Toplinsko i reološko ponašanje nanofluida

Ždrakić, Marija

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:149:393092

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Marija Ždrakić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb,rujan 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Marija Ždrakić

Toplinsko i reološko ponašanje nanofluida

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv.prof. dr.sc. Jasna Prlić Kardum

Članovi ispitne komisije:

izv.prof. dr.sc. Jasna Prlić Kardum

prof.dr.sc. Aleksandra Sander

izv.prof.dr.sc. Vanja Kosar

Zagreb, rujan 2015.

SAŽETAK

U ovom radu ispitivana je stabilnost i termo-fizikalna svojstva nanofluida sa i bez aditiva. Za pripravu suspenzija korištene su nanočestice Al_2O_3 koje su dispergirane u demineraliziranoj vodi u 0.5, 1.0, 1.5 vol %. U suspenziju koja sadrži 0.5 vol % Al_2O_3 dodani su različiti aditivi (polivinil alkohol (PVA), polivinilpirolidon (PVP), arapska guma (AG), heksadeciltrimetilamonijev bromid (CTAB) i natrijev dodecil-sulfat (SDS)) u različitim masenim omjerima.

Pripravljenim nanosuspenzijama izmjerena je gustoća, viskoznost i koeficijent toplinske vodljivosti. Da bi se definirala stabilnost nanosuspenzija, praćena je promjena *pH* vrijednosti i toplinske vodljivosti suspenzija s vremenom.

Poboljšanje stabilnosti postiže se povećanjem volumnog udjela Al_2O_3, te dodatkom aditiva (s izuzetkom SDS-a). Iako su nanofluidi s dodanim aditivima stabilniji od nanosuspenzija bez aditiva, njihovom upotrebom se smanjuje toplinska vodljivost, povećava gustoća i viskoznost. Korištenjem površinski aktivnih tvari mijenjaju se reološke karakteristike nanosuspenzija iz newtonskih u nenewtonske fluide.

Najbolja stabilizacijska svojstva pokazao je PVA čijom upotrebom se ne mijenja reološko ponašanje nanosuspenzije, a viskoznost i gustoća mu se neznatno povećavaju u odnosu na nanofluid iste koncentracije bez aditiva. Toplinska vodljivost nije smanjena, a stabilnost je zadovoljavajuća.

Ključne riječi: Al_2O_3, koeficijent toplinske vodljivosti, nanofluid, aditivi, termo-fizikalna svojstva nanofluida.

ABSTRACT

In these work stability and thermo- physical properties of nanofluids with and without additives were examined. Nanofluids were prepared by disperzion of Al_2O_3 nanoparticles in demineralized water in 0.5; 1.0; 1.5 vol%. In 0.5 vol% suspension different additives in different volume portions were added (Polyvinyl alcohol (PVA), Polyvinylpyrrolidone (PVP), Gum arabic (AG), Hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB) and Sodium dodecyl sulfate (SDS).

Density, viscosity and thermal conductivity of prepared nanosuspensions were determined. To define the stability of the nanosuspensions, the change in the pH values and thermal conductivity of the suspensions was measured within a time period.

The improvement in the stability was achieved through the increase of the mass ratio of Al_20_3, and through the addition of the additives (not including SDS). Although the nanofluids with the additives proved more stable than the ones without the additives, the use of the additives decreased thermal conductivity, and increased the density and viscosity. The use of surfactants changed rheological characteristics of the nanosuspensions from Newtonian fluids into non-Newtonian fluids.

PVA was shown to have the best stabilising properties. It's use didn't change the rheological characteristics of the nanosuspension, and viscosity and density were only slightly increased in comparison to the nanofluid of the same concentration but without the additives. Thermal conductivity was not decreased, while the stability was satisfactory.

Key words: Al_2O_3, coefficient of thermal conductivity, nanofluid, additives, thermo -physical properties of nanofluids.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. OPĆI DIO 1
2.1. Nanočestice 1
2.2. Nanofluidi 4
2.2.1. Stabilnost nanofluida 6
2.3. Termo-fizikalna svojstva nanofluida 9
2.3.1. Gustoća nanofluida 9
2.3.2. Viskoznost nanofluida 9
2.3.3. Toplinska vodljivost nanofluida 10
2.3.4. Toplinski kapacitet 11
2.4. Aditivi 12
3.EKSPERIMENTALNI DIO 13
3.1. Zadatak 13
3.2. Materijal 13
3.2.1. Nanočestice Al_2O_3 13
3.2.2. Aditivi 14
3.3. Priprema nanofluida 16
3.4. Uređaji 16
3.4.1. Ultrazvučni homogenizator 16
3.4.2. Mjerenje gustoće nanosuspenzija 17
3.4.3. Određivanje viskoznosti 18
3.4.4. Uređaj za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti 19
4. REZULTATI 20
4.1. Viskoznost 20
4.2. Gustoća 25
4.3. Koeficijent toplinske vodljivosti 27
4.4. Određivanje stabilnosti pripravljenih uzoraka 28
5. RASPRAVA 30
6. ZAKLJUČAK 34
7. POPIS SIMBOLA 35
8. LITERATURA 36

1. UVOD

Interes za održivu energiju te interes za povećanje učinkovitosti postojećih procesa prijenosa topline stvorio je značajnu potrebu za novom tehnologijom koja uključuje nanofluide, koloidne otopine sa česticama reda veličine nekoliko nanometara, budući da već postojeće kapljevine za prijenos topline nemaju dovoljno dobru toplinsku provodnost. Povećanje prijenosa topline može u skladu s odgovarajućim radnim uvjetima dovesti do smanjenja potrošnje energije, smanjenja sirovina na ulazu, smanjenja veličine opreme, a time i troškova te povećanje učinkovitosti sustava. Tako su na primjer, Warrier *et al.* ustanovili povećanje toplinske vodljivosti od 39%, kada nanofluid sadrži 2% nanočestica bakra.[7] Slično tome su Warrier *et al.* definirali u eksperimentu s vrenjem nanofluida koji sadrži 1.25% aluminijevih nanočestica povećanje koeficijenta prijenosa topline za 40 % u usporedbi s eksperimentima koji su provedeni s čistom vodom.[7] U posljednjih nekoliko godina u porastu su istraživanja vezana uz nanofluide jer osim njihove primjene u prijenosu topline i povećanja toplinske vodljivosti oni se mogu primjenjivati u raznim granama industrije pa se tako mogu koristiti u sustavima za hlađenje, biomedicinskoj primjeni, nuklearnim reaktorima, mikro-elektromehaničkim sustavima, automobilskoj i zračnoj industriji te elektroničkoj primjeni.

U ovom radu razmatrat će se kako volumni udio nanočestica utječe na toplinska i reološka svojstva nanofluida. U eksperimentu bit će korištene nanočestice Al_2O_3 dispergirane u demineraliziranoj vodi u 0.5, 1.0, 1.5 vol %. Pripravljenim suspenzijama dodani su aditivi: PVA (polivinil alkohol)u 1.0 mas %, PVP (polivinilpirolidon) u 5.0 mas %, AG (arapska guma) u 2.5 mas %, CTAB (heksadeciltrimetilamonijev bromid) u 0.0132 mas %, SDS (natrijev dodecil-sulfat) u 0.1 mas %. Pripravljenim suspenzijama praćena je stabilnost (mjerenjem *pH* vrijednosti i koeficijenta toplinske vodljivosti s vremenom) te izmjerena gustoća i viskoznost nanosuspenzije.

2. OPĆI DIO

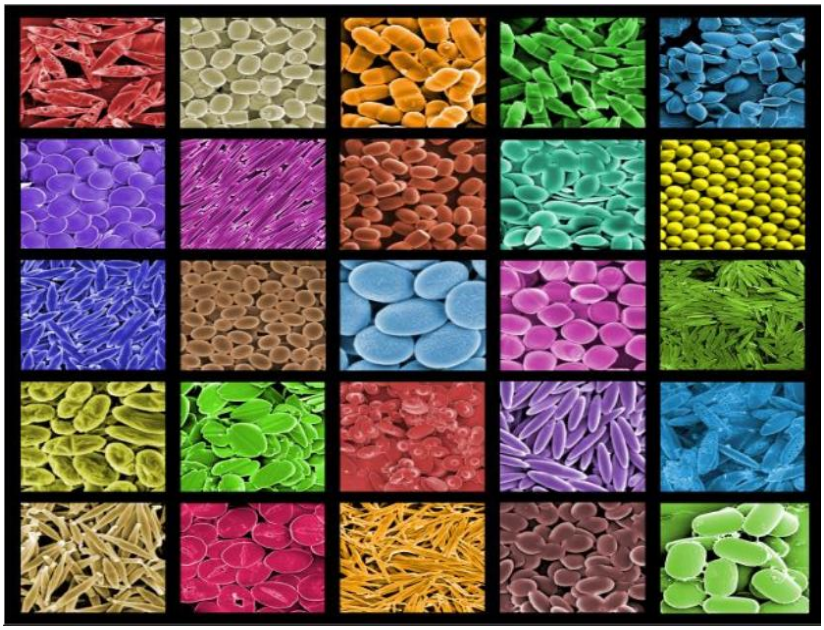
2.1. Nanočestice

Nanočestice su u zadnjih tridesetak godina pronašle široku primjenu u industriji, visokoj tehnologiji, medicini i farmaciji. Nanočestice su superfine čestice veličine od 1 do 100 nanometara (slika1.). Moguće je dodatkom nanočestica materijalima poboljšati tvrdoću, čvrstoću te druga mehanička svojstva. Velika je njihova primjena u nanotehnologiji gdje se promjenom njihove veličine mijenjanju magnetska, optička i električna svojstva.[6] U nanomedicini se nanočestice koriste u različite svrhe: kao fluorescentni markeri, za gensku terapiju i transport lijekova, za detekciju proteina, ispitivanje strukture DNA. Nanočestice pokazuju niz posebnih svojstava u odnosu na dispergirani materijal te tako imamo nanočestice bakra veličine manje od 50 nm koje se smatraju super tvrdim česticama i koje ne pokazuju istu kovnost i savitljivost kao cjeloviti bakar.[2] Nanočestice su čestice malog volumena i goleme površine te ista svojstva koja nanočestice čine poželjnima mogu biti i štetna. Kao primjer,može se navesti feroelektrični materijal manji od 10 nm, koji se koristi za električne uređaje, kada na sobnoj temperaturi mogu prebaciti smjer magnetiziranja toplinske energije i tako postaju beskorisni.[2] Stabilne suspenzije nanočestica moguće je dobiti jer je interakcija između površine čestica i otapala dovoljno jaka da prevlada razlike u gustoći. Nanočestice često imaju neočekivane vidljive osobine jer su dovoljno male da ograniče svoje elektrone i tako proizvedu kvantne učinke. Kao primjer možemo navesti nanočestice zlata koje se u otopini pojavljuju od crvene do crne boje. Velika površina nanočestica osigurava veću površinu izmjene topline između čestica i bazne kapljevine što pridonosi povećanju toplinske vodljivosti. U članku o nanočesticama navedeno je da se sinteriranje može održati na nižim temperaturama tijekom kraćih vremenskih razdoblja nego za veće čestice.[2] Čestice u nanosuspenzijama su u *Brownovom* gibanju te formiranje klastera poznato kao agregacija nastaje kada se čestice udruže zbog jakih privlačnih sila. Udio *Van der Waalsove* sile koje djeluju na nanočestice u odnosu na druge sile je veći od udjela kojim djeluju na mikročestice. *Van der Waalsove* sile smanjuju se s povećanjem udaljenosti između čestica. Ilyas *et al.* navode da sklonost čestica aglomeriranju smanjuje njihovu ukupnu učinkovitu toplinsku vodljivost i može izazvati začepljenje.[1]

Nanočestice se primjenjuju u mnogim područjima pa su tako studije pokazale da nanočestice željeza mogu biti učinkovitije u čišćenju kemikalija u podzemnim vodama, jer reagiraju učinkovitije s tim kemikalijama od većih čestica željeza.[5] Nanodijamanti s dodanim

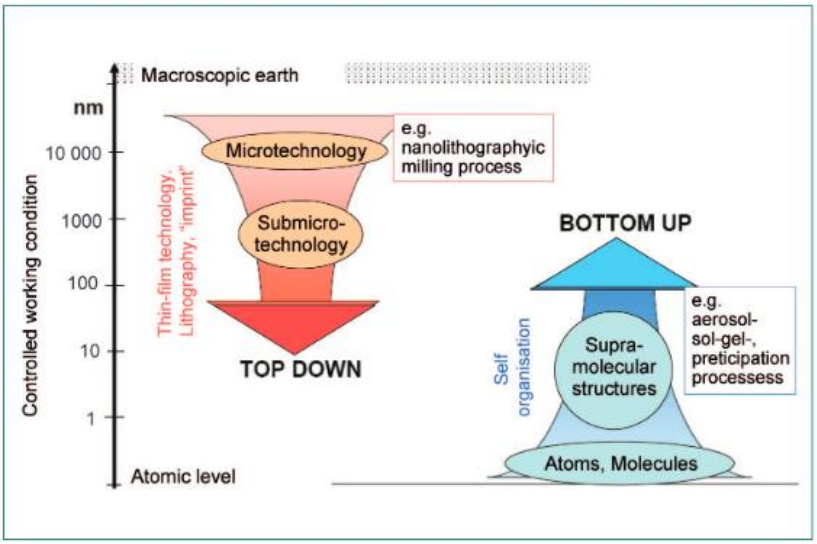
molekulama proteina koriste se za povećanje rasta kostiju oko dentalnih implantata ili zglobova te za liječenje tumora.[5] Nanočestice imaju veliki potencijal i u elektrotehnici gdje možemo pomoću ugljkovih nanocjevčica izraditi tranzistor minimalnih dimenzija. Koriste se i za razvoj *lowcost* elektroda gorivih ćelija koja može zamijeniti skupe platine koje se koriste kao elektrode u katalizatorima.[5]

