

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



**CERCETĂRI PRIVIND DEZVOLTAREA DE NOI MATERIALE
PE BAZĂ DE POLIETILEN GLICOL CU NANOPARTICULE
PENTRU APLICAȚII TERMICE**

ing. Marius Ionuț CHERECHEȘ

Conducător de doctorat: prof. dr. habil. ing. Alina-Adriana MINEA

IAȘI, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 24 aprilie 2024 la ora 12:00 în amfiteatru T2, corp Rectorat, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

"CERCETĂRI PRIVIND DEZVOLTAREA DE NOI MATERIALE PE BAZĂ DE POLIETILENGLICOL CU NANOPARTICULE PENTRU APLICAȚII TERMICE"

elaborate de domnul **CHERECHES MARIUS IONUȚ** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. **BĂDĂRĂU Gheorghe**, conf. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" din Iași președinte
2. **MINEA Alina Adriana**, prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" din Iași conducător de doctorat
3. **BUJOREANU Leandru-Gheorghe**, prof. univ. dr. ing., Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" din Iași referent oficial
4. **MATEI Ecaterina**, prof. univ. dr. ing., Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București referent oficial
5. **DIMITRIU Dan-Gheorghe**, Prof. dr. fiz., Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,



Secretar universitate,

.....

*pentru susținerile online se va preciza link-ul și soluția de software

CUPRINS

	pag. teza/rezumat	
CAPITOLUL 1. INTRODUCERE	7	5
1.1. Justificarea alegerii temei de cercetare	7	5
1.2. Oportunitatea utilizării fluidelor îmbunătățite cu nanoparticule	9	6
1.3. Obiectivele generale ale tezei	14	7
 CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII PRIVIND FLUIDELE PE BAZĂ DE POLIETILEN GLICOL ȘI SUSPENSILE ACESTORA CU NANOPARTICULE	 15	 8
 CAPITOLUL 3. METODOLOGIA DE LUCRU ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE	 37	 9
3.1. Alegerea materialelor și echipamentele utilizate pentru prepararea suspensiilor	39	11
3.2. Metode de caracterizare a materialelor	42	12
3.2.1 Analiza structurii: metodologia de lucru și echipamentele utilizate	42	12
3.2.2 Analiza stabilității, a proprietăților termofizice și electrice. Metodologia de lucru și echipamentele utilizate	44	-
3.3. Analiza incertitudinii datelor experimentale	48	14
 CAPITOLUL 4. REZULTATE EXPERIMENTALE	 49	 15
4.1. Prepararea noilor fluide	49	15
4.2. Caracterizarea materialelor	53	-
4.2.1 Caracterizarea nanoparticulelor	53	-
4.2.2 Caracterizarea fluidului de bază	61	-
4.3. Rezultate experimentale privind determinarea pH-ului	69	18
4.4. Rezultate experimentale privind determinarea conductivității termice	71	19
4.4.1 Modele teoretice utilizate în analiza datelor experimentale	71	19

4.4.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă	72	20
4.4.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii	79	23
4.5. Rezultate experimentale privind determinarea căldurii specifice	85	26
4.5.1 Modele teoretice utilizate în estimarea căldurii specifice	85	26
4.5.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă	85	27
4.5.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii	88	27
4.6. Rezultate experimentale privind comportamentul reologic și vâscozitatea	96	31
4.6.1 Modele teoretice utilizate în estimarea vâscozității nanofluidelor	96	31
4.6.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă	97	32
4.6.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii	108	37
4.7. Rezultate experimentale privind conductivitatea electrică	127	41
4.7.1 Modele teoretice utilizate în estimarea conductivității electrice	127	41
4.7.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă	128	41
4.7.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii	131	43
CAPITOLUL 5. ANALIZA COMPORTĂRII NANOFUIDELOR PE BAZĂ DE POLIETILEN GLICOL ÎN APLICAȚII TERMICE	138	46
5.1 Sinteza proprietăților termofizice ale nanofluidelor PEG 400	138	-
5.2 Evaluarea transferului de căldură convectiv a mai multor fluide nano-îmbunătățite pe bază de PEG	141	46
CAPITOLUL 6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	149	52
BIBLIOGRAFIE	155	58
ANEXA 1 LISTĂ NOTAȚII, ABREVIERI	171	-
ANEXA 2 LISTĂ FIGURI	174	-
ANEXA 3 LISTĂ TABELE	179	-
ANEXA 4 ACTIVITATE ȘTIINȚIFICĂ - EFECTUATĂ PE TEMATICA TEZEI DE DOCTORAT	181	60

MULȚUMIRI

*Elaborarea și finalizarea acestei teze de doctorat nu ar fi fost posibile fără coordonarea continuă a doamnei **prof. univ. dr. ing. Alina Adriana MINEA**, în calitate de conducător de doctorat, care a reușit de-a lungul anilor să țină sub control evoluția cercetărilor prin îndrumări concise, răbdare și înțelegere. De asemenea, îmi exprim gratitudinea către doamna **prof. univ. dr. ing. Alina Adriana MINEA**, pentru cooperarea internațională și pentru că a creat oportunitatea și mi-a susținut participarea la diferite proiecte și training-uri europene în domeniul tezei de doctorat.*

*Alese mulțumiri și întreaga mea recunoștință doamnei **prof. univ. dr. habil. ing. Gabriela Huminic** de la Universitatea Transilvania Brașov, doamnei **prof. univ. dr. ing. Constanța Ibănescu** și domnului **dr. ing. Maricel Danu** de la Facultatea de Chimie Industrială, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași, cât și doamnei **dr. Dana Bejan** de la Institutul de Chimie Macromoleculară “Petru Poni” din Iași pentru suportul deosebit acordat în realizarea cercetărilor experimentale.*

*Alese mulțumiri domnului **conf. univ. dr. ing. Gheorghe Bădărău**, decan al Facultății de Știința și Ingineria Materialelor și domnului **prof. univ. dr. ing. Petrică Vizureanu**, director al Departamentului de Tehnologii și Echipamente pentru Procesarea Materialelor, pentru sprijinul profesional și accesul la o infrastructură adecvată.*

*De asemenea, adresez mulțumiri tuturor cadrelor didactice de la Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor, și în mod deosebit soției mele, doamnei **asist. univ. dr. ing. Elena Ionela Cherecheș** pentru îndrumare, încurajare, răbdare și sfaturile oferite.*

*Recunoștința și mulțumirile mele se îndreaptă și către **membrii comisiei**, numiți referenți oficiali, pentru răbdarea cu care au analizat lucrarea de față, precum și pentru aprecierile și sugestiile formulate.*

Marius Ionuț CHERECHEȘ

2024

CAPITOLUL 1.

INTRODUCERE

1.1. Justificarea alegerii temei de cercetare

Polietilen glicolul (PEG) poate fi utilizat ca fluid de transfer de căldură datorită proprietăților sale termofizice excelente, precum și capacității sale ridicate de stocare a căldurii latente la temperaturi de topire care pot fi ajustate prin fluctuația masei molare a polimerului, așa cum a fost explicat în Zalba și colab. [1] și Minea [2].

Pentru realizarea noilor fluide, tehnica este similară cu cea aplicată pentru nanofluide (*termenul „nanofluid” se aplică unei varietăți de fluide îmbunătățite cu nanoparticule*) și include amestecarea de PEG lichid cu nanoparticule, folosind metoda într-o singură etapă sau în două etape (în funcție de concentrația masică preconizată pentru nanoparticulele din lichidul de bază) urmată de sonicare (ultrasonare) (a se vedea [8] pentru o descriere detaliată). Procesul de fabricație este unul simplu; cu toate acestea tratamentul de sonicare (ultrasonare) este esențial pentru stabilitatea viitoare a nanofluidului și pentru evitarea sedimentării acestuia.

Trebuie avut în vedere că nanofluidele pe bază de PEG aparțin unei clase de fluide cu proprietăți variabile și numărul (de exemplu, 200, 400, 600 etc.) este strict legat de masa molară medie, care determină și punctul de topire. Cu toate acestea, punctul de topire al PEG este mai mare pe măsură ce masa molară crește, astfel încât se poate concluziona că numai PEG-urile de până la 1000 pot fi utilizate ca posibile fluide de transfer de căldură [2].

În ceea ce privește proprietățile termofizice, studiile sunt relativ incomplete și nu există o abordare unitară și completă în literatura de specialitate. O descriere bună a unor fluide pe bază de polietilen glicol este realizată de Marcos și colab. [8], Ahmad și colab. [10] și Gomez-Merino [16] care au studiat PEG 200, PEG 400 și PEG 1000, îmbunătățite cu diferite nanoparticule (alumină, grafen, argint, MWCNT) și au reușit o reprezentare aproape completă a influenței nanoparticulelor asupra proprietăților nanofluidelor pe bază de PEG.

1.2. Oportunitatea utilizării fluidelor îmbunătățite cu nanoparticule

În ultimii ani a apărut o nouă clasă de materiale, și anume fluidele îmbunătățite cu nanoparticule în scopul maximizării unor proprietăți termofizice esențiale pentru transferul termic. Această nouă clasă de materiale este denumită în literatura de specialitate nanofluide. Nanofluidele sunt de fapt fluide clasice, la care se adaugă diferite nanoparticule în scopul creșterii conductivității termice și a capacității de transfer termic dar nu numai, fiind utilizate în multe aplicații (ca de exemplu stocarea căldurii, diverse procese chimice etc). Nanoparticulele utilizate pot fi oxizi, nanotuburi de carbon, metale pure, materiale ceramice, materiale compozite precum și combinații ale acestora.

Nanofluidele pe bază de alumina au fost cele mai intens studiate în ultimii ani ca fiind cele mai stabile și mai ușor de realizat nanofluide. Sridhara și Satapathy [17] au analizat nanofluidele pe bază de alumina urmărind conductivitatea termică, vâscozitatea și pH-ul și au concluzionat că dezvoltarea acestor nanofluide este esențială datorită numeroaselor lor aplicații, în special în schimbătoarele de căldură cu buclă închisă.

Dacă se discută despre tipurile de nanofluide pe bază de alumina, precum și despre proprietățile acestora, se poate observa că cele mai multe dintre probele studiate sunt nanofluidele pe bază de alumina și apă (vezi [18 – 25]), urmate de cele pe bază de etilenglicol (vezi [18, 20, 26, 27]), precum și diferite uleiuri. Proprietatea termofizică cea mai studiată a fost conductivitatea termică, care s-a dovedit a fi îmbunătățită cu până la 33 % [18] prin adăugarea de nanoparticule. Pe de altă parte, Guo [28] a evidențiat, în lucrările sale, că până în prezent se observă un progres semnificativ în îmbunătățirea transferului de căldură folosind nanofluide. În plus, suspensiile diluate, cu nanoparticule foarte bune conductoare și bine dispersate s-au dovedit a fi benefice pentru îmbunătățirea performanței termice a noului fluid în comparație cu fluidul de bază considerat.

1.3. Obiectivele generale ale tezei

Teza de doctorat prezintă conceperea și caracterizarea experimentală a stabilității temporale, a conductivității termice, a căldurii specifice, a comportamentului reologic și a vâscozității, precum și a conductivității electrice ale polietilen glicolului PEG 400 pur și îmbunătățit cu trei tipuri de nanoparticule și anume: două tipuri de oxizi (Al_2O_3 și ZnO) și MWCNT.

Ideea acestei cercetări a apărut datorită preocupărilor de a îmbunătăți performanța transferului de căldură în aplicațiile de încălzire și răcire prin utilizarea unor noi fluide de transfer termic. Astfel, teza de doctorat are la bază conceptul de *nanofluid*, prin utilizarea unui polietilen glicol (PEG) mai puțin utilizat ca fluid de transfer de căldură, și anume PEG 400. PEG este considerat un material promițător datorită stabilității, reciclabilității și biodegradabilității sale și care poate fi folosit cu succes în sinteza organică.

Scopul acestei teze este de a concepe un nou nanofluid pe bază de PEG 400, care să prezinte o îmbunătățire a proprietăților termofizice prin adăugarea de nanoparticule, comparativ cu lichidele clasice de transfer termic.

Obiectivele specifice ale tezei de doctorat sunt:

- O1. Obținerea experimentală de noi fluide de transfer termic pe bază de PEG 400 și dispersie de nanoparticule (Al_2O_3 , ZnO , MWCNT), cu o concentrație masică de maxim 5 %;
- O2. Studiul proprietăților morfologice ale nanoparticulelor;
- O3. Analize privind structura și puritatea fluidului de bază;
- O4. Studiul experimental privind proprietățile termofizice și electrice ale noilor fluide;
- O5. Analiza critică a rezultatelor experimentale obținute;
- O6. Studiul privind comportarea nanofluidelor în condiții de transfer de căldură convectiv.

CAPITOLUL 2.

STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII PRIVIND FLUIDELE PE BAZĂ DE POLIETILEN GLICOL ȘI SUSPENSIILE ACESTORA CU NANOPARTICULE

Din punct de vedere chimic, PEG este un compus din polieter (polyether) cu nenumărate utilizări, începând cu domeniul industrial până la domeniul medical. Structura PEG este exprimată în mod obișnuit ca $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$, compusul putând fi utilizat în diferite aplicații, ca de exemplu:

- aplicații chimice (ca lubrifiant, în studii experimentale de biochimie sau ca biomembrană, surfactant, compus de calibrare în spectrometria de masă etc);
- medicină (de exemplu, ca excipient);
- biologie (agent de aglomerare, pentru cristalizarea proteinelor);
- utilizări comerciale (tatuaje pentru monitorizarea diabetului, agent antispumant în mai multe alimente și băuturi, ca un compus în cremele de piele, dispersant pentru pasta de dinți etc.);
- aplicații industriale (ca agent de reducere a spumei, ceramică tehnică, izolator etc);
- aplicații recreative.

Denumirea PEG este de obicei urmată de un număr care semnifică masa molară medie a compusului. Nanofluidelor reprezintă un domeniu de viitor, având aplicații în operațiile de transfer termic, dar nu numai, acestea putând fi considerate și în aplicații biomedicale sau chimice relevante, ca de exemplu bioreactoarele de masă.

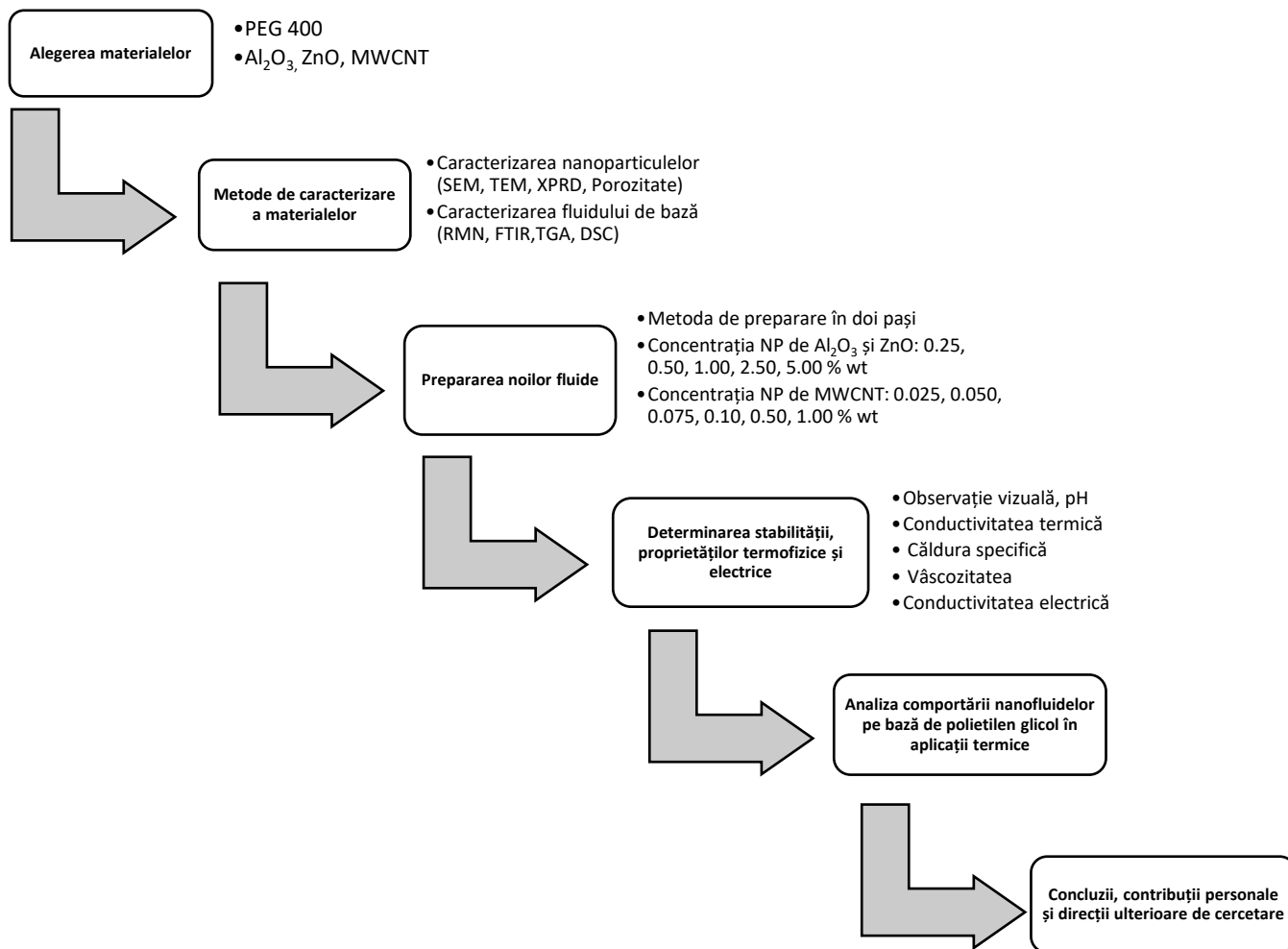
CAPITOLUL 3.

METODOLOGIA DE LUCRU ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE

Cercetările experimentale s-au desfășurat la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, precum și în colaborare cu Institutul de Chimie Macromoleculară “Petru Poni” din Iași (ICMPP) și Universitatea Transilvania din Brașov.

