

**RAZVOJ NANOFLUIDA VODA/Al₂O₃ PRIMENOM RAČUNARSKE DINAMIKE FLUIDA
DEVELOPMENT OF NANOFLUID WATER/Al₂O₃ USING COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS**Danijel Đurković, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast- MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – Predmet rada bila je prinudna konvekcija nanofluida voda/Al₂O₃. Cilj rada bio je da se za potrebe razvoja nanofluida urade numeričke simulacije prinudne konvekcije nanofluida voda/Al₂O₃. Numeričke simulacije urađene su primenom računarske dinamike fluida, metodom konačnih zapremina. Numeričke simulacije su realizovane u komercijalnom softveru Star CCM+.

Ključne reči: nanofluid, prinudna konvekcija, metod konačnih zapremina

Abstract - The subject of this paper is forced convection of water/Al₂O₃ nanofluid. The aim was to perform numerical simulations of forced convection of water/Al₂O₃ nanofluid for the purpose of the development of nanofluids. The numerical simulations were carried out by means of computational fluid dynamics, using the finite volume method. The numerical simulations were performed using the commercial Star CCM+ software.

Keywords: nanofluid, forced convection, finite volume method

1. UVOD

U novije vreme procesi grejanja i hlađenja predstavljaju najveći izazov za razvoj efikasnosti uređaja za razmenu toplote. Do sada su u industriji najčešće korišćeni konvekcionalni fluidi kao što su voda, mineralna ili sintetička ulja i etilen – glikol.

Konvekcioni prelaz toplote korišćenjem konvekcioničnih tečnosti je često ograničen njenom niskom toplotnom provodljivošću i malom mogućnošću akumulacije veće količine toplotne energije.

U poslednje vreme radilo se dosta na poboljšanju fizičkih osobina fluida kao što su toplotna provodljivost i toplotni kapacitet fluida. Za iznalaženje rešenja problema koje bi zadovoljilo potrebe savremene industrije, veoma velika pažnja posvetila se razvoju nanofluida.

Nanofluidi su tečne suspenzije koje sadrže čestice koje su veličine manje od 100 nm. Radi se o česticama koje imaju veću toplotnu provodljivost od osnovne tečnosti.

Koeficijent prelaza toplote zavisi od toplotnih svojstava nanofluida, zapreminskog udela nanočestica u nanofluidu, oblika i vrste čvrste čestice. Imajući to u vidu došlo se do ideje o dodavanju čvrstih čestica u tečnosti koje mogu da povećaju vrednost koeficijenta prelaza toplote u poređenju sa konvekcionalnim fluidima.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Siniša Bikić, docent.

Materijali koji doprinose povećanju ovog koeficijenta su čisti metali (Al, Cu, Ni), oksidi metala (Al₂O₃, TiO₂, CuO, SiO₂, Fe₂O₃ i Fe₃O₄), ugljenične nanocevi i keramika [1].

Istraživači su na početku koristili suspenzije vode sa čvrstim česticama prečnika od nekoliko milimetara ili nekoliko mikrometara. Poređenjem dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenim u slučaju kada je radni fluid voda, primećeno je povećanje koeficijenta prelaza toplote radnog fluida.

Prilikom upotrebe fluida sa dispergovanim česticama javili su se problemi kao što su erozija zida cevi, loša stabilnost suspenzije, sedimentacija i začepljenje cevi, a to su prilično ozbiljni problemi za sisteme koji koriste npr. mini i mikro kanale [1].

2. PREGLED STANJA U OBLASTI

Mnogi naučni radovi ukazuju da postoji poboljšanje toplotne provodljivosti i konvektivnog prenosa toplote kod nanofluida, pri niskim koncentracijama nanočestica [2].

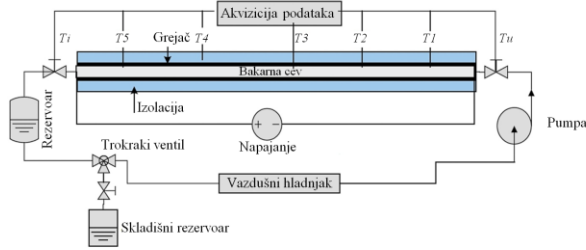
Zanimljivo je da u istraživačkoj studiji iz 1873. godine Maksvel (Maxwell) analizirao dispergovane čestice u tečnosti. Međutim 1904. godina bi mogla da se smatra kao početak nanotehnologije [3].

