



NUMERIČKE SIMULACIJE STRUJANJA NANOJONSKE TEČNOSTI KROZ PRAVU CEV KRUŽNOG POPREČNOG PRESEKA

NUMERICAL SIMULATIONS OF IONIC-NANOFLUID LIQUID FLOW TROUGH A HORIZONTAL PIPE OF CIRCULAR CROSS SECTION

Nikola Drobac, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – MAŠINSTVO

Kratak sadržaj – Predmet istraživanja ovog rada jeste laminarno strujanje nanojonske tečnosti kroz pravu cev kružnog poprečnog preseka. Cilj ovog rada je istraživanje prinudne konvekcije i hidrauličkih karakteristika nanojonske tečnosti. Istraživanje je urađeno primenom računarske dinamike fluida (*Computational Fluid Dynamics-CFD*). Rezultati numeričkih simulacija verifikovani su na dva načina. Prilikom strujanja vode kroz cev, upoređen je pad pritiska dobijen simulacijom sa padom pritiska dobijenim Darsi-Vajbahovim (*Darcy - Weisbach*) izrazom. Prilikom strujanja jonske i nanojonske tečnosti kroz cev, upoređen je Nuseltov broj (*Nusselt*) dobijen podacima iz simulacija sa Nuseltovim brojem primenom Šahove (*Shah's*) jednačine. Primenjeni su kriterijumi kako bi se sagledalo da li predmetnu nanojonsku tečnost ima smisla koristiti u sistemima za prenos toplote. Rezultati numeričke simulacije su uspešno verifikovani, a ispitivani fluid ispunjava kriterijume i može da se koristi u sistemima za prenos toplote kada je masena koncentracija nano čestica 0,5 % i 1 %, a ulazna temperatura ispitivaju fluida 335 K.

Ključne reči: Jonska tečnost, nanočestice, nanojonska tečnost, računarska dinamika fluida

Abstract – The subject of this research was laminar flow of ionic-nanofluid through a horizontal tube with circular cross-section. The aim of this research was investigating of forced convection and hydraulic characteristics in a straight pipe section using computational fluid dynamics (*CFD*). Verification of numerical simulation data is executed in two ways: with water flow through a pipe, and comparison between a pressure drop results from simulation and the pressure drop obtained from the *Darcy - Weisbach* equation. *Shah's* equation was used for calculation of *Nusselt's* number and it was compared with *Nusselt* number calculated from *CFD* simulations results for the purpose of numerical simulation result verification. To check weather using of examined ionic nanofluid is meaningful in heat transfer systems, a few criteria was used. Results of numerical simulations was successfully verified, and it was found that examined fluid meets the criteria for mass concentrations of 0.5 % and 1 % nanoparticles and inlet temperature of fluid $T=335$ K.

Keywords: Ionic fluid, nanoparticles, nanoionic fluid, computational fluid dynamics

NAPOMENA:

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

1. UVOD

Energetska kriza je jedan od najvažnijih i najvećih problema u skorijoj istoriji planete Zemlje. Prema najnovijim istraživanjima potreba za energijom će u periodu od 2010. do 2040. godine porasti za 56%. Trenutno 80% energije se dobija iz fosilnih goriva [1].

Zajednica za zaštitu životne sredine zabrinuta je zbog globalnog zagrevanja i emisije CO_2 koje nastaje sagorevanjem fosilnih goriva. Ova zabrinutost, kao i visoke cene i potrošnja fosilnih goriva, naterali su istraživače u oblasti energetike da pronađu nove, pouzdanije, čistije i ekonomski isplativije izvore energije. Isto tako, pored istraživanja, unapređenja i pronalazjenja novih obnovljivih izvora energije, paralelno se vrše istraživanja u oblasti unapređenja efikasnosti postojećih sistema koji kao energiju troše fosilna goriva. Ukoliko u sistemu postoji bolja razmena toplote, sistem je efikasniji.