Cercetările s-au axat pe prepararea fluidelor pe bază de PEG 400 îmbunătățite cu trei tipuri de nanoparticule, și anume Al_2O_3 , ZnO și MWCNT, realizându-se în primă fază analize privind morfologia nanoparticulelor (analize tip SEM, TEM, XPRD, de porozitate) și puritatea fluidului de bază (analize tip RMN, FTIR, TGA, DSC). Ulterior, a fost calculată concentrația nanofluidelor și au fost realizate suspensiile. În urma analizei critice a stadiului actual al cercetărilor în domeniu, am decis să lucrez cu valori mici ale concentrației, de până în 5 % procente masice de nanoparticule, pentru a împiedica aglomerarea și sedimentarea excesivă. Probele au fost sonicate și apoi supuse studiului stabilității în soluție (observație vizuală, analize tip pH). Proprietățile termofizice (conductivitatea termică, vâscozitatea și comportamentul reologic, căldura specifică și conductivitatea electrică) ale tuturor suspensiilor au fost determinate experimental pentru a se observa avantajele dar și dezavantajele fiecărui fluid conceput. Astfel, proprietățile termofizice ale nanofluidelor au fost studiate la temperatura ambiantă și în intervalul de temperatură de 288.15 – 333.15 K (sugestiv pentru aplicații practice în regim termic normal pentru o gamă variată de schimbătoare de căldură). Rezultatele experimentale obținute au fost interpretate, analizate, discutate și comparate cu datele din literatura de specialitate.

În Figura 3.1 este prezentată metodologia de lucru proprie studiilor efectuate în cadrul acestei teze de doctorat.

**Figura 3.1** Metodologia de lucru.

3.1. Alegerea materialelor și echipamentele utilizate pentru prepararea suspensiilor

Materialele utilizate au fost alese luând în considerare datele colectate și analizate din literatura de specialitate. Astfel, fluidul ce a stat la baza acestui studiu a fost polietilen glicolul PEG 400. Deși în literatura de specialitate au fost publicate informații și date relativ complete privind proprietățile fizice și termodinamice ale unor fluide de tip polietilen glicol, se găsesc foarte puține date cu privire la PEG 400, care este în stare fluidă la temperatura ambiantă. Pentru PEG-uri au fost studiate diverse aplicații, cum ar fi utilizarea acestora ca solvenți în industria farmaceutică, ca absorbant special pentru deshidratarea gazelor sau ca agent de transfer termic.

După alegerea fluidului de bază, au fost alese tipurile de nanoparticule necesare conceperii noilor fluide de transfer termic.

Nanofluidelor au fost preparate după metoda în două etape, proces ce presupune dispersarea directă a nanoparticulelor în lichidul de bază. Substanțele chimice și nanofluidelor au fost cântărite utilizând o balanță KERN ADJ 100-4, cu o eroare de ± 0.01 mg și calibrare automată (adică tip isoCAL, cu compensare a temperaturii ambiante). După preparare, suspensiile au fost expuse la vibrații ultrasonice timp de 60 de minute (timpul a fost selectat datorită rezultatelor bune în cazul unor nanofluide similare – a se vedea [53-55, 66-68] pentru detalii) folosind o baie cu ultrasunete GETI GUC 02A (cu o putere a ultrasunetelor de 60 W), la o frecvență de 40 kHz pentru a minimiza procesul de sedimentare.

3.2. Metode de caracterizare a materialelor

Înainte de prepararea nanofluidelor au fost efectuate mai multe analize preliminare pentru a verifica structura și puritatea polietilen glicolului dar și analize privind caracterizarea morfologică a nanoparticulelor. Analizele au fost realizate în cadrul Institutului de Chimie Macromoleculară “Petru Poni” din Iași.

3.2.2 Analiza stabilității, a proprietăților termofizice și electrice. Metodologia de lucru și echipamentele utilizate

Stabilitatea suspensiilor prin teste de pH a fost realizată folosind instrumentul Edge® HI 2030 (Hanna Instruments, România), adică un electrod inteligent de pH pentru utilizare cu echipamentul hibrid Multiparameter HI-2030. Pentru a evalua pH-ul, aparatul efectuează calibrarea la 3 probe standard de pH: 7.01, 4.01 și 10.1. Toate măsurătorile de pH sunt afișate, înregistrate și exportate cu o rezoluție de pH 0.01. pH-ul probelor a fost măsurat la presiunea și temperatura ambiantă iar testele pe probe au fost repetate de 3-5 ori, înregistrându-se valoarea medie. Incertitudinea generală a datelor a fost sub 3 %.

Conductivitatea termică a fluidului de bază și a nanofluidelor din acest studiu a fost determinată utilizând tehnica Hot Wire, cu ajutorul unui analizor de proprietăți termice KD2 Pro (Decagon, Statele Unite ale Americii). Înainte de fiecare măsurătoare, echipamentul KD2 a fost calibrat cu glicerol și apă distilată la temperatura ambiantă; precizia experimentului a fost în intervalul ± 1 %. Pe parcursul tuturor testelor, o baie termostatică Haake C10-P5/U (precizie de ± 0.04 grade pentru controlul temperaturii în intervalul 273.15 – 373.15 K) a fost utilizată pentru menținerea temperaturii de măsurare, atât pentru PEG 400, cât și pentru nanofluidelor realizate.

Căldura specifică a fost măsurată în intervalul de temperatură 283.15 – 333.15 K (10 – 60 °C) cu un calorimetru diferențial de baleiaj Mettler Toledo, DSC 1, (SUA), echipat cu un software STAR. Tehnica a implicat încălzire, răcire și un alt ciclu de încălzire; precizia temperaturii a fost de 0.2 K iar acuratețea rezultatelor a fost estimată la mai puțin de 5 %. Viteza de încălzire – răcire a fost menținută la 10 K/min pentru fiecare test. Fiecare experiment a fost repetat de 3 – 5 ori, pentru fiecare probă, pentru a elimina cât mai mult posibil incertitudinile. Întregul experiment a

fost realizat la presiunea ambiantă. Căldura specifică a fost calculată utilizând software-ul echipamentului, folosind fluxul de căldură, viteza de încălzire și masa probei (fiecare probă a fost cântărită automat înainte de fiecare experiment) (a se vedea [66, 34] pentru informații suplimentare).

Testele reologice și de determinare a vâscozității au fost efectuate pe un reometru Physica MCR 501 (Anton Paar, Austria) cu sistem Peltier pentru controlul temperaturii și plăci paralele cu 50 mm în diametru și 0.5 mm distanța dintre plăci (vezi [66, 91, 92] pentru detalii suplimentare). Rezultatele au fost obținute la o viteză de forfecare cuprinsă între 10 – 1000 1/s în regim de rotație. Vâscozitatea a fost măsurată continuu și valorile au fost înregistrate la fiecare 10 secunde. Au fost realizate mai multe cicluri de încălzire – răcire (la o viteză de încălzire de 1 K/min) pentru fiecare probă pentru a verifica comportamentul probelor într-o posibilă aplicație reală. Pentru variația vâscozității cu temperatura, a fost menținută o viteză de forfecare constantă de 100 1/s, în timp ce temperatura a variat între 293.15 – 333.15 K (20 – 60 °C) cu un gradient de încălzire/răcire de 0.017 K/s. Precizia experimentală a fost verificată anterior și s-a constatat că este de 1.5 % în comparație cu vâscozitatea pentru apa pură (a se vedea [66, 91, 92] pentru detalii). Pentru fiecare probă au fost extrase trei măsurători, astfel încât să se ajungă la o cât mai bună precizie a experimentului.

Conductivitatea electrică a fost determinată cu echipamentul Edge® Multiparameter HI 2030 (Hanna Instruments) cu senzor de temperatură integrat și suprafețe mari de măsurare, până la 500 mS/cm și rezoluție de 0.01 μ S/cm. Precizia de măsurare a temperaturii a fost de ± 0.2 K. Experimentul a fost efectuat la temperatura ambiantă, urmat de încălzire până la 333.15 K utilizând o baie de încălzire; datele au fost înregistrate din 5 în 5 grade. Precizia testelor a fost de 3 %. Înainte de teste, echipamentul a fost calibrat cu o soluție HI7031 (1413 μ S/cm la 298.15 K). Fiecare test a fost repetat de 3-5 ori pentru a minimiza erorile experimentale; cifrele înregistrate au fost calculate ca valoare medie.

3.3. Analiza incertitudinii datelor experimentale

Teza de doctorat prezintă un studiu experimental complex care nu ar putea duce la o analiză comparativă corectă fără controlul coerent al datelor experimentale și al erorilor care pot influența datele colectate prin experiment. În această idee, fiecare experiment a fost repetat de câteva ori (3-5 ori) pentru a evita erorile și au fost calculate abaterea standard, eroarea standard și abaterea medie absolută, conform datelor prezentate în această secțiune.

Pentru datele experimentale, abaterea standard a fost calculată cu:

$$s(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2}{N-1}}, \quad (3.1)$$

unde: $s(X)$ este abaterea standard, N este numărul de măsurători, X este variabila (adică căldura specifică) și X_m este valoarea medie.

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (3.2)$$

Eroarea standard, $u(X)$, este:

$$u(X) = \frac{s(X)}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2}{N-1}}, \quad (3.3)$$

Abaterea medie absolută (AAD) a fost utilizată ca instrument pentru evaluarea ecuațiilor propuse, unde AAD este definită ca:

$$AAD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{exp} - X_{pred}}{X_{exp}} \right|. \quad (3.4)$$

În continuare, în cadrul prezentării rezultatelor experimentale, pentru fiecare experiment descris au fost inserate și datele privind acuratețea și gradul de încredere al fiecărei corelații propuse.

CAPITOLUL 4.

REZULTATE EXPERIMENTALE

4.1. Prepararea noilor fluide

La realizarea fluidelor (evidențiate în Tabelul 4.1.) au fost respectați câțiva pași, începând cu calculele exacte pentru prepararea fiecărei suspensii (a se vedea Tabelul 4.2), urmate de cântărirea materialelor utilizând echipamentul KERN ADJ 100⁴ (Kern, Germania), cu o precizie de 1×10^{-4} g și amestecarea PEG 400 și a nanoparticulelor folosind un omogenizator ultrasonic GETI GUC02A (TIPA, Česká Republika) cu o putere de 60 W și o frecvență de 40 kHz (a se vedea detalii suplimentare în Capitolul 3). Stabilitatea suspensiilor a fost îmbunătățită prin aplicarea unui tratament de omogenizare ultrasonică timp de 60 de minute. Timpul a fost ales datorită rezultatelor excelente obținute în cazul ionanofluidelor și a unor nanofluide similare (a se vedea [91-93] pentru detalii privind experimentele realizate de grupul de cercetare din care fac parte).

Cantitățile de nanoparticule dispersate în PEG 400 au fost calculate stoichiometric pentru a obține nanofluide cu până la 0.015 fracții volumice pentru Al₂O₃, 0.01 pentru ZnO și 0.0054 pentru MWCNT. Toate probele au fost realizate la temperatura ambiantă (adică 293.15 K) în condiții statice. Menționez că pentru realizarea acestora nu a fost folosit niciun agent tensioactiv.

Tabelul 4.1 oferă conversia în fracție volumică, în mod corespunzător, deoarece proprietățile termofizice ale suspensiilor vor fi discutate și în termeni de fracție volumică (majoritatea ecuațiilor teoretice sunt în termeni de fracție volumică).

Tabelul 4.1 Fluidele realizate și codurile acestora.

Tipul de fluid	Codul fluidelor	Concentrația masică	Fracția masică	Fracția volumică
Fluid de bază	PEG 400	0.00	0.00	0.00
Nanofluide	PEG 400 + 0.25 % wt Al ₂ O ₃	0.25	0.0025	0.0007

PEG 400 + 0.50 % wt Al ₂ O ₃	0.50	0.005	0.0014
PEG 400 + 1 % wt Al ₂ O ₃	1.00	0.01	0.0029
PEG 400 + 2.5 % wt Al ₂ O ₃	2.50	0.025	0.0072
PEG 400 + 5 % wt Al ₂ O ₃	5.00	0.05	0.0147
PEG 400 + 0.25 % wt ZnO	0.25	0.0025	0.0005
PEG 400 + 0.5 % wt ZnO	0.50	0.005	0.0010
PEG 400 + 1 % wt ZnO	1.00	0.01	0.0020
PEG 400 + 2.5 % wt ZnO	2.50	0.025	0.0051
PEG 400 + 5 % wt ZnO	5.00	0.05	0.0105
PEG 400 + 0.025 % wt MWCNT	0.025	0.00025	0.00013
PEG 400 + 0.050 % wt MWCNT	0.050	0.00050	0.00027
PEG 400 + 0.075 % wt MWCNT	0.075	0.00075	0.00041
PEG 400 + 0.10 % wt MWCNT	0.10	0.001	0.00054
PEG 400 + 0.50 % wt MWCNT	0.50	0.005	0.00268
PEG 400 + 1.00 % wt MWCNT	1.00	0.01	0.00538



Figura 4.1 Nanofluidelor pe bază de PEG 400 + Al₂O₃.



Figura 4.2 Nanofluidelor pe bază de PEG 400 + ZnO.

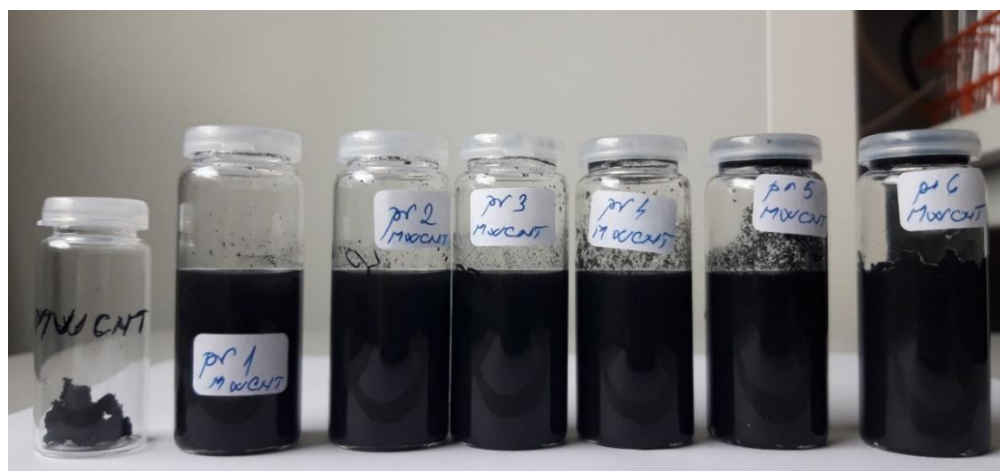


Figura 4.3 Nanoparticulele de MWCNT și nanofluidelor pe bază de PEG 400 + MWCNT.

4.3. Rezultate experimentale privind determinarea pH-ului

Stabilitatea nanofluidelor create și analizate s-a dovedit a fi foarte bună, fiind verificată prin observație vizuală, precum și prin pH, așa cum se poate observa din rezultatele prezentate în Tabelul 4.8, deși nu a fost adăugat niciun surfactant (agent activ de suprafață). Nanofluidelor s-au dovedit a fi stabile cu un pH cuprins între 7.44 și 8.90 la temperatura ambiantă.

Tabelul 4.8 Rezultate experimentale privind pH-ul pentru nanofluidelor pe bază de PEG 400 studiate.

Nanofluid	pH
PEG 400	7.44
PEG 400 + 0.25 % wt Al ₂ O ₃	8.15
PEG 400 + 0.50 % wt Al ₂ O ₃	7.85
PEG 400 + 1 % wt Al ₂ O ₃	8.44
PEG 400 + 2.5 % wt Al ₂ O ₃	8.84
PEG 400 + 5 % wt Al ₂ O ₃	8.88
PEG 400 + 0.25 % wt ZnO	8.12
PEG 400 + 0.50 % wt ZnO	7.71
PEG 400 + 1 % wt ZnO	8.01
PEG 400 + 2.5 % wt ZnO	7.45
PEG 400 + 5 % wt ZnO	7.75
PEG 400 + 0.025 % wt MWCNT	6.07
PEG 400 + 0.050 % wt MWCNT	6.50
PEG 400 + 0.075 % wt MWCNT	6.68
PEG 400 + 0.10 % wt MWCNT	6.13
PEG 400 + 0.50 % wt MWCNT	8.88

4.4. Rezultate experimentale privind determinarea conductivității termice

4.4.1 Modele teoretice utilizate în analiza datelor experimentale

În secțiunile următoare se vor efectua comparații ale datelor experimentale cu cele mai utilizate ecuații teoretice și experimentale pentru tipul de nanoparticule studiat (a se vedea ecuațiile 4.3 – 4.11) [70, 127 - 134]. După cum se poate observa, majoritatea corelațiilor reflectă dependența conductivității termice de fracția volumică a nanoparticulelor, temperatura nefiind considerată un parametru de influență asupra variației conductivității termice.

Modelele teoretice cele mai utilizate de către diferite grupuri de cercetători, și care au fost folosite și în acest studiu sunt:

$$\text{Maxwell [70]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(k_p - k_f)} \quad (4.3)$$

$$\text{Hamilton și Crosser [127]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f + (n-1)\varphi(k_p - k_f)}{k_p + (n-1)k_f - \varphi(k_p - k_f)} \quad (4.4)$$

$$\text{Wasp [128]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(k_p - k_f)} \quad (4.5)$$

$$\text{Maiga și colab. [129]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 2.72\varphi + 4.97\varphi^2 \quad (4.6)$$

$$\text{Buongiorno [130]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 7.47\varphi \quad (4.7)$$

$$\text{Li and Peterson [131]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = 0.7644815\varphi + 0.018689T_{nf} + 0.537853 \quad (4.8)$$

$$\text{Mintsa și colab. [132]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 1.72\varphi \quad (4.9)$$

$$\text{Timofeeva și colab. [133]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 3\varphi \quad (4.10)$$

$$\text{Xue [134]: } \frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{1 - \varphi + 2\varphi \frac{k_p}{k_p - k_f} \ln \frac{k_p + k_f}{2k_f}}{1 - \varphi + 2\varphi \frac{k_f}{k_p - k_f} \ln \frac{k_p + k_f}{2k_f}} \quad (4.11)$$

unde: k este conductivitatea termică în (W/m·K), indicii p , nf , f se referă la particule, nanofluid, respectiv fluidul de bază, φ este fracția volumică a nanoparticulelor și T este temperatura (K).

În cele ce urmează, datele experimentale obținute în cadrul tezei de doctorat vor fi analizate și în corespondență cu aceste modele teoretice.

