



ULOGA MIKROMEŠAČA U OBLASTI MIKROFLUIDIKE  
THE ROLE OF MICROMIXERS AS MICROFLUIDIC DEVICES

Vladimir Kozomora, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Mašinstvo – ENERGETIKA I PROCESNA  
TEHNIKA**

**Kratak sadržaj** – U okviru ovog rada dat je kratak uvod o mikrofluidici kao naučno tehnološkoj disciplini sve prisutnijoj u različitim oblastima nauke i tehnike. Poseban akcenat stavljen je na mikromešače, kao tip mikrofluidnih uređaja. Izvršena je detaljna podela pasivnih mikromešača i objašnjen je princip njihovog rada.

**Ključne reči:** mikrofluidika, pasivni mikromešači

**Abstract** – In this paper, a brief introduction to microfluidics as a scientific and technological discipline is given. In addition, micromixers as a type of microfluidic devices are presented. And as the main topic of the paper, a detailed division of passive mixers and an explanation of their principle of operation is given

**Keywords:** microfluidics, passive micromixers

## 1. UVOD

Kontrola fluida na mikroskali zastupljena je u svim aspektima života. U prirodi drveće hiljade svojih listova hrani uz pomoć ogromne mreže kapilara prečnika nekoliko desetina mikrometara i pora reda veličina nekoliko desetina nanometara usisavajući nutritivne materije iz zemljišta. Ljudsko telo je još jedan odličan primer mikrofluidnog sistema. Cirkulatorni sistem čoveka sastoji se od mreže arterija, vena i kapilara čija je ukupna dužina sto hiljada kilometara. Čovek nastoji da rekreira prirodne procese i implementira ih u svoj život. Na taj način razvila se mikrofluidika čija se značajna primena nalazi u uređajima nazvanim MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) koji su se pojavili sedamdesetih godina prošlog veka. U okviru MEMS tehnologije u sistemima koji se nazivaju mikro sistemi za totalnu analizu ili  $\mu$ TAS (eng. Micro Total Analysis System) postojala je potreba za upotrebom fluida za razne primene. Ovo je uslovalo smanjivanje fluidnih sistema čime se otvorilo novo poglavlje u mehanici fluida - mikrofluidika koja se bavi strujanjem i manipulacijom fluida na mikro skali.

## 2. MIKROFLUIDIKA I MIKROMEŠAČI

Mikrofluidika je naučno-tehnološka disciplina koja se bavi izučavanjem, manipulacijom i kontrolom malih količina tečnosti reda mikro, nano i pikolitara unutar kanala i drugih struktura, veličina od nekoliko mikrometara do milimetra [1].

### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bila prof. dr Maša Bukurov.

Tehnološki aspekt mikrofluidike ogleda se u metodologiji proizvodnje i minijaturizacije uređaja koji se sastoje od ovih struktura, poput komora, tunela i kanala koji ograničavaju fluid u sebi [2]. Najveće prednosti mikrofluidnih uređaja prvenstveno su sposobnost da koriste veoma male količine uzoraka i reagenasa, da vrše separaciju ili detekciju sa visokom preciznošću i osetljivošću; vreme potrebno za ove procese je kratko, a uz to, dimenzije uređaja su male dok je cena niska [3]. Značaj mikrofluidike dolazi do izražaja integracijom različitih procesa poput mešanja, filtracije, sortiranja, separacije i kontrole biohemijske okoline na jednoj platformi. Jedna od nalogičnijih primena mikrofluidnih sistema je u oblasti medicine za dijagnostiku bolesti, pogotovo infektivnih, predotkrivanje ili skrining, testiranje na mestu zbrinjavanja, gde ovi sistemi ne samo što povećavaju efikasnost testova, nego i smanjuju rizik od kontaminacije uzorka [5].

Mikrofluidni mikromešači su uređaji projektovani za mešanje tečnosti na mikroskopskom nivou [6]. Mikromešači mogu biti integrisani u mikrofluidni sistem ili biti zasebni uređaji [7]. Oni su jedna od najbitnijih komponenti mikrofluidnih sistema i imaju velik uticaj na njihovu efikasnost i osetljivost. Kako su vrednosti protoka u mikromešačima generalno veoma male, režim strujanja u mikrokanalima je praktično laminaran. Tako da se mešanje u mikromešačima oslanja na tri osnovna principa [6-8]: molekularnu difuziju, haotičnu konvekciju i Tejlorovu disperziju.

