

# Raspodjela vremena zadržavanja u cijevnim reaktorima

---

**Volarić, Iva**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:128828>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ  
STUDIJ EKOINŽENJERSTVA

IVA VOLARIĆ

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, RUJAN 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Iva Volarić

Predala je izrađen završni rad dana: 17. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Ana Vrsalović Presečki, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Miroslav Jerković, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Domagoj Vrsaljko, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 20. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ  
STUDIJ EKOINŽENJERSTVA

IVA VOLARIĆ  
RASPODJELA VREMENA ZADRŽAVANJA U CIJEVNIM REAKTORIMA  
ZAVRŠNI RAD

VODITELJ RADA: IZV.PROF.DR.SC. VANJA KOSAR

ZAGREB, RUJAN 2024.

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada bila je odrediti raspodjelu vremena zadržavanja u cijevnim reaktorima. Eksperiment je rađen u tri različite cijevi: praznoj cijevi, cijevi punjenoj staklenim kuglicama i spiralnoj cijevi koja je duža nego prethodne dvije cijevi. Kako bi se moglo utvrditi odstupanje promatranog sustava od idealnog određujemo raspodjelu vremena zadržavanja. Obradom eksperimentalnih podataka dobivene su različite vrijednosti vremena zadržavanja i disperzijskog broja.

Ključne riječi: cijevni reaktor, idealno strujanje, raspodjela vremena zadržavanja, disperzijski broj

## ABSTRACT

The topic of this final work was to determine the distributio of residence time in tubular reactor. The experiment was done in three different tubes: an empty tube, a tube filled with glass beads and a spiral tube that is longer than the previous two tubes. In order to determine the deviation of the observed system from the ideal, we determine the residence time distribution. By processing experimental data, different values of residence time and dispersion number were obtained.

Key words: tubular reactor, ideal flow, residence time distribution, dispersion number

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1 Cijevni reaktor.....	2
2.2 Raspodjela vremena zadržavanja.....	4
2.3 Modeli strujanja.....	6
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	12
3.1 Metoda određivanja RVZ funkcija.....	12
3.2 Opis aparature i mjerenja.....	12
3.3 Prikaz eksperimentalni RZV krivulja.....	13
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	18
4.1 Obrada eksperimentalnih podataka.....	18
4.2 Tablični prikaz parametara modela.....	19
4.3 Prikaz bezdimenzijskih RZV krivulja.....	21
5. ZAKLJUČAK.....	26
LITERATURA.....	27
POPIS OZNAKA.....	28

## 1. UVOD

Kemijski reaktor je bitna i nezaobilazna jedinica u svakom kemijskom industrijskom procesu. To je prostor u kojem se odvija kemijska reakcija. On je polazna osnova u dimenzioniranju i projektiranju određenog kemijskog procesa. Konačni konstruktivni oblik kemijskog reaktora određen je reakcijskim uvjetima, načinom rada i kapacitetom proizvodnje, a osniva se na uobičajenim načelima strojarskih konstrukcija. Svrha ovog rada bila je upoznavanje s fizičkom slikom strujanja u cijevnim reaktorima. Prilikom prolaza reakcijske smjese kroz realne otvorene reakcijske sustave uvijek dolazi do odstupanja od graničnih slučajeva strujanja. Granični slučajevi su protjecanje kroz reaktor idealnim strujanjem te protjecanje uz idealno miješanje. Odstupanja od idealnosti moguće je opisati eksperimentalnim određivanjem funkcije raspodjele vremena zadržavanja. 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. Pojam raspodjele vremena zadržavanja nije vezan isključivo za kemijske reaktore. Ispitivanja raspodjele vremena zadržavanja koriste se za proučavanje strujanja fluida u svrhu određivanja stupnja miješanja, ali i problema u strujanju kao što su recirkulacija, promjena smjera ili stagnacija. I u drugim tipovima procesne opreme, poput izmjenjivača topline ili punjenih kolona, takva strujanja treba izbjeći jer smanjuju učinkovitost procesne jedinice. U prehrambenoj industriji, raspodjela temperature i vremena zadržavanja u cijevima važna je za postizanje propisane kvalitete proizvoda. Ovakve su analize, također, izuzetno bitne pri mikrobiološkoj obradi otpadne vode ili pri farmakološkim ispitivanjima.



## 2. TEORIJSKI DIO

Najopćenitije kemijski reaktor je prostor u kojem se odvija kemijska reakcija u svrhu dobivanja određenog produkta. Osnovni tipovi kemijskih reaktora su kotlasti, protočno kotlasti reaktor i cijevni reaktor. U nastavku će se detaljno opisati cijevni reaktor u kojima su provedeni eksperimenti.[1]

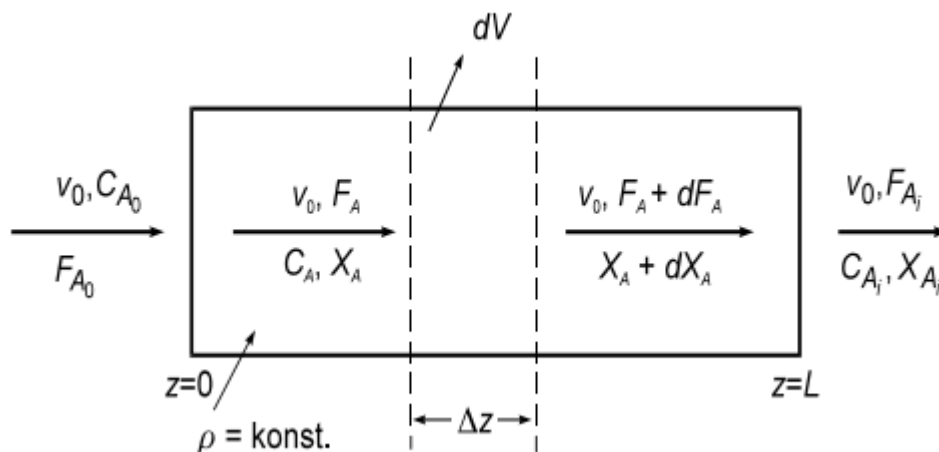
### 2.1 Cijevni reaktor

Cijevni reaktori su kemijski reaktori u obliku cijevi. Zbog jednostavne izvedbe, bez dodatnih uređaja, pogodni su za proizvodnju s velikim kapacitetom pa se koriste u industriji.

Osnove značajke cijevnog reaktora su:

- Reakcijska smjesa prolazi kroz reaktor idealnim strujanjem
- Reaktor radi izotermno, temperatura se ne mijenja sa položajem unutar reaktora a niti s vremenom
- Reaktor se promatra u stacionarnom stanju, nestacionaran rad važan je samo za početak, odnosno kraj rada te za probleme vezane uz vodenje i kontrolu
- Ne postoji promjena gustoće reakcijske smjese za vrijeme prolaza kroz reaktor

Po svojoj izvedbi cijevni reaktor je otvoreni sustav. Veličina stanja su nezavisne od vremena, vremenska promjena jednaka je nuli odnosno nema akumulacije tvari i topline. Kod cijevnih reaktora idealno strujanje pretpostavlja da brzina strujanja u svakoj točki ima isti iznos i smjer. Brzina strujanja dana je skalarnom veličinom. (Slika 1.)[1][2]



Slika 1. Shema 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

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

Ovu osnovnu jednadžbu bilance množine tvari (komponente) za idealni cijevni reaktor koja se može prevesti u drug oblike koristeći različite jedinice.

Uzevši u obzir kako je :

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

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

dobije se izraz:

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

Kako je:

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

i:

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

Jednadžba (2.5.) moguće je integrirati na dva načina. Prvim ćemo dobiti uobičajenu jednadžbu u kojoj je prikazana zavisnost promjene koncentracije komponente A po duljini reaktora ( 2.8.)