4.4.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă

Dacă analizăm Figura 4.22 (datele experimentale ale suspensiilor de ZnO + PEG 400) se poate observa pentru conductivitatea termică relativă (conductivitatea termică relativă a fost calculată ca raportul între conductivitatea termică a nanofluidelor și cea pentru fluidul de bază, PEG 400) o variație polinomială de gradul doi care poate fi descrisă printr-o ecuație de regresie de forma:

$$k_r = -1606.6 \varphi^2 + 24.733 \varphi + 1.0213, \text{ cu } R^2 = 0.96 \quad (4.12)$$

unde: k_r este conductivitatea termică relativă și φ se referă la fracția volumică a nanoparticulelor.

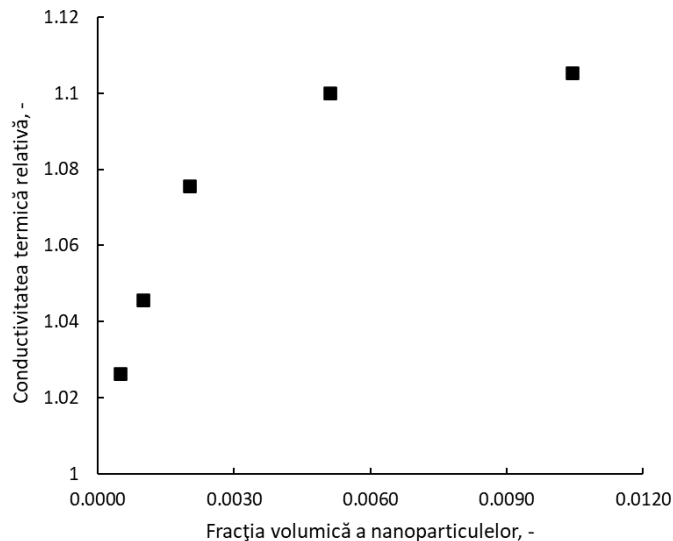


Figura 4.22 Variația conductivității termice relative cu fracția volumică a suspensiilor ZnO - PEG 400.

Analizând Figura 4.22 se remarcă o creștere evidentă a conductivității termice atunci când nanoparticulele solide de ZnO sunt adăugate în fluidul de bază, fenomen evidențiat și în literatură. Îmbunătățirea globală este de până la 11 % pentru cea mai concentrată suspensie. Dacă se compară datele cu modelele teoretice (a se vedea ecuațiile 4.3 – 4.11), se poate vedea din Figura 4.23 că toate ecuațiile (adică care dau aproximativ aceleași rezultate) oferă estimări care sunt în mod evident sub valorile determinate experimental.

În continuare, datele pentru nanofluidelor pe bază de alumina + PEG 400 sunt prezentate în Figura 4.24 și Figura 4.25. Din Figura 4.24, se poate observa o variație polinomială de gradul doi pentru conductivitatea termică relativă, care poate fi descrisă printr-o ecuație de regresie de forma:

$$k_r = 271.87 \varphi^2 + 0.3927 \varphi + 1.004, \text{ cu } R^2 = 0.99 \quad (4.13)$$

unde: k_r este conductivitatea termică relativă și φ se referă la fracția volumică a nanoparticulelor din suspensie.

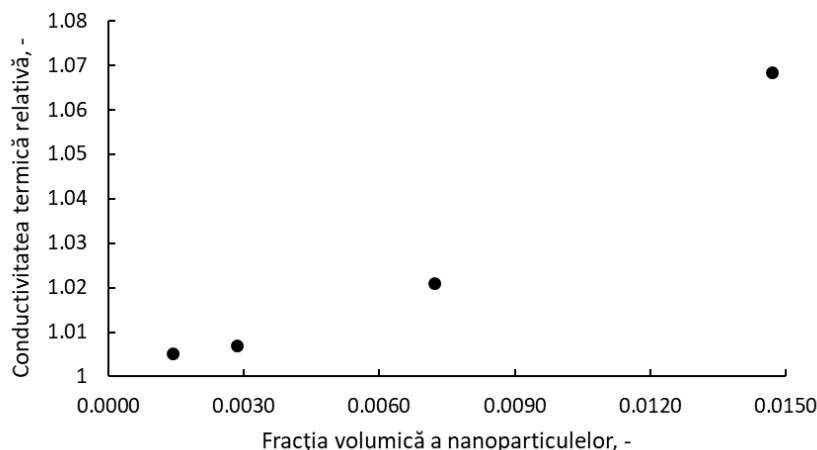


Figura 4.24 Variația conductivității termice relative în funcție de fracția volumică a suspensiilor pe bază de Al_2O_3 + PEG 400.

Datele experimentale pentru variația conductivității termice a nanofluidului MWCNT + PEG 400 la 293.15 K sunt prezentate în Figura 4.26, iar în Figura 4.27 este prezentată o comparație cu modelele teoretice, așa cum au fost descrise cu ajutorul ecuațiilor 4.3 – 4.11.

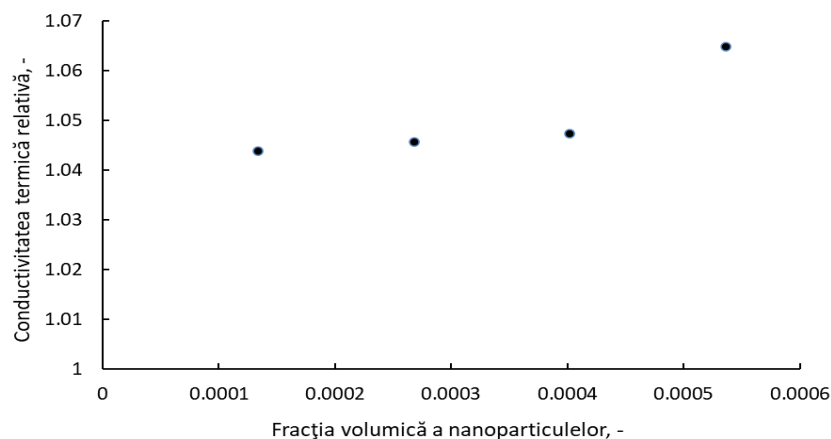


Figura 4.26 Variația conductivității termice relative în funcție de fracția volumică a suspensiilor de MWCNT + PEG 400.

Din Figura 4.26, se poate observa aceeași tendință, similară cu cea pentru celelalte două tipuri de suspensii analizate, și anume variația polinomială de gradul doi a conductivității termice relative cu fracția volumică a nanoparticulelor, care poate fi descrisă printr-o ecuație de regresie de forma:

$$k_r = 219788 \varphi^2 - 98.797 \varphi + 1.0539, \text{ cu } R^2 = 0.96 \quad (4.14)$$

unde: k_r este conductivitatea termică relativă și φ se referă la fracția volumică a nanoparticulelor din suspensie.

Mai mult, pentru o imagine completă a rezultatelor experimentale, în Figura 4.28 sunt reprezentate grafic toate valorile conductivității termice experimentale pentru suspensiile realizate, unde se observă conductivitatea termică mai mare dată de adăugarea de MWCNT.

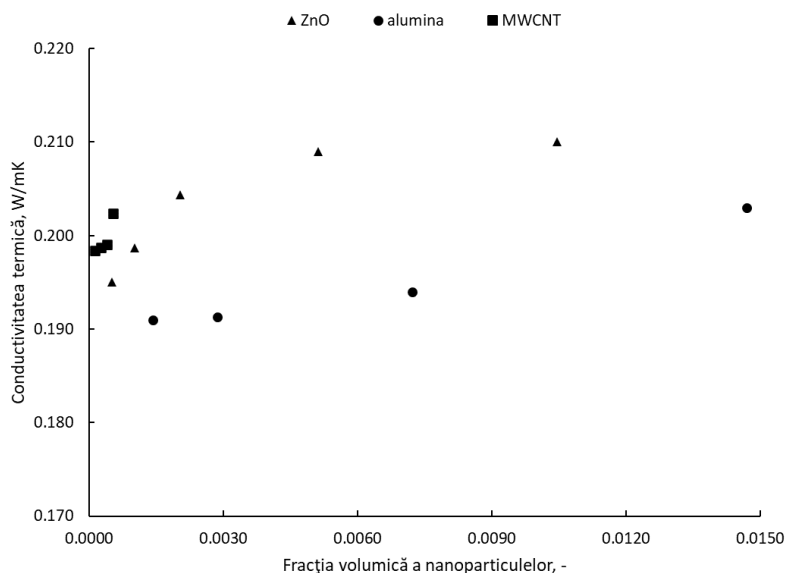


Figura 4.28 O comparație a conductivității termice pentru toate suspensiile.

4.4.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii

Conductivitatea termică a fost studiată și la încălzire până la 333.15 K, rezultatele fiind discutate în cele ce urmează.

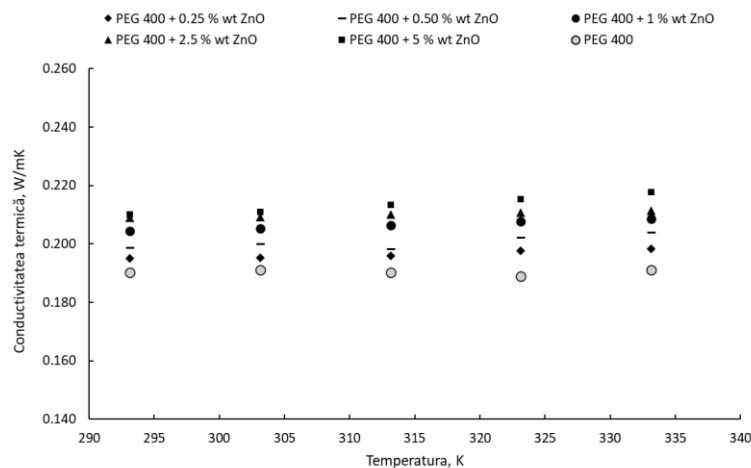


Figura 4.29 Variația conductivității termice cu temperatura pentru nanofluidelor ZnO + PEG 400.

Pentru suspensiile ZnO + PEG 400, se poate vedea din datele prezentate în Figura 4.29 că adăugarea de nanoparticule de ZnO nu influențează conductivitatea fluidului de bază, în special la o concentrație de până la 1 % wt. O mică creștere este prezentă pentru suspensia cu cea mai mare

concentrație, îmbunătățirea observată fiind de 4 % în comparație cu valorile înregistrate la temperatura ambiantă. Pe de altă parte, pentru suspensiile cu alumina (Figura 4.30), influența Al_2O_3 este evidentă iar nanofluidelile concentrate (1-5 % wt) prezintă o creștere liniară de 10 % a conductivității termice atunci când temperatura crește până la 60 °C.

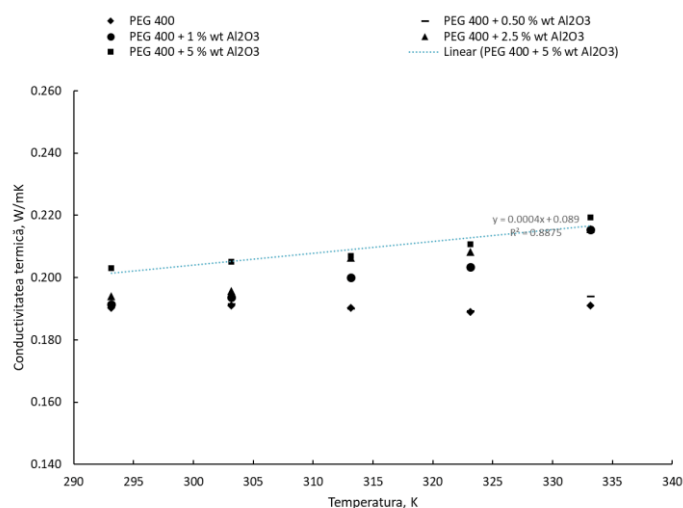


Figura 4.30 Variația conductivității termice cu temperatura pentru nanofluidelile alumina + PEG 400.

În ceea ce privește nanofluidelile MWCNT + PEG 400 (datele experimentale se regăsesc în Figura 4.31), conductivitatea termică rămâne constantă cu temperatura, totuși adaosul de MWCNT este relativ scăzut, astfel încât nu s-a observat nicio influență asupra comportamentului la încălzire, așa cum au observat și concluzionat și Marcos și colab. [56].

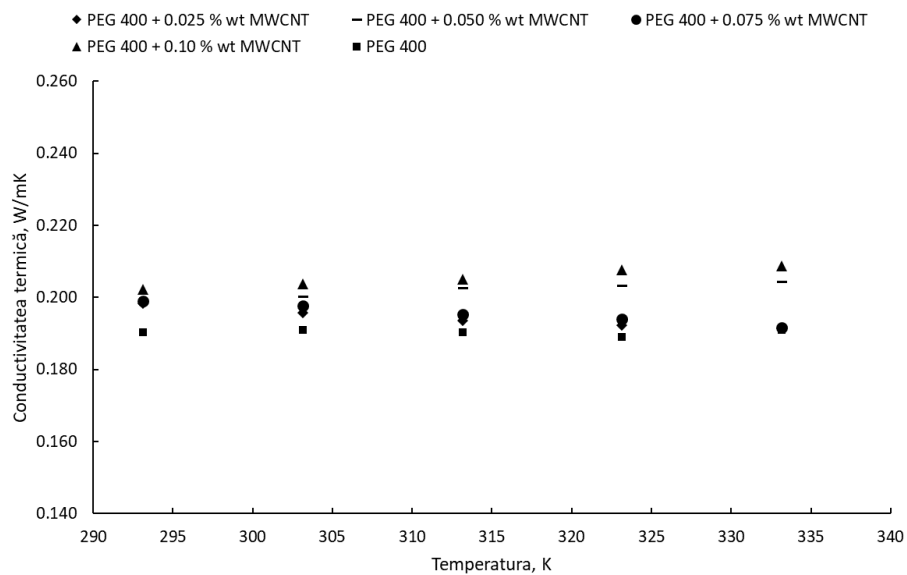


Figura 4.31 Variația conductivității termice cu temperatura pentru nanofluidelor MWCNT + PEG 400.

4.5 Rezultate experimentale privind determinarea căldurii specifice

4.5.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă

Rezultatele privind căldura specifică relativă (căldura specifică relativă este definită ca raportul dintre căldura specifică a nanofluidului și cea a fluidului de bază) pentru PEG 400 și toate suspensiile preparate sunt prezentate în Figurile 4.33, 4.34 și 4.35. După cum se poate observa din Figura 4.33, căldura specifică relativă a nanofluidelor pe bază de alumina, crește odată cu adăugarea nanoparticulelor, fenomen ce este urmat de o scădere a căldurii specifice pentru concentrații masice mai mari.

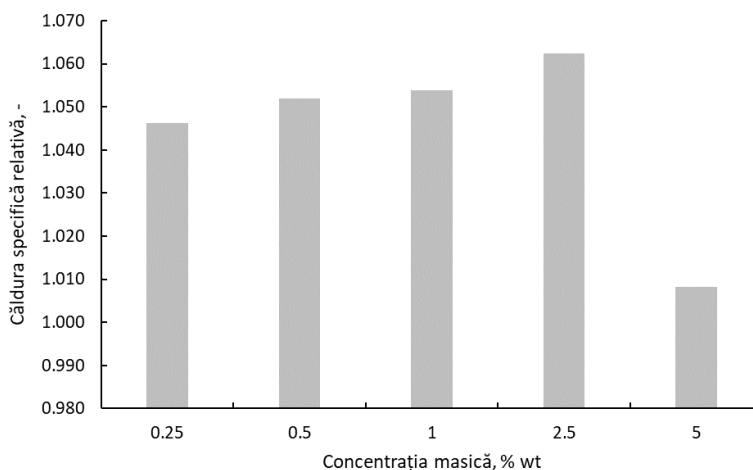


Figura 4.33 Variația căldurii specifice relative cu adăugarea nanoparticulelor de Al_2O_3 în PEG 400.

Creșterea valorilor căldurii specifice depinde de concentrația de nanoparticule, situându-se între 1.5 – 5.4 % (vezi Figura 4.34) în comparație cu fluidul de bază. Dacă se discută valorile experimentale prezentate în Figura 4.35, se poate observa creșterea căldurii specifice odată cu creșterea concentrației nanoparticulelor de MWCNT. Creșterea este între 2.3 % și 12 % în comparație cu fluidul de bază.

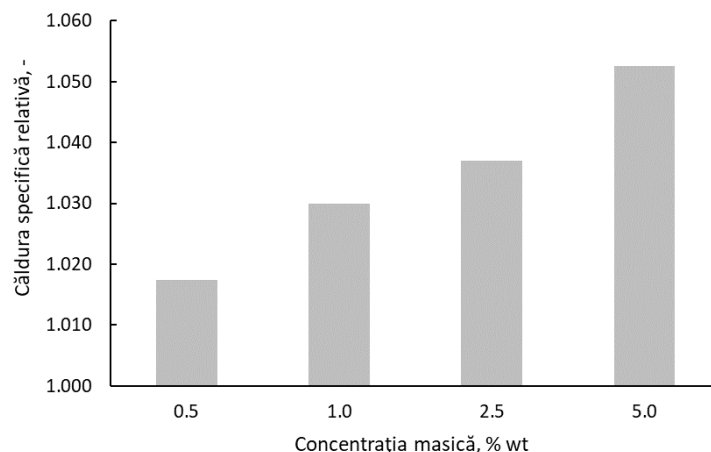


Figura 4.34 Variația căldurii specifice relative cu adăugarea nanoparticulelor de ZnO în PEG 400.

