoru definirana raspodjelom tvari u diferencijalnom volumenu po vremenu na izlazu, to će se impulsnim poremećajem upravo

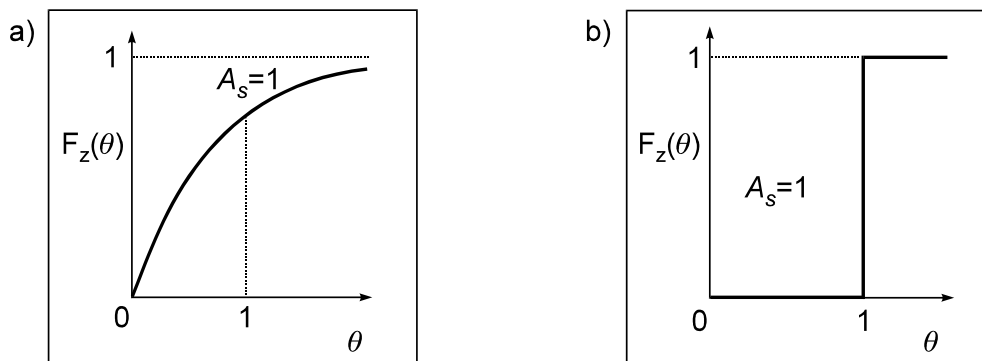
aproksimirati ta predodžba. Impulsni poremećaj se često koristi za hidrodinamičku analizu.

Uz impulsni poremećaj koristi se još i poremećaj u obliku skokomične ili step funkcije prikazane na slici 3.1. Skokomična funkcija definirana je sljedećim izrazom.

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

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

Skokomični poremećaj se ostvaruje uvođenjem stalne količine traseru od nekog nultog vremena te se prati promjena koncentracije na izlazu do stacionarnog stanja. Odzivna krivulja se često naziva  $F_z$  funkcija.

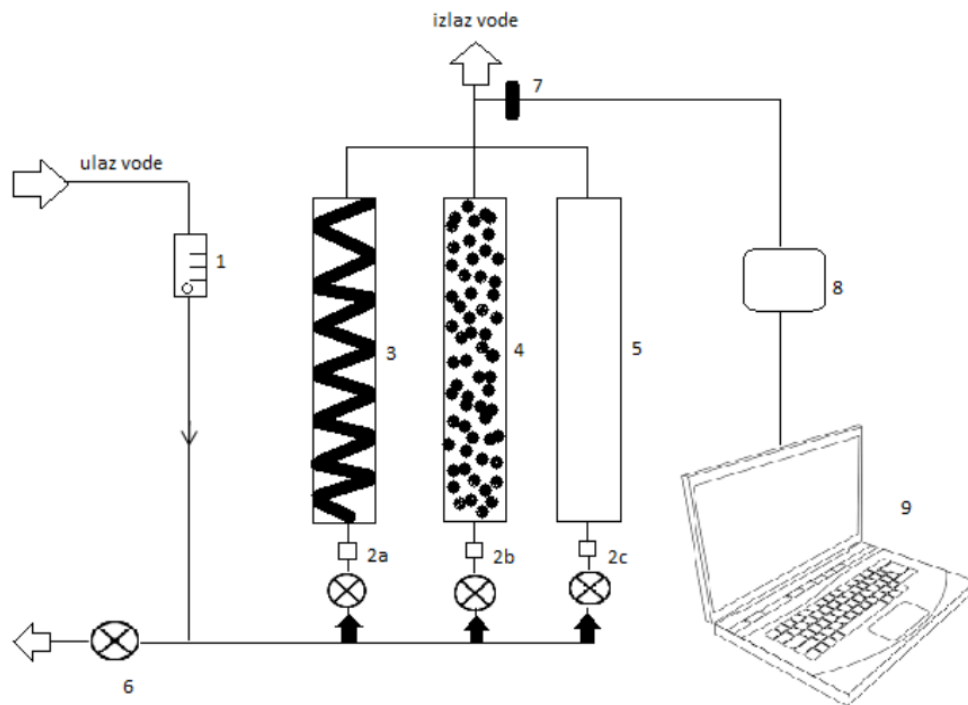


Slika 3.1. Funkcija odziva,  $F_z$  na skokomični poremećaj u a) sustavu s idealnim miješanjem i b) sustavu s idealnim strujanjem

Eksperimentalne vrijednosti  $E_z$  funkcije dobivaju se obično kao diskretni iznosi količina ili koncentracija traseru u zavisnosti o vremenu. Kako je  $E_z$  funkcija statistička funkcija, podaci se normaliziraju radi međusobne usporedbe eksperimentalnih rezultata. Normalizacija je postupak kojim se jednostavno utvrđuje da je površina ispod krivulje jedinična, odnosno da je zbroj svih pojedinačnih vrijednosti RVZ funkcija jednak jedinici.

[1] [13] [14]

### 3.2. SHEMA APARATURE I IZVEDBA MJERENJA



Slika 3.2. Shema eksperimentalne aparature

Legenda:

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1- Rotametar                    | 5- Ravna prazna cijev                  |
| 2- Mjesta ulaza trasera         | 6- Pipac za ispuštanje vode iz sustava |
| 3- Spiralna cijev               | 7- Konduktometrijska ćelija            |
| 4- Cijev sa staklenim kuglicama | 8- Konduktometar                       |
|                                 | 9- Prijenosno računalo                 |

Osnovna aparatura koja se koristila u eksperimentalnom radu prikazana na shematskom prikazu, slika 3.2., sastoji se od tri različite cijevi, odnosno tri različita cijevna reaktora. Kroz cijevne reaktore struji voda. Vodovodna voda struji do rotametra (1) pomoću kojega se kontrolira željeni protok. Voda dalje struji do cijevi 1, 2 i 3. Ovisno o tome za koju cijev se rade mjerenja pipac za ispuštanje vode (6) se zatvara. Na izlazu iz cijevi nalazi se uređaj za mjerenje vodljivosti kapljice (7). Preko konduktometra (8) se izlazni signal vodi do računala koji ga pretvara u naponski signal i prikazuje RVZ krivulju u programu NI SignalExpress. Tako prikupljeni podaci se zatim obrađuju u Microsoft Excel programu. [7]