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

Kada integriramo na drugi način dobiva se jednadžba koja prikazuje ovisnost koncentracije komponente A o prostornom i ukazuje na sličnost modela cijevnog reaktora.[3]

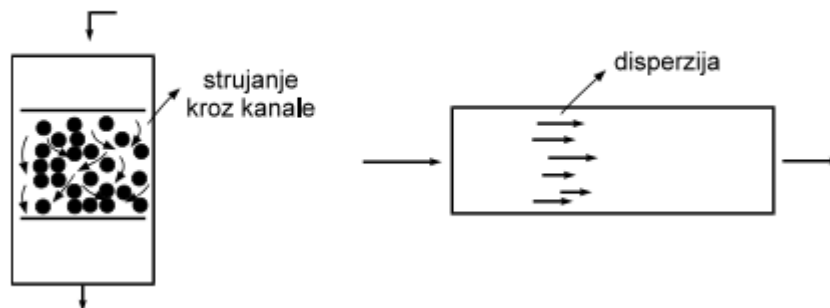
$$r_A = -\frac{dC_A}{d\tau} \quad (2.9.)$$

## 2.2 Raspodjela vremena zadržavanja

Raspodjela vremena zadržavanja je statička funkcija koja definira posebno svojstvo molekula. Raspodjela vremena zadržavanja reaktora je karakteristika strujanja medija u kemijskom reaktoru koja nam daje najviše informacija o obilježjima reaktora. Važno je spomenuti uzroke koje dovode do odstupanja od idealnih stanja i na koji način ta odstupanja djeluju na značajke reaktora. Poznavanje odstupanja od idealnih uvjeta bitno je za dimenzioniranje, odnosno uvećanje cijevnih reaktora u industriji.[2][9]

Uzroci odstupanja od idealnog strujanja su:

- laminarno strujanje za reakcije u homogenim sustavima
- prijenos tvari difuzijom u aksijalnom i radijalnom smjeru
- promjene puta skretanja unutar reaktora s punilima ili krutim katalizatorima uslijed postojanja obilazaka, postranih tokova ili kraćenja[5]



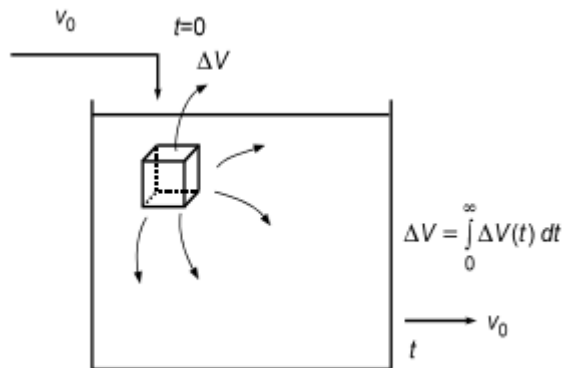
Slika 2. Uzroci odstupanja od idealnog strujanja u cijevnim reaktorima

Na Slici 2. dan je prikaz pojedinih situacija koji mogu postojati u realnim cijevnim reaktorima a koje dovode do odstupanja od idealnog strujanja. Kada nije moguće predvidjeti ili opisati na osnovi slike hidrodinamičko ponašanje fluida koji struji kroz reaktor tada na temelju eksperimentalnih podataka potvrditi ili usvojiti model strujanja kojim se može opisati odstupanje od graničnih načina strujanja.

Promatra se jedan element fluida na ulazu u reaktor, diferencijalni volumen.(Slika 3.) Vjerojatnost s kojom će taj element nakon nekog vremena izaći iz reaktora izražava se s funkcijom raspodjele vremena zadržavanja RZV. Možemo uočiti da je RZV funkcija statička

raspodjela pa je ukupna vjerojatnost dana površinom ispod krivulje i mora biti jednaka jedinici. Pretpostavka je da sav  $\Delta V$  koji smo unijeli mora izaći van.[2]

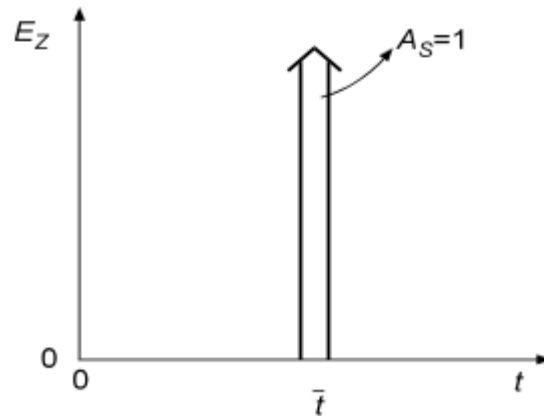
$$\int_0^{\infty} E_Z(t) dt = 1 \quad (2.10.)$$



Slika 3. Raspodjela vremena zadržavanja

RZV funkcija se uobičajeno označuje slovom  $E_z$  što potječe od *Exit function*.

U idealnom cijevnom reaktoru svaki element fluida ima istu vjerojatnost da će se u reaktoru zadržati određeno vrijeme. Zbog toga možemo zaključiti da u njemu ne postoji raspodjela vremena zadržavanja. RZV funkcija se u ovom slučaju definira Diracovom ili delta funkcijom. (Slika 4.) Površina ispod  $E_z$  krivulje mora iznositi jedan, to znači da je vrijednost ordinate funkcije beskonačno velika. Naime, sve čestice fluida se jednako zadržavaju u sustavu pa na apscisi postoji samo jedna vrijednost koja je u stvari srednje vrijeme zadržavanja.



Slika 4. RZV funkcija za idealno strujanje u cijevnom reaktoru

Ako pretpostavimo da na ulazu u reaktor označimo jedan elementarni volumen fluida i vrijeme ulaska tog elementa u reaktor uzmemo nula, odnosno kao početno. Tada vrijedi

$$E_z(t) = \delta(t) = 0 \quad \text{za } t = 0 \quad (2.11.)$$

$$E_z(t) = \delta(t) = 0 \quad \text{za } t \neq 0 \quad (2.12.)$$

a onda vrijedi:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.13.)$$

Ujedno i definicija delta funkcije.

### 2.3 Modeli strujanja

U realnim sustavima ne dolazi do idealnog strujanja nego se javljaju odstupanja od graničnih oblika gibanja fluida. Provjeravaju se eksperimentalno sa nađenim  $E_z$  funkcijama.

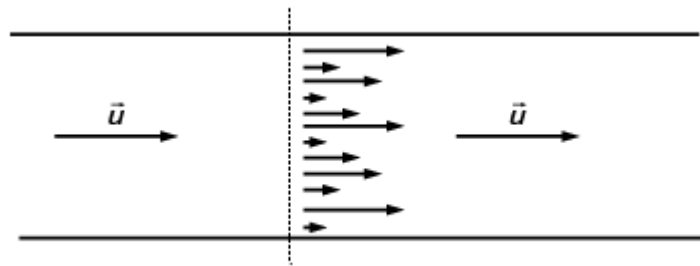
Postoje dvije grupe modela strujanja. Najčešće primjenjivani u praksi su laminarni model i model aksijalne disperzije. To su modeli koji su izvedeni na osnovi hidrodinamičkih značajki sustava.[6]

### Model aksijalne disperzije

Ovaj model je prikladan za opis strujanja kroz cijevne reaktore koje malo odstupa od idealnog, u osnovi, to se strujanje može zamisliti kao idealno uz dodatnu disperziju ili miješanje u smjeru strujanja. Disperzija u aksijalnom smjeru može se prikazati jednostavnim difuzijskim prijenosom tvari. Difuzijski prijenos dan je Fickovim zakonom ( 2.14.):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = De \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2.14.)$$

Parametar  $De$  naziva se prosječnim koeficijentom difuzije ili koeficijentom disperzije. Zamišljeno strujanje u cijevnom reaktoru prema modelu aksijalne disperzije prikazano je na slici 5.