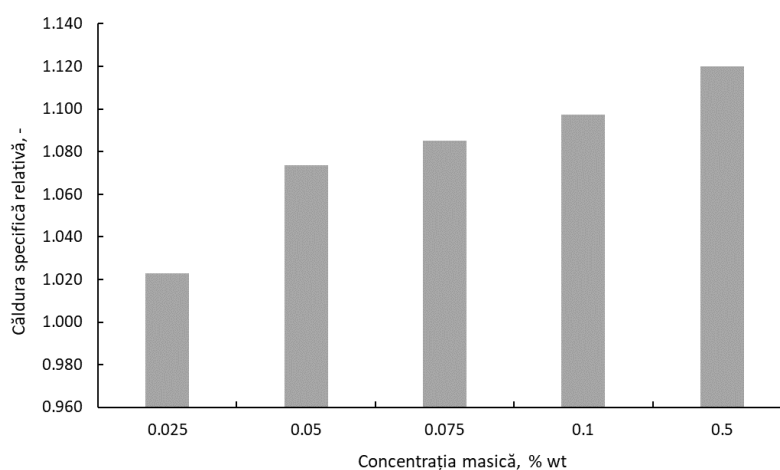
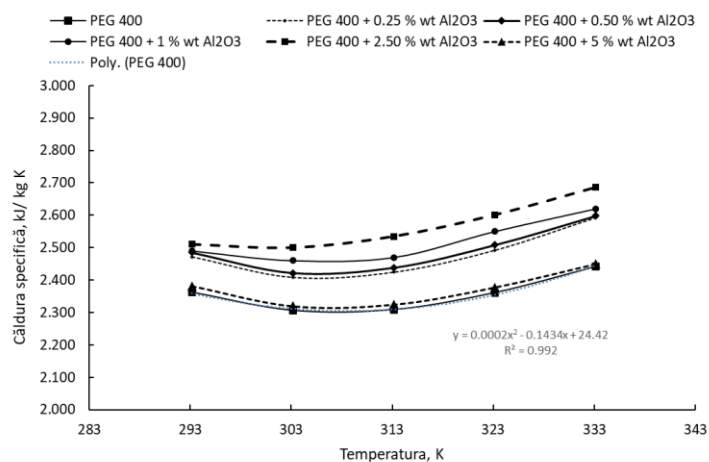


Figura 4.35 Variația căldurii specifice relative cu adăugarea nanoparticulelor de MWCNT în PEG 400.

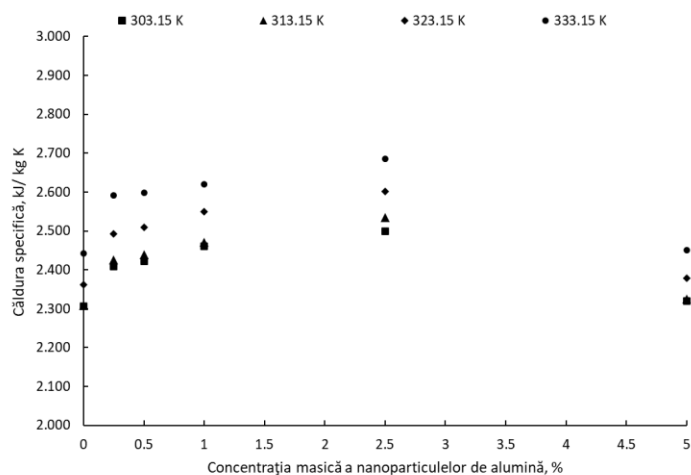
4.5.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii

a) Nanofluidele Al_2O_3 + PEG 400

Rezultatele experimentale privind căldura specifică sunt prezentate în Figura 4.36 pentru PEG 400 și toate suspensiile realizate cu nanoparticule de Al_2O_3 . Rezultatele pentru fluidul de bază, PEG 400, indică o scădere mică (3.2 %) a căldurii specifice atunci când temperatura urcă, în timpul încălzirii, la 303.15 K, urmată de o creștere când temperatura continuă să crească la 333.15 K (vezi Figura 4.36 a).



a.



b.

Figura 4.36 Rezultate experimentale privind variația căldurii specifice, pentru toate nanofluidelor, în funcție de: a. variația temperaturii, la încălzire; b. variația concentrației masice de aluminiă la patru temperaturi.

b) Nanofluidelor ZnO + PEG 400

În Figura 4.37 sunt prezentate rezultatele privind căldura specifică pentru nanofluidelor pe bază de ZnO. Căldura specifică prezintă o variație polinomială cu temperatura, înregistrându-se o scădere ușoară până la 300 K, urmată de o creștere continuă odată cu creșterea temperaturii, așa cum este prezentat în Figura 4.37.

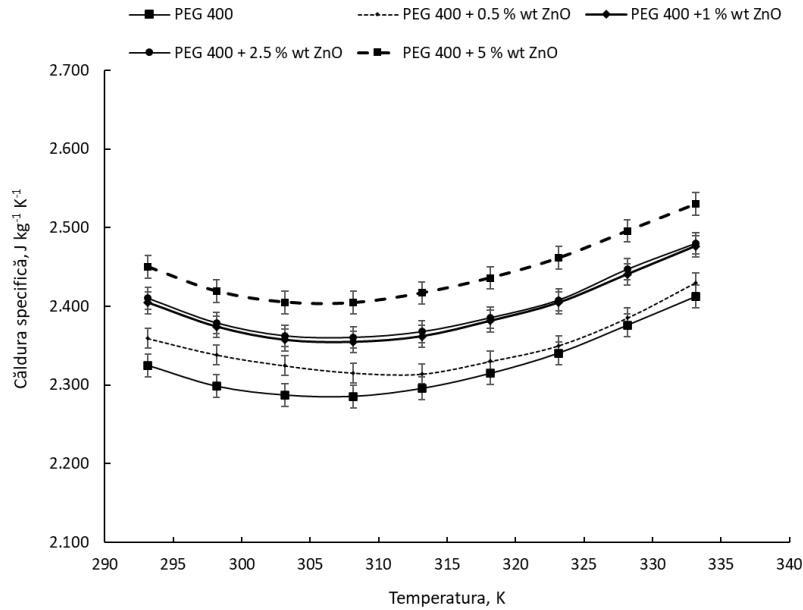


Figura 4.37 Variația căldurii specifice cu temperatura, la încălzire, pentru PEG 400 și ZnO + PEG 400.

Mai departe, considerând toate datele experimentale prezentate privind căldura specifică a nanofluidelor ZnO + PEG 400, se poate obține o corelație de suprafață pentru variația căldurii specifice atât cu temperatura, cât și cu fracția masică a nanoparticulelor în fluidul de bază. În această idee, influența temperaturii relative și a fracției masice asupra căldurii specifice relative au fost reprezentate și corelate așa cum se arată în Figura 4.38 și ecuația (4.18):

$$\frac{c_{pnf}}{c_{pbf}} = 1.052 - 0.068 \frac{T}{T_0} + 8.989\varphi - 381.755\varphi^2 + 4668.889\varphi^3 \quad (4.18)$$

Ecuația (4.18) are o valoare R^2 de 0.976 și o eroare standard de 0.0025.

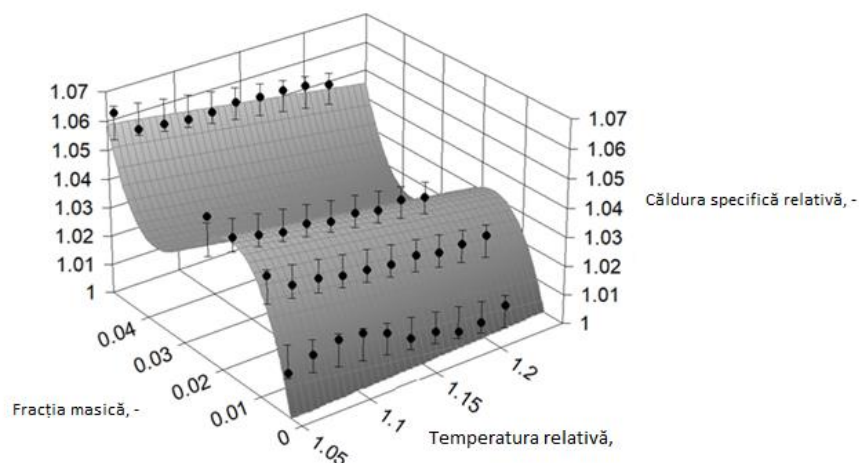


Figura 4.38 Graficul 3D al datelor experimentale privind căldura specifică pentru ZnO + PEG 400.

c) Nanofluidelor MWCNT + PEG 400

Figura 4.39 prezintă datele experimentale obținute la încălzirea până la 333.15 K pentru toate probele. Căldura specifică crește cu temperatura, creșterea fiind situată între 2.3 – 12 % pentru toate probele. Cea mai mare creștere a fost înregistrată pentru PEG 400 + 0.50 % wt MWCNT. Se poate spune că probele urmează tendința observată pentru fluidul de bază, iar căldura specifică este influențată de cantitatea de nanoparticule adăugată în fluid. Variații moderate similare au fost, de asemenea, observate în literatura de specialitate [67, 68].

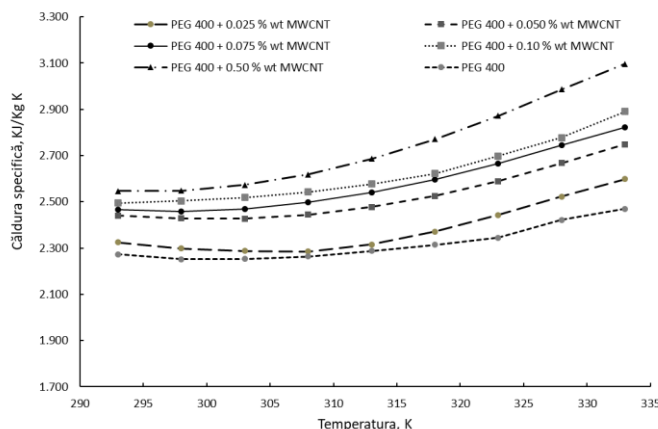


Figura 4.39 Variația căldurii specifice cu temperatura pentru PEG 400 și nanofluidelor cu MWCNT studiate.

4.6. Rezultate experimentale privind comportamentul reologic și vâscozitatea

4.6.1 Modele teoretice utilizate în estimarea vâscozității nanofluidelor

În vederea realizării unei evaluări complexe a rezultatelor experimentale, au fost luate în considerare ecuațiile frecvent utilizate în literatura de specialitate pentru estimarea vâscozității nanofluidelor, și anume:

$$\text{-Modelul Einstein [141]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = 1 + 2.5 \varphi_{vol} \quad (4.19)$$

$$\text{-Modelul Brinkman [142]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = (1 - \varphi_{vol})^{-2.5} \quad (4.20)$$

$$\text{-Modelul Krieger-Dougherty [143, 144]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi_{vol}}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m} \quad (4.21)$$

$$\text{-Modelul Maron – Pierce [145]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi_{vol}}{\varphi_m}\right)^{-2} \quad (4.22)$$

$$\text{-Modelul Batchelor [146]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = (1 + \eta\varphi + k_H\varphi^2 + \dots \dots \dots) \quad (4.23)$$

$$\text{-Modelul Pastorizza – Galego [147]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_f} = 1 + \sum_{i=1}^N C_i \varphi^i \quad (4.24)$$

$$\text{-Modelul Brenner-Condif [148]: } \frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = (1 - \eta_0\varphi) \quad (4.25)$$

$$\text{-Ecuția Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) [149]: } \ln \eta(T) = \ln \eta_0 + \frac{A T_0}{T - T_0} \quad (4.26)$$

În ecuația (4.21), η este coeficientul Einstein ($\eta=2.5$) iar $\varphi_m \approx 0.65$ (pentru nanoparticule sferice), φ_{vol} este fracția volumică a particulelor atunci când vâscozitatea este infinită, definită ca fracție volumică maximă. În ecuația (4.23), k_H ($k_H = 6.5$) este coeficientul Huggins iar în ecuația (4.26), η_0 , A și T_0 sunt parametri ajustabili.

De asemenea, Chow [150] a oferit o teorie pentru estimarea vâscozității suspensiilor concentrate de nanoparticule cu formă arbitrară. Pentru cele mai uzuale nanoparticule, adică sferice, Chow [150] demonstrează că un calcul corect al creșterii vâscozității poate fi exprimat prin:

$$\frac{\eta_{nf}}{\eta_{bf}} = 1 + \sum_{i=1}^N C_i \varphi^i \quad (4.27)$$

unde: N este gradul de dilatare și C_i sunt coeficienți determinați analitic.

În plus, pentru a descrie comportamentul non-newtonian al suspensiei cu concentrație mare, a fost folosit modelul legii puterii Ostwald-de Waele [144]:

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.28)$$

unde: η este vâscozitatea, $\dot{\gamma}$ este viteza de forfecare, k este indicele de consistență și n este indicele legii puterii. În funcție de indicele de consistență, fluidul poate fi:

- $n < 1$: fluidul se subțiază prin forfecare.
- $n > 1$: fluidul are un comportament de îngroșare prin forfecare.
- $n = 1$: fluidul este newtonian.

4.6.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă

Toate nanofluidelor au fost mai întâi testate la două temperaturi diferite (adică 288.15 și 298.15 K) și după aceea au fost efectuate mai multe teste care au luat în considerare încălzirea până la 333.15 K și apoi răcirea la temperatura ambiantă cu o viteză de 0.017 K/s. Au fost verificate regimurile de încălzire – răcire pentru a determina variația vâscozității cu temperatura și, de asemenea, pentru a primi informații despre comportamentul acestor nanofluide în aplicații din viața reală.

a) Nanofluidelor Al_2O_3 + PEG 400

Rezultatele la cele două temperaturi 288.15 și 298.15 K, pentru nanofluidelor pe bază de Al_2O_3 sunt prezentate în Figura 4.40 și, respectiv, Figura 4.41, unde se poate observa comportamentul newtonian (care consideră vâscozitatea drept constanta de proporționalitate dintre tensiunea și viteza de forfecare) pentru PEG 400 (cu o vâscozitate medie de 0.164 Pa s la 287.15 K) și nanofluidelor cu alumina cu concentrații de până la 5 % wt. O excepție poate fi observată la 288.15 K pentru PEG 400 + 2.50 % wt Al_2O_3 dar fenomenul nu a fost prezent la 298.15 K, deci poate fi neglijat.

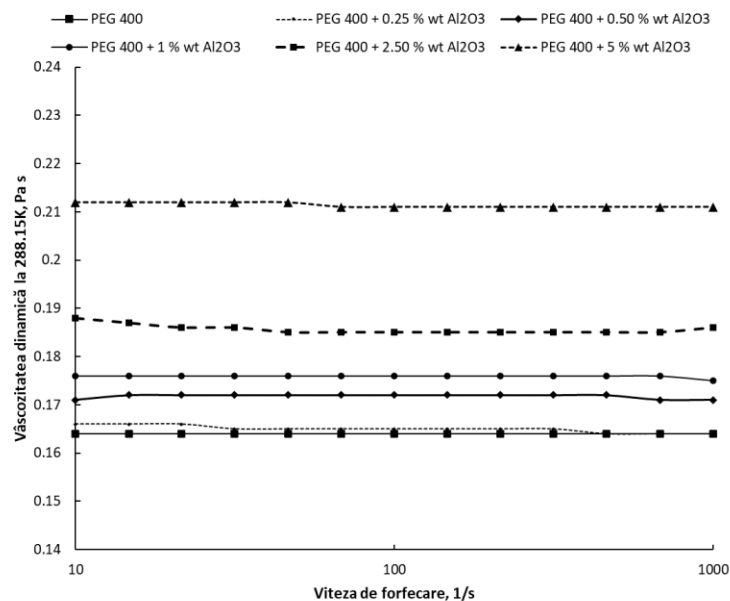


Figura 4.40 Variația vâscozității cu viteza de forfecare pentru nanofluidelor pe bază de Al₂O₃ la 288.15 K.

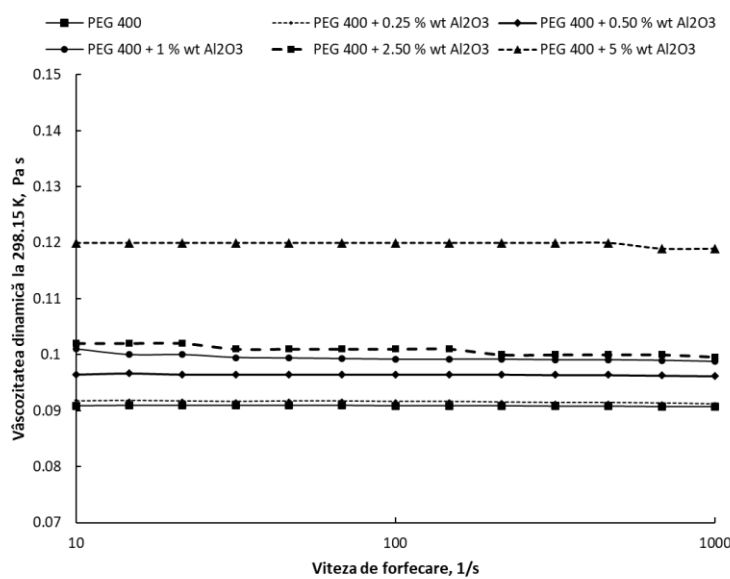


Figura 4.41 Variația vâscozității cu viteza de forfecare pentru nanofluidelor pe bază de Al₂O₃ la 298.15 K.

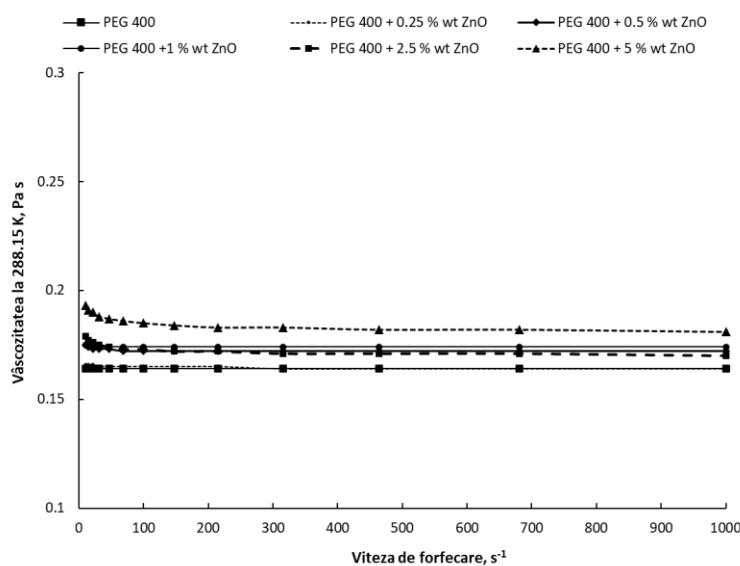
Vâscozitatea crește în mod clar atunci când nanoparticulele sunt adăugate în fluidul de bază, creșterea fiind calculată ca fiind în jur de 30 % pentru cea mai mare concentrație masică de

alumină, la ambele temperaturi monitorizate. Din datele colectate la cele două temperaturi se poate confirma comportamentul newtonian, astfel încât fenomenul pare a fi consecvent.

