Primjena nanofluida u pločastom izmjenjivaču topline

Samardžija, Marina

Master's thesis / Diplomski 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:149:425651

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Marina Samardžija

PRIMJENA NANOFLUIDA U PLOČASTOM IZMJENJIVAČU TOPLINE

DIPLOMSKI RAD

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

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc., Jasna Prlić Kardum,
prof. dr. sc., Aleksandra Sander,
prof. dr. sc., Ljubica Matijašević

Zagreb, rujan 2015.

SAŽETAK

U smjesu fluida (voda i glicerol) dispergirane se nanočestice aluminijeva (III) oksida (Al_2O_3), u različitim koncentracijama sa i bez stabilizatora, sa ciljem poboljšanja toplinske vodljivosti. Nakon postizanja stabilnosti suspenzija različitih koncentracija, određeno je njihovo reološko ponašanje, izmjereni su koeficijenti toplinske vodljivosti te specifični toplinski kapacitet pripravljenih nanofluida. Uspoređeni su različiti teoretski modeli sa eksperimentalno dobivenim vrijednostima termo –fizikalnih svojstava nanofluida.

Primjenom nanofluida u pločastom izmjenjivaču topline izračunat je koeficijent prijelaza i prolaza topline, te djelotvornost pločastog izmjenjivača topline pri različitim protocima. Također, mjerenja su provedena s fluidom u koji je dodan stabilizator Tween 20. Ovaj stabilizator izabran je kao najbolji između testiranih (arapska guma i Triton X100)

Reometrijskim mjerenjem utvrđeno je da nanofluidi pokazuju newtonovska svojstva s neznatnim povećanjem gustoće i viskoznosti u odnosu na bazni fluid. Koeficijent prijelaza topline poboljšavaju se s poboljšanjem hidrodinamičkih uvjeta u izmjenjivaču topline. Postignuta iskorištenja u izmjenjivaču topline su visoka, a smanjuju se pri većim protocima toplog fluida te povećanjem koncentracije nanočestica.

Vrijednosti eksponenata *m* u korelacijskim jednadžbama dobivenih korištenjem nanofluida povećana su u usporedbi s vrijednostima dobivenih za vodu pri laminarnim uvjetima strujanja.

Ključne riječi: koeficijent prijelaza topline, korelacijske jednadžbe, nanofluid, pločasti izmjenjivač topline, stabilizatori

SUMMARY

Aluminium III oxide (Al_2O_3) nanoparticles have been dispersed into the mixture of a fluid (water and glycerol) in different concentrations with or without the stabilitator with the aim to improve thermal conductivity. Having achieved the stability of suspensions of different concentrations, the rheological behaviour of the prepared nanofluids has been determined, and coefficient of thermal conductivity also as the specific heat capacity have been measured. Different theoretical models have been compared with the experimentally obtained values of thermo-physical properties of nanofluids.

By applying nanofluids in the plate heat exchanger the heat transfer coefficient and overall heat transfer coefficient have been calculated as well as the efficiency of the plate heat exchanger at different flows. Likewise, measurements have been carried out with the fluid which contains Tween 20 stabilitator. This stabilitator has been selected as prime among the tested samples. (Arab rubber and Triton X100)

Rheometrical measurement has affirmed that nanofluids indicate Newton's behaviour with slight increase in density and viscosity comparing to the base fluid. Improving of hydrodynamic conditions in the heat exchanger leads to heat transfer coefficient increasing. The achieved efficiency in the heat exchanger is high, being diminished at higher flows of hot fluid and with the increase of nanoparticles concentration.

By comparison with the values obtained for water in laminar flow conditions, values of *m* exponents in the correlation equations obtained for nanofluids have been increased.

Keywords: correlation equations, heat transfer coefficient, nanofluid, plate heat exchanger, stabilitators

"Kroz ovo sve me vodi tvoja ruka,da dođem gdje, sam nisam mogao.“

2009. – 2015.

Zahvaljujem svojoj mentorici izv.prof.dr.sc. Jasni Prlić Kardum na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

Hvala svim kolegama i prijateljima bez kojih studij ne bi prošao tako zabavno, a posebno M. V. Najveće hvala mojoj obitelji na razumijevanju i podršci tokom studiranja.

Sadržaj

1. UVOD 1
2. TEORIJSKI DIO 2
2.1. Nanosvijet 2
2.1.1. Nanočestice 3
2.1.2. Nananofluidi 4
2.2. Izmjenjivači topline 8
2.2.1. Lemljeni pločasti izmjenjivači topline 8
2.2.2. Opis geometrije pločastog izmjenjivača topline 9
2.4.5. Efikasnost izmjenjivača topline– *NTU* metoda 10
2.3. FIZIKALNO – TOPLINSKA SVOJSTVA NANOFLUIDA 11
2.3.1. Gustoća 11
2.3.2. Specifični toplinski kapacitet 11
2.3.3. Viskoznost 12
2.4. PROLAZ TOPLINE 14
2.4.1. Koeficijent toplinske vodljivosti 15
2.4.2. Koeficijent prijelaza topline 16
2.4.3. Prandtlova značajka 17
2.4.4. Nusseltova značajka 17
3. EKSPERIMENTALNI DIO 18
3.1. Definiranje svrhe istraživanja 18
3.2. Materijal 18
3.2.1. Nanočestice Al_2O_3 18
3.2.2. Voda 18
3.2.3. Glicerol 19
3.2.4. Stabilizatori 19
3.3. Priprava suspenzija 19
3.3. Uređaji 20
3.3.1. Instrument 3 u 1 – FTN 20
3.3.2. Ultrazvučni homogenizator *Bandelin sonoplus HD 3200* 20
3.3.3. Uređaj za određivanje gustoće - *Mettler toledo densitometer 30PX* 21
3.3.4. Rotacijski reometar *Brookfield DV – III ULTRA* 21
3.3.5. Uređaj za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti - *Transient hot bridge 1* 22
3.4. Aparatura 23
3.5. Metodika proračuna 25
4. REZULTATI 29
4.2. Određivanje stabilnosti i termo-fizikalnih svojstava 30

4.2.1. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva čiste nanosuspenzije 30
4.3.2. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva nanosuspenzije sa stabilizatorom 36
4.4. Rezultati mjerenja u izmjenjivaču topline 39
4.4.1. Rezultati mjerenja s različitim protokom toplog fluida i s konstantnom koncentracijom čestica Al_2O_3 39
4.4.2. Rezultati mjerenja sa stabilizatorom 43
5. RASPARAVA 47
5.1. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva 47
5.1.1. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva čiste nanosuspenzije 47
5.1.2. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva nanosuspenzije sa stabilizatorom 49
5.2. Mjerenja u izmjenjivaču topline 50
5.2.1. Mjerenja s različitim protokom toplog fluida i s konstantnom koncentracijom čestica Al_2O_3 50
5.2.2. Mjerenja sa stabilizatorom 51
6. ZAKLJUČCI 52
7. POPIS SKRAĆENICA I SIMBOLA 53
7. LITERATURA 55
8. ŽIVOTOPIS 57

1. UVOD

Izmjenjivači topline su uređaji koji služe za izmjenu topline između dva ili više fluida, a čija je svrha hlađenje ili grijanje jednog od njih. Njihova primjena je izuzetno rasprostranjena. U kućanstvima izmjenjivače topline susrećemo u sustavima centralnog grijanja (kotlovi, radijatori i sl.), sustavima hlađenja (isparivači, kondenzatori) i sustavima pripreme potrošnje tople vode. Izmjenjivači topline veliku primjenu imaju i u industrijskim postrojenjima i u termoenergetskim postrojenjima.

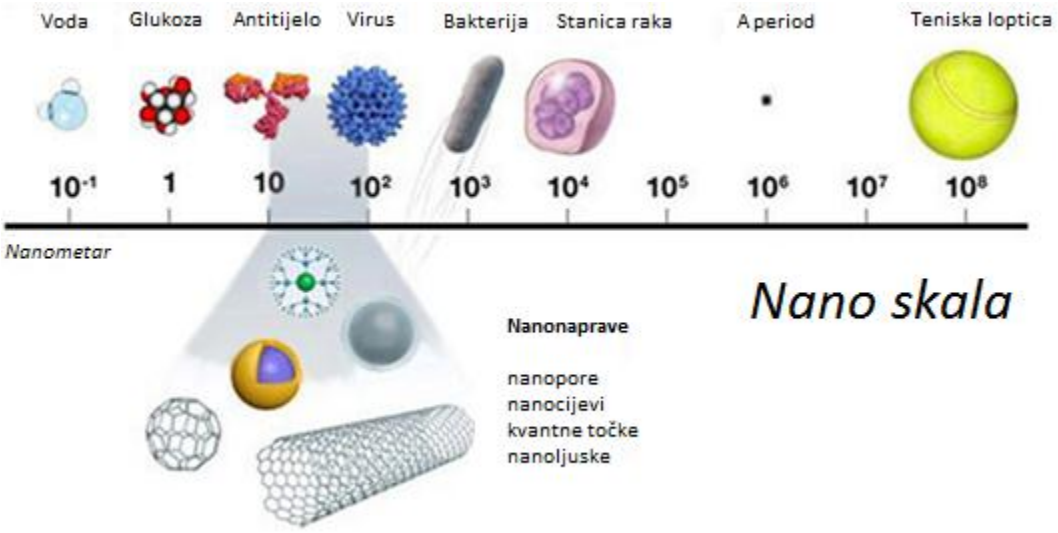
Za prijenos topline koriste se konvencionalni fluidi kao što su voda, etilen glikol, glicerol ili ulje, koji imaju relativno nisku toplinsku vodljivost, te se razvija ideja o poboljšanju njihove toplinske vodljivosti. Ideju raspršivanja čvrstih čestica u tekućinama prvi je dao James Clerk Maxwell [1]. Dodatkom mikro čestica metala u nanosuspenziju došlo je do povećanja toplinske vodljivosti, ali se pojavljuju problemi poput začepljenja, abrazije, velikog pada tlaka te brzog sedimentiranja čestica unutar izmjenjivača topline. Konvencionalni fluidi koji sadrže raspršene ultra fine metalne čestice nazivaju se nanofluidi, te su od posebnog interesa za mnoge istraživače u posljednjih nekoliko godina. Razvojem nanotehnologije moguće je pripraviti materijal koji ima posve drugačija svojstva u odnosu na makro materijal. Nanofluidi pokazali su povećanje koeficijenta toplinske vodljivosti. Osim toga, izbjegnuti su dotadašnji problemi poput začepljenja i abrazije u izmjenjivačima topline.

Pregledom literature, može se zaključiti da nanofluidi posjeduju izuzetna termo-fizikalna svojstva koja su poželjna pri izmjeni topline u mnogim proizvodnim procesima. Iako su nanofluidi pokazali dobra fizikalna svojstva, neki od problema i dalje su prisutni, osobito u području priprave stabilnih suspenzija. Ovaj problem može se riješiti djelovanjem ultrazvuka te dodatkom površinski aktivne tvari koja sprječava stvaranje aglomerata i sedimentaciju čestica. Sljedeći problem koji se javlja je odabir odgovarajućih korelacija. U literaturi postoji niz korelacijskih jednadžbi koje služe za proračun ovisno o geometriji izmjenjivača topline i hidrodinamičkim uvjetima. Stoga je potrebno izabrati korelacijsku jednadžbu kojom će se dobiti točne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u ispitivanim uvjetima. Nadalje, potrebno je izračunati koeficijent prolaza topline te djelotvornost pločastog izmjenjivača topline pri različitim protocima i koncentracijama nanofluida.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. NANOSVIJET

Nano predstavlja veličinu od 10^{-9} metara. Riječ „nano“ znači „patuljak“ te između ostaloga, služi kao kratica za milijarditi dio jednog metra. To je gotovo 100 000 puta manje od presjeka ljudske vlasi i 100 puta manje od veličina koje se danas komercijalno koriste u proizvodnji. Jedan nanometar je poput četiri atoma silicija koji stoje jedan pokraj drugoga. Na toj veličini zrnce prašine veliko je poput planeta. Između makro svijeta, našeg svijeta i nano svijeta jednak je odnos kao između debljine prsta i promjera zemlje [2].



Slika 1. Prikaz skale u nano dimenziji

Tijekom 20.-tog stoljeća potraga za beskrajno malim, nadahnula je mnoge znanstvenike i unijela pravu evoluciju u naš svijet, od računala i nuklearne fizike do biologije i potrage za novim materijalima. Može se reći da je u tijeku nova pustolovina gdje glavnu ulogu igra nanotehnologija i nanoznanost [2].

Nanotehnologija se bavi osmišljavanjem, karakterizacijom, proizvodnjom i primjenom materijala, naprava i sustava koji kontroliraju oblik i veličine na nanoskali. Male i neznatne promjene na nanoskali, odnosno sposobnost kontrole i manipulacije na razini atoma daje mogućnost preciznog stvaranja novih struktura, naprava i sustava koji imaju nova svojstva i funkcije zahvaljujući njihovim malim veličinama. Za nanosvijet kažu da se nalazi između svijeta vidljivog golim okom i svijeta atoma i molekula [3].

2.1.1. Nanočestice

Temeljni sastojak u proizvodnji nanostrukture su nano čestice za koje više ne vrijedi Newtonovi zakoni gibanja, već počinju prevladavati kvantni efekti. To su čvrste čestice, veličina u području od 1 do 100 nm. Svojstva nano-čestica su između makro materijala te atoma ili molekula.

Tablica 1. Prikaz definicija za nanočestice i nano materijale od strane različitih organizacija: Međunarodna organizacija za standardizaciju (*International Organization for Standardization* - ISO), Američko društvo za testiranje i materijale (*American Society of Testing and Materials* - ASTM), Nacionalni institut za sigurnost i zdravlje (*National Institute of Occupational Safety and Health* - NIOSH), Znanstveni odbor za potrošačke proizvode (*Scientific Committee on Consumer Products* - SCCP), Britanska institucija za standarde (*British Standards Institution* - BSI), Savezni zavod na zaštitu na radu (*Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin* . BAuA) [4].

	Nanočestice	Nanomaterijal
ISO	Čestica u rasponu 1-100 nm (promjer).	-
ASTM	Ultrafine čestice čija je barem jedna duljina od 1-100 nm	-
NIOSH	Čestica s promjerom između 1-100 nm, ili vlakna u rasponu rasponu 1-100 nm.	-
SCCP	Barem jedna strana je u nanomjerilu.	Materijal kod kojeg je barem jedna strana ili unutarnja struktura u nanomjerilu.
BSI	Sva područja ili promjeri su u nanomjerilu.	Materijal kod kojeg je barem jedna strana ili unutarnja struktura u nanomjerilu.
BauA	Sva područja ili promjeri su u nanomjerilu.	Materijal se sastoji od nanostrukture ili nano tvari.

2.1.1.1. Sinteza i priprema nanočestica

Posljednjih desetljeća, raznim metodama pokušale su se dobiti nanočestice. Prvi materijal koji se koristio za dobivanje nanofluida su oksidne čestice, jer se lako proizvode i kemijski su stabilne u otopini. Razni istraživači proizveli su Al_2O_3 i CuO nano prah pomoću IGC procesa (*inert-gas condensation process*). Druga metoda je LASER para, disperzijska tehnika koja se koristi za proizvodnju SiC nanočestice iz SiH_4 i C_2H_4. Čista kemijska sinteza je još jedna mogućnost za proizvodnju nanočestica poznate pod nazivom metalni *klaster* [5].

2.1.2. Nananofluidi

Nanofluidi su suspenzije fluida i nano čestica s barem jednom kritičnom dimenzijom od 100 nm [6]. Svrha njihove priprave je poboljšanje prijenosa topline pomoću nanometarske veličine krutih čestica (kao što su metali, legure, keramika, poluvodiči, nanocijevčice) koje su suspendirane u uobičajenim kapljevinama za prijenos topline (kao što je voda, ulja, etilen glikol i smjese) [7].

Grijanje ili hlađenje kapljevine je vrlo važno u mnogim industrijskim područjima, uključujući elektroniku, grijanje, ventilaciju i klimatizaciju, te transporta. Toplinska vodljivost kapljevina igra važnu ulogu u razvoju energetski učinkovite opreme za prijenos topline. Konvencionalne tekućine za prijenos topline imaju relativno slabu toplinsku vodljivost u odnosu na većinu krutih tvari.

Postoje dvije metode priprave nanofluida:

1. U jednom koraku (en. *one – step*) – sinteza nanočestica direktno u tekućinu za prijenos topline.
2. U dva koraka (en. *two – step*) – nanočestice ili nanocijevčice se prvo proizvode u obliku suhog praha, a zatim se u drugom koraku dispergiraju u kapljevinu [1].

2.1.2.1. Obilježja nanofluida

Nanofluidi mogu se smatrati kapljevinama za prijenos topline novog doba jer daju bolje mogućnosti za poboljšanje učinkovitost prijenosa topline u odnosu na čiste kapljevine. Od njih se očekuje da imaju bolja svojstva u usporedbi s konvencionalnom kapljevinama za prijenos topline, kao i kapljevine koje sadrže mikro veličine metalnih čestica. Daljnji razvoj nanofluida koči činjenica da postoje velike razlike u objavljenim rezultatima, do kojih dolazi, vjerojatno zbog loše raspršenosti čestica i karakterizacije suspenzija te nedostatka teorijskog razumijevanja mehanizama.

Kada su čestice ispravno raspršene, tada se od nanofluida očekuju sljedeće prednosti:

1. Veća količina prenesene topline – velika površina naončestica omogućuje veći prijenos topline. Čestice sitnije od 20 nm mogu nositi 20% svojih atoma na svoju površinu što ih istovremeno stavlja na raspolaganje za toplinsku interakciju. Još jedna

prednost je pokretljivost čestica, što može dovesti do mikro – konvekcije u tekućini i time povećati prijenos topline. Već je utvrđeno da se toplinska vodljivost nanofluida značajno povećava s porastom temperature, koje se mogu pripisati gore navedenom razlogu.

2. Stabilnost – budući da su čestice vrlo male te male masa, vrijeme potrebno da dođe do sedimentacije je relativno dugo. Time se smanjuje glavni nedostatak, prije korištenih mikro -suspenzija, taloženje čestica te se dobiva stabilniji nanofluid.
3. Prolaz bez začepljenja – nanofluidi neće, općenito, biti samo bolji mediji za prijenos topline, već će također biti pogodan za korištenje u mikrokanalima. Korištenje mezo ili mikro čestica nije pogodno jer začepljuju mikrokanale.
4. Manja pojava erozije – zbog male veličine čestica, sudari sa čvrstom stjenkom su puno manji te su manje šanse za pojavu erozije kao npr u izmjenjivaču topline, cjevovodu ili pumpi.
5. Smanjenje snage pumpe – snaga pumpe proporcionalna je s brzinom protoka i padom tlaka. Značajnim povećanjem brzine protoka povećava se i snaga pumpe. Velike uštede u pumpi mogu se postići ukoliko se poveća toplinska vodljivost s malim volumnim udjelom čestica [5].