Neka istraživanja su pokazala da sunčeva svjetlost koncentrirana na nanočestice može proizvesti paru s visokom energetskom učinkovitošću. Nanočestice se koriste i u programima zaštite okoliša. Jedan od primjera za to je kako upotreba nanočestica srebra kao katalizatora može znatno smanjiti štetne nusprodukte nastale proizvodnjom propilen oksida. Nanotehnologiju koristimo za poboljšanje solarnih ćelija i povećanje električne energije iz vjetrenjača gdje od ugljikovih nanocjevčica izrađujemo lopatice vjetrenjače koje će biti jače i manje težine te će količina proizvedene električne energije biti veća.[5]



Slika 1. Nanočestice

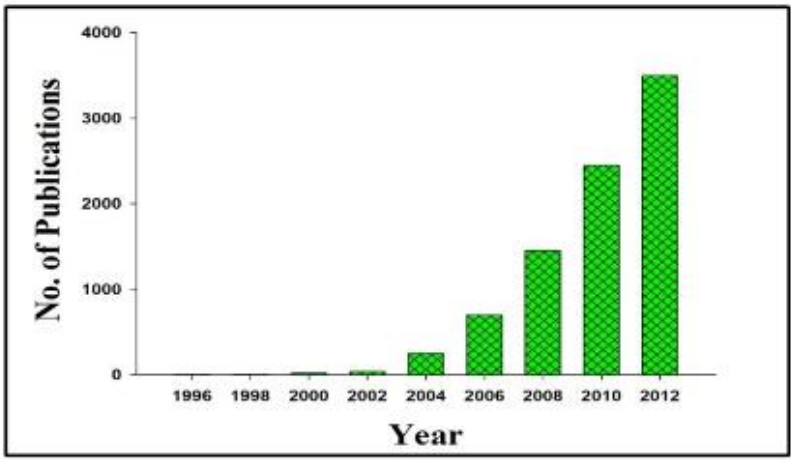
Dvije osnovne metode koje se koriste za proizvodnju nanočestica su *top-down* i *bottom-up* (slika2.). *"Top-down"* se odnosi na mehaničko drobljenje izvornog materijala u procesu mljevenja. U *bottom-up* metodi strukture nastaju kemijskim procesima. Izbor odgovarajućeg postupka ovisi o kemijskom sastavu i željenim karakteristikama konačnog produkta.[3] Kondenzacija pare i kemijska sinteza primjeri su *bottom-up* metode. Nastajanje nanočestica kondenzacijom vodene pare najčešće se koristi za proizvodnju nanočestica metalnih oksida. Osnovna prednost ove metode je niska razina onečišćenja, a veličina nanočestica kontrolira se parametrima kao što su temperatura, okolišni tlak i brzina isparavanja.[4] Druga najčešća korištena tehnika dobivanja nanočestica je kemijska sinteza. Kemijska sinteza sastoji se od rasta nanočestica u tekućem mediju koji se sastoji od različitih reaktanata. Ovom metodom se može lakše kontrolirati konačna veličina nanočestica nego kondenzacijom pare. Konačnu veličinu nanočestica možemo postići kontroliranjem kondenzacije, raznim kemikalijama ili zaustavljanjem procesa kada se postigne određena veličina. Prednost metode je niska cijena, a nedostatak je onečišćenje prilikom korištenja kemikalija. Treća metoda dobivanja nanočestica je metoda usitnjavanja koja pripada u *top-down* metodu. Ona se najčešće koristi ako se nanočstice ne mogu dobiti pomoću prethodno nabrojanih metoda. Ovu metodu primjenjujemo u proizvodnji metalnih i keramičkih nanomaterijala. Cjeloviti materijal se pretvara u prah pomoću kugličnih mlinova velike energije.[3] Vrijeme koje je potrebno za mljevenje ili usitnjavanje te atmosferska sredina mogu negativno djelovati na svojstva nanočestica.[4]



Slika 2. Metode za proizvodnju nanočestica

2.2. Nanofluidi

Dvadesetprvo stoljeće je doba tehnološkog razvoja i razdoblje u kojem dolazi do promjena u gotovo svakoj industriji. Znanstvenik Norio Taniguchi je započeo s uvođenjem pojma nanotehnologije, a 1995. godine znanstvenik Choi uspješno je pripremio nanofluid. Nakon toga započela su brojna istraživanja vezana uz nanofluide te je tako u 2011. godini bilo oko 700 znanstvenih radova vezano uz njih (slika3.).[9]



Slika 3. Porast znanstvenih radova o nanofluidima kroz godine

Rani istraživači koriste različite vrste nanočestica u svojim studijama poput metala Al, Fe, Cu, Ag, Au, metalnih oksida ZnO, CuO, TiO_2,Al_2O_3 i nanocjevčice. Većina studija primjenjuje nanočestice kao aditiv u vodi, etilen glikolu, acetonu i nekoliko drugih baznih tekućina. Nanofluidi su nova vrsta inženjerskih materijala i definirani su kao suspenzije nanočestica prosječnog promjera manjeg od 100 nm. Postoje dvije vrste nanofluida, a to su metalni i nemetalni. Metalni nanofluidi nastali su disperzijom nanočestica metala kao što su aluminij, bakar, nikal itd. Nemetalni nanofluidi nastali su dispergiranjem nanočestica nemetala ili metalnih oksida te alotropa ugljika.[9]

Nanofluidi imaju osobine koje ih čine veoma posebnima:

• Poboljšana sposobnost prijenosa topline

•Porast toplinske vodljivosti je veći od teoretskih predviđanja

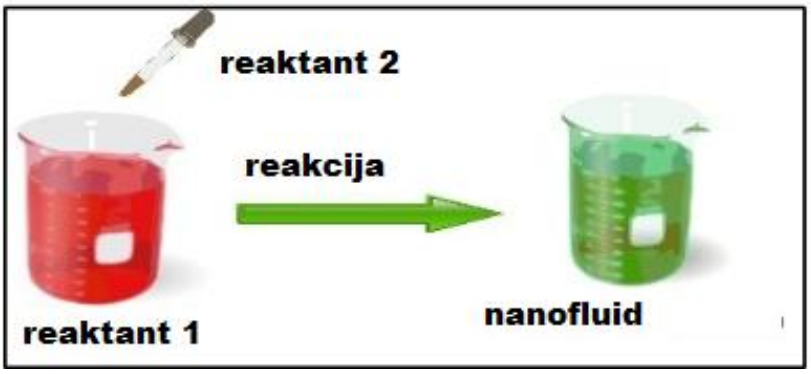
•Bolja stabilnost od drugih koloida

•Smanjenje erozije i začepljenja u mikro kanalima

•Bolje podmazivanje

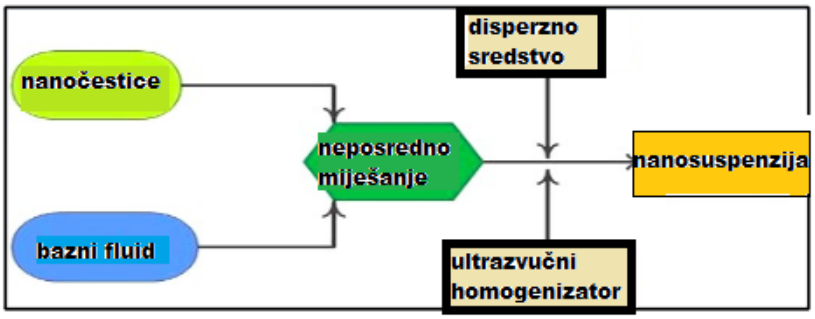
Do poboljšanih svojstava dolazi zbog veće učestalosti sudara i veće kontaktne površine između čvrstih nanočestica i tekuće faze.[10] Međutim postoje ograničenja njihove uporabe u industriji, a to su uzak raspon radnih uvjeta koji su ograničeni do vrelišta tekućine, slijeganje nanočestica u transportu ili statičkim uvjetima i porast viskoznosti tekućine(što povećava potrebnu snagu za pumpanje).[1] *Van der Waalsove* privlačne sile kontroliraju interakciju između čestica te interakcije dovode do stvaranja aglomerata i porasta viskoznosti tekućine. Stoga prilikom proučavanja toplinskih svojstava potrebno je i proučavati reološka svojstva (viskoznost).

Priprema nanofluida je ključan korak za postizanje stabilnih suspenzija. Koloidna teorija navodi da sedimentacija u suspenziji prestaje kada je veličina čestica ispod kritičnog radijusa. Primjena manje veličine čestica može biti dobra za pripremu stabilne nanosuspenzije, međutim manje čestice pokazuju visoku površinsku energiju koja utječe na formiranje nakupina.[1] Za pripremu potrebna je bazna otopina i krute nanočestice. Komercijalne nanočestice mogu se nabaviti u obliku suhog praha, a dispergiraju se u baznoj otopini. Postoje dvije metode za pripremu, a to su metoda u jednom koraku i metoda u dva koraka. Metoda u jednom koraku (slika 4.) odnosi se na istodoban proces sinteze i disperzije nanočestica u baznom fluidu. Nanosuspenzije dobivene ovom metodom pokazuju manju aglomeraciju i bolju stabilnost. Smetnja u tom procesu je visoki trošak proizvodnje u usporedbi s metodom dva koraka, za sada nije moguća sinteza u velikom mjerilu te nastanak nepoznate količine sporednih produkata. Postoji više metoda u jednom koraku, a na primjer imamo metodu izravnog isparavanja pod nazivom VEROS (*Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate*).



Slika 4. Metoda u jednom koraku

Metoda u dva koraka (slika 5.) najviše se koristi u proizvodnji nanofluida. Prvi korak je miješanje suhog praha, odnosno nanočestica u baznoj kapljevini. Nanočestice imaju tenedciju stvaranja agregata pa se ultrazvučnom vibracijom razbijaju aglomerati i zatim homogenizira smjesa.[1] Jedan od načina dispergiranja čestica u fluidu je primjena ultrazvučnih vibracija zvučne frekvencije 30-40 kHz. Prednost ove metode je ekonomičnost, a nedostatak je aglomeracija nanočestica koja uzrokuje dodatne troškove za namješavanje i stabilizaciju.



Slika 5. Metoda u dva koraka

2.2.1. Stabilnost nanofluida

Kod nanofluida najvažnije pitanje je njihova stabilnost. Najbolji nanofluidi su oni s najboljim toplinskim ponašanjem i dobrom stabilnošću. Za procjenu stabilnosti nanočestica u baznom fluidu koristi se Stokesov zakon (1). On opisuje ovisnost brzine sedimentacije čestica o gustoći i promjeru čestica te o viskoznosti kapljevine:

$$v = \frac{2r_p^2 g}{9\eta_L}(\rho_p - \rho_L) \quad (1)$$

v= brzina sedimentacije čestica

r_p= promjer čestice

g= gravitacijsko ubrzanje

ρ_p= gustoća čestica

ρ_L= gustoća kapljevine

η= dinamička viskoznost

Stabilnost nanofluida možemo odrediti koristeći metode kao što su metoda sedimentacije (slika 6.). Metoda se temelji na praćenju i fotografiranju sedimentacije nanofluida u epruvetama kroz duži vremenski period što je ujedno i nedostatak metode. Spektralna analiza pomoću UV-VIS spektrofotometra je druga metoda za procjenu stabilnosti. Prednost ove metode je da spektrofotometar daje kvantitativne rezultate koji odgovaraju koncentraciji nanofluida.[9] Sljedeća metoda je mjerenje zeta potencijal koji predstavlja razliku potencijala između disperzije srednjeg i stacionarnog sloja fluida pričvršćenog za dispergirane čestice. Koloidi s visokim zeta potencijalom (negativinim ili pozitivnim) su električno stabilizirajući dok su koloidi s niskim zeta potencijalom skloni zgrušnjavanju ili flokuliranju. Nanofluidi s zeta potencijalom 40-60 mV imaju izvrsnu stabilnost.[9]

Slika 6. Sedimentacija nanofluida

Nanofluid se smatra stabilnim ako je koncentracija i veličina čestica konstantna. Stabilnost znači da se čestice ne talože značajnom brzinom. DVLO (*Dejaguin, Verway, Landau, Overbeek*) teorija se bavi koloidnom stabilnosti. Ona kombinira *Van der Waalsove* privlačne sile i elektrostatsku otpornost kao funkciju udaljenosti između čestica. Dobivena krivulja je neto interakcijska energija.[10] Kada čestice imaju dovoljno velik stupanj odbijanja, suspenzije će biti u stabilnom stanju, a ako su privlačne sile veće od odbojnih sila suspenzija nije stabilna. Za stabilne nanofluide odbojna sila između čestica mora biti dominantna.

2.3. Termo-fizikalna svojstva nanofluida

U primjeni nanofluida važnu ulogu imaju toplinska vodljivost, specifična toplina, gustoća i viskoznost nanofluida.

