Odstupanje od idealnog strujanja u cijevnim reaktorima

Kuzmić, Željka

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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:149:391033

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Željka Kuzmić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Željka Kuzmić

ODSTUPANJE OD IDEALNOG STRUJANJA U CIJEVNIM REAKTORIMA

ZAVRŠNI RAD

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

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

Prof. dr. sc. Sanja Papić

Doc. dr. sc. Krunoslav Žižek

Zagreb, rujan 2015

SAŽETAK

U ovom radu istraživano je odstupanje od idealnog strujanja u modelnim cijevima. Provedeni su eksperimenti u tri cijevi: praznoj kratkoj cijevi, cijevi sa slojem staklenih kuglica i dugoj spiralnoj cijevi. Dobivene krivulje raspodjele vremena zadržavanja poslužile su za izračunavanje srednjeg vremena zadržavanja i disperzijskog broja. Eksperimentalne RVZ krivulje uspoređene su s analitičkim rješenjem disperzijskog modela strujanja uz definirane rubne uvjete za sustave "otvoreno-otvoreno" i "zatvoreno zatvoreno" Iz dobivenih vrijednosti može se diskutirati o hidrodinamici strujanja u sve tri cijevi.

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

ABSTRACT

In this work deviation from the plug flow in model tubes were explored. The experiments were performed in three different tubes: empty short tube, tube with the immobilized glass beads and long spiral tube. Govern curves for residence time distributions were used to evaluate mean residence time and dispersion number. Experimental RTD curves were compared with the analytical solution of dispersion model for so called open-open boundary conditions. From governed values it can be discussed about the flow profile sin three tubes.

Keywords: Plug flow, tubular reactor, residence time distribution, mean residence time, axial dispersion

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. TEORIJSKI DIO 2

2.1 IDEALNI CIJEVNI I PROTOČNO KOTLASTI REAKTOR 2

2.2 ODSTUPANJE OD IDEALNOG STRUJANJA I IDEALNOG MIJEŠANJA 6

2.3. MODELI STRUJANJA 9

2.3.1 MODEL LAMINARNOG STRUJANJA 9

2.3.2 MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE 11

2.3.3 MEHANISTIČKI MODELI STRUJANJA 14

2.4 EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE RVZ FUNKCIJE 15

3. EKSPERIMENTALNI DIO 16

3.1 APARATURA I POSTUPAK MJERENJA 16

3.2 PRIKAZ C KRIVULJA 19

4. REZULTATI I RASPRAVA 22

4.1 TABLIČNI PRIKAZ IZRAČUNATIH VRIJEDNOSTI 23

4.2 EKSPERIMENTALNIH PRIKAZ BEZDIMENZIJSKIH RVZ KRIVULJA 26

5. ZAKLJUČAK 30

6. LITERATURA 31

7.POPIS OZNAKA 32

1. UVOD

Nezaobilaznu komponentu svakog tehnološkog procesa u industriji predstavlja kemijski reaktor. Kemijski reaktor je prostor u kojem se odvija kemijska reakcija u svrhu dobivanja željenog produkta. S obzirom na izmjenu reakcijske smjese s okolinom, kemijski reaktori dijele se na reaktore otvorenog i reaktore zatvorenog sustava. U reaktore zatvorenog sustava spadaju mnogobrojni kotlasti reaktori kod kojih za vrijeme reakcije ne dolazi do ulaza niti izlaza smjese iz sustava. S druge strane, kod otvorenih reaktora kontinuirano se dovodi ili odvodi reakcijska smjesa. Najznačajniji predstavnici ovog tipa reaktora su protočno kotlasti reaktor i cijevni reaktor o kojemu ćemo nešto više u radu.

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

U ovome radu eksperimenti su provedeni u modelnim cijevima bez prisutnosti kemijske reakcije. Na taj način na ukupnu hidrodinamiku strujanja utječe isključivo geometrija cijevi odnosno brzina strujanja fluida (voda i traser). Uspoređivanjem eksperimentalnih odzivnih krivulja s nekim od modela strujanja mogu se procijeniti ključne veličine koje određuju režim strujanja.

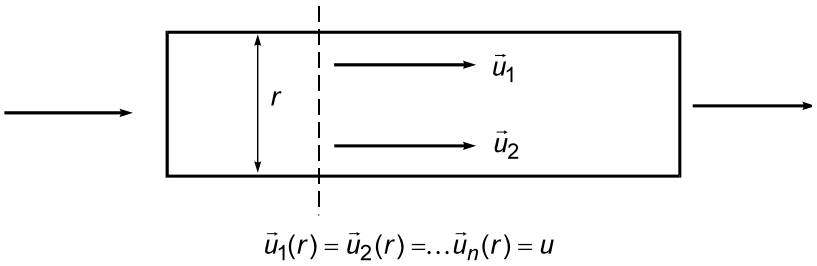
Primjenom kemijsko inženjerske metodologije, pri čemu mislimo na sustavni pristup problemu, odnosno cjelovito rješenje od ideje, eksperimenta, obrade, može se ovako relativno jednostavan sustav bez kemijske reakcije iskoristiti za upoznavanje s značajkama realnih cijevnih reaktora.

2. TEORIJSKI DIO

2.1 IDEALNI CIJEVNI I PROTOČNO KOTLASTI REAKTOR

U kemijskoj industriji jedna od najčešće primjenjivanih vrsta reaktora je cijevni reaktor. Sam naziv „cijevni reaktor“ govori o izvedbi reaktora u obliku cijevi. Upravo takva jednostavna konstrukcija razlog je njegove široke primjene u većim industrijskim postrojenjima (anorganske, petrokemijske, industrije organske sinteze) gdje najčešće radi u stacionarnom stanju. Stacionarno stanje ukazuje na nezavisnost temperature i koncentracije o vremenu. Cijevni reaktor pretežno se upotrebljava za velike kapacitete proizvodnje gdje je važna stalnost svojstava produkata radi ujednačene kvalitete.

Strujanje u cijevnom reaktoru odvija se u aksijalnom smjeru pri čemu teoretski ne dolazi do miješanja reakcijske smjese te poprima obilježja idealnog strujanja. Kod idealnog strujanja uzima se za pretpostavku da je brzina strujanja u cijevnom reaktoru identična u svakoj točki reaktora tj. ima isti iznos i smjer, slika 1.

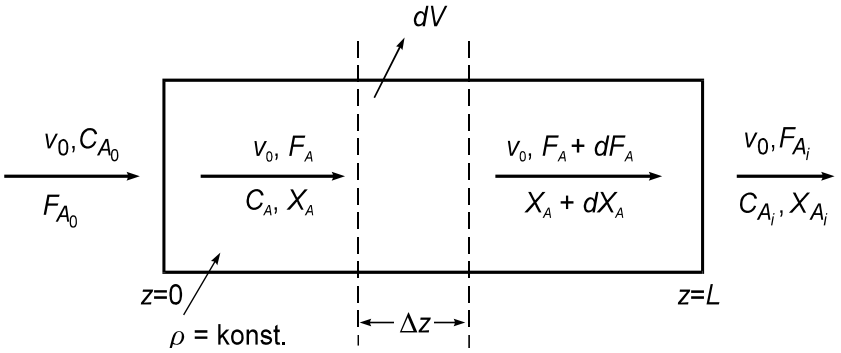


Slika 1. *Pojam idealnog strujanja u cijevnom reaktoru*

Za dobivanje matematičkog modela "idealnog" cijevnog reaktora, nužno je pretpostaviti:

- Prolazak reakcijske smjese kroz reaktor idealnim strujanjem
- Rad reaktora promatra se u stacionarnom stanju
- Ne dolazi do izmjene topline, temperatura se ne mijenja s položajem unutar reaktora niti nakon određenog vremena
- Gustoća reakcijske smjese za vrijeme prolaza kroz reaktor je stalna
- Mijenjaju se veličine stanja u aksijalnom smjeru te se u skladu s tim prilagođavaju i bilance za diferencijalni volumen.[1]

Razlikom određene množine tvari koja uđe u diferencijalni volumen u jediničnom vremenu i množine iste tvari koja izađe, dobiva se osnovna jednadžba bilance množine tvari za idealni cijevni reaktor,slika 2 i jednadžba (2.1)



Slika 2. *Model "idealnog" cijevnog reaktora*

$$F_A - \left(F_A + dF_A\right) - r_A dV = 0 \tag{2.1}$$

Ovu osnovnu jednadžbu bilance množine tvari za idealni cijevni reaktor moguće je prevesti u druge oblike. Ako se uzme u obzir

$$F_A = F_{A_0}\left(1 - X_A\right) \tag{2.2}$$

i

$$dF_A = -F_{A_0} dX_A \tag{2.3}$$

proizlazi

$$\frac{dV}{F_{A_0}} = \frac{dX_A}{r_A} \tag{2.4}$$

Pomoću jednadžbe (2.4) može se prikazati zavisnost o prostornom vremenu

$$V = F_{A_0}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} \tag{2.5}$$

$$F_{A_0} = C_{A_0} v_0 \tag{2.6}$$

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{V C_{A_0}}{F_{A_0}} \tag{2.7}$$

$$\tau = \frac{V}{v_0} = C_{A_0}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} = -\int_{C_{A_0}}^{C_A} \frac{dC_A}{r_A} \tag{2.8}$$

$$\frac{dC_A}{d\tau} + r_A = 0 \tag{2.9}$$

Bilanca množine tvari za idealni cijevni reaktor izvedena je korištenjem raznih pretpostavki, tako da su matematički modeli realnih reaktora znatno složeniji.
Promatrajući bilancu komponenata kotlastog reaktora