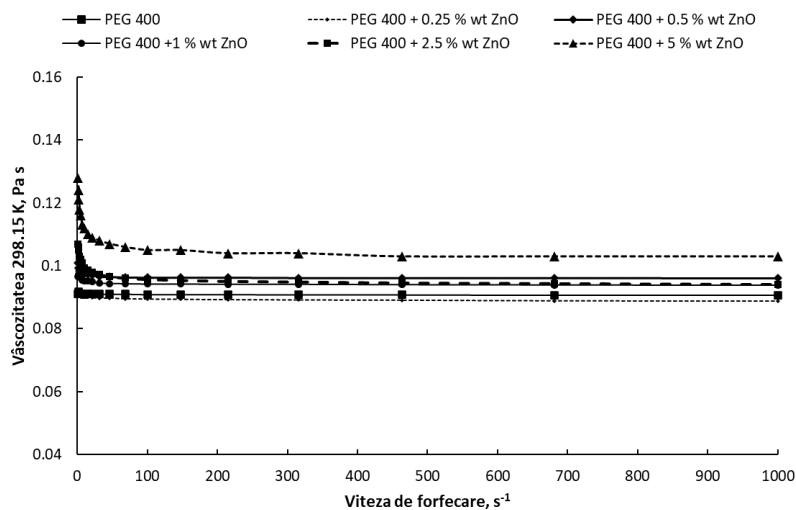
b) Nanofluidele ZnO + PEG 400

În ceea ce privește curbele de curgere obținute pentru fluidul PEG 400 și nanofluidele PEG 400 + ZnO, acestea sunt prezentate în Figura 4.43 pentru cele două temperaturi: 288.15 K și 298.15 K unde se poate observa că suspensiile cu concentrație scăzută au un comportament newtonian. Cele două grupuri de curbe de curgere au fost verificate pentru a confirma fenomenul care apare atunci când nanoparticulele sunt adăugate în fluidul de bază. Nanofluidul cu 5 % wt ZnO are un comportament non-newtonian la viteze de forfecare scăzute, în timp ce la o viteză de forfecare mai mare de 68 s^{-1} , curgerea a devenit newtoniană.

Dacă analizăm Figura 4.43 b se poate observa un comportament similar cu cel înregistrat la 288.15 K, în special în ceea ce privește comportamentul non-newtonian al nanofluidului cu cea mai mare concentrație.



a.

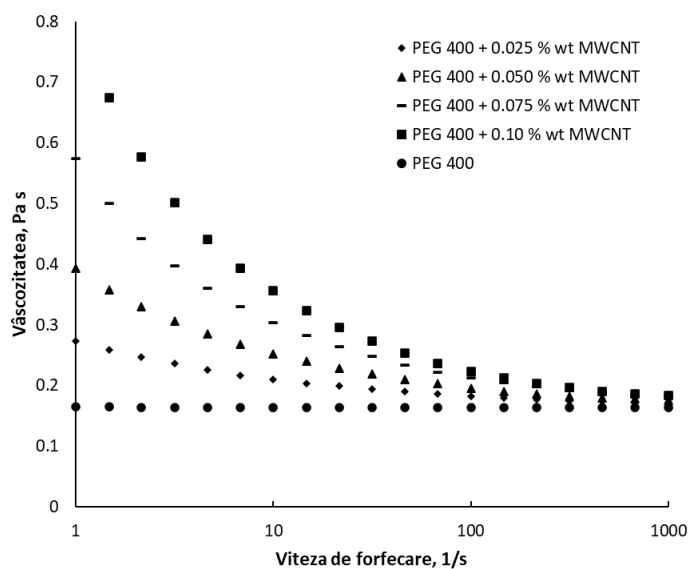


b.

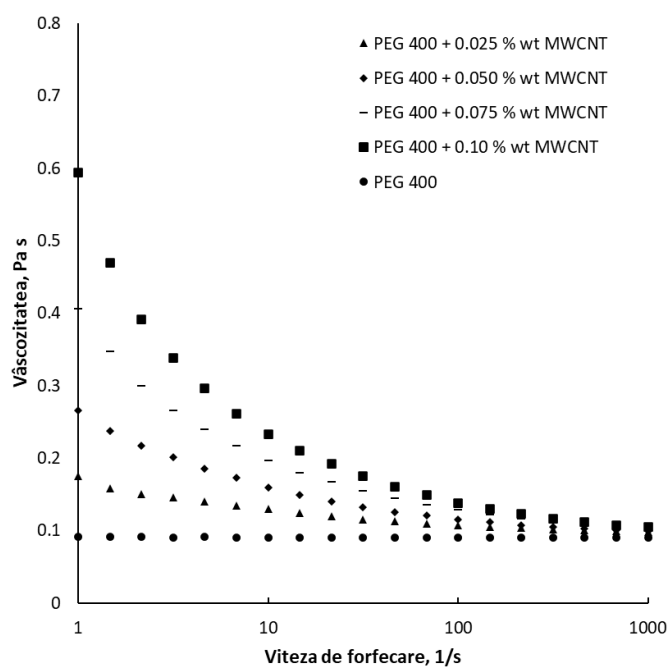
Figura 4.43 Variația vâscozității cu viteza de forfecare pentru nanofluidelor pe bază de ZnO, la:
a. 288.15 K și b. 298.15 K.

c) Nanofluidelor MWCNT + PEG 400

Comportamentul reologic al nanofluidelor pe bază de MWCNT a fost studiat la viteze de forfecare între 1 și 1000 s⁻¹. Variația vâscozității în funcție de viteza de forfecare la două temperaturi (și anume 288.15 și 298.15 K) este prezentată în Figura 4.45, unde se poate observa că PEG 400 are un comportament newtonian, în timp ce adăugarea de MWCNT modifică comportamentul de curgere într-unul non-newtonian, care este mai accentuat atunci când concentrația de nanoparticule crește.



a.



b.

Figura 4.45 Variația vâscozității cu viteza de forfecare pentru PEG 400 și suspensiile cu MWCNT la: a. 288.15 K și b. 298.15 K.

Datele din Figura 4.45 arată că vâscozitatea este puternic influențată de adaosul de nanoparticule și depinde de temperatură, în timp ce tendința de variație este similară atât la 288.15 K cât și la 298.15 K.

Creșterea vâscozității la temperatura ambiantă este cuprinsă între 10 și 40 % la o viteză de forfecare de 100 s^{-1} . Revenind la comportamentul de curgere, se poate observa din Figura 4.45 un comportament non-newtonian mai pronunțat atunci când crește concentrația de MWCNT și acesta este un fenomen observat în general în literatura de specialitate (a se vedea studiile din [156 - 162]).

4.6.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii

Au fost efectuate mai multe teste privind variația vâscozității cu temperatura iar rezultatele au fost validate și cu date din literatura de specialitate. Figura 4.47 este o comparație între datele experimentale obținute în cadrul acestui studiu și datele publicate de Marcos și colab. [18, 19].

Diferențele dintre datele din acest studiu experimental și datele din literatură privind PEG 400 sunt mai mici de 3 %, ceea ce confirmă corectitudinea abordării experimentale. Ca o observație la Figura 4.47, în acest studiu și Marcos și colab. [56] au folosit aceeași marcă de PEG 400 (mai exact, Kollislov) iar Marcos și colab. [57] au folosit PEG 400 de la compania Merck; cu toate acestea, datele sunt foarte asemănătoare și acest lucru confirmă corectitudinea testelor noastre.

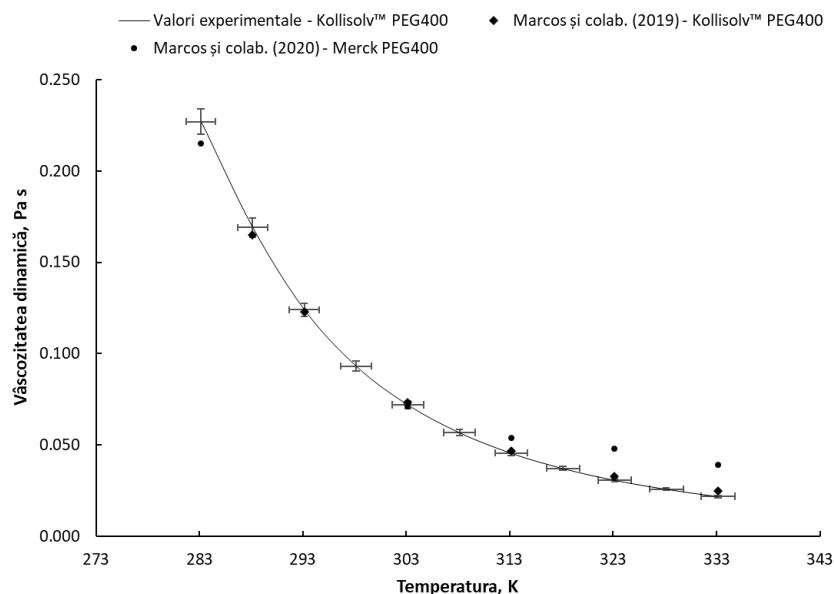


Figura 4.47 Variația vâscozității pentru PEG 400 cu temperatura: comparație cu literatura de specialitate.

a) Nanofluidele Al_2O_3 + PEG 400

După cum s-a menționat anterior, au fost efectuate mai multe teste privind variația vâscozității cu temperatura în intervalul 293.15 – 333.15 K, așa cum se arată în Figura 4.48. Rezultatele experimentale la încălzire au demonstrat comportamentul fluidic normal pentru toate suspensiile, în timp ce odată cu adăugarea de nanoparticule se ajunge la o creștere a vâscozității, așa cum era de așteptat.

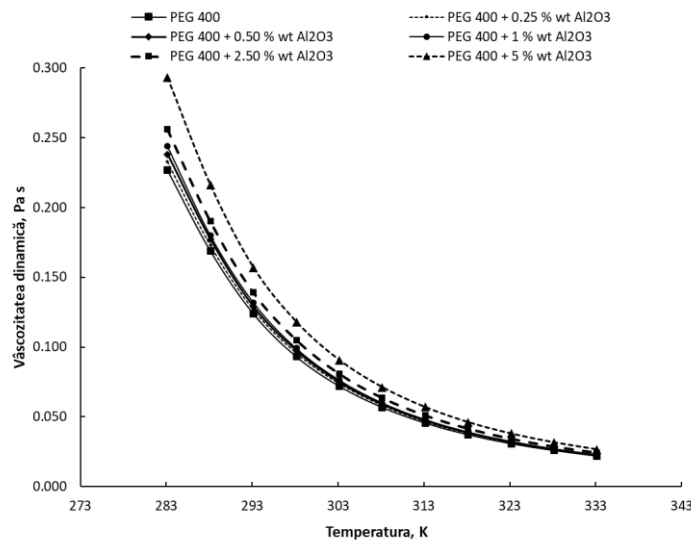


Figura 4.48 Influența temperaturii asupra vâscozității pentru PEG 400 și suspensiile pe bază de Al_2O_3 .

Regimurile de încălzire – răcire au fost efectuate între 293.15 și 333.15 K, impunând o viteză de încălzire de 0.017 K/s. Pe parcursul celor 3 cicluri de încălzire - răcire s-a monitorizat viteza de forfecare și vâscozitatea, rezultatele fiind prezentate în Figura 4.50. Dacă se analizează apariția efectului de histerezis, se poate observa că acest fenomen este prezent și pentru fluidul de bază, PEG 400, în timp ce influența concentrației nanoparticulelor este evidentă.

Se poate observa că adăugarea unor cantități mici de nanoparticule nu influențează apariția fenomenului, în timp ce adăugarea a 5 % wt Al_2O_3 aduce o modificare de 14.5 % a vâscozității după 3 cicluri de încălzire-răcire. Un fenomen interesant care a fost de asemenea observat este că vâscozitatea capătă valori mai scăzute după mai multe cicluri iar acest lucru este important pentru aplicațiile din viața reală.

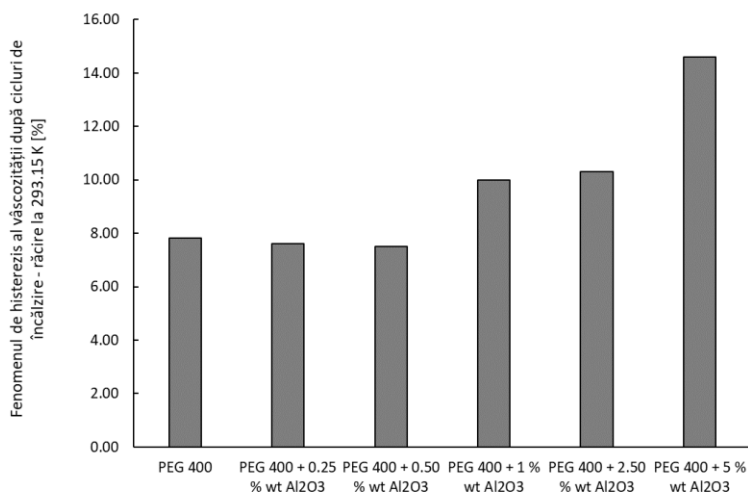


Figura 4.50 Efectul de histerezis pentru PEG și nanofluid.

b) Nanofluidele ZnO + PEG 400

Influența temperaturii a fost verificată la încălzire și, de asemenea, la răcire, așa cum se poate observa în Figura 4.52 și în discuțiile ulterioare. Vâscozitatea nanofluidelor cu ZnO crește cu până la 15 % odată cu adăugarea de nanoparticule și scade cu aproximativ 10 % odată cu creșterea temperaturii în intervalul de temperatură studiat (adică 283.15 – 333.15 K). Ambele observații sunt în favoarea unui comportament fluidic normal.

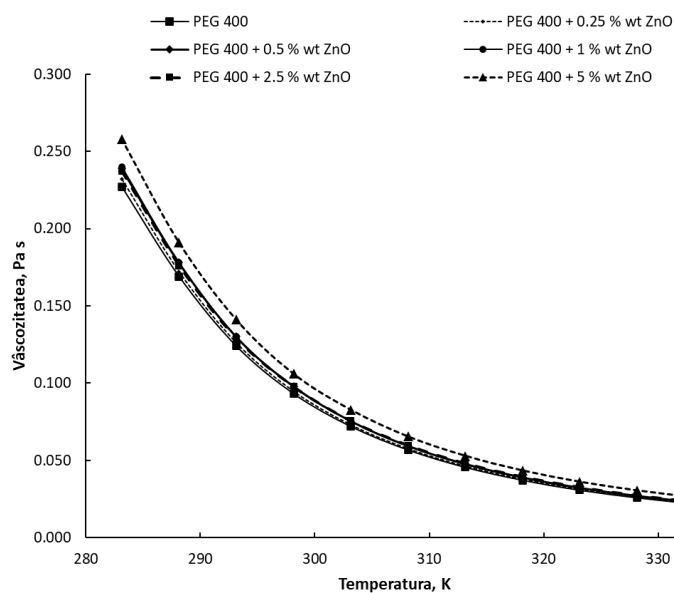


Figura 4.52 Influența temperaturii asupra vâscozității nanofluidelor.

c) Nanofluidele MWCNT + PEG 400

Variația vâscozității nanofluidelor pe bază de MWCNT la încălzire și la o viteză de forfecare de 100 s^{-1} este inserată în Figura 4.54, evoluția fiind una logică pentru toate fluidele, mai exact vâscozitatea scade, scăderea fiind cu procente cuprinse între 13-18 % la creșterea temperaturii de la 283.15 la 333.15 K atât pentru PEG 400, cât și pentru nanofluid. Acesta este un comportament fluidic normal. Cu toate acestea, se poate face o observație interesantă în ceea ce privește comportarea fluidelor la aplicarea diferitelor cicluri succesive de încălzire urmate de răcire.

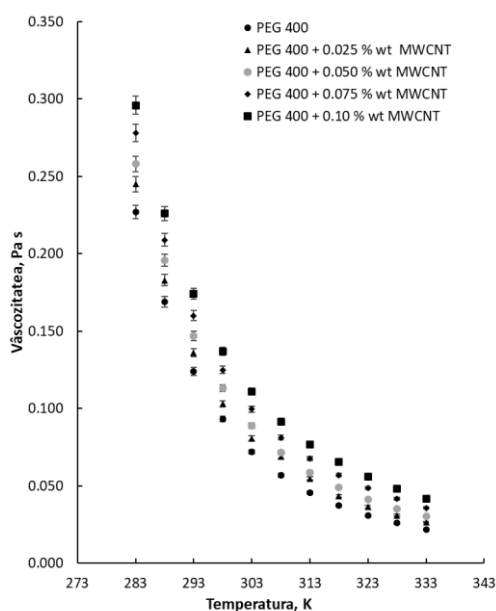


Figura 4.54 Variația vâscozității nanofluidelor cu temperatura (la o viteză de forfecare de 100 s^{-1}).

4.7. Rezultate experimentale privind conductivitatea electrică

4.7.1 Modele teoretice utilizate în estimarea conductivității electrice

Chiar dacă conductivitatea electrică nu a fost un parametru atât de studiat, în literatura de specialitate au fost identificate mai multe modele. Modelele clasice care iau în considerare fracția volumică, forma și dimensiunea nanoparticulelor sunt dezvoltate de Maxwell [70], Bruggeman [71] și Fricke [165].

Ecuția Maxwell [70] poate fi aplicată pentru o concentrație foarte mică de nanoparticule sferice și este exprimată ca:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 1 + \frac{3 \left(\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{bf}} \right) - 1 \right) \varphi}{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{bf}} \right) + 2 - \left(\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{bf}} \right) - 1 \right) \varphi} \quad (4.34)$$

Modelul Bruggeman [23] este:

$$1 - \varphi = \frac{\sigma_p - \sigma_{nf}}{\sigma_p - \sigma_{bf}} \left(\frac{\sigma_{bf}}{\sigma_{nf}} \right)^{1/3} \quad (4.35)$$

În plus față de modelele teoretice, în literatura de specialitate au fost identificate o serie de corelații experimentale, dar niciuna dintre ele nu a considerat PEG ca fluid de bază, așa că nu au relevanță pentru acest studiu.