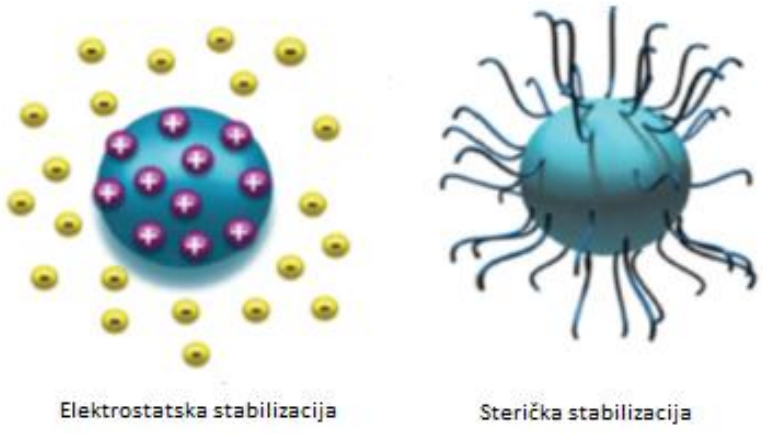
2.1.2.2. Stabilnost nanofluida

Površinski aktivne tvari koje se koriste za stabilizaciju nanofluida također se nazivaju i disperzana sredstva. Dodavanje disperzanata u dvofazni sustava je jednostavan i ekonomski prihvatljiv način za poboljšanje stabilnosti nanofluida. Disperzijska sredstva u malim količinama neće značajno utjecati na površinske karakteristike sustava. Dispergirane čestice mogu prijanjati jedna uz drugu i zajedno formirati agregate, zbog djelovanja gravitacije. Stabilnost znači da čestice ne agregiraju značajnom brzinom. Brzina agregacije općenito se određuje iz učestalost sudara i vjerojatnost nastajanja kohezije tokom sudara. Derjaguin, Verway, Landau i Overbeek (DLVO) su razvili teoriju koja proučava koloidnu stabilnosti. U DLVO teoriji stabilnost čestica u otopini je određena zbrojem van der Waalsovih privlačnih i odbojnih električnih sila koje postoje između čestica koje se međusobno približavaju zbog *Brownovog* gibanja. Ako je privlačna sila veća od odbojne, tada se dvije čestice sudaraju, a suspenzija nije stabilna. Ako čestice imaju dovoljno visoku odbojnost, suspenzije će biti

stabilna. Odbojna sile između čestica moraju biti dominantne kako bi imali stabilan nanofluid ili koloid.

Postoje dva mehanizma da se sile između čestica uravnoteže i time spriječe aglomeraciju.

1. Elektrostatska stabilizacija – postojanje električnog naboja na površini čestica je glavni izvor kinetičke stabilnosti. Elektrostatička stabilizacija nastaje adsorpcijom iona na elektrofilnu metalnu površinu (*Slika 2*.). Adsorpcija stvara dvostruki ili više električnih slojeva što rezultira Coulombovim odbojnim silama između nanočestice.
2. Sterička stabilizacija – postiže se okruživanjem metalnog centara slojevima materijala koji su sterički glomazni, poput polimera i površinski aktivnih tvari. Ovi veliki adsorbati stvaraju prostornu barijeru koja sprječava aglomeraciju metalnih čestica (*Slika 2*.) [8] .



Slika 2. Slikoviti prikaz elektrostatske i steričke stabilizacije

2.1.2.3. Primjena nanofluida

Zbog svojih dobrih toplinskih svojstva nanofluidi se mogu koristiti u mnogim inženjerskim granama od automobilske industrije, medicine, u rashladnim sustavima elektronike do računala [9].

Velike uštede energije i smanjenje određenih emisija plinova ostvarit će se korištenjem nanaofluida. U US industriji, korištenjem nanofluida moguće je očuvati 1 trilijun BTU (*British Thermal Unit*) energije. Američki elektroenergetski sustav koristi nanofluid u zatvorenom ciklusu te time mogu uštedjeti oko 10-30 trilijuna BTU energije godišnje (ekvivalent za godišnju potrošnju energije je od oko 50 000-150 000 kućanstava). Smanjenje

emisija će biti oko 5,6 milijuna tona ugljičnog dioksida, 8600 tona dušičnih oksida, te 21.000 metričkih tona sumporovog dioksida [8].

Kao primjer navodi se firma *Michelin* iz Sjeverne Amerike za proizvodnju gume. Prilikom obrade potrebno je ohladiti gumu. Takav proces zahtijeva više od 2 milijuna galona tekućine za prijenos topline. Cilj *Michelina* u ovom projektu je povećanje produktivnosti od 10% ako se koristi odgovarajući nanofluid.

Brzi razvoj moderne tehnologije znači da će novija elektronika stvarati ogromne količine topline. Time se pogoršava normalan rad elektroničkih uređaja, smanjuje se njihova pouzdanost i očekivani vijek trajanja. U 2007. godini jedan mikročip kod poluvodiča stvarao 330 W/m^2 toplinskog toka, dok je 2011. visoko učinkoviti čip generirao 520 W/m^2 topline. Korištenjem nanofluida moguće je poboljšati sustav hlađenja koji je jedan od najvažnijih problema u projektiranju elektroničkih komponenti [10].

2.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline su jedan od najčešće korištene opreme u procesnoj industriji, koriste se za prijenos topline između dvije procesne struje. Svaki proces koji zahtjeva grijanje, hlađenje ili promjenu faze (kondenzacija ili isparavanje) mora koristit izmjenjivače topline [11].

S obzirom na konstrukciju mogu biti: cijevni, spiralni i pločasti.

Smjer strujanja fluida može biti istostrujni, protustrujni i križni. O njihovoj konstrukciji i izvedbi ovisit će njihova primjena i djelotvornost. Za opis i proračun izmjene topline do koje dolazi u izmjenjivaču topline potrebno je poznavanje načina izmjene topline, kondukcijom, konvekcijom i često radijacijom [12].

2.2.1. Lemljeni pločasti izmjenjivači topline

Pločasti izmjenjivači topline (en. *Plate Heat Exchangers*) uvedeni su prije 80-tak godina, ali se relativno rijetko koriste u kemijskoj industriji. To su izmjenjivači topline koji koriste tehnologiju ploča s više usporednih prolaza za prolaz radnog medija.

Međutim u nekim primjenama pločasti izmjenjivači topline mogu imati bitne prednosti pred cijevnim, npr.:

1. stvarni protustrujni tok
2. brzina prijenosa topline 3-5 puta veća, zbog veće turbulencije
3. propuštanje fluida se lako uočava
4. zauzimaju 50-80% manje prostora
5. potrebno je kraće vrijeme za servisiranje (rastavljanje i sastavljanje)
6. izvedba se lako mijenja dodavanjem ili oduzimanjem novih ploča [12].

Nedostaci ovih izmjenjivača su:

1. ograničeni radni tlak do 1000 kPa
2. u slučaju nečistih fluida relativno lako dolazi do začepljenja
3. nisu pogodni kada dolazi do kondenzacije [11]

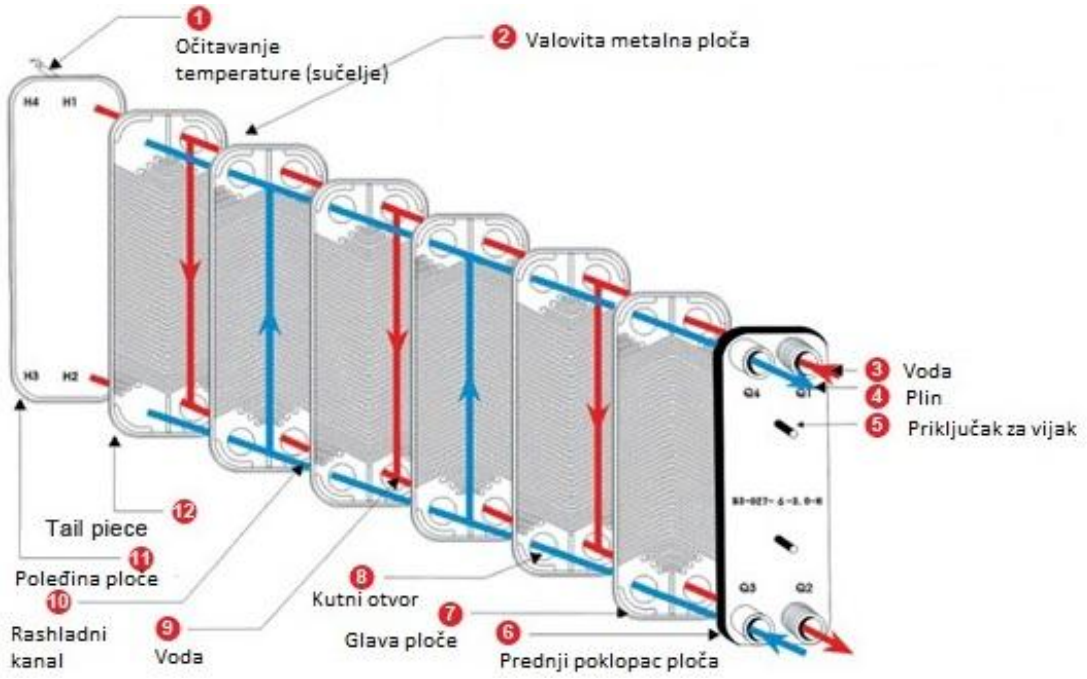
2.2.2. Opis geometrije pločastog izmjenjivača topline

Brtve u izmjenjivaču topline su napravljene od različitih elastomera (EPDM, fluorocarbon) i zbog toga je najviša radna temperatura 250 °C. Razlika temperatura ″toplog″ i ″hladnog″ fluida može biti i do 1 °C (kod cijevnih je oko 5 °C), što omogućuje i do 90% iskorištenja topline, za razliku od cijevnih gdje se ta vrijednost kreće oko 50%.

Konstrukcija ovih izmjenjivača je u obliku riblje kosti ili ribaće ploče i zbog toga će biti veći pad tlaka nego u cijevnom izmjenjivaču. Prednost ovih nabora je u tome što omogućuju veću turbulenciju oba fluida (Re < 500), tj. omogućuju bolji prijenos topline zbog veće površine, a time su manji otpori prijenosa.

Ploče izmjenjivača topline izgrađene su obično od nehrđajućeg materijala: nehrđajući čelik, titan, nikal, *Inkoloy 825*, *Hastelloy C*, bronca, bakar – nikal legure (monel). Oni nisu prikladni za plinove i jako viskozne kapljevine gdje obično dolazi do loše raspodjele fluida u međuprostoru između ploča [12].

Na *slici 3*. je prikazana shema pločastog izmjenjivača topline kroz kojeg topli i hladni fluid prolaze u protustruji.



Slika 3. Protustrujni tok u pločastom izmjenjivaču topline.

2.4.5. Efikasnost izmjenjivača topline– *NTU* metoda

Kod idealnog izmjenjivača topline, izlazna bi temperatura toplijeg fluida bila izjednačena s ulaznom strujom hladnijeg fluida. U tom slučaju prenesena toplina bila bi maksimalna.

Kod stvarnih izmjenjivača, prenesena toplina, Q manja je od maksimalne, pa možemo definirati stupanj efikasnosti ili učinkovitosti izmjenjivača topline. On se može odrediti računski i grafički. Ovdje će se definirati efikasnost samo računski:

$$Q_{stvarno} = C_{min} \cdot \Delta T \tag{1}$$

$$E = 1 - e^{\left(-NTU\left(1-\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right)} \tag{2}$$

Broj jedinica prijenosa topline, *NTU* je mjera veličine izmjenjivača topline, koja je direktno u funkciji površine izmjene topline (geometrijske karakteristike). Hidrodinamičke karakteristike utječu na koeficijent prolaza topline K, i minimalnu vodenu vrijednost, $C_{\min}$. Izmjenjivač topline koji po jedinici volumena ima najveću površinu je dobar izmjenjivač topline [11].

$$NTU = \frac{K \cdot A}{C_{min}} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{lm} \cdot F} \tag{3}$$

2.3. FIZIKALNO – TOPLINSKA SVOJSTVA NANOFLUIDA

Ideju raspršivanja čvrstih čestica u tekućinama dao je James Clerk Maxwell. U prošlosti je postojao nedostatak industrijskog interesa za poboljšanje toplinskih svojstva pomoću suspenzija koje sadrže milimetarske ili mikronske veličine čestica, uglavnom zbog slabe stabilnosti i problema do kojih dolazi zbog reološkog ponašanja suspenzije. Taloženje čestica iz suspenzije rezultiralo je začepljenjem kanala. Nedavno je pokazano da čvrste nanočestice dimenzija ~ 10 – 40 nm su izuzetno stabilne. Učinkovitost prijenosa topline ovisi o fizikalno – toplinskim svojstvima fluida: gustoći, toplinskom kapacitetu, viskoznosti i toplinskoj vodljivosti [1].

2.3.1. Gustoća

Gustoća nanofluida određuje se na fizičkom načelu pravila smjese, može se izračunati pomoću korelacije:

$$\rho_{eff} = \left(\frac{m}{V}\right)_{eff} = \frac{m_f + m_{\check{c}}}{V_f + V_{\check{c}}} = \frac{\rho_f V_f + \rho_{\check{c}} V_{\check{c}}}{V_f + V_{\check{c}}} = (1 - \varphi_{\check{c}})\rho_f + \varphi_{\check{c}}\rho_{\check{c}} \quad (4)$$

Da bi se ispitala valjanost ove jednadžbe napravljena su brojna eksperimentalna istraživanja za mjerenje gustoće nanofluda. Istraživanje je pokazalo odličnu podudaranost eksperimentalnih i teorijskih rezultata. Iz jednadžbe je vidljivo da sa povećanjem volumne koncentracije čestica dolazi do povećanja gustoće [15].

2.3.2. Specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet materijala definira se kao toplina koja je potrebna da se jednom kilogramu tog materijala povisi temperatura za 1 kelvin (ili stupanj celzijusa). Kako je specifični toplinski kapacitet metala manji od kapljevina, očekuje se smanjenje toplinskog kapaciteta nanofluida. Pokazano je kako se specifični toplinski kapacitet smanjuje s povećanjem volumne koncentracija nanočestica [16].

Postoje dva modela određivanja specifičnog toplinskog kapaciteta nanofluida. Model I, Li i Xuan (2000), je sličan teoriji miješanja idealnih plinova. Bazira se na linearnoj ovisnosti

specifičnog toplinskog kapaciteta o kapacitetu baznog fluida, nanočestica, i volumnoj koncentraciji čestica.

$$c_{p,nf} = \varphi c_{p,n} + (1-\varphi)c_{p,f} \tag{5}$$

Iako je jednostavan i često se koristi, ovaj model nije teoretski potvrđen u svrhu određivanja toplinskog kapaciteta nanofluida.

Model II se bazira na pretpostavkama toplinske ravnoteže između čestica i polja koje ih okružuju. On opisuje specifični toplinski kapacitet kao: [18]

$$c_{p,nf} = \frac{\varphi\left(\rho c_p\right)_n + (1-\varphi)\left(\rho c_p\right)_f}{\varphi\rho_n + (1-\varphi)\rho_f} \tag{6}$$

U ovom radu korišten je model I za računanje specifičnog toplinskog kapaciteta.

2.3.3. Viskoznost

U svim fluidima postoji sila trenja između molekula te zbog toga, fluidi, pokazuju određeni otpor prema protoku. Viskoznost je transportno svojstvo koje se odnosi na otpornost materijala prema protoku [1].

Određivanje viskoznosti puno je teže od određivanja gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta. Razlog toga je što viskoznost ovisi o mnogim čimbenicima kao što su: veličina, raspodjela i oblik čestica, mogućnost aglomeracije i stvaranja klastera (skupina) čestica, nasumično *Brownovo* gibanje, granična površina između čestica i baznog fluida, pH nanofluida i aditiva i temperatura nanofluida. Zbog svih ovih utjecaja postoji niz fizičkih mehanizama i matematičkih modela koji opisuju izračunavanje dinamičke viskoznosti za nanofluide. Einstein (1956.) je prvi dao ideju o mjerenju viskoznosti suspenzija pomoću viskoznosti baznog fluida i volumne koncentracije čestica te je iz toga dao fenomenološku hidrodinamičku jednadžbu:[11]

$$\eta_{eff} = \left(1 + 2.5\varphi_p\right)\eta_f \tag{7}$$

Kako je njegov model bio primjenjiv samo na veće veličine čestica kao što su milimetri i mikrometri, model se dalje razvija da bi bio primjenjiv i za nanofluide [17].

Brinkman proširuje i poboljšava Einstein-ovu jednadžbu za koncentrirane suspenzije:

$$\eta_{eff} = \eta_{bf} \cdot \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \tag{8}$$

Efekt *Brown-ovog* gibanja na viskoznost u suspenziji čvrstih sferičnih čestica proučavao je i Batchelor (1977). Za suspenzije izotropne strukture, viskoznost je dana s izrazom: [19]

$$\eta_{eff} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\phi^2)\eta_{bf} \tag{9}$$

U ovom radu korištena je Einstein-ova jednadžba (1956.) kako bi se usporedile teorijske i eksperimentalne vrijednosti viskoznosti.

2.4. PROLAZ TOPLINE

Ukoliko se toplina prenosi s jednog fluida na drugi koji su međusobno odijeljeni čvrstom stjenkom, govorimo o prolazu topline. Toplina prelazi s toplijeg na hladnije tijelo jer postoji razlika temperature. Takav prijenos se odvija sve dok se ne postigne ravnotežno stanje. U tom trenutku više ne postoji pokretačka sila. U industrijskoj praksi od najvećeg je značaja brzina procesa koja se u kemijskom inženjerstvu izražava po jedinici površine i naziva se fluks (gustoća toka).

$$fluks\ topline = \lambda \cdot \frac{pokretacka\ sila}{otpor} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{R_{toplinski}}$$

Općenito, gustoća toka topline ovisi o fizikalnim svojstvima, geometrijskim i hidrodinamičkim karakteristikama promatranog sustava. Hidrodinamički uvjeti utječu na formiranje hidrodinamičkog graničnog sloja koji se javlja kao posljedica djelovanja stjenke i viskoznosti fluida te unutar njemu postoji gradijent brzine. Svojim postojanjem hidrodinamički granični sloj utječe na prijenos topline pružajući otpor pa se zbog toga uvijek nastoji proces voditi u takvim uvjetima da je njegova debljina što manja. Analogno, pri zagrijavanju gibajućeg fluida dolazi do formiranja i toplinskog graničnog (δ_T) sloja u kojem postoji toplinski gradijent.