2.3.1. Gustoća nanofluida

Gustoća nanofluida je vrlo važno svojstvo kapljevine i utječe na faktor trenja, gubitke rada pumpe, Reynolds broj, Nusseltov broj itd. Gustoća mora biti poznata kako bi ocijenili dinamiku fluida i prijenos topline. Jednadžba za gustoću nanosuspenzija bazira se na fizikalnim principima pravila smjese. Definirana je sljedećim izrazom (2):

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{eff} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} = (1 - \varphi_p)\,\rho_f + \varphi_p\,\rho_p \qquad (2)$$

Pri čemu se *f* odnosi na fluid, a *p* na čestice.

ρ_{nf} gustoća nanofluida

m_f masa fluida

m_p masa čestica

V_f volumen fluida

V_p volumen čestica

φ_p volumni udio čestica

ρ_p gustoća čestica

2.3.2. Viskoznost nanofluida

Viskoznost (unutarnje trenje) je osobina kapljevina i plinova da pružaju otpor međusobnom kretanju njihovih slojeva. Viskoznost se opisuje koeficijentom viskoznosti η koji predstavlja konstantu proporcionalnosti u Newtonovom zakonu viskoznosti :

$$F = \eta \cdot S \frac{dv}{dx} \qquad (3)$$

i mjeri se u paskal-sekundama (Pa·s).

F sila

S dodirna površina

d*v*/d*x* smična brzina

Viskoznost nanofluida se smanjuje s porastom temperature, višim stupnjem disperzije, a povećava se s povećanjem udjela nanočestica.[11] Einstein je određivao efektivnu viskoznost suspenzija sa česticama sferičnih oblika kao funkciju volumnog udjela koristeći fenomenološke hidrodinamičke jednadžbe (4). Nakon njega znanstvenici su krenuli u potragu za jednadžbama koje obuhvaćaju nesferične čestice.[12]

$$\eta_{eff} = (1 + 2.5\,\varphi_p)\,\eta_f \qquad (4)$$

η_f viskoznost fluida

φ_p volumni udio čestica

η_{eff} viskoznost nanofluida

2.3.3. Toplinska vodljivost nanofluida

Toplinska vodljivost je definirana kao količina topline u jedinici vremena i važan je parametar za povećanje prijenosa topline. Mnogi su toplinsku vodljivost nanofluida izračunali na temelju toplinske vodljivosti kapljevine i nanočestica, oblika i površine nanočestica, volumnog udjela i temperature.[11] Brojne studije su vezane za termofizikalna svojstva nanofluida, pa su tako Shin i Lee pronašli da je disperzijom nanočestica u smjesi silikonskog ulja i kerozina toplinska vodljivost oko 13 % veća od toplinske vodljivosti baznog ulja.[7] Metodom molekularne dinamike proučava se ovisnost toplinske vodljivosti nanofluida o svojstvima nanočestica dispergiranih u baznoj otopini.

Toplinska vodljivost nanofluida je veća od baznog medija, a povećava se s povećanjem volumnog udjela nanočestica. Toplinska vodljivost povećava se s povišenjem temperature pa je tako pronađeno da je povećanje toplinske vodljivosti od 2 do 4 puta u rasponu temperatura od 21 do 52 °C.[12] Gustoća dispergiranih nanočestica je važan element koji određuje toplinsku

vodljivost pa je tako povećanje nanočestične mase u određenoj količini bazne otopine dovelo do izraženijeg povećanja toplinske vodljivosti nego što bi doveo rast u veličini čestica, ali konstantne mase. Četiri glavna mehanizma za poboljšanje toplinske vodljivosti uključuju *Brownovo* gibanje nanočestica, molekularne razine raslojavanja tekućine temeljene na kontaktu kapljevina-čestica, prijenos topline unutar nanočestica i učinci aglomerata nanočestica.[12] Maxwellov model izračunavanja koeficijenta toplinske vodljivosti bio je prvi predloženi model za smjesu kapljevina-čvrsto (5):

$$\lambda_{\mathrm{eff}} = \lambda_{\mathrm{f}} + \frac{3\varphi_{\mathrm{p}}(\lambda_{\mathrm{p}} - \lambda_{\mathrm{f}})}{k\lambda_{\mathrm{p}} + 2\lambda_{\mathrm{f}} - \varphi_{\mathrm{p}}(\lambda_{\mathrm{p}} - \lambda_{\mathrm{f}})} \tag{5}$$

λ_{eff} toplinska vodljivost nanofluida

φ_{p} volumni udio suspendiranih čestica

λ_{p} toplinska vodljivost čestica

λ_{f} toplinska vodljivost baznog fluida

Zajedno s Bruggemanovim modelom pogodni su za sferične čestice. Za nesferične čestice otkriven je Hamilton i Crosserov model (6):

$$\lambda_{\mathrm{eff}} = \frac{\lambda_{\mathrm{p}} + (n-1)\lambda_{\mathrm{f}} + (n-1)\phi_{\mathrm{p}}(\lambda_{\mathrm{p}} - \lambda_{\mathrm{f}})}{\lambda_{\mathrm{p}} + (n-1)\lambda_{\mathrm{f}} - \phi_{\mathrm{p}}(\lambda_{\mathrm{p}} - \lambda_{\mathrm{f}})}\lambda_{\mathrm{f}} \tag{6}$$

n empirijski faktor oblika, dobiven iz odnosa n=3/ψ, gdje ψ označava sferičnost čestice.[11]

2.3.4. Toplinski kapacitet

Toplinski kapacitet je fizikalna veličina koja pokazuje koliko topline je potrebno dovesti tijelu da mu se temperatura povisi za 1 K. Definirana je omjerom topline(Q) koju tijelo razmjenjuje s okolinom i promjene temperature (ΔT) tijela (7):

$$c = \frac{Q}{\Delta T} \tag{7}$$

Mjerna jedinica je džul po kelvinu(J/K). Toplinski kapacitet koji se odnosi na masu neke tvari naziva se specifični toplinski kapacitet (8):

$$c_{\mathrm{p}} = \frac{Q}{m * \Delta T} \tag{8}$$

Kod nanofluida specifična toplina se povećava s povećanjem temperature i smanjuje s povećanjem sadržaja nanočestica zbog manje specifične topline u čvrstoj fazi u odnosu na tekuću.

Osnovni izraz za izračunavanje specifičnog toplinskog kapaciteta (9):

$$c_{eff} = (1- \varphi_p)\, c_f + \varphi_p c_p \quad (9)$$

c_{eff} specifični toplinski kapacitet nanofluida

c_f toplinski kapacitet fluida

c_p toplinski kapacitet čestica

φ_p volumni udio nanočestica

2.4. Aditivi

Aditivi su kemijske supstance koje se u malim količinama dodaju različitim produktima radi stabilizacije ili poboljšanja nekih svojstava. Izbor aditiva je važan da se postigne visoki stupanj stabilnosti i spriječi aglomeracija nanočestica u dvofaznom sustavu. Aditivi mogu biti kationske, anionske, amfolitske ili neionske prirode.[1] Dodavanjem aditiva se smanjuje površinska napetost vode i povećava uronjenost čestica. Neki od površinski aktivnih tvari su SDS (natrijev dodecil-sulfat), CTAB (heksadeciltrimetilamonijev bromid), PVP (polivinilpirolidon), AG (arapska guma), PVA (polivinil alkohol).[9] Ova tehnika ne može se primijeniti za nanofluide na visokim temperaturama kad površinske aktivne tvari mogu povećati toplinske otpore između nanočestica i baznih tekućina.[9] Upotreba aditiva je vrlo čest način stabilizacije nanofluida, međutim oni mogu uzrokovati kontaminaciju medija za prijenos topline te pjenjenje rashladnog medija.

3.EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Zadatak

Eksperimentalni dio obuhvaća provjeru stabilnosti te određivanje toplinskih i reoloških svojstava pripremljenih suspenzija. Pripremljeno je osam suspenzija u kojima su nanočestice Al_2O_3 dispergirane u demineraliziranoj vodi u volumnim udjelima 0.5, 1.0, 1.5%. Pripravljenim suspenzijama dodani su aditivi: PVA 1.0 mas %, PVP 5.0 mas %, Arapska guma 2.5 mas %, CTAB 0.0132 mas % (1 mas % od dodanih nanočestica), SDS 0.1 mas %. Određen je vremenski period u kojem su pripremljene suspenzije stabilne.

3.2. Materijal

Kao bazna suspenzija korištena je demineralizirana voda u iznosu od 100 g u kojoj su dispergirane nanočestice Al_2O_3 u različitim volumnim udjelima. Aditivi su dodavani u različitim masenim udjelima u uzorak 1M (koji čini 0.5 vol % Al_2O_3 u H_2O).

3.2.1. Nanočestice Al_2O_3

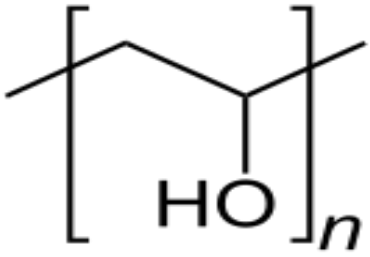
Komercijalni naziv za korištene nanočestice je *AEROXIDE Alu C 80*, a proizvođač je *Evonik Degussa*. Bijeli je, fini i lagani prah veličine između 7 i 40 nm. Zbog male veličine čestica sklon je aglomeraciji. Ostala svojstva nanočestica dana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva nanočestica Al_2O_3, AEROXID Alu C, proizvođača *Evonik Degussa*

AEROXIDE Alu C	
BET površina	100 m^2g^{-1}
Sastav određen XRD	33% δ, 66 % γ
Specifična težina	3.2 g cm^{-3}
Koeficijent toplinske vodljivosti	36 W m^{-1} K^{-1}

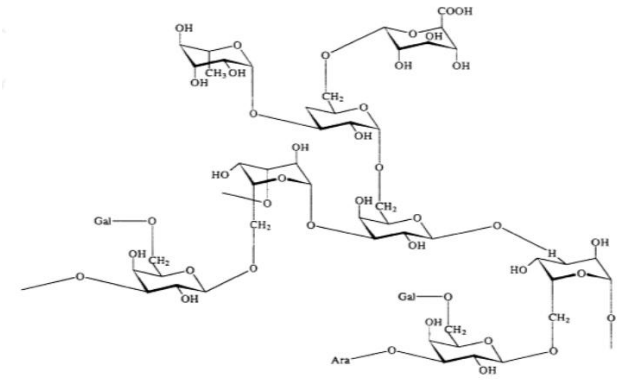
3.2.2. Aditivi

PVA{$(CH_2CH(OH))_n$} je sintetički polimer topljiv u vodi. Bijele je boje, bez mirisa, netoksičan, isporučuje se kao kuglice ili u obliku otopine u vodi. Koristi se u proizvodnji papira, tekstila, premaza. Ima visoku vlačnu čvrstoću i fleksibilnost te je otporan na ulja, masti i otapala[14]. Formula je prikazana na slici 7.



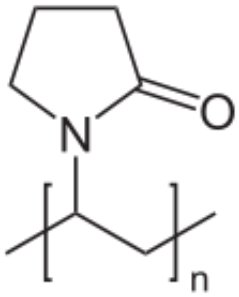
Slika 7. Formula PVA

Arapska guma dobiva se od raznih vrsta akacija, a ponajviše od grma *Acacia senegal*. Arapska guma je spoj kalcija, kalija i magnezija s kiselinskim ugljičnim hidratom. U njoj se nalaze i posebni katalizatori za oksidaciju, tzv. enzimi oksidaza i peroksidaza od kojih se lako oksidiraju spojevi s karbolnom skupinom i neki drugi kao na primjer adrenalin, morfin itd[14]. Strukturna formula nalazi se na slici 8.



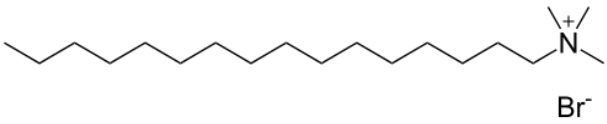
Slika 8. Strukturna formula arapske gume

PVP $(C_6H_9NO)_n$ je polimer topljiv u vodi i drugim polarnim otapalima sačinjen od monomera N-vinilpirolidona. PVP je svijetlo pahuljasti prah, u otopini ima odlična svojstva vlaženja i lako oblikovanje filma te je dobar kao prevlaka ili dodatak premaza[14]. Formula se nalazi na slici 9.



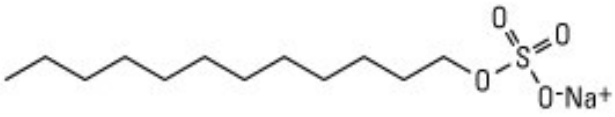
Slika 9. Formula PVP-a

CTAB ($(C_{16}H_{33})N(CH_3)_3Br$) je amin koji kao i bilo koja površinski aktivna tvar tvori micele u vodenim otopinama. Pronalazimo ga u antisepticima, proizvodima za kućanstvo, kozmetici[14]. Strukturna formula se nalazi na slici 10.



Slika 10. Strukturna formula CTAB

SDS je organski spoj s formulom ($CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$). To je anionska površinska tvar koji se koristi u mnogim sredstvima za čišćenje i higijenu. SDS je komercijalno dostupan u obliku praha i peleta te se u tom obliku brže otapa u vodi.[13] Na slici 11. je prikazana strukturna formula.