Kao što je prethodno navedeno preko rotametra se regulira željeni protok i pri tome protoku se u odabranu cijev unosi određena količina trasera. U ovome slučaju traser je

prethodno pripremljena otopina KCl-a u vodi. Rađeno je s dva volumena trasera. U prvome slučaju riječ je o 10 mg kalijeva klorida otopljenoga u 50 mL destilirane vode i unošeno je 1 mL trasera u cijevne modele. A u drugome slučaju unosi se ista otopina, ali volumena 0,5 mL trasera. Nakon injektiranja trasera u cijevi prati se konduktivnost odnosno vodljivost vode koja najčešće ima vrijednost između 0,55 i 0,65mS a u ovom slučaju je varirala od 0,61 do 0,62mS ovisno o danu izvođenja eksperimenta. Kada konduktometar prikaže takvu vrijednost, upućuje na to da je traser izašao iz sustava i mjerenje se prekida. Eksperimentalni podaci se pohranjuju u računalo i obrađuju se u već navedenom programu Microsoft Excel.

Prije početka eksperimenta napravljen je pokus sa obojenim traserom kako bi se moglo jasno vidjeti njegovo strujanje kroz cijev. Uočavaju se razlike u putovanju trasera s obzirom na izvedbu cijevi što je jasan pokazatelj različitog stupnja miješanja. U prvoj, ravnoj praznoj cijevi obojani traser je putovao nejednoliko i bilo je duže vrijeme zadržavanja, dok je u ravnoj cijevi s kuglicama strujanje teklo brže. U trećoj, spiralnoj cijevi najjasnije se mogla pratiti putanja trasera kroz cijev. Slika 3.3. prikazuje strujanje obojenog trasera kroz sve cijevi.

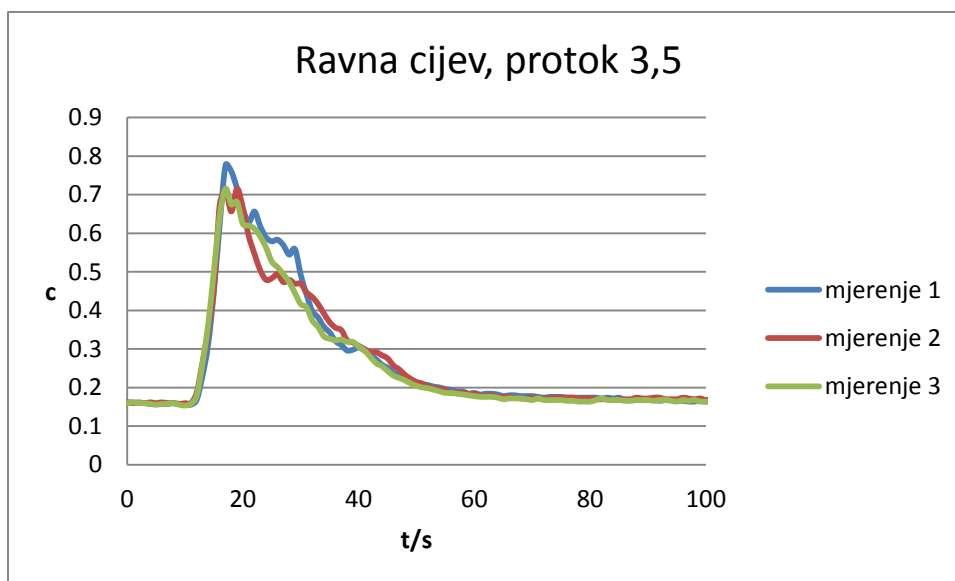


Slika 3.3. Strujanje obojenog trasera u a) ravnoj cijevi, b) ravnoj cijevi sa staklenim kuglicama, c) spiralnoj cijevi

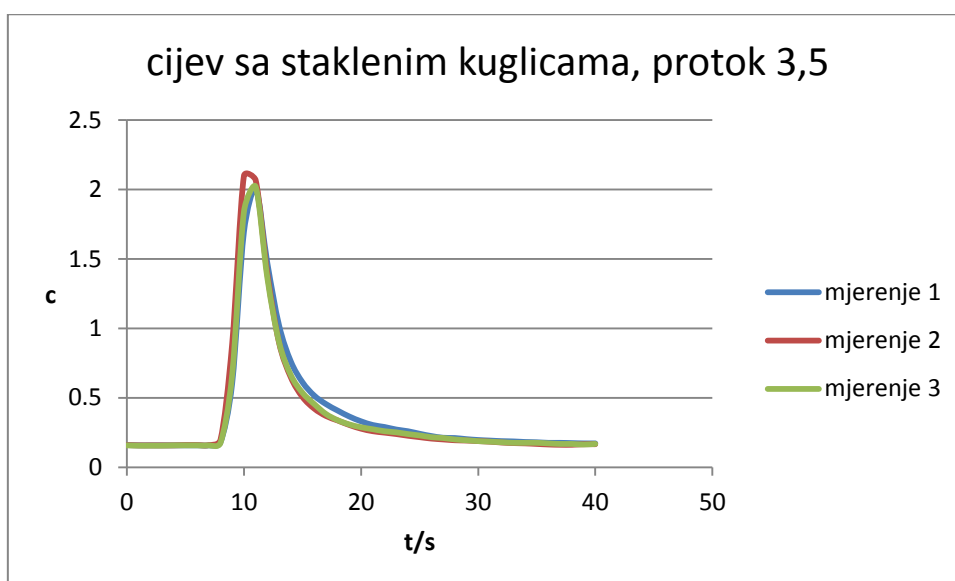
### 3.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA

Eksperimentalno dobivene odzivne krivulje, odnosno C-krivulje koje prikazuju ovisnost koncentracije traseera, koja je proporcionalna vodljivosti, o vremenu daju uvid u vremensko zadržavanje traseera u cijevi.

