

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Mecanică

Gheorghe Alexandru VĂRDARU

Contribuţii la creşterea eficienţei colectoarelor solare

Contributions to increasing the efficiency of solar collectors

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof. univ. dr. habil. Gabriela HUMINIC

BRAŞOV, 2025

MULȚUMIRI

Teza de doctorat reprezintă rezultatul unei perioade de muncă intensă și dedicare, desfășurată în cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Braşov. Privind în urmă, realizez că acest parcurs, pe un subiect inovator și provocator pentru mediul academic din România, nu ar fi fost posibil fără sprijinul și încrederea unor persoane deosebite.

În primul rând, doresc să-i mulțumesc coordonatorului meu, doamnei prof. Dr. habil. ing. Gabriela Huminic, pentru îndrumarea constantă și răbdarea de care a dat dovadă pe parcursul întregului proces. Cunoștințele sale și deschiderea față de idei noi mi-au oferit o viziune clară și m-au motivat să continui, chiar și în momentele dificile. De asemenea, îi sunt recunoscător pentru oportunitatea de a lucra în cadrul proiectului său de cercetare, pe baza căruia s-a fundamentat întreaga mea teză de doctorat.

Accesul la o infrastructură de cercetare adecvată a fost esențial pentru realizarea cercetărilor, iar pentru acest lucru îi mulțumesc și domnului profesor Angel Huminic (Universitatea Transilvania din Braşov).

Mulțumesc, de asemenea, domnilor cercetători Claudiu Fleacă, Florian Dumitrache și Ioan Morjan (Institutul Național pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației) pentru prepararea fluidelor multifazice utilizate în experimentele desfășurate în cadrul tezei de doctorat. Fără ajutorul lor, realizarea acestora și progresul tezei nu ar fi fost posibile.

Doresc să îmi exprim recunoștința față de membrii Comisiei de îndrumare și integritate academică pentru sprijinul acordat, precum și pentru observațiile și aprecierile aduse acestei lucrări.

În final, doresc să îmi exprim profunda recunoștință față de părinții mei, care mi-au fost mereu alături și m-au susținut necondiționat pe parcursul întregii mele călătorii. Tatălui meu îi mulțumesc pentru îndrumare, răbdare și încrederea pe care mi-a arătat-o în fiecare pas. Mamei mele îi sunt recunoscător pentru iubirea, sprijinul și sacrificiile pe care le-a făcut pentru mine de-a lungul anilor. De asemenea, fratelui meu îi mulțumesc pentru susținerea și încurajările constante, care au însemnat enorm pentru mine.

Cu recunoștință,

Vărdaru Gheorghe Alexandru

CUPRINS

1. CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT.....	1
2. TEMA TEZEI DE DOCTORAT ŞI DOMENIUL ÎN CARE SE ÎNCADREAZĂ.....	4
3. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT.....	5
4. STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT	6
5. METODOLOGIA DE CERCETARE	8
6. INTRODUCERE.....	9
6.1 Conceptul de fluid de lucru multifazic.....	9
6.2 Aplicații ale fluidelor multifazice	9
6.3 Proprietățile termofizice ale fluidelor multifazice.....	10
6.4 Proprietăților optice ale fluidelor de lucru multifazice.....	10
6.5 Caracteristicile de conversie fototermică.....	11
7. PROPRIETĂȚILE TERMOFIZICE – REZULTATE EXPERIMENTALE	12
7.1 Conductivitatea termică.....	12
7.1.1 Conductivitatea termică a fluidelor de bază.....	12
7.1.2 Conductivitatea termică a fluidelor multifazice	13
7.1.3 Concluzii privind studiul conductivității termice a fluidelor multifazice	18
7.2 Vâscozitatea dinamică	19
7.2.1 Vâscozitatea dinamică a fluidelor de bază	19
7.2.2 Vâscozitatea dinamică a fluidelor multifazice	20
7.2.3 Concluzii privind studiul vâscozității dinamice a fluidelor multifazice	25
7.3 Densitatea	25
7.3.1 Densitatea fluidelor de bază.....	25
7.3.2 Densitatea fluidelor multifazice	26
7.3.3 Concluzii privind studiul densității fluidelor multifazice	31
7.4 Tensiunea superficială	31
7.4.1 Tensiunea superficială a fluidelor de bază.....	31
7.4.2 Tensiunea superficială a fluidelor multifazice	32
7.4.3 Concluzii privind studiul tensiunii superficiale a fluidelor multifazice	37
7.5 Căldura specifică.....	38
7.5.1 Efectul temperaturii și al concentrației asupra căldurii specifice a fluidelor multifazice.....	38

7.5.2	Concluzii privind căldura specifică a fluidelor multifazice	42
8.	PROPRIETĂȚILE OPTICE – REZULTATE EXPERIMENTALE.....	43
8.1	Procedura experimentală.....	43
8.2	Interpretarea rezultatelor pentru fluidele de bază.....	43
8.3	Fluide multifazice pe bază de apă.....	45
8.3.1	Transmitanța	45
8.3.2	Absorbanța.....	47
8.4	Fluide multifazice pe bază de apă+EG.....	50
8.4.1	Transmitanța	50
8.4.2	Absorbanța.....	52
8.5	Concluzii privind proprietățile optice ale fluidelor multifazice.....	54
9.	CARACTERISTICILE DE CONVERSIE FOTOTERMICĂ – REZULTATE EXPERIMENTALE.....	55
9.1	Interpretarea rezultatelor	55
9.2	Performanța de conversie fototermică a fluidelor multifazice pe bază de apă.....	57
9.3	Performanța de conversie fototermică a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG.....	61
9.4	Concluzii privind caracteristicile de conversie fototermică ale fluidelor multifazice.....	65
10.	CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE.....	66
	Bibliografie	69
	ANEXA 1. Rezultatele cercetării prezentate în articole publicate în jurnale științifice sau expuse în cadrul conferințelor	74

Abrevieri

Al_2O_3 – oxid de aluminiu

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ – alumina gamma, o formă specifică a oxidului de aluminiu

ASHRAE – Societatea Americană a Inginerilor în Încălzire, Ventilație, Aer Condiționat și Refrigerare

CNT – nanotuburi de carbon

CuO – oxid de cupru

EG – etilen glicol

Fe – fier

Fe_3O_4 – oxid de fier sau magnetit

GNP – nanoparticule de grafen

LSPR – rezonanță plasmonică de suprafață localizată

MgO – oxid de magneziu

MWCNT – nanotuburi de carbon cu pereți multipli

NIST – Institutul Național de Standarde și Tehnologie

Pt – platină

PV/T – fotovoltaice/termice

SiC – carbură de siliciu

wt – concentrație masică

1. CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

LISTA TABELE.....	1
LISTA FIGURI.....	2
LISTA NOTAȚII, ABREVIERI.....	6
REZUMAT.....	9
ABSTRACT.....	11
Capitolul 1 Introducere.....	13
1.1 Importanța domeniului de cercetare.....	13
1.2 Obiectivele tezei.....	14
Capitolul 2 Stadiul actual în domeniul fluidelor de lucru multifazice.....	16
2.1 Conceptul de fluid de lucru multifazic.....	16
2.2 Aplicații ale fluidelor multifazice	16
2.3 Proprietățile termofizice ale fluidelor multifazice.....	17
2.3.1 Conductivitatea termică.....	18
2.3.2 Vâscozitatea dinamică.....	25
2.3.3 Densitatea	30
2.3.4 Tensiunea superficială.....	34
2.3.5 Căldura specifică.....	39
2.4 Studiul teoretic al proprietăților optice ale fluidelor de lucru multifazice.....	44
2.5 Studiul teoretic al caracteristicilor de conversie fototermică	48
Capitolul 3 Prepararea și metodele de investigare a fluidelor multifazice.....	54
3.1 Măsurarea conductivității termice.....	57
3.2 Măsurarea vâscozității dinamice	57
3.3 Măsurarea densității.....	58
3.4 Măsurarea tensiunii superficiale.....	59
3.5 Măsurarea proprietăților optice	59
3.6 Măsurarea proprietăților de conversie fototermică	60
Capitolul 4 Studiul experimental al proprietăților termofizice.....	62
4.1 Studiul experimental al conductivității termice a fluidelor multifazice	62
4.1.1 Conductivitatea termică a fluidelor de bază.....	62
4.1.2 Conductivitatea termică a fluidelor multifazice	63

4.1.3	Compararea cu modele teoretice.....	74
4.1.4	Compararea rezultatelor cu modelele empirice.....	79
4.1.5	Concluzii privind studiul conductivităţii termice a fluidelor multifazice	84
4.2	Studiul experimental al vâscozităţii dinamice a fluidelor multifazice.....	84
4.2.1	Vâscozitatea dinamică a fluidelor de bază	84
4.2.2	Vâscozitatea dinamică a fluidelor multifazice	85
4.2.3	Compararea cu modele teoretice.....	97
4.2.4	Compararea rezultatelor cu modelele empirice.....	102
4.2.5	Concluzii privind studiul vâscozităţii dinamice a fluidelor multifazice.....	107
4.3	Studiul experimental al densităţii fluidelor multifazice	108
4.3.1	Densitatea fluidelor de bază.....	108
4.3.2	Densitatea fluidelor multifazice	109
4.3.3	Compararea cu modele teoretice.....	118
4.3.4	Compararea rezultatelor cu modelele empirice.....	121
4.3.5	Concluzii privind studiul densităţii fluidelor multifazice	127
4.4	Studiul experimental al tensiunii superficiale.....	127
4.4.1	Tensiunea superficială a fluidelor de bază.....	127
4.4.2	Tensiunea superficială a fluidelor multifazice	129
4.4.3	Compararea valorilor de tensiune superficială (TS) obţinute experimental cu cele raportate în alte studii	140
4.4.4	Concluzii privind studiul tensiunii superficiale a fluidelor multifazice	143
4.5	Studiu teoretic privind căldura specifică (CS) a fluidelor multifazice	144
4.5.1	Efectul temperaturii asupra CS a fluidelor multifazice.....	144
4.5.2	Efectul concentraţiei asupra CS a fluidelor multifazice	149
4.5.3	Compararea valorilor căldurii specifice (CS) cu cele raportate în studiile anterioare....	153
4.5.4	Concluzii privind căldura specifică a fluidelor multifazice studiate	159
Capitolul 5 Studiul experimental al proprietăţilor optice ale noilor fluide multifazice.....		160
5.1	Interpretarea rezultatelor pentru fluidele de bază.....	160
5.2	Fluide multifazice pe bază de apă.....	162
5.2.1	Transmitanţa	162
5.2.2	Absorbanţa.....	165
5.2.3	Coeficientul de extincţie.....	168

5.3	Fluide multifazice pe bază de apă+EG.....	171
5.3.1	Transmitanţa	171
5.3.2	Absorbanţa.....	174
5.3.3	Coeficientul de extincţie.....	177
5.4	Concluzii privind proprietăţile optice ale fluidelor multifazice	184
Capitolul 6	Studiul experimental al caracteristicilor de conversie fototermică.....	185
6.1	Interpretarea rezultatelor	185
6.1.1	Performanţa de conversie fototermică a fluidelor multifazice pe bază de apă.....	187
6.1.2	Performanţa de conversie fototermică a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG	193
6.2	Compararea rezultatelor obţinute pentru randamentul de conversie fototermică al fluidelor multifazice	199
6.3	Concluzii privind caracteristicile de conversie fototermică ale fluidelor multifazice.....	201
Capitolul 7	Concluzii, contribuţii personale şi direcţii de cercetare.....	203
	Bibliografie.....	207
ANEXA 1.	Rezultatele cercetării prezentate în articole publicate în jurnale ştiinţifice sau expuse în cadrul conferinţelor.....	223

2. TEMA TEZEI DE DOCTORAT ŞI DOMENIUL ÎN CARE SE ÎNCADREAZĂ

Pe fondul scăderii resurselor energetice convenţionale şi al creşterii cererii de soluţii durabile, identificarea unor metode eficiente de producere şi utilizare a energiei devine o necesitate globală. Schimbările climatice şi impactul combustibililor fosili asupra mediului au accelerat interesul pentru sursele regenerabile, cum ar fi energia solară, o alternativă promiţătoare pentru un viitor sustenabil.

Această teză, cu tema „*Contribuţii la creşterea eficienţei colectoarelor solare*”, se încadrează în **domeniul energiei solare** şi se concentrează pe utilizarea fluidelor multifazice în colectoarele solare cu absorbţie directă (DASC-uri). Colectoarele solare, esenţiale în captarea şi transformarea energiei solare în căldură, necesită îmbunătăţiri ale eficienţei, iar nanotehnologia oferă soluţii inovative.

Fluidele multifazice sunt formate din nanoparticule solide dispersate într-un fluid de bază (apă, etilen glicol (EG) sau amestecuri de apă cu EG). Aceste fluide, care pot conţine una sau mai multe tipuri de nanoparticule, au proprietăţi superioare, cum ar fi o conductivitate termică îmbunătăţită şi o capacitate mare de absorbţie a radiaţiei solare, caracteristici care le fac ideale pentru utilizarea în DASC-uri.

Interesul tot mai mare pentru fluidele multifazice, atât în cercetare, cât şi în industrie, se datorează potenţialului lor de a îmbunătăţi eficienţa echipamentelor solare şi de a reduce impactul asupra mediului. Progresele recente în acest domeniu deschid noi perspective asupra mecanismelor care intensifică transferul de căldură şi îmbunătăţesc conversia energiei solare.

Argumentele principale care justifică alegerea acestei teme sunt:

- **Criza energetică globală:** În contextul crizei energetice, creşterea eficienţei sistemelor de producere, transfer şi stocare a energiei devine o necesitate. Fluidele multifazice reprezintă o soluţie inovatoare care poate contribui la reducerea consumului de energie şi a emisiilor de carbon, un aspect esenţial în lupta împotriva încălzirii globale.
- **Evoluţia rapidă a nanotehnologiilor:** Progresul rapid al nanotehnologiilor, inclusiv în ceea ce priveşte fluidele multifazice, oferă noi oportunităţi în domenii precum cel energetic. Fluidele multifazice, care combină diferite tipuri de nanoparticule, au performanţe mai bune şi sunt de mare interes în aplicaţiile de captare şi utilizare a energiei solare.
- **Interesul global în cercetarea fluidelor multifazice:** La nivel global, cercetarea în domeniul fluidelor multifazice beneficiază de resurse importante, printre care se numără fondurile oferite de guverne, investiţiile companiilor private, infrastructura modernă de cercetare, accesul la echipamente de laborator de ultimă tehnologie, precum şi colaborările interdisciplinare între universităţi şi institute de cercetare. Diverse programe de finanţare, cum ar fi cele susţinute de Uniunea Europeană prin FP7 şi Horizon 2020, au sprijinit dezvoltarea nanotehnologiilor, inclusiv fluidelor multifazice, pentru o gamă largă de aplicaţii energetice. Acest interes arată cât de mult pot contribui fluidele multifazice la îmbunătăţirea eficienţei energetice în viitor.
- **Impact şi potenţial:** Fluidele multifazice oferă beneficii majore în eficienţa energetică, reducerea costurilor şi a impactului negativ asupra mediului, deschizând noi perspective pentru utilizarea energiei solare.

3. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Cercetările experimentale vizează creşterea eficienţei colectoarelor solare prin identificarea şi implementarea unor soluţii inovatoare pentru optimizarea transferului termic. Aceste soluţii includ dezvoltarea şi optimizarea fluidelor de lucru utilizate în sistemele energetice, cu scopul de a îmbunătăţi performanţele termice şi a creşte sustenabilitatea în captarea şi utilizarea energiei solare.

În cadrul acestei teze, se propune dezvoltarea unor fluide multifazice, compuse dintr-un fluid de bază (apă şi amestec de apă cu EG) şi o fază solidă alcătuită din nanoparticule metalice şi oxidice cu dimensiuni la scară nanometrică.

Un aspect inovator al cercetării îl reprezintă utilizarea nanoparticulelor de argint (Ag) combinate cu oxid de grafen redus (rGO), oxid de fier (Fe_2O_3), carbură de fier (FeC) şi dioxid de titan (TiO_2). Aceste combinaţii sunt alese datorită capacităţii lor de a creşte semnificativ conductivitatea termică, optimizând astfel eficienţa transferului termic.

Obiectivul general al tezei constă în dezvoltarea unor fluide multifazice cu proprietăţi termofizice, optice şi de conversie fototermică îmbunătăţite, care să fie eficiente în aplicaţiile termice, în special în DASC.

Studiul analizează în detaliu comportamentul fluidelor multifazice, urmărind să determine performanţele acestora şi potenţialul lor de aplicare în optimizarea eficienţei energetice.

Obiectivele specifice ale tezei sunt:

- dezvoltarea tehnicilor experimentale pentru caracterizarea proprietăţilor termofizice (conductivitate termică, vâscozitate, densitate, tensiune superficială).
- investigarea experimentală a proprietăţilor optice (coeficienţi de transmisie şi extincţie) ale fluidelor de transfer de căldură.
- realizarea unui studiu experimental privind eficienţa conversiei fototermice a fluidelor de transfer de căldură.

Principalele etape ale cercetării prezentate în teză sunt:

- Studiul teoretic şi experimental al proprietăţilor termofizice ale fluidelor multifazice pe bază de nanoparticule de Ag cu rGO, Fe_2O_3 , TiO_2 şi FeC în apă şi în amestec de apă+EG.
- Dezvoltarea de modele empirice pentru estimarea proprietăţilor termofizice în funcţie de concentraţia nanoparticulelor şi de temperatură.
- Studiul teoretic şi experimental al proprietăţilor optice ale fluidelor multifazice.
- Studiul teoretic şi experimental al proprietăţilor de conversie fototermică ale fluidelor multifazice.
- Analiza comparativă a rezultatelor obţinute pentru fluidele multifazice pe bază de apă şi pentru cele cu amestec de apă+EG.

4. STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat este structurată în 7 capitole.

Capitolul 1: Introducere detaliază tema lucrării, subliniind importanța fluidelor multifazice în diverse domenii de aplicare. De asemenea, sunt prezentate obiectivele cercetării, care urmăresc o înțelegere mai profundă a fenomenelor implicate și dezvoltarea unor fluide multifazice cu proprietăți îmbunătățite, destinate utilizării într-un DASC.

Capitolul 2: Stadiul actual în domeniul fluidelor multifazice prezintă cercetările recente din acest domeniu, evidențiind aspectele fundamentale ale fluidelor multifazice. În prima parte, este definit conceptul de fluide multifazice, subliniind complexitatea și importanța acestora în diverse aplicații energetice.

Capitolul analizează și proprietățile termofizice ale acestor fluide, precum conductivitatea termică, vâscozitatea dinamică, densitatea, tensiunea superficială și căldura specifică. Înțelegerea acestor proprietăți este esențială pentru evaluarea comportamentului fluidelor multifazice în diverse condiții de temperatură și concentrație, precum și pentru înțelegerea impactului lor asupra performanței în DASC-uri.

De asemenea, capitolul analizează studiile teoretice referitoare la proprietățile optice și de conversie fototermică ale fluidelor multifazice, aspecte esențiale în domeniul energetic.

Capitolul oferă o viziune generală asupra progreselor recente în acest domeniu, pregătind astfel baza pentru cercetările și discuțiile ulterioare din teză.

Capitolul 3: Prepararea și metodele de investigare a fluidelor multifazice detaliază procesul de preparare a acestora, prezentând materialele utilizate, caracteristicile lor și rolul surfactanților în asigurarea stabilității și omogenității amestecurilor.

Capitolul include și o descriere detaliată a metodelor de investigare utilizate pentru evaluarea proprietăților termofizice, optice și de conversie fototermică ale fluidelor multifazice studiate, precum și a echipamentelor folosite în experimente.

Capitolul 4: Studiul experimental al proprietăților termofizice se concentrează pe analiza principalelor proprietăți termofizice, cum ar fi conductivitatea termică, vâscozitatea dinamică, densitatea, tensiunea superficială și căldura specifică.

Sunt prezentate rezultatele experimentale obținute atât pentru fluidele de bază, cât și pentru cele multifazice, cu scopul de a evalua influența concentrației de nanoparticule asupra proprietăților fluidelor de bază (apă și amestec de apă cu EG în proporție de 1:1, fiecare conținând 0.4 g/l, respectiv 4 g/l de CMCNa) utilizate în prepararea fluidelor multifazice.

Compararea rezultatelor experimentale cu cele obținute din modelele teoretice permite evaluarea concordanței între acestea, în timp ce comparațiile cu modelele empirice sunt utilizate pentru a observa diferențele dintre fluidele multifazice cu un singur component și cele cu două componente. Această comparație evidențiază îmbunătățirile aduse de fluidele multifazice cu două componente față de cele cu un singur component.

Concluziile obținute din aceste analize evidențiază îmbunătățirile aduse de cele mai eficiente combinații dintre nanoparticulele Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂ asupra proprietăților termofizice ale fluidelor de bază, capacitatea modelelor teoretice utilizate de a prezice aceste proprietăți, precum și îmbunătățirile aduse de aceste combinații de nanoparticule, comparativ cu alte combinații studiate de alți cercetători.

Capitolul 5: Studiul experimental al proprietăților optice ale noilor fluide multifazice se concentrează pe analiza comportamentului optic al acestora, punând un accent deosebit pe influența concentrației nanoparticulelor asupra absorbției și transmitanței radiațiilor solare.

În cadrul studiului, sunt realizate comparații între fluidele de bază și fluidele multifazice pentru a evalua impactul nanoparticulelor asupra performanței optice a acestora. Aceste comparații vizează în special eficiența procesului de absorbție a radiației solare, un factor esențial pentru îmbunătățirea performanței colectoarelor solare. Prin analiza comparativă, sunt identificate combinațiile de nanoparticule care oferă cele mai bune caracteristici optice, cum ar fi coeficientul de extincție și absorbția solară, pentru utilizarea în DASC. Astfel, acest proces de comparare ajută la selectarea celor mai eficiente fluide multifazice, contribuind la îmbunătățirea performanței sistemelor solare.

Coeficienții de extincție și spectrele de putere solară absorbită pentru fluidele analizate sunt calculate pe baza măsurătorilor de transmitanță obținute experimental.

Capitolul 6: Studiul experimental al caracteristicilor de conversie fototermică se concentrează pe evaluarea randamentului fluidelor multifazice în conversia fototermică a radiației solare, punând accent pe influența concentrației nanoparticulelor asupra acestuia.

Sunt investigate efectele diferitelor combinații de nanoparticule (precum Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂) la diverse concentrații asupra fluidelor de bază (apă și amestec de apă cu EG) în procesul de conversie a energiei solare în căldură. Astfel, sunt evidențiate îmbunătățirile aduse de nanoparticule și se oferă o înțelegere mai clară a influenței acestora asupra randamentului conversiei fototermice.

Capitolul 7: Concluzii, contribuții personale și direcții de cercetare sintetizează principalele rezultate obținute în cadrul tezei, evidențiind importanța acestora în domeniul fluidelor multifazice utilizate în DASC-uri. De asemenea, sunt prezentate contribuțiile autorului și direcțiile de cercetare viitoare, care vizează utilizarea fluidelor multifazice studiate într-un DASC, în condiții reale de funcționare.

În concluzie, această lucrare aduce contribuții semnificative în domeniul fluidelor multifazice utilizate în DASC-uri. Studiile experimentale realizate au evidențiat efectele pozitive ale combinațiilor de nanoparticule asupra proprietăților termofizice, optice și de conversie fototermică ale fluidelor multifazice, arătând potențialul acestora de a îmbunătăți performanța colectoarelor solare.

5. METODOLOGIA DE CERCETARE

Metodologia cercetării se bazează pe o abordare integrată, care combină analiza bibliografică, experimentele de laborator şi dezvoltarea de modele empirice, urmând ca rezultatele experimentale să fie comparate atât cu cele obţinute pe baza modelelor teoretice, cât şi cu cele raportate de alţi autori pentru fluide similare ce conţin una sau două dintre componentele de interes.

Iniţial, a fost realizată o analiză detaliată a 251 de referinţe bibliografice, selectate din surse academice, reviste de specialitate şi lucrări de cercetare relevante în domeniul fluidelor multifazice, energiei solare şi nanotehnologiei. Această analiză a permis identificarea tendinţelor actuale, a metodelor experimentale şi a modelelor teoretice utilizate în aceste domenii.

Ulterior, au fost efectuate studii experimentale pentru evaluarea proprietăţilor termofizice (conductivitatea termică, vâscozitatea, densitatea şi tensiunea superficială), optice (transmitanţa şi absorbanta) şi de conversie fototermică ale fluidelor de bază (apă şi amestec de apă+EG, cu surfactant la concentraţii de 0.4 şi 4 g/l CMCNa), precum şi ale fluidelor multifazice analizate (Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC şi Ag-TiO₂).

Datele experimentale obţinute au fost utilizate pentru dezvoltarea unor modele empirice care să determine proprietăţile termofizice ale fluidelor multifazice studiate. Fiecare proprietate a fost corelată atât în funcţie de temperatură, cât şi de concentraţie, iar rezultatele obţinute din modelele empirice au fost comparate cu cele generate de modelele teoretice existente în literatura de specialitate, pentru a valida acurateţea acestora în estimarea proprietăţilor termofizice (conductivitatea termică, vâscozitatea, densitatea) ale fluidelor multifazice cu două componente.

De asemenea, rezultatele experimentale au fost comparate şi cu cele obţinute din modelele empirice dezvoltate de alţi autori pentru proprietăţile termofizice (conductivitatea termică, vâscozitatea, densitatea şi tensiunea superficială) ale fluidelor multifazice ce conţin una sau două dintre componentele de interes, ceea ce a permis evaluarea îmbunătăţirilor aduse de combinaţiile de nanoparticule studiate (Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC, Ag-TiO₂) în aceleaşi fluide de bază.

Căldura specifică a fluidelor multifazice a fost calculată pe baza măsurătorilor de densitate, utilizând modelul teoretic propus de Takabi şi colaboratorii săi. Rezultatele obţinute au fost comparate cu valorile obţinute din modelele empirice disponibile în literatura de specialitate pentru fluidele multifazice care conţin una sau două dintre componentele analizate.

Pe baza măsurătorilor de transmitanţă, au fost calculaţi coeficienţii de extincţie pentru fluidele de bază şi pentru cele multifazice, utilizând legea lui Beer-Lambert. Folosind valorile standard ale spectrului solar AM1.5 şi transmitanţele fluidelor, au fost determinate spectrele de putere solară absorbită.

În final, pentru a evalua randamentul conversiei fototermice al fluidelor analizate, a fost utilizată ecuaţia $\eta = Q / (G_s \cdot A \cdot \Delta\tau)$, în care Q reprezintă energia totală stocată de fluidul de lucru, G_s este iradierea solară, A este aria suprafeţei expuse, iar $\Delta\tau$ este intervalul de expunere la radiaţia solară. Rezultatele obţinute au fost comparate cu datele existente privind randamentul conversiei fototermice pentru alte fluide multifazice care conţin una sau mai multe dintre componentele de interes.

Astfel, combinarea acestor abordări – analiza literaturii, experimentele de laborator, modelele empirice dezvoltate şi comparaţiile cu modelele teoretice şi empirice din literatura de specialitate – oferă o perspectivă cuprinzătoare asupra fenomenelor studiate şi contribuie semnificativ la îmbunătăţirea performanţei sistemelor de conversie a energiei solare.

6. INTRODUCERE

6.1 Conceptul de fluid de lucru multifazic

În ultimii ani, cercetările în domeniul fluidelor de lucru multifazice au înregistrat progrese semnificative în îmbunătățirea transferului de căldură și în reducerea impactului asupra mediului. Aceste fluide sunt esențiale în diverse aplicații, de la sisteme de încălzire și răcire până la procese industriale de conversie a energiei fototermice. Caracteristica principală a fluidelor multifazice este prezența simultană a două sau mai multe faze (lichid, gaz, solid) (Figura 6.1), ceea ce le permite să îmbunătățească transferul de căldură și masă [1-3].

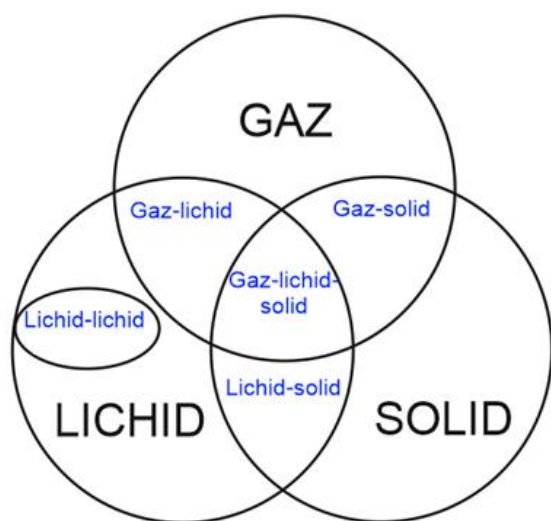


Figura 6.1 Fazele componente ale unui fluid de lucru multifazic

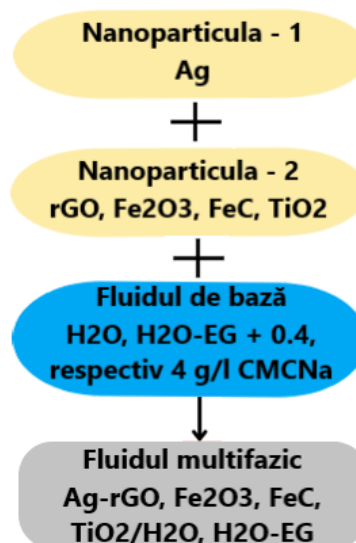


Figura 6.2 Componentele fluidelor de lucru multifazice studiate

Printre noile direcții de cercetare se numără fluidele multifazice, compuse din nanoparticule metalice, oxidice sau pe bază de carbon dispersate în lichide precum apa sau amestecuri de apă cu EG. Nanoparticulele de Ag combinate cu rGO, Fe_2O_3 , FeC și TiO_2 (Figura 6.2) îmbunătățesc proprietățile termofizice ale fluidelor de bază, crescând conductivitatea termică și eficiența transferului de căldură. De asemenea, utilizarea acestora reduce dimensiunile echipamentelor de răcire sau încălzire, economisind spațiu și costuri, contribuind totodată la reducerea emisiilor de carbon.