Slika 5. Strujanje prema modelu aksijalne disperzije

Modelom aksijalne disperzije pokušalo se aproksimirati realno strujanje no još uvijek uz određene pretpostavke:

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

Uvođenjem člana za idealno strujanje u jednadžbu( 2.14.)dobiva se matematički model strujanja aksijalnom disperzijom za nestacionaran period rada.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = De \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.15.)$$

U jednadžbi (2.15.) dva su parametra koja karakteriziraju strujanje uz aksijalnu disperziju, linearna brzina,  $u$ , kao parametar konvektivnog strujanja te koeficijent aksijalne disperzije,  $De$ . Ta dva parametra se spajaju u jedan, prevodeći jednadžbu (2.15.) u bezdimenzijski oblik uvođenjem novih varijabli, bezdimenzijskog vremena (2.16.) i bezdimenzijske dužine (2.17.).

$$\theta = \frac{tu}{L} \quad (2.16.)$$

$$x = \frac{z}{L} \quad (2.17.)$$

Izrazi (2.16.) i (2.17.) se deriviraju a zatim se uvrste u jednadžbu (2.15.).

$$\partial\theta = \frac{u}{L}\partial t \quad (2.18.)$$

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

$$\frac{\partial c}{\partial\theta\frac{L}{u}} = De \frac{\partial^2 c}{\partial x^2 L^2} - u \frac{\partial c}{\partial x L} \quad (2.20.)$$

Podijeli se jednadžba (2.20.) sa  $u$  i  $L$  dobiva se jednadžba (2.21.)

$$\frac{\partial c}{\partial\theta} = \frac{De}{uL} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.21.)$$

U izrazu (2.21.) koristi se disperzijska značajka koja je dana izrazom (2.22.)

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

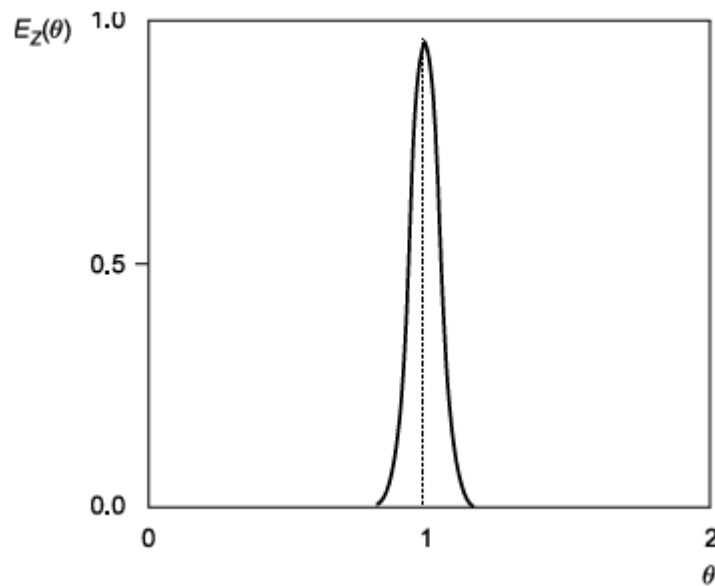
Postoje dva granična slučaja, ako je disperzijski broj jednak nuli disperzija ne postoji i strujanje je idealno, a ako disperzijski broj teži u beskonačnost, disperzija je potpuna i prisutno je strujanje uz idealno miješanje. Realna strujanja imaju disperzijsku značajku

između ovih graničnih vrijednosti. Disperzijska značajka je jedini parametar u modelu u kojem ovisi oblik dobivenih  $E_z$  krivulja. Opće rješenje jednadžbe (2.21.) ovisi o pretpostavljanim graničnim uvjetima strujanja na ulazu i izlazu iz sustava. Za mala odstupanja od idealnog strujanja (Slika 6.), model aksijalne disperzije daje simetričnu raspodjelu, odnosno Gaussovu krivulju pa se  $E_z$  funkcija može naći iz izraza(2.24.)[7]:

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

Varijanca i disperzijski broj povezani su izrazom(2.25.)

$$\sigma^2 = 2DB \quad (2.25.)$$

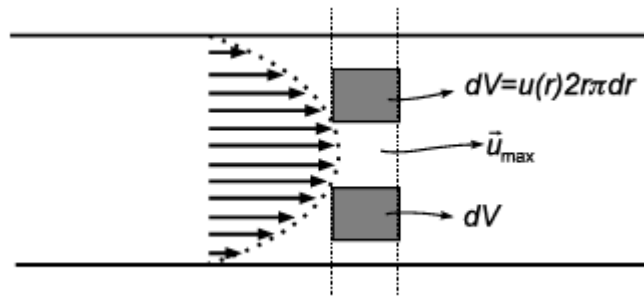


Slika 6. Model aksijalne disperzije za mala odstupanja od idealnog strujanja



## Model laminarnog strujanja

Brzina strujanja u cijevnim reaktorima u većini slučajeva nije velika tako da je u praksi često laminarno strujanje. Laminarno strujanje je segregirano slojevito, a definirano je profilom brzina po presjeku reaktora kao što je prikazano na slici 7. Treba napomenuti da ne postoji vektor brzine usmjeren u radijalnom smjeru.



Slika 7. Model laminarnog strujanja

Brzina strujanja u nekoj točki presjeka reaktora, polumjera  $r$ , jednaka je izrazu(2.26.)

$$u(r) = 2u_S \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.26.)$$

U prethodnom izrazu  $u_S$  je srednja brzina strujanja, dok je maksimalna brzina u centru cijevi jednaka  $2u_S$  Srednja brzina strujanja dana izrazom (2.27.)

$$u_S = \frac{v_0}{r_0^2 \pi} \quad (2.27.)$$

Srednje vrijeme zadržavanja dano je izrazom gdje je  $L$  duljina reaktora.(2.28.)

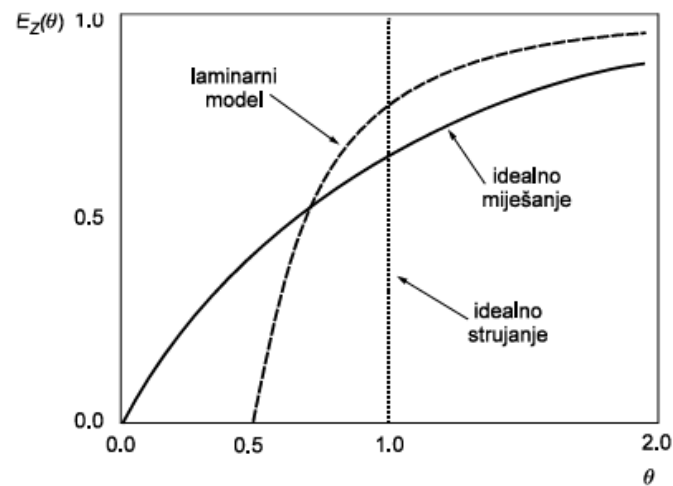
$$\bar{t} = \frac{L}{u_S} \quad (2.28.)$$

Raspored brzina po presjeku je paraboličan (Slika 7.), iz čega se može zaključiti da sve molekule u reaktoru ne zadržavaju jednako dugo. Uz stijenku je vrijeme zadržavanja vrlo veliko dok je u centru minimalno.

Vrijeme zadržavanja za element fluida u točki polumjera  $r$  dano je izrazom(2.29.)

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

Kod laminarnog strujanja srednje vrijeme zadržavanja je parametar zbog kojeg  $E_z$  krivulje imaju različit oblik, ali uvijek leže između graničnih oblika za idealno strujanje i idealnog miješanje. (Slika 8.)



Slika 8. Usporedba modela laminarnog strujanja s graničnim oblicima idealnog strujanja i idealnog miješanja

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada je odrediti raspodjelu vremena zadržavanja u cijevnim reaktorima. Eksperimenti su provedeni na tri različite cijevi, praznoj cijevi (cijev C1), cijevi punjenoj staklenoj kuglici (cijev C2) i spiralnoj cijevi (cijev C3).

#### 3.1 Metoda određivanja RVZ funkcija

Volumen u kojem želimo odrediti RZV moramo obilježiti kako bi ga mogli razlikovati od ostale reakcijske smjese. To postizemo unosom traser. U provedenim eksperimentima KCl je korišten kao traser u struji vode te nije bilo prisutna kemijska reakcija. Traser je unesen impulsnom metodom. Traser mora posjedovati određene značajke kako bi ga mogli koristiti tijekom eksperimenta a to su da ne smije promijeniti hidrodinamička karakteristike ispitivanog fluida, ne smije kemijski reagirati s okolnim fluidom te je potrebno njegovu koncentraciju na izlazu analitički lako i precizno odrediti.