Slika 11. Strukturna formula SDS-a

3.3. Priprema nanofluida

Za ispitivanje karakteristika nanosuspenzija pripremljeno je 8 uzoraka. Svi uzorci pripremljeni su od smjese demineralizirane vode i nanočestica u volumnim udjelima od 0.5, 1.0, 1.5 %. U uzorak koji sadrži 0.5 vol % Al_2O_3 dodavani su aditivi PVA, PVP, SDS, CTAB i AG. Nanosuspenziju potrebno je stabilizirati, tj. spriječiti aglomeraciju nanočestica što se postiže djelovanjem pomoću ultrazvučnog zračenja. U tablici 2. prikazane su koncentracije pripravljenih uzoraka.

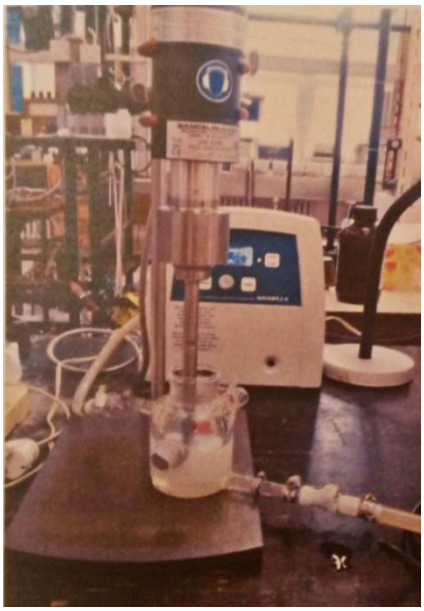
Tablica 2. Koncentracije pripravljenih uzoraka

Aditivi	PVP	PVA	AG	CTAB	SDS
volumni udio Al_2O_3, vol %	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
maseni udio aditiva, mas %	5.0	1.0	2.5	0.0132	0.1

3.4. Uređaji

3.4.1. Ultrazvučni homogenizator

Ultrazvučni homogenizator sastoji se od sonde koja se uranja u vodu u koju su dodane nanočestice. Nakon čega se pokreće program za homogenizaciju uzoraka. Snaga ultrazvučnog homogenizatora iznosi 2000 W, primijenjena amplituda 25 %, a trajanje djelovanja ultrazvučnih valova na suspenziju 20 minuta. Homogenizator služi za razbijanje i raspršivanje aglomerata u otopini te za homogenizaciju suspenzije. Zvučni valovi iz ultrazvučnog generatora uzrokuju promjene tlaka u otopini što dovodi do kavitacije unutar suspenzije te nadalje do homogene raspodjele čestica unutar suspenzije.[14] Na slici 12. prikazana je oprema za raspršivanje nanočestica.



Slika 12. Oprema za raspršenje nanočestica

3.4.2. Mjerenje gustoće nanosuspenzija

Mjerenje gustoće nanosuspenzija provedeno je digitalnim uređajem za mjerenje gustoće, *METTLER TOLEDO Densito 30PX* (slika 13.). Mjerenje se provodi uranjanjem cijevi za uzorkovanje u nanosuspenziju. Povlačenjem okidača očitavamo konačni rezultat. Mjerenje je ponovljeno tri puta za svaki uzorak te je na kraju određena srednja vrijednost gustoće. Korištenje oscilirajuće metode cijevi u kombinaciji s preciznim mjerenjem temperature i korisničkim sučeljem uređaj daje pouzdane rezultate mjerenja.

Slika 13. Uređaj za mjerenje gustoće- *METTLER TOLEDO Densito 30PX*

3.4.3. Određivanje viskoznosti

Mjerenje reoloških svojstava provedeno je na rotacijskom viskozimetru, model *DV-III+ Digital Rheometer-Brookfield,* primjenom koncentričnog cilindra SC4-27(slika 14.). Viskozimetar je povezan s računalom na kojem softver *Rheocalc 3.2.* upravlja mjerenjem reoloških svojstava nanofluida. Na ovom viskozimetru rotacijsko tijelo uranja se u fluida na određenoj udaljenosti od stjenke fluida. Mjerenje svježe pripremljene suspenzije provedeno je pri 15, 25, 35, 45 i 55 °C. Kako bi se održala konstantna temperatura suspenzije tijekom mjerenja korišten je termostat *model F 12 Julabo.* Mjerenjem je praćena ovisnost smičnog naprezanja,τ, o smičnoj brzini,γ, pri brzini smicanja do 182 s^{-1}.

Slika 14. Rotacijski viskozimetar *Brookfield DV-III Ultra*

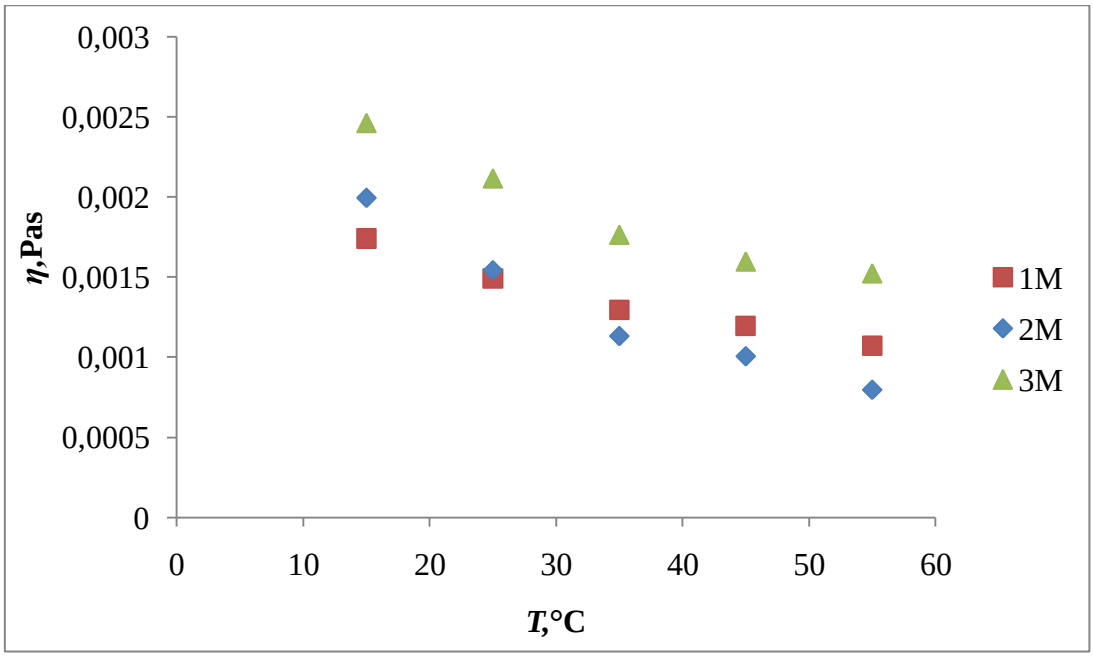
3.4.4. Uređaj za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti

Uređaj za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti korišten je model *Transient hot bridge* 1 (THB 1*)* tvrtke *Linseis Thermal Analysis.* Mjerenje se izvodi pomoću termoelektričnog senzora koji se nalazi u sondi i uranja se u uzorak. Senzor se sastoji od četiri duga otpora četiri kratka. Raspoređeni su da čine četiri paralelna para traka, od čega su dva para u neposrednoj blizini na sredini senzora dok su druga dva smještena po rubovima. Električna struja koja prolazi kroz otpornike uzrokuje razliku temperature između centra i ruba uzorka čime se stvara izlazni signal i računa se toplinska vodljivost. Uređaj je prikazan na slici 15.

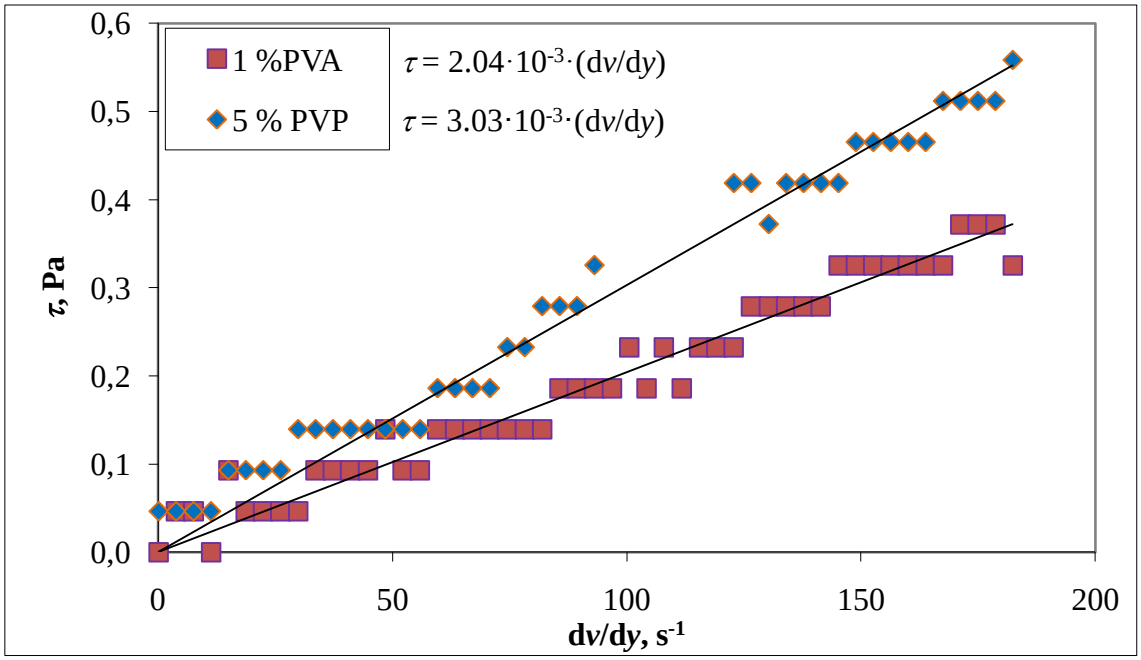
Slika 15. Uređaj za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti

4. REZULTATI

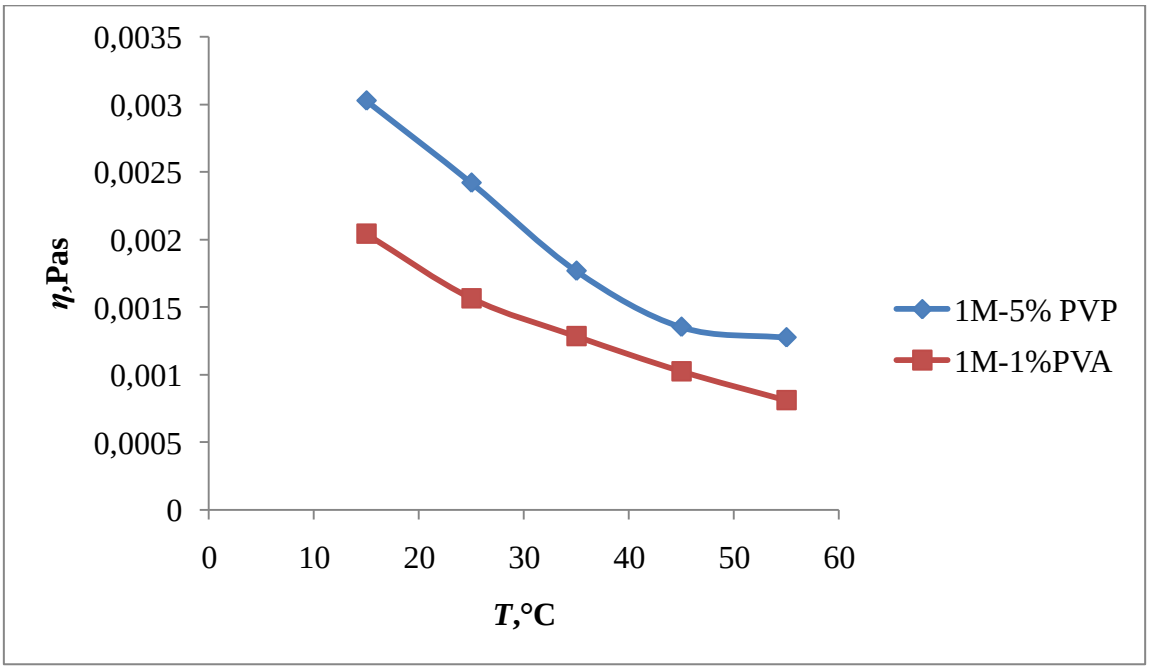
4.1. Viskoznost



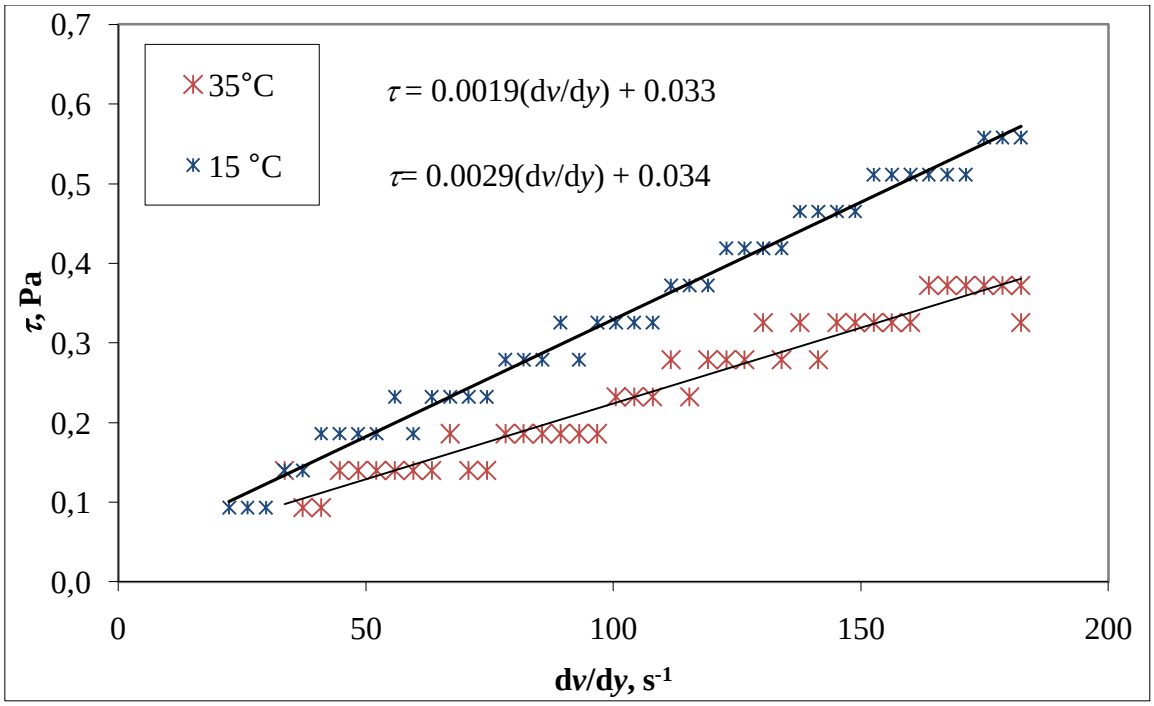
Slika 16. Promjena viskoznosti nanofluida pri različitim volumnim udjelima Al_2O_3 (0.5,1.0,1.5 vol %) sa temperaturom.