6.2 Aplicații ale fluidelor multifazice

În 1959, Richard Feynman a deschis drumul către nanotehnologie prin discursul „There's Plenty of Room at the Bottom”, în care anticipa posibilitatea fabricării materialelor la scară atomică [4].

Astăzi, nanotehnologia este un domeniu în expansiune, cu aplicații în industrie și cercetare, iar fluidele multifazice reprezintă un rezultat important al acestei evoluții. Acestea au proprietăți termice superioare față de fluidele convenționale, fiind ideale pentru transferul de căldură. Prin includerea diferitelor combinații de nanoparticule în fluidele convenționale (apă, EG sau amestec de apă cu EG), se îmbunătățesc semnificativ proprietățile optice ale acestora. Exemple de combinații de nanoparticule

inclusiv: MgO-MWCNT, Al₂O₃-CNT, Ag-CNT, Fe₂O₃-CNT, etc. [5]. Aceste combinații prezintă un potențial ridicat în aplicații precum colectoarele solare [6], unde eficiența conversiei fototermice este crucială. Datorită performanțelor termice și optice, fluidele multifazice sunt utilizate în aplicații industriale, cum ar fi tuburi termice [7], radiatoare [8] și schimbătoare de căldură cu plăci [9]. De asemenea, sunt folosite în sisteme de stocare a energiei termice și contribuie la creșterea eficienței în sistemele PV/T [10]. Nanotehnologia promite soluții inovative pentru provocările energetice ale viitorului, prin îmbunătățirea eficienței transferului de căldură, reducerea costurilor și impactului asupra mediului.

6.3 Proprietățile termofizice ale fluidelor multifazice

Principalele proprietăți termofizice ce caracterizează fluidele multifazice așa cum reies din literatura de specialitate, sunt:

- **Conductivitatea termică:** Reprezintă capacitatea unui amestec compus din faze distincte (lichide, gaze sau solide) de a transfera căldura prin conducție. Aceasta reflectă eficiența cu care energia termică este transmisă între fazele componente atunci când există un gradient de temperatură [11]. Prin adăugarea nanoparticulelor, conductivitatea termică a acestor fluide crește semnificativ în comparație cu fluidele convenționale, un aspect esențial în aplicațiile de disipare a căldurii, cum ar fi sistemele de răcire [12].
- **Vâscozitatea dinamică:** Măsoară rezistența opusă de fluid la curgere, influențată de interacțiunile dintre fazele multiple prezente (de exemplu, lichid-solid, lichid-gaz), determinând comportamentul de curgere al amestecului sub acțiunea forțelor externe [13].
- **Densitatea:** reprezintă masa totală a tuturor fazelor din amestec raportată la volumul ocupat. Aceasta depinde de densitatea fiecărei faze componente și poate îmbunătăți capacitatea fluidului de a stoca și transfera energie termică, dar poate afecta și curgerea fluidului în sistemele de transfer de căldură [14].
- **Tensiunea superficială:** Forța care acționează la suprafața unui lichid, făcând ca acesta să se comporte ca o peliculă elastică și să reziste la pătrunderea obiectelor, datorită forțelor de atracție dintre moleculele sale [15]. Modificarea tensiunii superficiale prin includerea nanoparticulelor poate îmbunătăți performanța în aplicații de micro-răcire și microfluidică [16].
- **Căldura specifică:** Se referă la cantitatea de energie necesară pentru a crește temperatura unei unități de masă a unui amestec multifazic cu un grad Celsius sau Kelvin, ținând cont de căldura specifică a fiecărei faze și de schimburile termice dintre ele [11]. Aceasta determină cât de eficient poate un fluid multifazic să stocheze căldura [17], având un impact semnificativ asupra aplicațiilor care implică stocarea și eliberarea energiei termice [18].

Analiza acestor proprietăți este esențială pentru îmbunătățirea performanței fluidelor multifazice în domenii care necesită stabilitate termică și eficiență ridicată în transferul de căldură.

6.4 Proprietăților optice ale fluidelor de lucru multifazice

Cele mai utilizate fluide pentru transferul de căldură, precum apa, glicolii și uleiurile, nu absorb eficient lumina în spectrul ultraviolet (UV) și vizibil, având o absorbție de doar 13% din energia solară primită,

conform studiilor recente [19]. Adăugarea de nanoparticule în cantități foarte mici (sub 0.01 vol%) îmbunătățește semnificativ proprietățile optice ale acestor fluide transparente. Cantitatea de nanoparticule încorporate într-un fluid depinde de aplicația specifică, iar utilizarea acestora conduce la creșterea absorbției de lumină. De exemplu, în timp ce apa și multe lichide organice sunt transparente în intervalul de lungimi de undă de 300-1500 nm, ele pot prezenta o absorbție semnificativă în afara acestui interval [20, 21]. Fluidele multifazice trebuie să absoarbă o cantitate semnificativă de radiație solară pentru a oferi rezultate optime. Fluidele multifazice cu o singură componentă, precum nanotuburile de carbon, au caracteristici optice excelente [22, 23], dar sunt costisitoare și prezintă dificultăți în dispersia uniformă [24]. În schimb, oxizii ceramici (Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiC) au o dispersie bună și o absorbție ridicată în regiunea vizibilă (380-780 nm), dar cu o absorbție mai scăzută în infraroșu apropiat (780-1500 nm) [25]. Spectrul solar conține 53% din energie în regiunea vizibilă și 42% în infraroșu apropiat, fiind astfel esențială creșterea absorbției atât în spectrul vizibil, cât și în cel infraroșu, pentru a optimiza eficiența fluidelor multifazice. Pentru a depăși limitările fluidelor multifazice cu o singură componentă, au fost dezvoltate fluide multifazice formate din două sau mai multe nanoparticule, care oferă proprietăți optice superioare [26, 27]. Acestea pot asigura o absorbție termică solară mai eficientă pe o gamă largă de lungimi de undă, utilizând proprietățile complementare ale diferitelor nanoparticule [28, 29]. Fluidele multifazice pot fi optimizate pentru a capta radiațiile solare din domeniile vizibil și infraroșu apropiat, esențiale pentru colectoarele solare. Principalele proprietăți optice care caracterizează fluidele multifazice, conform literaturii de specialitate, sunt:

- **Transmitanța:** reprezintă capacitatea unui fluid de a permite luminii să treacă prin el, cuantificând fracțiunea de lumină incidentă transmisă fără a fi absorbită sau împrăștiată [26].
- **Absorbanța:** reprezintă capacitatea unui fluid de a absorbi radiația incidentă, iar această proprietate este esențială în domenii precum optica și conversia energiei fototermice [27].

6.5 Caracteristicile de conversie fototermică

Conversia fototermică a fluidelor multifazice implică transformarea energiei luminoase în energie termică prin intermediul particulelor suspendate sau a diferitelor faze din fluid. Caracteristicile care influențează această conversie fototermică și sunt specifice fluidelor multifazice includ [30]:

- **Absorbția luminii:** Capacitatea fluidelor multifazice de a absorbi radiația depinde de compoziția și structura fazelor, precum și de prezența nanoparticulelor.
- **Conductivitatea termică:** Joacă un rol important în transferul căldurii generate prin conversia fototermică. În funcție de fazele componente (solide, lichide, gazoase), această proprietate variază și afectează capacitatea fluidului de a disipa căldura.
- **Eficiența conversiei:** Variază în funcție de absorbția și conductivitatea termică a fazelor, iar nanoparticulele pot îmbunătăți considerabil acest proces.
- **Căldura specifică:** Afectează cantitatea de energie termică stocată, fluidele multifazice având călduri specifice diferite în funcție de fazele componente.

Conceptul de colector solar cu absorbție directă (DASC) a fost propus de Minardi și Chuang în 1975 [30]. Caracteristica principală a DASC-ului este absorbția directă a radiației solare incidente de către volumul de fluid de lucru din sistem.

7. PROPRIETĂȚILE TERMOFIZICE – REZULTATE EXPERIMENTALE

Sunt prezentate și discutate efectele temperaturii și concentrației asupra proprietăților termofizice ale fluidelor de bază, precum și ale fluidelor multifazice (conductivitatea termică, vâscozitatea dinamică, densitatea, căldura specifică și tensiunea superficială). Măsurătorile au fost efectuate pentru apă distilată, apă distilată cu 0.4 și 4 g/l CMCNa, amestecul apă distilată+EG (50:50), cu și fără CMCNa, precum și pentru fluidele multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂, în apă și apă+EG, la trei concentrații de nanoparticule și temperaturi cuprinse între 293.15 și 323.15 K.

7.1 Conductivitatea termică

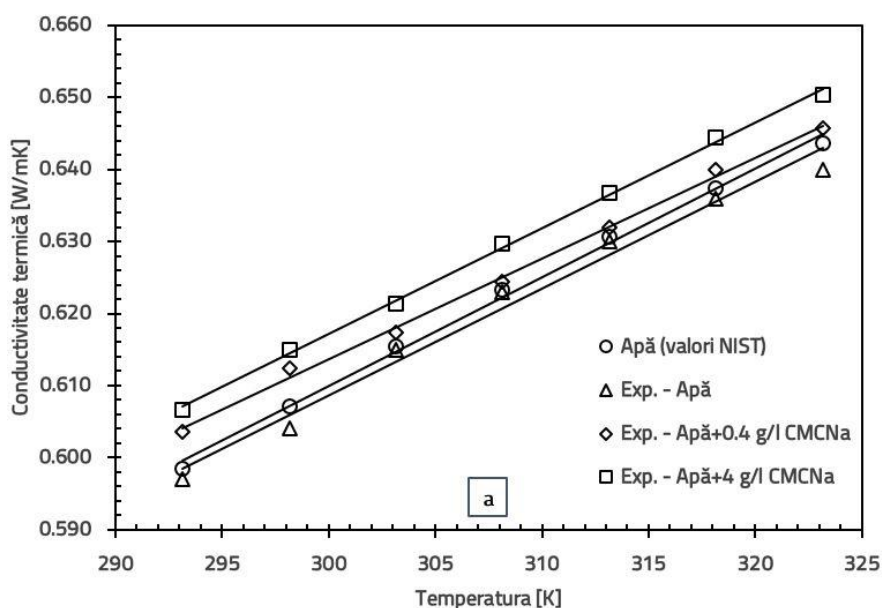
7.1.1 Conductivitatea termică a fluidelor de bază

În prima etapă a fost măsurată conductivitatea termică a fluidelor de bază: apă și amestecul apă+EG (1:1) cu și fără surfactant (0.4 și 4 g/l CMCNa) la temperaturi cuprinse între 293.15 și 323.15 K. Rezultatele au fost comparate cu datele de referință furnizate de NIST [31] și ASHRAE [32].

Figura 7.1 (a) prezintă conductivitatea termică a apei cu și fără surfactant în comparație cu valorile NIST. Conductivitatea termică a apei crește odată cu temperatura, iar valorile obținute experimental pentru apă fără surfactant sunt foarte apropiate de cele NIST cu o abatere maximă de doar 0.552%. Totodată, adăugarea surfactantului în apă (0.4 și 4 g/l CMCNa) a avut un efect redus asupra conductivității termice cu o creștere medie de 0.703, respectiv 1.360% [33].

În Figura 7.1 (b) sunt prezentate valorile conductivității termice pentru amestecul apă+EG cu și fără surfactant, iar datele experimentale sunt comparate cu cele furnizate de ASHRAE. Conductivitatea soluției apă+EG fără surfactant este foarte apropiată de valorile ASHRAE cu o abatere maximă de 1.319% [34]. Adăugarea surfactantului (0.4 și 4 g/l CMCNa) a dus la o creștere semnificativă a conductivității cu 5.756% și 9.647%.

Acest tip de comportament în care conductivitatea termică crește odată cu temperatura este caracteristic lichidelor.



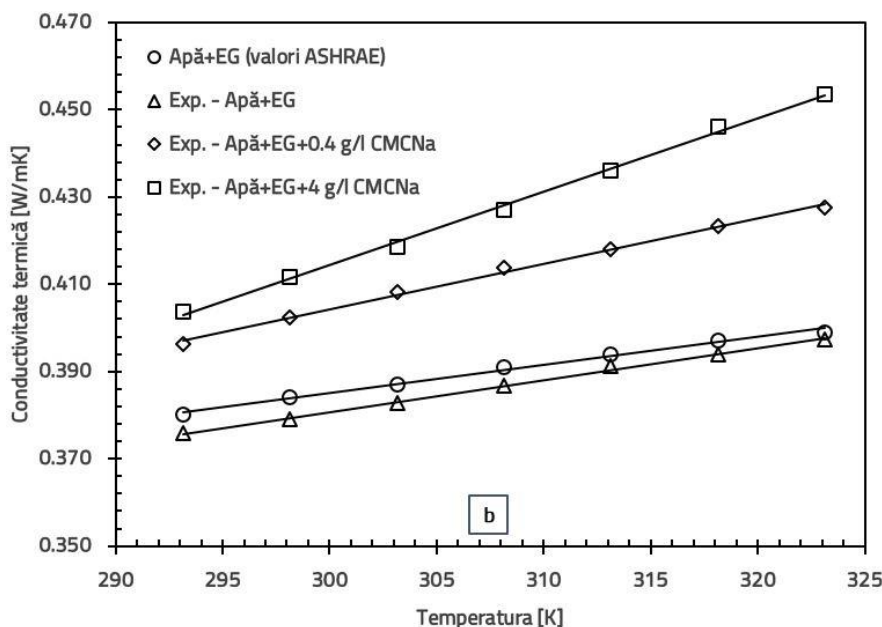


Figura 7.1. Validarea experimentului privind conductivitatea termică pentru: a) apă; b) apă+EG

7.1.2 Conductivitatea termică a fluidelor multifazice

În a doua etapă au fost măsurate conductivitățile termice ale fluidelor multifazice. Figura 7.2 prezintă variația conductivității termice (CT) a fluidelor multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC, Ag-TiO₂ pe bază de apă la diferite concentrații masice în funcție de temperatură. Pentru a obține o imagine de ansamblu, valorile CT ale fluidului multifazic au fost comparate cu cele ale fluidului de bază (apă cu 0.4, respectiv 4 g/l CMCNa). După cum se poate observa în Figura 7.2, valoarea maximă a CT pentru fluidele multifazice pe bază de apă a fost obținută la concentrațiile de 0.1, respectiv 1.0 wt% și temperatura de 323.15 K.

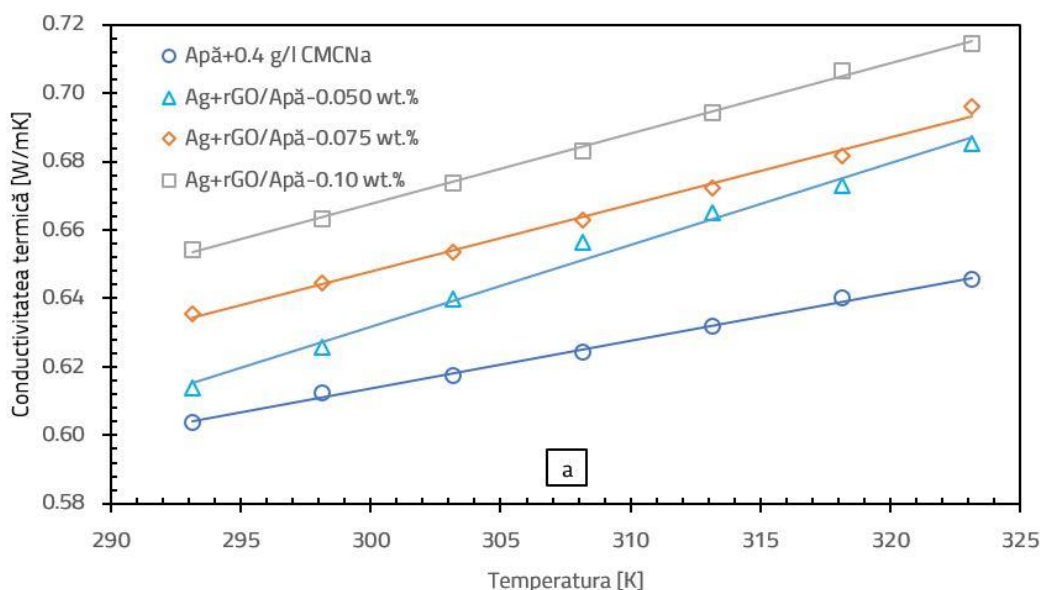
Efectul temperaturii asupra CT a fluidului multifazic Ag-rGO/apă la diferite concentrații este ilustrat în Figura 7.2 (a). La o concentrație de 0.050 wt%, temperatura determină o creștere a CT de 11.68% între 293.15 și 323.15 K. La concentrații mai mari (0.075 și 0.1 wt%), influența temperaturii este mai redusă, cu creșteri de 9.55% și 9.22%. Creșterea concentrației de nanoparticule (0.050-0.1 wt%) îmbunătățește CT a fluidului de bază (apă+0.4 g/l CMCNa) la 293.15 K cu 1.66%, 5.25% și 8.39%, iar la 323.15 K, creșterile sunt de 6.14%, 7.80% și 10.69%. Acest lucru arată că efectul concentrației este amplificat la temperaturi mai ridicate [33].

Efectul temperaturii asupra CT a fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă, la concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, este prezentat în Figura 7.2 (b). La concentrația de 0.5 wt%, s-a observat o creștere a CT de 6.90% în intervalul de temperatură 293.15-323.15 K. La concentrații mai mari (0.75 și 1 wt%), creșterile au fost de 6.95% și 7.03%, sugerând că o concentrație mai mare intensifică efectul temperaturii asupra CT. Comparativ cu Ag-rGO/apă, influența concentrației asupra CT în cazul fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă este mai redusă. La concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1 wt%, creșterile CT la 293.15 K au fost de 1.10%, 1.92% și 3.13%. La 323.15 K, aceste valori au scăzut ușor, cu creșteri de 0.82%, 1.69% și 2.97%. Aceste rezultate sugerează că în cazul fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă, adăugarea de nanoparticule are un efect mai redus asupra CT, mai ales la temperaturi ridicate, comparativ cu fluidul multifazic Ag-rGO/apă.

Pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă (Figura 7.2 (c)), efectul temperaturii asupra CT este mai pronunţat odată cu creşterea concentraţiei de nanoparticule. Îmbunătăţirile observate în CT sunt de 11.29%, 11.56% şi 11.78% pentru cele trei concentraţii analizate (0.5, 0.75 şi 1.0 wt%), în intervalul de temperatură 293.15-323.15 K, indicând că efectul temperaturii este mai pronunţat pentru Ag-FeC comparativ cu Ag-Fe₂O₃, la aceleaşi concentraţii. Efectul concentraţiei asupra CT a fluidului multifazic Ag-FeC/apă este mai accentuat decât în cazul Ag-Fe₂O₃. La concentraţiile de 0.5, 0.75 şi 1.0 wt%, CT a crescut cu 2.69%, 3.63% şi 4.45% la 293.15 K şi cu 6.61%, 7.84% şi 8.92% la 323.15 K, comparativ cu cea a fluidului de bază (apă+4 g/l CMCNa). Spre deosebire de Ag-Fe₂O₃, nanoparticulele de Ag-FeC au un impact mai semnificativ asupra îmbunătăţirii CT a fluidului de bază, sugerând că structura şi interacţiunile particulelor din Ag-FeC contribuie mai eficient la creşterea CT.

Fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă (Figura 7.2 (d)) prezintă îmbunătăţiri ale CT de 9.16%, 9.84% şi 10.59% odată cu creşterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K pentru concentraţiile analizate (0.5-1.0 wt%). Aceste valori sunt mai mici decât cele obţinute pentru Ag-FeC, dar superioare celor pentru Ag-Fe₂O₃, sugerând o sensibilitate mai scăzută la variaţiile de temperatură în comparaţie cu Ag-FeC, dar o performanţă mai ridicată decât Ag-Fe₂O₃. Creşterea concentraţiei de la 0.5 la 1.0 wt% îmbunătăţeşte CT cu 1.98%, 3.30% şi 4.78% la 293.15 K şi cu 3.84%, 5.84% şi 8.10% la 323.15 K. Aceste rezultate subliniază faptul că efectul concentraţiei asupra CT este mai pronunţat pentru Ag-TiO₂/apă decât pentru Ag-Fe₂O₃, dar mai redus comparativ cu Ag-FeC/apă, cu excepţia concentraţiei de 1.0 wt%, unde creşterea este de 4.78% la 293.15 K.

Conform datelor obţinute, Ag-FeC/apă a înregistrat cea mai mare îmbunătăţire a CT în funcţie de temperatură. În schimb, Ag-rGO/apă, la o concentraţie de doar 0.050 wt%, a oferit o îmbunătăţire semnificativă a CT, comparabilă cu cea a Ag-FeC la 1 wt%. Aceste rezultate sugerează că Ag-rGO/apă (0.05 wt%), ar putea reprezenta o opţiune viabilă pentru aplicaţii ce necesită temperaturi ridicate. În ceea ce priveşte influenţa concentraţiei, nanoparticulele de Ag-rGO au avut cel mai mare impact, îmbunătăţind CT a fluidului de bază (apă+0.4 g/l CMCNa) cu 8.39% la 293.15 K şi cu 10.69% la 323.15 K.



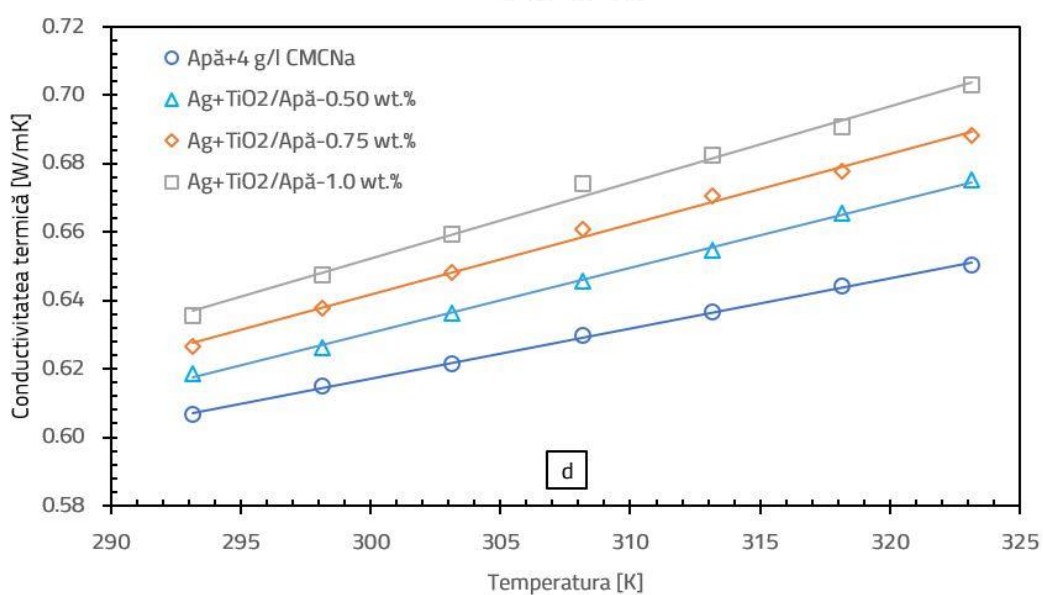
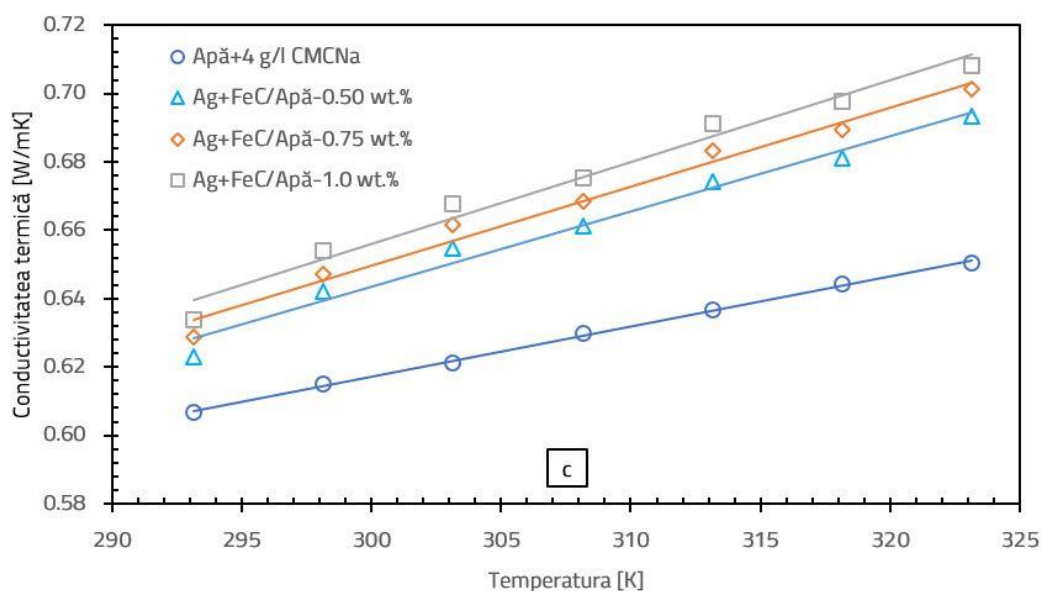
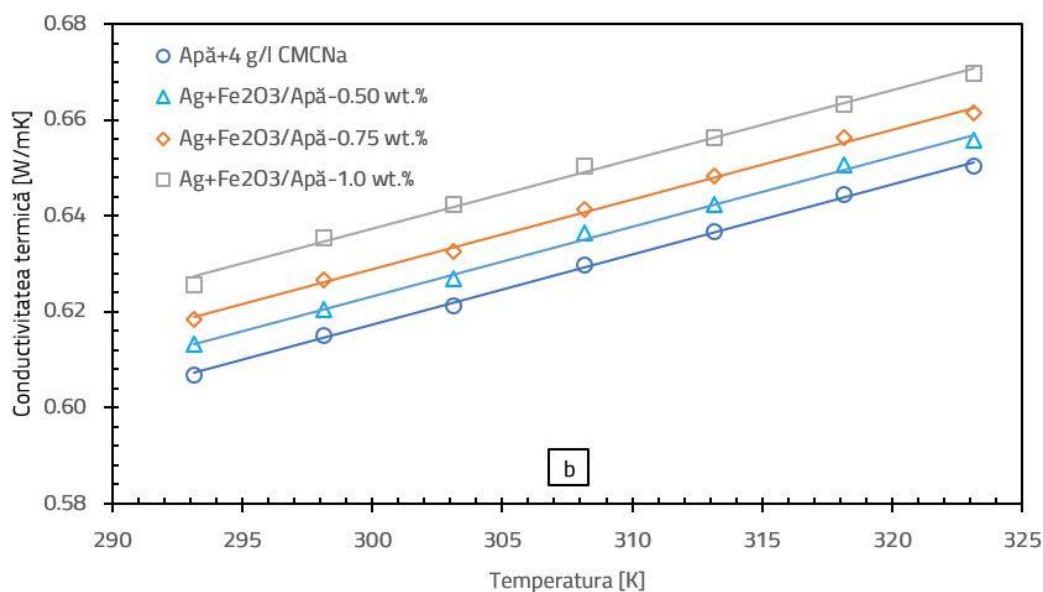


Figura 7.2. Variația conductivității termice cu temperatura a fluidelor multifazice pe bază de apă:
a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

Variația CT pentru fluidele multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂ pe bază de apă+EG, la diferite concentrații masice în funcție de temperatură, este prezentată în Figura 7.3. La fel ca în cazul fluidelor multifazice pe bază de apă, CT a fluidelor multifazice studiate a crescut odată cu temperatura și concentrația. De asemenea, s-a observat că valoarea maximă a CT a fost obținută la o concentrație de 0.1 wt% pentru Ag-rGO și 1.0 wt% pentru celelalte fluide multifazice, la temperatura de 323.15 K.