Eksperimentalno određivanje  $E_z$  ili RZV funkcije svodi se na analizu odziva što ga uzrokuje poremećaj, odnosno unošenje traser. Za analizu je potrebno pogodnom eksperimentalnom metodom utvrditi ovisnost količine traser o vremenu na izlazu iz reaktora, pretpostaviti model strujanja fluida kroz reaktor i provjeriti ga eksperimentalno dobivenom  $E_z$  krivuljom, zatim poznavati funkciju poremećaja, odnosno ovisnost količine traser o vremenu tijekom unošenja u sustav i na osnovi usporedbe zaključiti o primjenjivosti modela.

#### 3.2 Opis aparature i mjerenja

Aparatura sadrži tri različite cijevi od kojih je prva prazna cijev, druga je punjena staklenim kuglicama a treće spiralna cijev koja je dulja od prethodne dvije, kroz koje struji vodovodna voda. Mjerenje se provodi tri puta za svaku cijev za dva različita volumena traser (3,3 i 6,3 mL) te tri različita prototka. Vodovodna voda izlazi iz slavine te prolazi kroz rotametar kojim se regulira i mjeri protok, a zatim ulazi u jednu od cijevi. Svaka cijev na početku ima ventil kojim se može prekinuti dotok vode u nju. Na izlazu iz cijevi se nalazi protočna konduktometrijska ćelija i služi za mjerenje vodljivosti kapljevine. Kad se provodi eksperiment, ventili na preostale dvije cijevi su zatvoreni, tako da voda struji samo kroz željenu cijev. U željenu cijev iglom se što brže uštrca određena količina traser kroz gumeni čep istodobno se pokreće program NI SignalExpress, traser putuje od dna prema vrhu na vrhu se nalazi skup Pt- elektroda koju čine konduktometrijsku ćeliju koja mjeri promjenu vodljivosti. Mjerenje se provodi dok sav traser ne prođe kroz cijev. Prikupljeni podaci se prebace u Microsoft Excel program u kojem slijedi daljnja obrada. (Slika 9. )



Slika 9. Prikaz aparature

Također smo proveli baždarenje rotametra. Na rotametri se odabere određena vrijednost protoka koja se drži konstantnom tokom baždarenja. Pustili smo vodovodnu vodu kroz sustav te u vremenu od jedne minute mjerili smo pomoću menzure koliki volumen prođe kroz sustav. Za svaki protok se mjerenje ponovilo tri puta. (Tablica 1.)

Tablica 1. Izmjerena srednja vrijednost volumnog protoka u sustavu

Oznaka na rotametri	Protok 1 mL/min	Protok 2 mL/min	Protok 3 mL/min	Srednji protok mL/min
200	70	70	70	70
400	250	250	250	250
600	420	420	410	416,67

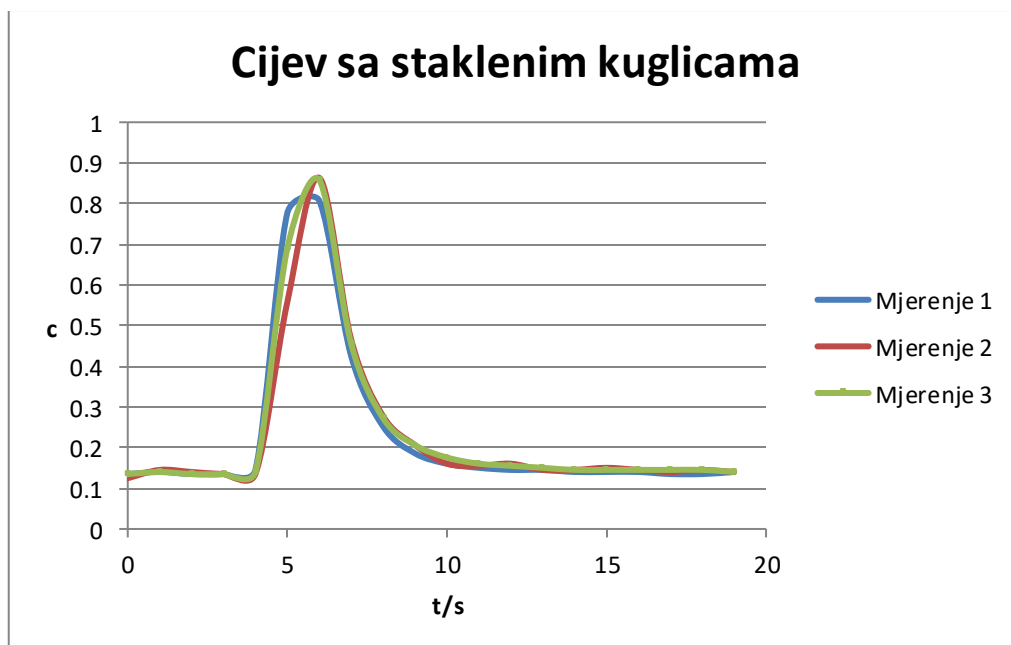
### 3.3 Prikaz eksperimentalni RZV krivulja

U nastavku ovog dijela bit će prikazane eksperimentalne RZV krivulje (c krivulje), krivulje prikazuju odziv na impulsni poremećaj te vizualno ukazuju koliko se dugo traser zadržav u sustavu te koliko je njegova disperzija.

1) Usporedba RZV krivulja za iste protoke pri istoj cijevi i različitim volumenima trasera

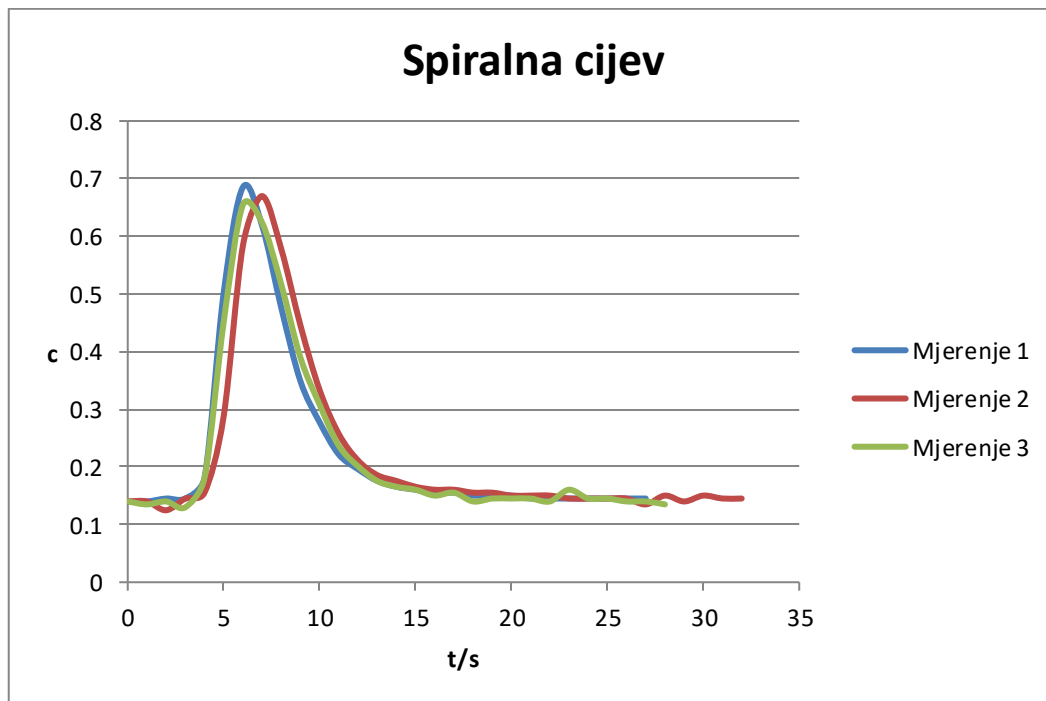


Slika 10. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 6,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min)