Upravo zbog sposobnosti bolje razmene toplote, nanofluidi, jonske i nanojonske tečnosti pronašli su svoju primenu u industriji [1]. Predmet istraživanja ovog rada je laminarno strujanje nanojonske tečnosti kroz pravu cev kružnog poprečnog preseka. Cilj ovog rada je istraživanje prinudne konvekcije i hidrauličkih karakteristika nanojonske tečnosti.

2. MATERIJAL I METOD

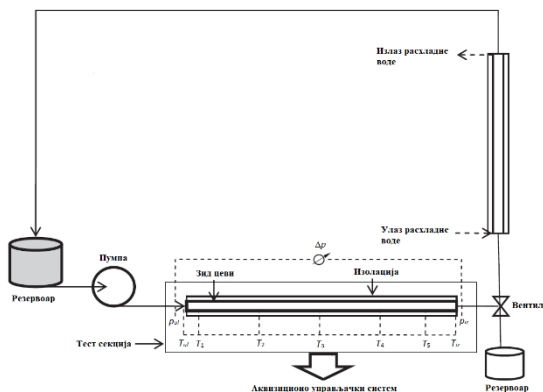
3.2 Nanojonska tečnost

Jonske tečnosti predstavljaju grupe soli rastvorene u tečnosti, dok nanojonske tečnosti predstavljaju jonsku tečnost u kojoj su suspendovani određeni hemijski elementi ili hemijska jedinjenja u vidu čestica ne većih od 100 nm. Predmetna nanojonska tečnost predstavlja suspenziju nanočestica aluminijum oksida u jonskoj tečnosti (1-Butyl-2,3-dimethylimidazolium bis {(trifluoromethyl) sulfonyl}-imide) i ima oznaku $[Al_2O_3][C4mmim][NTf_2]$ [2].

2.2 Primena računarske dinamike fluida

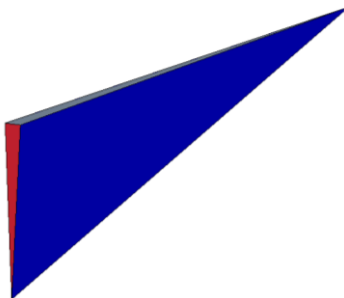
Model koji je korišćen u numeričkoj simulaciji napravljen je na osnovu eksperimentalnog postrojenja prikazanog na slici 2.1. Ovo postrojenje čine dva rezervoara, pumpa, ispitna sekcija, izmenjivač toplote, trokraki ventil i diferencijalni manometar. Protok tečnosti kroz eksperimentalno postrojenje ostvaruje se pomoću pumpe. Protok tečnosti može da se podešava promenom broja obrtaja pumpe pomoću frekventnog regulatora. Pomoću pumpe merio se protok tečnosti. Pumpa je predhodno kalibrisana pomoću zapreminske metode. Rezervoar postavljen ispred pumpe obezbeđuje njen normalan rad. Izmenjivač toplote

ima ulogu da pothlađuje fluid na izlazu iz test sekcije, da bi na ulazu temperatura fluida bila konstantna. Temperatura zida cevi merena je pomoću pet termoparova postavljenih lemljenjem duž test sekcije.



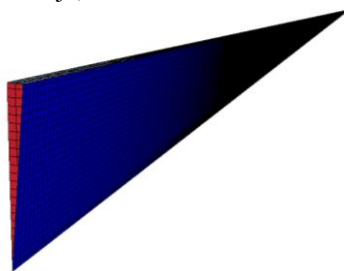
Slika 2.1 Eksperimentalno postrojenje za ispitivanje nanofluida [2]

Za potrebe ostvarivanja cilja istraživanja primenjena je računarska dinamika fluida. Numeričke simulacije su urađene u programskom paketu Star CCM+. Kao geometrijski model korišćena je prava cev, kružnog poprečnog preseka dužine $L=1,75$ [m] i unutrašnjeg prečnika $D=0,014$ [m], iz koje je izdvojen klin ugla 5° , slika 2.2.