Mikromešači se u zavisnosti od principa rada dele u dve kategorije, na aktivne i pasivne [6-8]. Aktivni mikromešači koriste spoljašnje izvore energije, pored energije pumpi koje služe za pokretanje fluida, kako bi u proces mešanja uveli vremenski zavisne poremećaje i time mešajući i uznemiravajući fluid ubrzali proces mešanja [6,9]. Uopšteno aktivni mikromešači imaju veći stepen efikasnosti mešanja od pasivnih, ali takođe zahtevaju integraciju perifernih uređaja poput aktuatora potrebnih za spoljne izvore energije [9]. Sa druge strane pasivni mikromešači ili, kako se drugačije nazivaju, statični mikromešači, oslanjaju se isključivo na energiju pumpanja fluida za mešanje i koriste specijalno projektovane mikrokanale kako bi restrukturirali tok na način na koji se smanjuje difuziona dužina i povećava kontaktna površina između fluida [6-10]. Pasivni mikromešači mogu da se svrstaju u dve grupe. Prvu grupu čine dvodimenzionalni mešači koji koriste jednostavne ravanske strukture poput konvergentno-divergentnih kanala, spiralnih kanala, cik-cak kanala itd [8]. Druga grupa pasivnih mikromešača su trodimenzionalni mešači koji koriste kompleksne prostorne strukture da bi proizveli vrtloge, sekundarne struje, Dinove vrtloge i haotičnu konvekciju, ali su nužno teži za proizvodnju baš zbog svoje geometrije [8].

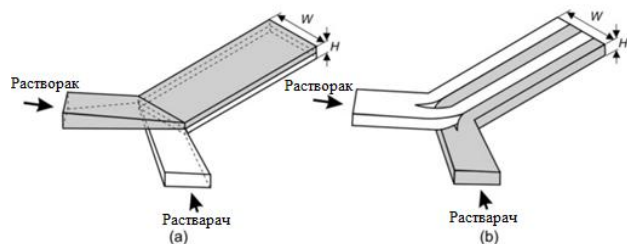
### 3. PASIVNI MIKROMEŠAČI ZASNOVANI NA MOLEKULARNOJ DIFUZIJI

Strujanje fluida u mikrofluidnim sistemima je okarakterisano malim zapreminama, malim vrednostima protoka i malim dimenzijama kanala, što usleđuje dominantnost viskoznih sila u odnosu na zanemarljivo male inercijalne sile [11]. Usled ovog u mikromešačima, dolazi do laminarnog mešanja. Ovo je fenomen pri kom dva fluida teku jedan pored drugog sa jasnom međusobnom granicom, bez mešanja, stvarajući difuzionu površinu između sebe [6, 11]. Samo difuziono mešanje zavisi od površine kontakta između rastvorka i rastvarača, kao i od debljine slojeva pojedinih faza. Visok difuzioni fluks može se ostvariti pri gradijentu koncentracije, velikoj površini kontakta između faza i visokom koeficijentu difuzije [6].

U slučaju mikromešača kratka dužina mešanja dovodi do visokog koncentracionog gradijenta koji je vrlo povoljan za efektivno mešanje [6, 11]. Sa druge strane, kako je koeficijent difuzije konstanta nekog materijala, on može da se koriguje samo povišenjem temperature i snižavanjem viskoznosti [6]. Poboľjšanja koja se dobijaju korekcijom temperature i viskoznosti veoma su mala tako da u slučaju mikromešača zasnovanih na molekularnoj difuziji optimizacija se vrši prvenstveno promenom same geometrije mešača ili smanjenjem debljine sloja faza [6]. Smanjenjem debljine sloja faza može se vršiti na nekoliko načina: paralelnom laminacijom, sekvencijalnom laminacijom, sekvencijalnom segmentacijom, segmentacijom na osnovu ubrizgavanja i hidrodinamičkim fokusiranjem [6].

#### Paralelna laminacija

Poboľšanjem kontaktne površine između fluida, tj. njenim povećanjem, smanjuje se dužina difuzionih ruta [6,7]. Ova poboľšanja se postižu tako što se rastvorak i rastvarač podele u  $n$  podtokova koji se kasnije rekombinuju i spajaju u jedan tok [6].