$$dV = r^2 \pi dz = A_s dz \tag{2.10}$$

$$\frac{dX_A}{dz} = \frac{A_s r_A}{F_{A_0}} = \frac{r_A}{C_{A_0} u} \tag{2.11}$$

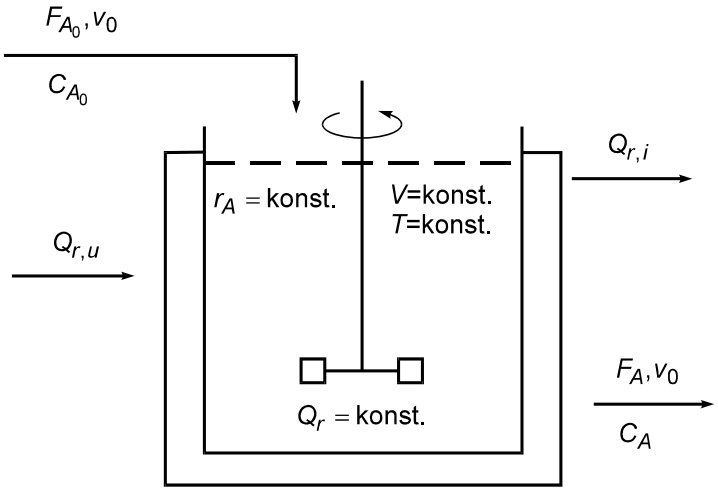
$$r_A = -u \frac{dC_A}{dz} \tag{2.12}$$

i cijevnog reaktora (2.9), uočava se razlika samo u tome da je vrijeme trajanja reakcije u kotlastom reaktoru zamijenjeno prostornim vremenom ili vremenom zadržavanja u modelu cijevnog reaktora. Određene sličnosti proizlaze iz činjenice da se prilikom izvođenja matematičkog modela cijevnog reaktora promatra diferencijalni volumen koji putuje od ulaza reaktora do izlaza idealnim strujanjem. Što znači da nema dodira sa susjednim volumenima pa reakcija unutar jednog diferencijalnog volumena traje toliko koliko iznosi prostorno vrijeme. Stoga se svaki takav diferencijalni volumen shvaća kao diferencijalni kotlasti reaktor u kojem reakcija traje toliko koliki je iznos prostornog vremena.[1,2]

Nešto složenije konstrukcije od cijevnog reaktora je protočno kotlasti reaktor. Razlog tomu je posjedovanje miješala te uređaja ugrađenih za uvođenje i izvođenje reakcijske smjese. Također, važno je omogućeno hlađenje ili grijanje reakcijske smjese. Za vrijeme kemijske reakcije dolazi do izmjene reakcijske mase sa okolinom, što ukazuje da se radi o otvorenom sustavu. Protočno kotlasti reaktor pogodan je za reakcije s malim konverzijama, za reakcije pri nižim tlakovima te za složenije reakcije. Često se kao pretpostavka za PKR uzima idealno miješanje pri čemu je jednak sastav reakcijske smjese i temperatura u svakoj točki reaktora.
Model idealnog PKR-a (slika 3) temelji se na:

- Dobro miješanoj reakcijskoj smjesi
- Radu reaktora u stacionarnom stanju
- Izotermnom radu
- Stalnom volumenu reakcijske smjese.[1]

Zbog jednostavnog matematičkog modela često se koristi za eksperimente kojima se određuju kinetičke reakcije.



Slika 3. *Model "idealnog" protočnog reaktora (PKR)*

Razlika unesene i iznesene množine određene tvari jednaka je množini koja je nastala kemijskom reakcijom u reaktorskom volumenu i jediničnom vremenu

$$F_{A_0} - F_A = r_A V \tag{2.13}$$

Kako je

$$F_A = F_{A_0}\left(1 - X_A\right) \tag{2.14}$$

i

$$F_A = C_A V \qquad F_{A_0} = C_{A_0} V \tag{2.15}$$

proizlazi da je

$$F_{A_0} = C_{A_0} v_0 \tag{2.16}$$

Tada se jednadžba (2.14) može napisati kao

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{C_{A_0} v_0}{r_A} \tag{2.17}$$

τ predstavlja prostorno vrijeme koje je u idealnom PKR-u jednako srednjem vremenu zadržavanja molekula smjese u reaktoru. To ukazuje na nejednako zadržavanje molekula u reaktoru te na postojanje određene raspodjele vremena zadržavanja molekula u reaktoru.

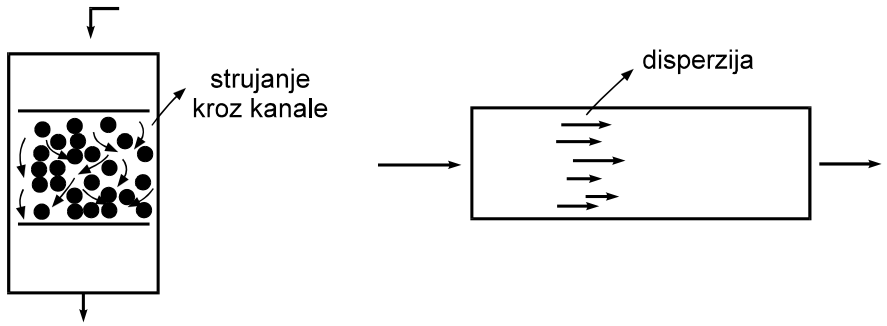
2.2 ODSTUPANJE OD IDEALNOG STRUJANJA I IDEALNOG MIJEŠANJA

U realnim sustavima moguće je postići uvjete približno jednake idealnim. Neophodno je poznavanje značajka koje utječu na pojavu neidealnosti zbog dimenzioniranja reaktora.
Uzroci odstupanja od idealnog strujanja kod cijevnog reaktora (slika 4) su:

- prijenos tvari disperzijom u aksijalnom i radijalnom smjeru
- postojanja laminarnog profila strujanja uslijed malih brzina za reakcije u homogenim sustavima
- promjene puta strujanja unutar reaktora s krutim katalizatorima ili punilima zbog postojanja obilazaka, prostranih tokova ili kraćenja.[4]

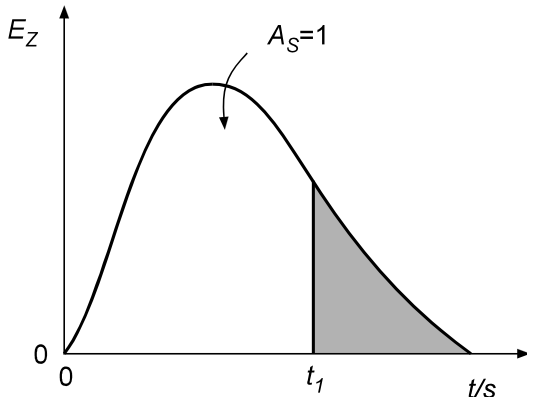
Kod protočno kotlastog reaktora, uzrocima odstupanja od idealnog miješanja smatraju se:

- loša izvedba miješalice čime je uzrokovano postojanje područja unutar reaktora u kojem se miješanje ne odvija kako bi trebalo
- mali omjer V/v_0 zbog čega je nemoguće postići homogenost sustava unutar reaktora.[1,3]



Slika 4. *Uzroci odstupanja od idealnog strujanja u cijevnim reaktorima*

Kod situacija u kojima se isključuje mogućnost predviđanje ili opis hidrodinamičkog ponašanja fluida na temelju fizičke slike, model strujanja određuje se pomoću eksperimentalnih podataka. Osnovni pojam koji se tada koristi je raspodjela vremena zadržavanja elemenata fluida u reaktoru. Funkcijom raspodjele vremena zadržavanja određuje se vjerojatnost izlaza iz reaktora nekog elementa fluida praćenog od njegova ulaza u isti. Statistički, ukupna vjerojatnost dana je površinom ispod krivulje čiji iznos mora biti jednak jedinici[1,5], slika 5.

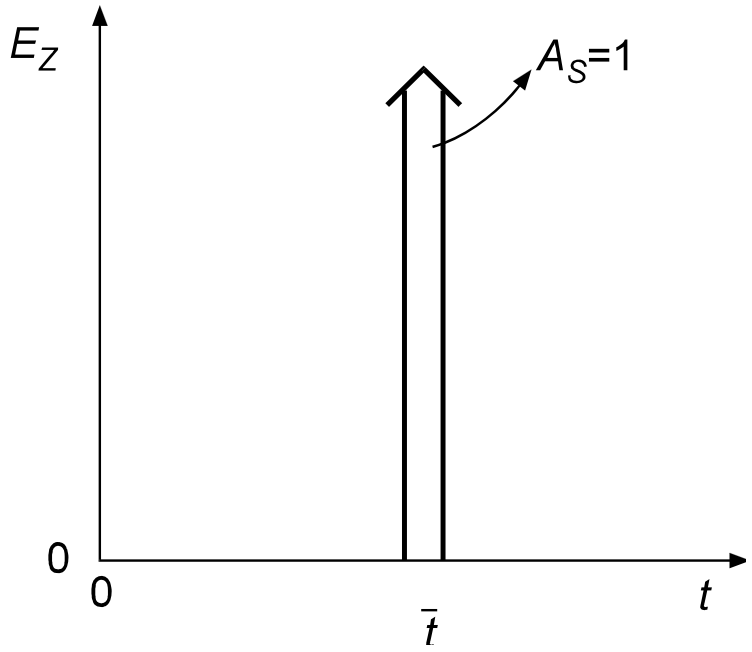


Slika 5. *Funkcija raspodjele vremena zadržavanja za fluid koji protječe kroz reaktor, RVZ funkcija*

Jednadžba koja odgovara RVZ funkciji glasi

$$\int_0^\infty E_z(t)dt = 1 \tag{2.18}$$

Pri idealnom strujanju svi elementi fluida imaju istu maksimalnu vjerojatnost da će se svaki element jednako vremenski zadržati u reaktoru. Stoga je RVZ funkcija definirana Diracovom ili delta funkcijom jer u tom slučaju ne postoji raspodjela vremena zadržavanja, slika 6. S obzirom da površina ispod E_z krivulje mora biti 1, ordinata je beskonačno velika.[1,5,6]



Slika 6. *RVZ funkcija za idealno strujanje u cijevnom reaktoru*

Uzmemo li za vrijeme ulaska jednog elementarnog volumena u reaktor nulu, tada slijedi da je:

$$E_z(t) = \delta(t) = 0 \text{ za } t \neq 0 \tag{2.19}$$

$$E_z(t) = \delta(t) = 1 \text{ za } t \neq 0 \tag{2.20}$$

Iz toga proizlazi definicija delta funkcije koja odgovara jednadžbi

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1 \tag{2.21}$$

Postoji više opcija pronalaženja RVZ funkcije za strujanje uz idealno miješanje. Jedna od njih je postavljanje bilance množine tvari unesene u reaktor u diferencijalnom volumenu, koja zapravo predstavlja i bilancu za PKR reaktor pri nestacionarnom načinu rada.