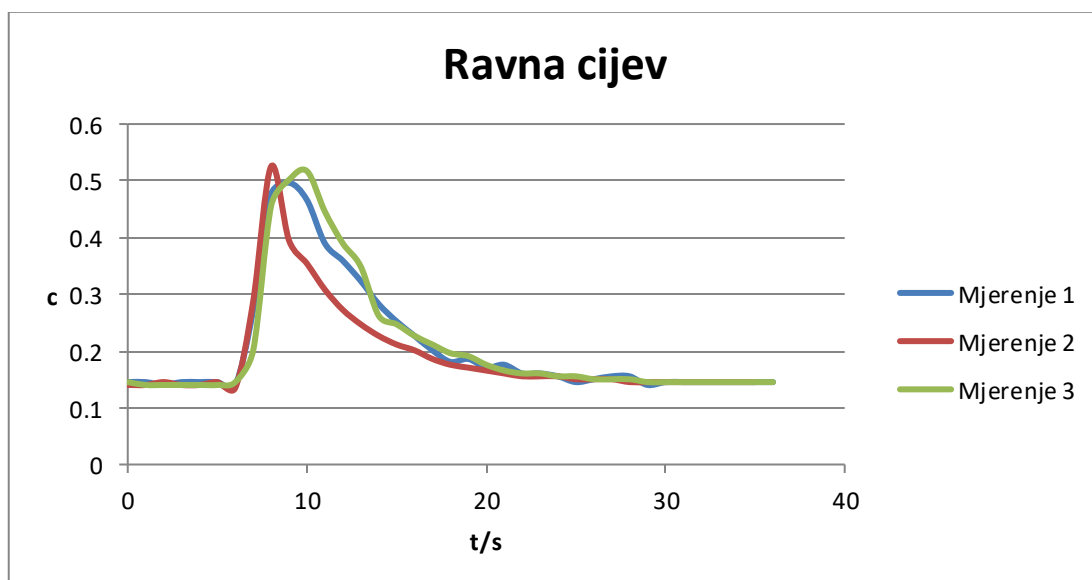


Slika 11. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 3,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min)

1a) Usporedba RZV krivulja za iste protoke pri istoj cijevi

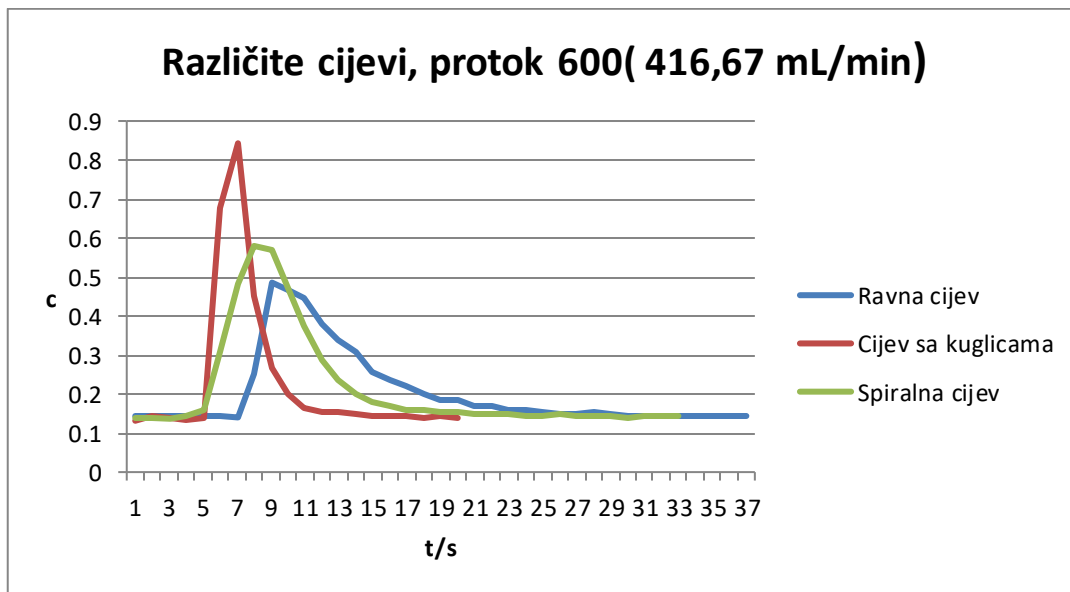


Slika 12. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 6,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min)



Slika 13. Provedba eksperimenta tri puta pri istim uvjetima volumena trasera 6,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min)

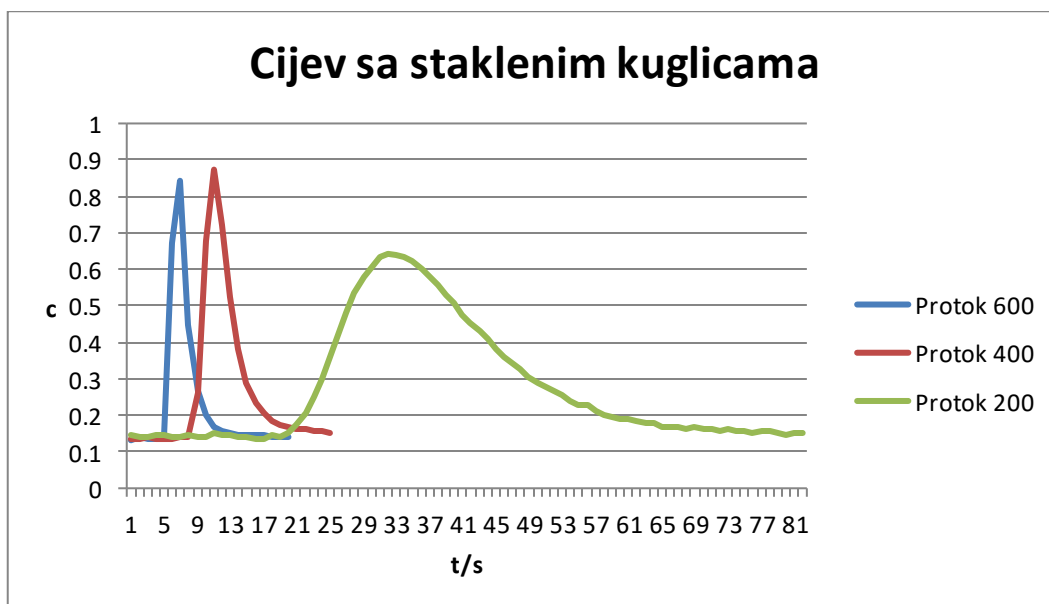
2) Usporedba RZV krivulja dobivena u različitim cijevima pri konstantnom protoku



Slika 14. RZV krivulje dobivene pri konstantnom protoku 600 (416,67 mL/min) i volumenu trasera 6,3 mL u tri različite cijevi

U cijevi sa staklenim kuglicama vrijeme zadržavanja je najmanje, a koncentracija, odnosno odziv najveći.

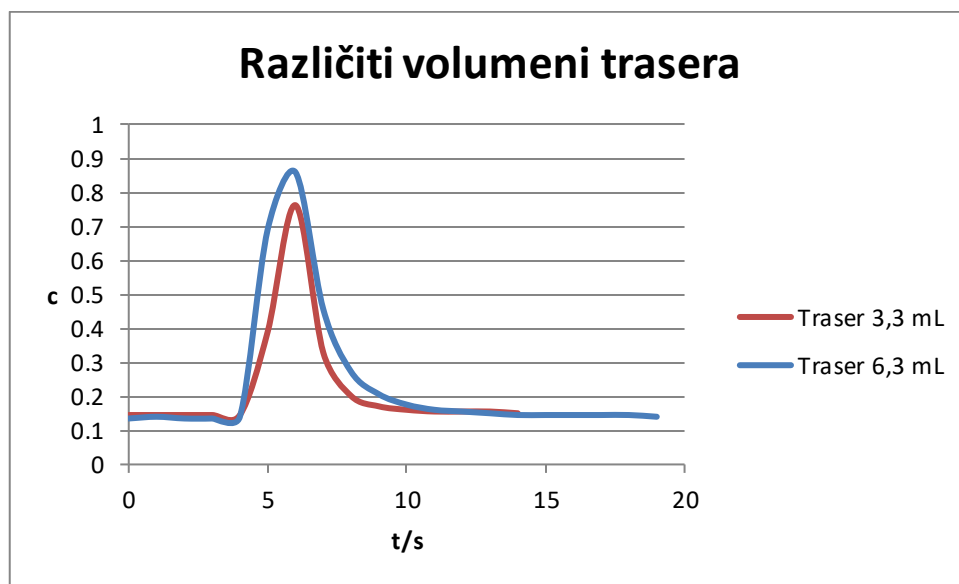
3) Usporedba RZV krivulja dobivena pri različitim protocima



Slika 15. RZV krivulje dobivene pri različitim protoku i volumenu trasera 6,3 u tri različite cijevi

Pri većim protocima veća je i vodljivost, odnosno koncentracija, a vrijeme zadržavanja je manje, pri manjim protocima, manja je i koncentracija, a traser se zadržava duže u cijevi.