Promjenom hidrodinamičkih uvijeta, koji su definirani Re značajkom, dolazi do promjene debljine hidrodinamičkog, a istovremeno i debljine toplinskog graničnog sloja. Debljina graničnih slojeva definirana je Re – značajkom prema Polhousenu.

$$\delta = \frac{d_e}{\sqrt{R_e}} \qquad \delta_H \sim \frac{1}{Re_x^m} \qquad \delta_T \sim \frac{1}{Re_x^n} \tag{10}$$

Iz toga slijedi da se povećanjem Re-značajke smanjuje debljina graničnih sloja, te se na taj način smanjuje i otpor prijenosu topline, odnosno povećava se koeficijent prijelaza topline. Kako bi se odredio koeficijent prijelaza topline, često se koriste bezdimenzijske korelacijske jednadžbe u kojim su konstante i eksponenti eksperimentalno određeni.

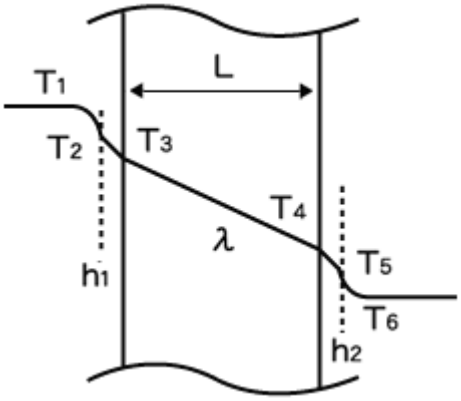
2.4.1. Koeficijent toplinske vodljivosti

Već je spomenuto da je prijelaz topline uvjetovan postojanjem temperaturne razlike. Prenesena toplina je dakle vektorska veličina usmjerena suprotno od temperaturnog gradijenta. Fourier je na temelju takvih spoznaja još početkom 19. stoljeća postavio zakon

$$\overrightarrow{q_P} = -\lambda \cdot grad\, T.$$

Prema Fourierovu zakonu prenesena je toplina proporcionalna negativnom gradijentu temperature. Faktor proporcionalnosti λ ovisi o materijalu kroz koji se toplina provodi. Što je taj faktor veći, to će se uz isti gradijent temperature prenijeti više topline.

Koeficijent toplinske vodljivosti, λ, pokazatelj je stupnja propusnosti materijala za vođenje topline. Označuje fizikalno svojstvo tvari i posljedica je molekularnog zbivanja unutar tvari. Zove se još i izotropna toplinska provodljivost jer je nezavisna od smjera [18]. Taj se koeficijent mijenja u širokom rasponu od materijala koji dobro vode toplinu do onih koji je vode veoma loše.



Slika 4. Prijenos topline

Općenito vrijedi pravilo da su dobri vodiči električne struje ujedno i dobri vodiči topline.

Proračun toplinske vodljivost i viskoznost nanofluida su još uvijek kontradiktorni u različitim publikacijama. Još uvijek je nejasno koji su najbolji modeli za definiranje toplinske vodljivosti i viskoznosti nanofluida. Razlog je utjecaj čitavog niza parametara (koncentracija, oblik i veličina čestica, nastajanje aglomerata te prisutnost disperganata) na njihovu vrijednost. Postoji niz modela kojima se može izračunati toplinska vodljivost [15].

Tablica 2. Modeli za izračunavanje koeficijenta toplinske vodljivosti

Maxwell	$\lambda = \frac{\lambda_w \cdot (1 + 2 \cdot \beta \cdot \phi_č)}{1 - \beta \cdot \phi_č}$
Pak/Cho	$\lambda_{nf} = [1 + 7.47\phi] \cdot \lambda_w$
Timofeewa	$\lambda_{nf} = [1 + 3\phi] \cdot \lambda_w$
WASP	$\lambda_{nf} = \left[\frac{\lambda_č + 2\lambda_w - 2\phi \cdot (\lambda_w - \lambda_č)}{\lambda_č + 2\lambda_w + \phi \cdot (\lambda_w - \lambda_č)}\right] \cdot \lambda_w$
Bruggeman	$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = [(3\phi_p - 1)\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + \{3(1 - \phi_p) - 1\}]^2 + 8\frac{\lambda_p}{\lambda_f}$
Hamilton/Crosser	$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_f + (n-1)\phi_p(\lambda_p - \lambda_f)}{\lambda_p + (n-1)\lambda_f - \phi_p(\lambda_p - \lambda_f)}\lambda_f$

2.4.2. Koeficijent prijelaza topline

Vrijednost koeficijenta prijelaza topline definira brzinu izmjene topline konvekcijom. Koeficijent prijelaza topline između dva fluida može se procijeniti korištenjem slijedećih korelacija:

Tablica 3. Korelacijske jednadžbe za izračunavanje koeficijenta prijelaza topline

Jackson i Troupe (1966)	$\alpha = 0{,}724 \cdot c_p \cdot \dot{m}_A \cdot R_e^{0.62} \cdot P_r^{0.4}$
Kays i Crawford (1980)	$\alpha = 0.664 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot R_e^{0.5} \cdot P_r^{1/3}$
Kakac i Liu (2002)	$\alpha = 0.348 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot R_e^{0.663} \cdot P_r^{1/3}$
Bounapane (1963)	$\alpha = 0.247 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot R_e^{0.66} \cdot P_r^{0.4}$

Sve korelacijske jednadžbe pokazuju ovisnost koeficijenta prijenosa topline o Re i Pr značajci.

2.4.3. Prandtlova značajka

Prandtlova značajka predstavlja omjer difuzivnosti količine gibanja (kinematička viskoznosti) i temperaturne difuzivnosti (koeficijentom temperaturne vodljivosti). Dakle, Prandtlova značajka ovisi o fizikalnim svojstvima fluida.

$$P_r = \frac{P_e}{R_e} = \frac{\frac{v \cdot l}{a}}{\frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \tag{11}$$

Kod viskoznih tekućina najčešće je Pr>1 što znači da je hidrodinamički granični sloj veći od toplinskog. Budući da se promjenom temperature mijenjaju i fizikalna svojstva fluida, nije svejedno da li se radi o hlađenju ili zagrijavanju. Tako npr., brzina prijenosa topline kod kapljevina veća je kod zagrijavanja nego kod hlađenja. Prandtlova značajka je bitna jer njome opisujemo konvekciju, odnosno prijenos topline između ploča i fluida.

2.4.4. Nusseltova značajka

Nusseltova značajka predstavlja odnos između ukupno prenesene topline i topline prenesene kondukcijom, tj. omjer gustoće toplinskog toka za kojeg je mjerodavan koeficijent prijelaza topline, α i gustoće toplinskog toka koji bi s istim ΔT provođenjem prošao kroz sloj debljine L uz odgovarajući koeficijent toplinske vodljivosti, λ.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \tag{12}$$

Nusseltova značajka određuje se preko korelacijskih jednadžbi koje se najčešće dobivaju eksperimentalno [19].

$$Nu = f(Re, Pr) \tag{13}$$

$$Nu = k \cdot Re^m \cdot Pr^{0.3} \tag{14}$$

Faktori u ovoj bezdimenzijskoj korelaciji ovise o hidrodinamičkim uvjetima u sustavu te geometrijskim karakteristikama sustava i samom sustavu, konstanata, k povezuje termofizikalna svojstva nanofluida, dok eksponent m ukazuje na hidrodinamičke uvjete.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. DEFINIRANJE SVRHE ISTRAŽIVANJA

Osnovni zadatak je ispitati mogućnost priprave i primjene nanofluida u izmjenjivaču topline kako bi se povećala njegova efikasnost prijenosa topline. Pri tome je potrebno:

1. dobiti stabilnu nanosuspenziju u različitim volumnim udjelima vode i glicerolu,
2. odrediti toplinska i reološka svojstva nanofluida,
3. na temelju eksperimentalnih podataka u IT razviti korelacijsku jednadžbu koja povezuje hidrodinamičke uvjete s toplinskim svojstvima nanofluida.

3.2. MATERIJAL

3.2.1. Nanočestice Al_2O_3

Suspenzije su pripremljene i mjerenja provedena na industrijski proizvedenim nanočesticama Al_2O_3 (komercijalnog naziva: *AEROXID Alu C*), proizvođača *Evonik*, slijedećih karakteristika:

Tablica 4. Karakteristike nanočestica Al_2O_3 proizvođača *Evonik*

	BET površina, m^2/g	gubitak sušenja, %	pH	indeks refrakcije	kemijski sastav	alotropska modifikacija
AEROXID Alu C	100±15	≤5.0	4.5-5.5	1.69	Al_2O_3	33% δ i 66% γ

3.2.2. Voda

Tablica 5. Fizikalno-kemijska svojstva vode

	ρ, kg/m^3	T_V, °C	T_T, °C	*Mr*, g/mol	kemijski sastav	c_p, kJ/kg·K
Voda	1000	100	0	18,016	H_2O	4,1813

3.2.3. Glicerol

Tablica 6. Fizikalno – kemijska svojstva glicerola

	ρ, kg/cm^3	T_V, °C	T_T, °C	*Mr*, g/mol	kemijski sastav	c_p, kJ/kg·K
Glicerol	1261	290	17,8	92,09382	$C_3H_8O_3$	2,43

3.2.4. Stabilizatori

Tablica 7. Fizikalno – kemijska svojstva stabilizatora

	ρ, kg/cm^3	HLB	T_V, °C	*Mr*, g/mol	kemijski sastav
Arapska guma	1350	-	-	-	$C_{26}H_{34}N_2O_{13}$
Tween 20	1100	16,7	> 100	1227.54	$C_{58}H_{114}O_{26}$
Triton X100	1070	-	270	647	$C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$ (n = 9-10)

3.3. PRIPRAVA SUSPENZIJA

Za pripravu nanosuspenzija korišteni su kao bazni fluidi destilirana voda, glicerol (GLY), te nanočestice Al_2O_3 u različitim omjerima vode i GLY, te različitim volumnim udjelima nanočestica. Nanosuspenziju je potrebno stabilizirati, odnosno spriječiti aglomeraciju nanočestica; što se postiže djelomično pomoću ultrazvuka pri frekvenciji od 20% u trajanju od 1sata. Da bi se dodatno poboljšala stabilnost koristi se stabilizator Tween 20. Nakon djelovanja ultrazvuka, nanosuspenzije se stavljaju u epruvete i prati se njihova stabilnost vizualnom provjerom. Nanosuspenzije se smatraju stabilnim i pogodnim za primjenu u izmjenjivačima topline, ako unutar mjesec dana ne dolazi do odjeljivanja slojeva.

3.3. UREĐAJI

3.3.1. Instrument 3 u 1 – FTN

Uređaju 3 u 1 – FTN objedinjuje funkcije triju instrumenata: turbidimetra, nefelometra i fotokolorimetra uz jednostavnu komunikaciju s osobnim računalom. Uređajem se prati promjena nefelometrijskih jedinica turbiditeta kroz 20 do 50 dana. Instrument registrira promjenu jačine (intenziteta) prolaznog zračenja ili jačine raspršenog zračenja kao posljedicu sraza s česticama. Praćenjem dobivenih podataka u vremenu određuje se stabilnost suspenzije.

3.3.2. Ultrazvučni homogenizator *Bandelin sonoplus HD 3200*

Oprema koja je korištena pri pripravi uzorka (stabilne suspenzije) je ultrazvučni homogenizator *Bandelin sonoplus HD 3200* (*slika 3*.). Snage 200 W i mogućnost promjene amplitude u rasponu od 10 do 40 %.

U pripremljeni uzorak, definirane mase kapljevine i dodatka nanočestica uronjena je ultrazvučna sonda je tipa TT 13. Kako bi se nanočestice raspršile u kapljevini, ispitivani su različiti uvjeti pripreme nanofluida: različite koncentracije Al_2O_3, kapljevine i različite ultrazvučne frekvencije i vremena tretiranja s ultrazvukom.



Slika 5. Ultrazvučna sonda *Bandelin sonoplus HD 3200*

3.3.3. Uređaj za određivanje gustoće - *Mettler toledo densitometer 30PX*

Mettler toledo densitometer 30PX je instrument za određivanje gustoće ili specifične težine kapljevina. Djeluje na principu oscilirajuće cijevi i rezultate prikazuje u sekundi.



Slika 6. Mettler toledo densitometer 30PX

3.3.4. Rotacijski reometar *Brookfield DV – III ULTRA*

Reološka svojstva pripremljenih suspenzija određena su na termostatiranom *Brookfieldov reometru DV – III ULTRA*. Određene su ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini pri različitim temperaturama u području 15 do 55 °C.



Slika 7. Rotacijski reometar *Brookfield DV – III ULTRA*

3.3.5. Uređaj za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti - *Transient hot bridge 1*

Koeficijenti toplinske vodljivosti i temperaturne difuzivosti za sve pripravljene uzorke određeni su na uređaju *Transient hot bridge 1* (THB 1) proizvođača *Linseis*. Ovaj uređaj koristi trakasti izvor topline koji je ujedno i temperaturni senzor. Pripravljenim suspenzijama određen je koeficijent toplinske vodljivosti.



Slika 8. Transient hot bridge 1 (THB 1**)**

3.4. APARATURA

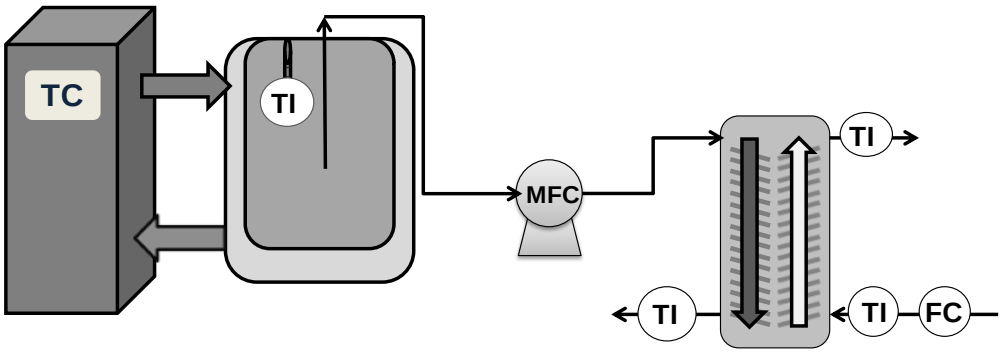
Aparatura potrebna za pripravu stabilne suspenzije prikazana je na *slici 9.*, a sastoji se od ultrazvučnog homogenizatora sa sondom koja je uronjena u posudu s duplom stjenkom. Kako se tijekom priprave suspenzije zbog djelovanja ultrazvučnog homogenizatora, razvija toplina, potrebno je nanofluid hladiti. Za to je korišten termostat *Julabo F 12*.



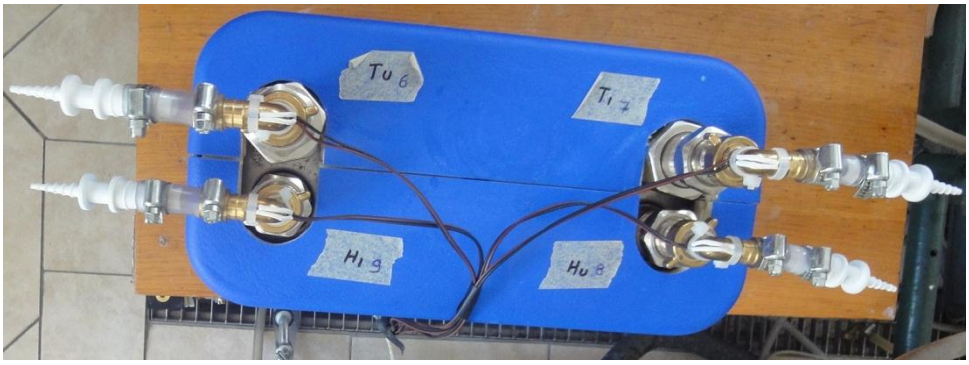
Slika 9. Aparaturu korištena za pripravljanje suspenzije nanofluida

Mjerenja su provedena u pločastom izmjenjivaču topline *CB30-10L* s hladnim fluidom, vodom te toplim nanofluidom sa suspendiranom nanočesticama Al_2O_3 (*slika 10.*). Ulazna temperatura toplog fluida iznosila je oko 50°C. Tokom mjerenja mijenjani su protoci oba fluida u intervalu od 40 do 370 mL/min. Korišten je nanofluid koncentracije čestica od 0,3 do 1,4 %.

Aparatura se sastojala od pločastog izmjenjivača topline, spremnika sa toplim fluidom, peristaltičke pumpe za transport toplog (nanofluida), temperaturnih osjetila za mjerenje ulaznih i izlaznih temperatura toplog i hladnog fluida te rotametra za određivanje protoka vode (hladni fluid) iz slavine.



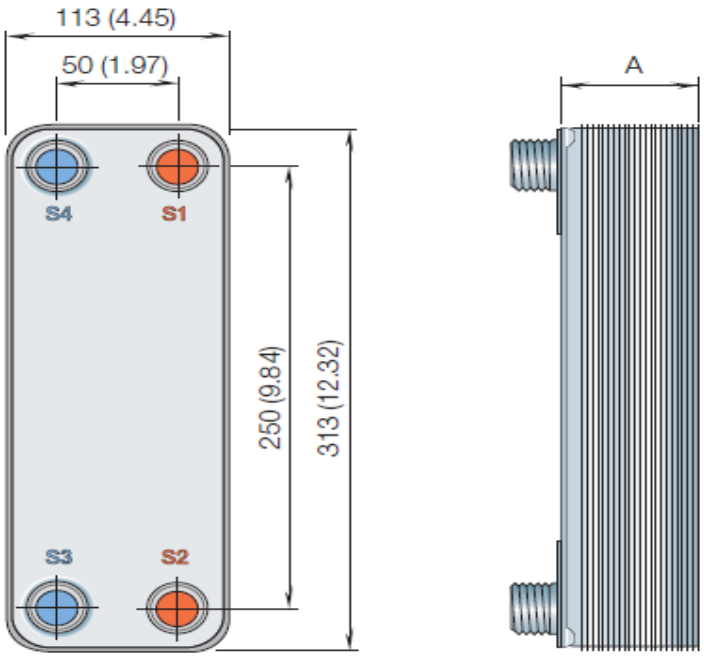
Slika 10. Shematski prikaz aparature za određivanje koeficijenta prijelaza topline



Slika 11. Prikaz korištenog izmjenjivača topline *Alfa Laval CB30-10L*

3.5. METODIKA PRORAČUNA

Na *slici 12.* prikazane su dimenzije korištenog pločastog izmjenjivača topline *CB30-10L*, širina i duljina ploče, razmak između ploča.