Velike čestice mogu uzorkovati različite probleme u opremi za prenos toplote. Velike čestice brzo teže da se istalože tako da se veliki pad pritiska može pojaviti npr u mikro kanalima. Takođe abrazivne aktivnosti čestica mogu da uzrokuju eroziju zidova cevi. Čestice male zapremine i koncentracija sprečavaju zagušenje i povećanje pada pritiska nanofluida [4].

Istraživači su se najviše u prošlosti bavili konvektivnim prenosom toplote nanofluida. Wen i Ding [5] eksperimentalno su istražili konvektivni prenos toplote nanofluida kroz bakarnu cev pri laminarnom režimu strujanja. Na slici 1. šematski je prikazano eksperimentalno postrojenje koje su autori rada koristili za istraživanje prinudne konvekcije nanofluida. Nanofluid su formirali suspendovanjem čestica Al₂O₃ u demineralizovanoj vodi kao osnovnom fluidu. Suspendovane su nanočestice γ -Al₂O₃ veličine od 27-56 nm. Kao surfaktant korišćen je natrijum dodecilbensensulfanat C₁₈H₂₉H_aO₃S (jedna desetina od mase nanočestica).

Razmatrani su nanofluidi sa nekoliko različitih koncentracija nanočestica Al₂O₃. Nanofluidi su pripremljeni metodom iz dva koraka. Nanočestice su prvo pomešane sa vodom u određenom odnosu. Zatim je nanofluid tretiran u ultrazvučnom kupatilu u trajanju od 16 do 20 h.

Uočeno je da nanofluidi sa koncentracijom nanočestica manjom od 4% imaju veoma dobru stabilnost. Ovi nanofluidi su bili stabilni više od nedelju dana. Konvektivni prenos toplote nanofluida na ulazu u cev nije u dovoljnoj meri istražen do predmetnog istraživanja. Iz tog razloga je fokus istraživanja stavljen na ponašanje nanofluida na ulazu u cev.



Slika 1. Šematski prikaz eksperimentalnog postrojenja [5]

Konvektivni prenos toplote analiziran je duž cevi putem vrednosti lokalnih koeficijenata prelaza toplote i Nuseltovog broja koji su računati iz sledećih jednačina

$$\alpha(x) = \frac{q}{(T_w(x) - T_f(x))}, \quad (1)$$

$$Nu(x) = \frac{\alpha(x) \cdot D}{\lambda}, \quad (2)$$

Profil temperature fluida duž cevi računat je iz energetskog bilansa:

$$\dot{Q}(x) = q \cdot S(x) = c_p \cdot \dot{m} \cdot (T_f(x) - T_{in}), \quad (3)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A, \quad (4)$$

$$T_f(x) = T_{in} + \frac{q \cdot S(x)}{c_p \cdot \rho \cdot v \cdot A}, \quad (5)$$

Jednačina (5) zasniva se na pretpostavci da nema gubitka toplote kroz zidove cevi.

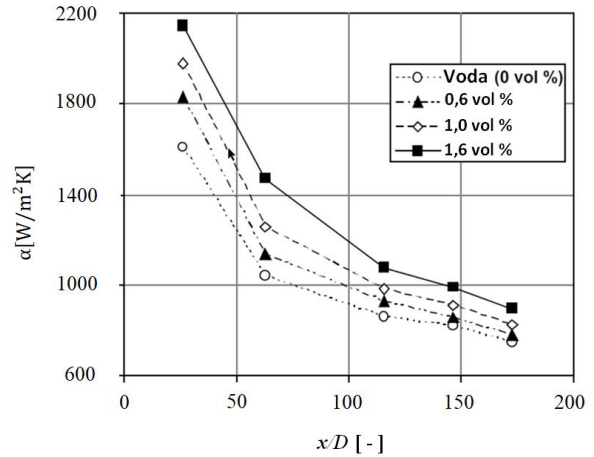
Rejnoldsov i Prantlov broj definišu se kao:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}, \quad (6)$$