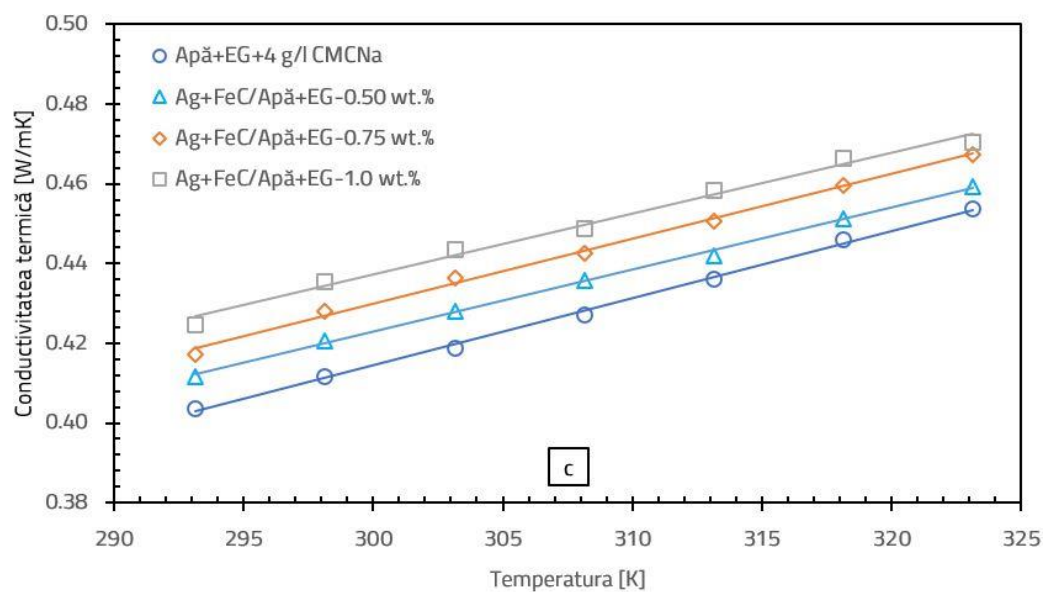
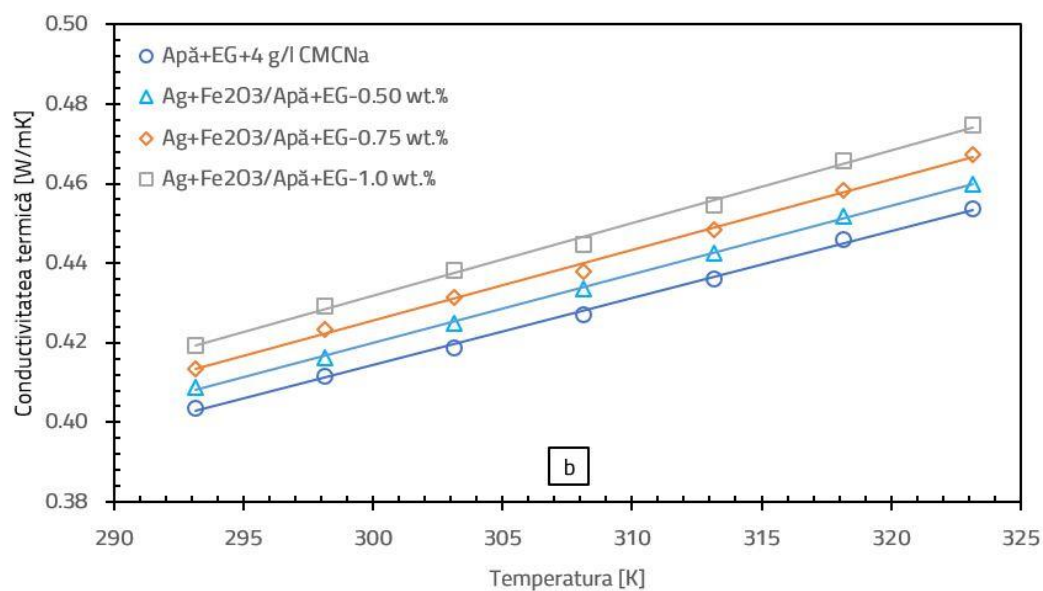
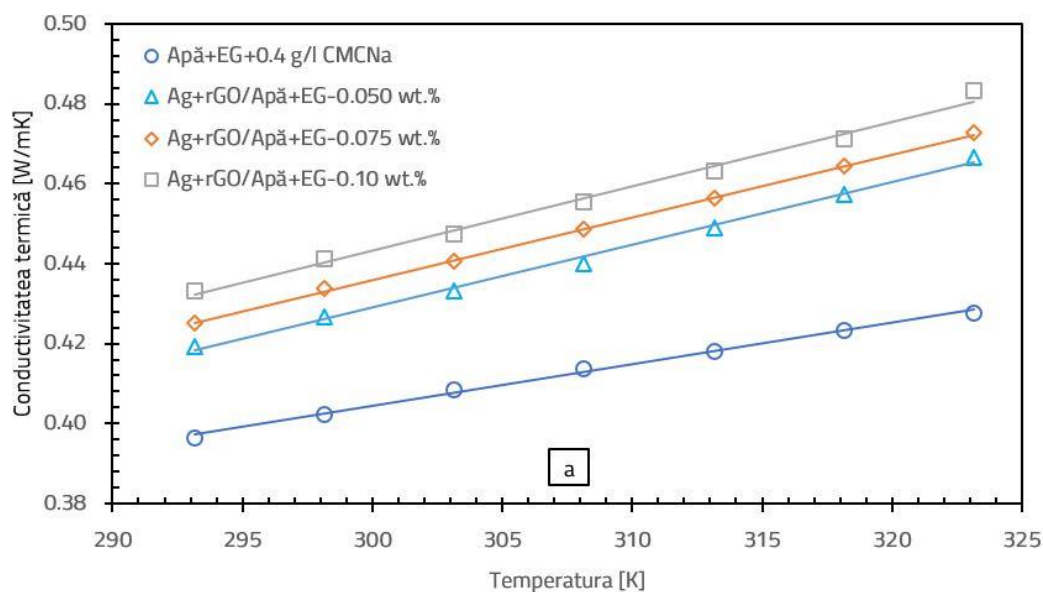
Figura 7.3 (a) ilustrează efectul temperaturii asupra CT pentru Ag-rGO/apă+EG la diferite concentrații. La concentrația de 0.050 wt%, creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K determină o creștere a CT de 11.29%, în timp ce pentru concentrațiile de 0.075 și 0.1 wt%, creșterile sunt de 11.22% și 11.54%, ceea ce indică faptul că o concentrație mai mare amplifică acest efect [34]. În ceea ce privește influența concentrației de nanoparticule, la 293.15 K, adăugarea acestora (0.050, 0.075 și 0.1 wt%) îmbunătățește CT cu 5.80%, 7.23% și 9.34%. La 323.15 K, efectul este mai pronunțat, cu creșteri de 9.12%, 10.52% și 13.02%. Aceste rezultate sugerează că o concentrație mai mare de nanoparticule Ag-rGO duce la o îmbunătățire semnificativă a CT, efectul fiind mai accentuat la temperaturi ridicate.

Efectul temperaturii asupra CT pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG este ilustrat în Figura 7.3 (b). Creșterea concentrației de la 0.5 la 1 wt% determină un impact mai pronunțat al temperaturii asupra CT, cu creșteri de 12.56%, 13.06% și 13.20% în intervalul 293.15–323.15 K. Aceste rezultate sugerează că o concentrație mai mare de nanoparticule intensifică efectul temperaturii asupra CT. În ceea ce privește influența concentrației, creșterea concentrației de nanoparticule Ag-Fe₂O₃ de la 0.5 la 1.0 wt% duce la o îmbunătățire a CT cu 1.24%, 2.39% și 3.88% la 293.15 K și cu 1.40%, 3.01% și 4.63% la 323.15 K. Totuși, aceste creșteri sunt mai mici în comparație cu cele observate la fluidul multifazic Ag-rGO.

Analizând fluidul multifazic Ag-FeC/apă+EG (Figura 7.3 (c)), se observă că la concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, influența temperaturii asupra CT este mai accentuată, cu creșteri de 11.58% și 11.98%. La concentrația de 1.0 wt%, efectul temperaturii este mai redus, cu o creștere a CT de 10.75%, ceea ce sugerează o limitare a interacțiunilor termice eficiente, posibil din cauza aglomerării nanoparticulelor. În ceea ce privește influența concentrației, la 293.15 K, creșterile CT sunt de 1.98%, 3.39% și 5.20%, iar la 323.15 K acestea sunt mai mici, înregistrând valori de 1.25%, 3.01% și 3.67%. Acest fapt indică că efectul concentrației este mai pronunțat la temperaturi mai scăzute. Comparativ cu Ag-Fe₂O₃, fluidul multifazic Ag-FeC/apă are o conductivitate termică mai bună la 293.15 K, dar mai redusă la 323.15 K. Aceste observații subliniază că efectul concentrației depinde de temperatură și că alegerea nanoparticulelor joacă un rol esențial în performanța fluidului multifazic.

Pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG (Figura 7.3 (d)), efectul temperaturii asupra CT devine mai accentuat odată cu creșterea concentrației de la 0.5 la 1.0 wt%, înregistrând creșteri de 11.49%, 11.61% și 12.54% în intervalul 293.15–323.15 K. În ceea ce privește influența concentrației, creșterea de la 0.5 la 1.0 wt% îmbunătățește CT cu 2.06%, 3.88% și 5.37% la 293.15 K și cu 1.25%, 3.16% și 5.51% la 323.15 K. La temperaturi mai ridicate, efectul concentrației este mai puțin pronunțat, cu excepția concentrației de 1 wt%. Comparativ cu alte fluide multifazice (Ag-Fe₂O₃ și Ag-FeC în apă+EG), Ag-TiO₂/apă+EG prezintă o CT mai ridicată.

Pe baza rezultatelor obținute, se poate observa că fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG a avut cel mai bun comportament în ceea ce privește efectul temperaturii asupra creșterii CT, sugerând că la o concentrație de 1.0 wt%, acesta ar putea fi ideal pentru aplicații la temperaturi ridicate. În ceea ce privește îmbunătățirea CT datorită concentrației, fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG a înregistrat cea mai mare îmbunătățire, urmat de Ag-TiO₂, Ag-FeC și Ag-Fe₂O₃.



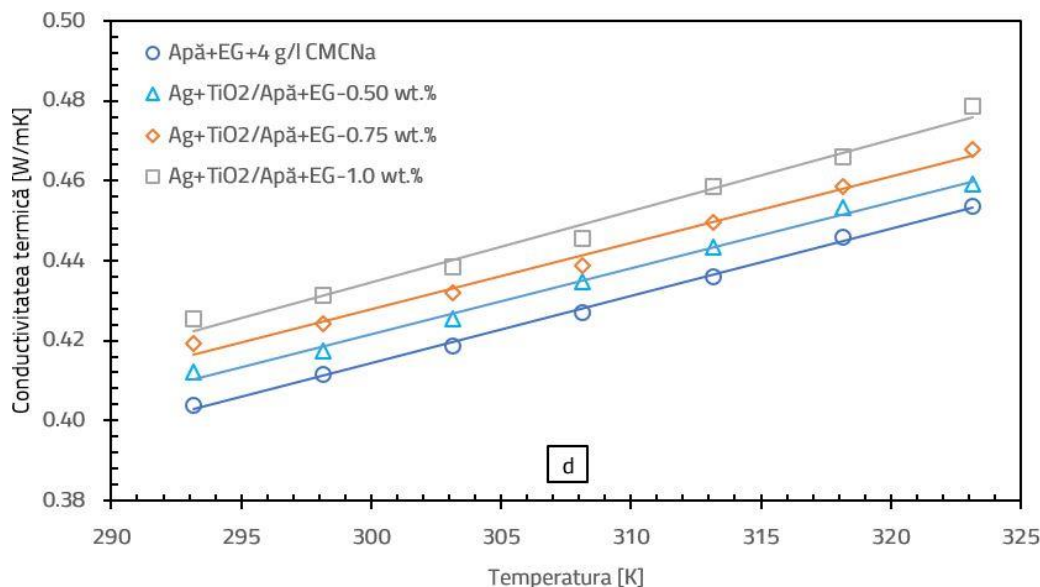


Figura 7.3. Variația conductivității termice cu temperatura a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

Conductivitatea termică a tuturor fluidelor multifazice studiate a crescut odată cu temperatura, iar utilizarea unei concentrații mai mari de nanoparticule contribuie la o îmbunătățire semnificativă a acesteia. Acest fenomen este cauzat de mișcarea browniană a particulelor din fluidul multifazic, unde dimensiunea mică a particulelor și vâscozitatea scăzută a fluidului de bază, care scade odată cu creșterea temperaturii duc la o mișcare necontrolată. Cu cât temperatura este mai mare, numărul de coliziuni crește, iar transferul de căldură este îmbunătățit [35]. Astfel, creșterea CT este strâns legată de viteza medie a particulelor și implicit de schimbul de energie dintre ele [36]. De asemenea, mișcarea browniană a particulelor poate fi afectată de inerția fluidului de bază [37]. Prin mișcarea unei particule sunt generate vortexuri în apă care afectează dinamica particulelor și ar putea influența conductivitatea termică [38].

7.1.3 Concluzii privind studiul conductivității termice a fluidelor multifazice

- Fluidul multifazic **Ag-rGO/apă+EG** cu o concentrație de **0.10 wt%** a înregistrat o creștere maximă a conductivității termice de 13.02% față de fluidul de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa) la temperatura de 323.15 K.
- În cazul fluidelor multifazice pe bază de apă, fluidul multifazic **Ag-rGO/apă** cu o concentrație de **0.1 wt%** a înregistrat o creștere maximă a conductivității termice de 10.69%, comparativ cu fluidul de bază (apă cu 0.4 g/l CMCNa).
- Cel mai bun rezultat privind influența temperaturii asupra conductivității termice a fost observat pentru **Ag-Fe₂O₃/apă+EG** cu o concentrație de **1 wt%** care a înregistrat o creștere a conductivității termice de 13.20% în intervalul de temperatură 293.15-323.15 K.
- Pentru fluidele pe bază de apă cel mai bun comportament la temperaturi ridicate a fost observat pentru **Ag-FeC/apă** cu o concentrație de **1 wt%**, care a înregistrat o creștere a conductivității termice de 11.78% odată cu creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K.

7.2 Vâscozitatea dinamică

7.2.1 Vâscozitatea dinamică a fluidelor de bază

În prima etapă a experimentului a fost măsurată vâscozitatea dinamică a fluidelor de bază (apă și amestec de apă+EG (1:1)), cu și fără surfactant (0.4 și 4 g/l CMCNa), la temperaturi între 293.15 și 323.15 K. Rezultatele obținute au fost comparate cu datele de referință NIST [31] și ASHRAE [32].

Figura 7.4 (a) prezintă vâscozitatea apei cu și fără surfactant, comparată cu valorile NIST. Se observă o scădere a vâscozității pe măsură ce temperatura crește, iar rezultatele pentru apă fără surfactant sunt aproape de valorile NIST, cu o abatere maximă de 0.444%. Adăugarea de surfactant (0.4 și 4 g/l CMCNa) a crescut vâscozitatea apei cu 1.942%, respectiv 6.264%.

În Figura 7.4 (b) sunt prezentate valorile vâscozității pentru amestecul de apă+EG, cu și fără surfactant, comparate cu datele de referință ASHRAE. Vâscozitatea amestecului fără surfactant este aproape de valorile ASHRAE, cu o abatere maximă de 0.307%. Adăugarea de surfactant (0.4 g/l CMCNa) a redus vâscozitatea cu 37.067%, iar la 4 g/l CMCNa aceasta a crescut cu 13.746% [34].

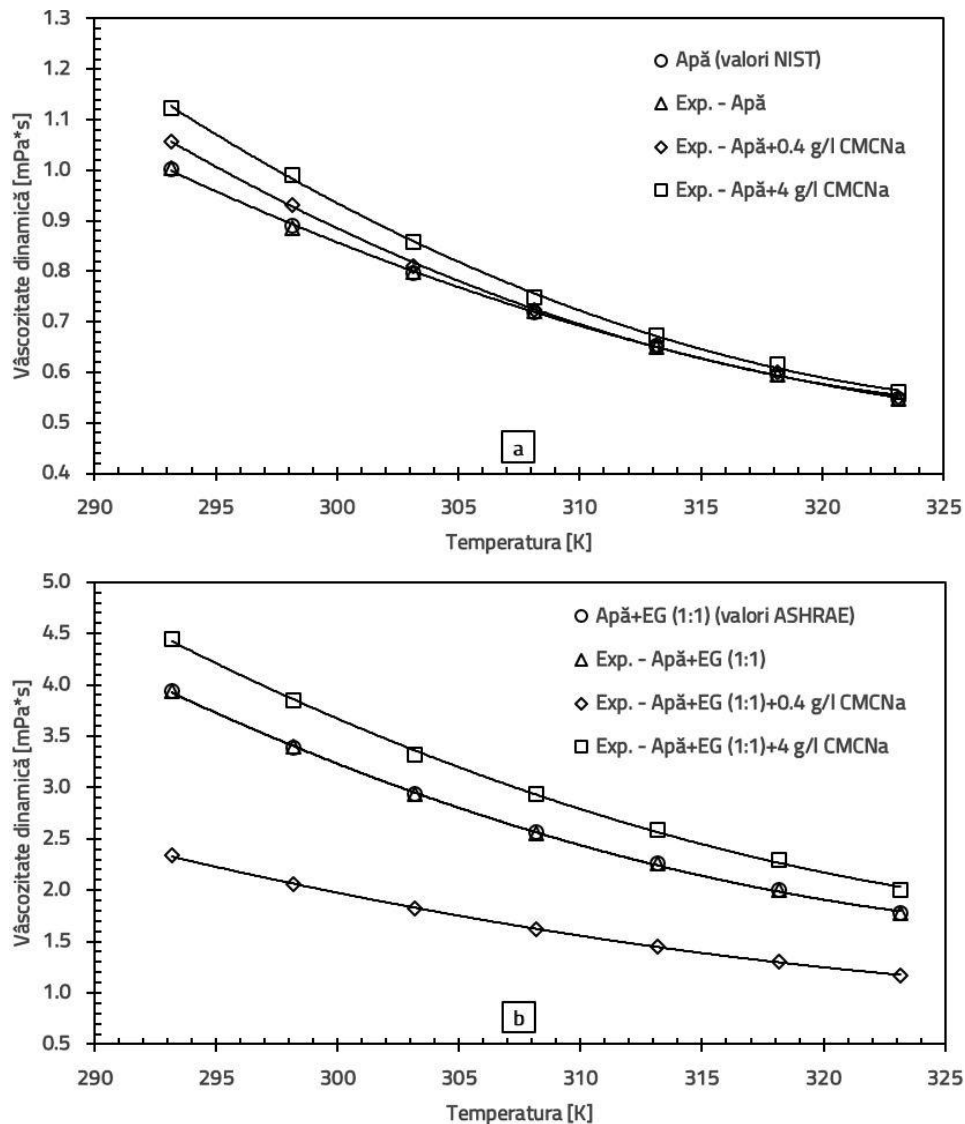


Figura 7.4. Validarea experimentului privind vâscozitatea fluidelor de bază: a) apă și b) apă+EG

7.2.2 Vâscozitatea dinamică a fluidelor multifazice

În continuare a fost studiat efectul temperaturii asupra vâscozității dinamice a fluidelor multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂ pe bază de apă la diferite concentrații masice. În Figura 4.11 se observă că vâscozitatea maximă pentru fluidele multifazice pe bază de apă a fost atinsă la concentrațiile de 0.1 wt% (pentru Ag-rGO) și 1.0 wt%, la o temperatură de 293.15 K. De asemenea, se remarcă o tendință generală de scădere a vâscozității odată cu creșterea temperaturii pentru toate fluidele multifazice analizate. Această scădere a vâscozității poate fi atribuită creșterii energiei cinetice a moleculelor din fluid care la temperaturi mai ridicate se deplasează mai rapid și reduc forțele de atracție dintre ele. Fluidul devine astfel mai puțin vâscos, iar particulele se mișcă mai liber în interiorul său.

De asemenea, scăderea vâscozității la temperaturi ridicate facilitează circulația fluidului în sistemele de răcire și în procesele de transfer de căldură, ceea ce la rândul său îmbunătățește eficiența energetică a acestor procese. Așadar, reducerea vâscozității în funcție de temperatură este un factor esențial care influențează comportamentul și aplicabilitatea fluidelor multifazice în domenii precum ingineria termică și nanotehnologia.

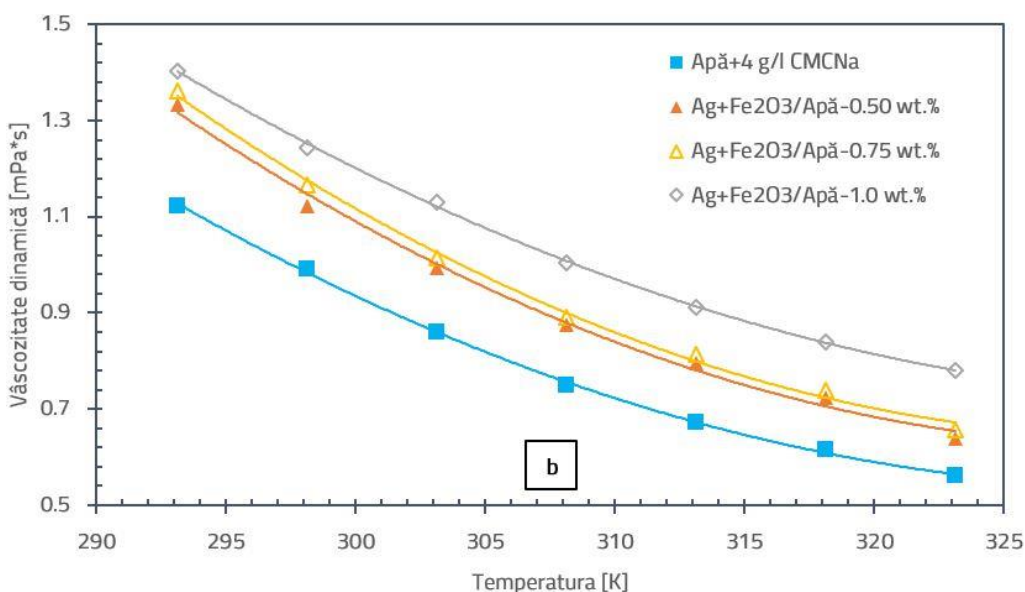
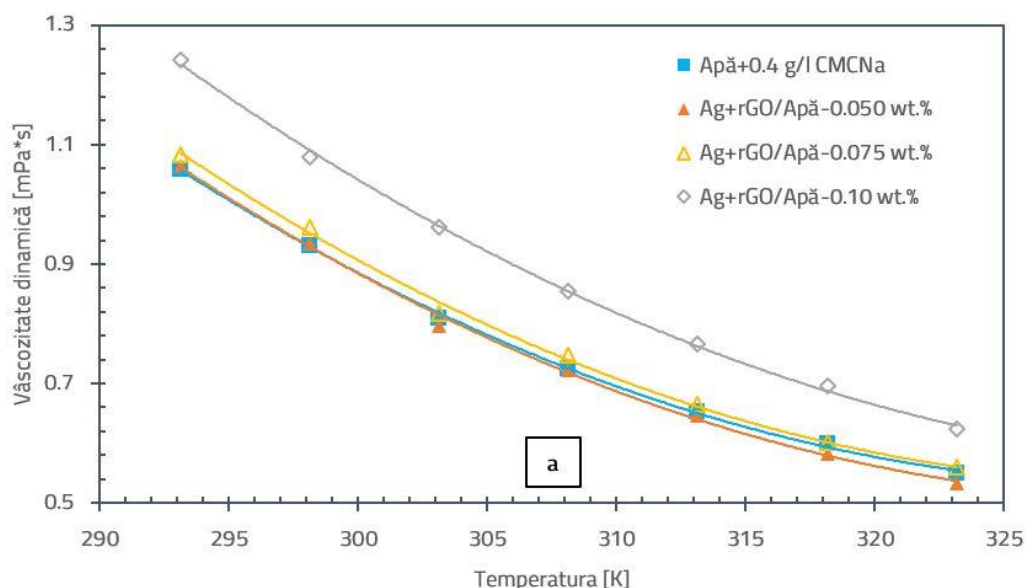
Figura 7.5 (a) ilustrează efectul temperaturii asupra vâscozității fluidului multifazic Ag-rGO/apă la diferite concentrații. La concentrația de 0.050 wt%, vâscozitatea scade cu 49.94% pe măsură ce temperatura crește de la 293.15 la 323.15 K. La concentrațiile de 0.075 și 0.1 wt%, scăderile sunt de 48.44% și 49.78%, sugerând o influență mai mică a temperaturii la concentrații mai mari. Adăugarea nanoparticulelor crește vâscozitatea fluidului de bază (apă+0.4 g/l CMCNa) la 293.15 K cu 0.57%, 2.50% și 17.38% pentru concentrațiile de 0.050, 0.075 și 0.1 wt%. La temperatura de 323.15 K, vâscozitatea scade cu 3.23% la 0.050 wt% și crește cu 1.59% și 13.31% la 0.075 și 0.1 wt%. Aceste rezultate sugerează că fluidul multifazic Ag-rGO/apă la 0.050 wt% ar putea fi o opțiune viabilă pentru DASC-uri, având o vâscozitate apropiată de cea a fluidului de bază [33].

În Figura 7.5 (b) se prezintă efectul temperaturii asupra vâscozității fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă la concentrații între 0.5 și 1.0 wt%. La concentrația de 0.5 wt%, vâscozitatea scade cu 52.19% în intervalul 293.15-323.15 K, iar la concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt%, scăderile sunt de 51.67% și 44.44%, indicând o influență mai mică a temperaturii la concentrații mai mari. La concentrații mici, nanoparticulele sunt mai mobile și reacționează mai eficient la temperaturi ridicate, în timp ce la concentrații mari, interacțiunile mai complexe limitează acest efect. Creșterea concentrației de nanoparticule de la 0.5 la 1.0 wt% determină în fluidul de bază creșteri ale vâscozității de 18.75%, 21.13% și 24.95% la 293.15 K. La temperatura de 323.15 K, influența concentrației scade pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt% (creșteri de 13.66% și 17.21%), iar pentru 1 wt%, creșterea vâscozității ajunge la 39%.

Figura 7.5 (c) prezintă efectul temperaturii asupra vâscozității fluidului multifazic Ag-FeC/apă. Pe măsură ce temperatura crește de la 293.15 la 323.15 K, vâscozitatea scade cu 51.72%, 51.59% și 51.89% la concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, indicând o influență semnificativă a temperaturii și un efect amplificat la concentrații mari de nanoparticule. Efectul concentrației asupra vâscozității este mai redus decât în cazul fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă. La 293.15 K, vâscozitatea apei crește cu 12.18%, 12.94% și 14.43% pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, iar la 323.15 K aceste creșteri sunt mai mici, respectiv 8.44%, 9.46% și 10.23%. Comparativ cu nanoparticulele de Fe₂O₃, cele de FeC au un impact mai redus asupra vâscozității fluidului de bază datorită structurii lor specifice.

În Figura 7.5 (d) este analizat efectul temperaturii asupra vâscozității fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă la diferite concentrații. La concentrația de 0.5 wt%, vâscozitatea scade cu 51.52% pe intervalul de temperatură studiat. La 0.75 wt%, reducerea este mai accentuată, de 53.19%, iar la 1.0 wt%, scăderea este de 51.78%, indicând o influență mai mică a temperaturii comparativ cu concentrația de 0.75 wt%. Creșterea concentrației de nanoparticule de la 0.5 la 1.0 wt% duce la creșteri ale vâscozității de 13.06%, 20.54% și 23.26% la 293.15 K, iar la temperaturi mai ridicate, efectul concentrației scade, cu creșteri de 9.75%, 12.97% și 19.01%. Influența concentrației asupra vâscozității este mai pronunțată în cazul Ag-TiO₂/apă decât în cazul Ag-FeC/apă, însă mai redusă comparativ cu Ag-Fe₂O₃/apă.

Rezultatele obținute arată că fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă la 0.75 wt% a înregistrat cea mai mare reducere a vâscozității, în timp ce Ag-Fe₂O₃/apă la 1 wt% a avut cea mai mică reducere. Aceste rezultate sugerează că Ag-TiO₂/apă este eficient în reducerea vâscozității la temperaturi ridicate, în timp ce Ag-Fe₂O₃/apă este potrivit pentru menținerea unei vâscozități ridicate. La temperatura de 323.15 K, fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă la 1 wt% a avut cea mai mare creștere a vâscozității de 39%, în timp ce Ag-rGO/apă la 0.050 wt% a înregistrat o scădere de 3.23% față de fluidul de bază.



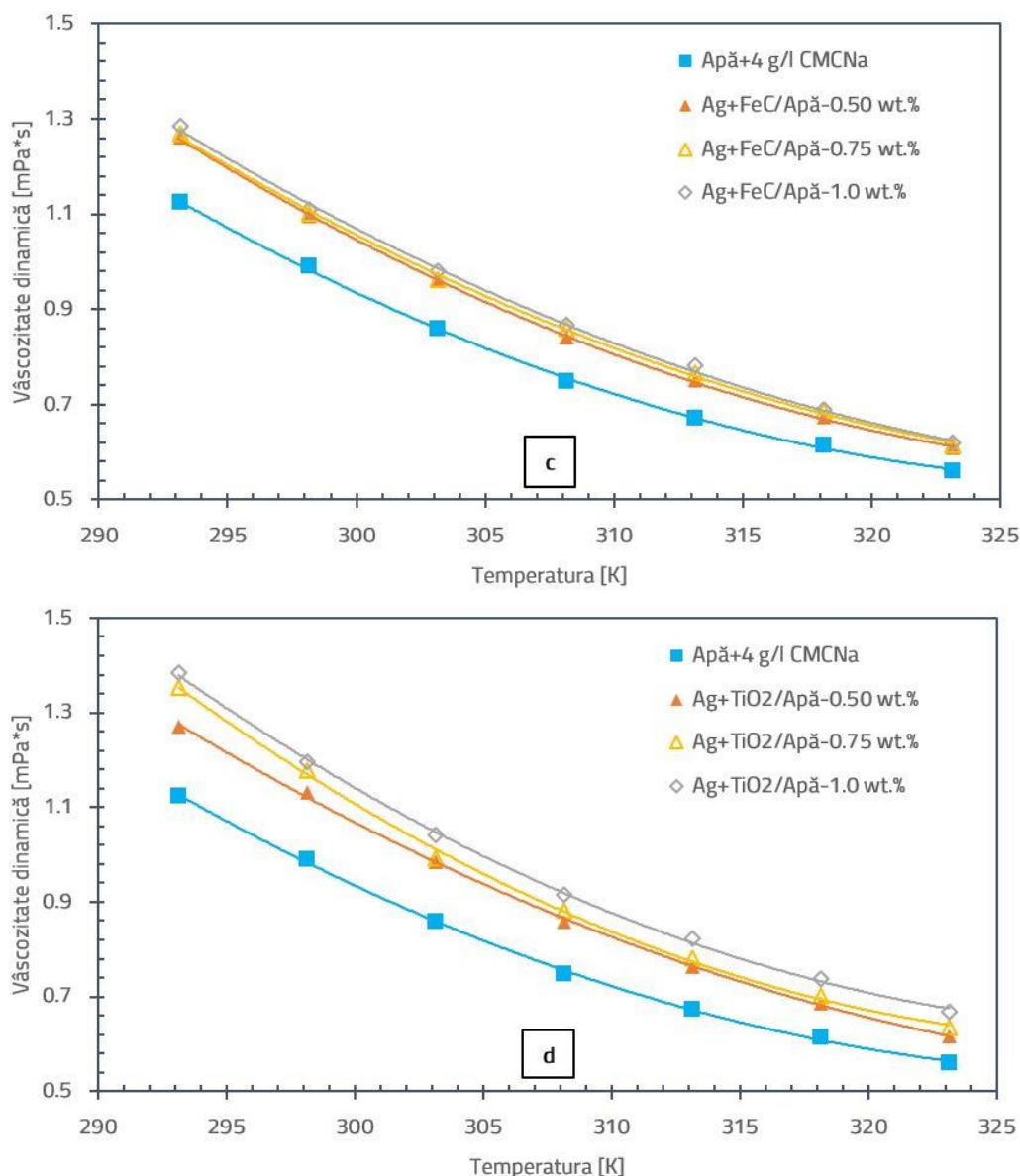


Figura 7.5. Variația vâscozității dinamice cu temperatura în cazul fluidelor multifazice pe bază de apă: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

În Figura 7.6 se observă că vâscozitatea fluidelor multifazice pe bază de apă+EG a scăzut odată cu creșterea temperaturii, similar cu fluidele multifazice pe bază de apă. De asemenea, vâscozitatea maximă a fost înregistrată la concentrațiile de 0.1 wt% pentru Ag-rGO și 1.0 wt% pentru celelalte fluide multifazice, la temperatura de 293.15 K.