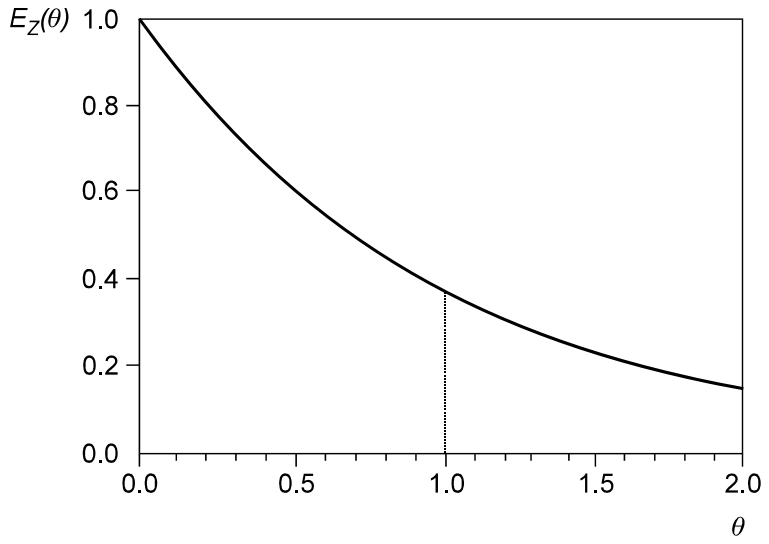
$$V\frac{dC_A}{dt} = v_0 C_{A_0} - vC_A \tag{2.22}$$

Uz pretpostavku o impulsnom poremećaju koncentracija na ulazu, za $t>0$, $C_{A_0} = 0$, glasi:

$$\frac{C_A}{C_{A_0}} = \exp\left[-\frac{tv}{V}\right] = \exp[-\theta] \tag{2.23}$$

gdje omjer C_A/C_{A0} predstavlja bezdimenzijsku E_Z funkciju i delta funkciju.

U PKR reaktoru raspodjela vremena zadržavanja ima eksponencijalni oblik ovisan o parametru τ, slika 7.



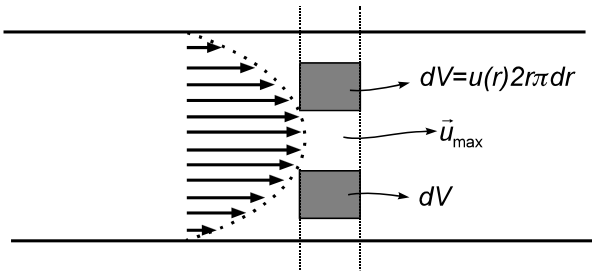
Slika 7. *RVZ funkcija fluida koji protječe kroz PKR reaktor uz idealno miješanje*

2.3. MODELI STRUJANJA

Kod realnog sustava uslijed neidealnog strujanja i miješanja, RVZ funkcije ne poprimaju oblike graničnih načina strujanja. Oblik realnih RVZ funkcija predočava se različitim modelima strujanja. Ovisno o broju parametara i složenosti matematičke funkcije, primjenjuju se modeli strujanja za određivanje odstupanja od graničnih oblika strujanja. Modeli strujanja dijele se u dvije skupine. Prvu skupinu čine modeli zasnovani na hidrodinamičkim značajkama sustava od kojih su najprimjenjivaniji *model aksijalne disperzije* i *laminarni model*. Drugu skupinu čine mehanistički modeli izvedeni ovisno o načinu predodžbe strujanja kroz reaktor kao npr. *PKR model* i *gama model*. Zajedničke značajke navedenih modela strujanja je njihovo slaganje s eksperimentalno dobivenim E_Z funkcijama.[5,6]

2.3.1 MODEL LAMINARNOG STRUJANJA

Kako je u cijevnim reaktorima brzina strujanja mala, najčešće se pojavljuje laminarni oblik strujanja. Laminarno strujanje karakterizira parabolični profil strujanja pri čemu ne dolazi do miješanja između slojeva, slika 8.



Slika 8. *Model laminarnog strujanja*

Brzina strujanja koja se javlja u određenoj točki presjeka reaktora čiji je polumjer *r*, opisana je jednadžbom

$$u(r) = 2u_s\left[1-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right] \tag{2.24}$$

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

$$u_s = \frac{v_0}{r_0^2\pi} \tag{2.25}$$

Dok srednje vrijeme zadržavanja dobivamo iz

$$\bar{t} = \frac{L}{u_s} \tag{2.26}$$

Iz slike 8 vidljivo je da se brzina strujanja smanjuje od središta prema stijenkama reaktora , što rezultira većim vremenom zadržavanja uz stijenku reaktora.

Vrijeme zadržavanja za element fluida u točki r

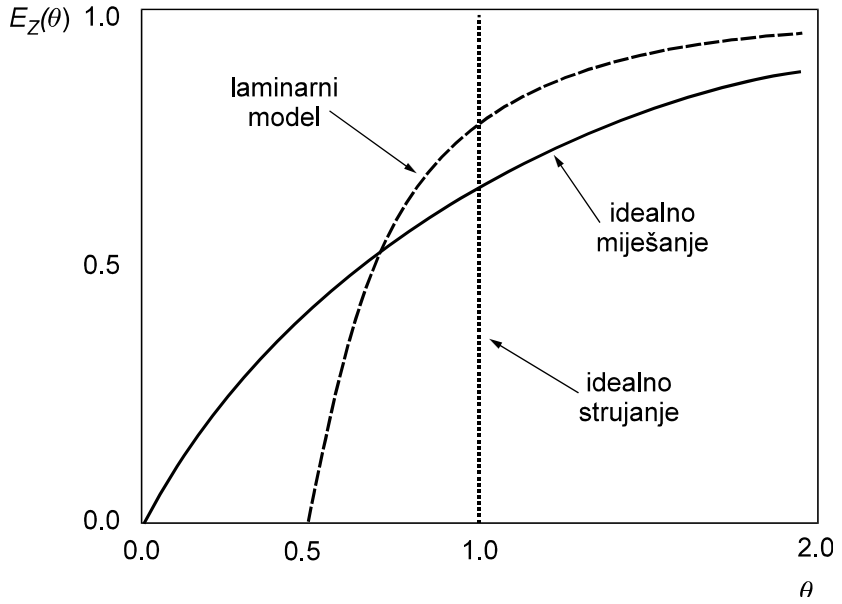
$$t = \frac{L}{u(r)} = \frac{\bar{t}}{2\left[1-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right]} \tag{2.27}$$

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

$$E_Z(t) = \frac{\Delta v(r)}{v_0} \tag{2.28}$$

Ovisno o vremenu zadržavanja kod laminarnog strujanja, razlikuje se oblik E_Z krivulje; Međutim uvijek se nalazi između graničnih krivulja idealnog miješanja i idealnog strujanja, slika 9. Raspodjela vremena zadržavanja dobiva se pomoću bilance množine tvari uz pretpostavku o laminarnom strujanju trasera ΔV u cijevi.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u(r)\frac{\partial C_A}{\partial z} \tag{2.29}$$



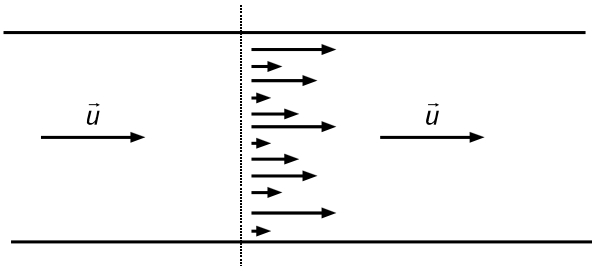
Slika 9. *Usporedba modela laminarnog strujanja s graničnim oblicima idealnog strujanja i idealnog miješanja*

2.3.2 MODEL AKSIJALNE DISPERZIJE

Model aksijalne disperzije najpogodniji je za opis strujanja kroz reaktore koji sadrže nepokretan sloj krutog katalizatora. Realistično prikazuje strujanja kod cijevnih reaktora u kojima se javljaju mala odstupanja od idealnog strujanja, slika 10. Difuzijski prijenos se zasniva na idealnom strujanju kojemu se dodaje makrostrujanje u smjeru osi, te se opisuje Fickovim zakonom

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \tag{2.30}$$

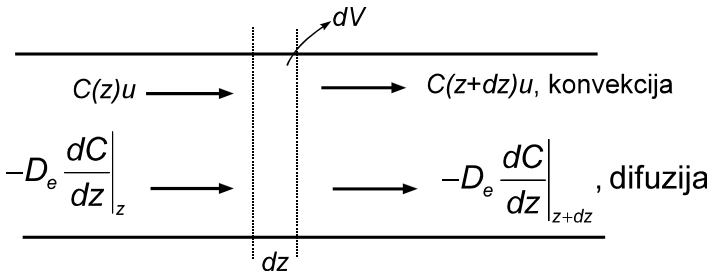
Kod Fickovog zakona parametar D_e označava *prosječan koeficijent difuzije* ili *koeficijent disperzije.*



Slika 10. *Strujanje prema modelu aksijalne disperzije*

Raspodjela vremena zadržavanja dobiva se pomoću bilance množine tvari, čija jednadžba zapravo prestavlja prijenos tvari konvekcijom i difuzijom u nestacionarnom stanju, unutar elemenata volumena ΔV, slika 11.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} u \tag{2.31}$$



Slika 11. *Model aksijalne disperzije; postavljanje bilance tvari u elementu volumena*

Navedena jednadžba (2.31) prevodi se u bezdimenzijski oblik:

bezdimenzijskog vremena, $\theta = \frac{tu}{L}$ (2.32)

bezdimenzijske dužine, $x = \frac{z}{L}$ (2.33)

te se dobiva jednadžba koja glasi

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{D_e}{uL}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \tag{2.34}$$

iz čega proizlazi da je disperzijski broj jednak recipročnoj vrijednosti Pecletove bezdimenzijske značajke

$$DB = \frac{D_e}{uL} \tag{2.35}$$

U slučaju da nema disperzije DB→0, strujanje je idealno. Ako se radi o potpunoj disperziji DB→ ∞, strujanje se odvija uz idealno miješanje.U slučaju realnog strujanja, disperzijska značajka je između navedenih graničnih vrijednosti.