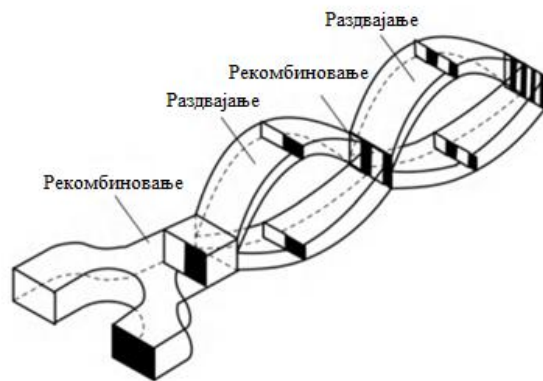
Slika 1. a) Laminacija duž visine; b) Razdvajanje i rekombinovanje [6]

U poređenju sa paralelnim mikromešačima sa dva podtoka, primenom principa paralelne laminacije vreme mešanja ili potrebna dužina kanala da bi se mešanje ostvarilo se može smanjiti sa faktorom  $n^2$  [6]. Primer jedne izvedbe ovakvog mikromešača dat je na slici 1 [6]. U ovoj izvedbi površina kontakta fluida povećava se sa faktorom  $W/H$ .

#### Sekvencijalna laminacija

Princip rada sekvencijalne laminacije sličan je paralelnoj laminaciji, sa razlikom u metodi koja se koristi da bi se ostvarila laminacija fluida koji se mešaju [6, 10]. Sekvencijalna laminacija je proces gde se već spojeni tok razdvaja u dva kanala i onda se opet rekombinuje [6]. Razdvajanje i

rekombinovanje može da se odvija i više puta. Ovaj princip se još naziva i SAR (eng. *split and recombine*) [6]. Na slici 2 dat je primer jednog SAR mikromešača kod kog se primenjuje horizontalna laminacija i vertikalno razdvajanje, ovo naravno može biti i obrnute orijentacije [6]. SAR mikromešači ostvaruju mnogo brže mešanje u poređenju sa konceptom paralelne laminacije [6]. Upravo ova trodimenzionalna struktura i kompleksan postupak proizvodnje je i glavna mana SAR mikromešača [6, 10].



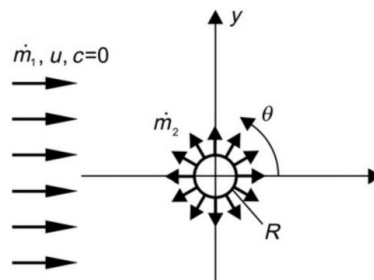
Slika 2. Koncept sekvencijalne laminacije [6]

#### Sekvencijalna segmentacija

Jednostavni mikromešači obično podrazumevaju strujanje dva laminarna toka duž mikrokanala. Ovde je kontaktna površina za molekularnu difuziju između fluidnih tokova duž cele dužine kanala, pa za adekvatno mešanje dužina može biti prevelika za praktičnu primenu [6,12]. Ukoliko bi kontaktna površina za molekularnu difuziju bila duž širine mikro kanala, ukupna dužina kanala za adekvatno mešanje se može značajno smanjiti, ovakav pristup se naziva sekvencijalna segmentacija [6]. Sekvencijalna segmentacija ostvaruje se naizmeničnom promenom protoka kroz ulazne kanale [6, 12]. Promena protoka kroz ulaze ostvaruje se ili pomoću dva ventila ili pomoću regulacije pumpe.

#### Segmentacija na osnovu ubrizgavanja

Koncept segmentacije na osnovu ubrizgavanja je veoma sličan paralelnoj laminaciji. Segmentacija na osnovu ubrizgavanja umesto razdvajanja oba ulazna toka uvodi rastvarač u rastvorak pomoću reda mlaznica [6, 7]. Ovakav pristup takođe povećava kontaktnu površinu fluida uz smanjenje dužine mešanja.



Slika 3. Princip segmentacije na osnovu ubrizgavanja [6]

Jednostavan primer ovakvog mikromešača dat je na slici 3 u obliku dvodimenzionalnog modela gde se rastvorak kreće masenim protokom  $\dot{m}_1$  dok se rastvarač kreće masenim protokom  $\dot{m}_2$  [6].

### Hidrodinamičko fokusiranje

Sve prethodno navedene metode imaju zadatak da poboljšaju procese mešanja, a kako se one primarno oslanjaju na geometrijske promene, može doći do rasta cene proizvodnje. Alternativa za ove metode je hidrodinamičko fokusiranje, koje je, u suštini, dugačak mikrokanal sa tri ulaza [6]. Princip rada je da fluidi (rastvarač i rastvorak) koji se dovode spoljnim granama budu stisnuti između dva tanka toka. Stiskanjem se ostvaruje manji tok kao i tanja laminaciona širina, pri čemu se širina fokusiranog toka kontroliše odnosom protoka srednjeg i spoljnih tokova [6]. Što je razlika protoka između unutrašnjeg i spoljnjih tokova veća time je veće suženje, a kako je vreme mešanja proporcionalno kvadratu difuzione dužine, koja je u ovom slučaju širina fokusiranog toka, time je i vreme mešanja manje [10, 13].