Figura 7.6 (a) prezintă influența temperaturii asupra vâscozității fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG la trei concentrații masice diferite. La concentrația de 0.050 wt%, creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K reduce vâscozitatea cu 54.34%. La 0.075 wt%, efectul temperaturii este mai pronunțat, cu o reducere de 55.18%, iar la 0.1 wt%, efectul este mai mic, cu o scădere de 52.06%. Aceste rezultate sugerează că o concentrație mai mare reduce impactul temperaturii asupra vâscozității Ag-rGO/apă+EG [34]. În ceea ce privește influența concentrației, la temperatura de 293.15 K, vâscozitatea apei+EG cu 0.4 g/l CMCNa crește la concentrațiile de 0.050, 0.075 și 0.1 wt%, cu 77.60%, 83.27% și 133.26%. La 323.15 K, aceste creșteri sunt mai mici: 62.43%, 64.51% și 124.06%. Aceste date sugerează

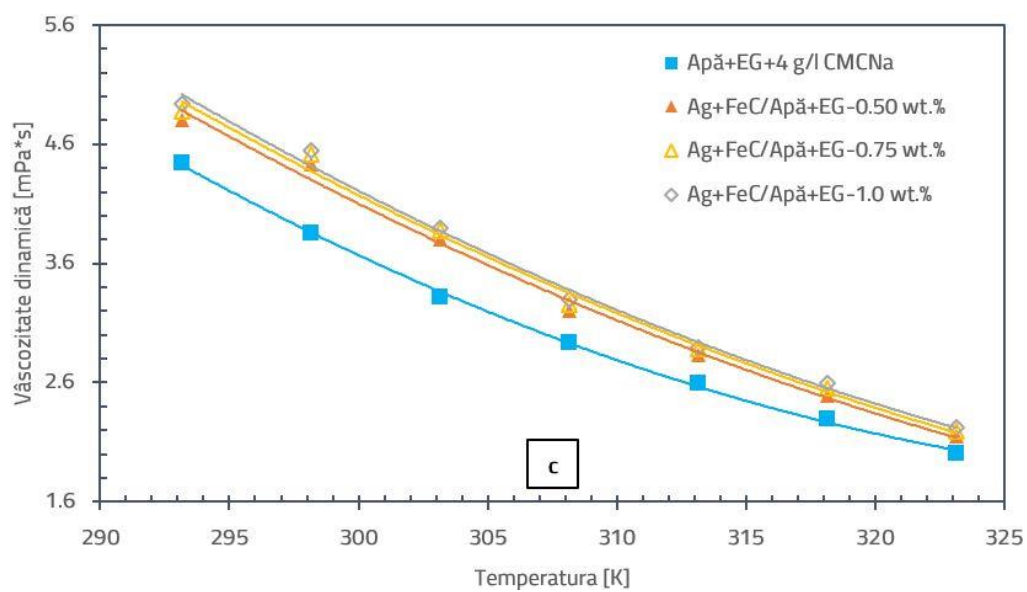
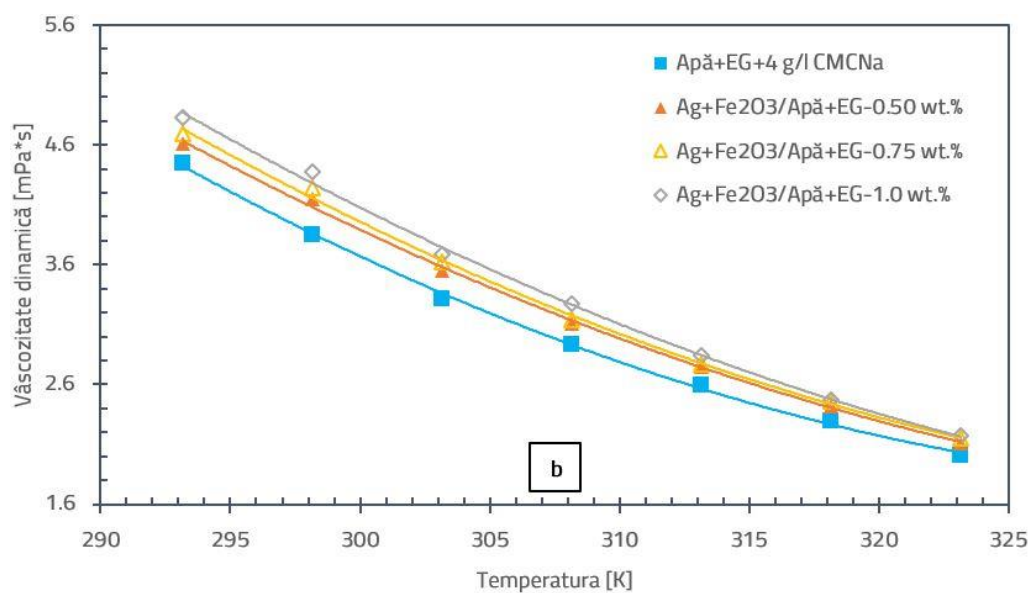
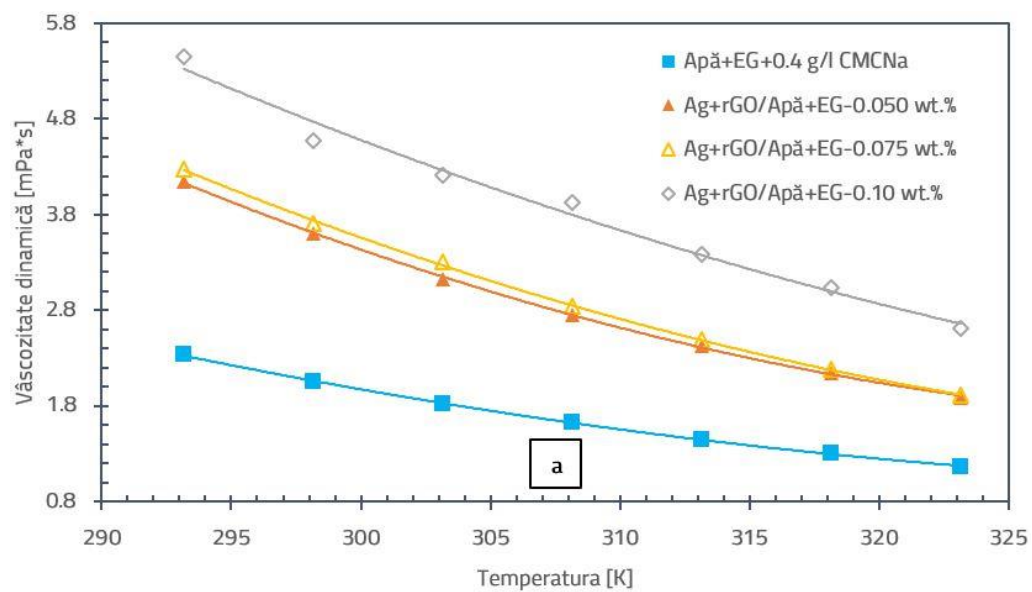
că nanoparticulele de Ag-rGO au un impact mai mare asupra vâscozităţii la temperaturi scăzute, în timp ce la temperaturi ridicate, efectul se diminuează.

În Figura 7.6 (b) este analizat efectul temperaturii asupra vâscozităţii fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG la concentraţii între 0.5 şi 1.0 wt%. Pe măsură ce concentraţia creşte, impactul temperaturii asupra vâscozităţii devine mai pronunţat, cu scăderi de 54.09%, 54.16% şi 55.02% în intervalul 293.15-323.15 K. Comparativ cu fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG, influenţa concentraţiei asupra vâscozităţii este mai mică. Creşterea concentraţiei de nanoparticule de Ag-Fe₂O₃ de la 0.5 la 1.0 wt% determină creşteri ale vâscozităţii de 3.64%, 5.64% şi 8.65% la temperatura de 293.15 K. La 323.15 K, efectul concentraţiei asupra vâscozităţii este mai pronunţat cu creşteri de 5.44% şi 7.31% la concentraţiile de 0.5 şi 0.75 wt%. La concentraţia de 1 wt%, efectul se diminuează, iar vâscozitatea creşte cu 8.31%. Aceste date sugerează că o concentraţie mai mare de nanoparticule de Ag-Fe₂O₃ contribuie la creşterea vâscozităţii, dar acest efect nu este la fel de pronunţat ca în cazul fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG cu concentraţii mai mici.

În Figura 7.6 (c) se observă că pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă+EG, influenţa temperaturii asupra vâscozităţii scade pe măsură ce concentraţia creşte, cu reduceri de 55.30%, 55.11% şi 55.02% la concentraţiile de 0.5, 0.75 şi 1.0 wt%. Spre deosebire de Ag-Fe₂O₃, unde concentraţiile mai mari intensifică efectul temperaturii datorită dispersiei uniforme a particulelor, Ag-FeC prezintă un comportament opus, reducând sensibilitatea la temperatură pe măsură ce concentraţia creşte. Creşterea concentraţiei de la 0.5 la 1.0 wt% determină creşteri ale vâscozităţii fluidului de bază cu 8.17%, 9.69% şi 11.10% la 293.15 K. La o temperatură mai ridicată de 323.15 K, efectul concentraţiei asupra vâscozităţii este mai mic, cu creşteri de 7.16%, 9.14% şi 10.75%. Comparativ cu Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC prezintă vâscozitate mai mare la toate concentraţiile.

Pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG prezentat în Figura 7.6 (d), efectul temperaturii asupra vâscozităţii scade odată cu creşterea concentraţiei de la 0.5 la 0.75 wt%, cu reduceri de 55.09% şi 54.97% între 293.15 şi 323.15 K. La concentraţia de 1 wt%, efectul temperaturii creşte uşor, cu o reducere de 55.14%. Creşterea concentraţiei de nanoparticule la 0.5 la 1.0 wt% duce la o creştere a vâscozităţii fluidului de bază (apă+EG cu 4 g/l CMCNa) de 7.54%, 12.06% şi 13.13% la 293.15 K. La 0.5 wt%, efectul concentraţiei este mai pronunţat, cu o creştere de 9.41% la 323.15 K, în timp ce la 0.75 şi 1.0 wt% efectul se diminuează, cu creşteri de 11.83% şi 12.48%. Comparativ cu Ag-Fe₂O₃ şi Ag-FeC, Ag-TiO₂ prezintă o creştere mai mare a vâscozităţii, cu excepţia concentraţiei de 0.5% la 293.15 K, unde Ag-FeC/apă+EG înregistrează o creştere mai mare.

Analiza efectuată indică faptul că fluidul multifazic Ag-FeC/apă+EG la 0.5 wt% a înregistrat cea mai mare scădere a vâscozităţii (aproape 55%) odată cu creşterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K, în timp ce fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG la 0.1 wt% a avut cea mai mică reducere de aproximativ 52%. Acelaşi fluid multifazic Ag-rGO/apă+EG a înregistrat şi cea mai mare creştere a vâscozităţii (133.26%) la 0.1 wt% şi 293.15 K, în timp ce Ag-Fe₂O₃/apă+EG a avut cea mai mică creştere (3.64%) la 0.5 wt% şi 293.15 K. Aceste rezultate sugerează că efectele concentraţiei şi temperaturii asupra vâscozităţii influenţează semnificativ comportamentul fluidului multifazic.



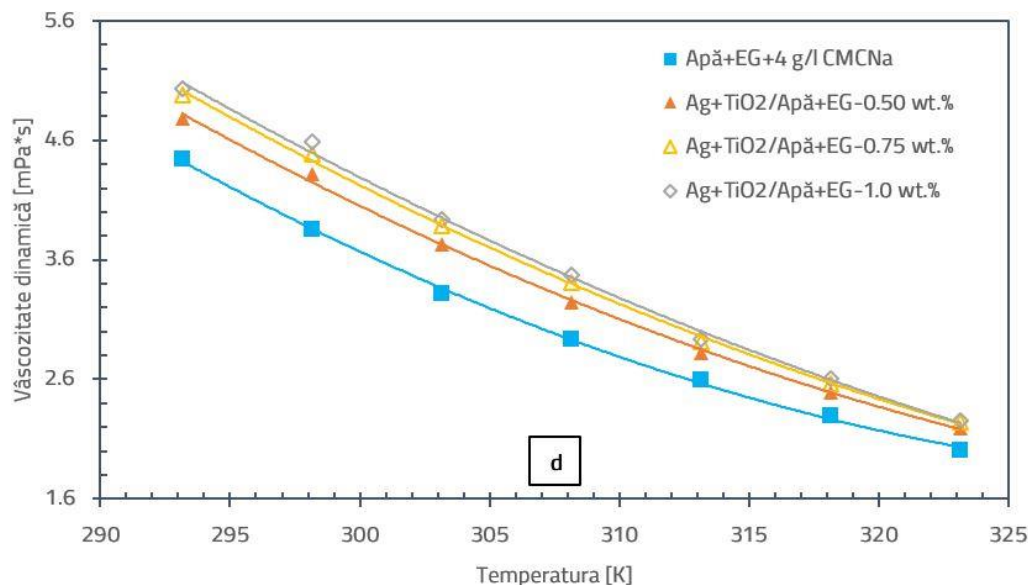


Figura 7.6. Variația vâscozității dinamice cu temperatura în cazul fluidelor multifazice pe bază de apă+EG: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

7.2.3 Concluzii privind studiul vâscozității dinamice a fluidelor multifazice

- Fluidul multifazic **Ag-FeC/apă+EG** cu o concentrație de **0.5 wt%** a prezentat cea mai mare reducere a vâscozității (55.30%) odată cu creșterea temperaturii de la 293.15 K la 323.15 K.
- În cazul fluidelor pe bază de apă, **Ag-TiO₂/apă** cu **0.75 wt%** a înregistrat cea mai mare reducere a vâscozității (53.19%) în intervalul de temperatură 293.15-323.15 K.
- **Ag-Fe₂O₃/apă (1 wt%, 323.15 K)** a prezentat o creștere a vâscozității de 39% față de fluidul de bază (apă+4 g/l CMCNa), în timp ce **Ag-rGO/apă (0.05 wt%, 323.15 K)** a prezentat o scădere cu 3.23% față de fluidul de bază (apă+0.4 g/l CMCNa).
- În cazul fluidelor pe bază de apă+EG, **Ag-rGO/apă+EG (0.1 wt%, 293.15 K)** a prezentat cea mai mare creștere a vâscozității de 133.26% față de fluidul de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa), în timp ce **Ag-Fe₂O₃/apă+EG (0.5 wt%, 293.15 K)** a prezentat o creștere cu 3.64% față de fluidul de bază (apă+EG cu 4 g/l CMCNa).

7.3 Densitatea

7.3.1 Densitatea fluidelor de bază

În prima etapă a fost măsurată densitatea fluidelor de bază (apă și apă+EG (1:1)), cu și fără surfactant (0.4 și 4 g/l CMCNa), la temperaturi între 293.15 și 323.15 K. Rezultatele experimentale au fost comparate cu datele NIST [31] și ASHRAE [32] și sunt prezentate în Figura 7.7.

În Figura 7.7 (a) se poate observa că valorile experimentale obținute pentru apa simplă sunt foarte apropiate de cele NIST, cu o abatere maximă de 0.06%. Adăugarea de CMCNa (0.4 și 4 g/l) a determinat o creștere a densității apei cu 0.22%, respectiv 0.54%.

Figura 7.7 (b) prezintă valorile densităţii pentru amestecul apă+EG, cu şi fără surfactant, comparate cu datele ASHRAE. Valorile densităţii soluţiei fără surfactant au fost foarte apropiate de cele ASHRAE, cu o abatere de 1.70%. Adăugarea a 0.4 g/l CMCNa a dus la o reducere a densităţii de 4.83%, în timp ce 4 g/l a avut un impact mai mic, crescând densitatea cu 0.10% [34].

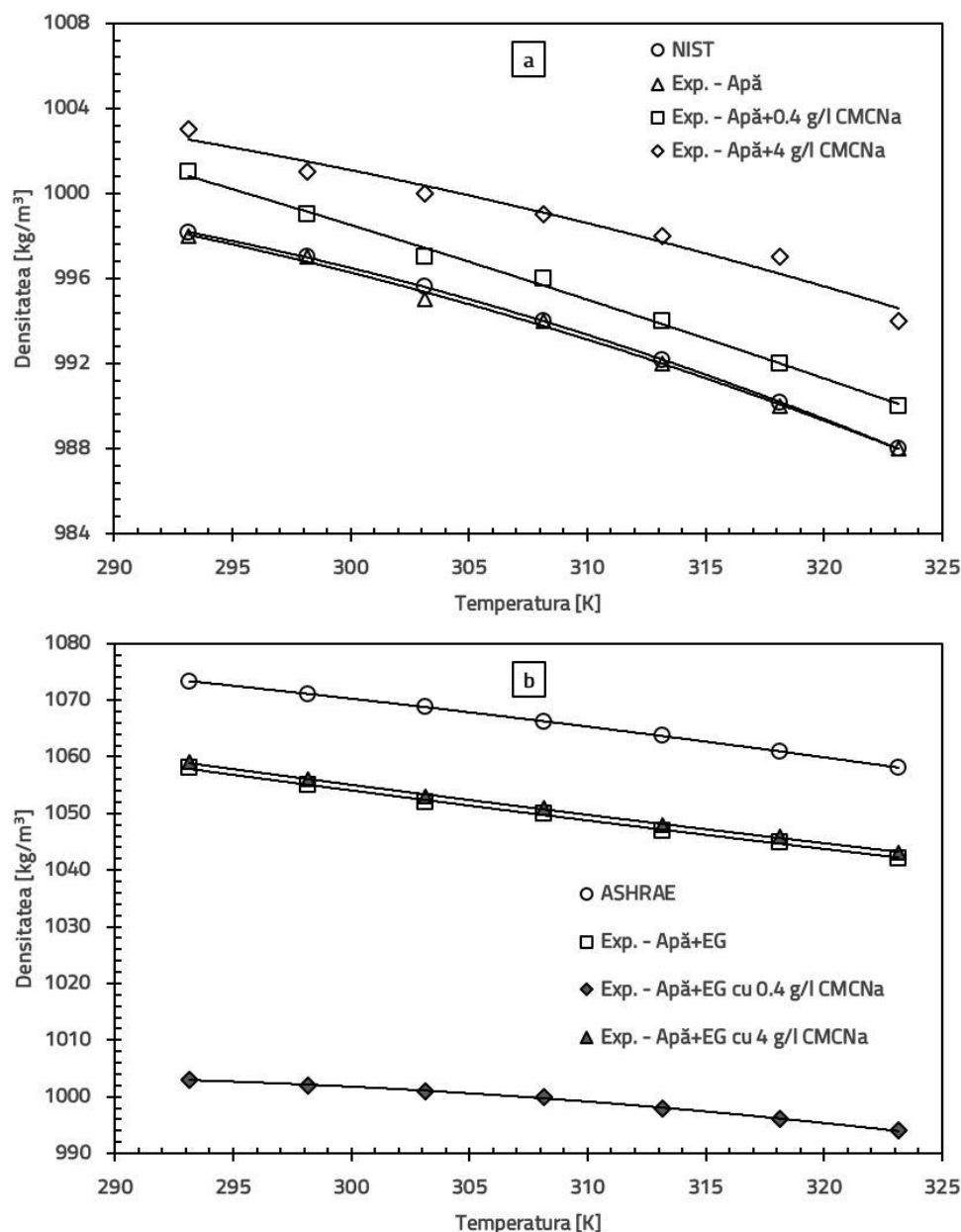


Figura 7.7. Validarea experimentului de densitate pentru: a) apă; b) apă + EG (1:1)

7.3.2 Densitatea fluidelor multifazice

Figura 7.8 prezintă densităţile fluidelor multifazice pe bază de apă în funcţie de temperatură la diferite concentraţii masice. Rezultatele arată că densitatea scade cu creşterea temperaturii şi creşte cu concentraţia. Pe măsură ce temperatura creşte, particulele primesc mai multă energie, se mişcă mai rapid şi se dispersează mai mult, ceea ce duce la o creştere a volumului şi o scădere a densităţii.

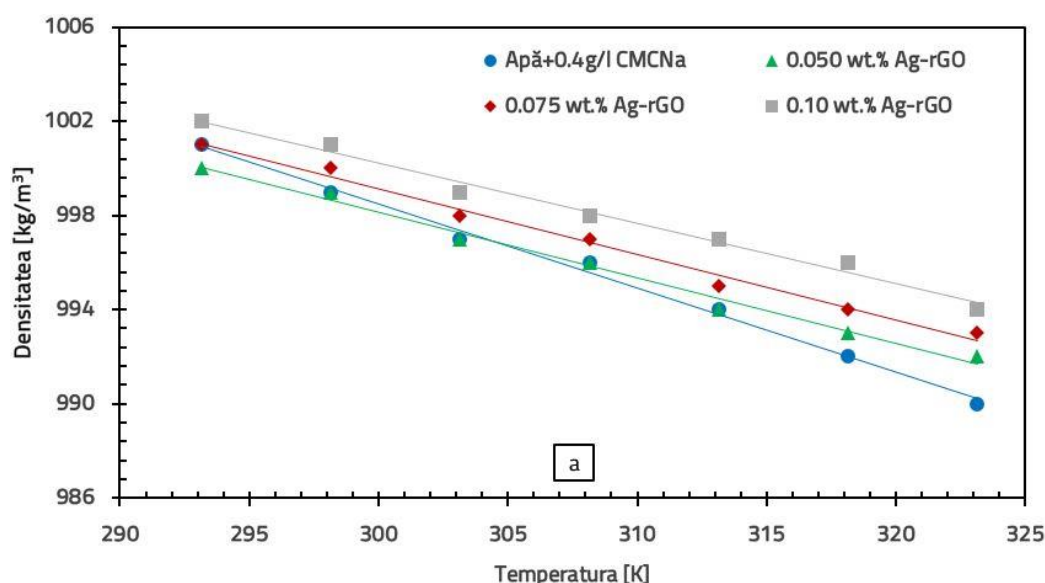
În Figura 7.8 (a) se observă că pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă densitatea maximă a fost înregistrată la o concentrație de 0.10 wt% și temperatura de 293.15 K. Pe măsură ce temperatura crește la 323.15 K, densitatea scade cu aproximativ 0.8% la toate concentrațiile. La concentrațiile de 0.050 și 0.075 wt%, densitățile sunt apropiate de cea a apei, cu creșteri medii de 0.029% și 0.129%. O concentrație mai mare (0.10 wt%) determină o ușoară creștere a densității, cu o creștere medie de 0.259% față de apa+0.4 g/l CMCNa [33]. Rezultatele obținute sunt în acord cu cele raportate de Yarmand și colab. [39], care au observat comportamente similare pentru GNP-Ag/apă.

În graficul din Figura 7.8 (b) se observă că densitatea maximă a fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă a fost atinsă la o concentrație de 1.0 wt% și o temperatură de 293.15 K. Creșterea temperaturii la 323.15 K a determinat o scădere a densității cu 1.48%, iar pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, scăderea a fost de 1%, respectiv 1.29%. Densitatea fluidului multifazic la concentrația de 0.5 wt% a fost mai mică în medie cu 0.086% față de fluidul de bază, iar la concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt% a fost mai mare cu 0.085% și 0.543%. Un comportament similar a fost observat și de Askari și colab. [40], unde densitatea fluidului multifazic grafen-Fe₃O₄ crește cu concentrația și scade odată cu creșterea temperaturii.

Pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă (Figura 7.8 (c)), densitatea maximă a fost înregistrată tot la 1.0 wt% și 293.15 K. Odată cu creșterea temperaturii la 323.15 K, densitatea a scăzut cu 0.79%, iar pentru concentrațiile de 0.50 și 0.75 wt%, reducerea a fost de 0.89%. Pentru toate concentrațiile studiate (0.5, 0.75 și 1.0 wt%), valorile densității au fost mai mari în medie cu 0.257%, 0.400% și 0.958% comparativ cu cele ale fluidului de bază (apa+4 g/l CMCNa).

Conform datelor din Figura 7.8 (d), densitatea maximă a fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă la concentrația de 1.0 wt% și temperatura de 293.15 K scade cu 1.18% odată cu creșterea temperaturii la 323.15 K. Pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, reducerea densității a fost de 1.09% și 0.89%. În intervalul de concentrații 0.5-1.0 wt%, densitatea fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă a fost mai mare decât cea a fluidului de bază cu 0.443%, 0.772% și 1.015%. Acest comportament este similar cu cel raportat de Shoghl și colab. [41] pentru fluidul multifazic TiO₂/apă.

Rezultatele arată că temperatura are un impact redus asupra densității fluidelor multifazice pe bază de apă, cea mai mare scădere fiind de 1.48% pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃, la o concentrație de 1.0 wt%. De asemenea, concentrația nu influențează semnificativ densitatea acestora.



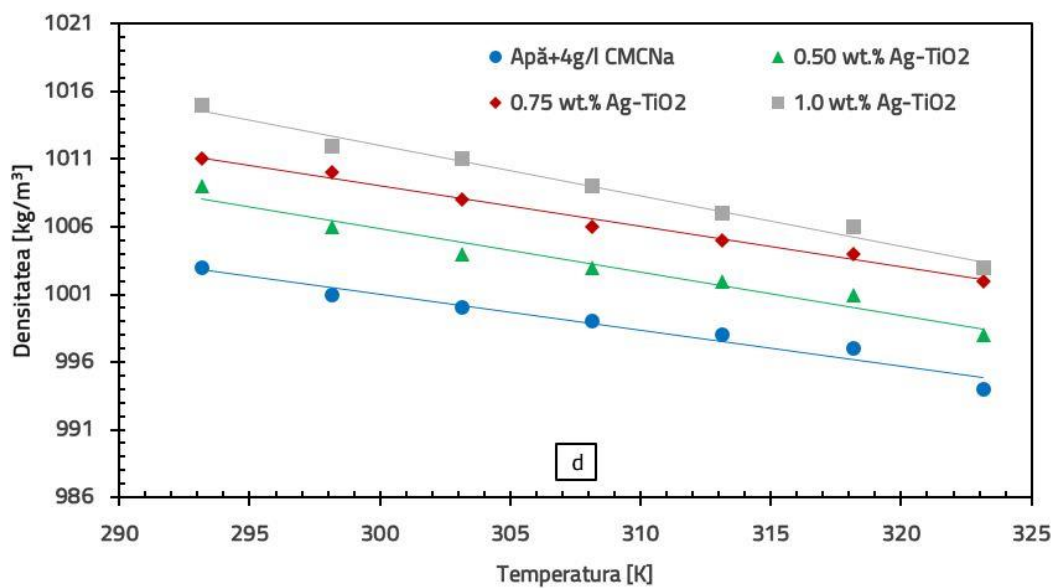
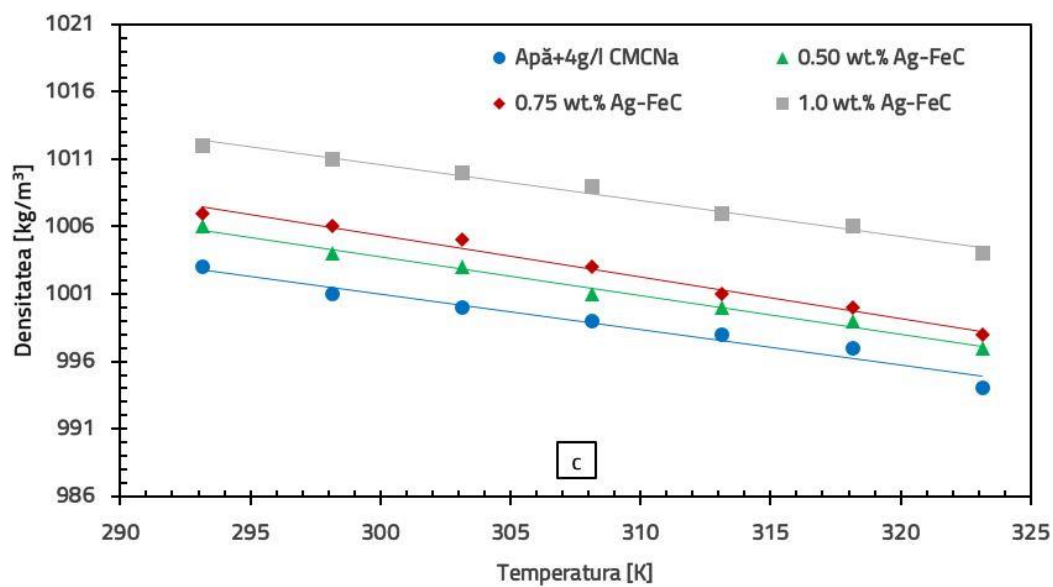
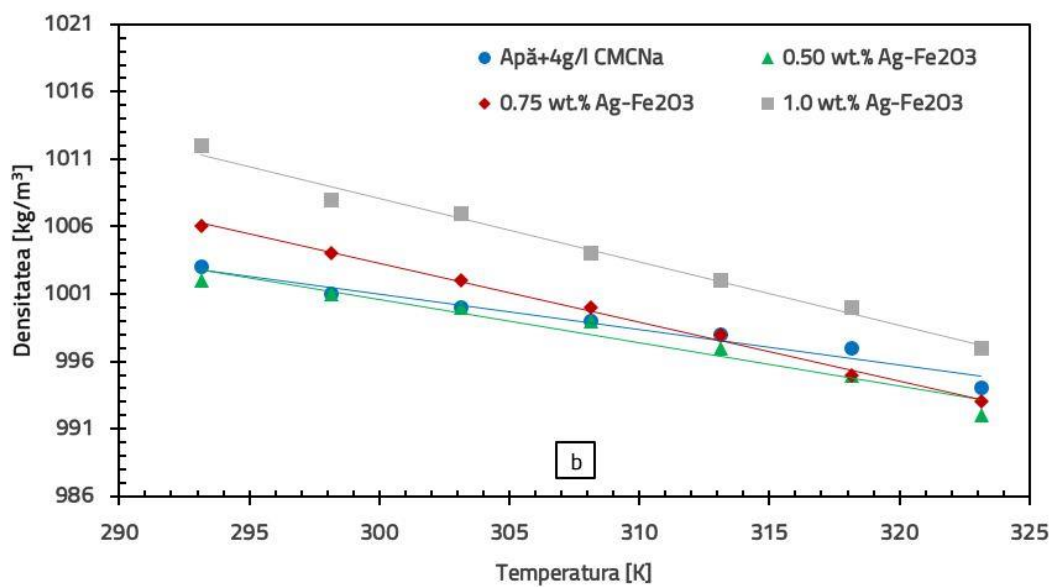


Figura 7.8 Variația densității cu temperatura pentru fluidele multifazice pe bază de apă:
a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

Variația densității fluidelor multifazice pe bază de apă+EG (1:1) în funcție de temperatură la diferite concentrații masice este ilustrată în Figura 7.9. Fluidele multifazice urmează o tendință similară celor pe bază de apă: densitatea scade pe măsură ce temperatura crește și crește odată cu creșterea concentrației. Aceste fluide multifazice au o densitate mai mare decât fluidul de bază la toate concentrațiile și temperaturile studiate, prezentând o creștere mai pronunțată a densității comparativ cu fluidele multifazice pe bază de apă.