#### 4) Usporedba RZV krivulja dobivena pri različitim volumenima traser



Slika 16. Promjena volumena u cijevi sa staklenim kuglicama pri prokotu 600 (416,67mL/min), porastom volumena raste i vodljivost i vrijeme zadržavanja.



## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Iz eksperimentalnih dobivenih RZV krivulja vidljivo je odstupanje strujanja od graničnih načina strujanja. Prije računske obrade svake pojedine RVZ krivulje potrebno je svesti sve vrijednosti na apscisu kako bi prilikom računanja površine ispod krivulje bila realna vrijednost. Izmjerene su RZV krivulje te se računa srednje vrijeme zadržavanja i disperzijski značajka. Disperzijska značajka izračunata je prema modelu aksijalne disperzije.

### 4.1 Obrada eksperimentalnih podataka

Iz eksperimentalnih dobivenih vrijednosti koncentracije trasera  $c_i$  i vremenskog intervala  $\Delta t$  od 1 s korištenjem programa Microsoft Excel računaju se sljedeće veličine:

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.

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

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) 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 prema izrazu (4.7)

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

#### 4.2 Tablični prikaz parametara modela

U sljedećim tablicama prikazane su izračunate vrijednosti srednjeg vremena zadržavanja ( $t_{sr}$ ) i disperzijskog broja (DB) za provedene eksperimente u sve 3 cijevi pri 3 različita protoka i dva volumena trasera.

a) volumen trasera 3.3 mL

Tablica 4.1. ravna cijev pri volumenu trasera 3,3 mL

Protok mL/min	70		250		416,67	
	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB
1.	103,847	0,121	21,501	0,115	13,035	0,081
2.	109,745	0,162	21,506	0,100	11,811	0,091
3.	104,052	0,122	22,002	0,096	13,423	0,078

Tablica 4.2. cijev sa kuglicama pri volumenu trasera 3,3 mL

Protok mL/min	70		250		416,67	
	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB
1.	33,542	0,043	11,597	0,041	6,643	0,038
2.	35,794	0,044	10,121	0,038	6,350	0,025
3.	31,263	0,041	10,476	0,040	6,245	0,021

Tablica 4.3. spiralna cijev pri volumenu trasera 3,3 mL

Protok mL/min	70		250		416,67	
	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB
1.	98,730	0,064	32,181	0,052	17,647	0,024
2.	115,176	0,079	32,401	0,054	18,396	0,028
3.	107,820	0,069	32,276	0,053	17,686	0,024

b) volumen trasera 6,3 mL

Tablica 4.4. ravna cijev pri volumenu trasera 6,3 mL

Protok mL/min	70		250		416,67	
	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB
1.	70,420	0,129	26,491	0,079	11,910	0,059
2.	64,420	0,112	26,206	0,066	12,177	0,061
3.	67,552	0,102	27,611	0,085	12,160	0,060

Tablica 4.5. cijev sa kuglicama pri volumenu trasea 6,3. mL

Protok mL/min	70		250		416,67	
	$\bar{t}/s$	DB	tsr $\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB
1.	34,088	0,055	7,233	0,035	6,269	0,027
2.	36,350	0,054	11,336	0,045	7,029	0,033
3.	40,720	0,061	11,761	0,054	6,664	0,029

Tablica 4.6. spiralna cijev pri volumenu trasera 6,3 mL

Protok mL/min	70		250		416,67	
	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB	$\bar{t}/s$	DB
1.	128,918	0,124	31,537	0,060	20,811	0,039
2.	134,830	0,146	30,285	0,056	20,210	0,033
3.	137,300	0,156	30,889	0,059	23,549	0,043

Iz prikazanim tablica vidljivo je da smo radili tri mjerenja za svaku cijev pri različitim protocima kako bi ispitali ponovljivost, vidljivo je da je ponovljivost eksperimenata dobra. Postoje mala odstupanja koja su se mogla dogoditi zbog brzine ubrizgavanja trasera u cijev te pokretanje programa na računalo koje se radilo ručno. Iz prikazanih tablica vidljivo je da se povećanjem protoka smanjuje srednje vrijeme zadržavanja te je veće kod unosa trasera većeg volumena. Najkraće srednje vrijeme zadržavanja je u cijevi sa staklenim kuglicama zbog najveće brzine strujanja a najduže u spiralnoj cijevi koja je duža od prethodne dvije. Na disperzijski broj ( $DB=De/uL$ ) utječe prije svega brzina strujanja trasera u cijevi odnosno duljina cijevi. Sukladno tome najmanji disperzijski broj nam je u pravilu kod spiralne cijevi koja nam je 3 puta dulja od ostale dvije cijevi. Isto tako u cijevi sa staklenim kuglicama znatno nam je veća brzina strujanja u odnosu na praznu cijev jer je slobodni volumen puno manji te je brzina velika da bi se zadržao konstantni protok.

### 4.3 Prikaz bezdimenzijskih RZV krivulja

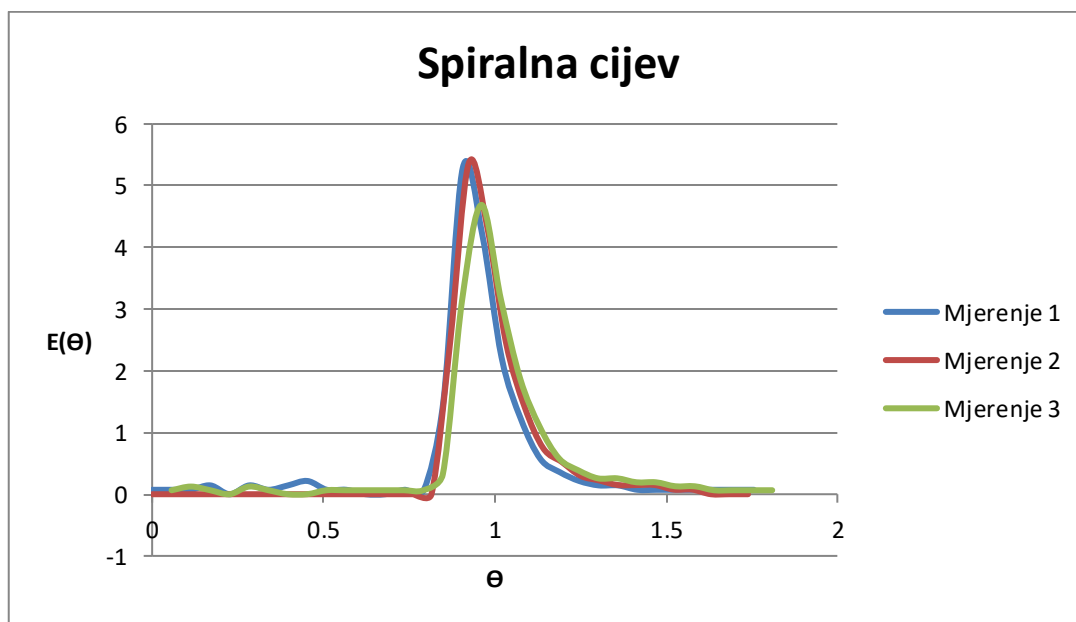
U nastavku ćemo prikazati bezdimenzijske Ez krivulje koje opisuju raspodjelu vremena zadržavanja u bezdimenzijskom vremenu.