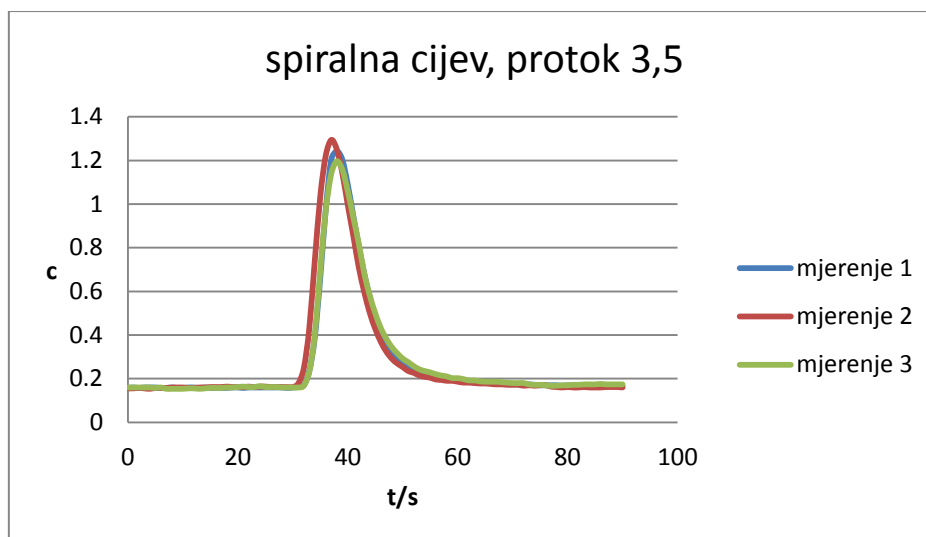
a) Usporedba RVZ krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta tri puta u istim uvjetima



Slika 3.4. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena 0,5 mL i protoka 3,5 na rotametri (213 mL/min) u ravnoj cijevi



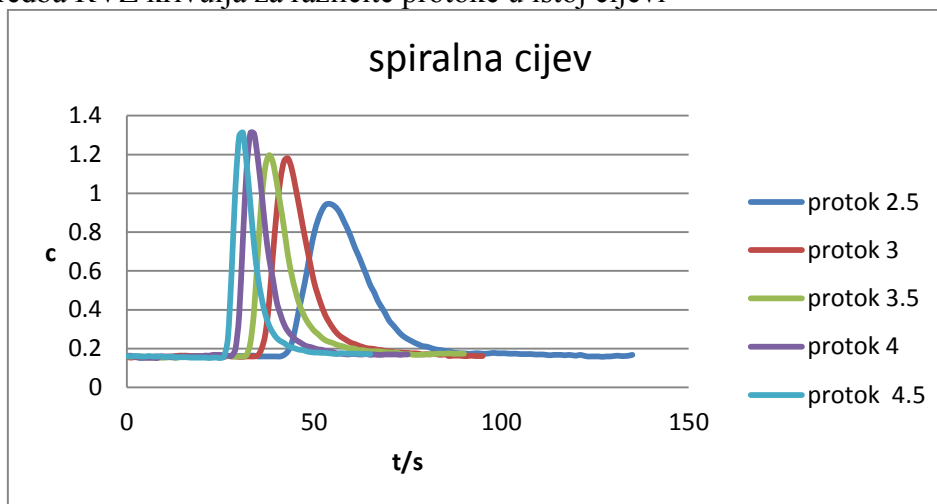
Slika 3.5. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena 0,5 mL i protoka 3,5 na rotametri (213 mL/min) u cijevi sa staklenim kuglicama



Slika 3.6. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena 0,5 mL i protoka 3,5 na rotametu (213 mL/min) u spiralnoj cijevi

Prethodne tri slike prikazuju tri krivulje dobivene ponavljanjem u istoj cijevi pri istim navedenim uvjetima. Iz priloženoga se može primijetiti da su odstupanja vrlo mala, nešto više primjetljivija u ravnoj cijevi.

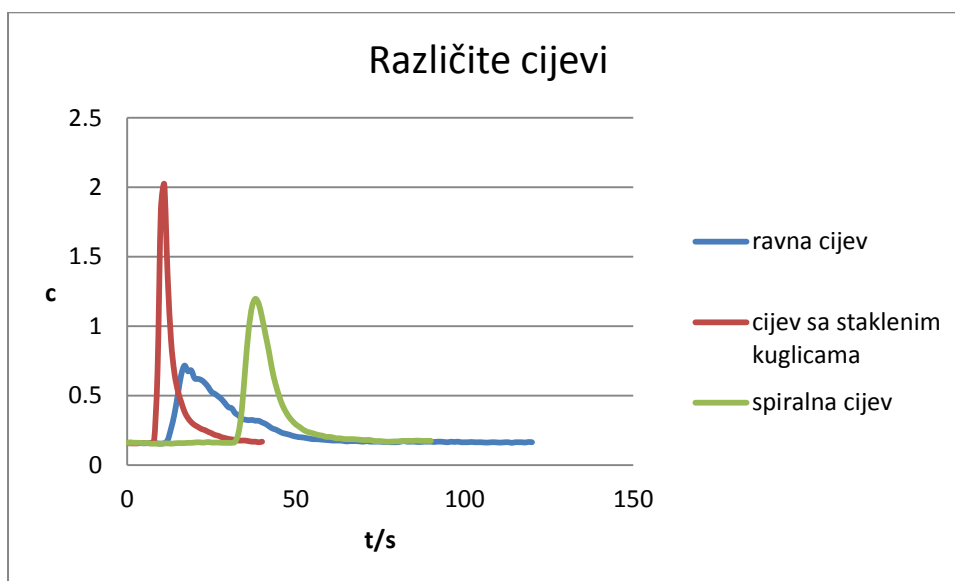
b) Usporedba RVZ krivulja za različite protoke u istoj cijevi



Slika 3.7. Promjena protoka u spiralnoj cijevi pri volumenu trasera 0,5 mL

Slika 3.7. prikazuje promjenu protoka u spiralnoj cijevi pri konstantnom volumenu trasera od 0,5 mL. Iz slike je vidljivo da je pri većim protocima veća i vodljivost, odnosno koncentracija, a vrijeme zadržavanja u cijevi je manje. Pri manjim protocima, manja je i koncentracija, a traser se zadržava duže u cijevi.