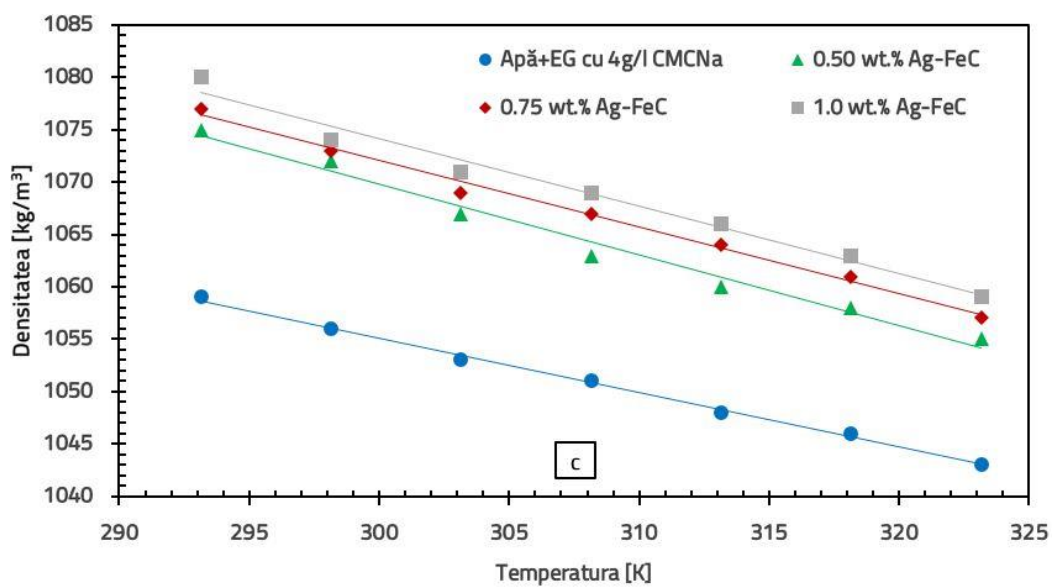
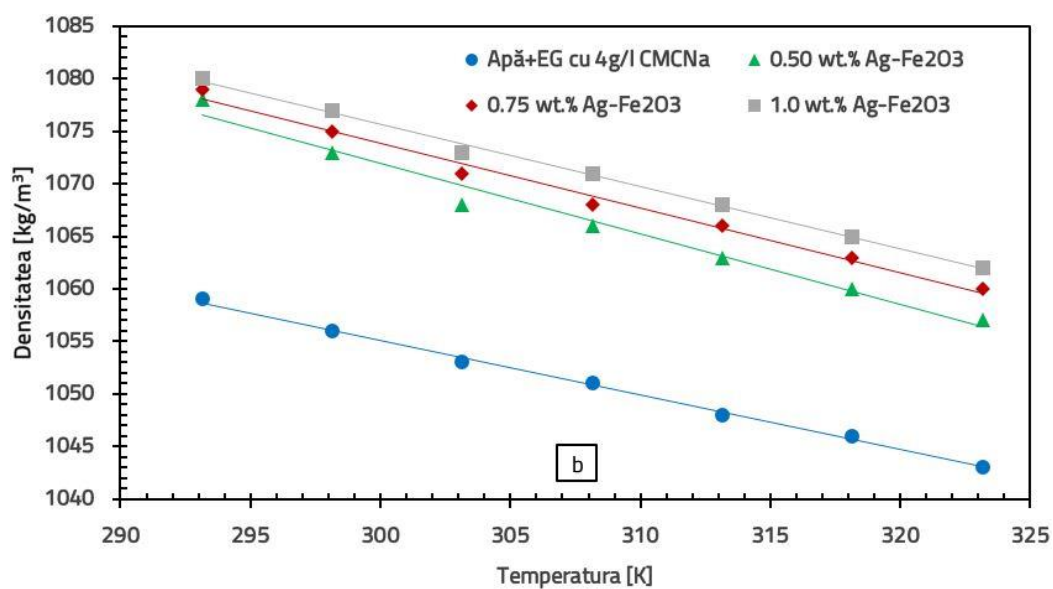
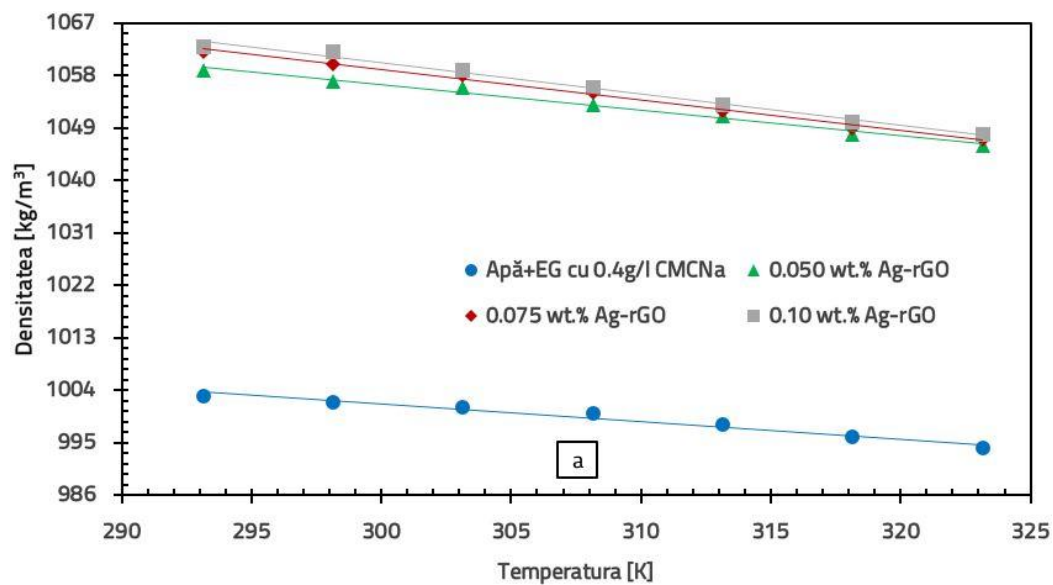
În Figura 7.9 (a) se poate observa că densitatea maximă a fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG a fost înregistrată la o concentrație de 0.10 wt% și temperatura de 293.15 K. Creșterea temperaturii la 323.15 K determină o scădere a densității cu 1.41%, iar pentru concentrațiile de 0.050 și 0.075 wt%, reducerea este de 1.23% și 1.41% [34]. Densitatea fluidului de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa) crește cu 5.376%, 5.561% și 5.676% odată cu creșterea concentrației de la 0.050 la 0.10 wt%. Adăugarea nanoparticulelor influențează semnificativ densitatea, însă creșterea concentrației de la 0.050 la 0.10 wt% are un impact moderat asupra acesteia.

Pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG (Figura 7.9 (b)), densitatea maximă a fost observată la o concentrație de 1.0 wt% și o temperatură de 293.15 K. Odată cu creșterea temperaturii la 323.15 K, densitatea scade cu 1.67%, iar pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt% scăderea este de 1.95%, respectiv 1.76%. Pentru toate concentrațiile analizate (0.5-1.0 wt%), valorile densității depășesc valorile fluidului de bază (apă+EG cu 4 g/l CMCNa) cu 1.481%, 1.712% și 1.903%.

Conform graficului din Figura 7.9 (c), densitatea maximă a fluidului multifazic Ag-FeC/apă este atinsă tot la 1.0 wt% și 293.15 K. La temperatura de 323.15 K, densitatea scade cu 1.94%, iar pentru concentrațiile de 0.50 și 0.75 wt%, scade cu 1.86%. Densitatea fluidului multifazic Ag-FeC/apă+EG crește în medie cu 1.277%, 1.522% și 1.712% pe măsură ce concentrația de Ag-FeC crește de la 0.5 la 1.0 wt%. Adăugarea nanoparticulelor influențează densitatea, însă creșterea concentrației de la 0.50 la 1.0 wt% are un impact moderat.

Pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG (Figura 7.9 (d)), densitatea maximă a fost atinsă la 1.0 wt% și 293.15 K. Pe măsură ce temperatura crește la 323.15 K, densitatea scade cu 1.57%, iar pentru concentrațiile de 0.50 și 0.75 wt% scade cu 1.86%. Valorile densității cresc în medie cu 1.359%, 1.631% și 2.039% odată cu creșterea concentrației de Ag-TiO₂ de la 0.5 la 1.0 wt%, însă creșterea concentrației nu influențează semnificativ densitatea.

Se poate concluziona că densitatea fluidelor multifazice scade pe măsură ce temperatura crește indiferent de fluidul de bază utilizat. În comparație cu fluidele multifazice pe bază de apă, toate fluidele multifazice preparate cu amestec de apă+EG prezintă o scădere relativ mai mare a densității odată cu creșterea temperaturii. Concentrația influențează semnificativ densitatea fluidelor multifazice pe bază de apă+EG, în special pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG, care a avut cea mai mare densitate comparativ cu fluidul de bază. Rezultatele obținute sunt în concordanță cu cele din alte studii [42, 43, 44, 45], care arată că nanoparticulele au densitate mai mare decât amestecul de apă+EG și că adăugarea lor crește densitatea fluidului de bază.



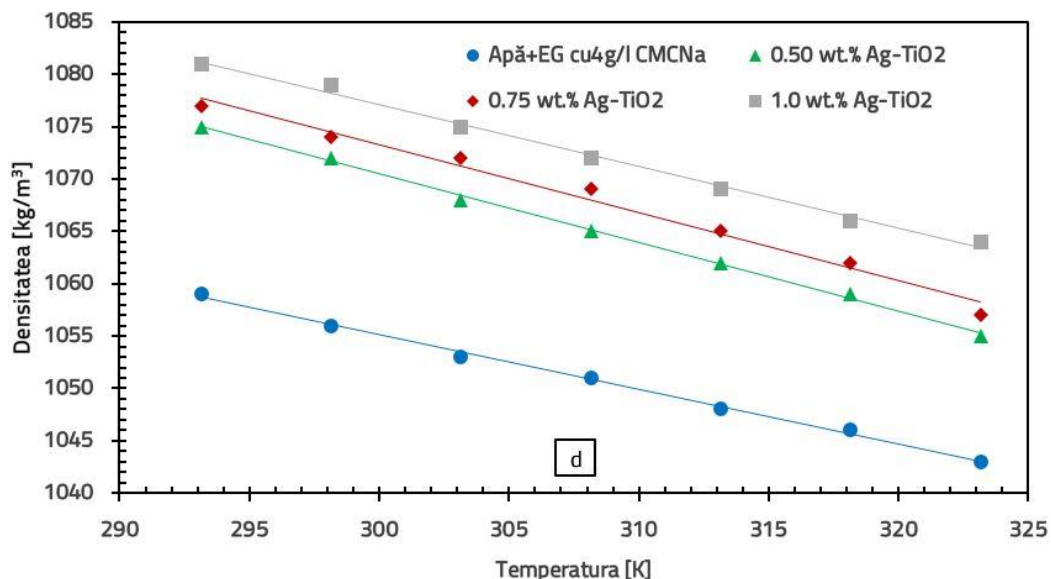


Figura 7.9. Variația densității cu temperatura pentru fluidele multifazice pe bază de apă+EG:

a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

7.3.3 Concluzii privind studiul densității fluidelor multifazice

- Fluidele multifazice pe bază de apă au prezentat cele mai bune rezultate în ceea ce privește densitatea, astfel cea mai mare creștere medie de 1% față de fluidul de bază a fost înregistrată de fluidul multifazic **Ag-TiO₂/apă** la o concentrație de **1 wt%**.
- Fluidul multifazic **Ag-Fe₂O₃/apă** la o concentrație de **0.5 wt%**, a prezentat cel mai bun comportament, înregistrând o reducere a densității de 0.086% comparativ cu apa+4 g/l CMCNa.
- Fluidele multifazice preparate cu amestec de apă+EG prezintă cele mai mari creșteri ale densității, astfel **Ag-rGO/apă+EG** la o concentrație de **0.1 wt%** a înregistrat o creștere medie de 5.37% față de fluidul de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa).

7.4 Tensiunea superficială

Investigarea tensiunii superficiale a fluidelor multifazice este într-un stadiu incipient în comparație cu proprietățile de transport, cum ar fi conductivitatea termică sau vâscozitatea.

7.4.1 Tensiunea superficială a fluidelor de bază

În prima etapă a fost măsurată tensiunea superficială a fluidelor de bază care formează datele de referință. Au fost luate în considerare două fluide de bază: apă distilată și amestec de apă+EG (1:1) în care s-au adăugat 0.4, respectiv 4 g/l de surfactant CMCNa.

Figura 7.10 (a) prezintă valorile tensiunii superficiale pentru apă, cu și fără surfactant, comparate cu datele NIST [31]. Rezultatele confirmă faptul că tensiunea superficială scade pe măsură ce temperatura crește, ceea ce este în concordanță cu datele NIST. Adăugarea surfactantului (0.4 și 4 g/l CMCNa) a redus tensiunea superficială cu 8.66% și 12.04% la 293.15 K și cu 6.40% și 7.89% la 323.15 K [46].

În Figura 7.10 (b) se prezintă tensiunea superficială pentru soluția de apă+EG. Surfactantul (0.4 și 4 g/l CMCNa) a redus tensiunea superficială cu 4.63% și 7.36% la 293.15 K și cu 0.23% și 1.82% la 323.15 K [46]. Datele experimentale pentru apă+EG au fost comparate cu cele furnizate de Jasper [47] și Connors [48]. Abaterile maxime față de rezultatele lui Jasper și Connors au fost de 1.78% și 1.58%.

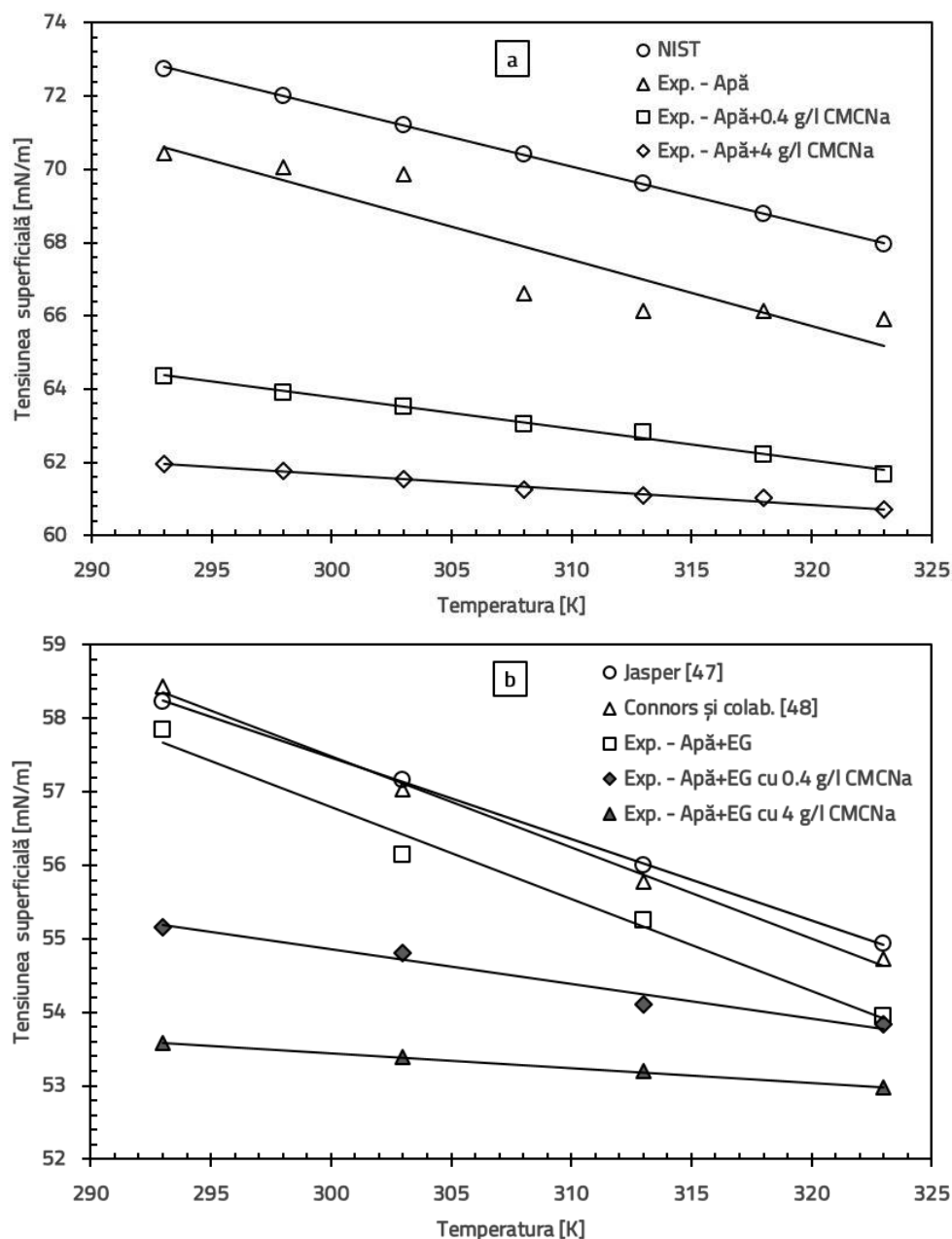


Figura 7.10. Validarea experimentului pentru: a) apă; b) amestecul de apă+EG (1:1)

7.4.2 Tensiunea superficială a fluidelor multifazice

Valorile medii ale tensiunii superficiale pentru fluidele multifazice pe bază de apă în funcție de temperatură la diferite concentrații masice sunt prezentate în Figura 7.11. Se poate observa o scădere a tensiunii superficiale atât pentru fluidul de bază, cât și pentru fluidele multifazice, odată cu creșterea temperaturii de la 293.15 K la 323.15 K.

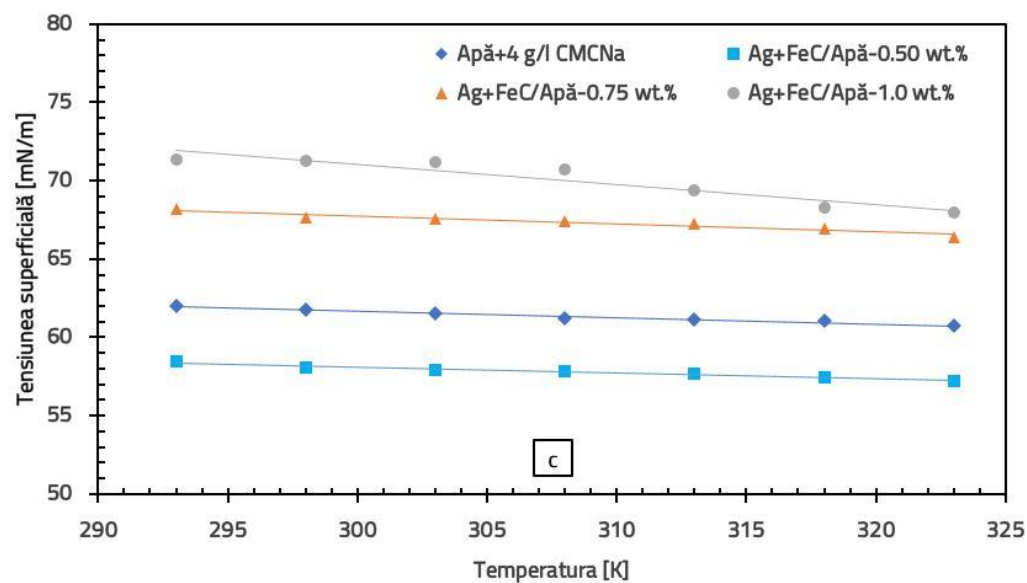
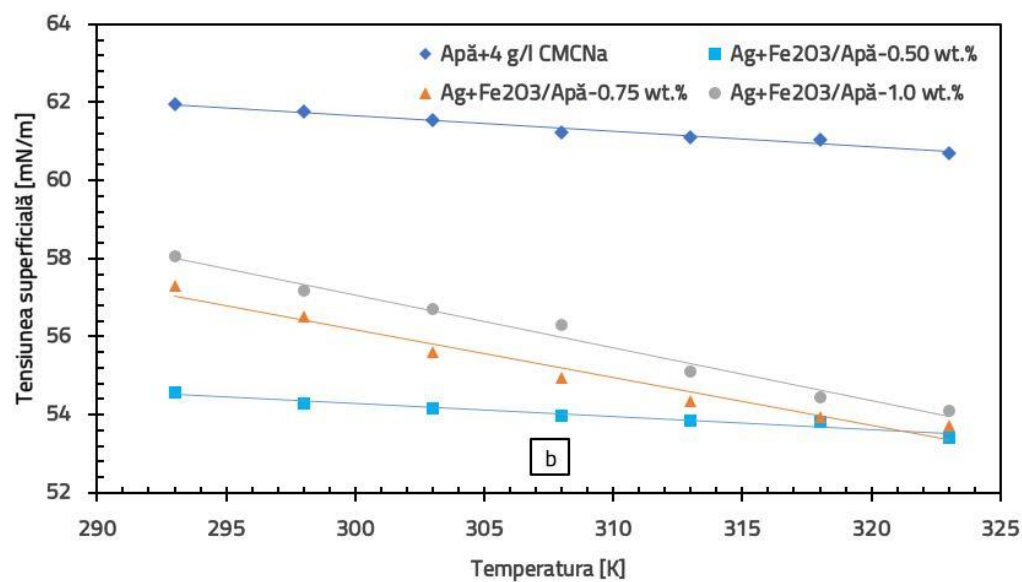
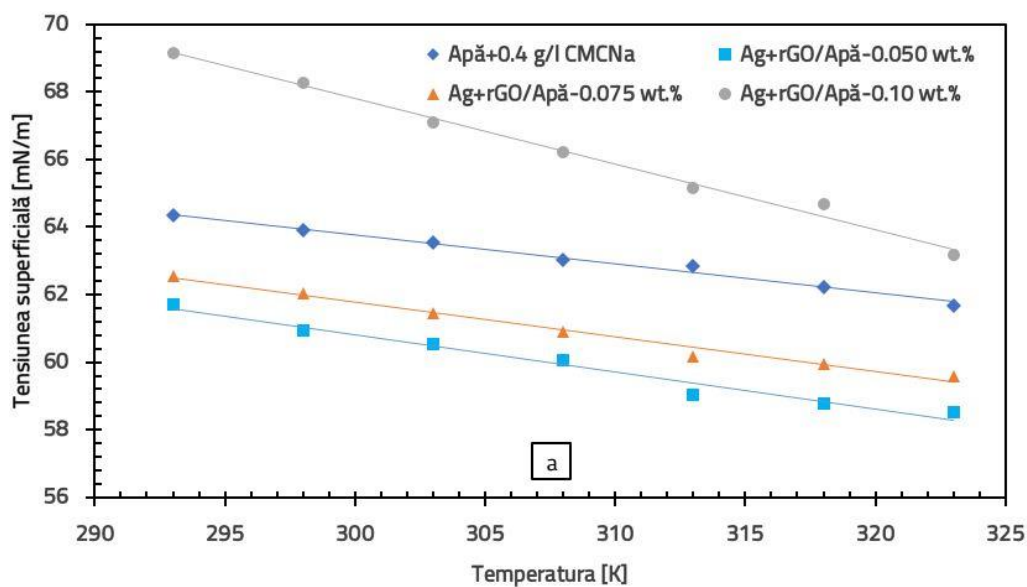
Interacţiunea dintre nanoparticule şi surfactanţi devine complexă datorită numeroaselor interacţiuni care au loc la diferite interfaţe [49]. Adăugarea nanoparticulelor influenţează semnificativ tensiunea superficială, iar creşterea concentraţiei acestora conduce la o creştere a tensiunii superficiale, datorită forţelor van der Waals care acţionează între particulele de la interfaţa lichid-gaz, ceea ce duce la o creştere a energiei libere de suprafaţă. Creşterea concentraţiei reduce distanţa dintre cele două nanoparticule şi molecula de apă, în special la interfaţa lichid-gaz, ceea ce contribuie la intensificarea tensiunii superficiale [46]. De asemenea, o concentraţie mai mare poate favoriza aglomerarea particulelor, provocând astfel o creştere suplimentară a tensiunii superficiale.

În Figura 7.11 (a) se observă că tensiunea superficială maximă a fost înregistrată pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă la o concentraţie de 0.10 wt% şi o temperatură de 293.15 K. Odată cu creşterea temperaturii de la 293.15 K la 323.15 K, tensiunea superficială a scăzut cu aproximativ 8.66%. La concentraţiile de 0.050 şi 0.075 wt%, reducerea a fost de 5.16%, respectiv 4.74%. Deşi tensiunea superficială a crescut odată cu concentraţia, aceasta a rămas mai mică decât cea a fluidului de bază, înregistrând scăderi de 5.003% şi 3.384% pentru concentraţiile de 0.050 şi 0.075 wt%. La concentraţia de 0.10 wt%, tensiunea superficială a fost cu 5.006% mai mare decât la fluidul de bază [46]. Aceste rezultate sunt în concordanţă cu cele raportate de Cabaleiro şi colab. [50], care au observat o scădere similară a tensiunii superficiale în cazul fluidului multifazic rGO/apă.

Conform graficului din Figura 7.11 (b), tensiunea superficială maximă a fost observată pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă la o concentraţie de 1.0 wt% şi temperatura de 293.15 K. Creşterea temperaturii la 323.15 K a dus la o scădere de aproximativ 6.85%. Pentru concentraţiile de 0.5 şi 0.75 wt%, scăderea a fost de 2.10% şi 6.27%. Tensiunea superficială a fluidului de bază a scăzut în medie cu 11.948%, 10.020% şi 8.743% pe măsură ce concentraţia de nanoparticule de Ag-Fe₂O₃ a crescut de la 0.50 la 1.0 wt%. Rezultatele obţinute sunt în concordanţă cu cele raportate de Huminic şi colab. [51], care au observat o reducere a tensiunii superficiale prin adăugarea nanoparticulelor de γ -Fe₂O₃ în apă. În cazul fluidului multifazic Ag-FeC/apă (Figura 7.11 (c)), tensiunea superficială maximă a fost înregistrată la 1.0 wt% şi 293.15 K. Creşterea temperaturii la 323.15 K a determinat o scădere de 4.72%, iar pentru concentraţiile de 0.50 şi 0.75 wt%, reducerea a fost de 2.18% şi 2.59%. La concentraţia de 0.50 wt%, tensiunea superficială a fost cu 5.791% mai mică decât cea a fluidului de bază (apă cu 4g/l CMCNa), însă aceasta a crescut la concentraţiile de 0.75% şi 1.0 wt%, depăşind valorile apei cu 9.807% şi 14.144%. Acest comportament este similar cu cel raportat de Huminic şi colab. [52], care au observat o creştere a tensiunii superficiale a apei odată cu creşterea concentraţiei de FeC.

Pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă (Figura 7.11 (d)), tensiunea superficială maximă a fost înregistrată tot la 1.0 wt% şi 293.15 K. La temperatura de 323.15 K, tensiunea superficială a scăzut cu aproximativ 7.43%. Reducerea a fost de 5.21% la 0.5 wt% şi de 4.51% la 0.75 wt%. La concentraţia de 0.5 wt%, tensiunea superficială a fost cu 9.318% mai mică decât cea a fluidului de bază, în timp ce la concentraţiile de 0.75% şi 1.0 wt%, a depăşit valorile apei cu 4.622% şi 15.847%. Aceste rezultate sunt în concordanţă cu cele raportate de Zhang şi colab. [53], care au observat o scădere a tensiunii superficiale a apei prin adăugarea unei cantităţi mai mici de nanoparticule de TiO₂.

Se poate observa că o concentraţie mai mare de nanoparticule (0.1, respectiv 1.0 wt%) duce la modificări semnificative ale tensiunii superficiale în funcţie de temperatură, creşterea fiind mai pronunţată la o temperatură mai scăzută (293.15 K) decât la una mai ridicată (323.15 K).



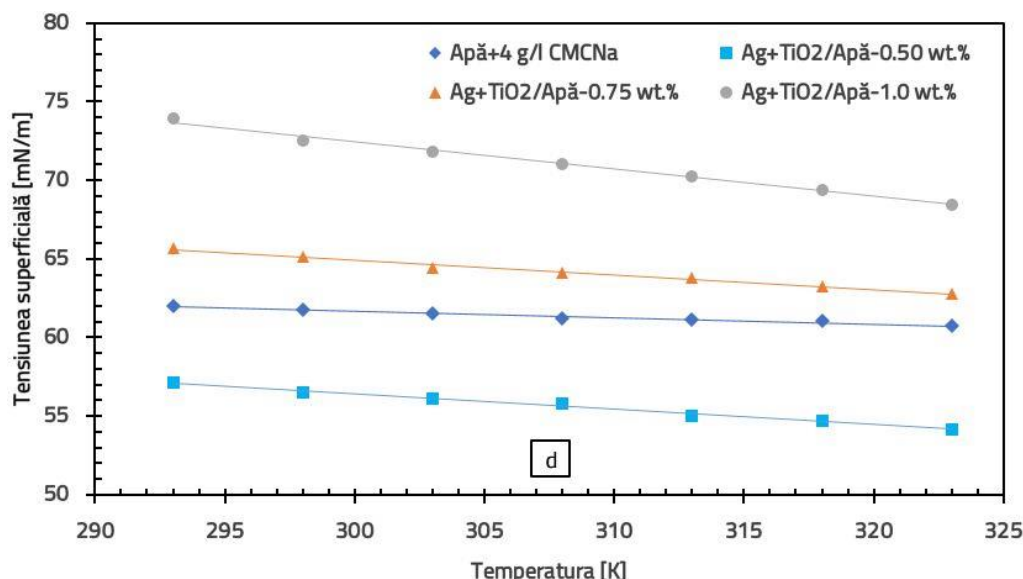


Figura 7.11. Variația tensiunii superficiale cu temperatura a fluidelor multifazice pe bază de apă:

a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

Variația tensiunii superficiale a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG cu temperatura la diferite concentrații este prezentată în Figura 7.12. Se observă o tendință similară cu cea a fluidelor multifazice pe bază de apă, caracterizată prin scăderea tensiunii superficiale odată cu creșterea temperaturii. Fluidele multifazice Ag-rGO și Ag-FeC în apă+EG au o tensiune superficială mai mare decât fluidul de bază la toate concentrațiile studiate. Pentru Ag-Fe₂O₃ în apă+EG, tensiunea superficială este mai mică la 0.5 wt%, iar la 0.75 wt% doar la 323.15 K. Fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG prezintă valori mai mici ale tensiunii superficiale pentru toate concentrațiile de nanoparticule, cu excepția concentrației de 1 wt% la 293.15 și 298.15 K. Comparativ cu fluidele multifazice pe bază de apă, cele cu apă+EG (cu excepția Ag-TiO₂ și Ag-Fe₂O₃ la concentrația de 0.5 wt%) prezintă o creștere semnificativă a tensiunii superficiale față de fluidul de bază pentru toate concentrațiile.

În Figura 7.12 (a) se poate observa că fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG prezintă cea mai mare tensiune superficială la concentrația de 0.10 wt% și temperatura de 293.15 K. La temperatura de 323.15 K, aceasta scade cu aproximativ 3.53%, iar pentru concentrațiile de 0.050 și 0.075 wt% scade cu 4.08% și 3.19%. Se remarcă faptul că tensiunea superficială a fluidului de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa) crește cu 8.125%, 8.824% și 9.369% odată cu creșterea concentrației de nanoparticule de la 0.050 la 0.1 wt%. Deși adăugarea nanoparticulelor influențează semnificativ tensiunea superficială, creșterea concentrației de la 0.050 la 0.10 wt% are un efect moderat asupra acesteia [46].

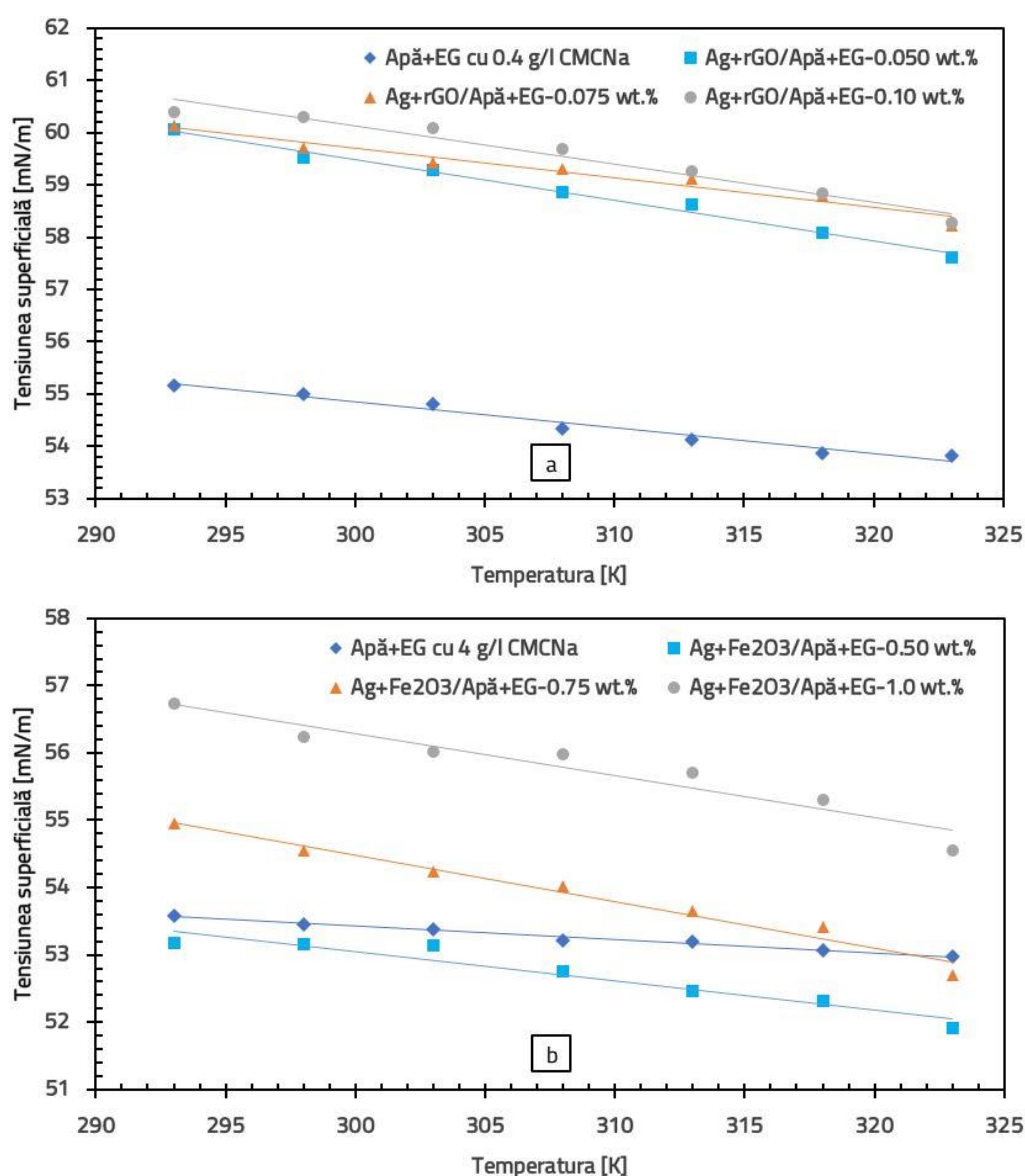
Pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG (Figura 7.12 (b)), valoare maximă a tensiunii superficiale a fost observată la concentrația de 1.0 wt% și temperatura de 293.15 K. Odată cu creșterea temperaturii la 323.15 K, tensiunea superficială scade cu 3.87%, iar pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, reducerea este de 2.36% și 4.09%. La o concentrație de 0.5 wt%, tensiunea superficială scade cu 1.059% față de fluidul de bază, iar pe măsură ce concentrația de Ag-Fe₂O₃ crește la 0.75% și 1 wt%, tensiunea superficială depășește valorile fluidului de bază cu 1.248% și 4.733%.

În cazul fluidului multifazic Ag-FeC/apă+EG (Figura 7.12 (c)), tensiunea superficială maximă a fost înregistrată la concentrația de 1.0 wt% și temperatura de 293.15 K. La 323.15 K, aceasta scade cu 3.92%, iar pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, reducerea a fost de 4.01% și 4.03%. Tensiunea

superficială a amestecului de apă+EG cu 4 g/l CMCNa creşte cu 11.630%, 12.252% şi 12.489% odată cu creşterea concentraţiei de la 0.5 la 1.0 wt%. Adăugarea de nanoparticule în fluidul de bază influenţează semnificativ tensiunea superficială, însă impactul creşterii concentraţiei de la 0.5 la 1.0 wt% este moderat.

În Figura 7.12 (d) se poate observa că tensiunea superficială maximă pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG a fost înregistrată la 1.0 wt% şi 293.15 K. La 323.15 K, aceasta scade cu aproximativ 8.25%, iar pentru concentraţiile de 0.50 şi 0.75 wt% scade cu 6.75% şi 8.79%. Tensiunea superficială a fluidului de bază (apă+EG cu 4 g/l CMCNa) scade în medie cu 8.098%, 4.501% şi 1.652% pe măsură ce concentraţia creşte de la 0.50 la 1.0 wt%.

Tensiunea superficială scade cu temperatura indiferent de fluidul de bază. Creşterea concentraţiei determină o creştere a tensiunii superficiale, deoarece cele două nanoparticule şi molecula de apă tind să se deplaseze către interfaţa lichid-gaz şi să se apropie una de cealaltă.



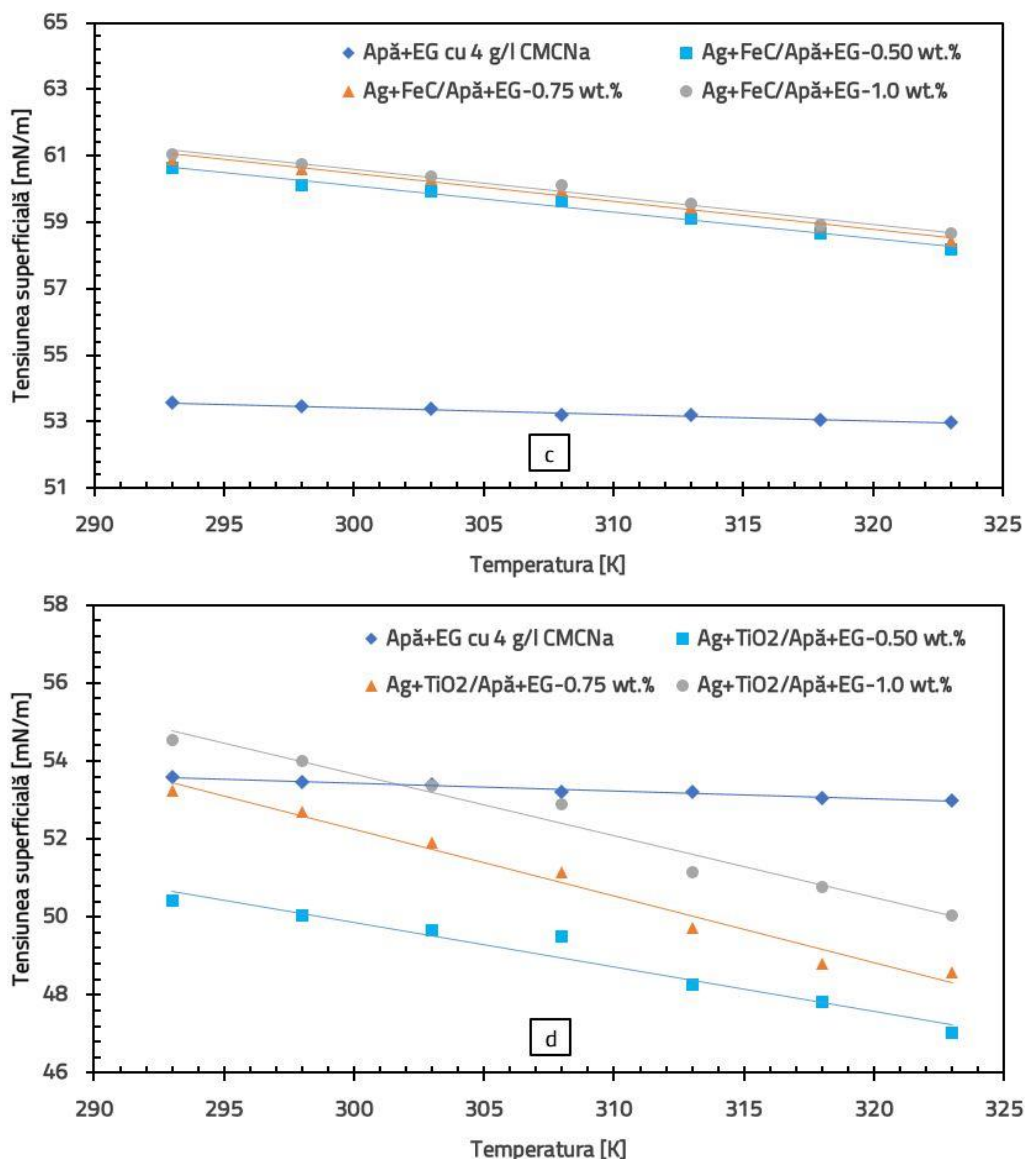


Figura 7.12. Variația tensiunii superficiale cu temperatura a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG:
a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

7.4.3 Concluzii privind studiul tensiunii superficiale a fluidelor multifazice

- Pentru fluidul multifazic **Ag-rGO/apă**, tensiunea superficială a scăzut cu 5.00% și 3.38% la 0.050 și 0.075 wt%, iar la 0.1 wt% a crescut cu 5.01%, comparativ cu apa+0.4 g/l CMCNa.
- Pentru fluidul multifazic **Ag-rGO/apă+EG**, tensiunea superficială este mai mare decât cea a apei+EG cu 0.4 g/l CMCNa. Creșterile sunt de 8.12%, 8.82% și 9.37% la 0.05, 0.075 și 0.1 wt%.
- Fluidul multifazic **Ag-Fe₂O₃/apă** prezintă o tensiune superficială mai mică decât apa+4 g/l CMCNa la toate concentrațiile (0.5, 0.75 și 1.0 wt%), cu reduceri de 11.95%, 10.02% și 8.74%.
- Fluidul multifazic **Ag-TiO₂/apă+EG** are o tensiune superficială mai mică decât apa+EG cu 4 g/l CMCNa, înregistrând scăderi de 8.10%, 4.50% și 1.65% la concentrațiile de 0.5%, 0.75% și 1.0 wt%.
- Odată cu creșterea temperaturii, tensiunea superficială scade mai mult la fluidele multifazice pe bază de apă decât la cele cu apă+EG.

7.5 Căldura specifică

Pornind de la măsurătorile de densitate, au fost calculate valorile căldurii specifice (CS) pentru fluidele multifazice pe bază de apă și apă+EG. Pentru calculul CS s-a utilizat următoarea ecuație:

$$C_{p, fm} = \frac{\varphi_{np1} \cdot \rho_{np1} \cdot C_{p, np1} + \varphi_{np2} \cdot \rho_{np2} \cdot C_{p, np2} + (1 - \varphi_{np1} - \varphi_{np2}) \cdot C_{p, fb}}{\rho_{fm}} \quad (7.1)$$

În continuare, a fost analizat efectul temperaturii și al concentrației asupra CS a fluidelor multifazice.

7.5.1 Efectul temperaturii și al concentrației asupra căldurii specifice a fluidelor multifazice

Temperatura are un impact semnificativ asupra CS a fluidelor multifazice. Se consideră pe scară largă că aceste fluide multifazice au o CS mai mică decât cea a apei. Fazeli și colab. [54] au atribuit acest fenomen creșterii difuzivității termice. Efectul temperaturii asupra CS variază ușor și este în anumite cazuri neconcludent. Concentrația de nanoparticule este direct proporțională cu CS a fluidelor multifazice. Această tendință poate fi atribuită efectului combinat al căldurilor specifice ale nanoparticulelor și fluidului de bază. Pe măsură ce concentrația de nanoparticule crește se produce o modificare a energiei libere la interfața dintre faza solidă și cea lichidă. Datorită suprafeței mari a nanoparticulelor, energia liberă de suprafață influențează semnificativ transferul total de căldură, având un impact asupra CS a materialelor nanocompozite [55]. În Figura 7.13 este prezentată variația CS a fluidelor multifazice pe bază de apă în funcție de temperatură, la diferite concentrații.

Pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă (Figura 7.13 (a)), CS crește între 293.15 și 298.15 K, scade până la 318.15 K și apoi crește din nou. Acest comportament este valabil pentru toate concentrațiile studiate, însă la concentrația de 0.050 wt%, CS continuă să scadă pe măsură ce temperatura crește. Tendința observată este similară cu cea raportată de Devarajan și colab. [56] pentru fluidul multifazic CNT-Al₂O₃. Odată cu creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K, CS scade în medie cu 0.071%, 0.174% și 0.176% pentru concentrațiile de 0.05, 0.075 și 0.1 wt%. Pentru Ag-rGO/apă, CS scade cu 0.039%, 0.458% și 0.591% la concentrațiile de 0.05, 0.075 și 0.1 wt%, comparativ cu apa. Aceste rezultate sunt în acord cu cele raportate de Gao și colab. [57], care au observat o scădere a CS de 4% și 7% pentru Grafen-Al₂O₃/apă, la concentrațiile de 0.05 și 0.15 wt% și la o temperatură de 20 °C, comparativ cu apa.

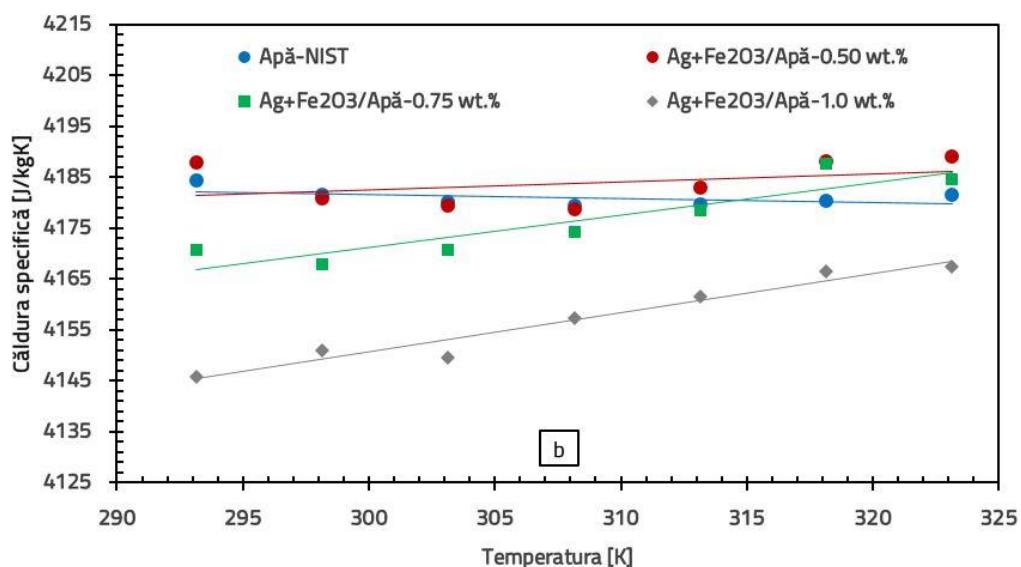
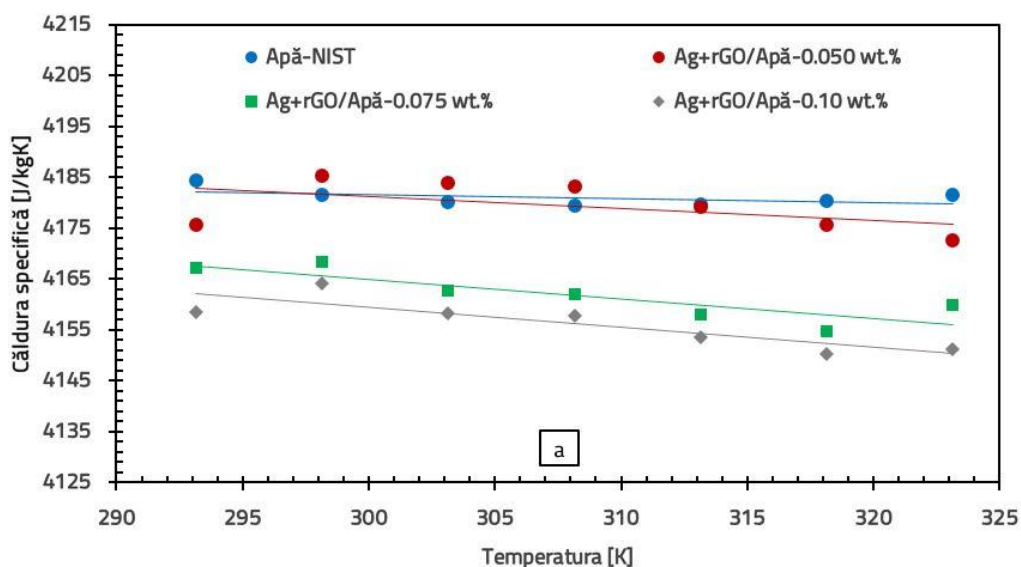
În Figura 7.13 (b) se poate observa că pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă la concentrația de 0.5 wt%, CS scade între 293.15 și 308.15 K, apoi crește odată cu creșterea temperaturii. La 0.75 wt%, CS scade între 293.15 și 298.15 K, crește până la 318.15 K, după care scade din nou. La 1.0 wt%, CS scade între 293.15 și 298.15 K, apoi crește până la 303.15 K, după care scade din nou. CS la o concentrație de 0.5 wt% este apropiată de cea a apei și crește cu 0.033% între 293.15 și 323.15 K. La concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt%, creșterile sunt mai mari, de 0.331% și 0.525%. Tendința observată pentru Ag-Fe₂O₃/apă este similară cu cea raportată de Ahammed și colab. [58] pentru fluidul multifazic Grafen-Al₂O₃/apă. La o concentrație de 0.5 wt%, CS a crescut în medie cu 0.068%, iar la concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt% a scăzut cu 0.112% și 0.575%, comparativ cu apa. Un comportament similar a fost observat de Sundar și colab. [59] la fluidul multifazic MWCNT-Fe₃O₄/apă.

Pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă (Figura 7.13 (c)), CS la concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt% scade între 293.15 și 303.15 K, după care crește până la 318.15 K și apoi scade din nou. La 1.0 wt%, CS scade între 293.15 și 308.15 K, după care crește până la 318.15 K, apoi scade din nou. Creșterea temperaturii de la

293.15 la 323.15 K determină o scădere a CS cu 0.072% pentru 0.5 și 0.75 wt%, respectiv 0.146% pentru 1.0 wt%. Tendința observată în ceea ce privește efectul temperaturii asupra CS pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă este similară cu cea raportată de Fazeli și colab. [54]. Odată cu creșterea concentrației de la 0.5 la 1.0 wt%, CS scade cu 0.272%, 0.420% și 0.977%. Această tendință este similară cu cea observată de Okonkwo și colab. [60] pentru fluidul multifazic Al_2O_3 -Fe/apă.

În Figura 7.13 (d) se poate observa că pentru fluidul multifazic Ag- TiO_2 /apă la 0.5 wt%, CS crește între 293.15 și 303.15 K, scade până la 308.15 K și apoi crește din nou. La 0.75 wt%, CS scade între 293.15 și 298.15 K, crește până la 318.15 K și scade ulterior la temperaturi mai ridicate. La 1.0 wt%, CS crește între 293.15 și 298.15 K, scade până la 303.15 K și crește din nou. Creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K determină o creștere a CS cu 0.126% și 0.220% la 0.5 și 1.0 wt%, iar la 0.75 wt% aceasta scade cu 0.076%. Aceeași tendință a fost observată și de Yarmand și colab. [61] pentru GNP-Pt/apă. Pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, CS scade cu 0.473%, 0.813% și 1.067%, comparativ cu apa. O tendință similară a fost observată și de Moldoveanu și Minea [62] pentru Al_2O_3 - TiO_2 /apă.

Pe baza rezultatelor obținute, se poate concluziona că temperatura și concentrația de nanoparticule au un efect redus asupra CS a fluidelor multifazice pe bază de apă.



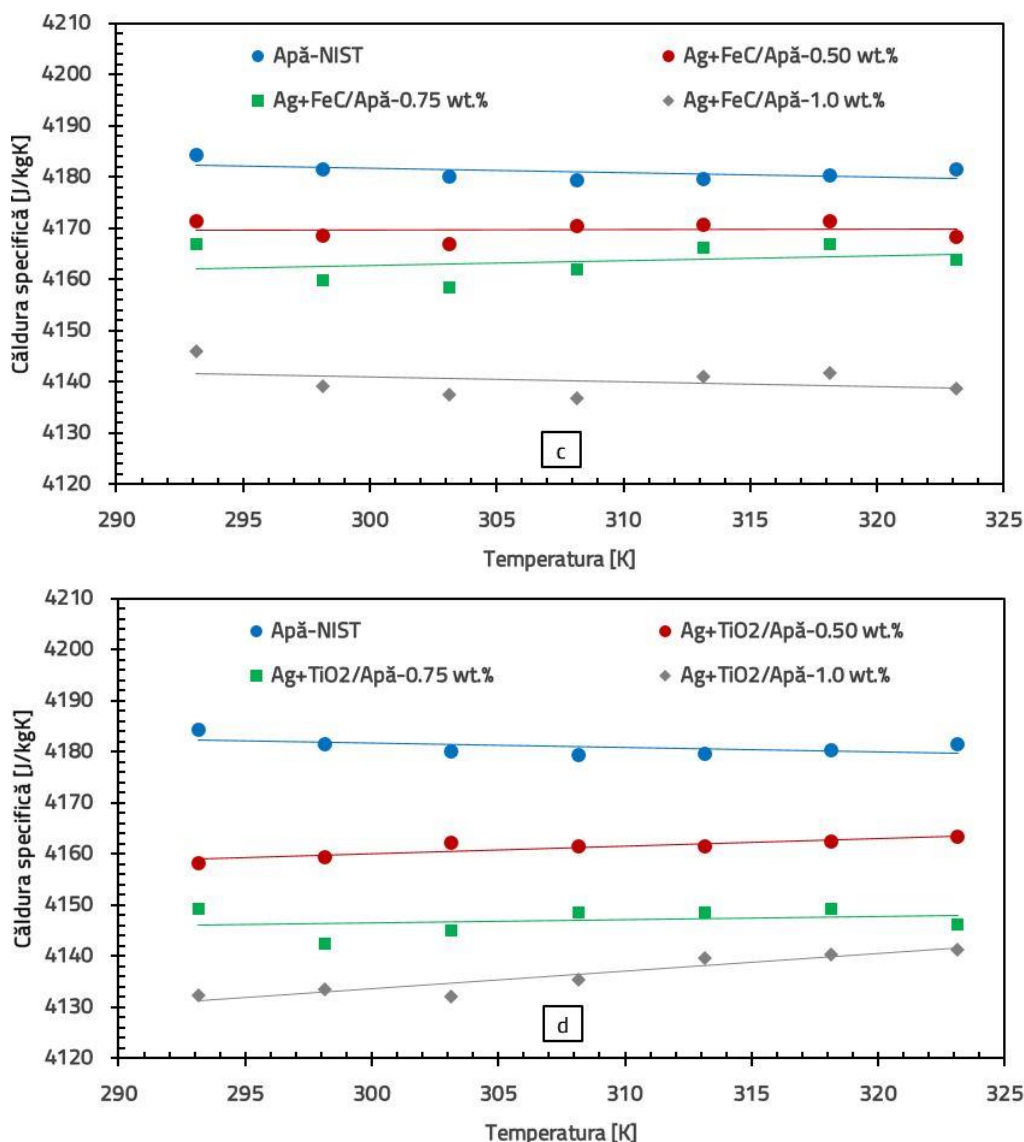


Figura 7.13. Variația căldurii specifice cu temperatura pentru fluidele multifazice pe bază de apă: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

Variația CS a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG (1:1) în funcție de temperatură la diferite concentrații masice este prezentată în Figura 7.14. Se observă că pentru toate fluidele multifazice analizate, CS crește odată cu temperatura. Totodată, valorile CS ale fluidelor multifazice pe bază de Ag cu rGO, Fe₂O₃, FeC și TiO₂ scad odată cu creșterea concentrației de nanoparticule, fiind considerabil mai mici decât cele ale soluției de apă+EG.