E_z funkciju za simetričnu raspodjelu moguće je dobiti preko izraza

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

Povezanost varijance s Pecletovim brojem i disperzijske značajke za navedeni slučaj dana je izrazom

$$\sigma_\theta^2 = 2D_B = \frac{2}{Pe} \tag{2.37}$$

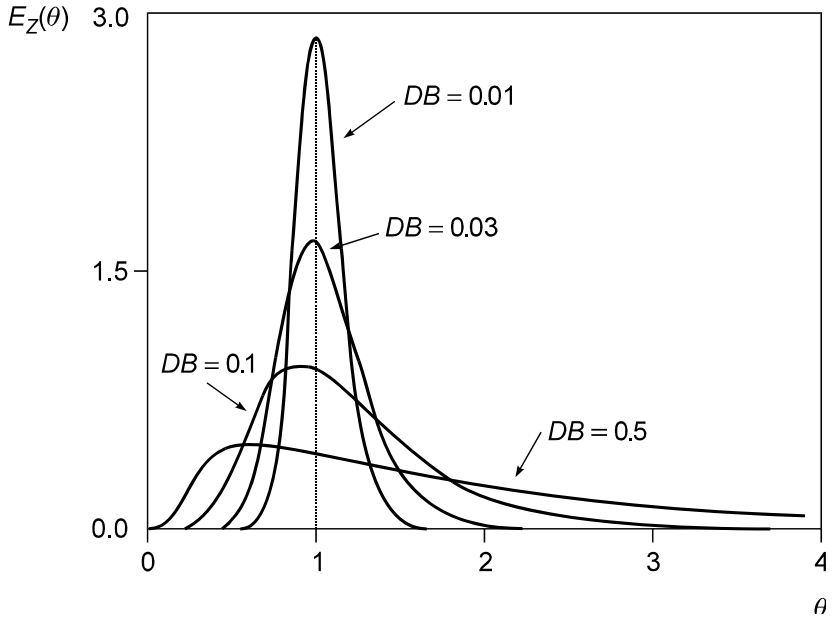
Kada nema disperzije na ulazu i na izlaz, odnosno kada je riječ o"zatvoreno-zatvoreno" sustavu, a disperzijska značajka za realno strujanje iznosi manje od 0,05; E_z funkcija u tom slučaju se dobiva iz sljedeće jednadžbe [3,5]

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

$E_z$funkcija za "otvoreno-otvoreno" sustav u kojem na izlazu i ulazu postoji disperzija u strujanju

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

što prikazuje slika 12,



Slika 12. *Model aksijalne disperzije, RVZ krivulje za sustav "otvoreno – otvoreno"*

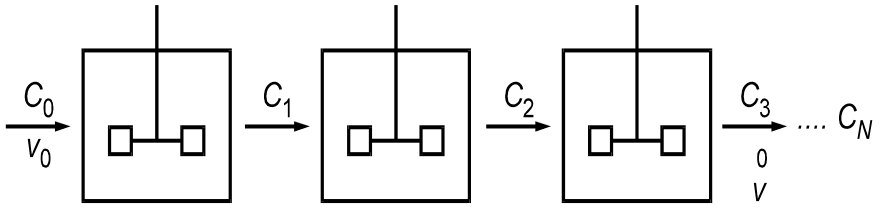
U ovom slučaju varijancu i disperzijsku značajku povezuje izraz

$$\sigma_\theta^2 = 2D_B + 8D_B^2 \tag{2.40}$$

Disperzijska značajka za pojedine sustave se određuje eksperimentalno pomoću dobivenih E_z funkcija. Na osnovi dobivene krivulje određuje se varijanca. Pri većim disperzijskim značajkama i strujanjima približnim onima uz idealno miješanje, povećava se mogućnost neslaganja modela i eksperimentalne krivulje. Uzrok navedenog odstupanja je miješanje reakcijske smjese u smjeru kako je pretpostavljen model i po presjeku reaktora. [5,10]

2.3.3 MEHANISTIČKI MODELI STRUJANJA

PKR model je jednostavan model utemeljen na strujanju reakcijske smjese kroz niz međusobno povezanih diferencijalnih PKR reaktora uz idealno miješanje, slika 13.



Slika 13.*Strujanje prema modelu ćelija vezanih u seriju*

Za prikazani model E_z funkcija dobiva se iz bilance množine tvari uz pretpostavku da ne dolazi do kemijske reakcije.

Izraz E_z za N ćelija

$$E_z(t) = \frac{t^{N-1}}{(\mathrm{N}-1)!\,\bar{t}_i^{\,n}} \exp\left[-\frac{t}{\bar{t}_i}\right] \tag{2.41}$$

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

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

Izraz općeg gama modela

$$E_z\left(t\right) = \frac{1}{d_g \Gamma(p)} (t-D)^p \exp\left[-\frac{t-D}{d_g}\right] \tag{2.42}$$

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

Gama funkcija dana je izrazom

$$\Gamma(\mathrm{p}) = \int_0^\infty x^{p-1} \exp[-x]dx \tag{2.43}$$

Kao glavni nedostatak ovog modela smatra se pomanjkanje fizičke slike strujanja te nije moguće predvidjeti brojčanu vrijednost parametara.

2.4 EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE RVZ FUNKCIJE

Pri određivanju RVZ funkcije u diferencijalnom volumenu nužno je dodavanje određene količine trasera kako bi se promatrani diferencijalni volumen razlikovao od ostatka reakcijske smjese. Prisutnost trasera od ulaza do izlaza iz reaktorskog prostora očitava se promjenom koncentracije.

Prilikom odabira trasera važno je:

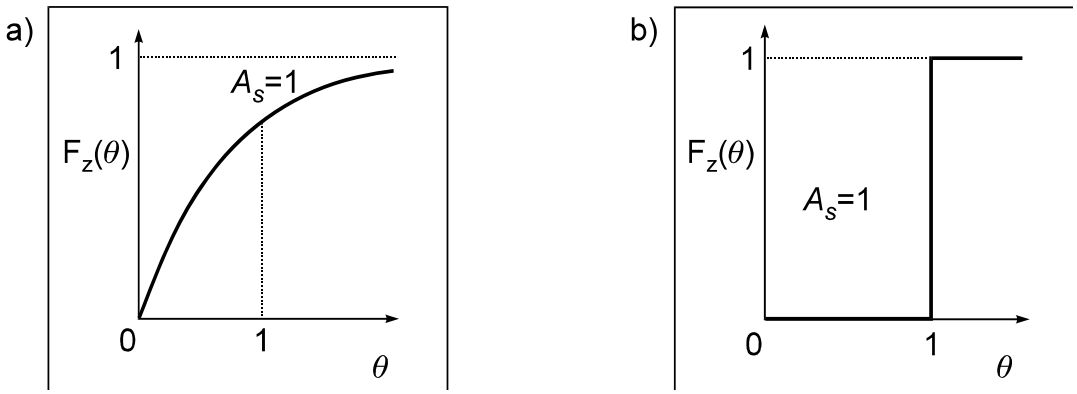
- da on ne mijenja hidrodinamička svojstva ispitivanog fluida
- da kemijski ne reagira s njim
- da se može precizno odrediti njegova koncentracija na izlazu

Za analizu strujanja koristi se impulsni poremećaj i poremećaj u obliku skokomične ili step funkcije. Impulsni poremećaj aproksimira se Diracovom funkcijom što znači da je u što kraćem vremenu potrebno unesti traser u sustav. Analizom odziva,što ga uzrokuje poremećaj nastao dodavanjem trasera u sustav, moguće je eksperimentalno odrediti E_Z ili RVZ funkciju.[5,11]

Skokomična ili step funkcija eksperimentalno se dobiva uvođenjem konstantne količine trasera koji uzrokuje promjenu koncentacije na izlazu do stacionarnog stanja a prati se od nultog vremena, slika 14. Tako nastala odzivna krivulja naziva se F_Z funkcija. Skokomičnu ili step funkciju definirana izraz[9]:

$$F(t)=0 \qquad t<0$$

$$F(t)=1 \qquad t>0 \tag{2.44}$$

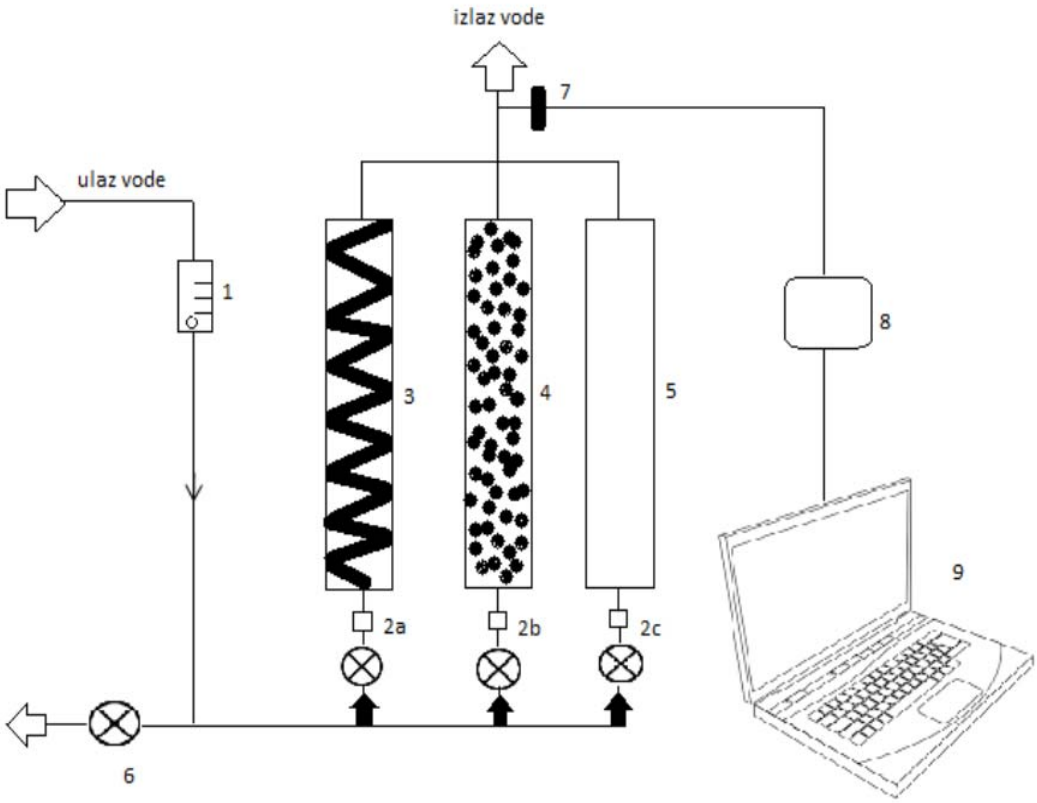


Slika 14. *Funkcija odziva, F_z na skokomični poremećaj u a) sustavu s idealnim miješanjem i b) sustavu s idealnim strujanjem*

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 APARATURA I POSTUPAK MJERENJA

Postupak mjerenja odvija se u shematski prikazanoj aparaturi (Slika 15). Na početku rada potrebno je zatvoriti ventil za ispust vode iz aparature u odvod te otvoriti ventile na sve tri cijevi kako bi osigurali nesmetan protok vode sustavom.