Slika 12. Shematski prikaz *chervon* ploče

Nanofluid struji u suprotnom smjeru od vode što čini protustrujni izmjenjivač topline. Ta dva fluida su odijeljena stjenkom ploče debljine 1 mm, a razmak između svake ploče je 1 mm. Ploče su rebrastog profila i izrađene su od nehrđajućeg čelika koji je lemljen pomoću bakra (*Alloy* 316/Cu). Iako je idealan za brojne primjene, bakar nije pogodan za agresivne fluide [20].

Eksperimentalno određeni podaci u izmjenjivaču topline su: protoci i temperature ulaza i izlaza oba fluida, te eksperimentalno određene gustoće, viskoznosti pripremljenih nanofluida te koeficijent toplinske vodljivosti. Specifični toplinski kapaciteti određen je računski prema literaturnim modelima.

Iz toplinske bilance izmjenjivača topline izračunava se toplinska dužnost izmjenjivača za hladni fluid:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_H \cdot c_{pH} \cdot \left(T_{H,iz} - T_{H,ul}\right) \tag{15}$$

za topli:

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_T \cdot c_{pT} \cdot \left(T_{T,ul} - T_{T,iz}\right) \tag{16}$$

Zatim je potrebno odrediti vodenu vrijednost fluida.

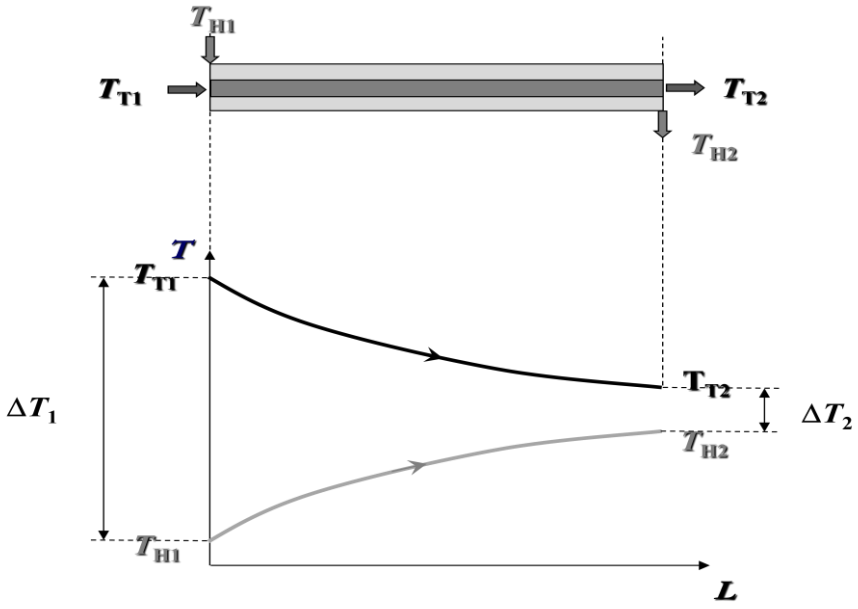
$$C = \dot{m} \cdot c_p \tag{17}$$

Kako je topli fluid, fluid s minimalnom toplinskom vrijednošću, toplinski tok toplog fluida uzima se dalje u proračunu za koeficijent prolaza topline, *K*.

Koeficijent prolaza topline, *K*, izračunava se iz kinetičke jednadžbe:

$$K = \frac{\dot{Q}}{A \cdot F \cdot \Delta T_{LM}} \tag{18}$$

Faktor korekcije iznosi 0,95, a određen je iz standardiziranih grafičkih prikaza za pločaste izmjenjivače topline [12].



Slika 13. Shema izmjene topline kod protustrujnog izmjenjivača topline

Srednja pokretačka sila računa se iz logaritamska razlike na jednom, odnosno drugom kraju IT:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \tag{19}$$

Koeficijent prijelaza topline na strani nanofluida izračunava se iz koeficijenta prolaza topline.

$$\alpha_{nf} = \frac{1}{1/K - 1/\alpha_v - l/\lambda} \tag{20}$$

Kao nepoznanica javlja se koeficijent prijelaza topline na strani vode, α_v. U literaturi postoji niz korelacijski jednadžbi koje služe za proračun ovisno o geometriji izmjenjivača topline i hidrodinamičkim uvjetima. Stoga je potrebno izabrati korelacijsku jednadžbu kojom će se dobiti točne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u ispitivanim uvjetima. U tablici 3 su prikazane ispitane jednadžbe.

Napravljeni su dodatni eksperiment koji uključuje izmjenu topline između tople i hlade vode. Slaganje između izračunate (teorijske) i stvarne površine korištenog izmjenjivača topline, ukazuje na odabir korelacijske jednadžbe.

Teorijska površina A_t izračunava se:

$$A_t = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_{LM} \cdot F} \tag{21}$$

Koeficijent prolaza topline predstavlja recipročnu vrijednost sume svih otpora prijenosu topline u danom sustavu (konvekcija, kondukcija, radijacija, naslage).

$$K = \frac{1}{1/\alpha_{v1} + l/\lambda + 1/\alpha_{v2}} \tag{22}$$

U tablici 8. su prikazane izračunate vrijednosti, prema različitim formulama, za koeficijent prijelaza topline sa pripadajućom izračunatom površinom.

Tablica 8. Prikaz izračunatih vrijednosti za koeficijent prijelaza topline prema različitim korelacijama

Naziv autora	α, W/m^{2}K		A, m^2	
	Hladni fluid	Topli fluid	izračunata	stvarna
Bounape	833,97	339,72	0,2123	0,23
Jackson i Troupe	259129,99	25919,48	0,0053	0,23
Kays i Crawford	1362,89	657,08	0,1189	0,23
Kakac i Liu	1088,71	415,95	0,1737	0,23

Pomoću Bounape jednadžba izračunat je koeficijent prijelaza topline čija vrijednost daje približno slaganje teorijske i stvarne površine.

$$\alpha = 0.247 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot R_e^{0.66} \cdot P_r^{0.4} \tag{23}$$

gdje je ekvivalentni promjer određen prema jednadžbi:

$$d_e = \frac{4ab}{2(a+b)}. \tag{24}$$

Reynoldsova značajka na strani tople i hladne vode računa se:

$$R_e = \frac{d_e \cdot \dot{m}_A}{\eta} \tag{25}$$

Masena brzina fluida izračunava se prema izrazu:

$$\dot{m}_A = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot n} \tag{26}$$

gdje je *a* širina ploče, *b* razmak između ploča i *n* broj prolaza između ploča hladnog, odnosno toplog fluida.

Prandtlova značajka izračunava se prema navedenom izrazu:

$$P_r = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \tag{27}$$

4. REZULTATI

U ovom poglavlju dan je pregled dobivenih rezultata. Rezultati su podijeljeni u dvije osnovne skupine:

1. Određivanje stabilnosti i termo-fizikalnih svojstava za:
    a) čiste nanosuspenzije,
    b) nanosuspenziju s različitim stabilizatorima
2. Rezultati dobiveni primjenom nanofluida u pločastom izmjenjivaču topline za:
    a) čistu nanosuspenziju,
    b) nanosuspenziju s različitim stabilizatorima.

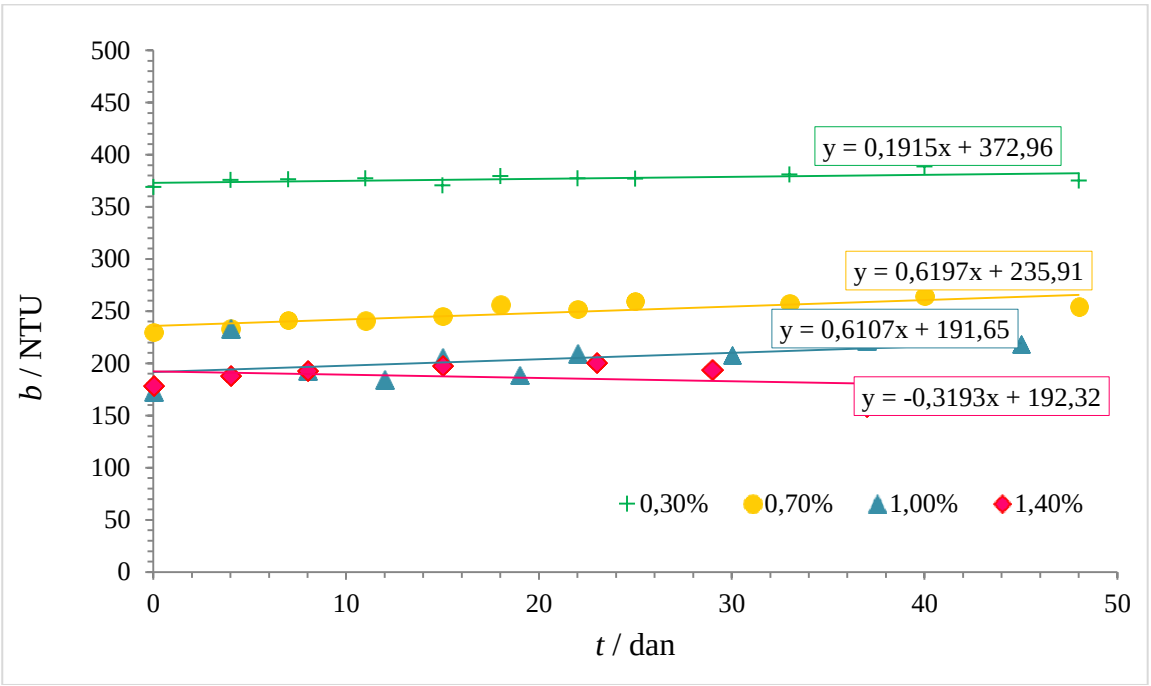
4.2. ODREĐIVANJE STABILNOSTI I TERMO-FIZIKALNIH SVOJSTAVA

4.2.1. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva čiste nanosuspenzije

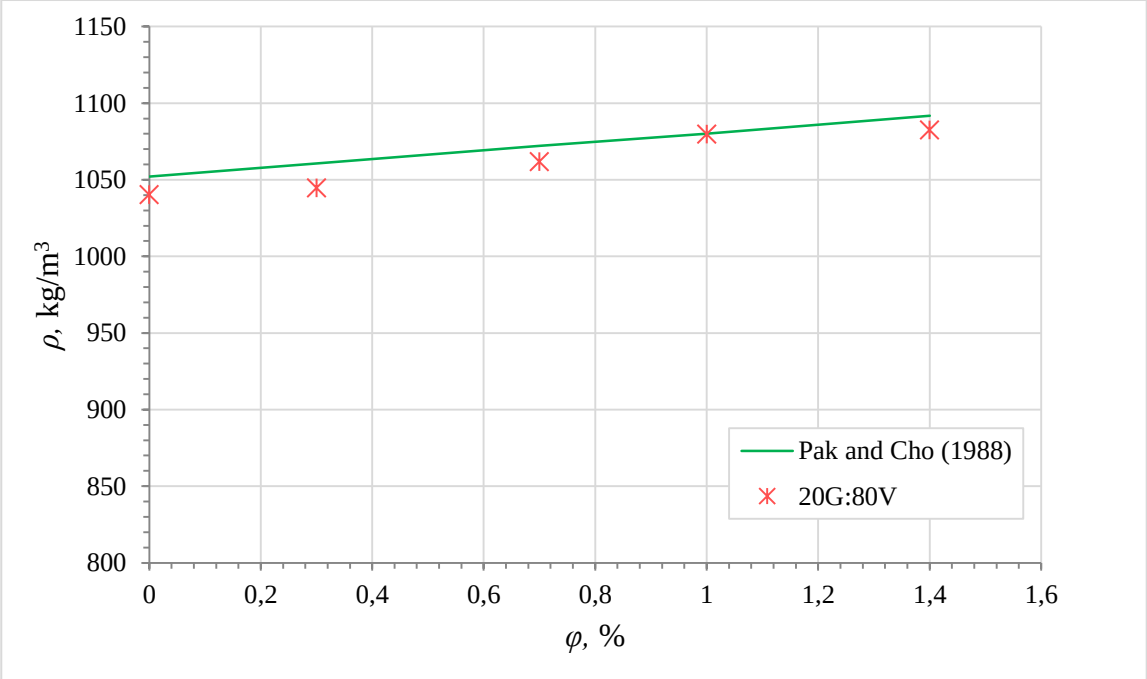


a) b)

Slika 14. Prikaz pripravljene nanosuspenzije s 20:80 – gly:voda i 0,7 % čestica Al_2O_3 nakon a) 7 dana i b) mjesec dana



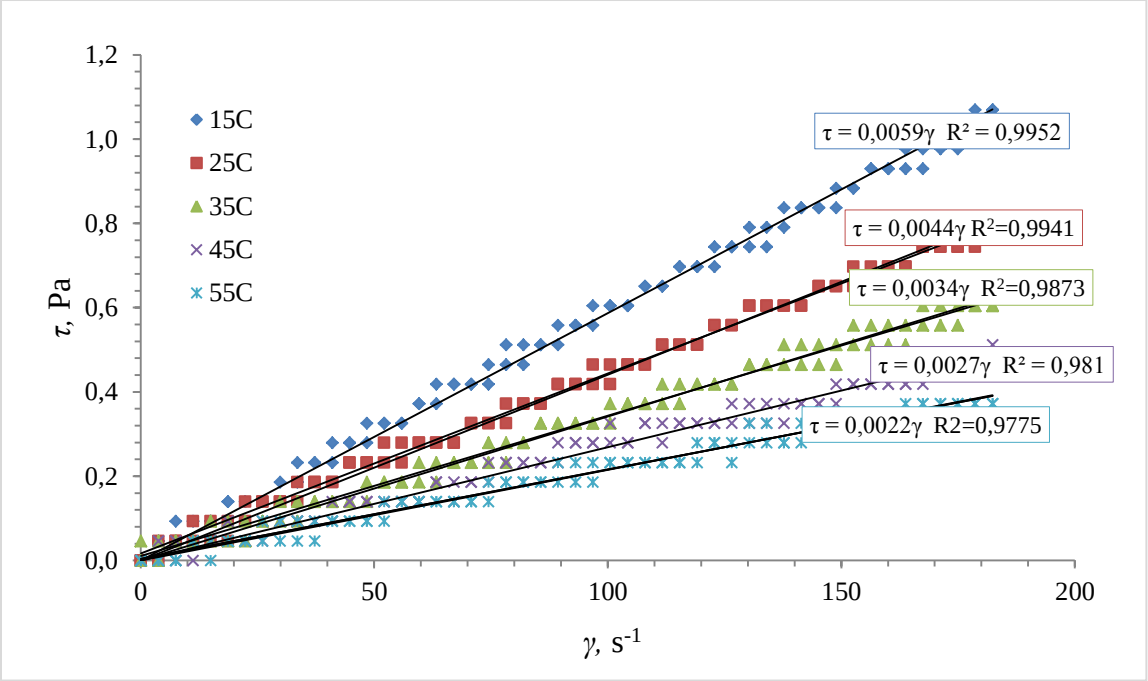
Slika 15. Promjena broja jedinica zamućenja s vremenom za nanosuspenzije dobivene u smjesi voda-glicerol



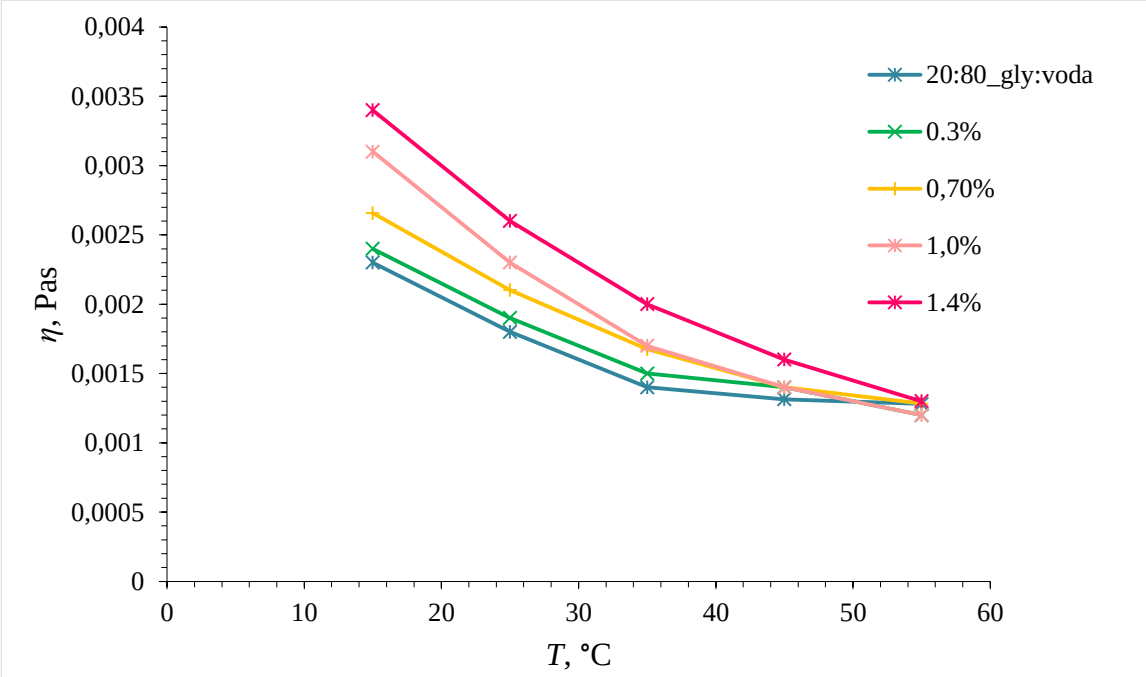
Slika 16. Promjena gustoće nanofluida s volumnim udjelom nanočestica

Tablica 9. Usporedba izmjerene i izračunate gustoće nanofluida

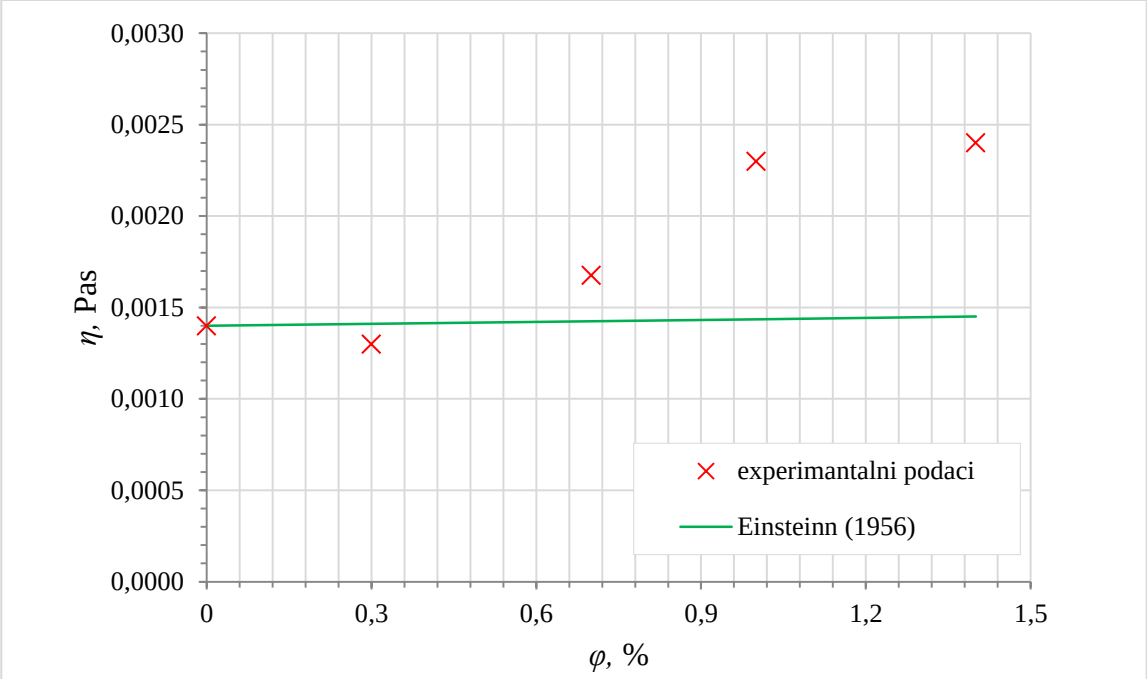
φ, %	ρ (Pak i Cho) kg/m^3	$\rho_{exp,}$ kg/m^3	ODSTUPANJE, %
0,0	1052,13	1040,20	1,13
0,3	1060,70	1044,73	1,51
0,7	1072,10	1061,86	0,95
1,0	1079,74	1079,73	0,00
1,4	1091,87	1082,50	0,86



Slika 17. Grafički prikaz ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za uzorak 0,3% Al_2O_3 suspendiran u 80 % vode i 20% glicerolu pri različitim temperaturama.