Slika 2.2 Geometrijski model

Nakon kreiranja geometrijskog modela, kreirana je strukturirana zapreminska mreža. Veličina baze jedne ćelije iznosila je 0,0012 m. Generisana mreža sastojala se iz oko 200000 ćelija, slika 2.3.



Slika 2.3 Mrežni model

Kao granični uslov definisan je toplotni fluks na zidu cevi čija je vrednost iznosila $q=13300$ [W/m²]. Kao početni uslovi definisani su pritisak, koji je imao vrednost atmosferskog pritiska, brzina strujanja fluida kroz cev koja je zavisila od Reynoldsovog broja i fizičkih osobina jonske i nanojonske tečnosti za određenu ulaznu temperaturu. Sve simulacije urađene su za dve vrednosti Reynoldsovog broja $Re=100$ i $Re=512$, za tri različite ulazne temperature nanofluida $T=293$ [K], $T=303$ [K], $T=335$ [K] i tri različite masene koncentracije nanočestica 0,5%, 1%, 2,5%.

2.3 Matematički model

Da bi se potvrdili rezultati simulacije najpre je simuliran pad pritiska Δp [Pa] pri strujanju vode kroz pravu cev. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim Darsi-Vajsbahovim izrazom [3]:

$$\Delta p = \rho \cdot \mu \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (1)$$

ρ [kg/m³] predstavlja gustinu tečnosti, L [m] je dužina cevi, D [m] unutrašnji prečnik cevi, v [m/s] je brzina strujanja tečnosti kroz cev, dok μ predstavlja koeficijent trenja i računa se na sledeći način:

$$\mu = \frac{64}{Re}, \quad (2)$$

Re [-] predstavlja Reynoldsov broj. Drugi način potvrde rezultata simulacije realizovan je upoređivanjem Nuseltovog broja dobijenim simulacijom sa Nuseltovim brojem dobijenim primenom Šahove jednačine [2].

Lokalni koeficijent prelaza toplote α [W/m²K] izračunat je na osnovu temperature zida cevi $T_w'(x)$ [K] i srednje temperature fluida u osi cevi $T_f'(x)$ [K] dobijenih iz simulacije.

$$\alpha(x) = \frac{q}{T_w'(x) - T_f'(x)}, \quad (3)$$

član q [W/m²] predstavlja toplotni fluks na zidu cevi. Zatim je izračunat Nuseltov broj Nu :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda}, \quad (4)$$

λ [W/mK] predstavlja toplotnu provodljivost fluida. Nakon toga su očitani podaci iz literature koji su korišćeni za izračunavanje Prantlovog broja Pr i Šahove jednačine. Prantlov broj izračunat je uz pomoć sledeće jednačine i predstavlja odnos molekularne difuzije količine kretanja i molekularne toplotne difuzije:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda}, \quad (5)$$

gde je η [Pa·s] dinamička viskoznost, a c [J/KgK] toplotni kapacitet. Šahova jednačina uz pomoć koje je izračunat Nuseltov broj za laminarni režim strujanja glasi:

$$Nu(x) = \begin{cases} 1,953 \left(RePr \frac{D}{x} \right)^{\frac{1}{3}} & \left(RePr \frac{D}{x} \right) \geq 33,3 \\ 4,364 + 0,0722 RePr \frac{D}{x} & \left(RePr \frac{D}{x} \right) \leq 33,3 \end{cases} \quad (6)$$

x [m] predstavlja aksijalno rastojanje od ulaza cevi do tačke za koju se određuje Nuseltov broj.

2.4 Kriterijumi za procenu opravdanosti primene nanojonske tečnosti

Kako bi se procenilo da li je smisleno koristiti predmetni fluid u sistemima za prenos toplote, primenjeni su određeni kriterijumi.

U ovom radu su primenjena tri kriterijuma.