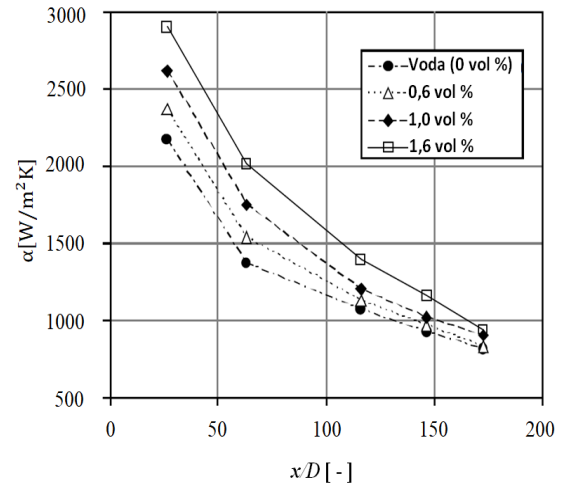
$$Pr = \frac{v}{a}, \quad (7)$$

Na slikama 2 i 3 prikazani su aksijalni profili lokalnog koeficijenta prelaza toplote za dve razmatrane vrednosti Rejnoldsovog broja. Rezultati pokazuju da primenom predmetnog nanofluida i povećanjem Rejnoldsovog broja može značajno da se poboljša konvektivni prenos toplote na ulazu u cev. Sasvim očekivano koeficijent prelaza

toplote opada udaljavanjem od ulaza u cev. Može da se uoči da je potrebna veća dužina cevi za razvijanje termičkog graničnog sloja kod nanofluida u odnosu na čistu vodu.



Slika 2. Aksijalni profil lokalnog koeficijenta prelaza toplote ($Re = 1050 \pm 50$) [6]



Slika 3. Aksijalni profil lokalnog koeficijenta prelaza toplote ($Re = 1600 \pm 50$) [6]

3. MATERIJAL I METOD

Cilj master rada bio je da se ispita prinudna konvekcija nanofluida kroz pravu cev kružnog poprečnog preseka primenom računarske dinamike fluida. Nanofluid je dobijen suspendovanjem nanočestica Al_2O_3 u vodi kao osnovnom fluidu. Koncetracija nanočestica iznosila je 1%.

Numerički model urađen je tako da odgovara fizičkom modelu prikazanom u radu [5]. Cev je dužine 970 mm i unutrašnjeg prečnika 4,5 mm. Razmatran je laminaran režim strujanja sa dve vrednosti Rejnoldsovog broja $Re=1050$ i $Re=1600$. Na zid cevi dovođena je konstantna toplotna snaga koja je iznosila 300 W i smatralo se da su uslovi strujanja nanofluida nestacionarni.

Verifikacija rezultata računarske dinamike fluida urađena je rezultatima dostupnim u literaturi [5].

Za potrebe računarske dinamike fluida izračunate su fizičke osobine nanofluida Al_2O_3 čije suspendovane čestice Al_2O_3 imaju zapreminsku koncentraciju od (1%) u demineralizovanoj vodi.

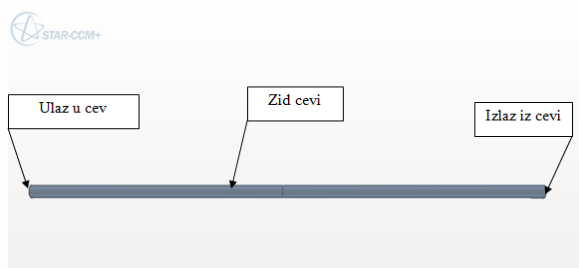
Fizičke osobine su izračunate za temperaturu nanofluida na ulazu u cev iz jednačine za energetski bilans (5). Uvedene su četiri aproksimacije numeričkog u odnosu na fizički model:

- smatralo se da je brzina strujanja fluida konstantna po površini poprečnog preseka na ulazu u cev;
- fizičke osobine sa kojima su podešene numeričke simulacije izračunate su za temperaturu nanofluida na ulazu u cev koja je iznosila 295 K;
- smatrano je da je nanofluid jednofazni fluid i
- zanemaren je efekat prirodne konvekcije.

3.0 Podešavanje numeričke simulacije

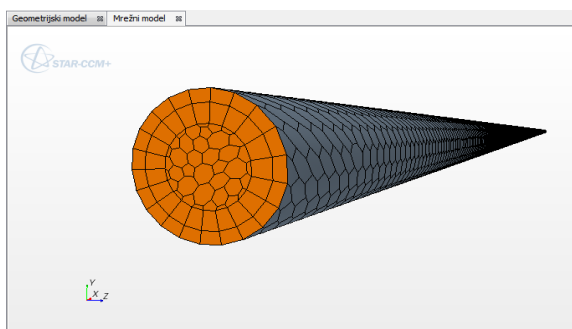
3.1 Crtanje CAD modela za formiranje geometrijskog modela to jest prava cev

3.2 Definisane tipa granica u softverskom paketu STAR CCM+ sve granice su predpodešene da budu zidovi (**Wall**). Na slici 4 prikazane su granice domena. Na ulazu u cev podešavana je brzina strujanja, dok je na izlazu iz cevi podešavano da razlika pritiska bude na granici $\Delta p=0$. Kako su predpodešeni tipovi svih granica tipa zida, tipovi granica na **Ulazu** i **Izlazu** iz cevi su promenjeni u **Velocity Inlet** i **Pressure Outlet**.