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

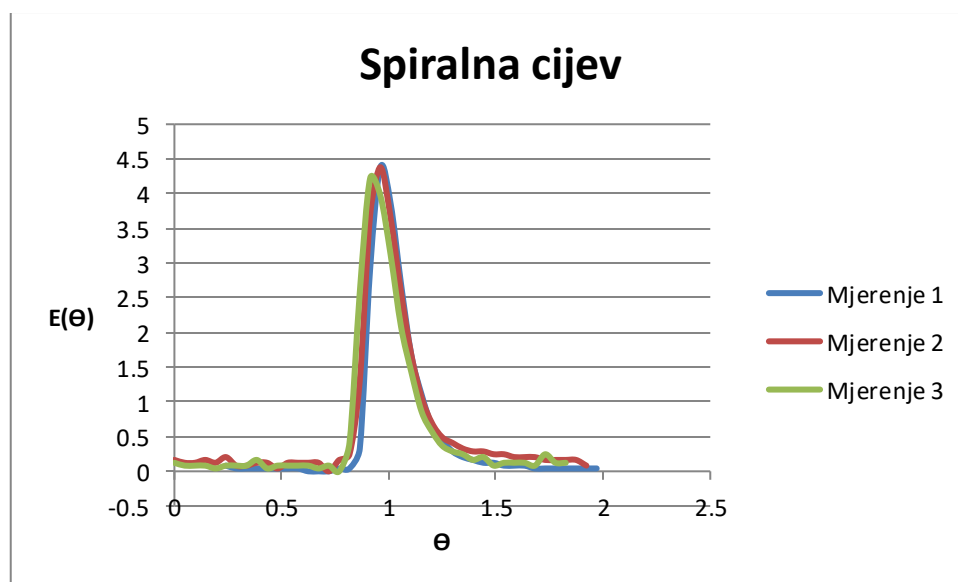
Ez funkcija definirana bezdimenzijskim vremenom

$$Ez(\theta) = \bar{t} \frac{c_{inor}(t)}{Q} \quad (4.9.)$$

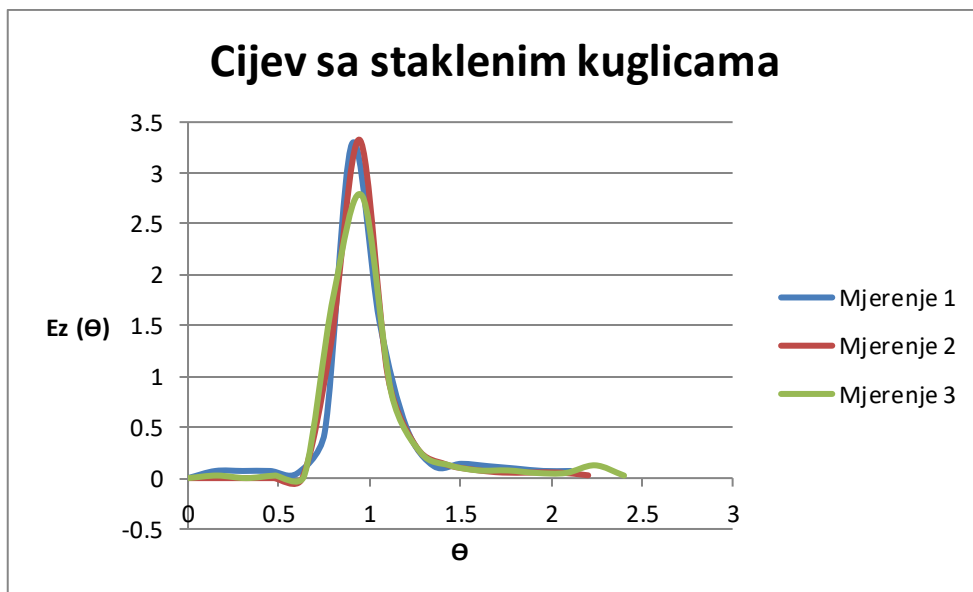
a) Usporedba  $E(\Theta)$  krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta pri istim uvjetima tri puta



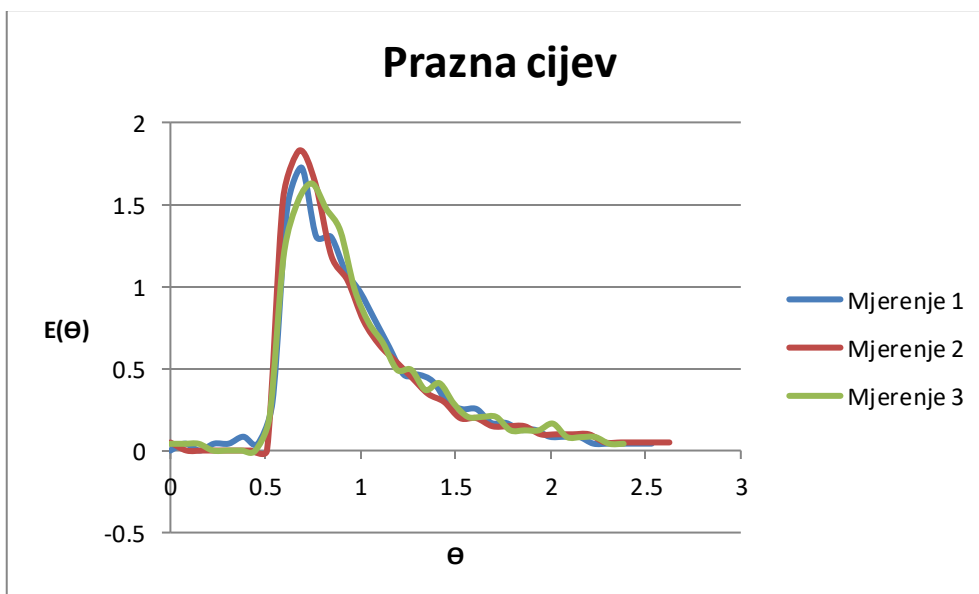
Slika 17. Usporedba  $E(\Theta)$  za tri različita mjerenja pri istim uvjetima volumena 3,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min) u spiralnoj cijevi



Slika 17. Usporedba  $E(\Theta)$  za tri različita mjerenja pri istim uvjetima volumena 6,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min) u spiralnoj cijevi



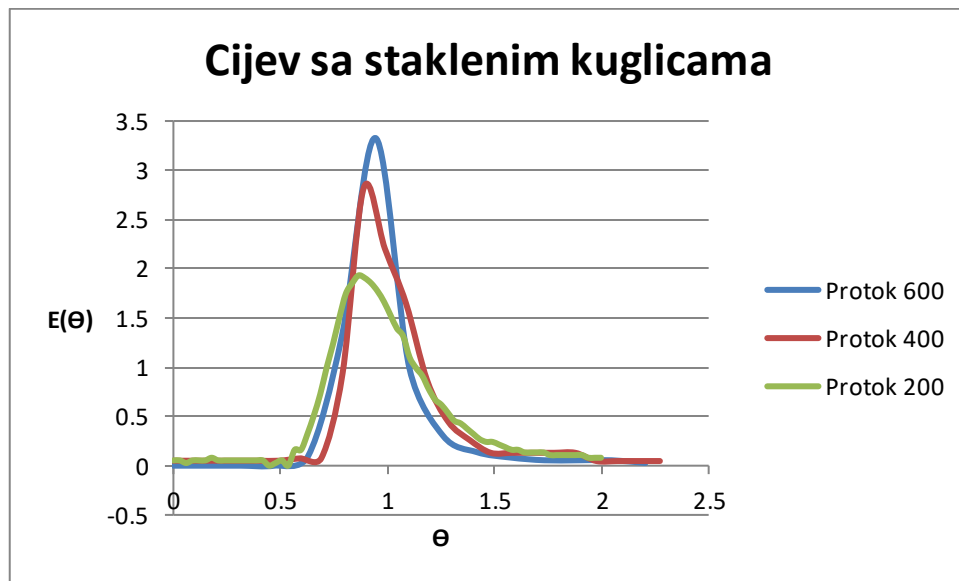
Slika 18. Usporedba  $E(\Theta)$  za tri različita mjerenja pri istim uvjetima volumena 3,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min) u cijevi sa staklenim kuglicama



Slika 19. Usporedba  $E(\Theta)$  za tri različita mjerenja pri istim uvjetima volumena 3,3 mL i protoka 600 (416,67 mL/min) u praznoj cijevi

Slike prikazuju raspodjelu vremena zadržavanja u tri različite cijevi pri protoku 600 (416,67 mL/min) i volumenu trasera 3,3 mL. U praznoj cijevi su najveća odstupanja te spiralna cijev i cijev sa staklenim kuglicama teži idealnosti,  $E_z$  krivulje za spiralnu i cijev sa staklenim kuglicama su relativno simetrične, a za praznu cijev  $E_z$  krivulja je nepravilna i asimetrična.