Prvi kriterijum δ predstavlja odnos osrednjenog koeficijenta prelaza toplote nanojonske i jonske tečnosti, podeljen sa odnosom pada pritiska nanojonske i jonske tečnosti:

$$\delta = \left(\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}} \right) / \left(\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{bf}} \right), \quad (3.11)$$

Δp_{nf} [Pa], Δp_{bf} [Pa] predstavljaju pad pritiska kroz cev nanojonske i bazne (jonske) tečnosti. Osrednjena vrednost koeficijenta prelaza toplote duž cevi dobijena je iz sledećeg izraza:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha dx. \quad (8)$$

Da bi ovaj kriterijum bio ispunjen potrebno je da vrednost δ bude veća od 1 ($\delta > 1$).

Drugi kriterijum predstavlja odnos Muromcefovog (Mouromtseff) broja Mo nanojonske i jonske tečnosti. Ovaj odnos zapravo predstavlja odnos toplotne provodljivosti λ nanojonske i jonske tečnosti:

$$\frac{Mo_{nf}}{Mo_{bf}} = \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}}. \quad (9)$$

Da bi ovaj kriterijum bio ispunjen potrebno je da odnos Muromcefovih brojeva ima vrednost veću od 1.

Treći kriterijum definiše se kao odnos dinamičke viskoznosti nanojonske i jonske tečnosti η_{nf} , η_{bf} stepenovan na 1/3, a da bi bio ispunjen mora da ima vrednost nižu od odnosa toplotne provodljivosti nanojonske i jonske tečnosti λ_{nf} , λ_{bf} :

$$\left(\frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} \right)^{1/3} < \left(\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \right). \quad (10)$$

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Pad pritiska vode kroz cevovod

U tabeli 1 prikazane su vrednosti padova pritiska vode kroz pravu cev, dobijene primenom Darsi-Vajbahovog obrasca, za različite brzine strujanja tečnosti i rezultati pada pritiska vode kroz pravu cev dobijeni računarskom dinamikom fluida.

Tabela 2.1. Rezultati dobijeni Darsi-Vajbahovom jednačinom upoređeni sa rezultatima numeričke simulacije

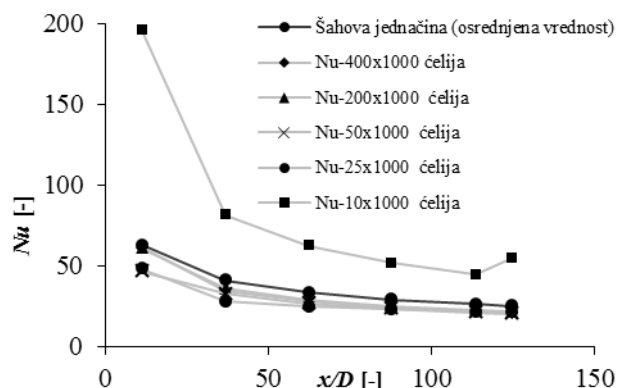
| v [m/s] | Δp [Pa]- Darsi-Vajbahovo obrazac | Δp [Pa]- Numerička simulacija | Razlika rezultata [%] |
|-----------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 0,2 | 425,72 | 423,6 | 0,40 |
| 0,3 | 638,57 | 630,19 | 1,33 |
| 0,4 | 851,43 | 865 | 1,57 |
| 0,55 | 1170,72 | 1187 | 1,37 |

Rezultati iz prethodne tabele su pokazali da ovako podešena mreža daje zadovoljavajuće rezultate, koji su veoma bliski literarnim vrednostima.

3.2 Nezavisna mrežna analiza

Kako bi se utvrdilo da li broj ćelija zapreminske mreže daje zadovoljavajuće rezultate urađena je nezavisna mrežna analiza. Simulirana je prinudna konvekcija toplote prilikom strujanja nanojonske tečnosti kroz cev.