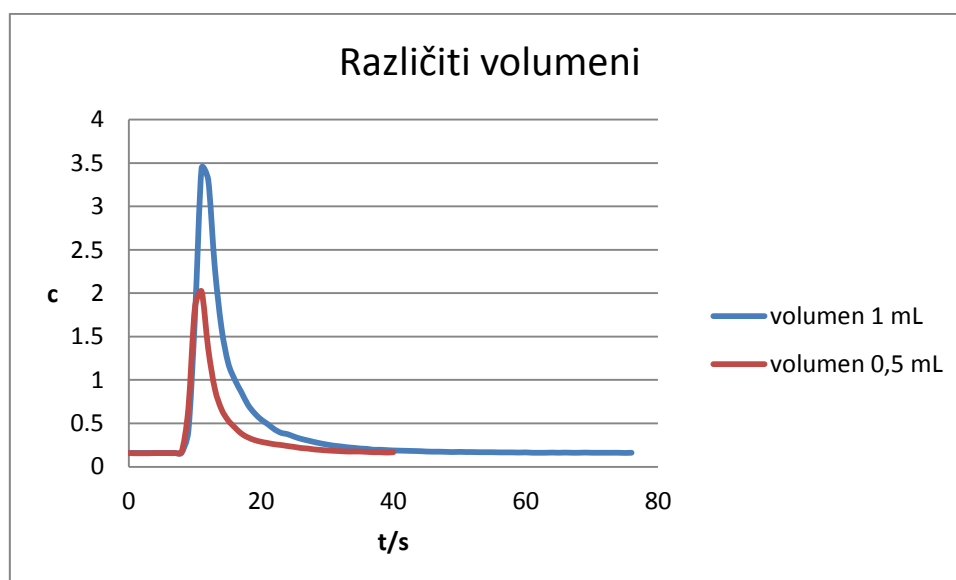
c) Usporedba RVZ krivulja u različitim cijevima



Slika 3.8. različite cijevi pri istom protoku 3,5 (213 mL/min) i volumenu 0,5 mL

Na gornjoj slici su prikazane krivulje za različite cijevi korištene u ovom eksperimentalnom radu. Volumen i protok je ostao konstantan. U cijevi sa staklenim kuglicama vrijeme zadržavanja je najmanje, a koncentracija, odnosno odziv najveći.

d) Usporedba RVZ krivulja s obzirom na volumene



Slika 3.9. Promjena volumena trasera u cijevi sa staklenim kuglicama pri protoku 3,5 (213 mL/min)

Na prethodnoj slici 3.9. je prikazan odnos različitih volumena koji su se koristili u ovom radu. Porastom volumena raste i vodljivost te vrijeme zadržavanja.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Odstupanje strujanja u cijevima od graničnih tipova strujanja mogu se primijetiti na osnovi normalizirane i u bezdimenzijskom obliku izvedene RVZ funkcije. Da bi se kvantitativno odredilo odstupanje eksperimentalna RVZ krivulja se može testirati nekim od pogodnih modela strujanja koji se izabiru na temelju izgleda krivulje. Uz normalizaciju podataka i prevođenje u bezdimenzijski oblik, računa se i srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$  i disperzijski broj  $DB$ , odnosno Pecletova značajka  $Pe$  kao i prikaz bezdimenzijskih RVZ krivulja.

### 4.1. OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAK

Iz eksperimentalno dobivenih podataka koncentracije trasera  $c_i$  i pripadajućeg vremenskog intervala  $\Delta t$  koje iznosi 1 sekundu računaju se sljedeće vrijednosti korištenjem računalnog programa Microsoft Excel:

- 1) odredi se minimalna koncentracija trasera  $c_{imin}$
- 2) provodi se normalizacija prema izrazu 4.1.

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

- 3) računa se približna površina  $Q$  ispod krivulje prema izrazu 4.2.

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

- 4) zatim se prema izrazu 4.3. računa srednje vrijeme zadržavanja  $\bar{t}$

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

- 5) nakon toga je potrebno izračunati bezdimenzijsko vrijeme  $\theta$ , prema izrazu 4.4.

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

- 6) da bi se izračunala varijanca  $\sigma^2$ , koristi se jednadžba 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) zatim se računa bezdimenzijska varijanca  $\sigma_\theta^2$ , 4.6.

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

8) disperzijski broj  $DB_1$ , 4.7.

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

9) Pecletova značajka  $Pe_1$  prema izrazu 4.8.

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

10)  $E_Z$  funkcija definirana bezdimenzijskim vremenom  $\theta$  prema jednažbi 4.9.

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

11)  $DB_2$  je potrebno izračunati prema izrazu 4.10.

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

12) te  $Pe_2$  prema izrazu 4.8.