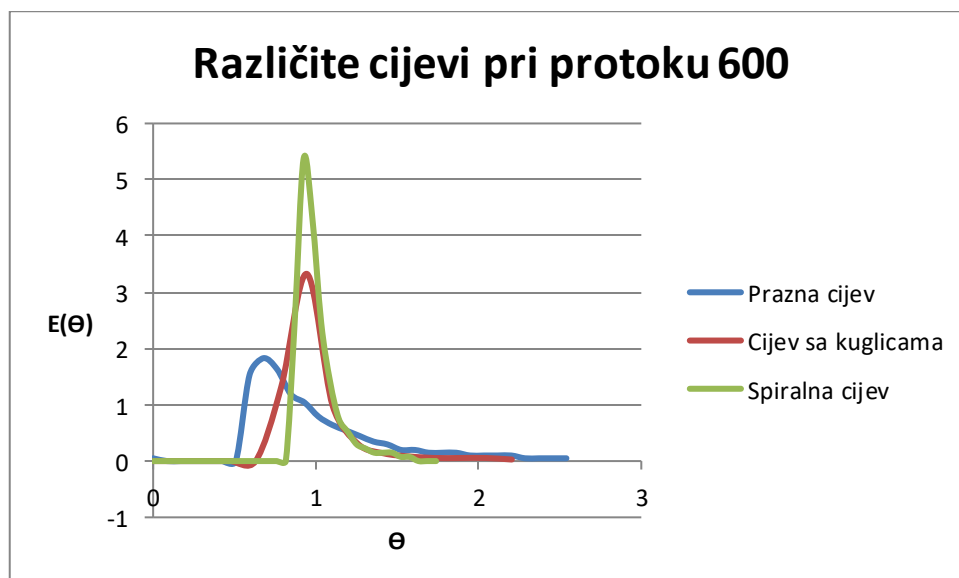
b) Usporedba  $E(\Theta)$  krivulja za različite protoke u istoj cijevi



Slika 20. Usporedba  $E(\Theta)$  funkcija pri različitim protocima te volumena traseru 3,3 mL u cijevi sa staklenim kuglicama

Na slici 20. Prikazana je raspodjela vremena zadržavanja u cijevi sa staklenim kuglicama, pri različitim protocima. Idealnije strujanje je pri najvećem protoku to nam potvrđuju i vrijednosti disperzijskog broja koji se smanjuje povećanjem protoka.

c) Usporedba  $E(\Theta)$  krivulja u različitim cijevima



Slika 21. Usporedba  $E(\Theta)$  funkcije za različite cijevi pri protoku 600 (416,67 mL/min) i volumenu traseru 3,3 mL

Na slici 21. Prikazana je raspodjela vremena zadržavanja u različitim cijevima pri istom protoku, u praznoj cijevi strujanje je najmanje idealno dok je u spiralnoj najbliže idealnom. To pokazuju i izračunati disperzijski brojevi, kod spiralne cijevi je najmanji. U usporedbi krivulja prazne cijevi i cijevi sa staklenim kuglicama idealnija je krivulja cijevi sa staklenim kuglicama.

Na slici 22. Prikazana je raspodjela vremena pri različitim volumenima traseira u istoj cijevi i pri istom protoku. Krivulja za manjim volumenom traseira je viša od krivulje sa većim volumenom. Impulsni poremećaj je bolji unošenjem manjeg volumena traseira koji pogoduje idealnom strujanju.

d) Usporedba  $E(\Theta)$  krivulja pri različitim volumenima traseira u istoj cijevi i istom protoku



Slika 22. Usporedba  $E(\Theta)$  funkcija za različite u cijevi sa staklenim kuglicama pri protoku 600

Prilikom usporedbe C i E krivulje, vidimo da je E krivulja bolja jer smo sve vrijednosti sveli na apscisu kako bi površina ispod krivulje bila realna vrijednost i kako bi računali samo tu površinu. Isto tako E krivulje su normalizirane i s obzirom na vrijeme i s obzirom na koncentraciju te su pogodnije za direktne usporedbe pojedinih eksperimenata.



## 5. ZAKLJUČAK

Modeli strujanja imaju važnu ulogu pri izvedbi cijevnih reaktora i drugih vrsta reaktora u kojima procesi zavise od hidrodinamike. Provjerom načina i vrste strujanja moguće je poboljšati izvedbu cijevnih reaktora. U tri različite cijevi smo eksperimentalno odredili RZV funkcije. Eksperimentalni podaci testirani su modelom aksijalne disperzije. Dobili smo srednje vrijeme zadržavanja i disperzijski broj. Srednje vrijeme zadržavanja najmanje je u cijevi sa staklenim kuglicama jer kuglice smanjuju površinu slobodnog prolaza fluida te fluid struji najvećom brzinom a najveće je u spiralnoj zbog toga što je ona duža od prethodno dvije ispitivane cijevi. Disperzijski broj je parametar koji ovisi o značajkama cijevnih reaktora, odnosno načinu strujanja u njima. Disperzijski broj je najmanji za spiralnu cijev, a najveći za praznu. U cijevi sa staklenim kuglicama, kuglice pospješuju brže strujanje trasera te to doprinosi smanjenju disperzijskog broja. Može se zaključiti da je najidealnije strujanje u spiralnoj cijevi zbog većeg omjera duljine i polumjera što omogućuje formiranje idealnog strujanja. Unošenjem manjeg volumena trasera pogoduje idealnijem strujanju. Također eksperimente bi trebalo automatizirati kako bi se izbjegle pogreške prilikom eksperimenta.

## LITERATURA

1. Z.Gomzi, Kemijski reaktori, Hinus, Zagreb, 1998.
2. Z.Gomzi, Ž.Kurtanjek, Modeliranje u kemijskom inženjerstvu, HDKI,FKIT, Zagreb, 2019.
3. O. Levespiel, Chemical Reaction Engineering, third edition, John Wiles & Sons, New York, 1999.
4. Froment, Gilbert F., Chemical reactor analysis and desing, 2nd ed, Hoboken; John Wiley & Sons, New York, 1990.
5. L.R. de Souza Jr., L. Lorenz, Residence Time distribution for Tubular reactor, Universidade Federal do Parana, Brazil
6. Y.Gao, F.J. Muzzio, M.G. Iearapatritou, Residence Time Distibution(RTD) application in solid unit operation, Powder Technology, Volume 228, 2012.,( 416-423)
- 7) Nauman, E. B., Buffham, B. A., Mixing in Continous Flow Systems, J. Wiley, New York, 1983.
- 8) Fogler S. H., Elements of Chemical Reaction Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- 9) S. Adams, How residence time affects product quaity in flow chemistry, case study #01, rev13, 2021.

## POPIS OZNAKA

$C_A$  – koncentracija tvari, mol/dm<sup>3</sup>

$D_e$  – prosječna difuzivnost u osnom smjeru, m<sup>2</sup>/s

DB- disperzijski broj

Ez- funkcija vremena zadržavanja

E( $\Theta$ )- funkcija vremena zadržavanja u bezdimenzijskom obliku

$F_A$ - molni protok tvari A mol/s

FZ- funkcija odziva na skokomični poremećaja

L- duljina reaktora

N- broj eksperimenata

$n_A$ - broj molova tvari

R- polumjer reaktora

$r_A$ - brzina reakcije s obzirom na tvar A, mol/m<sup>3</sup>s

t- vrijeme, s

$\bar{t}$ - srednje vrijeme zadržavanja, s

u- linearna brzina, m/s

$u_s$ - srednja linearna brzina, m/s

V- volumen, m<sup>3</sup>

v- volumni protok m<sup>3</sup>/s

$v_0$ - brzina na početku reakcije, m<sup>3</sup>/s

z. prostorna koordinata u smjeru osi, m