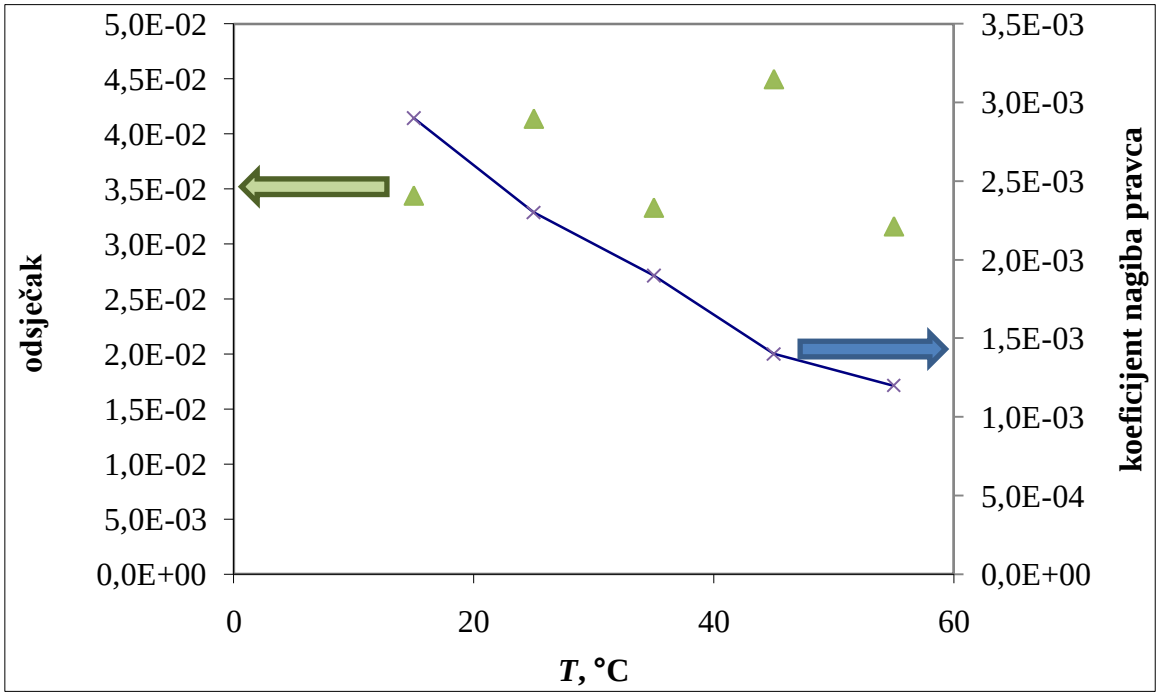
Slika 17. Ovisnost smičnog naprezanja o smičnoj brzini za uzorak 1M uz dodatak 1.0 mas % PVA, odnosno 5.0 mas % PVP na 15 °C.



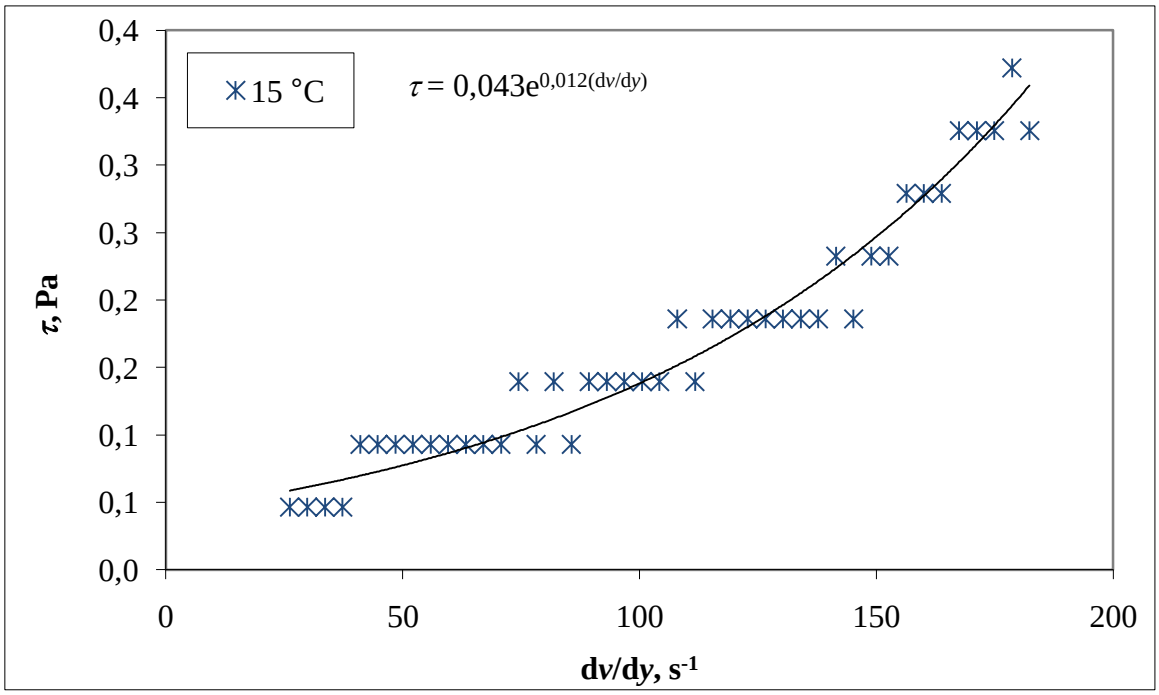
Slika 18. Promjena viskoznosti nanofluida s dodanim aditivima (1.0 mas % PVA i 5.0 mas% PVP) sa temperaturom.



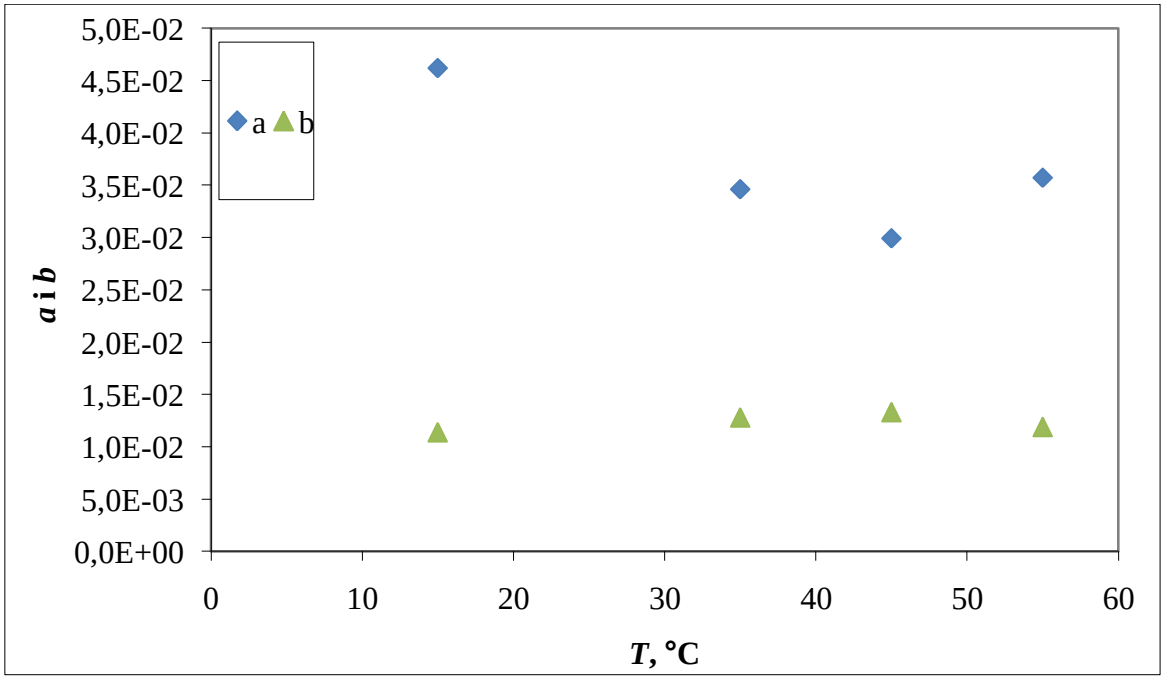
Slika 19. Promjena smične naprezanja sa smičnom brzinom –za 1M uzorak s dodatkom AG (2.5 mas%) za 15 i 35 °C.



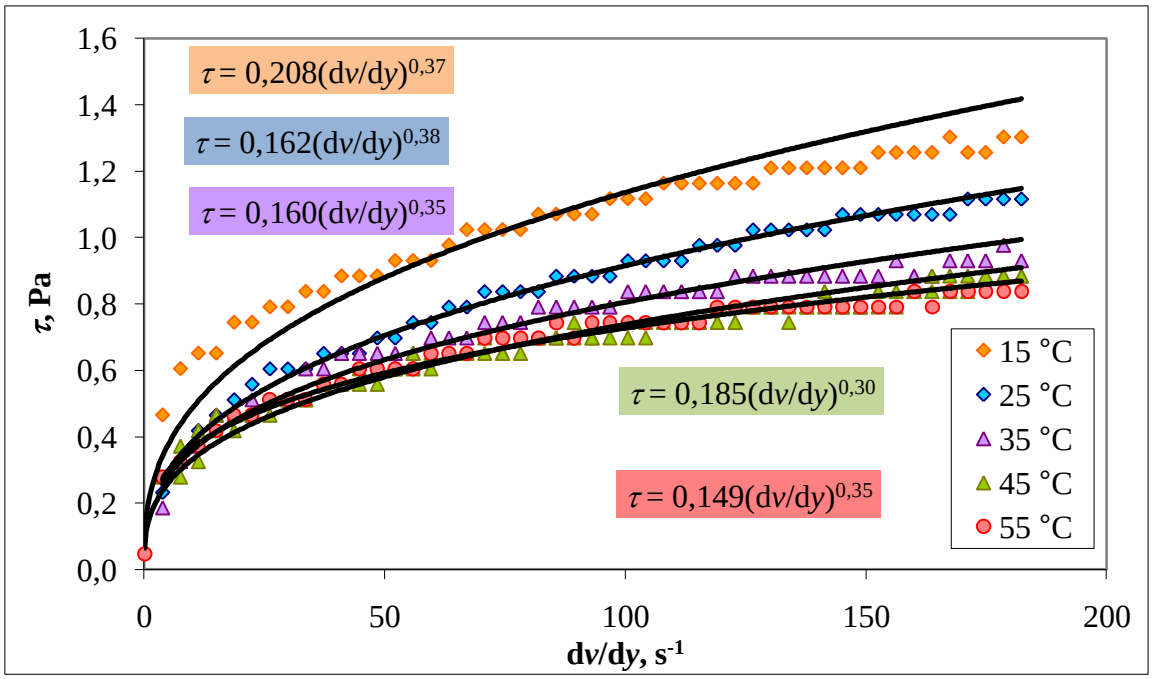
Slika 20. Ovisnost nagiba i odsječka aproksimacijskog pravca sa temperaturom.