Slika 4. Prikaz graničnih uslova

3.3 Generisanje mrežnog kontinuuma slika 5.



Slika 5. Izgled mrežnog kontinuuma

3.7 Podešavanje kriterijuma zaustavljanja numeričke simulacije

Kao kriterijum zaustavljanja numeričke simulacije podešeno je maksimalno fizičko vreme, pri čemu je deaktiviran kriterijum zaustavljanja numeričke simulacije maksimalnim brojem iteracija.

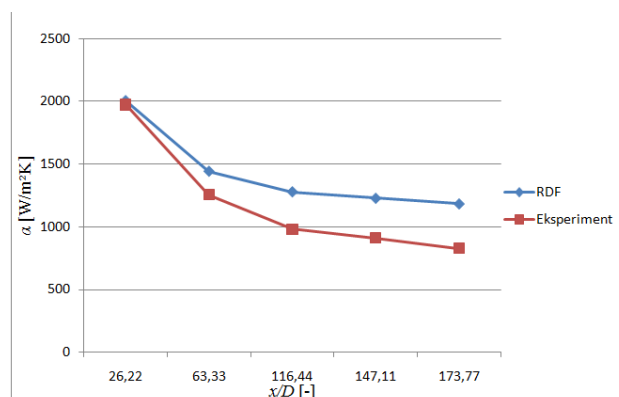
Maksimalno fizičko vreme trajanja simulacije je 100 s, a vremenski korak pri rešavanju je 0,1 s.

4. REZULTATI RADA I DISKUSIJA

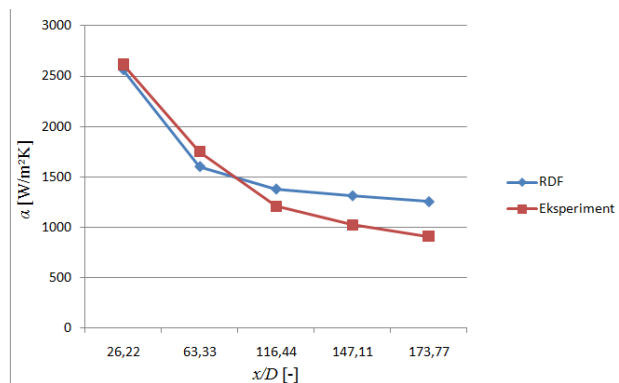
Na osnovu razlike temperature na zidu cevi i osrednjene temperature fluida dobijene numeričkim simulacijama na definisanim mestima x duž cevi izračunat je lokalni koeficijent prelaza toplote i Nuseltov broj.

Primenom jednačine (1) izračunate su vrednosti lokalnih koeficijenta prelaza toplote duž cevi pri vrednosti Rejnoldsovog broja $Re = 1050$ i $Re = 1600$:

Na slici 6 i slici 7 prikazan je dijagram sa poređenjem koeficijenta prelaza toplote dobijenih računarskom dinamikom fluida i eksperimentom.



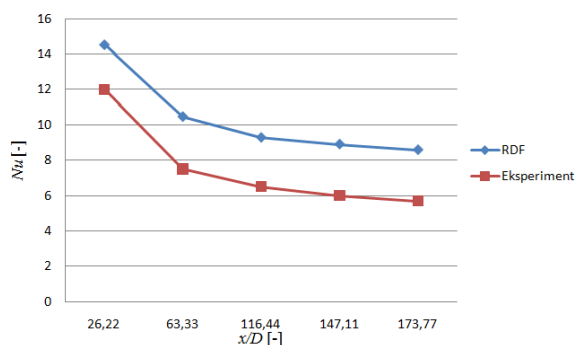
Slika 6 Grafički prikaz promena lokalnog koeficijenta prelaza toplote duž cevi pri strujanju 1vol% Al_2O_3 nanofluida pri vrednosti Rejnoldsovog broja $Re = 1050$.