Za iste ulazne parametre, korišćena je mreža sa različitim brojem ćelija (najmanji broj ćelija je 10000 a najveći 400000). Na slici 3.1 prikazane su vrednosti Nuseltovog broja Nu dobijenog simulacijama u zavisnosti od bezdimenzionog rastojanja x/D i primenom Šahove jednačine.

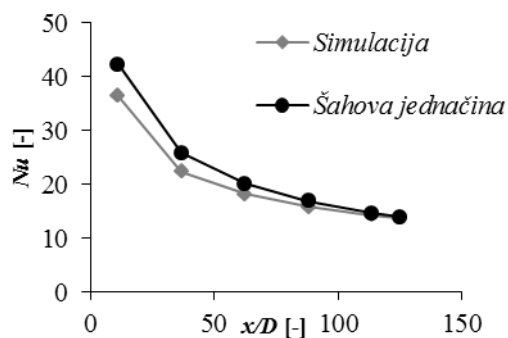


Slika 3.1 Nezavisna mrežna analiza

Primećeno je da mreža od 400000 ćelija ne daje znatno bolje rezultate od mreže sa 200000 ćelija, a vreme trajanja simulacije je znatno duže. Iz tog razloga odlučeno je da se u daljem radu koristi zapreminska mreža od 200000 ćelija.

3.3 Nuseltov Broj

Na slici 3.2 prikazano je poređenje vrednosti Nuseltovog broja Nu za nanojonsku tečnost dobijenih računarskom dinamikom fluida i Nuseltovog broja dobijenog uz pomoć Šahovog izraza u zavisnosti od bezdimenzionog rastojanja x/D .



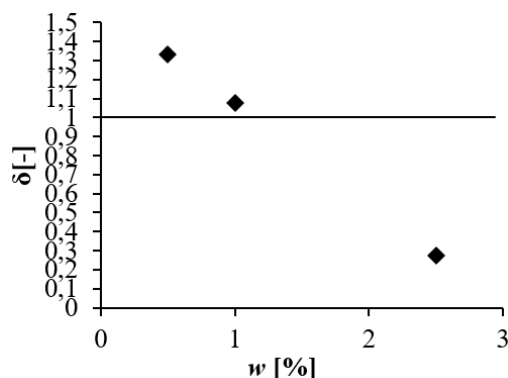
Slika 3.2 Zavisnost Nuseltovog broja Nu i bezdimenzionog rastojanja x/D

Sa slike 3.2 može se zaključiti da su rezultati veoma bliski.

Takođe, kako se termički granični sloj razvija, razlika između rezultata postaje sve manja.

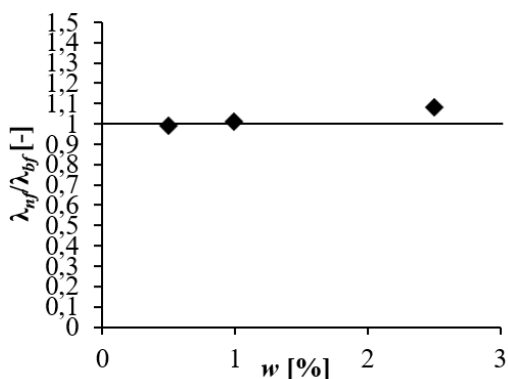
3.4 Rezultati primene kriterijuma za predmetnu nanojonsku tečnost

Na slici 3.3 može se uočiti da predmetna nanojonska tečnost zadovoljava prvi kriterijum jedino za temperaturu tečnosti na ulazu od $T=335$ K i to u slučaju kada je masena koncentracija nanočestica niža od 2,5%, odnosno, za masene koncentracije od 0,5% i od 1%.



Slika 3.3 Rezultati primene prvog kriterijuma pri temperaturi tečnosti od $T=335$ K i Reynoldsovom broju od $Re=512$

Predmetna nanojonska tečnost ne ispunjava drugi kriterijum samo pri temperature tečnosti na ulazu od $T=293$ K i masenoj koncentraciji nanočestica od $w=0,5\%$. Kriterijum je ispunjen za sve ostale razmatrane temperature i masene koncentracije nanočestica, slika 3.4.