Slika 15. *Shematski prikaz eksperimentalne aparature*

Legenda:

1-rotametar

2a,2b,2c- mjesta unosa trasera

3-spiralna cijev

4-cijev sa staklenim kuglicama

5-ravna prazna cijev

6-pipac za ispust vode iz sustava

7-konduktometrijska ćelija

8-konduktometar

9-prijenosno računalo

Otvaranjem pipe za dovod vode dolazi do punjenja sustava. Voda prvo prolazi kroz rotametar kojim se regulira željeni protok vode u sustavu, a zatim popunjava tri cijevi: spiralnu dugu cijev, cijev ispunjenu staklenim kuglicama i kratku praznu cijev. Ispod svake cijevi nalazi se septum kroz koji se injektira određena koncentracija i volumen trasera. Na vrhu cijevi nalazi se protočna konduktometrijska ćelija sastavljena od Pt-elektroda kojom se mjeri vodljivost kapljevine. Nastali signal se preko konduktometra vodi na računalo koji pretvara vodljivost u naponski signal koji se očitava u obliku pika na grafu.

Eksperimentalna mjerenja provode se za svaku cijev tri puta koristeći dvije različite koncentracije trasera i dva različita volumena pri tri različita protoka. U ovom slučaju kao traser koristile su se vodene otopine KCl-a masene koncentracija 300 g/L i 150 g/L, te volumena 1 mL i 0,5 mL. Injekcijom se traser određene koncentracije i volumena injektira u što kraćem vremenskom periodu u cijev pri čemu se istodobno pokreće program na računalu NI SignalExpress. Konduktometrijska ćelija svake jedne sekunde mjeri vodljivost koja se znatno mijenja dolaskom trasera na vrh cijevi. Konduktometar izlazni signal vodi na računalo koji ga pretvara u naponski signal i prikazuje RVZ krivulju i softwereu NI SignalExpress. Praćenjem konduktivnosti vode, koja najčešće iznosi između 0,55 i 0,60 mS, može se uočiti da li je sav traser izašao iz sustava. Nakon što konduktivnost dosegne željenu vrijednost, obustavlja se mjerenje.

Provedbom eksperimenta sa obojenim traserom, čiji smo prolaz kroz sustav mogli vizualno pratiti, uočili smo razlike u strujanja u pojedinim cijevima što je dokaz različitog stupnja miješanja.

Za preciznu provedbu eksperimenta potrebno je i provesti baždarenje rotametra. Baždarenje smo proveli počevši s najmanjom oznakom protoka na rotametru prema većim. Nakon odabrane vrijednosti protoka, pusti se vodovodna voda kroz sustav te se otvori pipac za ispust i jedna cijev dok su preostale dvije zatvorene. U vremenu od jedne minute menzurom se mjeri volumen vode koja je prošla kroz sustav. Zatim se ponovi isto sa otvorenom drugom cijevi, te sa trećom.

Protok 1(Tablica 3.1) označava strujanje sa otvorenom spiralnom cijevi, *Protok 2* sa otvorenom cijevi punjenom staklenim kuglicama i *Protok 3* pri otvorenoj samo praznoj cijevi.

Oznaka protoka na rotametru	Protok 1 [ml/min]	Protok 2 [ml/min]	Protok 3 [ml/min]	Srednji protok [ml/min]
1,1	42	47	47	45
1,2	75	74	74	74
2,1	113	118	122	118
2,2	148	148	155	150
3,1	169	175	182	175
3,2	211	213	225	216
4,1	234	236	249	240
4,2	266	265	280	270

Tablica 3.1 *Izmjereni volumni protoci u sustavu i njihova srednja vrijednost*

Uz poznati volumni protok, dimenzije reaktora (duljina i polumjer) te parametre (gustoća vode i kinematička viskoznost vode pri 25°C) može se izračunati režim strujanja unutar cijevi, tzv. Reynoldsov broj koristeći sljedeće izraze[5].

$$u = \frac{v_0}{r^2 \pi} \tag{3.1}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{ud\rho}{\eta} \tag{3.2}$$

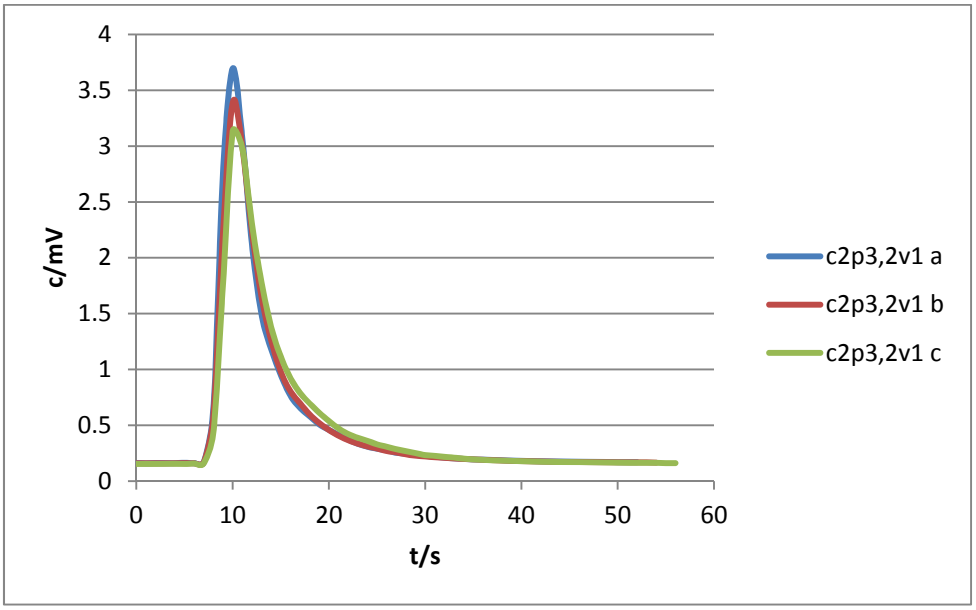
Dobivene vrijednosti Reynoldosvog broja ukazuju uglavnom na laminarno strujanje pri izmjerenim protocima (Tablica 3.2)

volumni protok [m3/s]	Re
7,56E-06	540,45
1,24E-05	886,18
1,96E-05	1402,79
2,51E-05	1792,23
2,92E-05	2090,27
3,61E-05	2579,07
3,99E-05	2857,24
4,51E-05	3222,84

Tablica 3.2 *Izračunate vrijednosti Reynoldsovog broja ovisno o volumnom protoku*

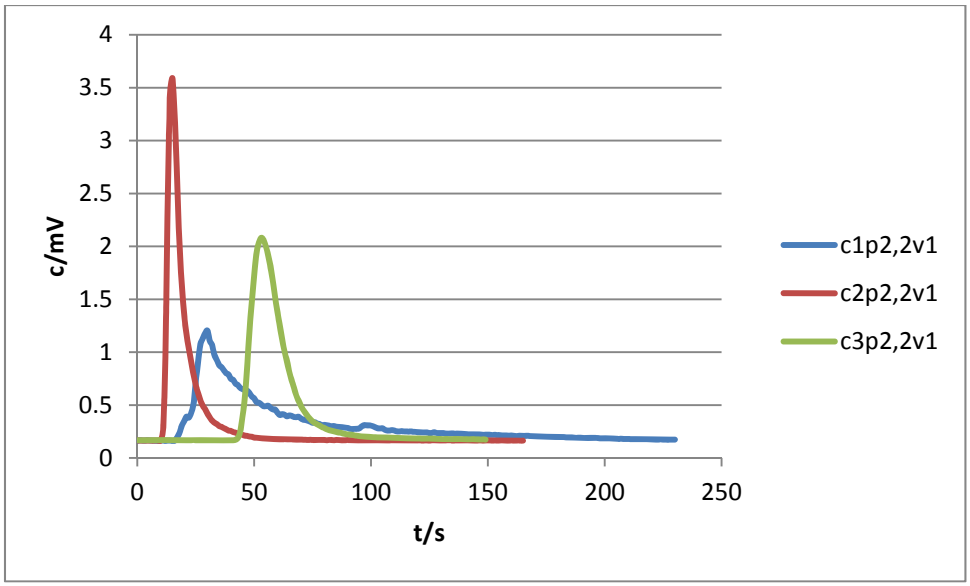
3.2 PRIKAZ C KRIVULJA

Nadalje prikazane eksperimentalne RVZ krivulje (c-krivulje) prikazuju odziv na impulsni poremećaj. One omogućavaju pregled vremenskog perioda u kojem se traser zadržavao u sustavu kao i njegovu koncentraciju. Koncentracija trasera proporcionalna je vodljivosti izmjerene pomoću konduktometra, te je preračunata u napon $[mV]$.