## 4.2. TABLIČNI PRIKAZ PARAMETARA MODELA

### a) Ravna cijev

Tablica 4.1. Ravna cijev, volumen trasera 0,5 mL

Protok mL/min	$\bar{t} / s$	$DB_1 * 10^2$	$DB_2 * 10^2$	$Pe_1$	$Pe_2$
117	75,24	20,67	13,44	4,86	7,46
152	60,10	24,36	15,16	4,11	6,60
182	38,52	18,97	12,61	5,28	7,94
213	31,72	17,22	11,72	5,82	8,55
241	28,07	16,88	11,54	5,96	8,69
263	24,20	13,90	9,92	7,34	10,20

Tablica 4.2. Ravna cijev, volumen trasera 1 mL

Protok mL/min	$\bar{t} / s$	$DB_1 * 10^2$	$DB_2 * 10^2$	$Pe_1$	$Pe_2$
117	66,43	11,10	8,32	9,01	12,01
152	51,42	12,93	9,42	7,12	10,61
182	42,18	17,67	11,95	5,66	8,37
213	38,73	17,99	12,12	5,56	8,25
241	32,63	17,68	11,96	5,66	8,36
263	31,51	20,00	13,14	4,97	7,61

### b) Cijev sa staklenim kuglicama

Tablica 4.3. Cijev sa staklenim kuglicama, volumen trasera 0,5 mL

Protok mL/min	$\bar{t} / s$	$DB_1 * 10^2$	$DB_2 * 10^2$	$Pe_1$	$Pe_2$
117	26,83	8,76	6,87	11,48	14,62
152	19,59	7,10	5,77	14,12	17,37
182	16,09	6,46	5,33	15,52	18,81
213	13,59	6,92	5,65	14,49	17,75
241	12,58	6,74	5,52	14,94	18,22
263	12,06	4,86	4,16	20,67	24,10

Tablica 4.4. Cijev sa staklenim kuglicama, volumen traseru 1 mL

Protok mL/min	$\bar{t} / s$	$DB_1 * 10^2$	$DB_2 * 10^2$	$Pe_1$	$Pe_2$
117	26,38	10,66	8,06	9,38	12,41
152	20,66	8,09	6,43	12,36	15,54
182	16,86	7,82	6,26	12,79	15,99
213	15,21	7,74	6,20	12,92	16,12
241	14,33	7,11	5,76	14,06	17,31
263	14,24	7,03	5,72	14,23	17,48

c) Spiralna cijev

Tablica 4.5. Spiralna cijev, volumen traseru 0,5 mL

Protok mL/min	$\bar{t} / s$	$DB_1 * 10^2$	$DB_2 * 10^2$	$Pe_1$	$Pe_2$
117	76,76	2,84	2,58	35,25	38,87
152	60,69	2,73	2,51	36,32	39,96
182	47,16	2,45	2,25	41,32	44,99
213	41,85	2,37	2,19	43,02	46,70
241	36,80	2,21	2,04	47,42	51,12
263	33,07	1,98	1,84	52,62	56,35

Tablica 4.6. Spiralna cijev, volumen traseru 1 mL

Protok mL/min	$\bar{t} / s$	$DB_1 * 10^2$	$DB_2 * 10^2$	$Pe_1$	$Pe_2$
117	74,14	2,33	2,15	42,89	46,58
152	59,71	2,66	2,43	37,12	41,17
182	49,22	2,70	2,46	37,10	40,74
213	42,26	2,76	2,51	36,32	39,96
241	37,79	2,92	2,65	34,25	37,87
263	34,88	3,88	3,39	28,28	31,81

Iz prikazanih tablica vidljivo je da se povećanjem protoka smanjuje srednje vrijeme zadržavanja. Srednje vrijeme zadržavanja je veće kod unosa traseru većeg volumena. Traser se najduže zadržava u spiralnoj cijevi koja je dugačka tri metra, dok su ostale cijevi dugačke jedan metar. Najkraće srednje vrijeme zadržavanja je u ravnoj cijevi sa staklenim kuglicama zbog hidrodinamičkih uvjeta. U cijevi sa staklenim kuglicama manji je slobodan volumen strujanja fluida pa da bi se održao stalan protok, brzina strujanja mora

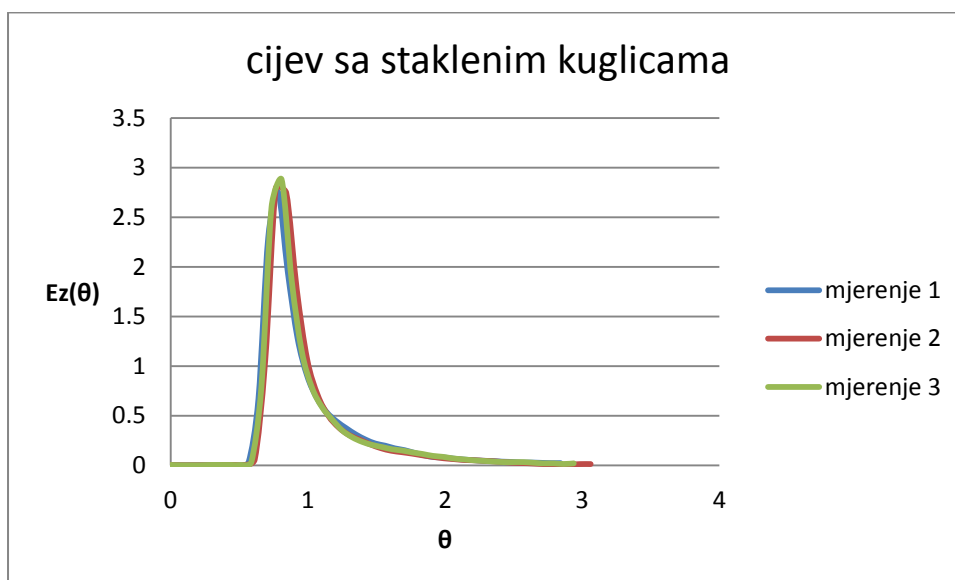
biti veća. Što je veća brzina strujanja, vrijeme zadržavanja je manje te se sustav više približava idealnome. Nadalje, kako raste protok fluida, tako se smanjuje disperzijski broj, a povećava Pecletova značajka. Disperzijski broj je veći kod većeg volumena traser. Također, on se mijenja ovisno o vrsti cijevi kroz koje struji fluid. Najveći je u ravnoj cijevi, a najmanji u spiralnoj cijevi. Disperzijski broj ukazuje na odstupanje od idealnosti te možemo zaključiti da je strujanje u spiralnoj cijevi najbliže idealnome strujanju.