Slika 3.4 Rezultati primene drugog kriterijuma pri temperaturi $T=293$ K

Rezultati primene trećeg kriterijuma prikazani su u tabeli 3.1

Tabela 3.1 Rezultati primene trećeg kriterijuma

| T [K] | w [%] | $\lambda_{nf}/\lambda_{bf}$ [-] | $(\eta_{nf}/\eta_{bf})^{1/3}$ [-] |
|---------|---------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 293 | 0,5 | 0,98577 | 1,01978 |
| | 1,0 | 1,00843 | 1,05089 |
| | 2,5 | 1,07843 | 1,43557 |
| 303 | 0,5 | 1,03038 | 1,02327 |
| | 1,0 | 1,04510 | 1,07048 |
| | 2,5 | 1,07941 | 1,48093 |
| 335 | 0,5 | 1,04874 | 0,97027 |
| | 1,0 | 1,06456 | 1,02040 |
| | 2,5 | 1,10616 | 1,41467 |

Iz Tabele 3.1 može se uočiti da predmetni nanofluid zadovoljava treći kriterijum pri masenim koncentracijama od 0,5% i 1% i pri temperature tečnosti na ulazu od $T=335$ K.

4. ZAKLJUČAK

Nuseltov broj Nu koji je izračunat uz pomoć podataka dobijenih simulacijama i Nuseltov broj Nu dobijen uz pomoć Šahove jednačine odstupa maksimalno 30% na početku cevi kada je termički granični sloj nerazvijen, kako se granični sloj razvija ova odstupanja postaju sve manja da bi na kraju cevi odstupanja bila nekoliko procenata. Korišćenjem kriterijuma za potvrdu opravdanosti primene nanojonskih tečnosti u sistemima za prenos toplote, došlo se do zaključka da korišćena nanojonska tečnost ispunjava prvi kriterijum, i treći kriterijum i to za vrednosti masene koncentracije nanočestica od 0,5% i 1% i inicijalnu ulaznu temperaturu od 335 K.

Drugi kriterijum nije ispunjen samo za nanojonsku tečnost koja ima masenu koncentraciju nanočestica 0,5% i inicijalnu ulaznu temperaturu od 293 K. Na osnovu poklapanja rezultata prvog i trećeg kriterijuma, zaključeno je da predmetnu nanojonsku tečnost ima smisla koristiti u sistemima za prenos toplote ukoliko je koncentracija nanojonskih tečnosti 0,5% i 1% a inicijalna ulazna temperatura 335 K. Nanojonske tečnosti su i dalje u razvoju i još uvek je njihova cena visoka.

U ovom radu se može videti da predmetnu nanojonsku tečnost sa tehničkog aspekta ima smisla koristiti u komercijalne svrhe. Neki uređaji poput izmenjivača toplote rade na temperaturama višim od 500 K, iz razloga nedostatka eksperimentalnih termofizičkih podataka za ovu tečnost pri visokim temperaturama, dalja istraživanja treba fokusirati na prikupljanju eksperimentalnih podataka pri temperaturama višim od 370 K.

5. LITERATURA

- [1] Briefing, U. S., "International Energy Outlook 2013.", DOE/EIA-0484, 2013.
- [2] Paul, T. C., "Investigation of Thermal Performance of Nanoparticle Enhanced Ionic Liquids (NEILs) for Solar Collector Applications" (Doctoral dissertation), 2014.
- [3] Bukurov M., „Mehanika fluida - knjiga prva: osnove“, FTN Novi Sad, 2013.

Kratka biografija:



Nikola Drobac rođen je u Novom Sadu 1992. god. Osnovne studije iz oblasti Mašinstva završio je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2017 god. Master rad iz oblasti Mašinstva odbranio je na istom fakultetu 2020 god. kontakt: drobac92@gmail.com