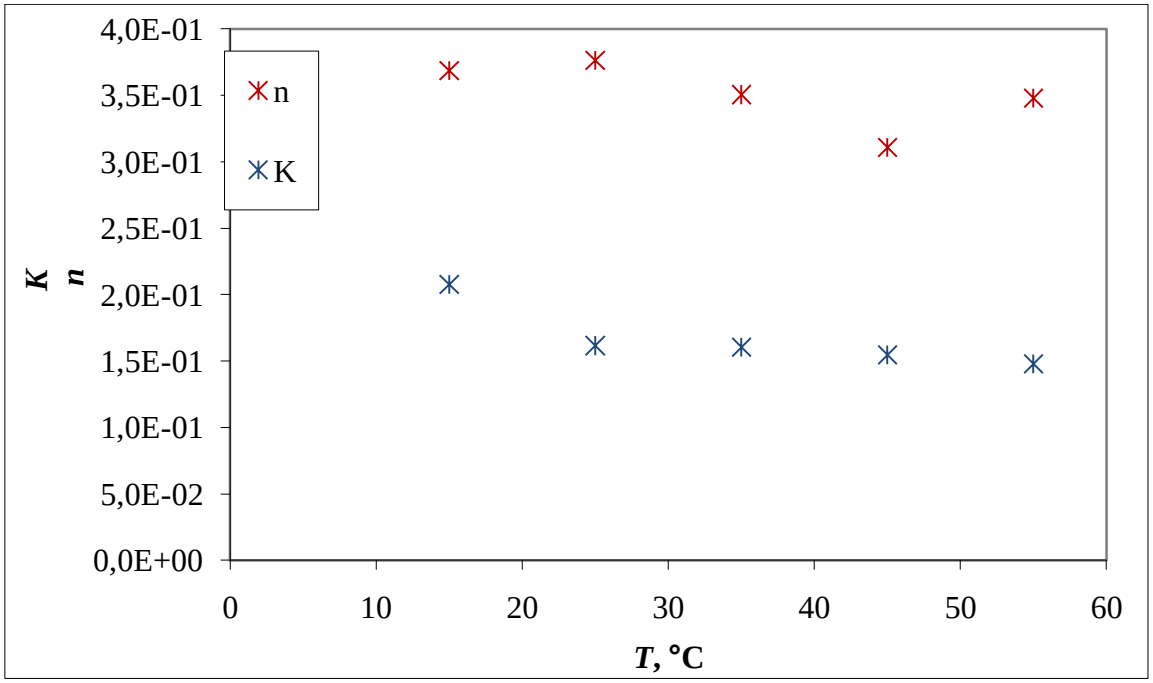
Slika 21. Promjena smičnog naprezanja sa smičnom brzinom –za 1M uzorak s dodatkom CTAB (0.0132 mas%) za 15 °C.



Slika 22. Ovisnost parametara reološke jednadžbe kojom se opisuje ovisnost τ=f(dv/dy) sa temperaturom.



Slika 23. Promjena smičnog naprezanja sa smičnom brzinom –za 1M uzorak s dodatkom SDS (0.1 mas%).

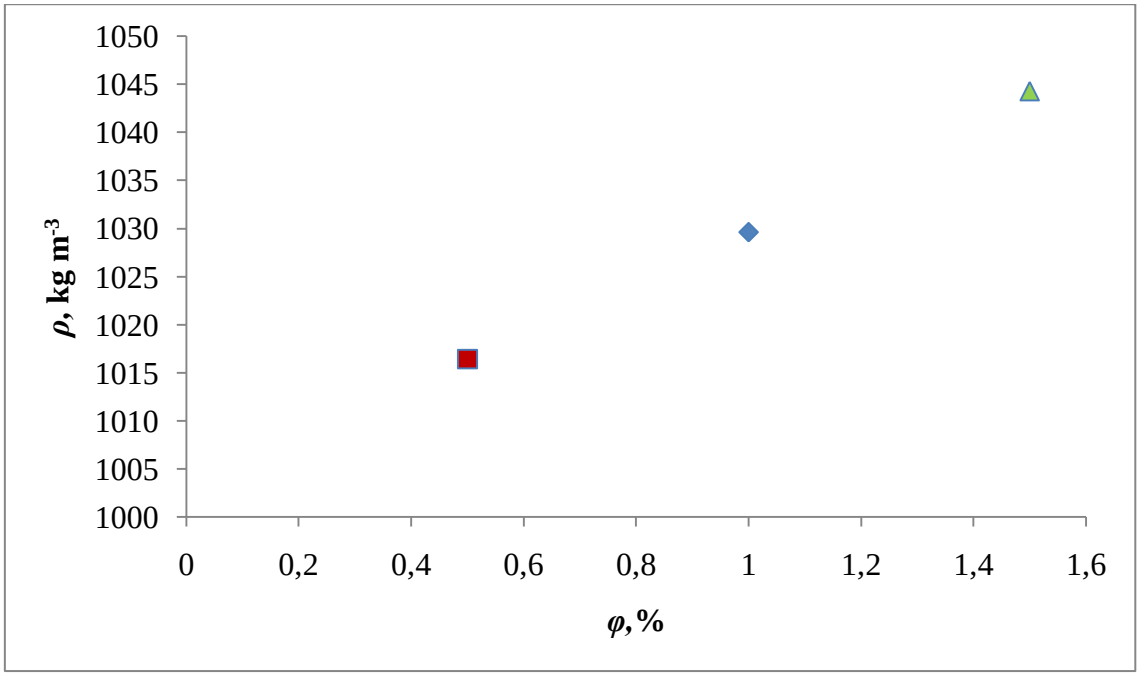


Slika 24. Ovisnost parametara (indeks ponašanja toka i indeks konzistencije) reološke jednadžbe kojom se opisuje ovisnost τ=f(dv/dy) sa temperaturom.

4.2. Gustoća

Tablica 3. Izmjerena gustoća nanosuspenzija pri različitim volumnim udjelima Al_2O_3 (0.5,1.0,1.5 vol %) na sobnoj temperaturi.

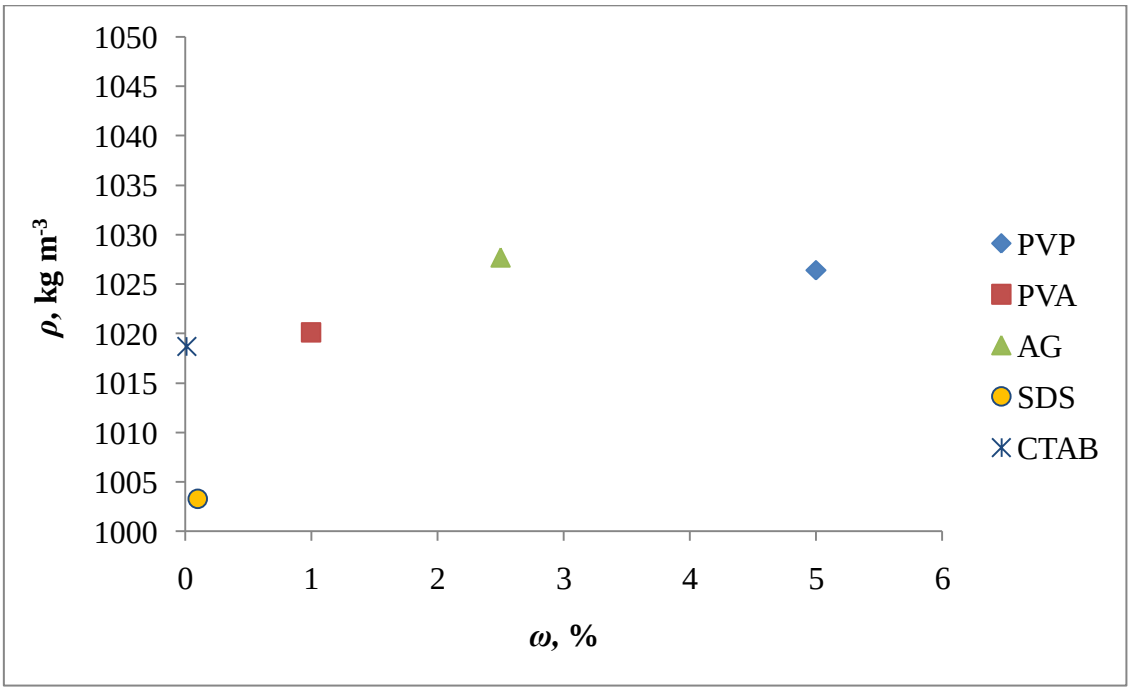
φ,%	0.5	1.0	1.5
ρ, kg m^{-3}	1016.4	1029.6	1044.3



Slika 25. Promjena gustoće nanofluida s volumnim udjelom nanočestica izmjerenih na sobnoj temperaturi

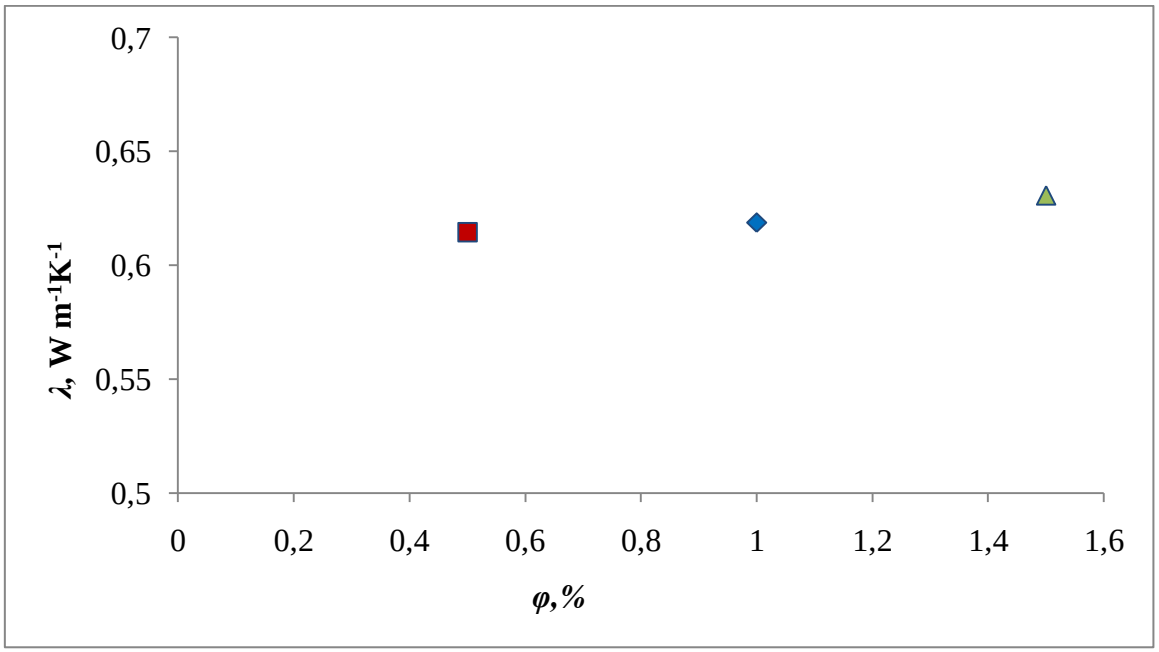
Tablica 4. Izmjerena gustoća nanosuspenzija s dodanim aditivima na sobnoj temperaturi

aditivi	PVP	PVA	AG	SDS	CTAB
ρ, kg m^{-3}	1026.4	1020.1	1027.7	1003.3	1018.7

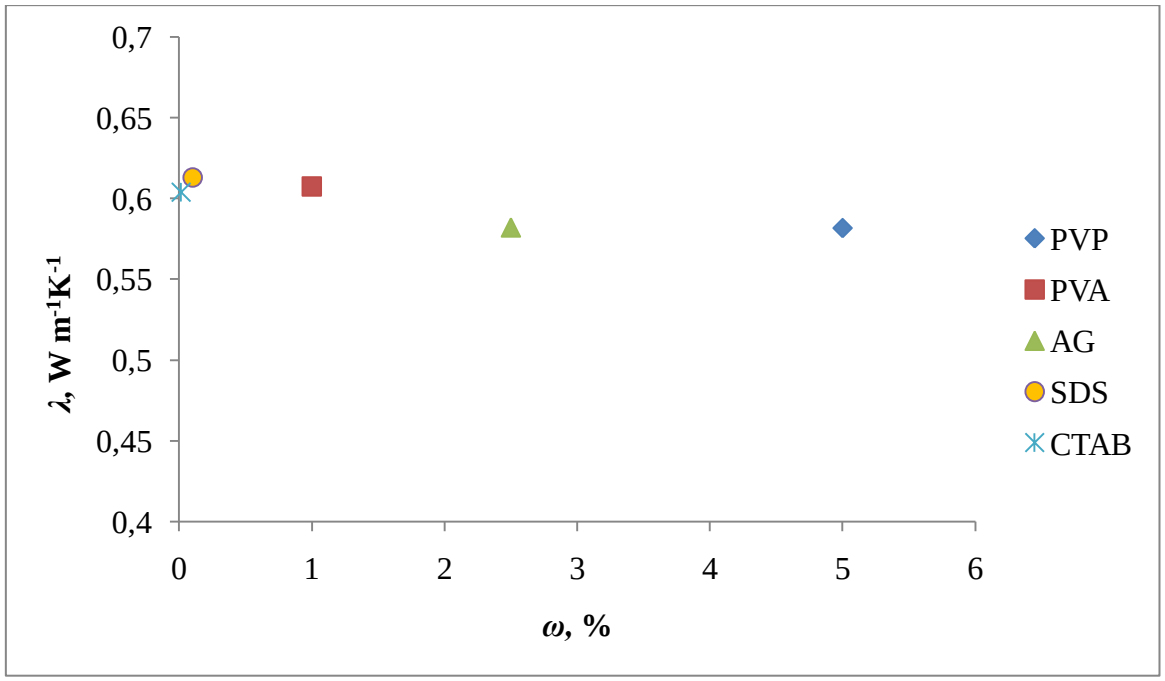


Slika 26. Promjena gustoće nanofluida (s dodanim aditivima) s masenim udjelom izmjerenih na sobnoj temperaturi