### 4.3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH RVZ KRIVULJA

Uspoređuju su RVZ krivulje u bezdimenzijskom obliku, 4.11., kako bi se bolje moglo promatrati odstupanje od idealnosti jer u idealnom strujanju površina ispod krivulje bi trebala biti jednaka jedinici.

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

a) Usporedba  $E_z(\theta)$  krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta tri puta u istim uvjetima

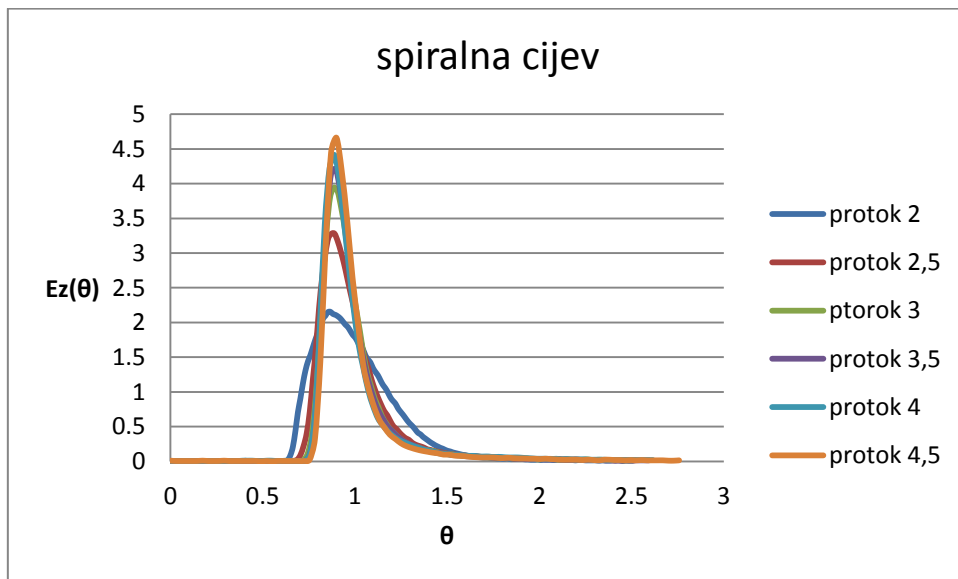


Slika 4.1. Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcija za tri različita mjerenje pri istim uvjetima volumena 0,5 mL i protoka 3,5 na rotametu (213 mL/min) u cijevi sa staklenim kuglica

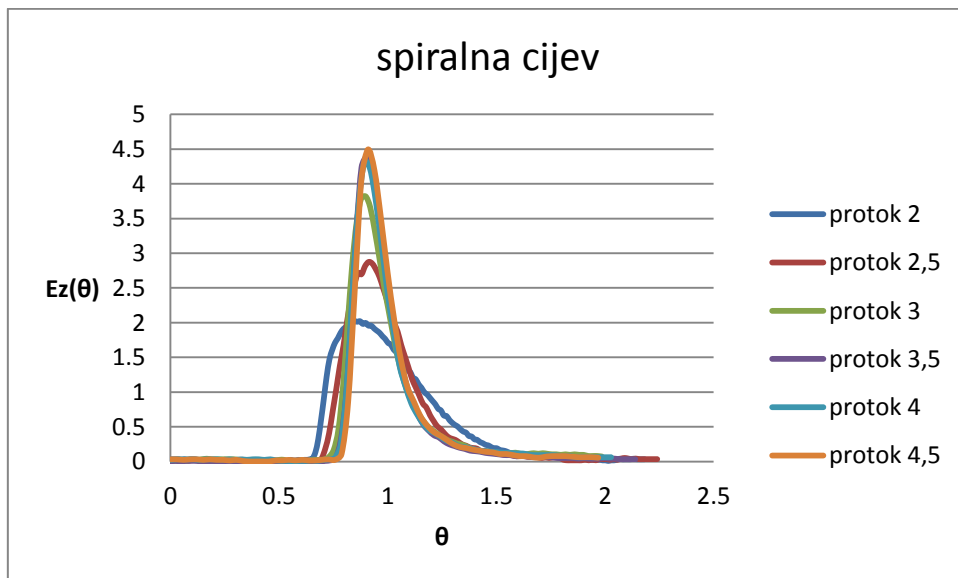
Slika 4.1. prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja za tri provedbe eksperimenta pri protoku 3,5, odnosno (213 mL/min) i volumenu traser od 0,5 mL. Vidljivo je da nema

prevelikih odstupanja u mjerenjima te da strujanje u cijevi sa staklenim kuglicama teži idealnosti.

b) Usporedba  $E_Z(\theta)$  krivulja za različite protoke u istoj cijevi



Slika 4.2. Usporedba  $E_Z(\theta)$  funkcija pri različitim protocima u spiralnoj cijevi za volumen trasera 1 mL

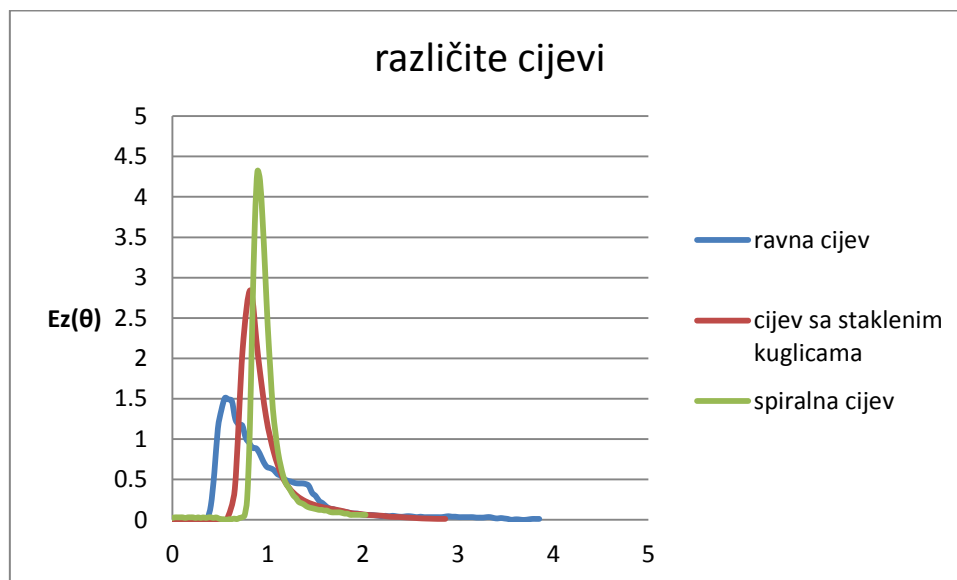


Slika 4.3. Usporedba  $E_Z(\theta)$  funkcija pri različitim protocima u spiralnoj cijevi za volumen trasera 0,5 mL