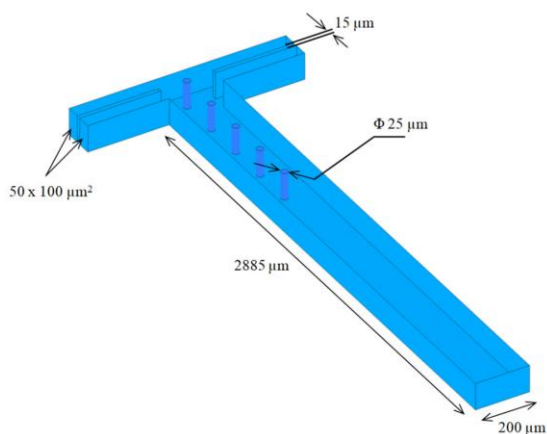
### **4. PASIVNI MIKROMEŠAČI ZASNOVANI NA HAOTIČNOJ KONVEKCIJI**

Transport molekula unutar fluida u pokretu naziva se konvekcija. Konvekcija omogućava mešanje fluidnih tokova pri niskim Rejnoldsovima brojevima, ali kako je u mikromešačima konvekcija u pravcu strujanja, transverzalni transport oslanja se isključivo na molekularnu difuziju [6, 10, 14]. U slučaju kada konvekcija ima trodimenzionalnu putanju naziva se haotična konvekcija i proizvodi sekundarni transverzalni transport i drastično poboljšava mešanje [6]. U suštini, osnovni koncept za stvaranje konvekcije je modifikacija oblika mikrofluidnog kanala kako bi došlo do razvlačenja, savijanja i lomljenja laminarnog toka. Usled različitih geometrija mikromešača haotična konvekcija se posmatra pri različitim Rejnoldsovima brojevima i klasifikuje se prema njima. U zavisnosti od operativnog opsega postoji sledeća klasifikacija [6]:

- visok opseg,  $Re > 100$
- srednji opseg,  $100 > Re > 10$
- nizak opseg,  $Re < 10$ .

#### „T“ Mikromešači pri visokim Rejnoldsovima brojevima

Usled oštre krivine od  $90^\circ$  kroz koju fluidi moraju da prođu, javljaju se dovoljno velike inercijalne sile za formiranje vrtloga [6]. U opštem slučaju, u „T“ mikromešačima se laminarni režim sastoji od tri podrežima: stratifikacija, vrtloženje i progutavanje [6]. Stratifikacija se javlja pri  $Re < 50$  i oba ulazna toka teku jedan pored drugog, a transverzalni transport se odvija molekularnom difuzijom [6].



Slika 4. „T“ mikromešač [15]

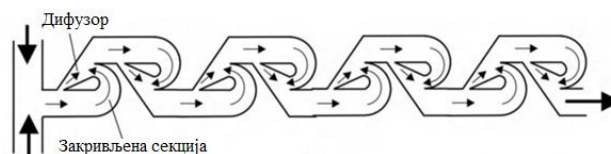
Čak i pri niskom Rejnoldsovom broju postoji formiranje vrtloga u kanalu ali oni su malog intenziteta i veoma brzo dolazi do njihove disipacije usled viskoznosti fluida. U vrtložnom režimu, pri  $50 < Re < 150$ , pojavljuju se Dinovi (Dean) vrtlozi koji su tad potpuno simetrični. U režimu progutavanja, pri  $Re > 150$ , vrtlozi postaju asimetrični i pojavljuje se prava haotična konvekcija [6]. U stvari, u ovom režimu dolazi do uvijanja kontaktne ravni između fluida. Upravo ovaj režim se koristi za mešanje. Izgled jednog „T“ mikromešača je dat na slici 4.