4.3. Koeficijent toplinske vodljivosti

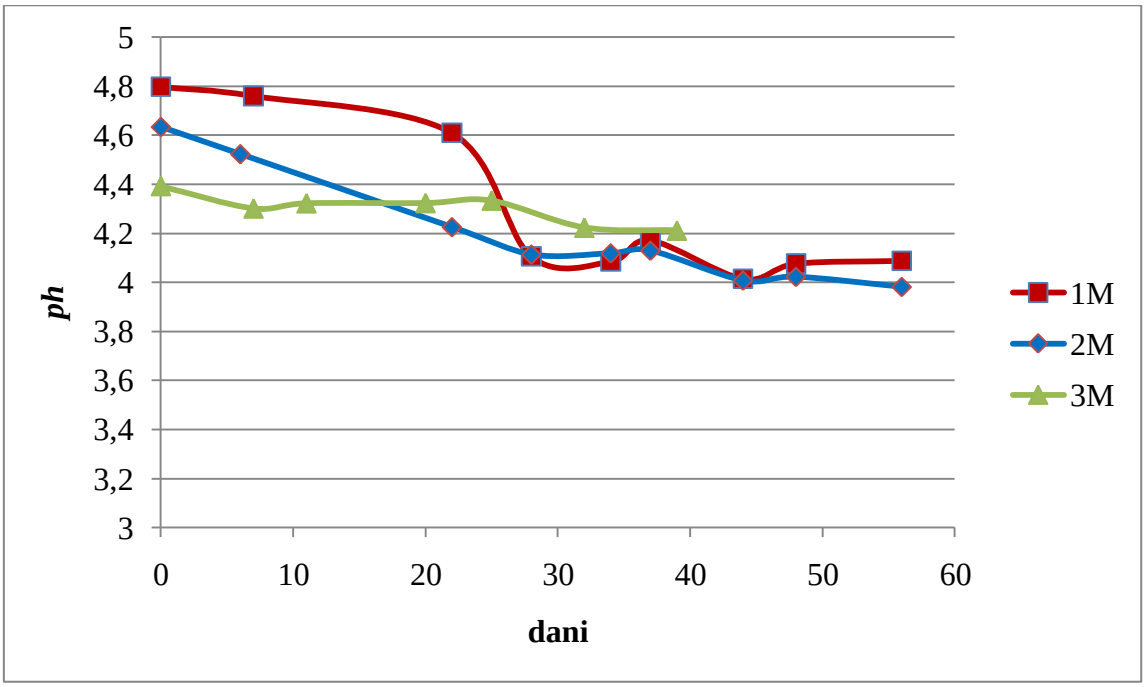


Slika 27. Promjena koeficijenta toplinske vodljivosti nanosuspenzija različitih volumnih udjela Al_2O_3(0.5, 1.0, 1.5 vol %)

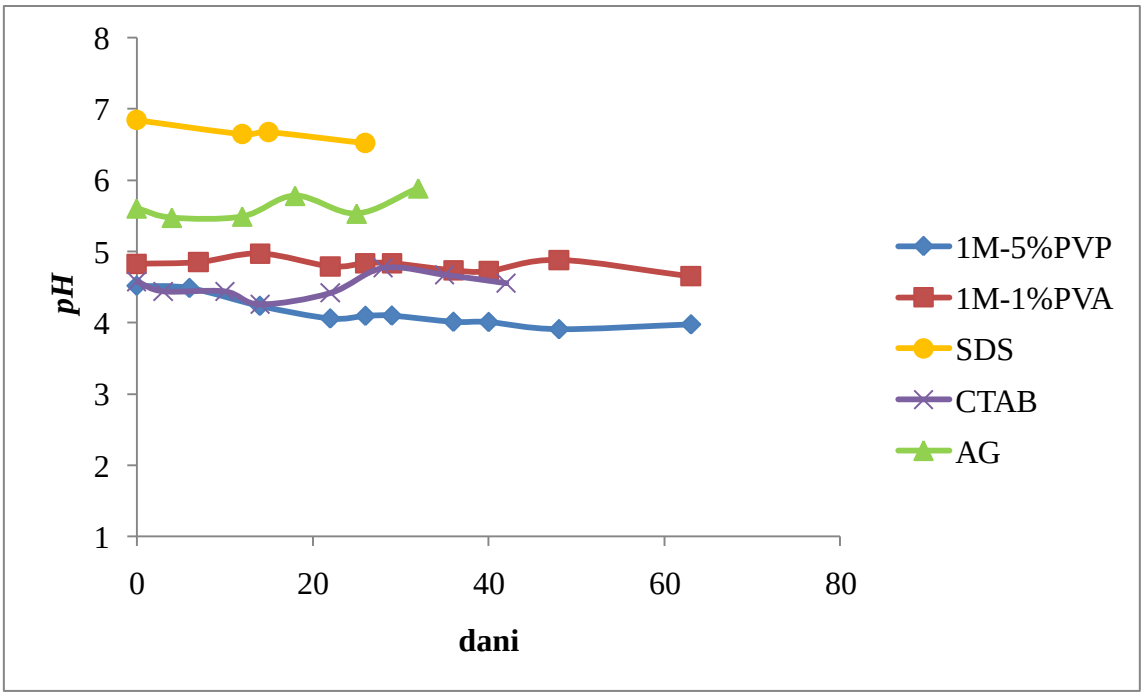


Slika 28. Promjena koeficijenta toplinske vodljivosti nanosuspenzija (s dodanim aditivima) s masenim udjelom

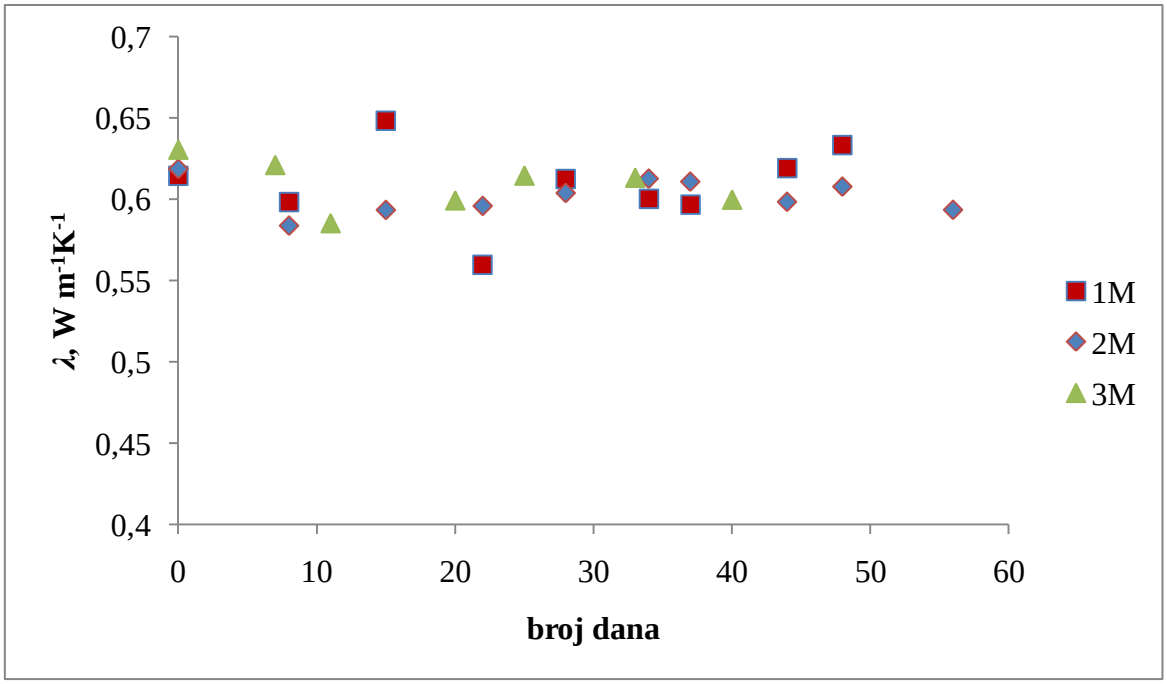
4.4. Određivanje stabilnosti pripravljenih uzoraka



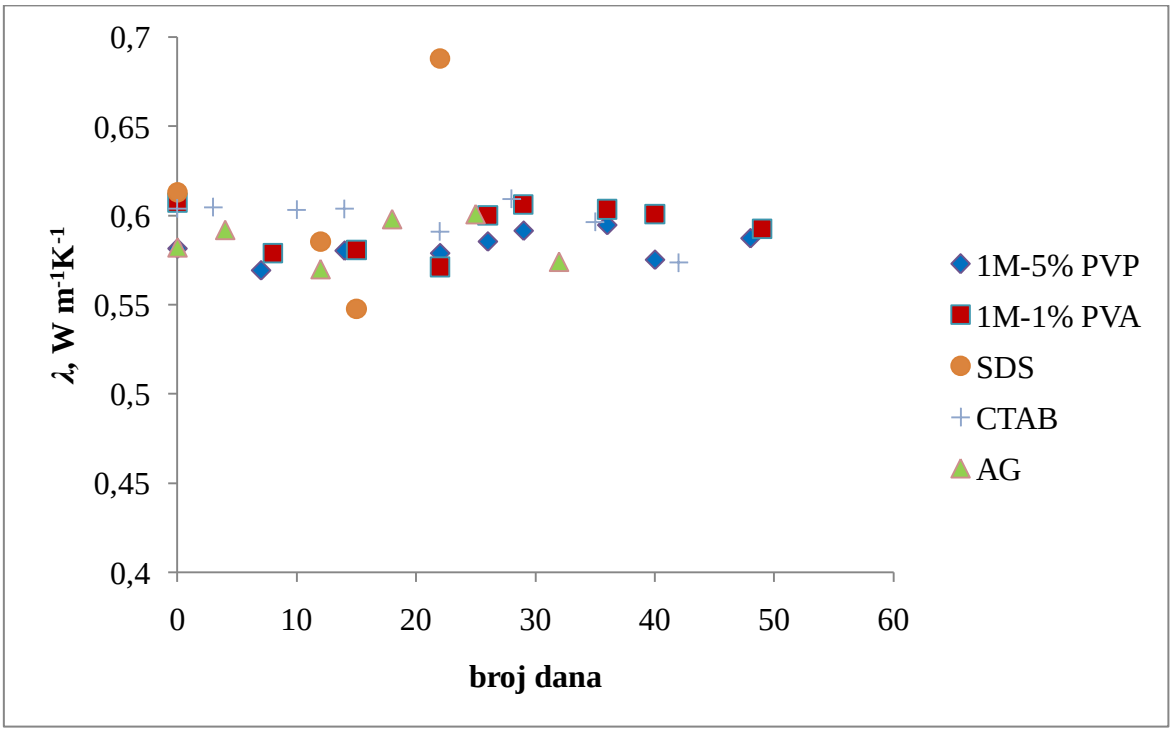
Slika 29. Promjena pH vrijednosti nanosuspenzija s danima



Slika 30. Promjena pH vrijednosti nanosuspenzija s dodanim aditivima po danima



Slika 31. Promjena koeficijenta toplinske vodljivosti nanosuspenzija ovisno o volumnom udjelu nanočestica po danima



Slika 32. Promjena koeficijenta toplinske vodljivosti nanosuspenzija s dodanim aditivima po danima

5. RASPRAVA

Kako bi povećali učinkovitost procesa prijenosa topline korištenjem nanofluida u ovom radu istraživano je toplinsko i reološko ponašanje nanofluida. Kao bazna otopina korištena je demineralizirana voda u kojoj su zatim dispergirane nanočestice Al_2O_3 u volumnim udjelima od 0.5, 1.0 i 1.5 %. U uzorak 1M (0.5 vol % Al_2O_3 u baznoj otopini) dodavani su aditivi (PVP, PVA, AG, CTAB, SDS). Aditivi su dodavani u različitim masenim omjerima, a udjeli su određeni prema literaturi. Za samu pripremu nanofluida bio je potreban ultrazvučni homogenizator kojemu je suspenzija nanofluida bila izložena 20 minuta radi boljeg dispergiranja čestica.

Kako je primjena nanofluida povezana sa tečenjem, važno je odrediti reološko ponašanje i viskoznost nanofluida. Na slici 16. prikazana je promjena viskoznosti nanofluida različitih udjela nanočestica s temperaturom, vidljivo je da se viskoznost za sve uzorke smanjuje s povećanjem temperature jer gibanje pri povišenoj temperaturi smanjuje privlačne međumolekulske sile. Nadalje, viskoznost se povećava s povećanjem udjela nanočestica u kapljevini. Naime, utvrđeno je da se dodatkom i raspršivanjem nanočestica u baznom fluidu povećava uređenost sustava te zbog toga povećava viskoznost nanofluida. Manje odstupanje vidljivo je za masene udjele 0.5 i 1.0 %. Kako su razlike u viskoznosti male, moguće je da nedovoljna dispergiranost nanočestica u baznom fluidu utječe na viskoznost. Upravo veličina dispergiranih čestica je ključni parametar o kojem ovise ispitivana termo-fizikalna svojstva. Nanofluidi pripremljeni bez dodatka površinskih aktivnih tvari ponašaju se kao Newtonski fluidi.