4.7.2 Rezultate experimentale obținute la temperatura ambiantă

Rezultatele privind conductivitatea electrică a nanofluidelor $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{PEG 400}$ vor fi discutate în continuare în termeni de influență a fracției solide. La temperatura ambiantă, rezultatele au indicat o scădere a conductivității electrice la adăugarea nanoparticulelor de Al_2O_3 în PEG 400 și acest lucru poate fi explicat prin valoarea scăzută a conductivității electrice a nanoparticulelor de Al_2O_3 , care sunt definite ca izolatori. Conductivitatea electrică a nanoparticulelor de Al_2O_3 este $10^{-8} \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ [2].

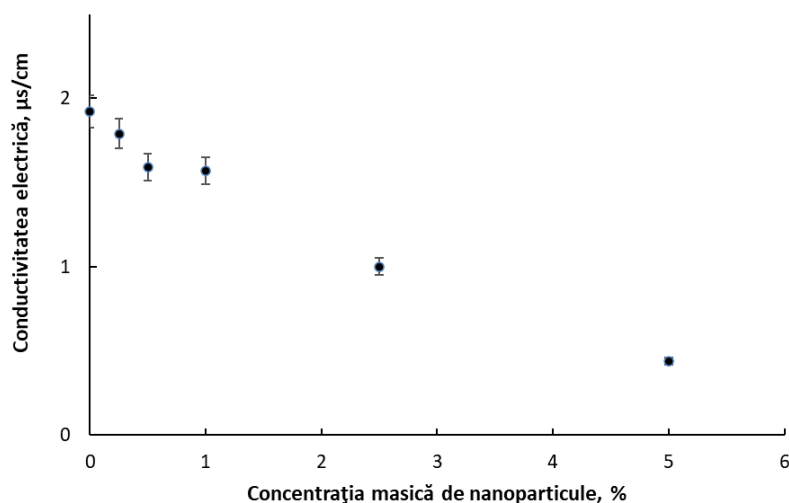


Figura 4.58 Variația conductivității electrice pentru PEG 400 cu diferite concentrații masice de Al_2O_3 la 298.15 K.

În Figura 4.58 sunt prezentate datele obținute la 298.15 K pentru nanofluide PEG 400 cu Al_2O_3 și se poate observa scăderea conductivității electrice odată cu creșterea concentrației masice a nanoparticulelor.

În Figura 4.59 sunt prezentate datele obținute la 298.15 K pentru nanofluidele cu ZnO și se poate observa valoarea medie de $1.9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

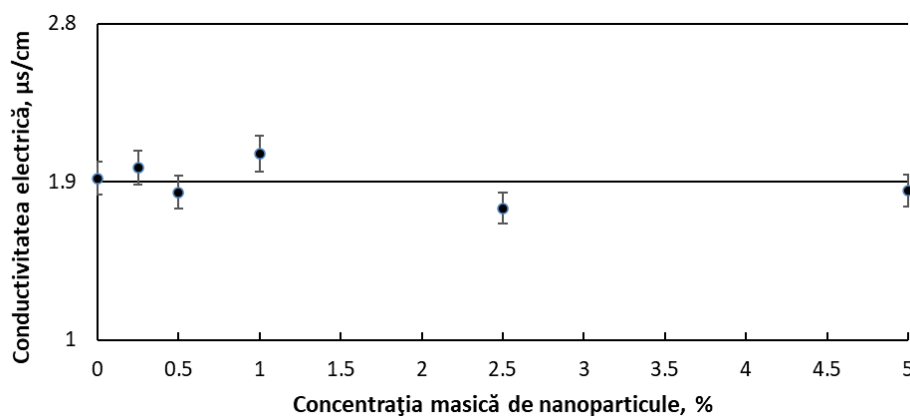


Figura 4.59 Rezultate experimentale la temperatura ambiantă (298.15 K) pentru nanofluidelele ZnO + PEG 400.

Rezultatele la temperatura ambiantă pentru nanofluidelor PEG 400 cu MWCNT sunt în Figura 4.61, unde se observă o creștere a conductivității electrice odată cu adăugarea de nanoparticule, chiar și la aceste concentrații foarte mici

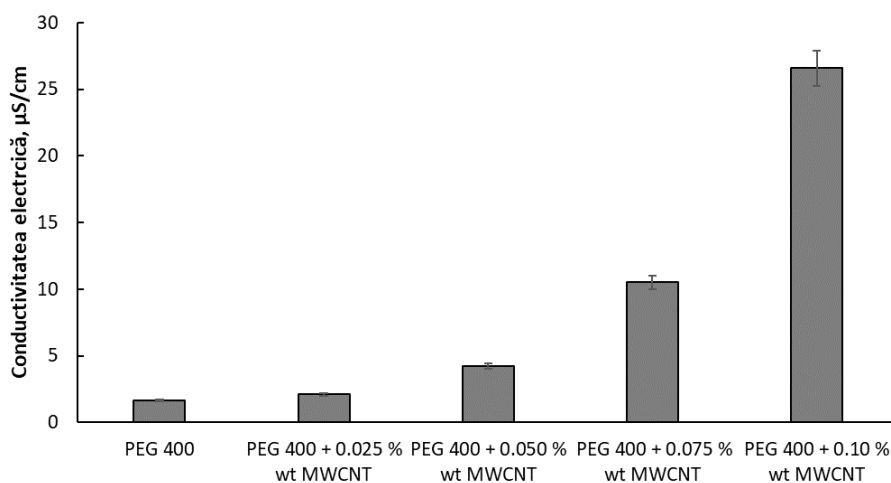


Figura 4.61 Conductivitatea electrică: rezultate la 298.15 K pentru fluidele MWCNT + PEG 400 studiate.

4.7.3 Rezultate experimentale obținute la variația temperaturii

a) Nanofluidul Al_2O_3 + PEG 400

În Figura 4.62 sunt prezentate rezultatele privind conductivitatea electrică relativă pentru nanofluidul Al_2O_3 + PEG 400 la două temperaturi. Conductivitatea electrică relativă este definită ca raportul dintre conductivitatea electrică a nanofluidului și a fluidului de bază (adică PEG 400 pur). Rezultatele din Figura 4.62 arată o scădere a conductivității electrice relative odată cu adăugarea nanoparticulelor, aceeași tendință fiind observată pentru ambele temperaturi evidențiate. Se poate observa, de asemenea, că aceasta scade odată cu creșterea temperaturii, fenomenul fiind observat pentru toate nanofluidelor pe bază de Al_2O_3 .

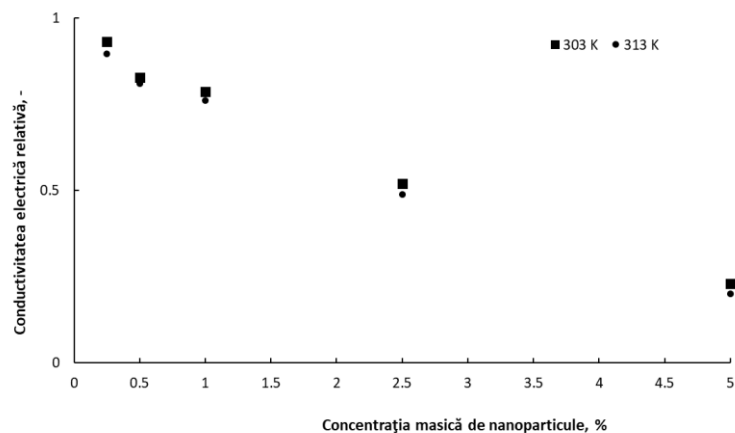


Figura 4.62 Variația conductivității electrice pentru PEG 400 cu diferite concentrații masice de Al_2O_3 la 303.15 și 313.15 K.

b) Nanofluid ZnO + PEG 400

Variația conductivității electrice cu temperatura pentru toate nanofluidelor ZnO + PEG realizate este reprezentată grafic în Figura 4.63, unde se observă îmbunătățirea conductivității electrice odată cu creșterea temperaturii. Rezultatele din Figura 4.63 privind conductivitatea electrică arată că aceasta nu depinde de concentrația masică pentru aceste suspensii particulare și explicația se bazează pe conductivitatea electrică a nanoparticulelor ZnO , care este similară cu fluidul de bază (adică, PEG 400).

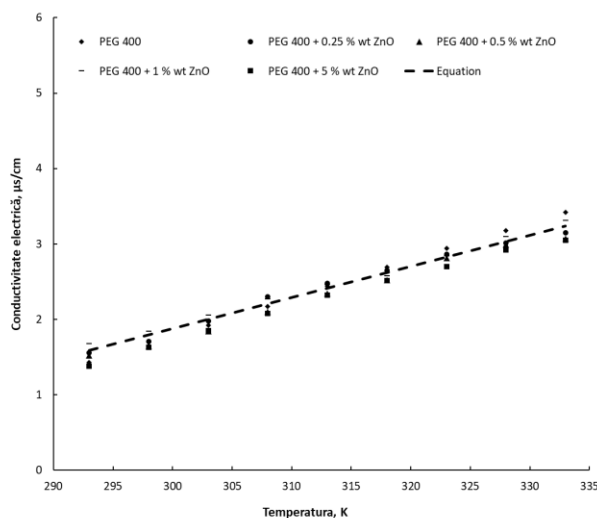


Figura 4.63 Variația conductivității electrice cu temperatura pentru nanofluidelor ZnO + PEG 400.

c) Nanofluidе MWCNT + PEG 400

Pentru suspensiile cu MWCNT, variația conductivității electrice la încălzire este reprezentată în Figura 4.65, unde se poate observa îmbunătățirea acesteia la creșterea temperaturii.

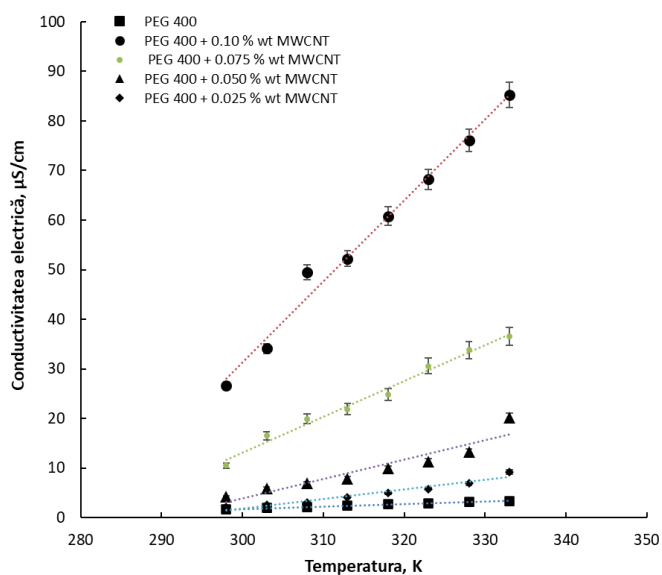


Figura 4.65 Variația conductivității electrice cu temperatura pentru nanofluidеle cu MWCNT și PEG 400.

În Figura 4.65, liniile punctate evidențiază variația liniară a conductivității electrice cu temperatura, respectând tendința identificată și pentru PEG 400. Se poate observa că atunci când concentrația de MWCNT crește, influența temperaturii este mai mare, fenomen care apare datorită conductivității electrice intrinseci a nanoparticulelor solide.

CAPITOLUL 5.

ANALIZA COMPORTĂRII NANOFUIDELOR PE BAZĂ DE POLIETILEN GLICOL ÎN APLICAȚII TERMICE

Acest capitol conține o analiză cuprinzătoare, bazată pe rezultatele experimentale și proprietățile termofizice (căldura specifică, conductivitatea termică și vâscozitatea). Analiza a fost efectuată luând în considerare puterea de pompare, numărul Pr, difuzivitatea termică și numărul Mo atât în curgere laminară, cât și în turbulentă, evidențiind efectul adăugării nanoparticulelor de Al_2O_3 , ZnO și MWCNT în PEG 400. Acest capitol este util deoarece cercetarea asupra nanofuidelor pe bază de PEG este încă în zona de pionierat și discuția cu privire la avantajele transferului de căldură și dezavantajele în relație cu puterea de pompare poate fi deosebit de relevantă pentru aplicații practice (a se vedea detalii privind ecuațiile utilizate în Capitolul 2).

5.2. Evaluarea transferului de căldură a mai multor fluide nano-îmbunătățite pe bază de PEG

a) Numarul Prandtl

În Tabelul 5.1 se poate observa o comparație a numărului Pr, pentru PEG 400 și diferite fluide, cu date de la Rapp [174] și detalii ale producătorului (adică pentru uleiurile Dowtherm și Shell).

Tabelul 5.1 Numărul Pr pentru diferite fluide de transfer de căldură.

	Numărul Pr
PEG 400 la 30°C	862.16
apa la 25 °C	6.89
etanol la 25 °C	18.05
glicerol la 25 °C	7612.74
fluid Dowtherm Q la 20 °C	54.19

ulei de transfer termic la 20 °C, tip Shell	1003.00
---	---------

Pr este definit ca raportul dintre transportul de impuls și transportul total de căldură, fiind de obicei calculat ca vâscozitatea cinematică împărțită la difuzivitatea termică (α), unde difuzivitatea termică este definită ca:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (5.2)$$

În Tabelul 5.2, este prezentat numărul Prandtl relativ (acesta este definit ca raportul dintre Pr pentru nanofluid și cel pentru fluidul de bază) pentru suspensiile studiate.

Tabelul 5.2 Variația în procente a numărului Pr relativ al fluidului nano-îmbunătățit în comparație cu fluidul de bază PEG 400.

Fluid	Temperatura, [K]				
	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15
PEG 400 + 0.50 % wt Al ₂ O ₃	10.62	9.93	10.42	11.16	9.93
PEG 400 + 1 % wt Al ₂ O ₃	13.22	12.56	8.08	6.88	1.19
PEG 400 + 2.50 % wt Al ₂ O ₃	18.53	19.59	13.49	11.62	8.52
PEG 400 + 0.50 % wt ZnO	1.74	1.64	0.80	-2.25	-1.79
PEG 400 + 1 % wt ZnO	0.82	0.38	-1.11	-2.25	-2.17
PEG 400 + 2.50 % wt ZnO	-1.95	-1.04	-1.56	-1.99	-1.13
PEG 400 + 0.025 % MWCNT	5.07	9.55	40.43	21.54	29.66
PEG 400 + 0.050 % MWCNT	19.00	24.80	30.23	38.18	47.88
PEG 400 + 0.075 % MWCNT	30.70	44.21	59.51	74.76	90.13
PEG 400 + 0.10 % MWCNT	41.40	59.20	75.49	90.76	109.33

Din Tabelul 5.2 se poate observa că numărul Pr crește până la aproximativ 20 % atunci când alumina este adăugată la PEG 400, fenomen datorat creșterii vâscozității, ceea ce înseamnă că transportul termic devine mai dificil. În ceea ce privește adăugarea de ZnO, transportul termic scade cu până la 2.25 %, în funcție de temperatură și concentrația de nanoparticule.

Pentru difuzivitatea termică a suspensiilor, rezultatele sunt prezentate în Figura 5.2. Menționez că difuzivitatea termică descrie capacitatea unui anumit material de a schimba căldură.

Din Figura 5.2 se poate observa că, la temperatura ambiantă, difuzivitatea termică a fluidelor PEG 400 cu nanoparticule de Al_2O_3 este în scădere în comparație cu cazul în care se adaugă ZnO sau MWCNT. Discutând aceste date în corelație cu variația numărului Pr, se poate concluziona că numărul Pr crește, această creștere fiind datorată în principal creșterii vâscozității, confirmând că adăugarea de nanoparticule de ZnO poate fi văzută ca o alegere mai bună decât adăugarea de alumina la PEG 400. Adăugarea de nanoparticule de ZnO crește difuzivitatea termică cu până la 4 %, în timp ce numărul Pr rămâne același sau scade, dovedind un transfer de căldură mai bun. Acest lucru se poate datora sinergiei nanoparticulei de ZnO cu fluidul PEG 400, acum s-a discutat și pe parcursul prezentării datelor experimentale realizate în decursul acestei teze.

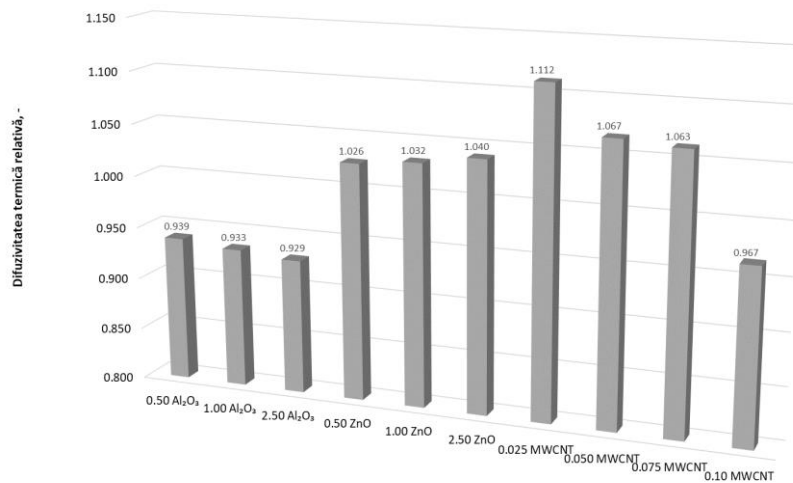


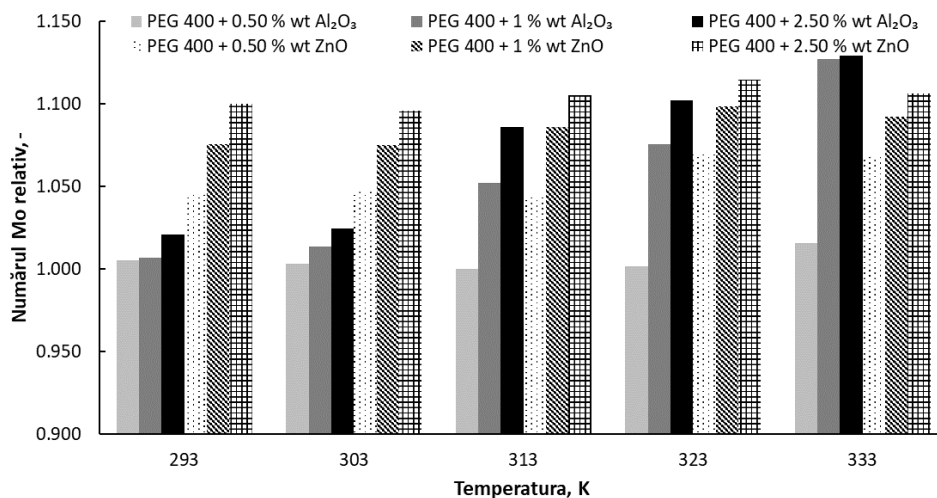
Figura 5.2 Difuzivitatea termică relativă a suspensiilor PEG 400 cu nanoparticule de oxid și MWCNT.

b) Numărul Mo

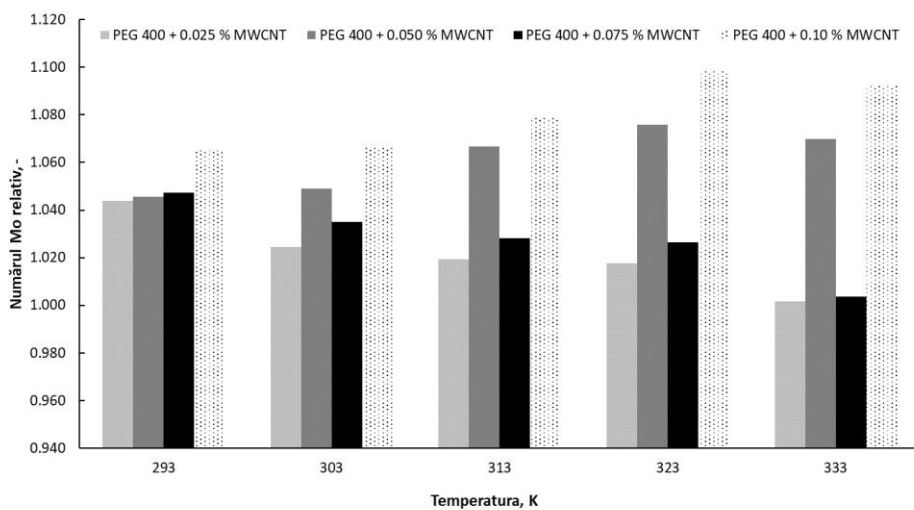
Evaluarea numărului lui Mouromtseff pentru transferul de căldură convectiv [83, 84] va fi discutată folosind ecuațiile (2.3) și (2.4) pentru curgerea laminară și, respectiv, turbulentă. Pentru curgerea laminară, Mo relativ descrie reducerea raportului de conductivitate termică iar rezultatele sunt prezentate în Figura 5.3.