Slika 18. Promjena viskoznosti suspenzije čestica Al_2O_3 u smjesi kapljevina 20% glicerola i 80% voda o temperaturi



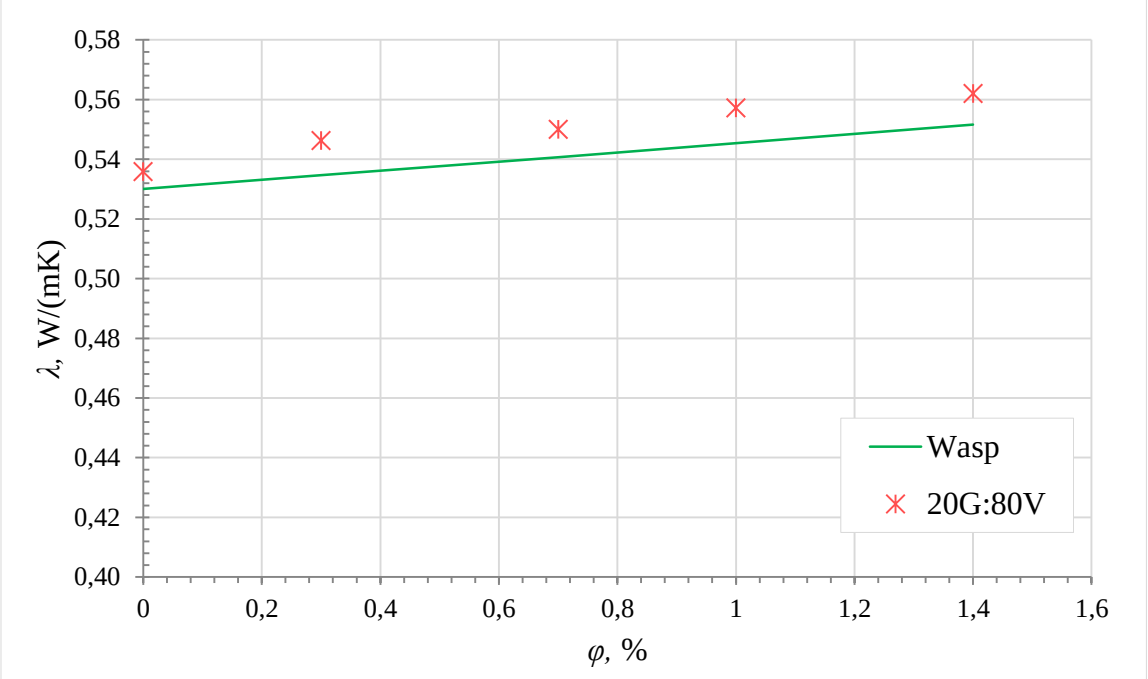
Slika 19. Promjena viskoznosti pripremljenih nanosuspenzija s volumnim udjelom nanočestica pri 35 °C

Tablica 10. Usporedba izmjerene i izračunate viskoznosti nanofluida

φ, %	$\eta_{,\text{teorija}}$ (Einstein), Pas	η_{exp}, Pas	ODSTUPANJE, %
0	0,001400	0,0014	0,00
0,3	0,001411	0,0013	7,83
0,7	0,001425	0,0017	14,95
1	0,001435	0,0023	37,60
1,4	0,001449	0,0024	39,62

Tablica 11. Izračunate vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti prema različitim modelima

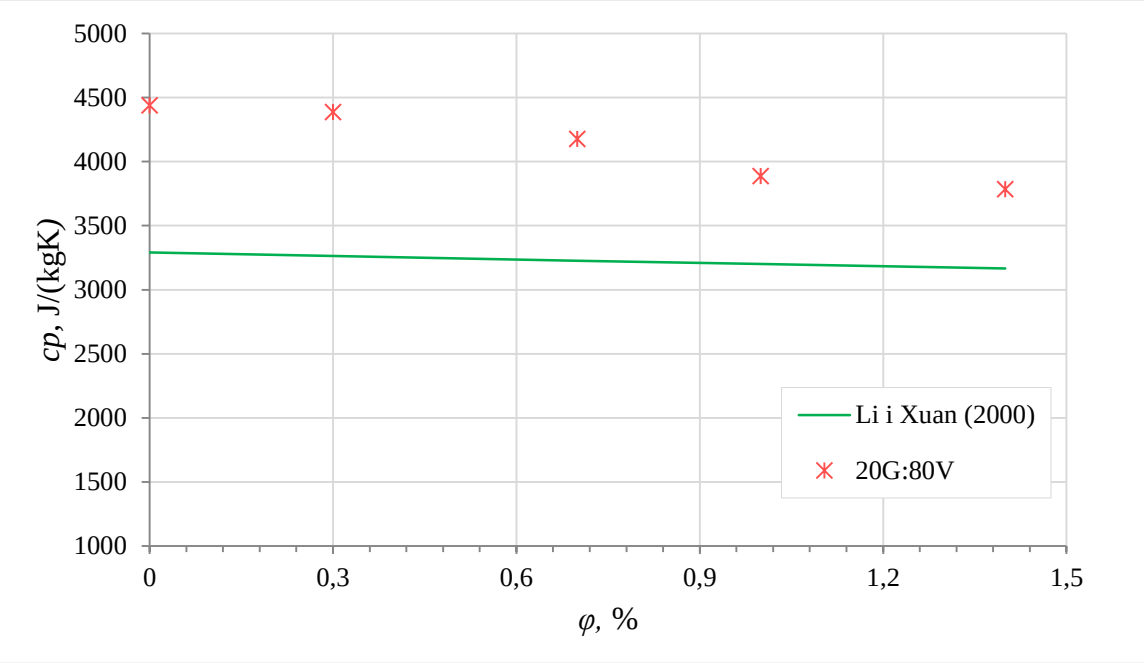
λ, kJ/(m·K)			
MODELI	0,3% Al_2O_3	0,7% Al_2O_3	1,4% Al_2O_3
Maxwell	0,4405	0,4457	0,4547
Pak/Cho	0,4466	0,4597	0,4826
Timofeewa	0,4407	0,4461	0,4552
WASP	0,4405	0,4457	0,4547



Slika 20. Promjena toplinske vodljivosti nanosuspenzije ovisno o volumnom udjelu nanočestica

Tablica 12. Usporedba izmjerene i izračunate toplinske vodljivosti nanofluida

φ, %	$\lambda_{,teorija}$ (Wasp), W/(mK)	λ_{exp}, W/(mK)	ODSTUPANJE, %
0	0,5300	0,5358	1,09
0,3	0,5346	0,5462	2,16
0,7	0,5407	0,5500	1,71
1	0,5454	0,5572	2,15
1,4	0,5516	0,5620	1,89

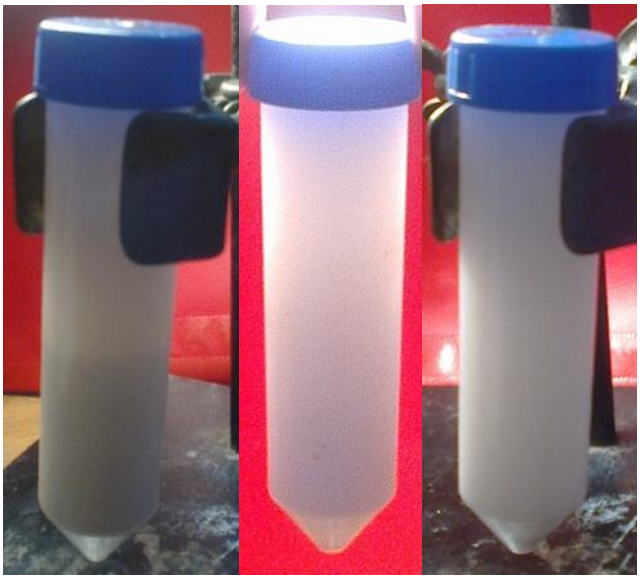


Slika 21. Promjena specifičnog toplinskog kapaciteta nanosuspenzija ovisno o volumnom udjelu nanočestica

Tablica 13. Usporedba izmjerenog i izračunatog specifičnog toplinskog kapaciteta nanofluida

φ, %	$c_{p,\text{teorija}}$ (Li i Xuan), J/(kgK)	$c_{p,\text{exp}}$, J/(kg/K)	ODSTUPANJE, %
0	3291,50	4438,34	34,84
0,3	3263,39	4387,03	34,43
0,7	3226,71	4177,81	29,48
1	3200,49	3887,07	21,45
1,4	3164,92	3785,13	19,60

4.3.2. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva nanosuspenzije sa stabilizatorom



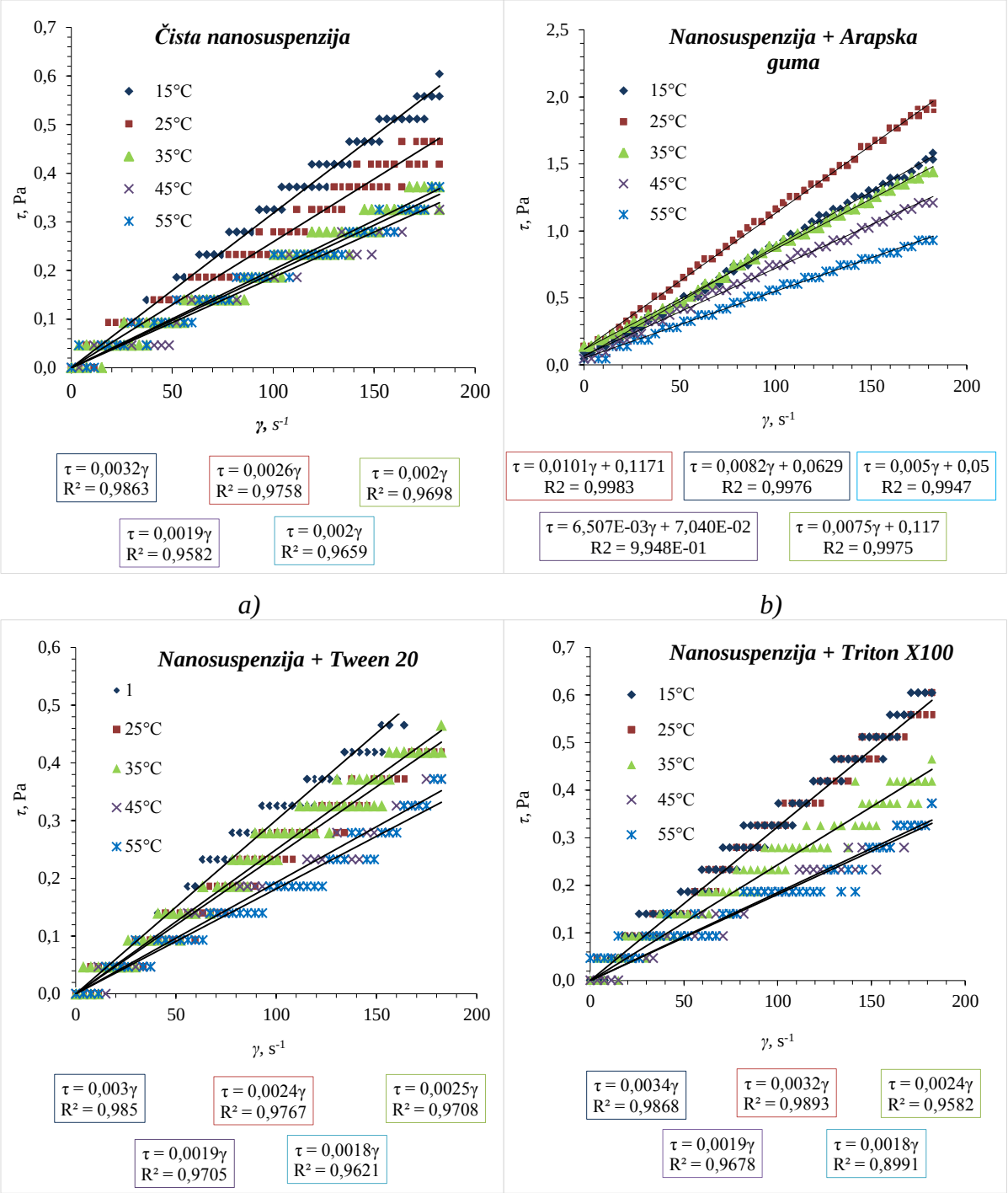
a) b) c)

Slika 22. Prikaz pripravljenih suspenzija 20:80 – gly:voda (0,7 % Al2O3) a) sa stabilizatorom: a) Arapska guma, b) Tween 20, c) Triton X100 stare 7 dana

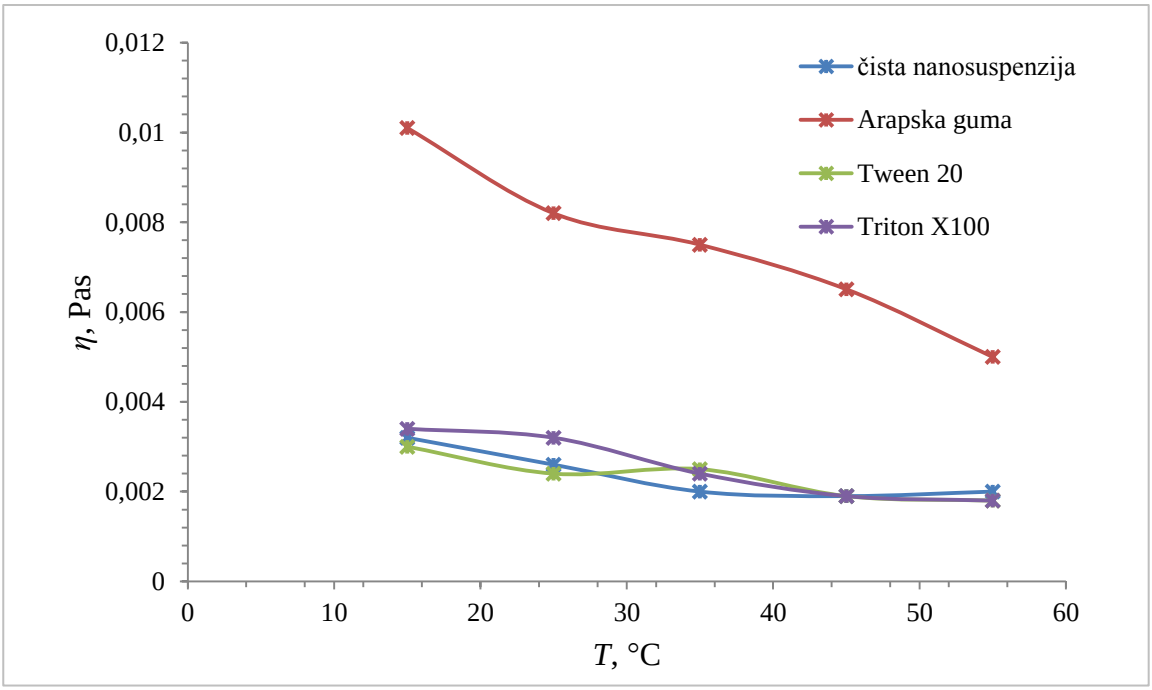


a) b) c)

Slika 23. Prikaz pripravljenih suspenzija 20:80 – gly:voda (0,7 % Al_2O_3) a) sa stabilizatorom: a) Arapska guma, b) Tween 20, c) Triron X100 nakon mjesec dana



Slika 24. Grafički prikaz ovisnosti smične brzine o smičnom naprezanju za uzorak a) 0,7% Al_2O_3 suspendiran u 80 % vode i 20% glicerolu pri različitim temperaturama i stabilizatoru: b) Arapska guma, c) Tween 20 i d) Triton X100.