#### Mikromešači sa preprekama u kanalu pri visokim Rejnoldsovima brojevima

Kako tok u mikromešačima postaje nestabilan pri visokim vrednostima Rejnoldsovog broja, slično turbulizatorima koji se koriste na makro nivou, postavljene prepreke u mikrokanalima mogu da ubrzaju ove nestabilnosti, ujedno i da omogućе da se javе pri nižim vrednostima Rejnoldsovog broja, time čineći mešače prikladnijim za praktičnu upotrebu [6]. U ovakvoj izvedbi delimično izmešana tečnost prolazi kroz nekoliko prepreka koje generišu vrtloge pri velikim Rejnoldsovima brojevima [6, 15, 16]. Ovi vrtlozi remete laminaran tok i uvode transverzalni transport u kanalu [6]. Čak i sa preprekama brzina strujanja je dovoljno velika da se stvore vrtlozi, ali prepreke uvode i porast pada pritiska u kanalu [6, 15, 16]. Uopšteno važi da što je veći broj prepreka postavljeno u kanal time se ostvaruje bolje mešanje [6, 16]. Uprkos tome, pokazalo se da postavljanje prepreka asimetrično duž kanala za mešanje izaziva bolje mešanje nego jednostavno povećavanje broja prepreka, gde je najbitniji faktor koji utiče na mešanje faktor začepljenja i međusobna rastojanja između prepreka [16].

#### Haotična konvekcija u kanalima različitih oblika pri srednjim Rejnoldsovima brojevima

Mešanje pri srednjim vrednostima Rejnoldsovog broja može biti poboljšano kombinacijom Tejlorove disperzije i Dinovih vrtloga [6, 10]. Tejlorova disperzija i Dinovi vrtlozi se najbolje koriste u mikromešačima koji imaju kanale u obliku krivina ili skretanja kombinovano sa promenom brzine [6]. Jedan takav mikromešač je dat na slici 5 i ima strukturu Tesla ventila gde kanal ima zakrivljene i difuzorske sekcije [6]. Zakrivljene sekcije mikrokanala omogućavaju da se fluid razdvoji pre nego što se opet sudari pod uglom od  $180^\circ$  koristeći Koanda efekat (tendencija fluida da ostane pripojen uz konkavnu površinu) [6, 17].



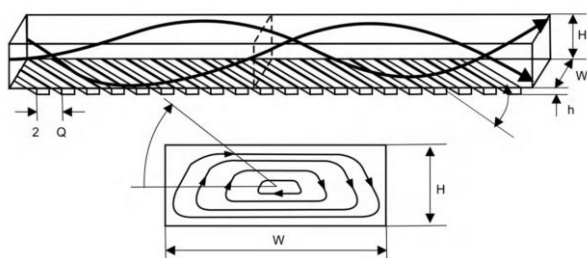
Slika 5. Tesla mikromešač

#### Haotična konvekcija sa strukturama za usmeravanje toka pri niskim Rejnoldsovima brojevima

Sekundarno strujanje slično Dinovim vrtlozima može se formirati usled aksijalnog gradijenta pritiska ako se na zidove kanala postave grebeni pod nekim uglom  $\theta$  [6, 7]. Pri niskim Rejnoldsovima brojevima ovi grebeni su anizotropan otpor strujanju, i otpor je minimalan pri uglu od  $0^\circ$  dok je maksimalan pri uglu od  $90^\circ$  [6]. Taj anizotropan



otpor usmerava tok preko ovih grebena. Ovakva konstrukcija se naziva SGM (eng. *slanted groove micromixer*) mikromešač [6]. Na slici 6 data je tipična putanja strujnica sekundarnog toka u SGM mikromešačima usled niza grebena [6]. Usled niza grebena putanja strujnica će dobiti helikoidalnu strukturu. Sekundarno strujanje generisano grebenima koristi se za dobijanje efekta haotične konvekcije usled ponavljajućeg niza rotacionog i ekstenzionog strujanja izazvanog vrtlozima [6]. Ekstenziono strujanje je pojava pri kojoj dolazi do izdužavanja fluidnih delića pri delovanju neke sile na njih [18, 19].



Slika 6. Putanja strujnica usled niza grebena [6]

## 5. ZAKLJUČAK

Iako je oblast mikrofluidike relativno nova već je značajno utemeljena na akademskoj sceni sa skoro eksponencijalnim rastom istraživanja. Pored naučnog aspekta, mikrofluidni uređaji poput mikromešača postaju nezamenljivi elementi u raznim kompleksnim sistemima inženjerske prakse, a pogotovo u oblasti biomedicine gde nagoveštavaju revoluciju u oblastima laboratorijske analize i prevencije. Pokazana je fleksibilnost ove tehnologije i mogućnost njene adaptacije da specifično odgovori željenim zahtevima. Sa druge strane prikazane su i poteškoće sa kojima se mikromešači susreću u pogledu učestale i masovne primene usled raznih ograničenja koja se pretežno ogledaju u ekonomskoj isplativosti ali i tehničkim ograničenjima u okviru konvencionalnih postupaka proizvodnje i kontrole sa kojim bi morali biti komplementarni zarad ispunjenja ovih ciljeva. U ovom radu je kroz razne primere i podvrste mikromešača objašnjene su elementarne zakonitosti funkcionisanja mikromešača ali i mogućnosti i tehnike za poboljšanje procesa mešanja u zavisnosti od tipa uređaja.