În Figura 5.3 a și b toate fluidele nano-îmbunătățite au un număr relativ Mo mai mare decât 1, ceea ce înseamnă că adăugarea de NP crește transferul de căldură în regim laminar datorită creșterii conductivității termice. Observarea experimentală a variației conductivității termice cu

adăugarea de NP și temperatura sugerează că utilizarea nanoparticulelor de ZnO crește Mo relativ. Cu toate acestea, influența adăugării de NP nu este mare.



a.



b.

Figura 5.3 Numărul Mo relativ în curgere laminară, la diferite temperaturi.

Pentru curgerea turbulentă (vezi Figura 5.4), unde vâscozitatea joacă un rol relevant, se poate observa că adăugarea de Al₂O₃ scade Mo relativ, în timp ce adăugarea de ZnO poate crește cu până la 7 % Mo relativ iar acest lucru este în corelație cu analiza numărului Pr. Pe de altă parte,

adăugarea nanoparticulelor de MWCNT scade Mo relativ. Scăderea este mai accentuată odată ce cantitatea de nanoparticule adăugată în fluidul de bază crește.

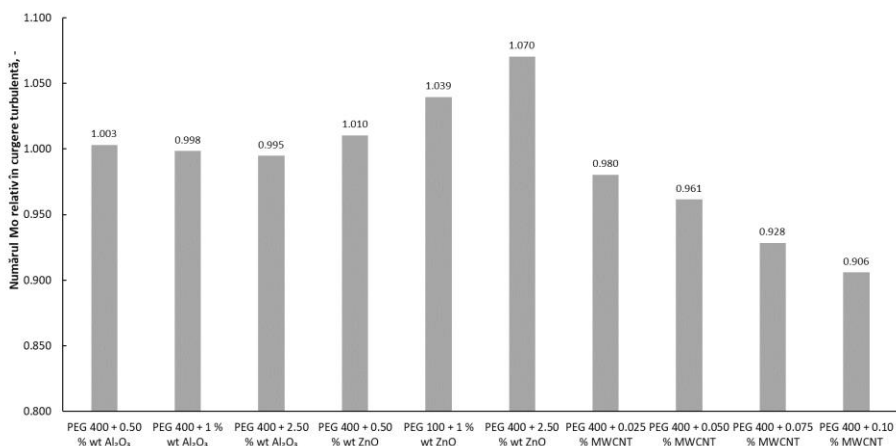


Figura 5.4 Numărul Mo relativ în curgere turbulentă.

c) Puterea de pompare

Evaluarea influenței adăugării de nanoparticule asupra puterii de pompare pentru PEG 400 a fost realizată cu ajutorul ecuațiilor Mansour și colab. [88], mai exact ecuațiile (2.5) și (2.6), în curgere laminară și respectiv turbulentă. Rezultatele sunt prezentate în Figura 5.5, unde se poate observa în aproape toate cazurile o creștere a puterii de pompare, chiar dacă această creștere este relativ scăzută. Cu toate acestea, rezultate mai bune se obțin pentru suspensiile ZnO + PEG 400, unde variația este de până la 4 % în curgere laminară și aproape nicio influență în regim turbulent. Pentru nanofluidul Al₂O₃ + PEG 400 se poate observa că în curgerea laminară apare o creștere a puterii de pompare de până la 8.1 %, în timp ce în curgere turbulentă creșterea nu este semnificativă. În cazul nanofluidelor cu MWCNT, puterea de pompare este mai mare comparativ cu nanofluidul oxidic, cea mai mare creștere a puterii de pompare în regim laminar fiind de 29.7 % iar în regim turbulent este de 9.6 %.

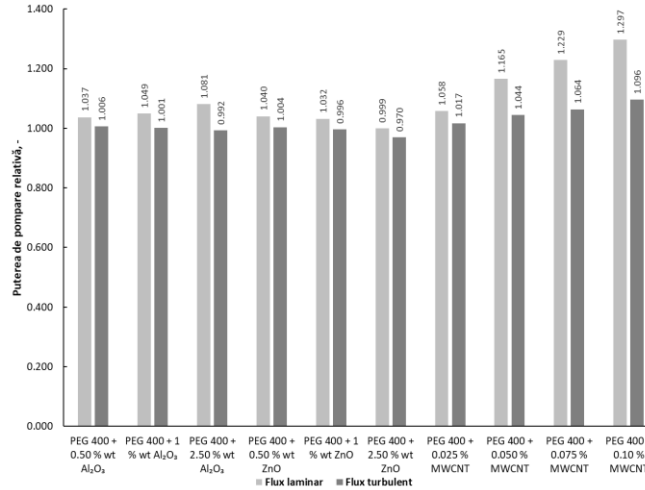


Figura 5.5 Puterea de pompare relativă pentru PEG 400 îmbunătățită cu diferite NP.

O altă analiză a fost efectuată folosind ecuația (2.10) iar rezultatele sunt prezentate în Figura 5.6, unde se poate observa creșterea puterii de pompare până la 35.9 % pentru alumina și până la 14.3 % pentru nanofluidul pe bază de ZnO, indiferent de tipul de curgere.

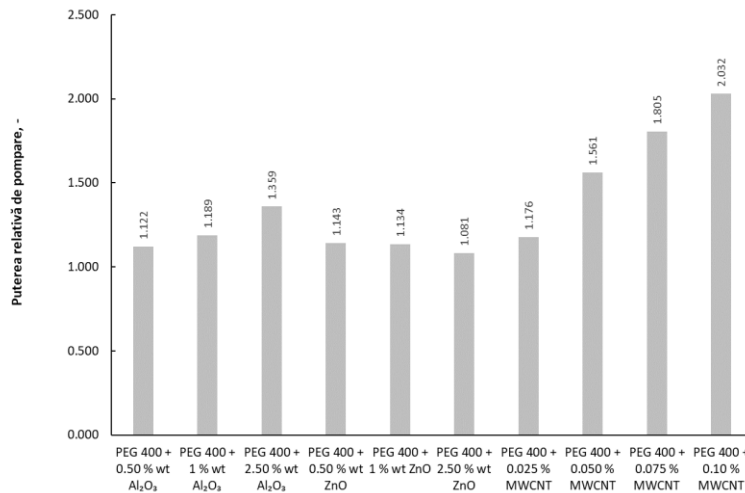


Figura 5.6 Puterea de pompare relativă.

Pe baza rezultatelor experimentale pentru cele trei tipuri de nanofluid studiate, se poate concluziona că adăugarea de concentrații scăzute de ZnO în PEG 400 este o soluție viabilă pentru a crește transferul de căldură prin convecție și poate fi văzută ca o soluție bună de îmbunătățire a regimului termic al schimbătoarelor de căldură.

CAPITOLUL 6.

CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Prezenta teză de doctorat a abordat un domeniu complet nou și modern de cercetare, și anume tehnici de intensificare a transferul termic utilizând noi fluide, proiectate în acest scop.

Scopul tezei a fost studiul unei noi clase de fluide cu potențial imens în aplicațiile termice, și anume nanofluidele pe bază de polietilen glicol. Astfel, pe baza studiului literaturii de specialitate și a discuțiilor împreună cu colaboratorii din străinătate, a fost ales polietilenul glicol PEG 400 și trei tipuri de nanoparticule: doi oxizi și nanotuburi de carbon cu pereți multipli. Experimentele au fost dezvoltate pentru trei tipuri de suspensii pe bază de PEG 400. Pentru realizarea nanofluidelor au fost folosite două tipuri de nanoparticule oxidice (Al_2O_3 și ZnO) și MWCNT. Concentrația masică a nanofluidelor a variat în intervalul 0.25 – 5.00 % wt pentru nanoparticulele oxidice și între 0.025 – 0.50 % wt pentru MWCNT.

Experimentul a fost unul extrem de complex, implicând un efort experimental coordonat și cooperarea cu mai multe laboratoare din țară.

Tema abordată are un caracter interdisciplinar ridicat, necesitând cunoștințe și abordări specifice unor domenii conexe domeniului de bază (ingineria materialelor), cum ar fi: chimie sau fizică aplicată în dezvoltarea suspensiilor, analizele morfologice și de puritate, propunere corelații experimentale etc.

Teza de doctorat este structurată în 6 capitole și a debutat cu analiza critică a stadiului actual, continuând cu descrierea și interpretarea experimentului, care au fost posibile prin crearea și respectarea unei metodologii de cercetare complexe și extrem de riguroase. Rezultatele obținute precum și analiza acestora au fost publicate încă de la obținerea acestora în diferite reviste de specialitate cu factor mare de impact sau au fost prezentate la diferite conferințe (naționale și internaționale). Lista de publicații este în Anexa 4.

Concluzii generale

- Proprietățile termofizice ale nanofluidelor pe bază de polietilen glicol PEG 400 au fost comparate cu stadiul actual al cercetărilor în domeniu, rezultând o analiză complexă a potențialului nanofluidelor cu baza PEG 400.
- Au fost realizate analize morfologice în ceea ce privește nanoparticulele și analize de puritate în cazul fluidului PEG 400, confirmând datele furnizate de către producători.
- Stabilitatea nanofluidelor a fost verificată prin observație vizuală și analiza pH-ului, rezultând a stabilitate foarte bună a noilor fluide obținute.
- A fost studiată experimental conductivitatea termică și electrică, căldura specifică și vâscozitatea. Toate proprietățile termofizice și electrice au fost studiate la temperatura ambiantă și la încălzire.
- Au fost determinate ecuații specifice fiecărei proprietăți termofizice studiate.
- Au fost efectuate analize comparative privind comportamentul nanofluidelor studiate atât în regim laminar, cât și în cel turbulent.

Pentru *nanofluidele* $Al_2O_3 + PEG 400$ concluziile generale ale studiului experimental sunt:

- A fost observată o creștere liniară de 10 % a conductivității termice atunci când temperatura crește până la 333.15 K.
- căldura specifică relativă a nanofluidelor pe bază de alumină crește odată cu adăugarea nanoparticulelor, fenomen ce este urmat de o scădere a căldurii specifice pentru concentrații masice mai mari.
- nanofluidele cu alumină au un comportament newtonian în intervalul de viteză de forfecare studiat. Vâscozitatea crește atunci când nanoparticulele sunt adăugate în fluidul de bază, creșterea fiind de aproximativ 30 % pentru cea mai mare concentrație masică de alumină. Adăugarea unor cantități mici de nanoparticule nu influențează apariția fenomenului de histerezis, în timp ce adăugarea a 5 % wt Al_2O_3 aduce o modificare de 14.5 % a vâscozității după 3 cicluri de încălzire-răcire. Vâscozitatea nanofluidelor pe bază de alumină a scăzut odată cu temperatura.
- la temperatura ambiantă, s-a observat o scădere a conductivității electrice la adăugarea nanoparticulelor de Al_2O_3 în PEG 400. Rezultatele au arătat o creștere a conductivității electrice a nanofluidelor odată cu temperatura.

Pentru *nanofluidele ZnO + PEG 400* concluziile generale ale studiului experimental sunt:

- conductivitatea termică a crescut cu 4 % în comparație cu valorile înregistrate la temperatura ambiantă pentru suspensia cu cea mai mare concentrație.
- creșterea valorilor căldurii specifice depinde de concentrația de nanoparticule, situându-se între 1.5 – 5.4 % în comparație cu fluidul de bază.
- suspensiile cu concentrație scăzută au un comportament newtonian, iar nanofluidul cu 5 % wt ZnO are un comportament non-newtonian la viteze de forfecare scăzute, în timp ce la o viteză de forfecare mai mare de 68 s^{-1} , curgerea a devenit newtoniană. Vâscozitatea nanofluidelor cu ZnO crește cu până la 15 % odată cu adăugarea de nanoparticule și scade cu aproximativ 10 % odată cu creșterea temperaturii în intervalul de temperatură studiat (adică 283.15 – 333.15 K).
- vâscozitatea scade cu aproximativ 5 % după mai multe cicluri de încălzire – răcire.
- adăugarea nanoparticulelor de ZnO în PEG 400 are o influență scăzută sau deloc asupra conductivității electrice a suspensiilor.

Pentru *nanofluidele MWCNT + PEG 400* concluziile generale ale studiului experimental sunt:

- conductivitatea termică rămâne constantă cu temperatura, totuși adaosul de MWCNT este relativ scăzut, astfel încât nu s-a observat nicio influență asupra comportamentului la încălzire.
- căldura specifică crește odată cu creșterea concentrației nanoparticulelor de MWCNT, creșterea fiind între 2.3 % și 12 % în comparație cu fluidul de bază.
- nanofluidele au un comportament non-newtonian, mai accentuat atunci când concentrația de nanoparticule crește. Creșterea vâscozității la temperatura ambiantă este cuprinsă între 10 și 40 % la o viteză de forfecare de 100 s^{-1} . Vâscozitatea scade cu procente cuprinse între 13-18 % la creșterea temperaturii de la 283.15 la 333.15 K. S-a observat un comportament fluidic normal, în timp ce histerezisul vâscozității este destul de scăzut și negativ.
- la temperatura ambiantă se observă o creștere a conductivității electrice odată cu adăugarea de nanoparticule, chiar și la concentrații foarte mici.

Contribuții personale

- S-au studiat nanofluid pe bază de PEG 400, fluid care este foarte puțin studiat în raport cu aplicațiile acestuia în domeniul transferului termic, dar cu un mare potențial în îmbunătățirea transferului de căldură în schimbătoarele de căldură.
- S-au studiat nanofluidel PEG 400 cu trei tipuri de nanoparticule, cel cu ZnO fiind o premieră pe plan internațional.
- Stabilitatea nanofluidelor a fost verificată atât prin observație vizuală, cât și prin analiză tip pH și s-a dovedit că probele au o stabilitate adecvată cu un pH cuprins între 7.44 și 8.90.
- Datele experimentale au fost colectate la temperatura mediului ambiant (adică 298.15 K), și la încălzire până la 328.15 K, precum și după secvențe succesive de încălzire – răcire, oferind o evaluare corectă a posibilelor aplicații ale acestor fluide.
- În ceea ce privește conductivitatea termică relativă, a fost observată o variație polinomială de gradul doi cu fracția volumică a nanoparticulelor, pentru toate cele trei tipuri de nanofluid. În plus, a fost observată o creștere evidentă a conductivității termice atunci când nanoparticulele solide sunt adăugate în fluidul de bază.
- Modelele teoretice de estimare a conductivității termice nu pot fi aplicate fluidelor îmbunătățite cu nanoparticule de MWCNT dar în cazul celor cu nanoparticule de alumina par să estimeze destul de bine valorile experimentale. Pe de altă parte, modelele teoretice sunt sub valorile prezentate în urma concluziilor experimentale pentru nanofluidel cu ZnO.
- În ceea ce privește tipul de nanoparticule, adăugarea nanoparticulelor de alumina și MWCNT au o influență mai graduală decât cea a nanoparticulelor de ZnO, care măresc brusc conductivitatea termică.
- Căldura specifică crește odată cu adăugarea de nanoparticule, influența temperaturii fiind, însă, moderată.
- Au fost propuse mai multe ecuații pentru a descrie comportamentul nanofluidelor în ceea ce privește variația vâscozității (legea puterii și ecuațiile VFT) și a căldurii specifice (au fost propuse regresii polinomiale de ordinul doi).
- Studiul reologic a demonstrat că PEG 400 are un comportament newtonian, la fel și nanofluidel cu alumina și cele slab concentrate pe bază de ZnO. În schimb adăugarea de nanoparticule de MWCNT modifică curgerea în una non-newtoniană.