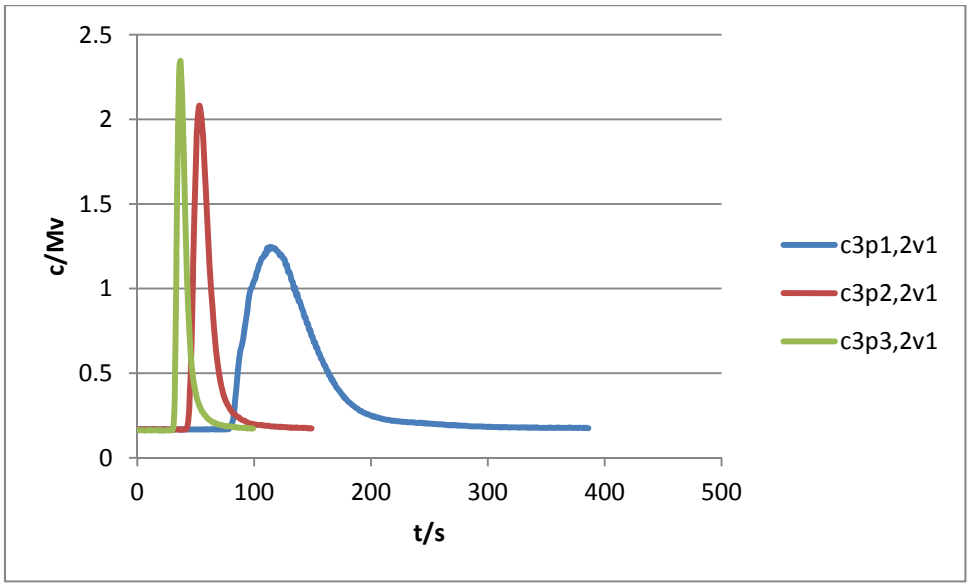
Slika 16. *Usporedba RVZ krivulja dobivenih ponavljanjem eksperimenta tri puta pri istim uvjetima*

Slika 16. Prikazuje tri krivulje dobivene ponavljanjem u istoj cijevi pri istom protoku, volumenu trasera i koncentraciji. Uočavamo da postoje veoma mala odstupanja između dobivenih krivulja.



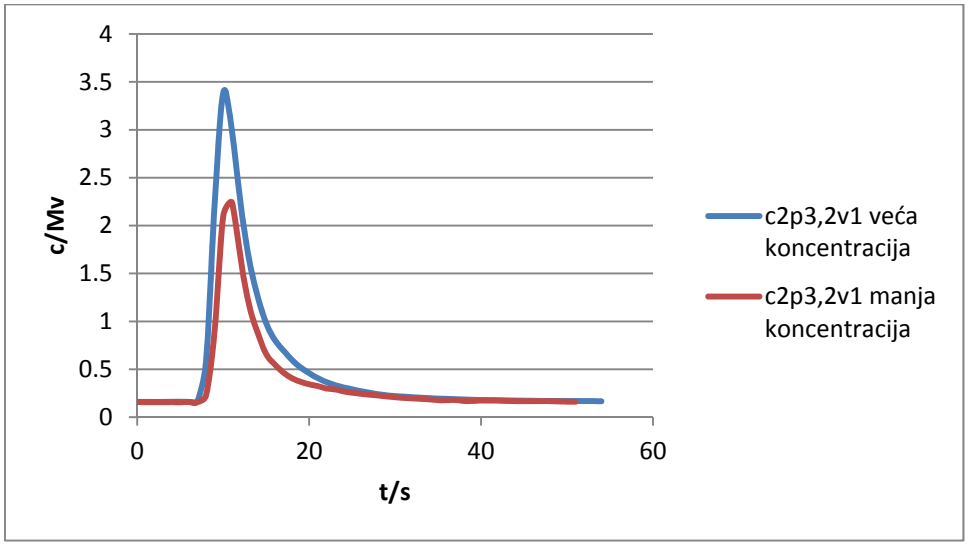
***Slika 17**. Usporedba RVZ krivulja dobivenih za različite cijevi pri istoj koncentraciji i protoku*

Iz slike 17. usporedbom sve tri cijevi koristeći istu koncentraciju i protok, vidljivo je da je kod prve cijevi najmanja vodljivost, dok je kod druge najveća.



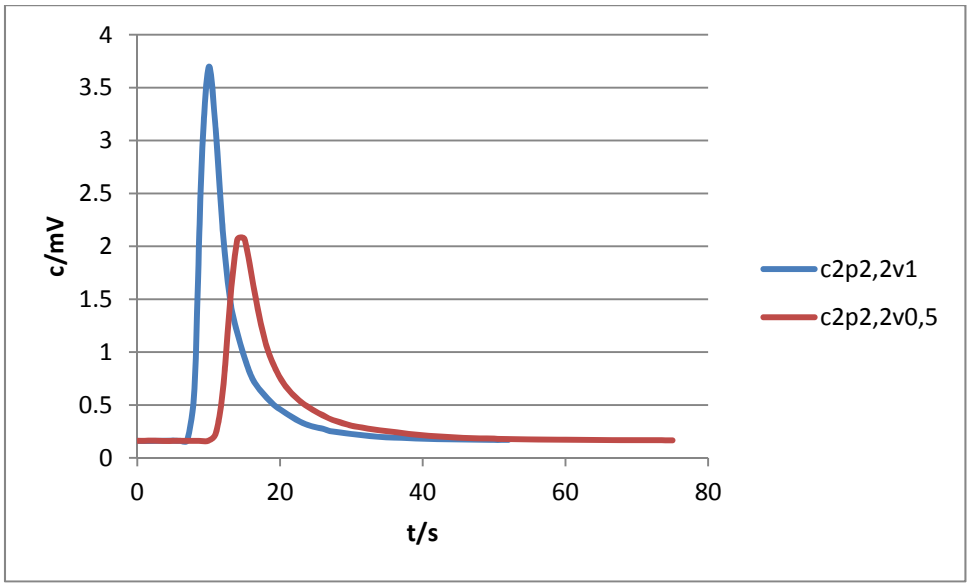
***Slika 18.** Usporedba RVZ krivulja dobivenih povećavanjem protoka u istoj cijevi*

Slika 18. prikazuje usporedbu krivulja dobivenih u istoj cijevi povećavanjem protoka. Uočavamo da je pri najvećem protoku vodljivosti i najveća, dok je pri najmanjem protoku najmanja. Ovakva razlika u rezultatima uvjetovana je sporijem strujanju trasera pri manjem protoku.



Slika 19. *Usporedba RVZ krivulja dobivenih pri različitoj koncentraciji*

Slika 19. prikazuje usporedbu utjecaja koncentracije na vodljivost. Vidljivo je da pri većoj koncentraciji ϒ(KCl)=300g/L vodljivost veća naspram manjoj koncentraciji ϒ(KCl)=150g/L. Zaključujemo da vodljivost raste povećanjem koncentracije.



Slika 20. *Usporedba RVZ krivulja dobivenih za različite volumene*

Slika 20. prikazuje krivulje dobivene na temelju različitih volumena trasera. Vidimo da se vodljivost povećava povećanjem volumena trasera.

4. REZULTATI I RASPRAVA

Eksperimentalno dobiveni rezultati koncentracije trasera c_i i vremenskog intervala Δt (1s) potrebni su za daljni izračun koji se odvija u sljedećim koracima [7,8,12]:

- iz eksperimentalno dobivenih vrijednosti koncentracije trasera određuje se najmanja vrijednost→c_{imin}

- provodi se normalizacija koncentracija prema izrazu:

$$c_{inorm} = c_i - c_{i\min} \tag{4.1}$$

- zatim se određuje približna površina Q

$$Q = \sum_{i=1}^{n} c_{inorm} \Delta t_i \tag{4.2}$$

- srednje vrijeme zadržavanja jednako je

$$\overline{t} = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_{inorm} t_i}{\sum_{i=1}^{n} c_{inorm}} \tag{4.3}$$

- bezdimenzijsko vrijeme

$$\theta = \frac{t_i}{\overline{t}} \tag{4.4}$$

- varijancu σ^2, eksperimentalno određene krivulje

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 c_{inorm}}{\sum_{i=1}^{n} c_i} - \overline{t}^{\,2} \tag{4.5}$$

- bezdimenzijsku varijancu, σ_θ^2

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{\overline{t}^{\,2}} \tag{4.6}$$

- disperzijski broj, DB_1

$$DB_1 = \frac{\sigma_\theta^2}{2} \tag{4.7}$$

- Peckletovu značajku, Pe_1

$$Pe_1 = \frac{1}{DB_1} \tag{4.8}$$

- E_z funkcija definirana je bezdimenzijskim vremenom θ te glasi

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

- Uzimajući u obzir jednadžbu (2.37) može se izračunati DB_2, koja je nakon sređivanja jednaka

$$DB_2 = -\frac{1}{8} \pm \frac{\sqrt{4 + 32 * 2DB_1}}{16} \tag{4.10}$$

- Tada je Peckletova značajka Pe_2 jednaka recipročnoj vrijednosti DB_2

4.1 TABLIČNI PRIKAZ IZRAČUNATIH VRIJEDNOSTI

U sljedećem dijelu biti će tablično prikazane srednje vrijednosti srednjih vremena zadržavanja ($\bar{t}$),te disperzijskih brojeva(DB_1 i DB_2) odnosno Peckletovih značajki (Pe_1 i Pe_2).[11]

1. Dobiveni rezultati za volumen trasera 1 mL i koncentracije ϒ(KCl)=300 g/L

Protok[mL/min]	$\bar{t}$**/s**	**DB_1**	**DB_2**	**Pe_1**	**Pe_2**
74	156	0,120	0,089	8,33	11,24
150	63	0,099	0,076	10,10	13,16
216	43	0,076	0,061	13,16	16,39

Tablica 4.1 *Izračunate vrijednosti za praznu cijev*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	50	0,042	0,036	23,81	27,78
150	20	0,028	0,025	35,71	40,00
216	14	0,019	0,018	52,63	55,56

Tablica 4.2 *Izračunate vrijednosti za cijev ispunjenu staklenim kuglicama*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	127	0,0051	0,0050	196,08	200,00
150	60	0,0019	0,0018	526,32	555,56
216	41	0,0007	0,0006	1428,57	1666,67