Slika 25. Ovisnost viskoznosit o temperaturi

Tablica 14. Izmjerene vrijednosti gustoće suspenzije s navedenim stabilizatorima

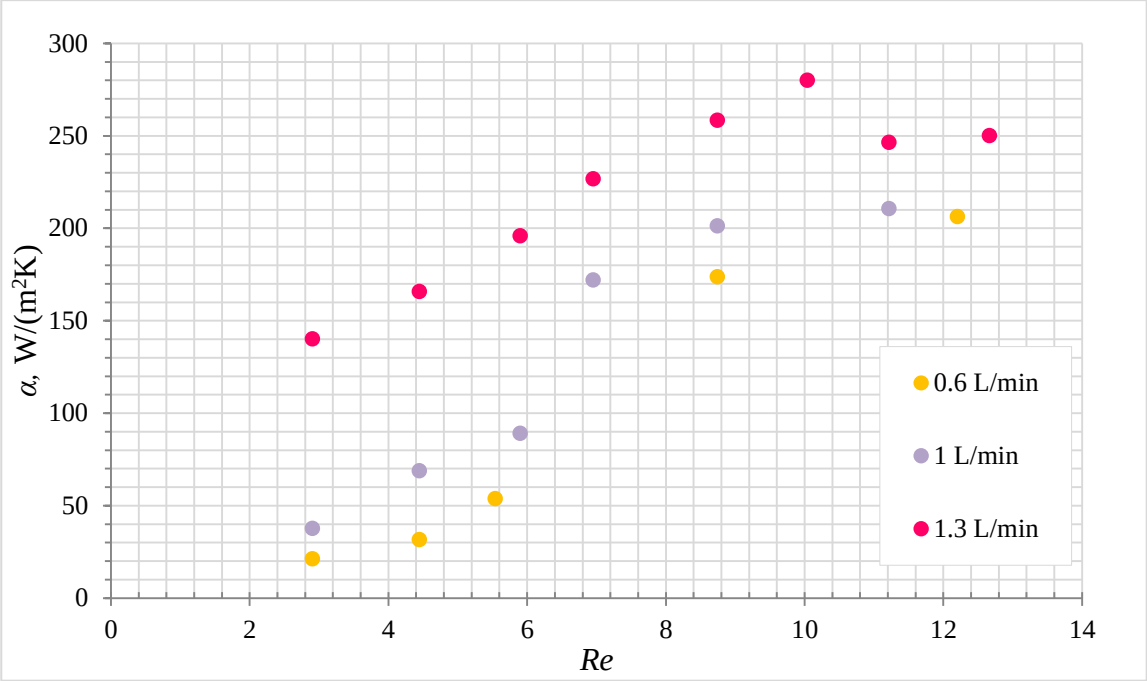
čista suspenzija		čista suspenzija + stabilizatori					
		Arapska guma		Tween 20		Triton X100	
T, ℃	*ρ*, g/cm^3	*T*, ℃	*ρ*, g/cm^3	*T*, ℃	*ρ*, g/cm^3	*T*, ℃	*ρ*, g/cm^3
30,0	1,0891	29,2	1,0916	29,3	1,0826	29,0	1,0896

Tablica 15. Izmjerene vrijednosti toplinske vodljivosti pomoću uređaja *Transient hot bridge* 1 (THB 1) za uzorak 0,2:0,8 – gly:voda s 0,7 % Al_2O_3

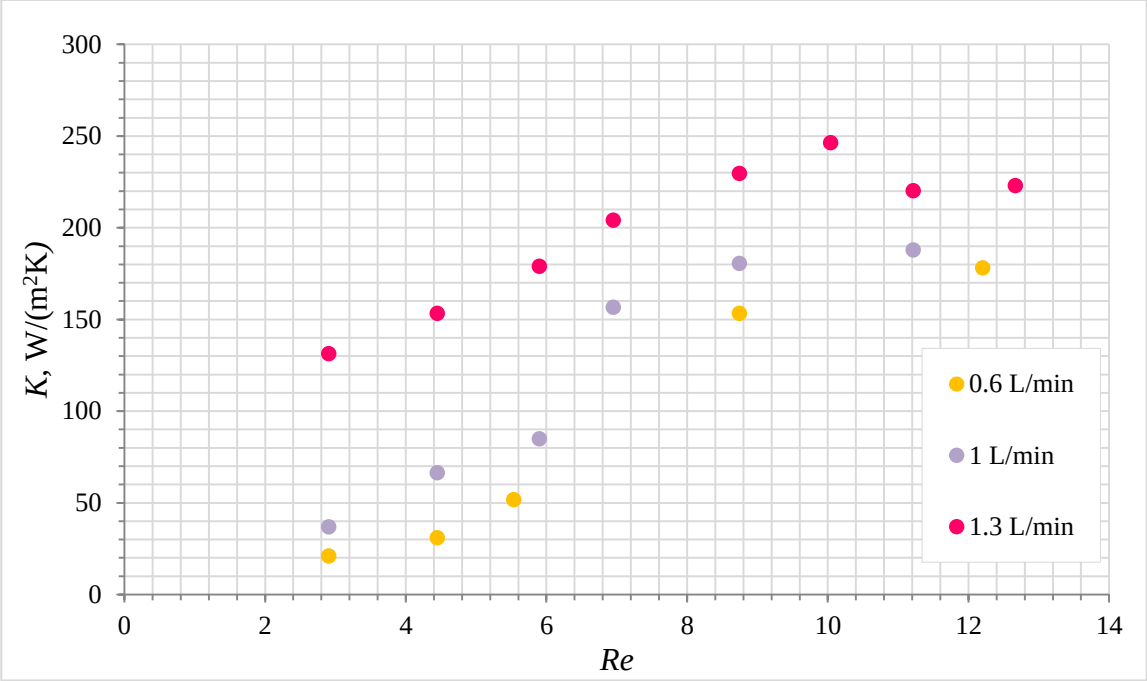
STABILIZATORI					
ARAPSKA GUMA		TWEEN 20		TRITON X100	
T, °C	*λ*, W/(mK)	*T*, °C	*λ*, W/(mK)	*T*, °C	*λ*, W/(mK)
34,43	0,5114	30,22	0,5293	30,76	0,5339
33,40	0,5333	30,14	0,5264	30,70	0,5365
32,42	0,5049	30,22	0,5235	30,44	0,5143
30,39	0,5049	30,17	0,5214	30,61	0,5098
29,61	0,5056	30,29	0,5207	30,42	0,5384
srednje vrijednosti	0,51202		0,52426		0,52658

4.4. REZULTATI MJERENJA U IZMJENJIVAČU TOPLINE

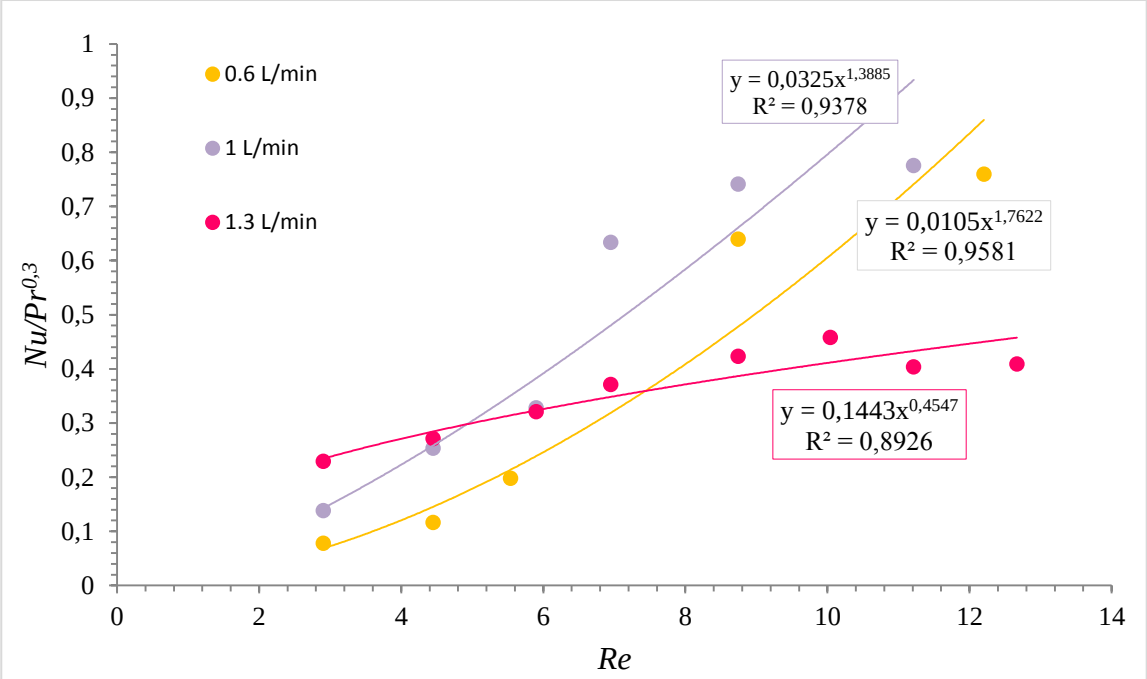
4.4.1. Rezultati mjerenja s različitim protokom toplog fluida i s konstantnom koncentracijom čestica Al_2O_3



Slika 26. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o Reynoldsovoj značajci za uzorak od 0,7% Al_2O_3 suspendiranih u vodi i glicerolu pri različitim protocima hladnog fluida



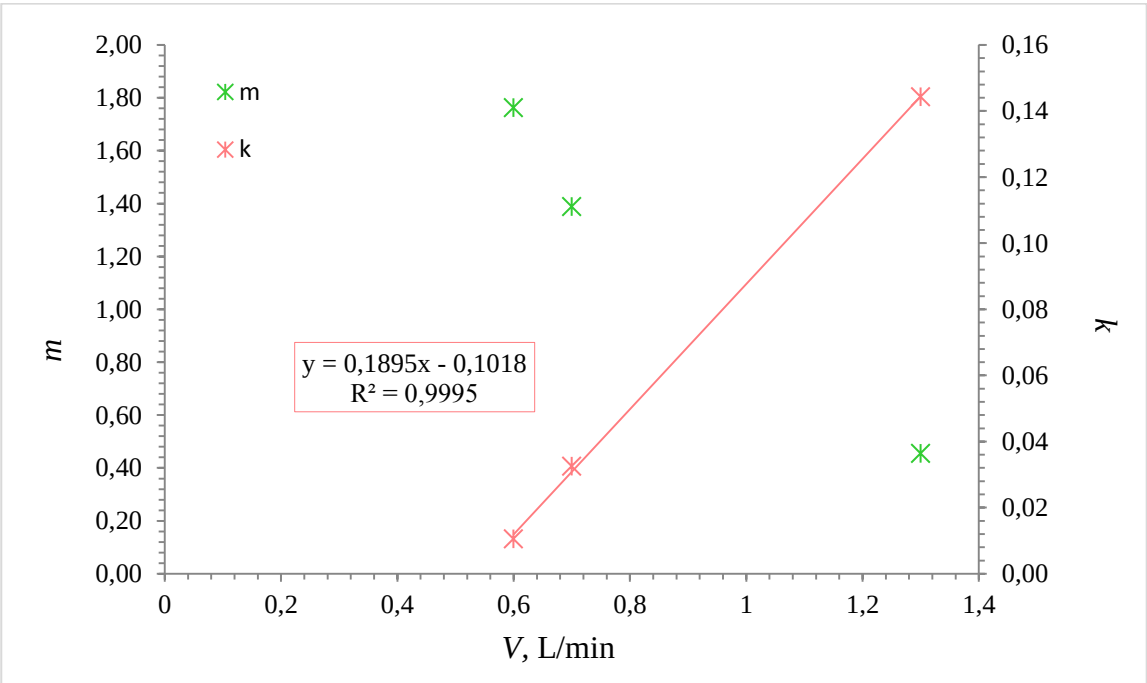
Slika 27. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o Reynoldsovoj značajci za uzorak od 0,7% Al_2O_3 suspendiranih u vodi i glicerolu pri različitim protocima hladnog fluida



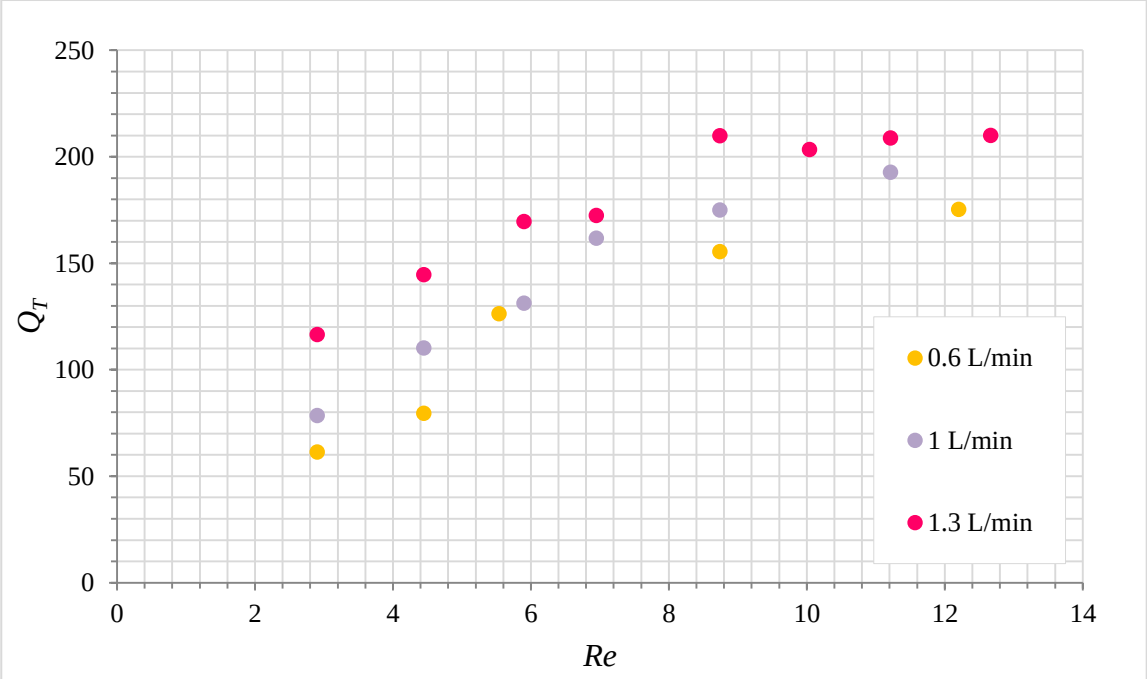
Slika 28. Ovisnost Nusseltove i Prandltove značajke o Reynldsovoj

Tablica 16. Eksperimentalno određivanje eksponenta *m* i faktora *k* pri različitim protocima

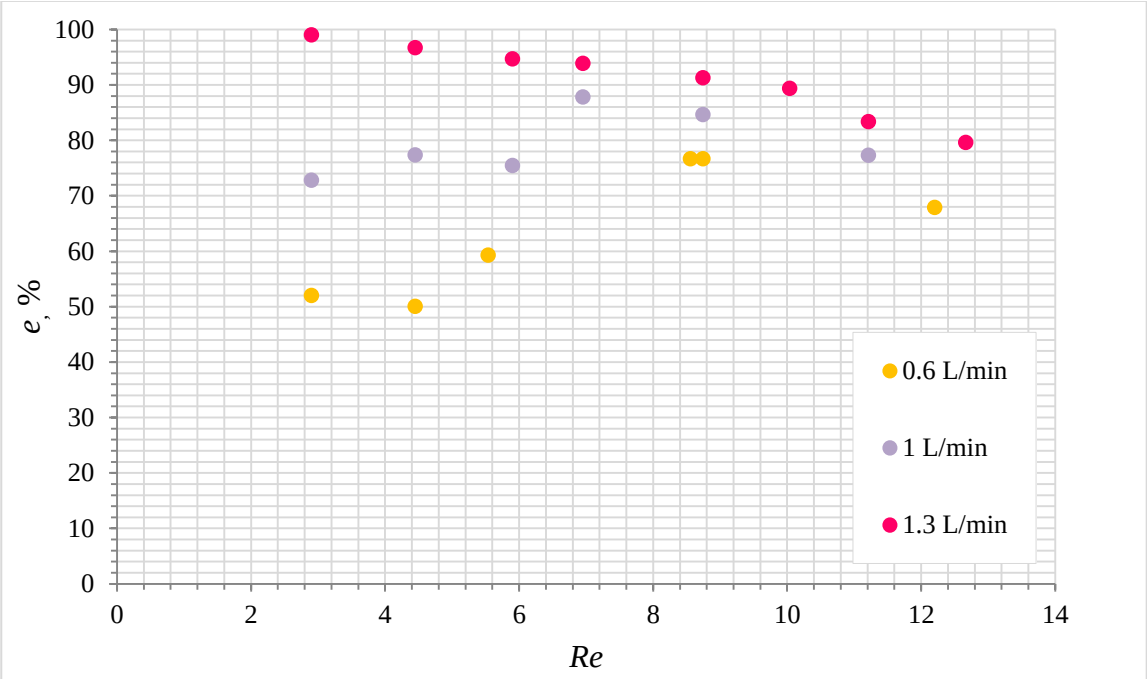
V, L/min	*m*	*k*
0,6	1,7622	0,0105
1	1,3885	0,0325
1,3	0,4547	0,1443



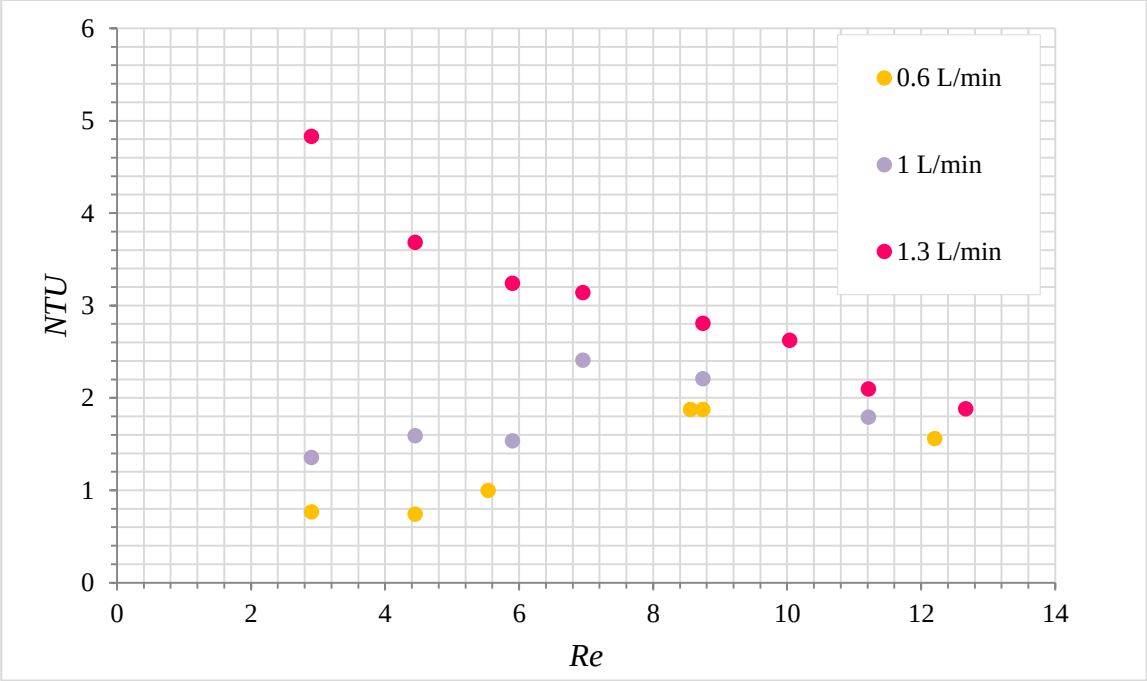
Slika 29. Ovisnost eksponenta *m* i faktora *k* o protoku