## 6. LITERATURA

- [1] Ivana Podunavac, Realizacija mikrofluidičnog čipa za separaciju mikročestica po veličini na principu uštinutog toka, Univerzitet u Novom Sadu Prirodno-Matematički fakultet, 2019.
- [2] Sanja Kojić, Realizacija i testirawe mikrofluidnih čipova za primene u biomedicine, Univerzitet u Novom Sadu Fakultet Tehničkih Nauka, 2021.
- [3] George M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, NATURE vol. 442, 2006.
- [4] Jose M. Ayuso, Maria Virumbrales-Munoz, Joshua M. Lang, David J. Beebe, A rol for microfluidic systems in precision medicine, NATURE COMMUNICATIONS, 2022.

- [5] Catherine Rivet, Hyewong Lee, Alison Hirsch, Sharon Hamilton, Hang Lu, Microfluidics for medical diagnostics and biosensors, Elsevier Ltd., 2010.
- [6] Nam-Trung Nguyen, Micromixers, Elsevier Inc., 2021.
- [7] Nam-Trung Nguyen, Zhigang Wu, Micromixers—a review, J. Micromech. Microeng. 15, 2005.
- [8] Gaozhe Cai, Li Xue, Huilin Zhang, Jianhan Lin, A Review on Micromixers, Micromachines, 8, 2021.
- [9] Chia-Yen Lee, Chin-Lung Chang, Yao-Nan Wang, Lung-Ming Fu, Microfluidic Mixing: A Review, International Journal of Molecular Sciences, 12, 2011.
- [10] Lorenzo Capretto, Wei Cheng, Martyn Hill, Xunli Zhang, Micromixing Within Microfluidic Devices, Springer-Verlag Bernil, 2011.
- [11] Clement Kleinstreuer, Microfluidics and Nanofluidics: Theory and Selected Applications, Wiley, 2013.
- [12] Yap Kah Fai David, Design and analysis of a sequential segmentation two phase gas-liquid micromixer, University of Toronto, 2007.
- [13] Arman Sadeghi, Micromixing by two-phase hydrodynamic focusing: A 3D analytical modeling, Chemical Engineering Science vol. 179., 2018
- [14] Yonas Desta Bizualem, Amare Gashu Nurie, Talbachew Tadesse Nadew, A review on biodiesel micromixers: Types of micromixers, configurations, and flow patterns, Elsevier Ltd., 2024.
- [15] T. Manoj Dundi, V.R.K. Raju, V.P. Chandramohan, Characterization of mixing in an optimized designed T-T mixer with cylindrical elements, Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019.
- [16] S.M.H. Mirkarimi, M.J. Hosseini, Y. Pahamli, Numerical, Investigation of a curved micromixer using different arrangements of cylindrical obstacles, Elsevier BV. 2023.
- [17] Aleksandar Saljnikov, Koanda efekat i njegova primena u klimatizaciji, KGH Br. 2, 1980.
- [18] Y. C. Lam, H. Y. Gan, N. T. Nguyen, H. Lie, Micromixer based on viscoelastic flow instability at low Reynolds number, Biomicrofluidics 3, 2009.
- [19] S. Gupta, C. Sasmal, On designing a wavy sinusoidal micromixer for efficient mixing of viscoelastic fluids harnessing elastic instability and elastic turbulence phenomena, Elsevier Inc. 2024

### Kratka biografija:



**Vladimir Kozomora** rođen je u Novom Sadu 2000. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Energetike i procesne tehnike - Računarsko modeliranje mikromešača softverom „Comsol“ odbranio je 2024.god.  
kontakt:  
vladimirkozomora.private@gmail.com



**Maša Bukurov** rođena je u Novom Sadu 1968. godine. Doktorirala je na Fakultetu tehničkih nauka 2004. god., a od 2018. god. je dobila zvanje redovnog profesora. Oblasti interesovanja je teorijska i primenjena mehanika fluida.