Tablica 4.3 *Izračunate vrijednosti za spiralnu cijev*

2. Dobiveni rezultati za traser volumena 0,5 mL i koncentracije ϒ(KCl)=300 g/L

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	136	0,068	0,056	14,71	17,86
150	56	0,078	0,062	12,82	16,13
216	37	0,077	0,061	12,99	16,39

Tablica 4.4 *Izračunate vrijednosti za praznu cijev*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	45	0,033	0,029	30,30	34,48
150	20	0,021	0,019	47,62	52,63
216	15	0,022	0,020	45,45	50,00

Tablica 4.5 *Izračunate vrijednosti za cijev ispunjenu staklenim kuglicama*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	129	0,0101	0,0097	99,01	103,09
150	59	0,0019	0,0019	526,32	526,32
216	40	0,0013	0,0012	769,23	833,33

Tablica 4.6 *Izračunate vrijednosti za spiralnu cijev*

3. Dobiveni rezultati za volumen trasera 1 mL i koncentracije ϒ(KCl)=150 g/L

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	148	0,082	0,065	12,20	15,38
150	52	0,064	0,053	15,63	18,87
216	38	0,077	0,062	12,99	16,13

Tablica 4.7 *Izračunate vrijednosti za praznu cijev*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	52	0,053	0,045	18,87	22,22
150	20	0,023	0,021	43,48	47,62
216	15	0,019	0,018	52,63	55,56

Tablica 4.8 *Izračunate vrijednosti za cijev ispunjenu staklenim kuglicama*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	133	0,007	0,0068	142,86	147,06
150	60	0,003	0,0029	333,33	344,83
216	41	0,001	0,0009	1000,00	1111,11

Tablica 4.9 *Izračunate vrijednosti za spiralnu cijev*

4. Dobiveni rezultati za volumen trasera 0,5 mL i koncentraciju ϒ(KCl)=300 g/L

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	115	0,074	0,059	13,51	16,95
150	46	0,041	0,035	24,39	28,57
216	31	0,034	0,030	29,41	33,33

Tablica 4.10 *Izračunate vrijednosti za praznu cijev*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	52	0,031	0,028	32,26	35,71
150	21	0,019	0,017	52,63	58,82
216	13	0,018	0,016	55,56	62,50

Tablica 4.11 *Izračunate vrijednosti za cijev ispunjenu staklenim kuglicama*

Protok[mL/min]	$\bar{t}$/s	DB_1	DB_2	Pe_1	Pe_2
74	129	0,0058	0,0057	172,41	175,44
150	58	0,0016	0,0016	625,00	625,00
216	39	0,0009	0,0009	1111,11	1111,11

Tablica 4.12 *Izračunate vrijednosti za spiralnu cijev*

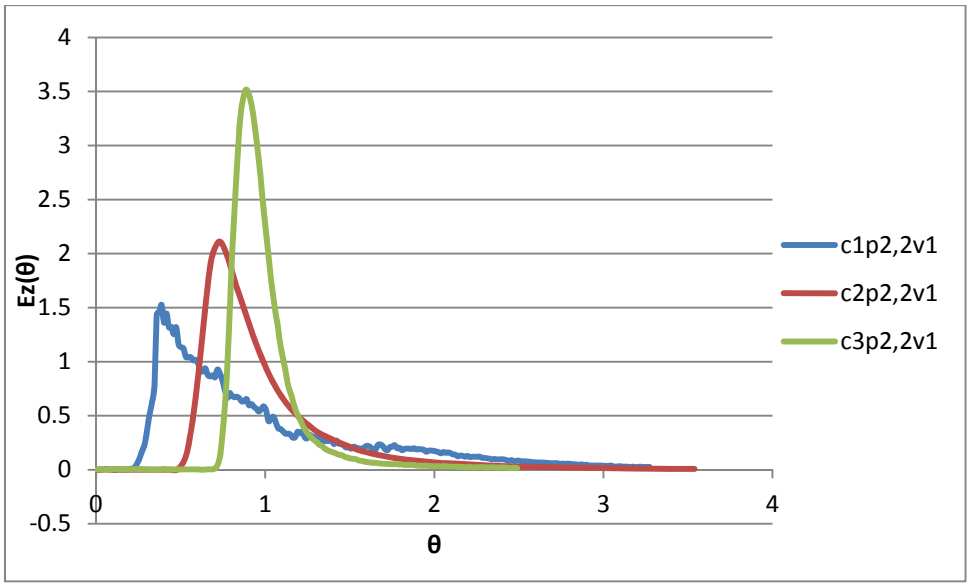
Iz prikazanih rezultata uočavamo da je srednje vrijeme zadržavanja najmanje kod cijevi napunjene staklenim kuglicama što je i logično jer ona ima najmanji slobodni volumen od ispitivane 3 cijevi (volumenom kuglica smanjen je volumen protjecanja fluida). Pri određivanju vrijednosti disperzijskog broja uočavamo da bitnu ulogu ima vrsta cijevi u kojoj je proveden eksperiment. Vidljivo je da je disperzijski broj pretežno najveći u praznoj cijevi, a najmanji u spiralnoj dugoj cijevi. Veoma nizak disperzijski broj u spiralnoj cijevi ukazuje na najmanje odstupanje od idealnog strujanja. Određeno neslaganje rezultata prisutno je kod eksperimenta s praznom cijevi te stoga pretpostavljamo da je traser zaostao u sustavu te zbog toga dobivamo lažne vrijednosti disperzijskog broja.

4.2 EKSPERIMENTALNIH PRIKAZ BEZDIMENZIJSKIH RVZ KRIVULJA

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

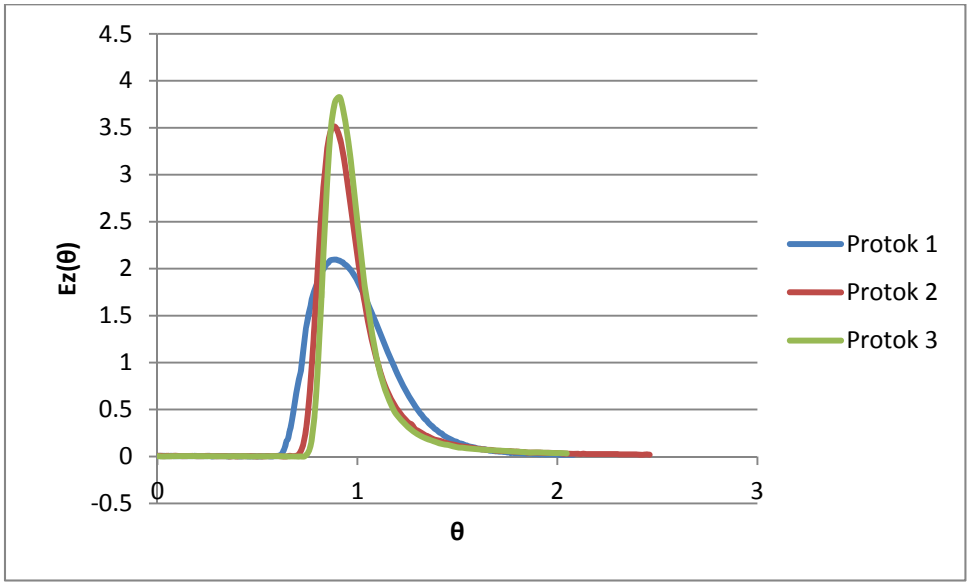
$$E_z(\theta) = \frac{\bar{t}c_{inorm}(t)}{Q} \tag{4.11}$$

Slika 21. prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja u različitim cijevima, ali pri istom protoku i volumenu trasera. Za spiralnu cijev najidealnija je dobivena krivulja, što možemo pripisati njezinoj najvećoj duljini i najmanjem promjeru što pogoduje idealnom strujanju. U cijevi napunjenoj staklenim kuglicama idealniji je odziv zbog manjeg slobodnog volumena za strujanje trasera. Najnepovoljniji rezultat prikazuje krivulja dobivena u ravnoj praznoj cijevi.