Na slici 17. prikazan je reološki dijagram (ovisnost smičnog naprezanja o smičnoj brzini) za uzorak 1M sa dodatkom 1.0 mas % PVA i 5.0 mas% PVP pri temperaturi od 15 °C. Vidljiva je linearna ovisnost smičnog naprezanja o smičnoj brzini, $\tau = f(dv/dy)$ što ukazuje da su nanofluidi pripravljeni uz dodatak ovih polimera, također Newtonski. Njihova viskoznost, također pada sa povišenjem temperature, a fluid s 1.0 % PVA je manje viskozan pri istoj temperaturi suspenzije (slika 18,). Razlog tomu je vjerojatno manji udio polimera u suspenziji.

Na slikama 19. do 24. prikazan je način određivanja viskoznosti za istu koncentraciju suspenzije 0.5 vol% nanočestica, ali uz dodatak površinski aktivnih tvari (AG, CTAB ili SDS). Ono što je uočljivo iz grafova (19., 21. i 23.) koji pokazuju ovisnost $\tau = f(dv/dy)$ da

pripravljeni nanofluidi ne pokazuju newtonska svojstva. Kod nanofluda dobivenog uz dodatak AG (slika 19.) ovisnost smičnog naprezanja o smičnoj brzini je linearna, ali pravac ne prolazi kroz ishodište. Nagib pravca smanjuje se sa sniženjem temperature, a odsječak na osi *y* ne mijenja se znatno. Za nanoflud uz dodatak 1.0 mas % CTAB, ovisnost je opisana eksponencijalnom jednadžbom (slika 21.). Na slici 22. prikazana je ovisnost koeficijenata aproksimacijske jednadžbe o temperaturi. Koeficijent *a* se smanjuje s temperaturom, dok koeficijent *b* ne ovisi o temperaturi. Dodatkom 1.0 mas% SDS-a u nanofluid, ovisnost τ=f(d*v*/d*y*) se može opisati potencijskom krivuljom (slika 23.) što ukazuje da je dobiveni nanofluid pseudoplastični (indeks ponašanja toka, n<1). Na slici 24. prikazana je ovisnost indeksa ponašanja toka i indeksa konzistencije sa povišenjem temperature. Vidljivo je da oba indeksa pokazuju lagano smanjenje sa povišenjem temperature.

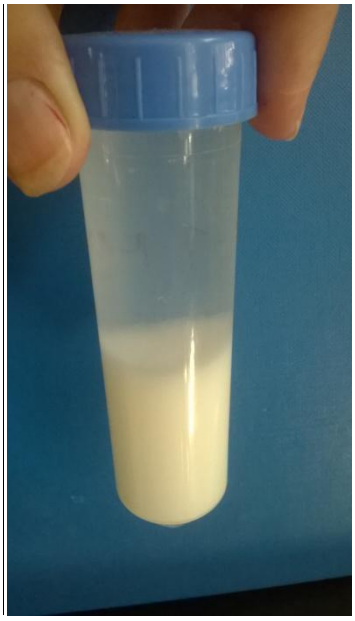
Dakle, općenito se može zaključit da se viskoznost smanjuje s povišenjem temperature te da dodatak površinski aktivnih tvari mijenja reološko ponašanje nanofluida u odnosu na nanofluide pripravljene bez aditiva ili sa ispitanim polimerima. Do toga dolazi zbog mijenjanja međučestičnog djelovanja između nanočestica te nanočestica i bazne kapljevine. Također, može se pretpostaviti da površinski aktivne tvari utječe i na *Brownovo* gibanje nanočestica.

Povećanjem volumnog udjela nanočestica raste i gustoća nanofluida što je vidljivo iz tablice 3. i slike 25. Iz tablice 4. vidljivo je da najveću izmjerenu gustoću ima nanofluid s dodanim aditivom AG (Arapska guma) iza njega slijedi PVP, a najmanju ima nanosuspenzija s SDS-om. U primjeni nanofluida u izmjenjivačima topline poželjno je što manje povećanje viskoznosti i gustoće u odnosu na bazni fluid zbog što manjeg pada tlaka (gubitaka energije) u sustavu. Međutim, između ostalog, zbog *Brownovog* gibanja raspršenih nanočestica u kapljevini povećava se gustoća i viskoznost nanofluida.

Na slikama 27. i 28. prikazana je vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti u ovisnosti s volumnim udjelom nanočestica u suspenziji, odnosno masenim udjelom aditiva. Vrijednost koeficijenta se povećava s volumnim udjelom nanočestica, a smanjuje s većom masom dodanih aditiva. Razlog je razlika vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti dodatne komponente od bazne kapljevine, odnosno viši koeficijent toplinske vodljivosti nanočestica te niža vrijednosti aditiva.

Kako bi se definirala stabilnost pripravljenih nanosuspenzija, osim vizualnog praćenja suspenzija, mjerena je i njihova *pH* vrijednost te promjena koeficijenta toplinske vodljivosti kroz duži vremenski period.

Na slici 29. prikazana je promjena *pH* vrijednosti suspenzija za tri koncentracije nanočestica, 0.5, 1.0 i 1.5 vol % Al_2O_3 Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je Al_2O_3 suspenzija bez dodatka aditiva stabilna u kiselom području pri *pH* vrijednostima od 3.981 do 4.634. *pH* suspenzije se smanjuje s povećanjem količine dodanog Al_2O_3. Vrijednost *pH* pada s vremenom, a najmanje promjene *pH* vrijednosti pokazuje suspenzija sa 1.5 vol % Al_2O_3. Iz toga se može zaključiti da se povećanjem udjela Al_2O_3 dobiva stabilnija suspenzija, barem za područje ispitanih koncentracija. Slika 30. prikazuje promjenu *pH* vrijednosti za suspenzije s dodanim aditivima. Nekim suspenzijama je povećana vrijednost *pH* (SDS, AG i PVP), a nekima smanjena (PVP i CTAB) u odnosu na vrijednost nanosuspenzije bez aditiva. Općenito se može zaključiti da je stabilnost povećana za sve dodane aditive, osim SDS-a. Naime dodatkom 0.1 mas % SDS-a, došlo je do sedimentacije nanočestica i pojave bistre zone nakon samo 10 dana (slika 33.).



Slika 33. Sedimentacija nanosuspenzije s SDS-om

Ove zaključke potvrđuje i promjena toplinske vodljivosti u vremenu za sve pripravljene uzorke. Na slikama 31. i 32. prikazana je promjena koeficijenta toplinske vodljivosti nanosuspenzija po danima. Iz slika je vidljivo da nanosuspenzije bez aditiva pokazuju veća odstupanja i promjene toplinske vodljivosti nego što je to na slici 32.

6. ZAKLJUČAK

Kako bi se pripravio stabilni nanofluid potrebno je odabrati aditive koji će omogućiti dobru raspršenost nanočestica te povećati stabilnost nanosuspenzije. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva određivana su suspenzijama sa i bez aditiva. Za stabilizaciju nanosuspenzija korišteni su različiti aditivi u različitim masenim omjerima. Pripravljenim suspenzijama određivana su termo-fizikalna svojstva.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da se viskoznost smanjuje s povećanjem temperature i smanjenjem koncentracije nanočestica u suspenziji. Dodatak polimera (PVA i PVP) ne mijenja reološko ponašanje dobivenih nanosuspenzija, dok dodatkom površinski aktivnih tvari dolazi do promjene iz newtonskih u nenewtonske fluide. Povećanjem volumnog udjela nanočestica raste i gustoća nanofluida te dolazi do povećanja toplinske vodljivosti. Dodatak aditiva smanjuje toplinsku vodljivost nanofluida.

Stabilnost suspenzija provjerena je sedimentacijskim testom te praćenjem *pH* vrijednosti suspenzije kao i promjene koeficijenta toplinske vodljivosti s vremenom. Poboljšanje stabilnosti postiže se povećanjem volumnog udjela Al_2O_3, te dodatkom aditiva.

Na temelju svih rezultata može se zaključiti da nanofluidi s dodanim aditivima postaju stabilniji od nanosuspenzija bez aditiva, međutim aditivi smanjuju toplinsku vodljivost, povećavaju gustoću i viskoznost te u nekim slučajevima mijenjaju reološko ponašanje suspenzije.

Najboljim aditivom pokazao se PVA koji ne mijenja reološko ponašanje, a viskoznost i gustoća pripravljenog nanofluida neznatno se povećavaju u odnosu na nanofluid iste koncentracije bez aditiva. Toplinska vodljivost nije smanjena, a stabilnost je zadovoljavajuća.

7. POPIS SIMBOLA

c_p specifični toplinski kapacitet nanofluida, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

g gravitacijsko ubrzanje, $m \cdot s^{-1}$

K indeks ponašanja toka, -

m masa, kg

n indeks ponašanja toka, -

r promjer čestice, m

V volumen, m^3

v brzina sedimentacije čestica, $m \cdot s^{-1}$

ρ gustoća nanofluida, $kg \cdot m^{-3}$

η dinamička viskoznost, Pa·s

φ volumni udio, -

λ toplinska vodljivost, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

INDEKSI

f – fluid

l – kapljevina

nf – nanofluid

p - čestice

8. LITERATURA

1. Suhaib Umer Ilyas,Rajashekhar Pendyala, Narahari Marneni, Preparation, Sedimentation, and Agglomeration of Nanofluids, Chemical Engineering Technology 2014, 37 (12), 2011-2021.

2. Dan Hogan ,Science Daily, Nanoparticles, http://www.sciencedaily.com, 6.8.2015.

3. Christina Raab, Myrtill Simko, Ulrich Fiedeler, Michael Nentwich, Andre Gazso (2011), Production of nanoparticles and nanomaterials, Nano trust dossiers , (006),1-4. http://www.musiklexikon.ac.at:8000/buecher/Organisationseinheiten/_id10508e_/NanoTrust-Dossiers/006en-NanoTrust-Dossier.pdf [2.8.2015.]

4. Paul Holister, Jan-Willem Weener, Cristina Roman Vas, Tim Harper (2003), Nanoparticles, Technology White Papers nr. 3, Cientifica, (3), 1-11. http://www.nanoparticles.org/pdf/Cientifica-WP3.pdf [2.8.2015.]

5. http://www.understandingnano.com, 6.8.2015.

6. Mislav Mustapić, Damir Pajić, Nikolina Novosel, Emil Babić, Krešo Zadro, Joseph Horvat, Marina Cindrić, Željko Skoko, Andrey Shcherbakov, Mirjana Bijelić, Sinteza, strukturna i magnetska karakterizacija nanočestica tipa željezo-borida s i bez silikatnog oklopa, http://www.phy.pmf.unizg.hr, 1.8.2015.

7. Pramod Warrier, Yanhui Yuan, Michael P. Beck, and Amyn S. Teja, Heat Transfer in Nanoparticle Suspensions:Modeling the Thermal Conductivity of Nanofluids, American Institute of Chemical Engineers 2010, 56(12), 3243-3256.

8. Amirhossein Zamzamian, Shahin Nasseri Oskouie, Ahmad Doosthoseini, Aliakbar Joneidi, Mohammad Pazouki, Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al_2O_3/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow, Experimental Thermal and Fluid Science 2011, 35(3), 495-502.

9. Sayantan Mukherjee, Somjit Paria, Preparation and Stability of Nanofluids-A Review, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2013, 9(2), 63-69.

10. Cherng- Yuan Lin, Jung-Chang Wang, Teng-Chieh Chen, Analysis of suspension and heat transfer characteristics of Al_2O_3 nanofluids prepared through ultrasonic vibration, Applied Energy 2011, 88(12), 4527-4533.

11. H.A. Mohammed, G. Bhaskaran, N.H. S huaib, R.Saidur, Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011, 15(3), 1502-1512.

12. Khali Khanafer, Kambiz Vafai, A crtical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, International Journal of Hear and Mass Transfer 2011, 54(19-20), 4410-4428.

13. Wang Xian-Ju, Li Hai, Li Xin-Fang, Wang Zhou-Fei, Lin Fang, Stability of TiO_2 and Al_2O_3 Nanofluids, Chin.Phys. Lett. 2011, 28 (8), 1-4.

14. https://www.wikipedia.org, 7.8.2015.

15. Bhagat UK, More PV and Khanna PK, Study of Zinc Oxide Nanofluids for Heat Transfer Application, SAJ Nanoscience and Nanotechnology 2015, 1(1), 1-7.

16. Michal Drzazga, Grzegorz Dzido, Marcin Lemanowicz, Andrzej Gierczycki, Influence of nonionic surfactant on nanofluid properties, 14th European Conference on Mixing Warszawa, 10-13 September 2012, 89-94.

17. Arun Kumar Nayak, Manas Ranjan Gartia, and P.K. Vijayan, Nanofluids: A Novel Promising Flow Stabilizer in Natural Circulation Systems, American Institute of Chemical Engineers, 2009, 55 (1), 268-274.

ŽIVOTOPIS

Osobni podaci: Marija Ždrakić

Dragutina Lermana 19, Velika

Telefon: 034/233-069

E-mail: m.zdrakic@gmail.com

Datum i mjesto rođenja: 03.08.1992., Požega

Obrazovanje:

2011. – 2015. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb

Smjer Ekoinženjerstvo

2007. – 2011. Opća gimnazija, Požega

Osobne vještine i sposobnosti:

Strani jezici: Engleski jezik (aktivno u govoru i pismu)

Računalne vještine: Microsoft Office paket, Matlab i Scientist

Socijalne vještine: sklonost timskom radu, odgovorna, komunikativna, izgrađene radne navike