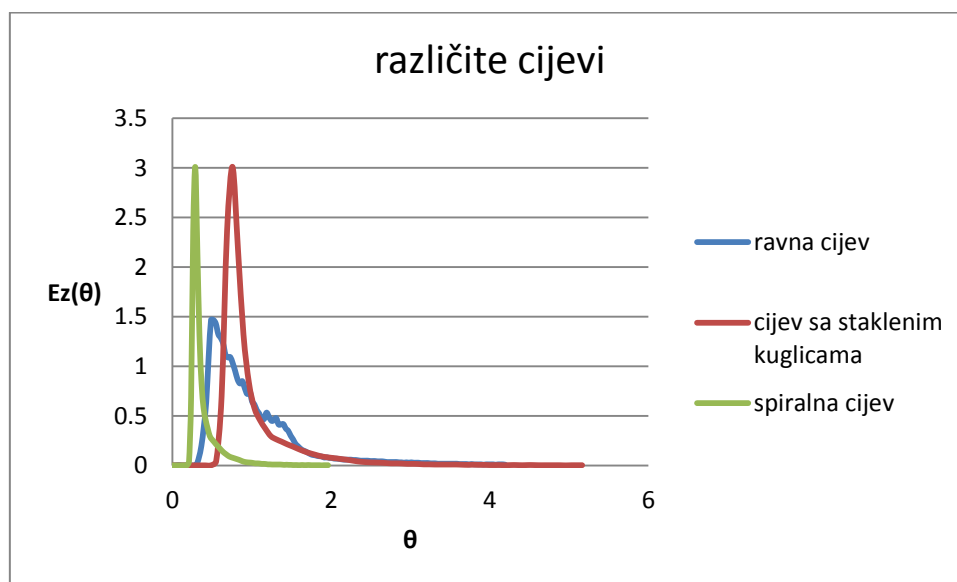
Raspodjela vremena zadržavanja u istoj cijevi, u ovom slučaju spiralnoj cijevi prikazana je na slici 4.2. za volumen trasera 1 mL i na slici 4.3. za volumen od 0,5 mL.

Strujanje je idealnije što je protok veći i odziv je bolji. Impulsni poremećaj je bolji kod manjega volumena zbog bržeg injektiranja trasera u sustav.

c) Usporedba  $E_z(\theta)$  krivulja u različitim cijevima



Slika 4.4. Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcija za različite cijevi pri protoku 4 (241 mL/min) i volumenu od 0,5 mL



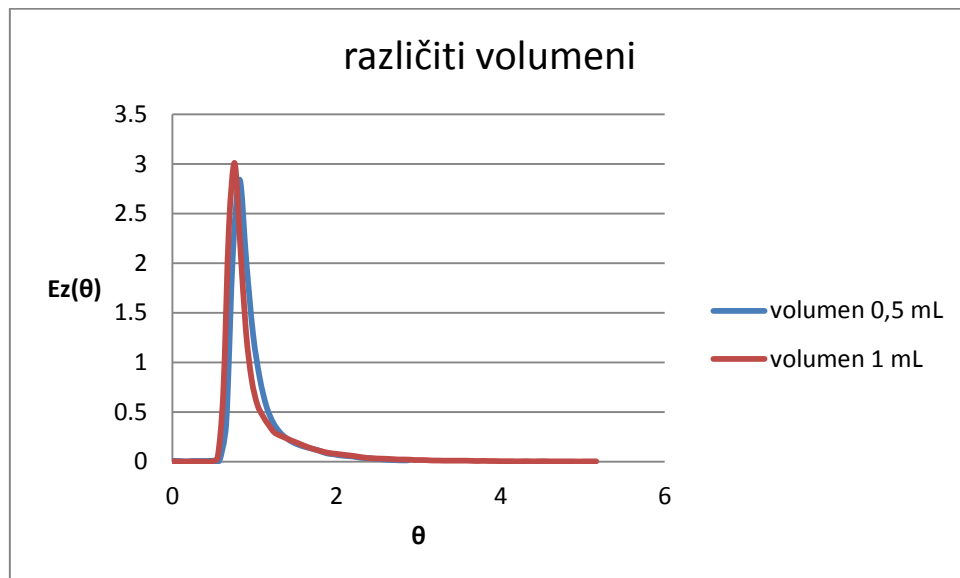
Slika 4.5. Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcija za različite cijevi pri protoku 4 (241 mL/min) i volumenu od 1 mL

U ravnoj cijevi strujanje je najmanje idealno, dok je strujanje u spiralnoj cijevi najbliže idealnom graničnom strujanju jer je to cijev manjeg protoka. Na gornjoj slici, 4.4.,

može se i vidjeti da je odziv za cijev sa staklenim kuglicama idealan te je vrijeme zadržavanja manje od ravne cijevi. U eksperimentu u koji je unešen traser volumena 1 mL, slika 4.5., došlo je do odstupanja u raspodjeli vremena zadržavanja za spiralnu cijev koja se uvelike odmaknula od idealnog strujanja.