Slika 30. Grafička ovisnost ukupno prenesene topline i Reynoldsova broja



Slika 31. Grafička ovisnost izračunate efikasnosti i Reynoldsova broja



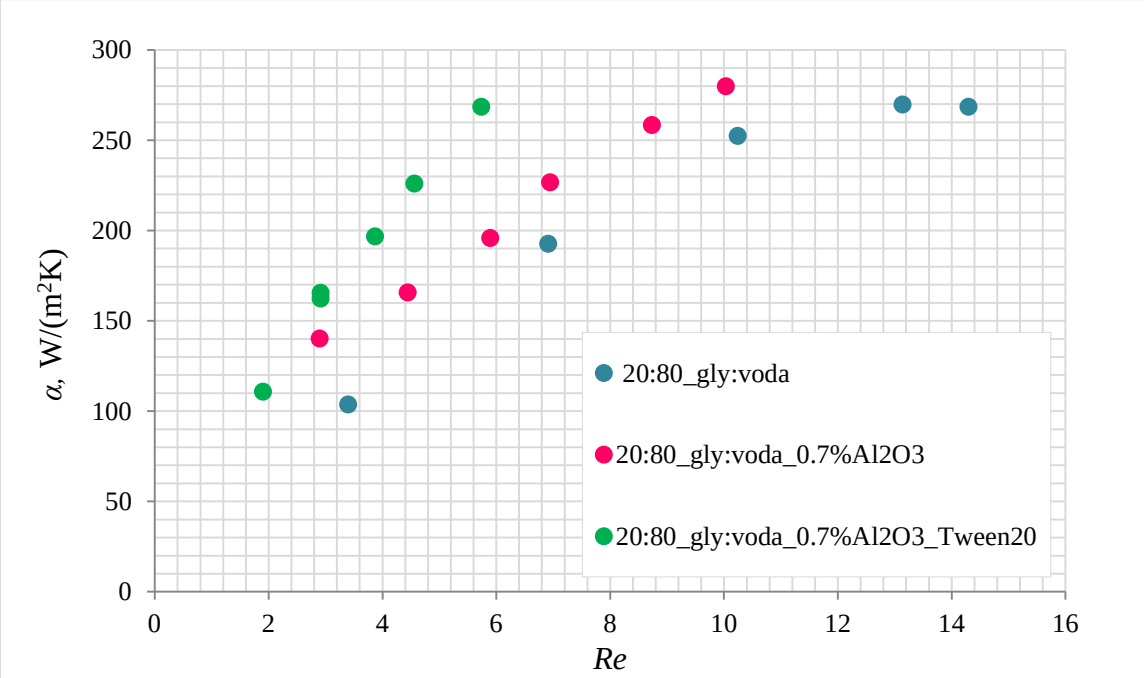
Slika 32. Grafička ovisnost broja jedinica prijenosa i Reynoldsova broja

4.4.2. Rezultati mjerenja sa stabilizatorom

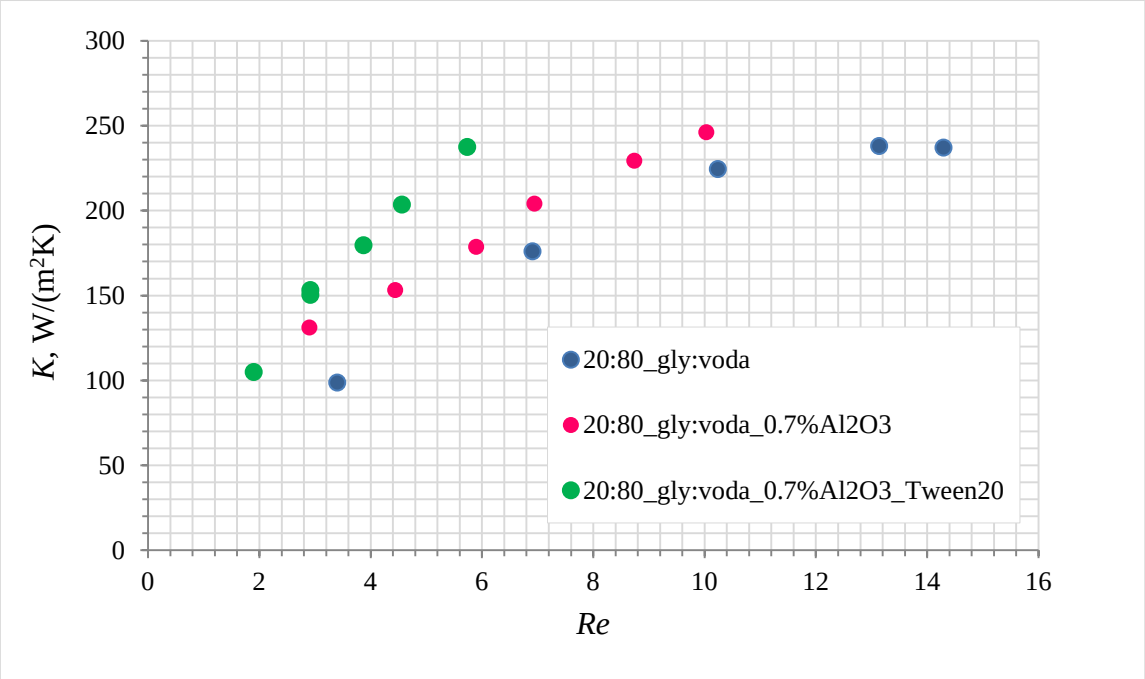
Grafovi u ovom poglavlju napravljeni su na temelju mjerenja s:

1. 20% glicerola i 80% vode
2. 20% glicerola, 80% vode i 0,7% Al_2O_3
3. 20% glicerola, 80% vode, 0,7% Al_2O_3 i 0,5% stabilizatora Tween 20,

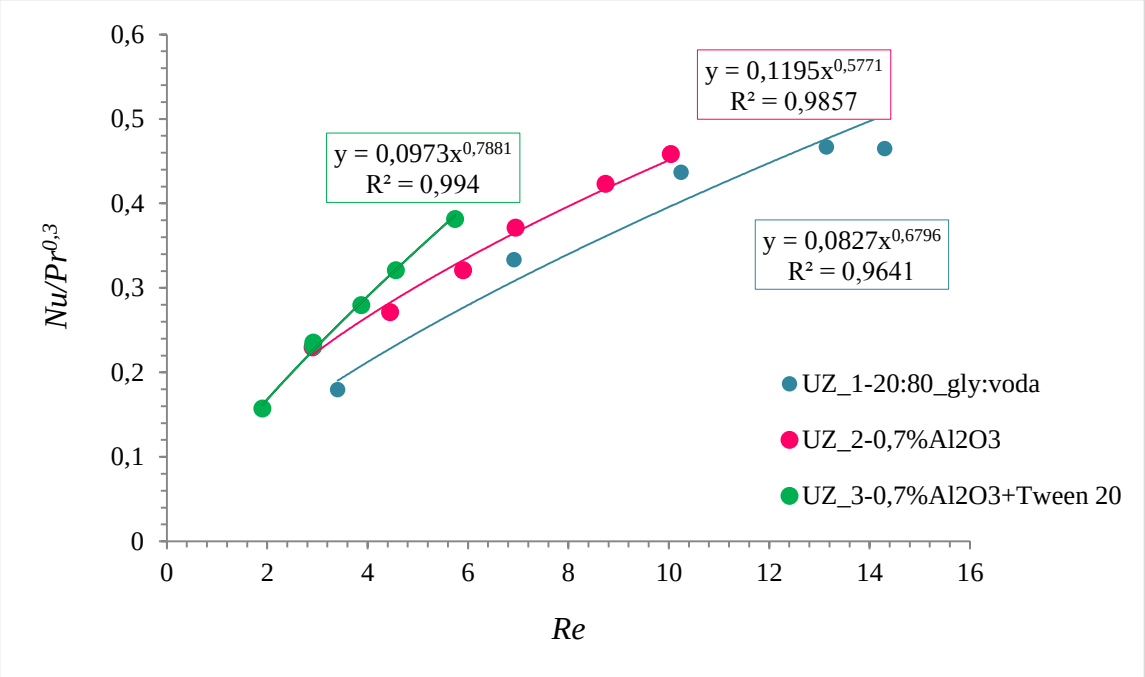
pri konstantnom protoku hladnog fluida od 1,3 L/min i različitim vrijednostima protoka toplog nanofluida.



Slika 33. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o Re značajci pri konstantom protoku hladnog fluida od 1300 mL/min, te različitim vrijednostima protoka toplog fluida



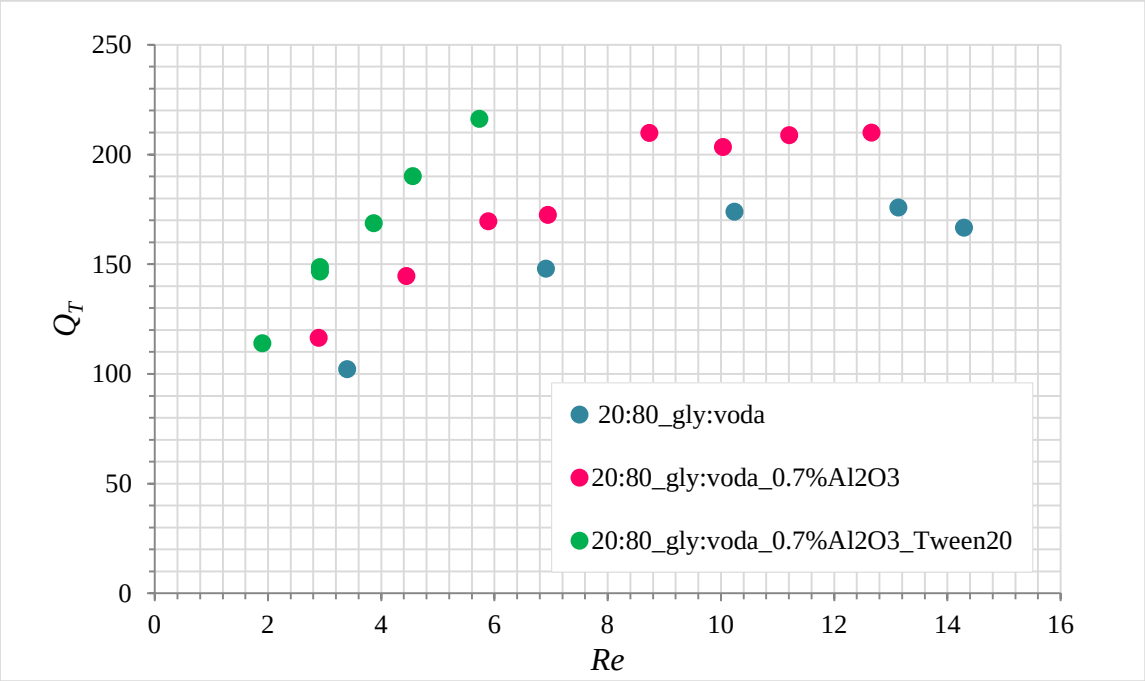
Slika 34. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o Re značajci pri konstantom protoku hladnog fluida od 1300 mL/min, te različitim vrijednostima protoka toplog fluida



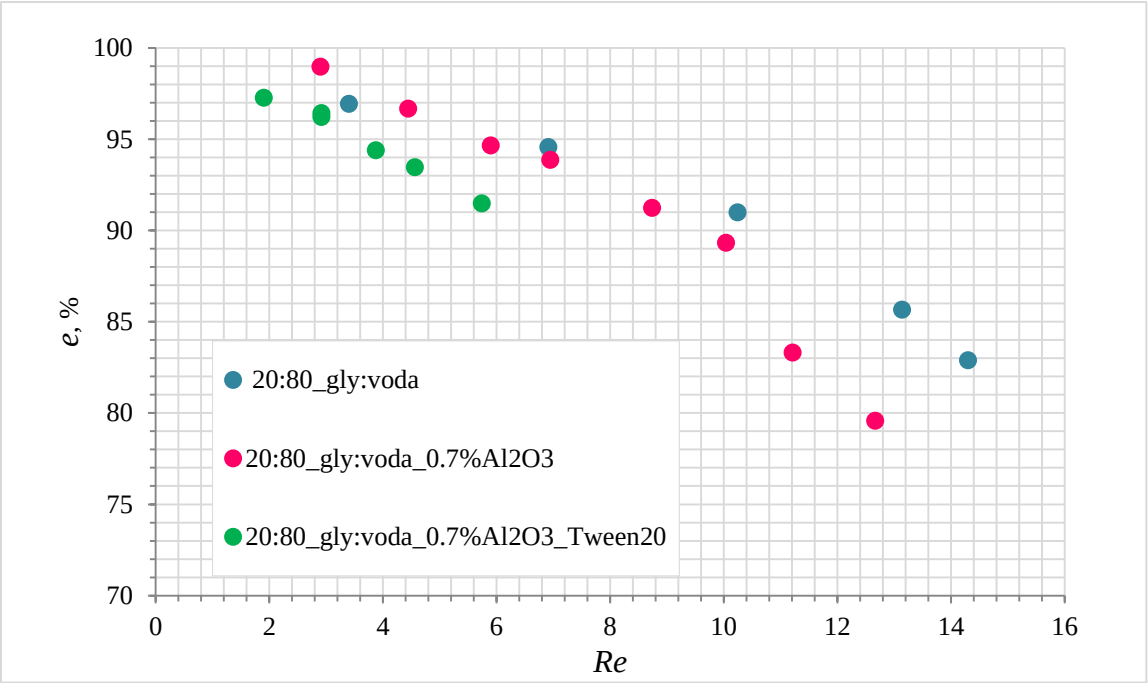
Slika 35. Ovisnost Nusseltove i Prandltove značajke o Reynldsovoj značajci za 20:80-glicerol:voda, suspenzije koje sadrže 0,7% nanočestica Al_2O_3 koje su raspršene u 20% glicerola i 80% vode, te pomiješane sa stabilizatorom Tween 20

Tablica 17. Eksperimentalno određivanje eksponenta *m* i faktora *k* za uzorke koji sadrže 20% glicerola i 80% vode

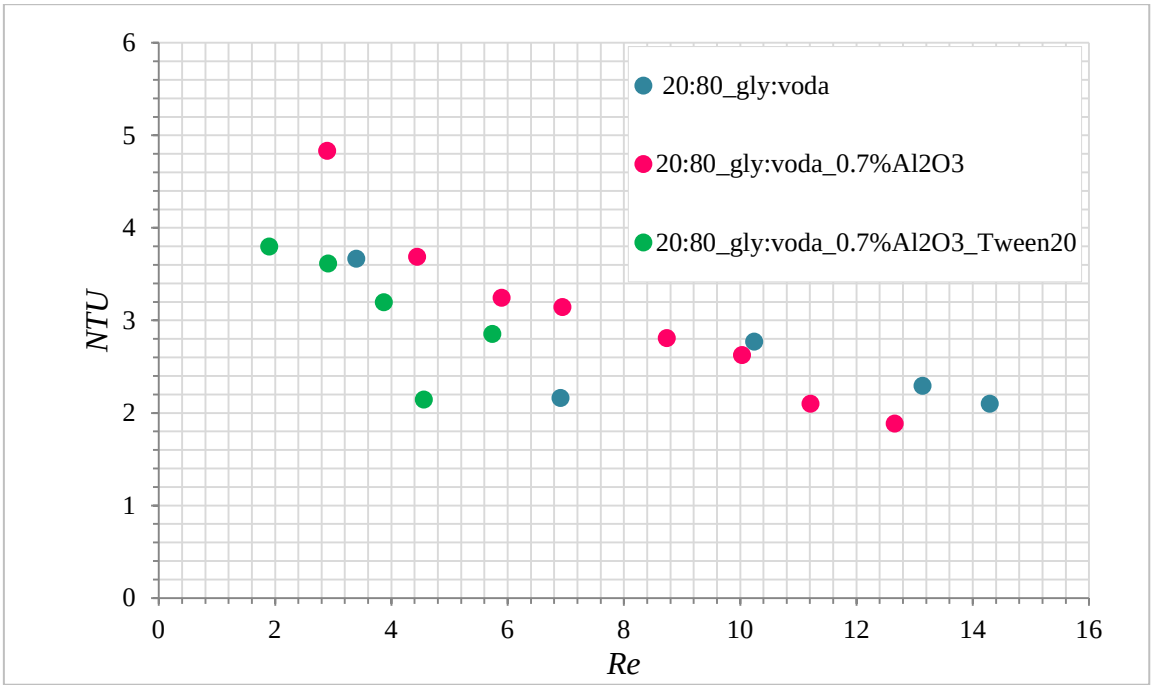
UZORAK	*m*	*k*
1	0,6796	0,0827
2	0,5771	0,1195
3	0,7881	0,0973



Slika 36. Grafička ovisnost ukupno prenesene topline i Reynoldsova broja



Slika 37. Grafička ovisnost izračunate efikasnosti i Reynoldsova broja



Slika 38. Grafička ovisnost broja jedinica prijenosa i Reynoldsova broja

5. RASPARAVA

5.1. STABILNOST I TERMO-FIZIKALNA SVOJSTVA

5.1.1. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva čiste nanosuspenzije

Da bi se nanofluid mogao uspješno koristiti u izmjenjivačima topline potrebno je prethodno pripremiti stabilnu nanosuspenziju te odrediti njegova osnovna fizikalno - toplinska svojstva (viskoznost, gustoću, specifični toplinski kapacitet, koeficijent toplinske vodljivosti…). Pregledom literature, može se zaključiti da suspenzija treba biti stabilna oko mjesec dana da bi se mogla koristiti u izmjenjivaču topline. Miješanjem vode i glicerola u masenom omjeru 80:20 s različitim volumnim udjelima nanočestica Al_2O_3 dobivena je stabilna nanosuspenzija više od 30 dana. Stabilnost je postignuta djelovanjem ultrazvučne sonde u trajanju od 1 sat, pri amplitudi 20%. Kako bi se poboljšala stabilnost ispitana su termo-fizikalna svojstva, stabilnost i primjena nanofluida u IT uz dodatak različitih stabilizatora.

Da bi se odredio period stabilnosti nanosuspenzije, vizualno je praćeno da li dolazi do sedimentacije. *Slika 14 a)* snimljena je nakon 7 dana i nije vidljiva bistra zona. Na *slici 14 b)* koja je slikana nakon mjesec dana, također nije vidljiva bistra zona. Osim vizualne metode, stabilnost suspenzija bez stabilizatora za različite volumne udjele nanočestica, definirana je i promjenom nefelometrijskih jedinica turbiditeta do 50 dana. Na *slici 15.* može se uočiti manja promjena broja nefelometrijskih jedinica s vremenom za manje koncentracije nanočestica. Naime, ukoliko dolazi do sedimentacije čvrstih čestica u kapljevini, broj nefelometrijskih jedinica će se smanjivati ili povećavati, ovisno o tome da li svjetlost prolazi kroz bistru ili ugušćenu sedimentacijsku zonu. Najveća nestabilnost nanosuspenzije može se uočiti (najveća promjena broja nefelometrijskih jedinica) pri najvećim koncentracijama nanočestica (φ=1,4%).