- Testele de vâscozitate au arătat că toate probele au un comportament fluidic normal iar vâscozitatea crește odată cu adăugarea de nanoparticule.
- Histerezisul vâscozității a fost verificat și nu au fost observate modificări importante în cazul nanofluidelor oxidice iar pentru nanofluidelor cu MWCNT prezența histerezisului este moderată.
- Conductivitatea electrică a polietilen glicolului PEG 400 și a nanofluidelor, cu diferite tipuri de nanoparticule (un izolator, un semiconductor și un conductor) a fost studiată cu atenție la temperatura ambiantă și între 293.15 – 333.15 K. Rezultatele au fost discutate din punct de vedere al stadiului actual.
- Testele efectuate la temperatura ambiantă privind conductivitatea electrică au demonstrat dependența conductivității electrice de tipul de nanoparticule și de concentrația acestora.
- Testele privind variația conductivității electrice cu temperatura pentru nanofluidelor cu ZnO și MWCNT au relevat o creștere liniară a conductivității electrice cu temperatura, așa cum a fost demonstrat și în literatura de specialitate dar în cazul nanofluidelor pe bază de alumina, aceasta scade odată cu creșterea temperaturii.
- Toate datele experimentale au fost corelate în ceea ce privește concentrația de nanoparticule în fluidul de bază și influența temperaturii, precum și în ceea ce privește corelațiile 3D (adică bazate atât pe concentrația masică, cât și pe influența temperaturii).
- Toate datele experimentale au fost comparate cu modele teoretice.
- A fost realizată o analiză teoretică cu relevanță pentru aplicațiile practice, analiză ce a luat în considerare puterea de pompare, numărul Pr, difuzivitatea termică și numărul Mo.
- Au fost discutate punctual atât avantajele noilor fluide în îmbunătățirea transferului de căldură, cât și dezavantajele în ceea ce privește puterea de pompare.

Direcții viitoare de cercetare

Aplicațiile și analiza comportamentului fluidic și termic al nanofluidelor pe bază de PEG 400 se află încă în stadiu de dezvoltare. Trebuie dezvoltate noi suspensii de nanoparticule și sunt necesare mai multe studii experimentale asupra proprietăților termofizice pentru a putea trage o concluzie fermă asupra avantajelor și dezavantajelor.

Efectul sinergic dintre nanoparticule și fluidul de bază trebuie demonstrat prin studiul mai multor suspensii care utilizează perechi de nanoparticule și fluide de bază.

De asemenea, este necesară studierea unor concentrații diferite de nanoparticule pentru a confirma eventuala modificare a comportamentului electric la o anumită valoare. În plus, studiile privind comportamentul electric trebuie extinse la comportamentul dielectric, în acord cu aplicațiile posibile.

Există o mare perspectivă în utilizarea polietilen glicolului PEG 400 ca fluid de bază pentru aplicații termice, totuși acest potențial trebuie dovedit prin intensificarea efortului experimental și asupra altor combinații (mai exact, alte suspensii și concentrații) pentru a obține o imagine de ansamblu completă asupra aplicațiilor și dezavantajelor acestor noi fluide.

Cercetările viitoare se vor axa pe studii numerice și experimentale utilizând schimbătoare de căldură, pentru o mai bună înțelegere a fenomenelor care apar atunci când este utilizat polietilen glicolul PEG 400.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [2] A.A. Minea, State of the art in PEG-based heat transfer fluids and their suspensions with nanoparticles, *Nanomaterials*, 11(1) (2021) 86.
- [3] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2) (2009) 318-345.
- [8] M.A. Marcos, D. Cabaleiro, María J.G. Guimarey, María J.P. Comuñas, L. Fedele, J. Fernández, L. Lugo, PEG 400-Based Phase Change Materials Nano-Enhanced with Functionalized Graphene Nanoplatelets, *Nanomaterials*, 8 (2018) 16.
- [56] M.A. Marcos, N.E. Podolsky, D. Cabaleiro, L. Lugo, A.O. Zakharov, V.N. Postnov, N.A. Charykov, S.V. Ageev, K.N. Semenov, MWCNT in PEG-400 nanofluids for thermal applications: A chemical, physical and thermal approach, *Journal of Molecular Liquids*, 294 (2019) 111616.
- [57] M.A. Marcos, D. Cabaleiro, S. Hamze, L. Fedele, S. Bobbo, P. Estellé, L. Lugo, NePCM Based on Silver Dispersions in Poly(Ethylene Glycol) as a Stable Solution for Thermal Storage, *Nanomaterials*, 10 (2020) 19.
- [63] D. Cabaleiro, S. Hamze, J. Fal, M. A. Marcos, P. Estellé, G. Zyła, Thermal and Physical Characterization of PEG Phase Change Materials Enhanced by Carbon-Based Nanoparticles, *Nanomaterials*, 10 (2020) 1168.
- [69] M.A. Marcos, L. Lugo, S.V. Ageev, N.E. Podolsky, D. Cabaleiro, V.N. Postnov, K.N. Semenov, Influence of molecular mass of PEG on rheological behaviour of MWCNT-based nanofluids for thermal energy storage, *Journal of Molecular Liquids*, 318 (2020) 113965.
- [75] G. Zyła, J. Fal, Experimental studies on viscosity, thermal and electrical conductivity of aluminum nitride–ethylene glycol (AlN–EG) nanofluids, *Thermochimica Acta*, 637 (2016) 11-16.
- [76] G. Zyła, J. Fal, Viscosity, thermal and electrical conductivity of silicon dioxide–ethylene glycol transparent nanofluids: An experimental studies, *Thermochimica Acta*, 650 (2017) 106-113.

- [85] A.A. Minea, Comparative study of turbulent heat transfer of nanofluids: effect of thermophysical properties on figure of merit ratio, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(1) (2016) 407-416.
- [92] G.M. Moldoveanu, C. Ibanescu, M. Danu, A.A. Minea, Viscosity estimation of Al₂O₃, SiO₂ nanofluids and their hybrid: An experimental study, *Journal of Molecular Liquids*, 253 (2018) 188-196.
- [95] S.B. Mousavi, S.Z. Heris, Experimental investigation of ZnO nanoparticles effects on thermophysical and tribological properties of diesel oil, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 23603 – 23614.
- [96] D.K. Singh, D.K. Pandey, R.R. Yadav, Devraj Singh, A study of ZnO nanoparticles and ZnOEG nanofluid, *Journal of Experimental Nanoscience*, 8(5) (2013) 731-741.
- [107] M.D. Donohue, G.L. Aranovich, Classification of Gibbs adsorption isotherms, *Advances in Colloid and Interface Science*, 76-77 (1998) 137-152.
- [112] M.A. Marcos, D. Cabaleiro, M.J.G. Guimarey, M.J.P. Comuñas, L. Fedele, J. Fernández, L. Lugo, PEG 400-Based Phase Change Materials Nano-Enhanced with Functionalized Graphene Nanoplatelets, *Nanomaterials*, 8 (1) (2018) 16.
- [113] L. Mu, J. Wu, L. Matsakas, M. Chen, A. Vahidi, M. Grahn, U. Rova, P. Christakopoulos, J. Zhu, Y. Shi, Lignin from Hardwood and Softwood Biomass as a Lubricating Additive to Ethylene Glycol, *Molecules*, 23 (2018) 537.
- [127] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1 (1962) 187–91.
- [168] A.A. Minea, A Review on Electrical Conductivity of Nanoparticle-Enhanced Fluids, *Nanomaterials*, 9 (2019) 1592.
- [173] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 11 (1998) 151–170.
- [174] B.E. Rapp, *Fluids*, Editor(s): Bastian E. Rapp, In *Micro and Nano Technologies, Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*, Elsevier, 2017, Pages 243-263, ISBN 9781455731411.

ANEXA 4

ACTIVITATE ȘTIINȚIFICĂ ÎN TEMATICA TEZEI DE DOCTORAT

Lucrări publicate în reviste cotate Wos, cu factor de impact:

a. În domeniul tezei de doctorat și în care s-au publicat rezultatele din teză

1. **M. Chereches**, D. Bejan, E.I. Chereches, A.A. Minea, Experimental and analytical investigation of the convective heat transfer potential of PEG 400 based nanocolloids with Al₂O₃ and ZnO nanoparticles, *Heat and Mass Transfer*, 59 875-890 (2023), 10.1007/s00231-022-03305-z, **IF = 2.325 (Q3)**.
2. E.I. Chereches, **M.I. Chereches**, A.A. Minea, Experimental results on specific heat capacity of MWCNT nanoenhanced PEG fluid, *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS SERIES-APPLIED MATHEMATICS MECHANICS AND ENGINEERING*, 65 (4) 1059-1064 (2022) **IF = 0.3 (Q4)**.
3. **M. Chereches**, D. Bejan, E.I. Chereches, A.A. Minea, Experimental studies on several properties of PEG 400 and MWCNT nanoenhanced PEG 400 fluids, *Journal of Molecular Liquids*, 356 119049 (2022), 10.1016/j.molliq.2022.119049, **IF = 6.633 (Q1)**.
4. **M. Chereches**, C. Ibanescu, M. Danu, E.I. Chereches, A.A. Minea, PEG 400-Based Phase Change Materials Nano-Enhanced with Alumina: an experimental approach, *Alexandria Engineering Journal*, 61 (9) (2022) 6819-6830, 10.1016/j.aej.2021.12.029, **IF = 6.626 (Q1)**.
5. **M. Chereches**, D. Bejan, C. Ibanescu, M. Danu, E.I. Chereches, A.A. Minea, Viscosity and isobaric heat capacity of PEG 400-Based Phase Change Materials Nano-Enhanced with ZnO nanoparticles, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147 8815–8826 (2022), 10.1007/s10973-021-11171-w, **IF = 4.755 (Q1)**.
6. **M. Chereches**, A. Vardaru, G. Humnic, E.I. Chereches, A.A. Minea, A. Humnic, Thermal conductivity of stabilized PEG 400 based nanofluids: An experimental approach, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 130 105798 (2022), 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105798, **IF = 6.782 (Q1)**.

7. **M. Chereches**, D. Bejan, E.I. Chereches, A. Alexandru, A.A. Minea, An Experimental Study on Electrical Conductivity of Several Oxide Nanoparticle Enhanced PEG 400 Fluid, *International Journal of Thermophysics*, 42 (7) (2021) 104, 10.1007/s10765-021-02855-4, **IF = 2.416 (Q3)**.

b. În domeniul conex tezei de doctorat (alte nanofluide)

8. R. Nimmagadda, E.I. Cherecheș, **M. Chereches**, Heat Transfer Performance of Uni-Directional and Bi-Directional Lid-Driven Cavities Using Nanoparticle Enhanced Ionic Liquids (NEILS), *International Journal of Thermophysics*, 42 (5) (2021) 61, 10.1007/s10765-021-02814-z, **IF = 2.416 (Q3)**.
9. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A. Alexandru, A. Dima, A.A. Minea, Nanoparticles in ionic liquids: numerical evaluation of heat transfer behaviour in laminar flow, *Heat Transfer Engineering*, 42 (19-20) (2021) 1625-1634, 10.1080/01457632.2020.1818372, **IF = 2.431 (Q3)**.
10. E.I. Cherecheș, J.I. Prado, **M. Cherecheș**, A.A. Minea, L. Lugo, Experimental study on thermophysical properties of alumina nanoparticle enhanced ionic liquids, *Journal of Molecular Liquids*, 291 (2019) 111332, 10.1016/j.molliq.2019.111332, **IF = 6.633 (Q1)**.

Lucrări publicate în reviste indexate în diferite baze de date:

a. În domeniul tezei de doctorat și în care s-au publicat rezultatele din teză

1. E.I. Cherecheș, **M.I. Cherecheș**, L. Zupcu, A.A. Minea, CFD analysis of PEG 400 based nanofluids, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, ISSN 2067–3604, Vol. XIV, No. 3/2022, <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.31>.
2. **M.I. Cherecheș**, E.I. Cherecheș, A.A. Minea, Studies on phase change materials improved with nanoparticles, *BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI*, Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Volumul 67 (71), Numărul 1-2, 2021, Secția ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR, Iasi, Romania.
3. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A.A. Minea, J.I. Prado, L. Lugo, A numerical approach in the assessment of a new class of fluids performance in laminar flow, *International Conference ModTech 2019*, June 19-22, 2019, Iasi, Romania, IOP Conference Series: Materials Science

and Engineering, 591 (1) (2019) 012044, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/591/1/012044> – SCOPUS, GOOGLE SCHOLAR.

4. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A.A. Minea, A study on specific heat of nanoparticle enhanced fluids, UgalMat 2018 The 8th CONFERENCE ON MATERIAL SCIENCE & ENGINEERING, October 11-13, 2018, Galati, Romania, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 485 (1) (2018) 012006, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/485/1/012006>, – SCOPUS, GOOGLE SCHOLAR.

b. În domeniul conex tezei de doctorat (alte nanofluide)

5. E.I. Cherecheș, **M.I. Cherecheș**, A.A. Minea, Analysis of the operating behavior of some mixtures: water, ionic liquid, nanoparticles, BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI, Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Volumul 67 (71), Numărul 1-2, 2021, Secția ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR, Iasi, Romania.

Lucrări prezentate la conferințe internaționale:

a. În domeniul tezei de doctorat și în care s-au publicat rezultatele din teză

1. E.I. Chereches, **M.I. Chereches**, A.A. Minea, Studies on the viscosity of nanoparticle enhanced fluids for heat transfer applications, EmergeMAT, 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IN MATERIALS ENGINEERING, 9-10 November 2023, Bucharest, Romania, <https://imnr.ro/wp/en/6th-international-conference-emergemat/>, (*oral presentation*).
2. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A.A. Minea, Experimental results on specific heat capacity of MWCNT nanoenhanced PEG fluid, IManEE 2022: 26th International Conference of Innovative Manufacturing Engineering & Energy, November 17-19, 2022, Iasi, Romania. <https://imane.ro/> (*oral presentation*).
3. E.I. Chereches, **M. Chereches**, L. Zupcu, A.A. Minea, CFD analysis of PEG 400 based nanofluids, ModTech2022 International Conference, June 22-25, 2022, Eforie Nord, Romania. <https://modtech.ro/> (*oral presentation*).

4. **M. Chereches**, C. Ibanescu, M. Danu, E.I. Chereches, A.A. Minea, PEG nanoparticle enhanced fluids with Al₂O₃ and ZnO viscosity studies, International Conference on Rheology, May 26, 2022, Iasi, Romania (*oral presentation*).
5. **M.I. Chereches**, E.I. Chereches, PEG based nanofluids and their thermophysical properties, 5th International Conference of the Doctoral School, Technical University "Gheorghe Asachi" of Iasi, Romania, May 18 - 20, 2022, Iasi, Romania (*oral presentation*).
6. **M.I. Chereches**, E.I. Chereches, D. Bejan, A.A. Minea, A morphology study on several PEG 400 based nanocolloids, International Symposium on Thermodynamics of Metal Complexes, June 16–18, 2021, Białystok, vol.: 10, SYMPOSIUM EDITION: XXXI, <https://www.ismecgroup.org/ismec-acta/>, ISSN: 2239-2459, (*poster presentation*).

b. În domeniul conex tezei de doctorat (alte nanofluide)

7. E.I. Chereches, **M.I. Chereches**, A.A. Minea, Electrical conductivity studies on ionic liquids enhanced with nanoparticles, The 22th International Conference Tehnomus-New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, 10 - 11 November 2023, Suceava, Romania, <http://www.tehnomus.usv.ro/>, (*oral presentation*).
8. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A. A. Minea, S M Sohel Murshed, Numerical Analysis of Ionic Liquids Based Nanocolloids Behaviour at Heat Transfer, 3rd European Symposium on Nanofluids (ESNf), September 9-10, 2021, Iasi, Romania (*oral presentation*).
9. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A.A. Minea, CFD analysis of new heat transfer fluids based on ionic liquids, "23rd Congress on Thermal Science and Technology with International Participation (ULIBTK 2021)", September 8-10, 2021, Gaziantep, Turkey. <http://ulibtk2021.gantep.edu.tr/index.php?dil=en>. (*oral presentation*).
10. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A.A. Minea, A numerical study on ionic liquids - water mixture based ionanofluid enhanced with alumina nanoparticles, 31st European Congress on Nanotechnology and Materials Engineering, February 12-13, 2020, Paris, France, (*poster presentation*).
11. J.I. Prado, E.I. Cherecheș, **M. Cherecheș**, A.A. Minea, L. Lugo, Design of ionic liquid-water mixture based nanofluids with aluminium oxide nanoparticles, 1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019), 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf2019), June 26-28,

- 2019, Castellon, **Spain**, <http://dx.doi.org/10.6035/CA15119.03>, ISBN 978-84-685-3917-1, *(poster presentation)*.
12. E.I. Chereches, **M. Chereches**, A. Dima and A.A. Minea, Nanoparticles in ionic liquids: numerical evaluation of heat transfer behavior in laminar flow, 1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019), 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf 2019), June 26-28, 2019, Castellon, **Spain**, <http://dx.doi.org/10.6035/CA15119.03>, ISBN 978-84-685-3917-1. *(poster presentation)*.
13. E.I. Chereches, **M.I. Chereches**, A numerical study on ionic liquids - water mixture based ionanofluid enhanced with alumina nanoparticles, 3rd International Conference of the Doctoral School, Technical University "Gheorghe Asachi" of Iasi, May 22 - 23, 2019, Iasi, Romania *(oral presentation)*.
14. I.E. Dinu, **M. Chereches**, A theoretical, numerical and experimental approach on the intensification of heat transfer through the use of IoNanofluids, 2nd International Conference of the Doctoral School, Technical University "Gheorghe Asachi" of Iasi, May 23 - 24, 2018, Iasi, Romania *(oral presentation)*.
15. **M. Chereches**, I.E. Dinu, A.A. Minea, Nanoparticle Enhanced Ionic Liquids thermophysical properties variation and the benefits of their development, First International Conference on Energy Systems Engineering, KBU—Karabuk, **Turkey**, November 2-4, 2017, ISBN:978-605-9554-13-8, Published date: 25 December 2017 *(oral presentation)*.

Experiență proiecte

1. *Director de proiect* Nr. GI /R6_Drd/2021, Contract de grant intern „Granturi interne de sprijinire a finalizării tezelor de doctorat din cadrul TUIASI”, Valoare contract **10.000 RON** - 01.08.2021 – 30.11.2021
2. *Doctorand* Grant intern - Publicații, nr. GI/P27/2021 – PEG 400-Based phase change materials Nano- Enhanced with Alumina and ZnO: An experimental approach, Valoare grant **45.000 RON** - 01.07.2021- 15.12.2021
3. *Membru proiect* international COST Action CA 15119: Overcoming Barriers to Nanofluids Market Uptake (NANO-UPTAKE) - 2016 – 2020