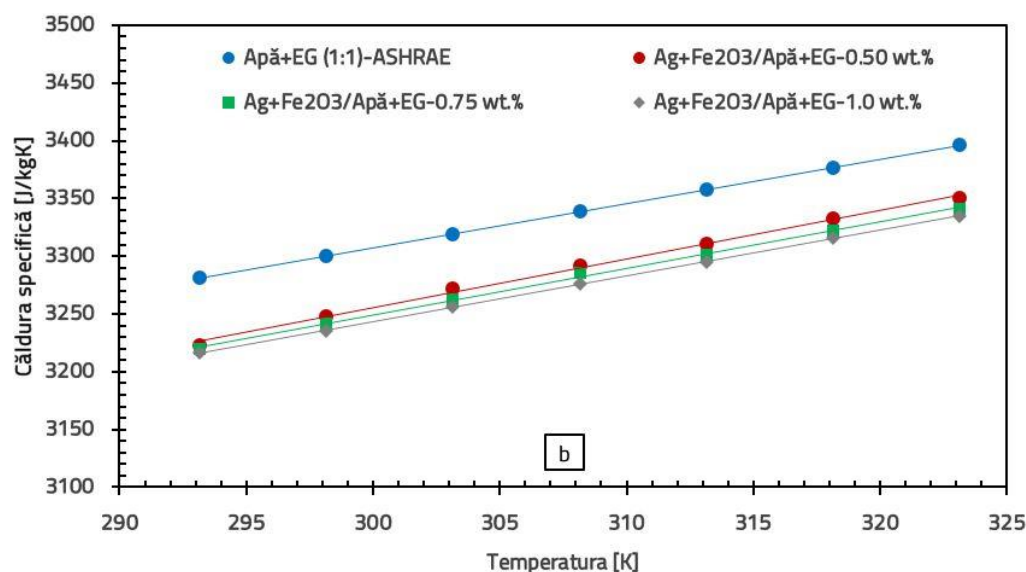
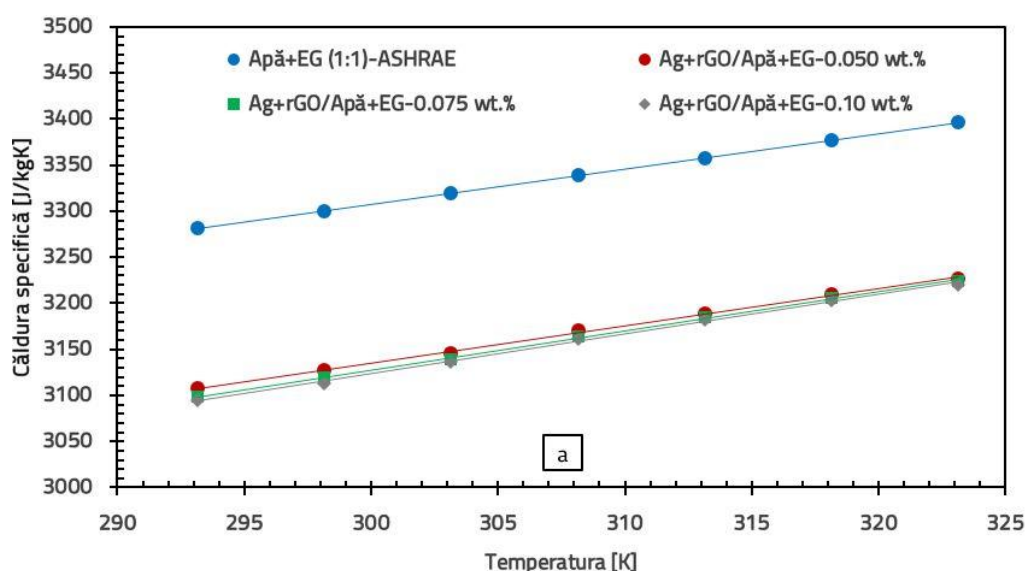
Pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG (Figura 7.14 (a)) la concentrațiile de 0.050, 0.075 și 0.1 wt%, CS a crescut cu aproximativ 3.851%, 4.046% și 4.044% odată cu creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K. Creșterea concentrației de la 0.050 wt% la 0.1 wt% a determinat o scădere a CS cu 5.109%, 5.280% și 5.387% în comparație cu soluția de apă+EG (1:1) [34].

În cazul fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG ilustrat în Figura 7.14 (b), CS a crescut odată cu creșterea temperaturii de la 293.15 la 323.15 K, cu 3.965%, 3.767% și 3.667% pentru concentrațiile analizate (0.5, 0.75 și 1.0 wt%). Deși tendința este similară celei observate anterior, reducerile au fost mai mici, de 1.467%, 1.695% și 1.882% la concentrații mai mari de nanoparticule (0.5, 0.75 și 1.0 wt%).

Conform datelor din Figura 7.14 (c), CS pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă+EG a crescut cu 3.873%, 3.868% și 3.960% la concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt% pe măsură ce temperatura a crescut de la 293.15 la 323.15 K. Totodată, CS a scăzut în medie cu 1.267%, 1.508% și 1.695% odată cu creșterea concentrației de nanoparticule de la 0.5 la 1.0 wt%, comparativ cu soluția de apă+EG.

Pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG (Figura 7.14 (d)), CS a crescut odată cu creșterea temperaturii cu 3.872%, 3.868% și 3.567% la concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%. În același timp, CS a scăzut în medie cu 1.361%, 1.635% și 2.039% la aceleași concentrații, în comparație cu amestecul de apă+EG.

Rezultatele arată că atât temperatura, cât și concentrația au un impact semnificativ asupra CS a fluidelor multifazice pe bază de amestec de apă+EG (1:1). Creșterea temperaturii duce la o creștere a CS, în timp ce o concentrație mai mare de nanoparticule determină o scădere a acesteia. Această tendință este similară cu cea observată pentru fluidele multifazice pe bază de apă, deoarece amestecul apă+EG are o căldură specifică mai mare decât nanoparticulele. De asemenea, chiar și la concentrații mici, nanoparticulele reduc semnificativ CS, mai ales la temperaturi scăzute. Aceste observații sunt susținute de rezultatele din literatură [63, 64].



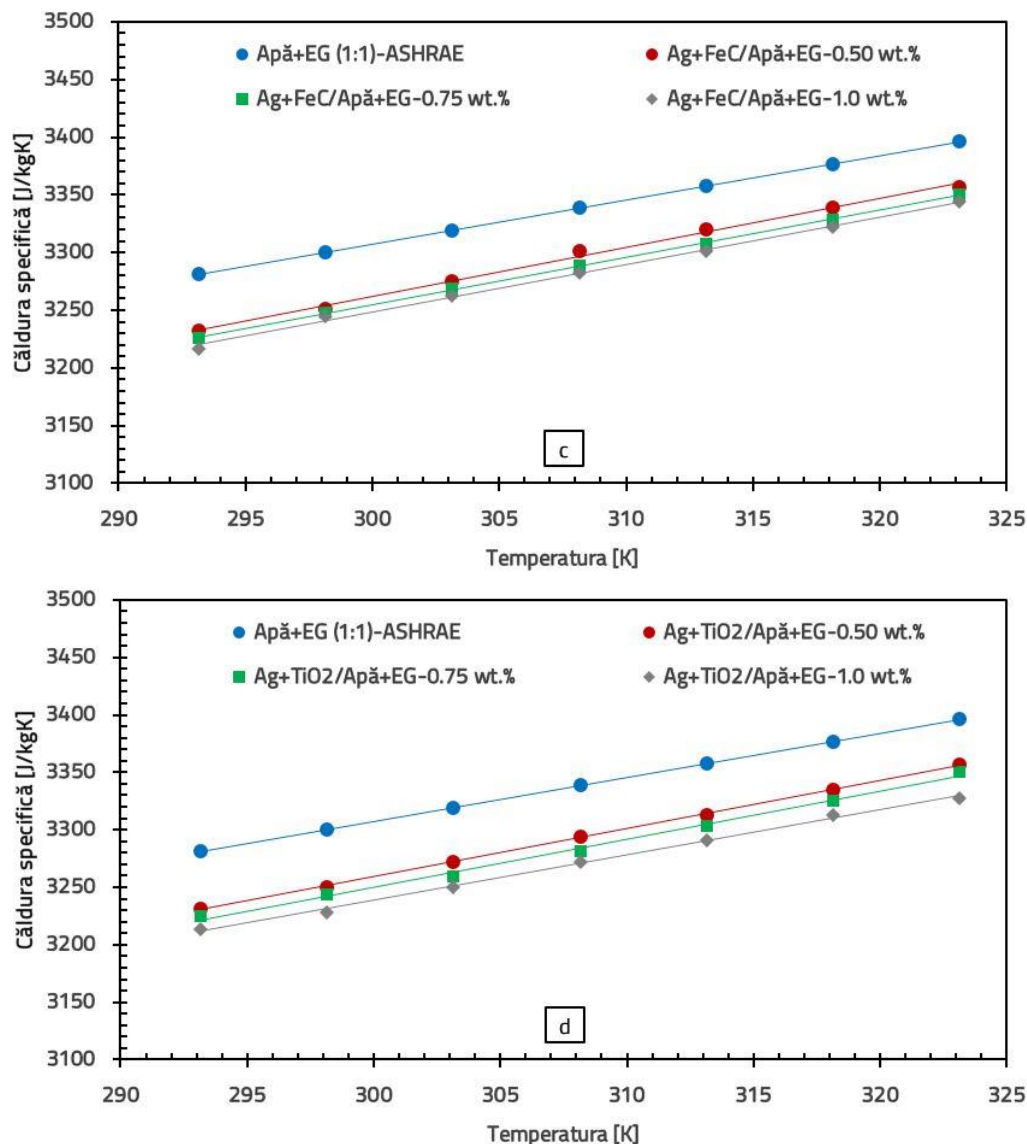


Figura 7.14. Variația căldurii specifice cu temperatura pentru fluidele multifazice pe bază de apă+EG: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

7.5.2 Concluzii privind căldura specifică a fluidelor multifazice

- Fluidul multifazic **Ag-Fe₂O₃/apă** la o concentrație de **0.5 wt%** a prezentat cele mai bune rezultate, înregistrând o creștere a CS de 0.068%, comparativ cu fluidul de bază.
- Adăugarea nanoparticulelor în apă a dus la scăderea CS, cu o reducere maximă de 1.067%, observată pentru fluidul multifazic **Ag-TiO₂/apă** la o concentrație de **1 wt%**.
- **Ag-rGO/apă+EG** a înregistrat cea mai mare reducere a CS de 5.387%, la o concentrație de **0.1 wt%**, comparativ cu soluția de apă+EG.
- **Ag-FeC/apă+EG** la o concentrație de **0.5 wt%**, a prezentat cele mai bune rezultate în amestecul apă+EG, înregistrând o reducere de 1.267%, sugerând că anumite combinații de nanoparticule pot oferi o CS apropiată de cea a fluidului de bază.
- Pe baza rezultatelor, se poate concluziona că **Ag-Fe₂O₃/apă** prezintă cea mai bună CS dintre fluidele multifazice studiate, iar **Ag-FeC/apă+EG** a avut cele mai bune rezultate în apă+EG.

8. PROPRIETĂȚILE OPTICE – REZULTATE EXPERIMENTALE

8.1 Procedura experimentală

Acest studiu analizează valorile de transmitanță și absorbanță ale diferitelor fluide multifazice (Ag-rGO, Ag-Al₂O₃, Ag-TiO₂, Ag-FeC), care utilizează ca bază apa și amestecul de apă+EG, luând în considerare factori precum concentrația masică și materialele nanoparticulelor. Toate fluidele multifazice au fost analizate la trei concentrații masice de nanoparticule.

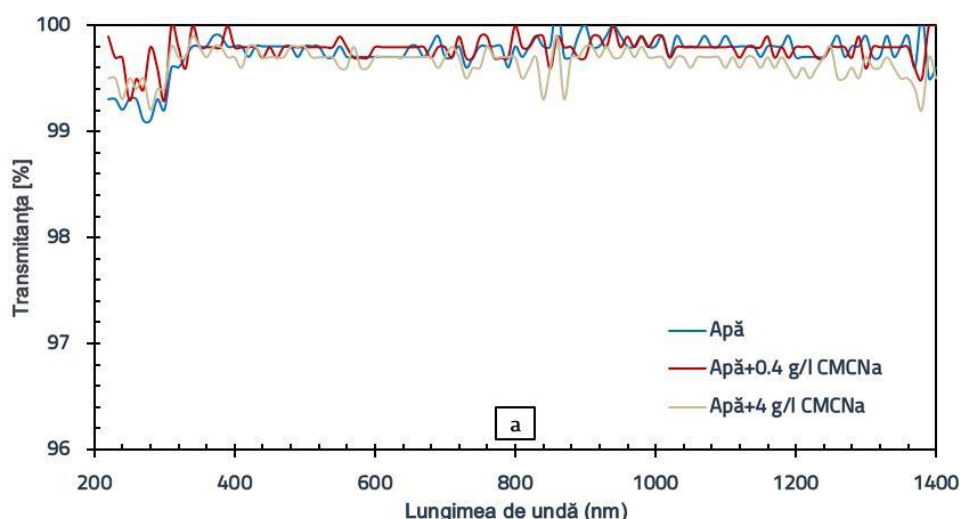
În timpul experimentului, toate măsurătorile au fost efectuate la o temperatură constantă de 293.15 K. Analiza spectrelor obținute a fost limitată la intervalul 220-1400 nm, deoarece absorbția în infraroșu apropiat a apei și a amestecului de apă cu EG (fluidele primare utilizate), dincolo de acest interval este extrem de ridicată.

8.2 Interpretarea rezultatelor pentru fluidele de bază

Măsurătorile pentru fluidele de bază (apă și apă+EG), cu și fără surfactant (0.4 și 4 g/l CMCNa), au fost efectuate la temperatura camerei (293.15 K), în intervalul de lungimi de undă 220-1400 nm.

În Figura 8.1 se poate observa că pentru un drum optic de 1 mm, apa prezintă un comportament binecunoscut cu o transmitanță mare, nefiind capabilă să absoarbă radiația în intervalul studiat. Adăugarea de EG în apă nu modifică semnificativ valorile transmitanței.

Figura 8.1 (a) ilustrează transmitanța apei și a surfactantului CMCNa amestecat în apă, iar Figura 8.1 (b) transmitanța amestecului de apă+EG și a surfactantului în acest amestec. Din grafic este evident că surfactantul are un efect neglijabil asupra transmitanței optice a apei și a amestecului de apă cu EG. Prin urmare, orice modificare a proprietăților optice ale fluidului multifazic în comparație cu apa și amestecul de apă cu EG se va datora exclusiv prezenței nanoparticulelor [65].



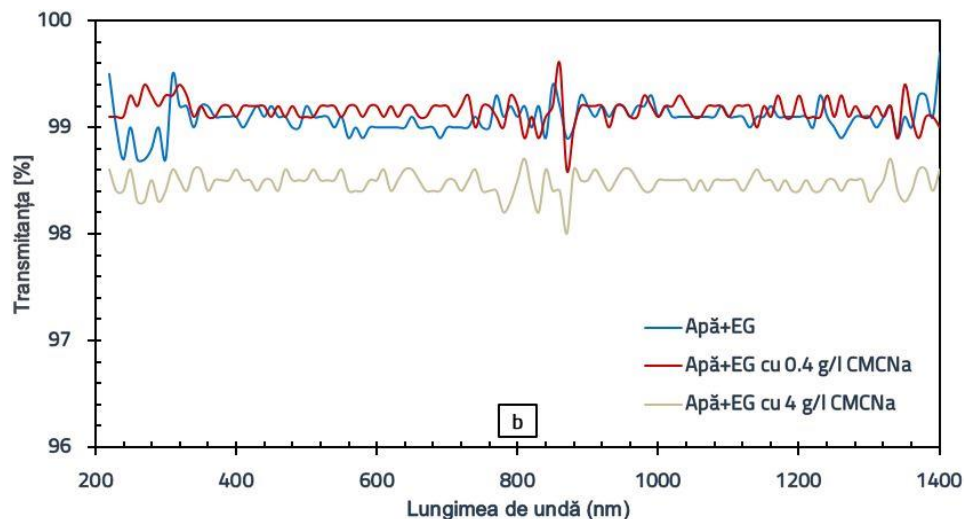


Figura 8.1. Transmitanța pentru: a) apă și b) apă+EG (50%-50%) – drum optic 1 mm

În Figura 8.2 se observă o scădere a transmittanței pentru apă și amestecul de apă+EG, cu și fără surfactant, pentru un drum optic de 10 mm. Se poate concluziona că transmittanța depinde de drumul optic, iar o creștere a acestuia determină o reducere a transmittanței.

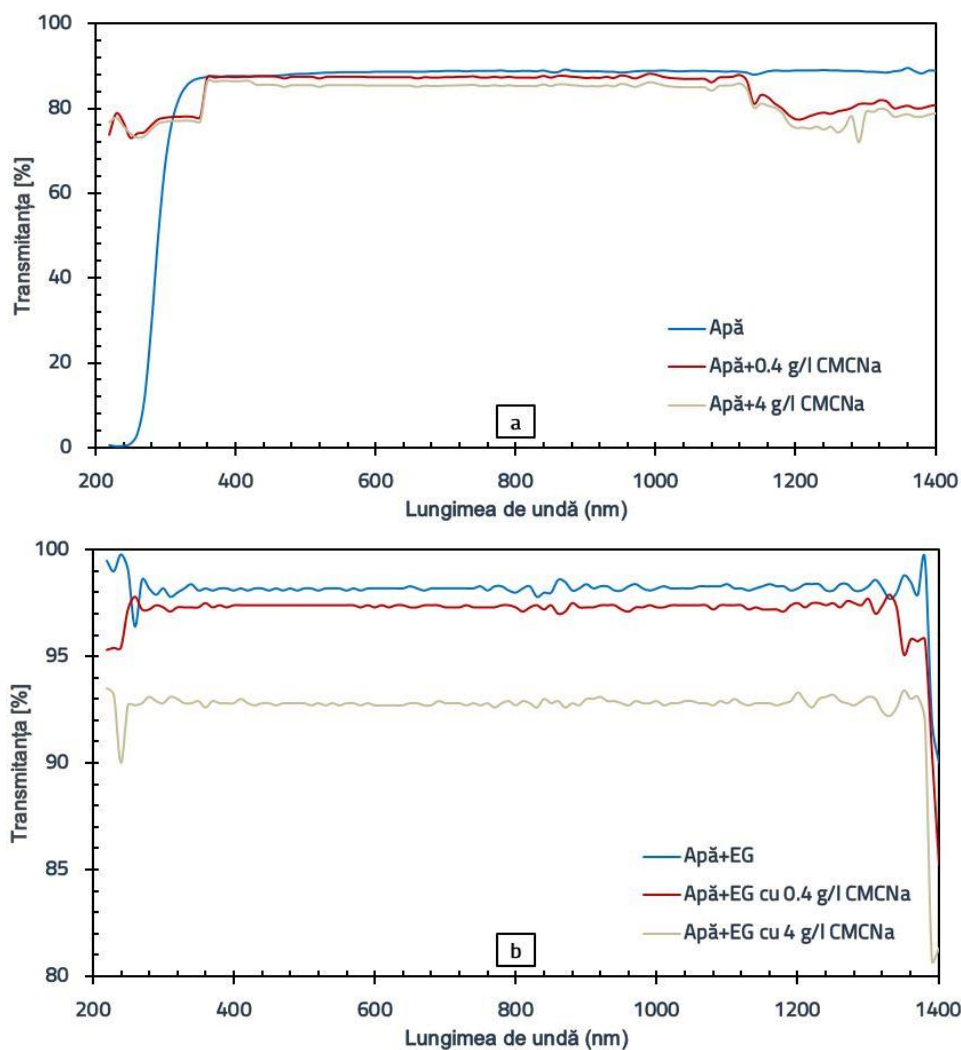


Figura 8.2. Transmittanța pentru: a) apă și b) apă+EG (50%-50%) – drum optic 10 mm

În continuare, se prezintă proprietățile optice ale fluidelor multifazice pe bază de apă și apă+EG (1:1). Pentru a măsura absorbanta și transmitanța fluidelor multifazice, a fost utilizată o cuvă de cuarț cu un drum optic de 1 mm. Rezultatele acestor măsurători sunt prezentate în Figurile 8.3-8.18.

8.3 Fluide multifazice pe bază de apă

8.3.1 Transmitanța

Rezultatele transmitanței pentru fluidele multifazice pe bază de apă la diferite concentrații masice sunt prezentate în Figurile 8.3-8.6.

În Figura 8.3 sunt prezentate valorile transmitanței pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă la concentrațiile de 0.05, 0.075 și 0.1 wt%, comparativ cu apa distilată cu 0.4 g/l CMCNa folosită ca referință. Transmitanța fluidului multifazic Ag-rGO/apă este foarte scăzută (sub 7%) în infraroșu apropiat după lungimea de undă de 800 nm, în timp ce apa distilată are o transmitanță de aproximativ 100% pe întregul interval de lungimi de undă [65]. Cu toate acestea, transmitanța fluidului multifazic Ag-rGO/apă este ridicată pentru lungimile de undă din intervalul 220-550 nm, atingând o valoare maximă de 44.53% la 390 nm, pentru o concentrație de 0.05 wt%. Pentru concentrații de 0.075 și 0.1 wt%, valorile maxime ale transmitanței au fost de 37.23%, respectiv 22.83%, la 390, respectiv 340 nm. La 0.1 wt%, transmitanța este de aproximativ 2% în infraroșu apropiat și scade spre zero, ceea ce indică o absorbție completă a luminii. Nanoparticulele de Ag și rGO conferă fluidului multifazic proprietăți excelente de absorbție optică, sugerând potențialul acestuia de utilizare ca fluid de lucru într-un DASC.

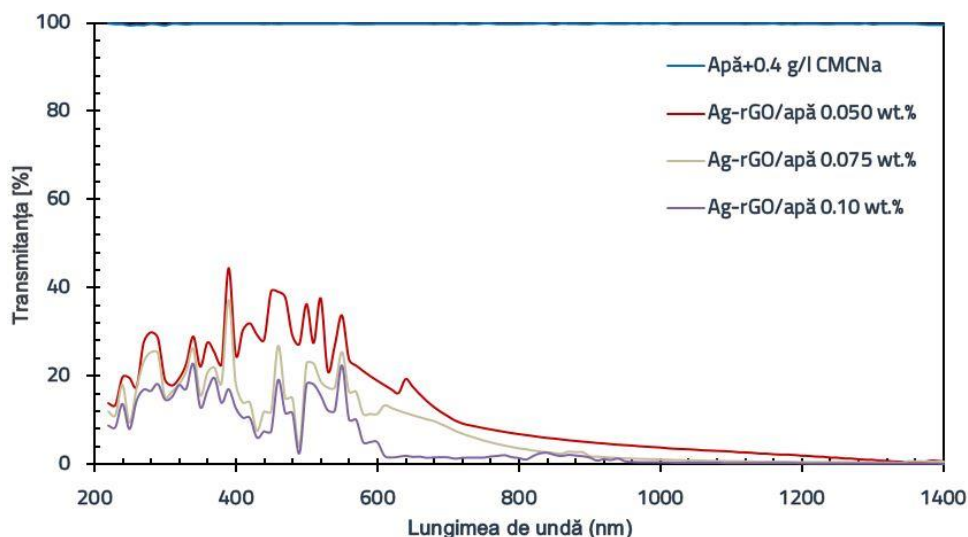


Figura 8.3. Spectrul de transmisie al apei și al fluidului multifazic Ag-rGO/apă

Figura 8.4 prezintă spectrele de transmisie ale fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă la concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, comparativ cu proba de referință (apă+4 g/l CMCNa). Apa cu 4 g/l de CMCNa este transparentă pe întreg intervalul de lungimi de undă. Fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă prezintă o transmitanță maximă de 68.73% la 1400 nm pentru concentrația de 0.5 wt%, care scade la 64.16% pentru 0.75 wt% și 57.16% pentru 1 wt%. Fluidul multifazic cu 0.5 wt% prezintă o transmitanță ridicată (64.83%-68.73%), indicând o absorbție scăzută. Se poate observa o tendință similară de creștere a

transmitanței pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, iar pentru 1 wt% creșterea este mai pronunțată, probabil din cauza agregării excesive a nanoparticulelor și instabilității suspensiei.

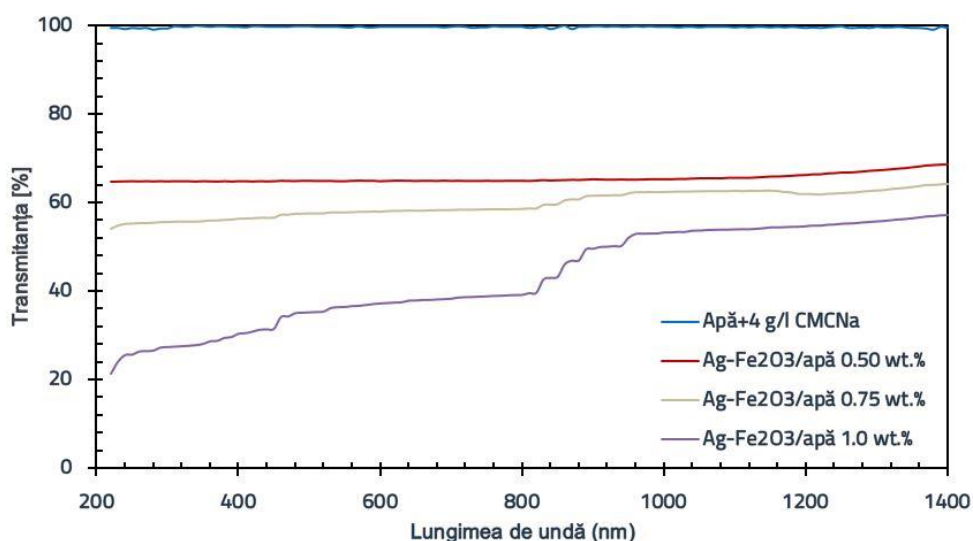


Figura 8.4 Spectrul de transmisie al apei și al fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă

Spectrul de transmisie al fluidului multifazic Ag-FeC/apă și al fluidului de bază (apă+4 g/l CMCNa) în UV, vizibil și infraroșu apropiat este prezentat în Figura 8.5. După lungimea de undă de 530 nm, transmitanța fluidului multifazic pentru toate concentrațiile studiate scade sub 11%. În regiunea UV, fluidul multifazic înregistrează o valoare maximă a transmitanței de 77.4%, la lungimea de undă de 330 nm, pentru o concentrație de 0.5 wt%. Particulele sau impuritățile din material împrăștiie lumina incidentă, provocând fluctuații în spectrul de transmisie. Fluctuațiile din spectrul de transmisie care apar în domeniul UV se referă la variații ale cantității de lumină transmisă prin fluidul multifazic, la diferite concentrații, în funcție de lungimea de undă. Aceste fluctuații apar ca vârfuri în spectru la anumite lungimi de undă, la care nanoparticulele transmit lumina cel mai eficient. În domeniul vizibil și infraroșu apropiat, fluidul multifazic Ag-FeC/apă prezintă o transmisie mai mică, ceea ce sugerează o absorbție mai eficientă a luminii în aceste regiuni.

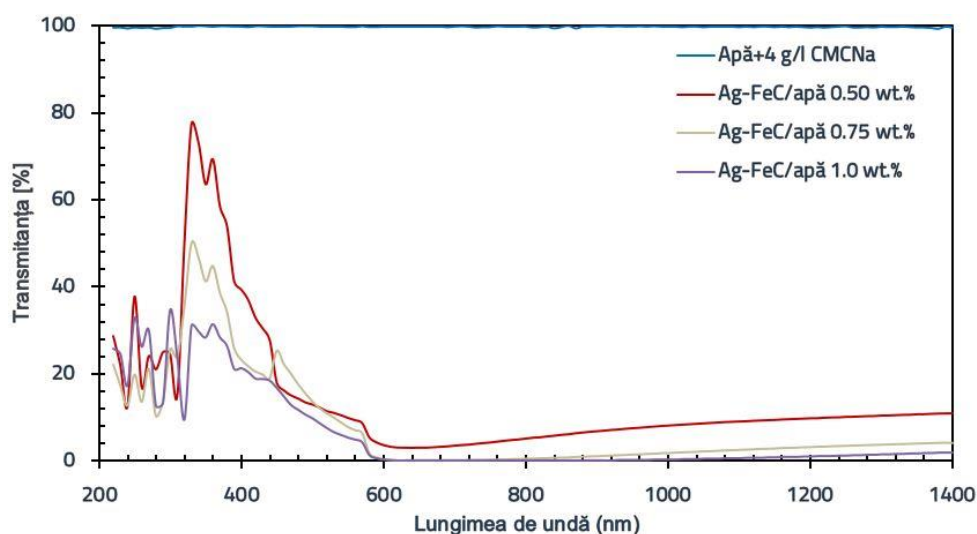


Figura 8.5. Spectrul de transmisie al apei și al fluidului multifazic Ag-FeC/apă

Spectrul de transmisie al fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă (Figura 8.6) prezintă o tendință similară pentru cele trei concentrații de nanoparticule studiate. Se observă că după atingerea lungimii de undă de 810 nm, transmitanța începe să se stabilizeze, fără a mai apărea variații în spectrul de transmisie. De asemenea se poate observa că în domeniul UV și vizibil spectrul de transmisie prezintă fluctuații care se referă la variații ale cantității de lumină transmise la diferite concentrații. Pentru o concentrație de 0.5 wt%, valoarea maximă a transmitanței este de 62.125% și scade la 61.3%, respectiv 56.15% pentru concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt%, la lungimea de undă de 440 nm. La lungimea de undă de 810 nm, fluidul multifazic prezintă un vârf de rezonanță plasmonică de suprafață localizată (LSPR) unde lumina este absorbită cel mai eficient.