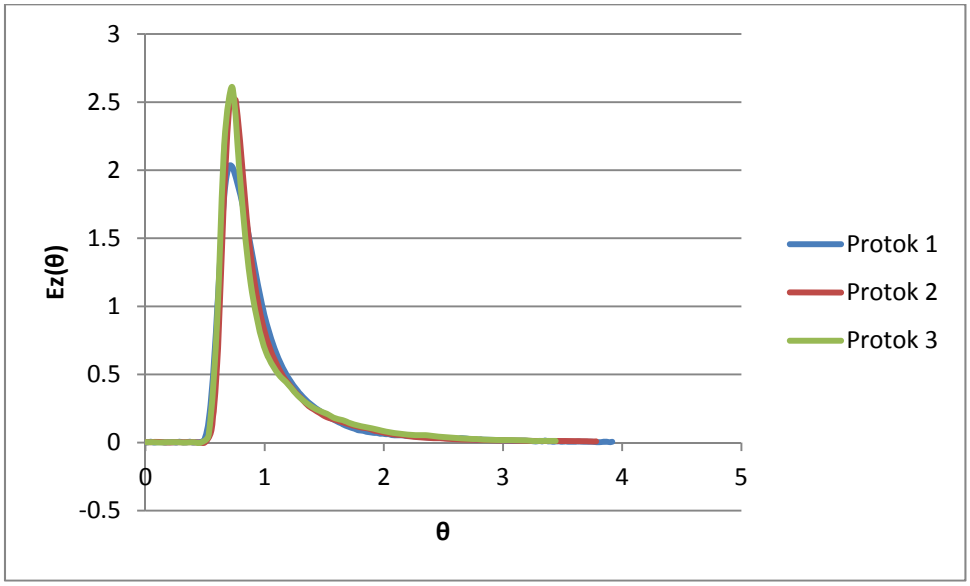


Slika 21. *Usporedba $E_z(\theta)$ funkcije dobivene za tri različite cijevi*

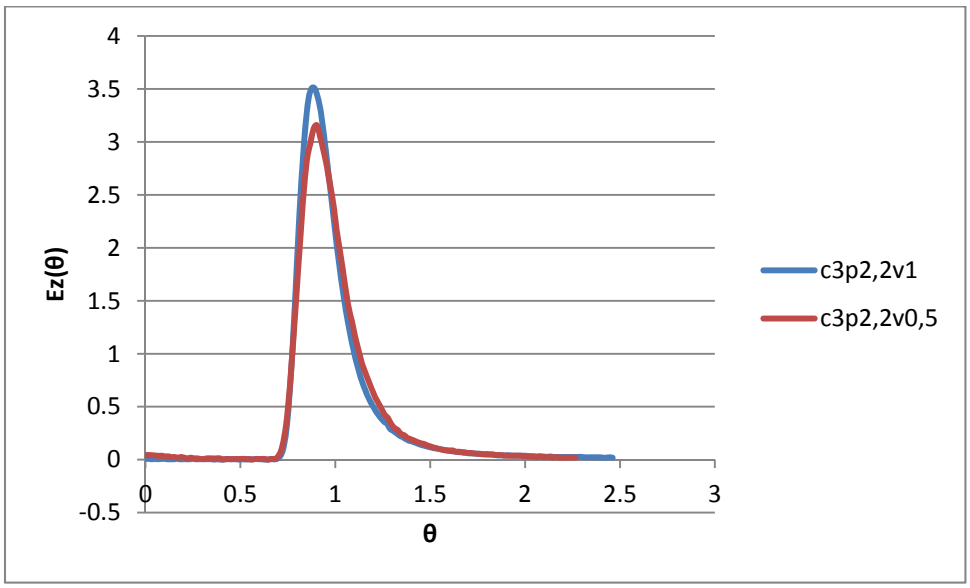
Na slici 22. i 23. prikazane su krivulje raspodjele vremena zadržavanja u istoj cijevi i koristeći isti volumen trasera, ali pri različitim protocima. Najveći protok označava zelena krivulja, dok je najmanji protok označen plavom krivuljom. Možemo uočiti da je strujanje idealnije pri većem protoku, dok smanjenje protoka rezultira i lošijem odzivu. Razlika između najmanjeg i preostala dva protoka je uočljiva, što pripisujemo boljem strujanju pri većim protocima. Također usporedbom slika vidljivo je da poželjnije rezultate dobivamo koristeći manji volumen trasera. Razlog tomu je lakše i brže injektiranje trasera čime se približavamo idealnom impulsnom poremećaju.



Slika 22. *Usporedba $E_z(\theta)$ funkcije dobivene za volumen trasera 1 mL povećavanjem protoka*

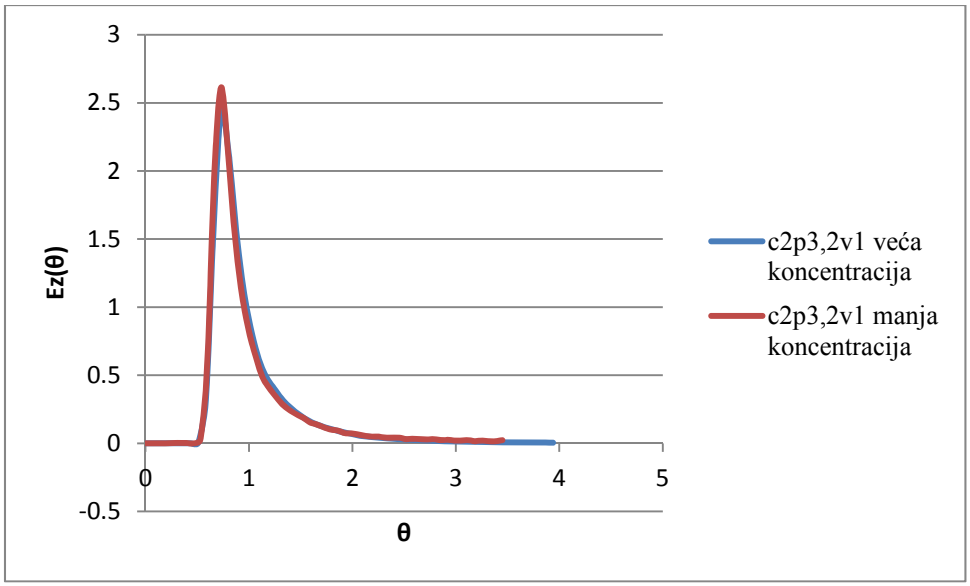


Slika 23. *Usporedba $E_z(\theta)$ funkcije dobivene za volumen trasera 0,5 mL povećavanjem protoka*



Slika 24. *Usporedba $E_z(\theta)$ funkcije dobivene pri različitim volumenima trasera*

Slika 24. Prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja dobivenu pri različitim volumenima trasera, ali u istoj cijevi i istom protoku. Dobiveni rezultat nisu u skladu s očekivanim jer manji volumen pogoduje približavanju idealnom impulsnom poremećaj.



Slika 25. *Usporedba $E_z(\theta)$ funkcije dobivene za različite koncentracije*

Slika 25. prikazuje raspodjelu vremena zadržavanja pri različitim koncentracijama ali u istoj cijevi , pri istom protoku i volumenu trasera. Uočljivo je da je razlika između krivulja gotovo zanemariva te se prilično dobro poklapaju što ukazuje na mali utjecaj koncentracije trasera.

5. ZAKLJUČAK

Prilikom provedbe eksperimenta modelom aksijalne disperzije u tri različite cijevi, čime je određeno srednje vrijeme zadržavanja i disperzijski broj, dobiveni su sljedeći podaci:

- Dobivene vrijednosti srednjeg vremena zadržavanja pokazuju kako je najduže vrijeme zadržavanja u praznoj cijevi, a najkraće u cijevi ispunjenoj staklenim kuglicama
- Vrijednost disperzijskog broja najmanja je u dugoj spiralnoj cijevi jer je ona i najdulja ispitivana cijev. Najmanji disperzijski broj ujedno upućuje i na najmanje odstupanje od idealnog strujanja. U usporedbi s praznom cijevi, u cijevi napunjenoj staklenim kuglicama volumen je manji, a time i disperzijski broj što ukazuje da prazna cijev pokazuje najveća odstupanja od idealnog strujanja
- Iz dobivenih vrijednosti disperzijskih brojeva za 'zatvoreno-zatvoreno' i 'otvoreno-otvoreno' sustave, uočavaju se manje vrijednosti disperzijskih brojeva za sustav 'otvoreno-otvoreno' što upućuje na manja odstupanja od idealnog strujanja
- Strujanje trasera u dugoj spiralnoj cijevi je znatno brže nego u preostale dvije, dok je u cijevi napunjenoj staklenim kuglicama brzina strujanja veća u usporedbi s prvom praznom cijevi zbog manjeg slobodnog volumena. Prisutnost kuglica u drugoj cijevi predstavlja nepokretni sloj što uzrokuje izravnavanje profila brzina po presjeku cijevi, a samim time i manju disperziju.

6. LITERATURA

1. Gomzi, Z., *Kemijski reaktori*, Hinus, Zagreb, 1998. (281-321)
2. Fogler S. H., *Elementsof Chemical ReactionEngineering*, Ptentice-Hall, EnglewoodCliffs, New Jersey, 1986.
3. Levenspiel O., *Chemical Reaction Engineering*, 2nd ed. J. Wiley, New Tork, 1972.
4. Nauman, E. B., Buffham, B. A., *Mixingin Continous Flow Systems*, J. Wiley, New York, 1983.
5. Wen C. Y. and Fan L. T., *Models for Flow Systems and Chemical Reactors*, Marcel Dekker, New York, 1975.
6. Danckwerts P. V., *Gas-Liquid Reactions*, McGraw-Hill, New York, 1970.
7. Danckwerts P. V., Chem. Eng. Sci., 2 (1953.) 78-94
8. Danckwerts P. V., A. I. Ch. E. J., 1, 4 (1955.) 56-62
9. Gomzi, Z., Vasič-Rački, Đ., Zrinčević, S., Matijašević, Lj., Priručnik za vježbe iz „Reakcijskog inženjerstva“, Zagreb, 1978.
10. Magistarski rad, Elke Kotur, *Strujanje i miješanje kapljevite i plinske faze u koloni s punilom*, Zagreb, 1988.
11. Himmelblau, D. M., *Process Analysisby Statistical Methods*, J. Wiley, New York, 1970.
12. R.Matanović, Završni rad, 2015

7.POPIS OZNAKA

C- koncentracija, mol dm^{-3}
C_A- koncentracija tvari A, mol dm^{-3}
D - parametar u gama modelu strujanja
D_e - prosječna (efektivna) difuznost u osnom smjeru, m^2 s^{-1}
DB - značajka disperzije = 1/Pe
d_g- parametar u gama modelu strujanja
E_z - funkcija vremena zadržavanja, razne jedinice
E_θ–funkcija vremena zadržavanja u bezdimenzijskom obliku
F_A- molni protok tvari A, mol s^{-1}
F - ukupni molni protok, 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, mol m^{-3} s^{-1}
t - vrijeme, s
$\bar{t}$ - srednje vrijeme zadržavanja, s
u - linearna brzina, m s^{-1}
u_s- srednja linearna brzina, m s^{-1}
V - volumen, m^3
v -volumna brzina, m^3 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
η- dinamička viskoznost
θ - bezdimenzijsko vrijeme
ρ - gustoća, kg m^{-3}
σ^2 -varijanca
σ_θ^2 - varijanca u bezdimenzijskom obliku
τ - prostorno vrijeme,s

ŽIVOTOPIS

Osobni podaci: Željka Kuzmić
Novo naselje 6B, Topusko
Telefon/Mobitel: 044/885-251 098 930 505 4
E-mail: zkuzmic123@gmail.com
Datum rođenja: 10.08.1992
Mjesto rođenja: Sisak
Obrazovanje
2011.-2015. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb
2008.-2011. Opća gimnazija, Srednja škola Glina, Glina
Osobne vještine i sposobnosti:
Strani jezici: Engleski jezik (aktivno u govoru i pismu)
Njemački jezik (osnovno)
Računalne vještine: Microsoft Office paket
Matlab
Scientist
Socijalne vještine: sklonost timskom radu, odgovorna, komunikativna