Sljedeća slika 4.6. prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja u cijevi sa spiralnim kuglicama pri protoku 4, odnosno protoku iznosa 241 mL/min za različite volumene traseira od 0,5 i 1 mL. Odziv bi trebao biti bolji za manji volumen koji pogoduje idealnom strujanju.

d) Usporedba  $E_z(\theta)$  krivulja s obzirom na volumene



Slika 4.6. Usporedba  $E_z(\theta)$  funkcija za različite volumene u cijevi sa staklenim kuglicama pri protoku 4 (241 mL/min)

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovi provedenih eksperimentalnih određivanja RVZ funkcija u modelnim cijevima i provedene statističke obrade, odnosno testiranja modela aksijalne disperzije, može se izvesti nekoliko osnovnih zaključaka:

- 1) Srednje vrijeme zadržavanja najmanje je u cijevi napunjenoj staklenim kuglicama zbog toga što se u njoj ostvaruje značajno veća brzina strujanja trasera zbog smanjenog slobodnog volumena.
- 2) Najmanje vrijednosti disperzijskog broja, odnosno najidealnije strujanje postiže se u spiralnoj cijevi. Razlog tome je što je spiralna cijev značajno duža od ostale dvije cijevi (3:1 metar) što pridonosi većem omjeru duljina kroz polumjer i to omogućava formiranje čepolikog (idealnog) strujanja.
- 3) U ravnoj praznoj cijevi najviše je izražena disperzija u sustavu što se očituje najduljim vremenom potrebnim za izlazak trasera. Također prilikom obrade rezultata zbog povremeno preranog prekida eksperimenata, dobivene su nelogične vrijednosti disperzijskog broja.
- 4) Ostale veličine čiji je utjecaj provjeren u ovome radu (volumen trasera 0,5 i 1 mL) nisu značajno utjecale na odzivne krivulje kao ni na vrijeme zadržavanja.

U nastavku rada na ovome području bilo bi važno osigurati uvjete rada u većem području protoka za što je potrebna instalacija novog rotametra.



## LITERATURA

1. Z. Gomzi, Kemijski reaktori, Hinus, Zagreb, 1998
2. J.Vojtešek, P. Dostal, P. Krivankova, *Steady –State and Dynamic Analysis od a Tubular Chemical Reactor*
3. M. Gavrilesco, R. Z. Tudose, Residence Time Distribution of the Liquid Phase in a Concentric- Tube Airlift Reactor, *Chemical Engineering and Processing*, 38 (1999) 225-238
4. O. Levespiel, „*Chemical Reaction Engineering*, third edition, John Wiley & Sons, New York, 1999
5. K. Ekambara, J.B. Joshi, Axial mixing in laminar pipe flows, *Chemical Engineering Science*, 59 (2004) 3929-3944
6. Carola G. C. C. Gutierrez, Eduardo F.T.S. Dias, Jorge A.W. Gut, Residence time distribution in holding tubes using generalized convection model and numerical convolution for non- ideal tracer detection, *Journal of Food Engineering*, 98 (2010) 248-256
7. V. Kosar, Priručnik za vježbe iz Kemijskih reaktora, Zagreb, 2012
8. Fogler S. H., *Elementsof Chemical ReactionEngineering*, Ptentice-Hall, EnglewoodCliffs, New Jersey, 1986.
9. Nauman, E. B., Buffham, B. A., *Mixingin Continous Flow Systems*, J. Wiley, New York, 1983.
10. Wen C. Y. and Fan L. T., *Models for Flow Systems and Chemical Reactors*, Marcel Dekker, New York, 1975.
11. Danckwerts P. V., *Gas-Liquid Reactions*, McGraw-Hill, New York, 1970.
12. Danckwerts P. V., *Chem. Eng. Sci.*, 2 (1953.) 78-94
13. Danckwerts P. V., *A. I. Ch. E. J.*, 1, 4 (1955.) 56-62
14. Himmelblau, D. M., *Process Analysisby Statistical Methods*, J. Wiley, New York, 1970

## POPIS OZNAKA

$C$  - koncentracija,  $\text{mol dm}^{-3}$   
 $C_A$  - koncentracija tvari A,  $\text{mol dm}^{-3}$   
 $D$  - parametar u gama modelu strujanja  
 $D_e$  - prosječna (efektivna) difuznost u osnom smjeru,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$   
 $DB$  - 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,  $\text{mol s}^{-1}$   
 $F$  - ukupni molni protok,  $\text{mol s}^{-1}$   
 $L$  - 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,  $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$   
 $t$  - vrijeme, s  
 $\bar{t}$  - srednje vrijeme zadržavanja, s  
 $u$  - linearna brzina,  $\text{m s}^{-1}$   
 $u_s$  - srednja linearna brzina,  $\text{m s}^{-1}$   
 $V$  - volumen,  $\text{m}^3$   
 $v$  - volumna brzina,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$   
 $v_0$  - 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,  $\text{kg m}^{-3}$   
 $\sigma^2$  - varijanca  
 $\sigma_\theta^2$  - varijanca u bezdimenzijskom obliku  
 $\tau$  - prostorno vrijeme, s

## ŽIVOTOPIS

### Osobni podaci:

Iva Čutura

Poljska 20

32100 Vinkovci

Telefon: 032/ 333- 435

Mobitel: 095/ 5225708

E-mail: ivacutura@gmail.com

Datum rođenja: 01.08.1994.

Mjesto rođenja: Vinkovci

### Obrazovanje:

2013.-2016. - Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, studij Ekoinženjerstvo,  
Zagreb

2009.-2013. - Opća gimnazija Matije Antuna Reljkovića, Vinkovci

2001.-2009. - Osnovna škola Antun Gustav Matoš, Vinkovci

### Osobne vještine i sposobnosti:

Strani jezici: Engleski jezik (B2), Njemački jezik (B2)

Računalne vještine: Microsoft Office paket, Scientist

Socijalne vještine: timski rad, komunikativnost, odgovornost

Vozačka dozvola „B“ kategorije

Stručna praksa: SLADORANA d. o. o. Županja