Kako bi se ispitala valjanost jednadžbi za određivanje termo-fizikalnih svojstava nanofluida provedeno je eksperimentalno mjerenje gustoće, viskoznosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske vodljivosti, pri sobnoj temperaturi, pomoću instrumenata koji su opisani u poglavlju 3.2.. Izračunate i izmjerene vrijednosti gustoće prikazane su na *slici 16.*, vidljivo je da gustoća raste zajedno s povećanjem volumnog udjela nanočestica u suspenziju. Odstupanje između teorijske i eksperimentalne vrijednosti je malo i iznosi do 1,5 % (tablica 9).

Slika 17. prikazuje ovisnost smičnog naprezanja o smičnoj brzini za nanofluid volumne koncentracije 0,3% pri različitim temperaturama, ovisnost je linearna, a smično naprezanje se povećava s povećanjem smične brzine. Ovakva ovisnost ukazuje da se suspenzija ponaša kao newtonska tekućina te je za svaku temperaturu dana jednadžba reološkog ponašanja. Reološko ponašanje određeno je za sve pripremljene suspenzije u rasponu temperatura od 15 do 55 °C te su njihove viskoznosti prikazane u ovisnosti o temperaturi, za sve volumne udjele nanočestica (*slika 18.*). Viskoznost ispitivanih suspenzija povećava se sniženjem temperature i povećanjem volumnog udjela nanočestica. Odstupanje je vidljivu za najvišu temperaturu. Do ovog odstupanja dolazi u području niskih viskoznosti nanofluida kada dolazi do većih odstupanja u mjerenju smičnog naprezanja (*slika 18*). 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 [20]. Međutim, nemoguće je izbjeći povećanje gustoće i viskoznosti do kojeg dolazi, između ostalog i zbog *Brownovog* gibanja raspršenih nanočestica u kapljevini čime se povećava gustoća i viskoznost nanofluida [21]. Eksperimentalni podaci za viskoznosti pokazuju na *slici 19.* da viskoznost raste zajedno s povećanjem volumnog udjela nanočestica u suspenziju. Odstupanje između teorijske i eksperimentalne vrijednosti je veliko (tablica 10). Prema Einstenovoj jednadžbi viskoznost suspenzije ovisi samo o koncentraciji raspršenih čestica. Einsteinova teorija ne uzima u obzir hidrodinamičke smetnje i *Brownovo* gibanje čestica [21].

Kako u literaturi postoji čitav niz predloženih izraza za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti, ispitani su neki od njih (tablica 2). U tablici 11. prikazane su dobivene vrijednosti, vidljivo je da se s odabranim jednadžbama dobivaju slične vrijednosti, a u proračunu je korišten izraz prema Waspu. Povećanjem koncentracije nanočestica, a zbog povećanog koeficijenta toplinske vodljivosti nanočestica, povećava se koeficijent toplinske vodljivosti cijele suspenzije. Njihove vrijednosti određene su eksperimentalno na instrumentu *Transient hot bridge* 1 (THB 1). Na *slici 20* i u tablici 12 vidljivo je dobro slaganje teorijske i eksperimentalne vrijednosti za toplinsku vodljivost.

Na *slici 21* je prikazana usporedba izmjerenog i izračunatog specifičnog toplinskog kapaciteta nanofluida. Specifični toplinski kapacitet metalnih oksida je manji nego kod kapljevina te se vidi smanjenje toplinskog kapaciteta nanofluida s povećanjem volumne koncentracije čestica. Također je vidljivo i veće odstupanje između izmjerenih i izračunatih vrijednosti (tablica 13). Do ove pogreške dolazi zbog metode koja se koristila pri određivanju koeficijenta

temperaturne vodljivosti. Kako bi se izbjegla konvekcija u kapljevini prilikom određivanja koeficijenta temperaturne vodljivosti, sve suspenzije su gelirane, određen im je koeficijent toplinske vodljivosti, te izračunat specifični toplinski kapacitet. Iako dolazi do odstupanja od vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta izračunatih jednadžbom prema modelu I, odstupanja su znatno manja nego s podacima dobivenim mjerenjima u kapljevitoj fazi. Također, višestrukim mjerenjima u geliranim uzorcima, dokazana je reproducibilnost.

Uvidom u termo-fizikalna svojstva i stabilnost pripravljenih suspenzija, suspenzija sa 0,7 vol% nanočestica odabrana je za primjenu u pločastom izmjenjivaču topline te za ispitivanje sa stabilizatorima.

5.1.2. Stabilnost i termo-fizikalna svojstva nanosuspenzije sa stabilizatorom

Slike 22 i 23 prikazuje pripravljene nanosuspenzije sa stabilizatorima (0,7 vol%). Ispitivani stabilizatori su arapska guma (ω=2,5 mas%), Triton X100 (0,5 mas%) i Tween 20 (0,5 mas%). U nanosuspenziji s dodatkom arapske gume došlo je do sedimentacije nanočestica unutar 7 dana. Nanosuspenzije pripravljene sa stabilizatorima Tween 20 i Triton X100 pokazale su bolju stabilnost. Osim vizualnog određivanja stabilnosti suspenzija sa stabilizatorom, određena su i njihova termo-fizikalna svojstva. Pri određivanju koeficijenta toplinske vodljivosti sa stabilizatorom Triton X100 uočava se manje odstupanje pri višestrukom ponavljanju mjerenja. Ovo se može pripisati nestabilnosti suspenzije. U tablici 14 prikazane su vrijednosti gustoće za sustave sa stabilizatorom. Nanosuspenzija sa stabilizatorom Tween 20 ima najmanju gustoću (dok najveću gustoću ima sustav s Arapskom gumom.

Grafički prikaz (*slika 24. a), c) i d)*) ovisnosti smične brzine o smičnom naprezanju pokazuje newtonowsko ponašanje kapljevine jer ovisnost je linearna te pravac prolazi kroz ishodište, a smično naprezanje se povećava s povećanjem smične brzine. Uzorak s arapskom gumom (*slika 24. b)*) ukazuje da se suspenzija ponaša kao Binghamov fluid. Kod Binghamovih fluida potrebno je savladati početno naprezanje da se suspenzija počne ponašati kao fluid.

Ovisnost viskoznosti čiste nanosuspenzije i nanosuspenzije sa stabilizatorima (arapska guma, Tween 20 i Triton X100) o temperaturi prikazana je na *slici 25*. Kod svih uzoraka vidljivo je da s povećanjem temperature viskoznost opada. Arapska guma pokazuje najveću viskoznost, dok ostali stabilizatori imaju viskoznost sličnu kao i čista nanosuspenzija.

Tablica 15 prikazuje vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti za sustave koji u sebi sadrže stabilizatore. Dodatkom stabilizatora u čistu nanosuspenziju smanjuje se koeficijent toplinske vodljivosti.

Kao najbolji stabilizator pokazao se stabilizator Tween 20 jer je njegovom primjenom dobivena stabilna suspenzija duže od 2 mjeseca, a gustoća i viskoznost suspenzije se neznatno razlikuju od suspenzije bez stabilizatora.

5.2. MJERENJA U IZMJENJIVAČU TOPLINE

5.2.1. Mjerenja s različitim protokom toplog fluida i s konstantnom koncentracijom čestica Al_2O_3

Utjecaj hidrodinamičkih uvjeta i volumnog udjela nanočestica na prijenos topline u pločastom izmjenjivaču topline, prikazani su na slikama od 26 do 32. Također su predložene korelacijske jednadžbe (Nu=f(Re, Pr)) koje su karakteristične za različite protoke hladnog nanofluida s volumnim udjelom nanočestica od 0,7% te za isti protok čistog fluida i sa dodatkom stabilizatora.

Povećanjem Re značajke na strani toplog fluida povećava se vrijednost koeficijenta prijelaza topline i ukupnog koeficijenta prolaza topline nanofluida (*slika 26. i 27*.). Naime, povećanjem protoka poboljšavaju se hidrodinamički uvjeti i prijenos topline. Nadalje, može se primijetiti da pri većim protocima nanofluida dolazi do odstupanja. Razlog je što se pri većim protocima ne postižu stacionarni uvjeti.

Iz *slike 29*. je vidljivo da eksponent *m* opada s povećanjem protoka te da su njegove vrijednosti za niže protoke hladnog fluida iznad 1. Budući da se vrijednost eksponenta *m* povezuje s hidrodinamičkim uvjetima i čija je vrijednost za razvijeno turbulentno područje oko 0,8, zaključeno je da su ovako visoke vrijednosti eksponenta dobivene zbog premalih protoka fluida za ovu veličinu i konstrukciju IT. Daljnja mjerenja i usporedbe (dodatak stabilizatora) provedene su pri najvećem protoku hladnog fluida.

Slika 30. prikazuje kako prenesena toplina sa toplog na hladni fluid raste s porastom protoka nanofluida te s porastom protoka hladnog fluida. Kako se poboljšavaju hidrodinamički uvjeti, bez obzira da li se radi o povećanju protoka na strani toplog ili hladnog fluida, dolazi i do povećanja prenesene topline.

Povećanjem protoka nanofluida dolazi do smanjenja efikasnosti (*slika 31.*) i broja jedinica prijenosa tvari, *NTU* (*slika 32.*) izmjenjivača topline. Efikasnost je funkcija *NTU*, a iz jednadžbe 3. se vidi da je *NTU* u direktnoj vezi sa koeficijentom prolaza topline i protokom. Budući da se povećanjem protoka povećava i koeficijent prolaza topline, to dovodi do smanjenja efikasnosti, odnosno veći protoci smanjuju efikasnost rada izmjenjivača. Dakle, pri većim protocima dolazi do smanjenja efikasnosti, broja jedinica prijenosa u izmjenjivaču topline. Unatoč smanjenju djelotvornosti povećanjem protoka toplog fluida, dobivene djelotvornosti su visoke. Odstupanje od navedenog trenda ponovno je vidljivo za niže protoke hladnog fluida.

5.2.2. Mjerenja sa stabilizatorom

U nanosuspenziju koja se sastoji od 20% glicerola, 80% vode i 0,7 % Al_2O_3 dodano je 0,5% stablilizatora Tween 20. Nedostatak ovog stabilizatora je pojava pjenjenja zbog smanjenja površinske napetosti, ali iz rezultata koji slijede, proizlazi da to ne utječe na prijenos topline. Na slikama od 33 do 38 prikazana su rezultati dobiveni u PIT korištenjem fluida bez dodatka nanočestica te nanofluida istog volumnog udjela nanočestica sa i bez stabilizatora.

Uspoređujući nanosuspenziju bez dodatka stabilizatora i s dodatkom stabilizatora vidljiv je porast koeficijenta prijelaza topline i koeficijenta prolaza topline. Dodatkom stabilizatora se sprječava sljepljivanje nanočestica i nastajanje aglomerata što pospješuje prijenos topline bez obzira na smanjenje koeficijenta toplinske vodljivosti do kojeg dolazi korištenjem stabilizatora (*slika 33. i 34.*). Iz slika je vidljivo da fluid bez dodanih nanočestica ima najmanji koeficijent prijenosa topline.

Utjecaj hidrodinamičkih uvjeta na toplinska i reološka svojstva nanofluida prikazana su na *slici 35.* Predložene su korelacijske jednadžbe koje su karakteristične za različite protoke toplog nanofluida s volumnim udjelom nanočestica od 0,7% i stabilizatorom Tween 20. Eksperimetalno su određeni parametri *m* i *k*. Tablica 17. pokazuje rast parametra *m*, a pad parametra *k* s dodatkom stabilizatora, što se povezuje s poboljšanim uvjetima za prijenos topline. To potvrđuje i *slika 36.* gdje je vidljivo da se dodatkom stabilizatora povećava ukupno prenesena toplina. Gustoća nanosuspenzije sa stabilizatorom je veća, te se time ostvaruje veća kapacitivna brzina na strani toplog fluida, te dolazi do smanjenja efikasnosti i broja jedinica prijenosa (*slika 37.* i *38.*).

6. ZAKLJUČCI

Na temelju vizualnog praćenja instrumenta 3 u 1 FTN zaključeno je da su pripremljene suspenzije stabilne u periodu od dva mjeseca.

Nanofluid se pokazao prikladnim za upotrebu u pločastom izmjenjivaču topline. Ne uzrokuje začepljenja, a izmjenjivač se lako čisti.

Povećanjem volumnog udjela nanočestica u baznim fluidima, te povećanjem protoka toplog fluida uz konstantni protok hladnog fluida, dolazi do povećanja koeficijenta prijelaza i ukupnog prolaza topline nanofluida. Također se povećava se i izmijenjena toplina između toplog i hladnog fluida. Dodatak stabilizatora ima isti učinak.

Dobivene su korelacijske jednadžbe koje definiraju utjecaj hidrodinamike na prijenos topline u nanofluidu.

Vrijednost eksponenta *m*, povećava se u usporedbi s vrijednostima dobivenih za vodu u laminarnim uvjetima strujanja.

Dobivene vrijednosti djelotvornosti su visoke, ali se smanjuju povećanjem protoka nanofluida.

7. POPIS SKRAĆENICA I SIMBOLA

Simboli

A	površina prijenosa topline, m^2
a	širina ploče, m
b	razmak između ploča, m
c_p	specifični toplinski kapacitet, J/(kgK)
F	Foulingov faktor, -
K	ukupni koeficijent prolaza topline, W/m^2K
l	duljina, m
m	masa, kg
$\dot{m}$	maseni protok, kg/s
$\dot{Q}$	toplinski fluks, J/s
Δp	pad tlaka, Pa
T	temperatura, K
ΔT_{LM}	srednja logaritamska razlika temperature, K
V	volumen, m^3
v	brzina, m/s

Grčka slova

α	koeficijent prijelaza topline, kJ/m^2
β	koeficijent toplinske ekspanzije nanofluida, -
φ	volumni udio nanočestica,-
η	kinematička viskoznost, m^2/s
$\varphi_č$	volumni udio čvrstih čestica, -
λ	koeficijent toplinske vodljivosti stjenke, W/mK
η	dinamička viskoznost, Pas
ρ	gustoća, kg/m^3
ξ	faktor trenja,-

Indeksi

b_f	bazni fluid
č	čestica
e	ekvivalentno
e_{ff}	nanolfuidi
f	fluid
H	hladni
iz	izlaz
LM	logaritam
n_f	nanofluid
T	topli, talište
ul	ulaz
V	vrelište
v,w	voda

Bezdimenzijske značajke

$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	Nusseltova značajka
$P_r = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$	Prandtlova značajka
$R_e = \frac{v \cdot d_e \cdot \rho}{\eta}$	Reynoldsova značajka

Skraćenice

GLY	glicerol
NTU	number of transfer units

7. LITERATURA

1. S. S. Botha, *Synthesis and characterization of nanofluids for cooling applications*, South African institute for advanced materials chemistry, faculty of natural sciences university of the Western Cape, 2007.
2. http://dokumentarnifilmovi.net/znanost/nano-svijet/
3. J. Ramsden, *Essentials of Nanotechnology*, ISBN 978-87-7681-418-2, str 10., 2009.
4. http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527331972_c01.pdf
5. S. K. Das, S. U. S. Choi , H. E. Patel, *Heat Transfer in Nanofluids— A Review, vol. 27,*str. 10., 2006
6. E.V. Timofeeva, *Nanofluids for Heat Transfer – Potential and Engineering Strategies,* Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, Dr. Amimul Ahsan (Ed.) Agronne, IL, USA, 2011.
7. E. V. Timofeeva, *Nanofluids for Heat Transfer– Potential and Engineering Strategies,* Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL USA, 2011.
8. W. Yu, H. Xie, *Review Article A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications,* School of Urban Development and Environmental Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai ,vol. 2012, čl. ID 435873, str. 17., 2012.
9. K. V.Wong, O. de Leon, *Applications of Nanofluids: Current and Future, Mechanical and Aerospace Engineering Department,* Advances in Mechanical Engineering, vol. 2010, čl. ID 519659, str. 11., 2010.
10. U. Ur Rehman, *Heat Transfer Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchangerthrough CFD Studies,*Magistarski rad, Department of Chemical and Biological Engineering, Division of Chemical Engineering, Goteborg, Sweden, 2011.
11. A. Sander, predavanje, *Toplinsko procesno inženjerstvo*, Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, FKIT, Zagreb, 2012.
12. E. Beer, *Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije*, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, str. 227-287, 1994.
13. S.S. Mallick, A. Mishra, L. Kundan, *An investigation into modelling thermal conductivity for alumina–water nanofluids*, str. 234-244, 2013.
14. K. Khanafe, K. Vafai, *A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids*, International Journal of Heat and Mass Trnasfer, vol. 54, str.4410-4428, 2011.

15. H. O'Hanley, J. Buongiorno, T.McKrell, L.Hu, *Measurement And Model Validation On Nanofluid Specific Heat Capacity With Differential Scanning Calorimetry*, Hindawi Pub. Corp., vol. 2012, čl. ID 181079, str. 6., USA, 2012.
16. P.Sivashanmugam, *Application of nanofluids in heat transfer*, Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, poglavlje 14, Tiruchirappalli, India, 2012.
17. L. Lazić, *Numeričke metode u toplinskoj analizi*, Metalurški fakultet, Sisak, 2006.
18. A. Glasnović, predavanje, *Prijenos tvari i energije*, Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, Zagreb, 2010.
19. http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/brazed-plate-heat-exchangers/cb30--cbh30.pdf
20. J.Prlić Kardum, M. Samardžija, Š. Kamenić, M. Kovačić, *Reološka i toplinska karakterizacija nanofluida*, Proceedings 15th Ružička days: Danas znanost - sutra industrija , str. 125-138, Vukovar, 2015.
21. V. Ya. Rudyak, *Viscosity of Nanofluids—Why It Is Not Described by the Classical Theories*, Department of Theoretical Mechanics,vol. 2, br. 3, str. 14., Russian Federation, 2013.

8. ŽIVOTOPIS

Marina Samardžija

Marina Samardžija rođena je 15. listopada 1988. godine u Vinkovcima. Pohađala je osnovnu školu „Josip Kozarac“ u Vinkovcima. Nakon završene osnovne škole, upisala je Ekonomsku i trgovačku školu „Ivan Domac“ koju završava 2007. godine. Nakon dvije godine upisuje preddiplomski studij Kemijsko inženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu kojega završava u rujnu 2013. Iste godine upisuje diplomski studij Kemijsko inženjerstvo, smjer Kemijsko procesno inženjerstvo.