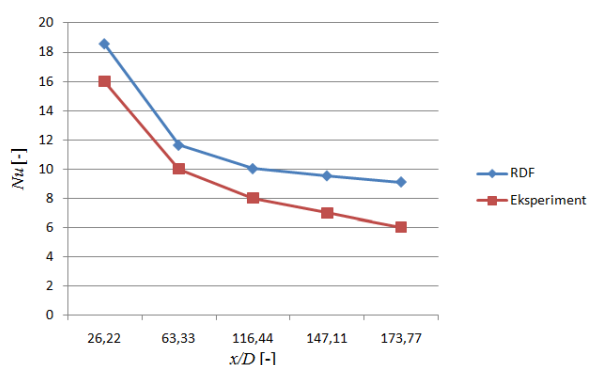
Slika 7 Grafički prikaz promena lokalnog koeficijenta prelaza toplote duž cevi pri strujanju 1vol% Al_2O_3 nanofluida pri vrednosti Rejnoldsovog broja $Re = 1600$.

Primenom jednačine (2) izračunate su vrednosti lokalnog Nuseltovog broja duž cevi pri vrednosti Rejnoldsovog broja $Re = 1050$ i $Re = 1600$:

Na slici 8 i slici 9 upoređene su vrednosti Nuseltovog broja dobijene računarskom dinamikom fluida i eksperimentalnim putem.



Slika 8 Grafički prikaz vrednosti lokalnog Nuseltovog broja duž cevi pri strujanju 1vol% Al₂O₃ nanofluida pri vrednosti Reynoldsovog broja Re = 1050.



Slika 9 Grafički prikaz vrednosti lokalnog Nuseltovog broja duž cevi pri strujanju 1vol% Al₂O₃ nanofluida pri vrednosti Reynoldsovog broja Re = 1600.

5. ZAKLJUČAK

Verifikacija rezultata numeričke simulacije urađena je analizom lokalnih vrednosti Nuseltovog broja i koeficijenta prelaza toplote duž cevi. Primećeno je da sa povećanjem brzine strujanja odnosno Reynoldsovog broja dolazi i do povećanje Nuseltovog broja, povećava se značajno količina prenesene toplotne energije sa zida cevi na fluid. Najveći lokalni koeficijent prelaza toplote je na ulazu u cev, a zatim drastično opadaju vrednosti sa povećanjem razdaljine odnosno na samom izlazu bakarne cevi. Radi se o tendenciji koja je sasvim očekivana pri prinudnoj konvekciji fluida kroz pravu cev.

Poređenjem vrednosti koeficijenata prelaza toplote dobijenih računarskom dinamikom fluida i eksperimentom za razmatrane vrednosti Reynoldsovog broja dobijena su sledeća relativna odstupanja:

- za vrednost Reynoldsovog broja Re = 1050 na ulazu u cev dobijena su najmanja odstupanja u odnosu na eksperimentalne rezultate i iznosila su 1,63%, a na izlazu iz cevi dobijena su najveća odstupanja koja iznose 43%
- za vrednosti Reynoldsovog broja Re = 1600 gde su relativna odstupanja na ulazu u cev iznosila najmanja 2,07%, a na izlazu iz cevi su dobijena najveća odstupanja koja su iznosila 38%.

Uočeno je da se povećanjem Reynoldsovog broja smanjuju odstupanja rezultata računarske dinamike fluida i eksperimentalnih rezultata.

U budućnosti bi trebalo nastaviti istraživanje prinudne konvekcije nanofluida voda/Al₂O₃ kroz pravu cev kružnog poprečnog preseka primenom računarske dinamike fluida. Potrebno je da se uradi analiza nezavisnosti mreže, ispita uticaj fizičkih modela i šema diskretizacije na numerička rešenja, kako bi se smanjila razlika između rezultata dobijenih računarskom dinamikom fluida i eksperimentom.

6. LITERATURA

- [1] Choi S.U.S.(1995). *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, ASME Publ. Fed, 231 99-106.
- [2] Yang Y., Zhang Z.G., Grulke E.A., Anderson W.B., Wu G. (2005). *Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow*, Int.J.Heat Mass Transfer, 48 1107-1116.
- [3] Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M.R., Goodarzi M., Dahari M., Mahian O., Dalkilica A.S., Wongwises. (2016). *Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 73 (02), 114-123.
- [4] Khanafer K., Vafai K., Lightstone M. (2003). *Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids*. Int. J. Heat Mass Transf, 46 (19), 3639-3653.
- [5] Wen D. end Ding Y. (2004). *Exsperimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (24), 5181-5188.

Kratka biografija:



Danijel Đurković rođen je u Novom Sadu, 1983. godine. Fakultet tehničkih nauka u Novi Sad, odsek Mašinstvo - Energetika i procesna tehnika osnovne studije završio 2016. godine, odbranivši diplomski rad na temu "Numeričke simulacije blendi za merenje protoka prirodnog gasa".