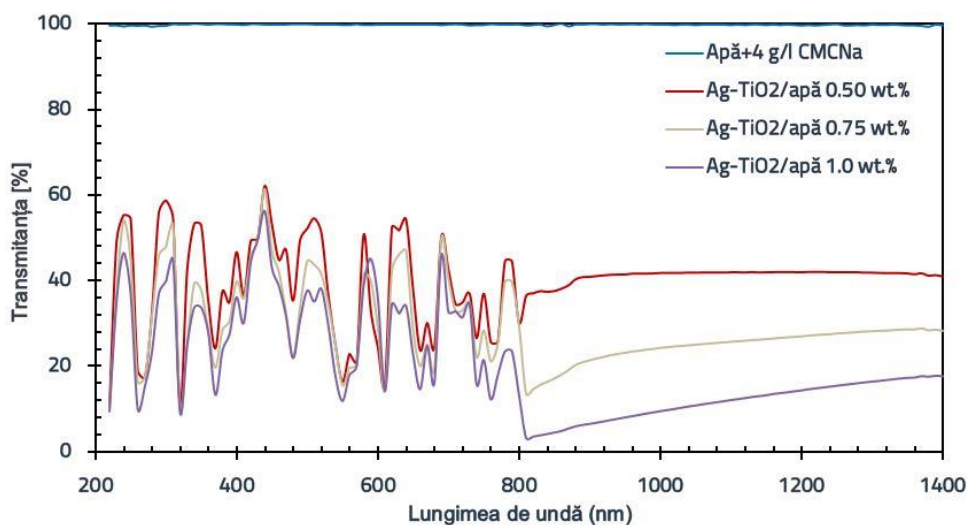


Figura 8.6. Spectrul de transmisie al apei și al fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă

Fluidele multifazice Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂ pe bază de apă prezintă o transmitanță mai mare decât a Ag-rGO/apă. Acest lucru sugerează că fluidul multifazic Ag-rGO/apă, cu o concentrație masică de 0.1% arată o perspectivă promițătoare de utilizare ca fluid de lucru într-un DASC.

8.3.2 Absorbanța

Figurile 8.7-8.10 prezintă variațiile absorbantei în funcție de lungimea de undă pentru fluidele multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC, Ag-TiO₂ pe bază de apă cu 0.4 și 4 g/l de CMCNa la diferite concentrații, comparativ cu proba de referință.

Variația absorbantei în funcție de lungimea de undă pentru fluidul multifazic Ag-rGO cu 0.4 g/l de CMCNa este descrisă în Figura 8.7. Absorbanța maximă a fost de 3.339 la lungimea de undă de aproximativ 1130 nm, pentru o concentrație de 0.1 wt%, iar pentru concentrațiile de 0.05 și 0.075 wt%, valorile maxime au fost de 2.281 și 3.075 la lungimile de undă de 1300, respectiv 1160 nm. Fluidul multifazic Ag-rGO/apă absoarbe semnificativ mai multă lumină în regiunea vizibilă și infraroșu apropiat. Creșterea concentrației de nanoparticule a îmbunătățit considerabil absorbția solară a fluidului de bază (apă cu 0.4 g/l CMCNa), dar creșterea absorbantei a fost mai mică între 0.075 și 0.1 wt% (7.15%), comparativ cu creșterea de la 0.05 la 0.075 wt% (32.27%).

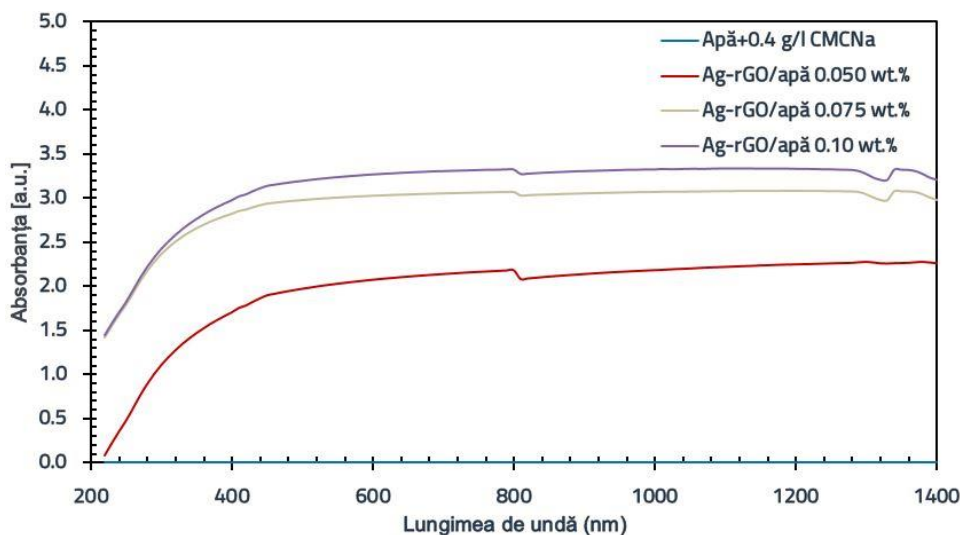


Figura 8.7. Spectrul de absorbanță al apei și al fluidului multifazic Ag-rGO/apă

Figura 8.8 prezintă variația absorbției în funcție de lungimea de undă pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃ în apă cu 4 g/l CMCNa. Pe măsură ce concentrația fluidului multifazic crește de la 0.5 la 1.0 wt%, absorbanta crește semnificativ îmbunătățind absorbția solară. Valorile maxime ale absorbției sunt de 0.202, 0.234 și 0.406, la lungimea de undă de 220 nm, pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%. Pentru concentrațiile de 0.5 și 0.75 wt%, absorbanta rămâne constantă în jurul valorilor de 0.195 și 0.215 pe întreg intervalul de lungimi de undă, iar pentru 1.0 wt% absorbanta scade la lungimi de undă mai mari, datorită absorbției mai eficiente la lungimi de undă scurte.

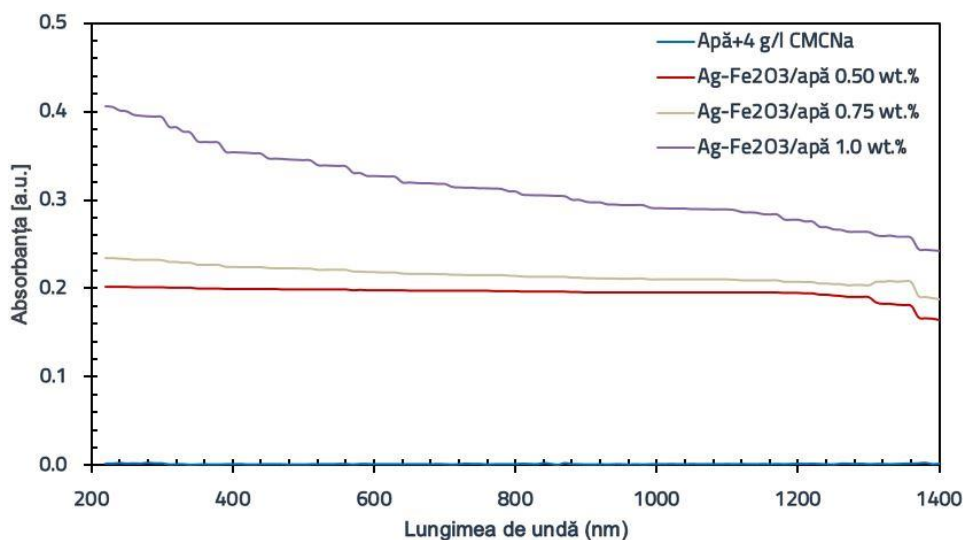


Figura 8.8. Spectrul de absorbanță al apei și al fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă

Spectrul de absorbție în domeniul UV, vizibil și infraroșu apropiat al fluidului multifazic Ag-FeC/apă și al fluidului de bază (apă cu 4 g/l CMCNa) este prezentat în Figura 8.9. Spectrul de absorbție al fluidului multifazic cu o concentrație de 0.5 wt% prezintă un profil similar cu cel al concentrațiilor de 0.75 și 1.0 wt%. Pentru toate concentrațiile studiate se poate observa că absorbanta are o tendință crescătoare până la valori ale lungimii de undă cuprinse între 640 și 710 nm, după care se constată o scădere a acestuia cu creșterea lungimii de undă. Astfel, valorile maxime ale absorbției sunt înregistrate în jurul

lungimilor de undă de 640 nm, 650 nm și respectiv 710 nm pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%. Aceste vârfuri ale absorbantei pot fi atribuite LSPR-ului nanoparticulelor de Ag [66]. În UV, fluidul multifazic absoarbe mai puțină lumină, dar în domeniul vizibil și infraroșu apropiat, absorbția crește semnificativ, ceea ce indică că acest fluid poate fi o soluție viabilă pentru utilizarea în aplicații solare.

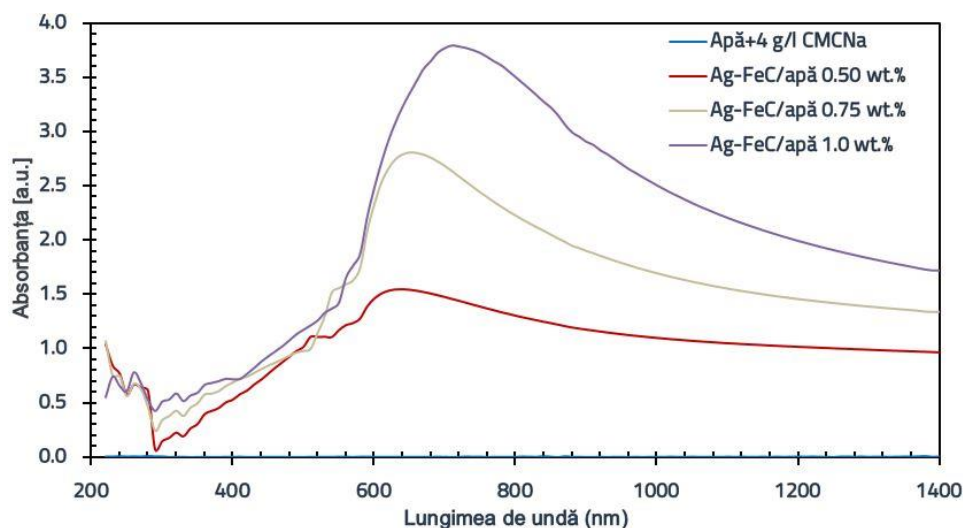


Figura 8.9. Spectrul de absorbantă al apei și al fluidului multifazic Ag-FeC/apă

Figura 8.10 prezintă variația absorbantei fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă, în funcție de lungimea de undă, pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%. Vârfurile din spectru corespund lungimilor de undă la care nanoparticulele absorb și împrăștiie lumina cel mai eficient. Absorbanta maximă pentru cele trei concentrații (0.5, 0.75 și 1.0 wt%) este obținută la lungimea de undă de aproximativ 570 nm și este de 3.385, 4.147 și 4.431. În regiunea UV, fluidul multifazic absoarbe mai multă lumină decât în infraroșu apropiat. În regiunea luminii vizibile, în intervalul 380-650 nm, Ag-TiO₂/apă prezintă valori ale absorbantei semnificativ mai mari, după care se poate observa o tendință descrescătoare a absorbantei până în jurul valorii lungimii de undă de 950 nm. În intervalul 950-1400 nm, valorile absorbantei pentru cele trei concentrații studiate rămân aproape constante.

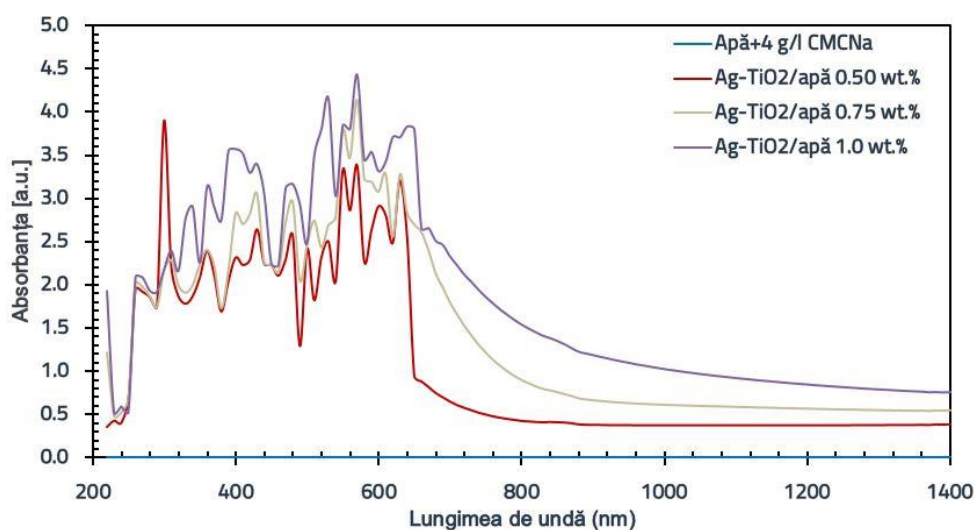


Figura 8.10. Spectrul de absorbantă al apei și al fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă

8.4 Fluide multifazice pe bază de apă+EG

8.4.1 Transmitanţa

Figurile 8.11-8.14 prezintă variaţia transmitanţei în funcţie de lungimea de undă pentru fluidele multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC şi Ag-TiO₂ la diferite concentraţii, comparativ cu proba de referinţă. Amestecul de apă+EG cu 0.4 şi 4 g/l CMCNa este transparent pe întregul interval de lungimi de undă studiat. Particulele sau impurităţile din material împrăştie lumina incidentă provocând fluctuaţii în spectrul de transmisie. Aceste fluctuaţii apar adesea ca vârfuri în spectru la anumite lungimi de undă, unde nanoparticulele transmit lumina cel mai eficient.

În Figura 8.11 este analizată transmitanţa fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG pentru concentraţiile de 0.05, 0.075 şi 0.1 wt%. La concentraţia de 0.05 wt%, fluidul multifazic Ag-rGO prezintă o transmitanţă ridicată în infraroşu apropiat, cu o valoare maximă de 32.6% la lungimea de undă de 980 nm. La concentraţia de 0.075 wt%, transmitanţa maximă de 21.46% este obţinută în regiunea UV la lungimea de undă de 360 nm. Pe măsură ce concentraţia creşte la 0.1 wt%, transmitanţa scade sub 4.3% pe intervalul de lungimi de undă 220-1400 nm. Fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG la 0.1 wt% prezintă o transmitanţă mult mai mică decât fluidul de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa), ceea ce indică caracteristici excepţionale de absorbţie optică, în special în regiunea vizibilă [65].

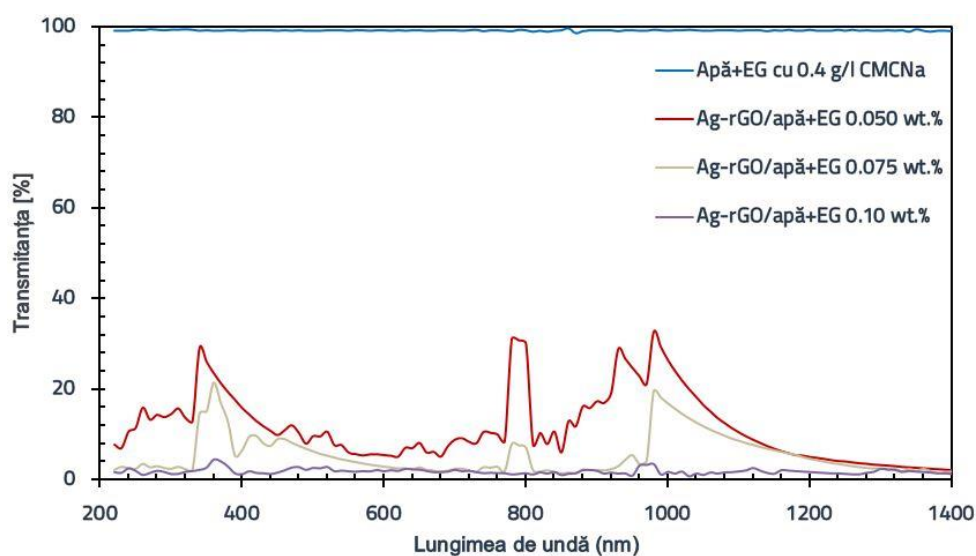


Figura 8.11. Spectrul de transmisie al amestecului de apă+EG şi al fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG

Pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG (Figura 8.12) valorile maxime ale transmitanţei au fost obţinute în regiunea UV. Pentru concentraţiile masice de 0.5, 0.75 şi 1.0%, vârfurile maxime ale transmitanţei au fost de 89.1%, 74.8% şi 61.65%, obţinute la lungimile de undă 370, 300 şi respectiv 380 nm. Se poate concluziona astfel că, transmitanţa scade cu creşterea concentraţiei de nanoparticule. Pentru toate concentraţiile studiate, transmitanţa este relativ ridicată în intervalul de lungimi de undă 220-490 nm. În regiunea vizibilă, la o lungime de undă de 510 nm, se poate observa o absorbţie îmbunătăţită evidenţiată printr-un vârf de LSPR, în timp ce pentru intervalul 510-1400 nm, se poate observa o creştere uşoară a transmitanţei pentru toate concentraţiile studiate.

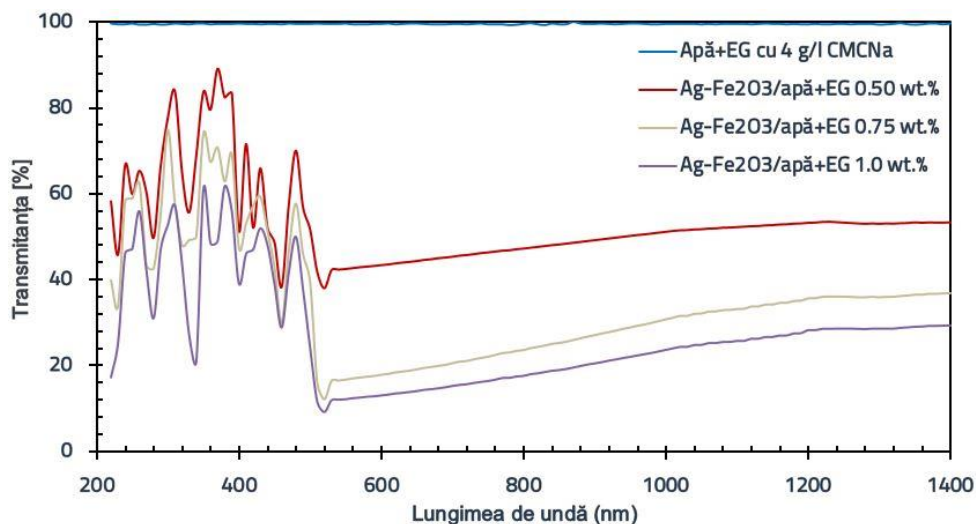


Figura 8.12. Spectrul de transmisie al amestecului de apă+EG şi al fluidului multifazic Ag- Fe_2O_3 /apă+EG

În Figura 8.13 se prezintă valorile transitanței fluidului multifazic Ag-FeC/apă+EG la concentrații masice de 0.5, 0.75 și 1.0%. Vârfurile maxime ale transitanței au fost de 88.4% (780 nm), 60.6% (950 nm) și 42.3% (940 nm) pentru cele trei concentrații studiate. De asemenea, a fost observată o absorbție îmbunătățită în regiunea vizibilă la lungimea de undă de 390 nm și în infraroșu apropiat la lungimile de undă 960 nm, respectiv 1070 nm care au prezentat vârfuri de LSPR. Mai mult, se poate observa o absorbție îmbunătățită în intervalul de lungimi de undă 1150-1400 nm la toate concentrațiile studiate.

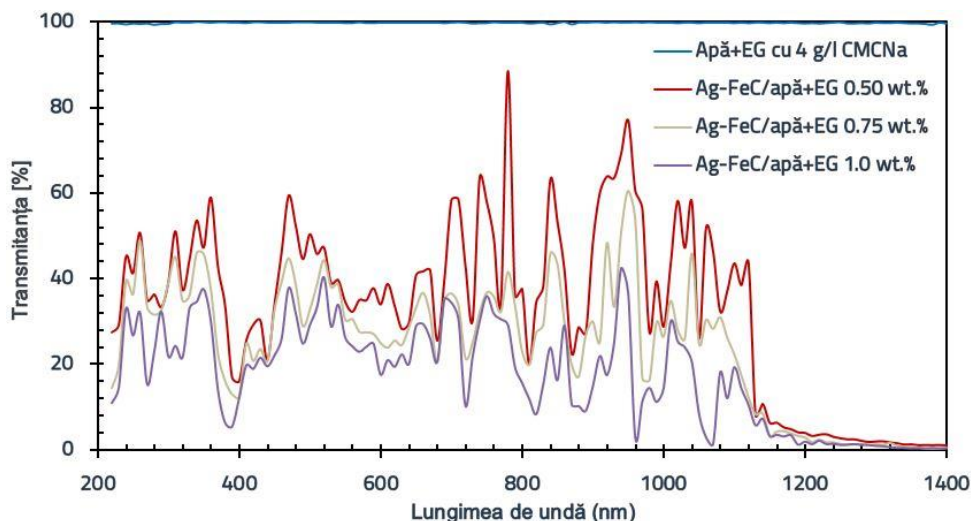


Figura 8.13. Spectrul de transmisie al amestecului de apă+EG şi al fluidului multifazic Ag-FeC/apă+EG

Valorile transitanței pentru fluidul multifazic Ag- TiO_2 /apă+EG sunt prezentate în Figura 8.14. Pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, vârfurile maxime ale transitanței au fost de 70.7% la 880 nm (infraroșu apropiat), 62.975% la 480 nm (vizibil) și 58.45% la 230 nm (UV). Rezultatele indică o absorbție îmbunătățită la 250 nm (UV) și 840 nm (infraroșu apropiat) marcată prin două vârfuri de LSPR. De asemenea, fluidul multifazic Ag- TiO_2 /apă+EG prezintă o absorbție crescută în intervalul de lungimi de undă 900-1400 nm pentru concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt%.

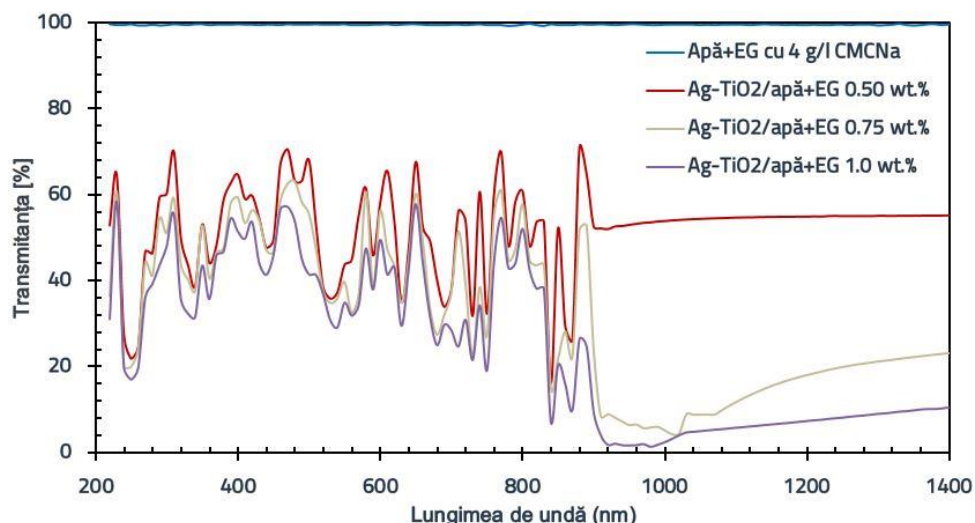


Figura 8.14. Spectrul de transmisie al amestecului de apă+EG și al fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă+EG

8.4.2 Absorbanța

Figurile 8.15-8.18 prezintă variația absorbției în funcție de lungimea de undă pentru fluidele multifazice Ag-rGO, Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC, Ag-TiO₂ pe bază de amestec de apă cu EG, la diferite concentrații masice și pentru proba de referință.

Figura 8.15 prezintă variația absorbției fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG în funcție de lungimea de undă. Reacțiile chimice dintre nanoparticulele de Ag și rGO modifică caracteristicile de absorbție ale fluidului de bază, ceea ce generează fluctuații ale absorbției. Aceste fluctuații sunt vizibile în regiunile UV și vizibilă, unde pe măsură ce concentrația crește, banda de absorbție este lărgită și deplasată la o lungime de undă mai mare. În regiunea infraroșu apropiat, absorbția scade între 860-920 nm și crește ulterior în intervalul 930-1400 nm. Valorile maxime ale absorbției au fost de 3.295, 4.402 și 4.804 la lungimea de undă de 580 nm, pentru concentrațiile de 0.05, 0.075 și 0.10 wt%.

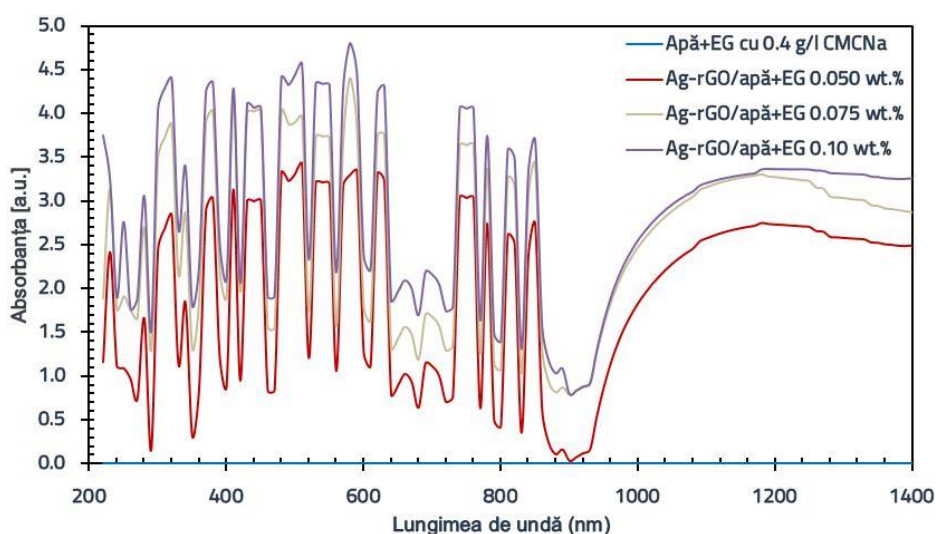


Figura 8.15. Spectrul de absorbție al amestecului de apă+EG și al fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG

Absorbanța fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG (Figura 8.16) pentru concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt% este mai mare în spectrul UV și vizibil și scade pe măsură ce lungimea de undă crește. Pentru concentrația de 0.5 wt% se observă că absorbanța rămâne constantă în jurul valorii de 0.390. Valorile maxime ale absorbanței pentru concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt% au fost de 2.604 și 3.046 la lungimile de undă de 260 nm, respectiv 310 nm. Creșterea concentrației de Ag-Fe₂O₃ de la 0.5 wt% la 1.0 wt% îmbunătățește semnificativ absorbția solară în regiunea UV și vizibilă.

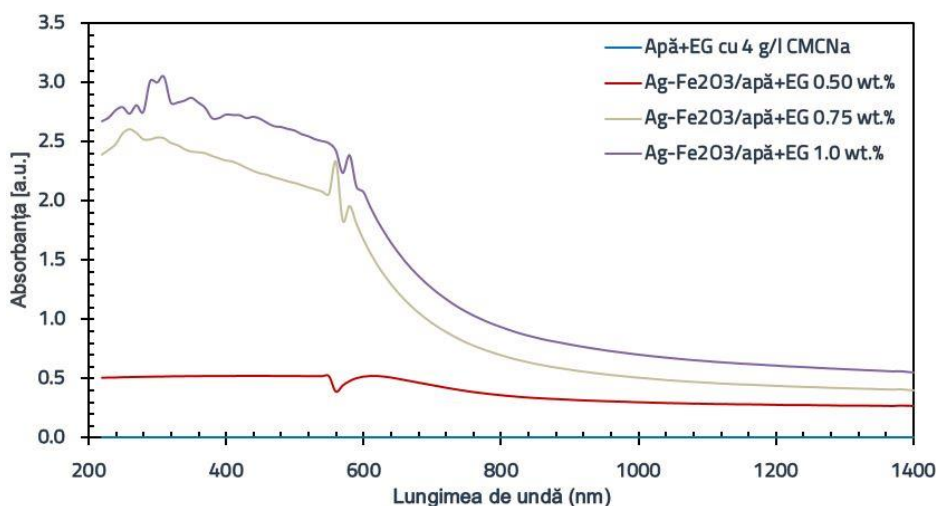


Figura 8.16. Spectrul de absorbanță al amestecului de apă+EG și al fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG

Variația absorbanței pentru fluidul multifazic Ag-FeC/apă+EG (Figura 8.17) urmează aceeași tendință în regiunile UV și vizibilă pentru toate concentrațiile, în timp ce în infraroșu apropiat concentrația de 1.0 wt% prezintă o ușoară îmbunătățire. Spectrul de absorbție al fluidului multifazic prezintă o bandă puternică de absorbție la 830-870 nm și 1220-1270 nm pentru 1.0 wt%, atribuită LSPR-ului nanoparticulelor de Ag. Valorile maxime ale absorbanței pentru 0.5, 0.75 și 1.0 wt% au fost de 0.659, 0.939 și 2.80 la 1210, 930 și 850 nm. Fluidul multifazic cu 1.0 wt% absoarbe lumina cel mai eficient în infraroșu, în timp ce creșterea de la 0.5 la 0.75 wt% aduce o îmbunătățire nesemnificativă.

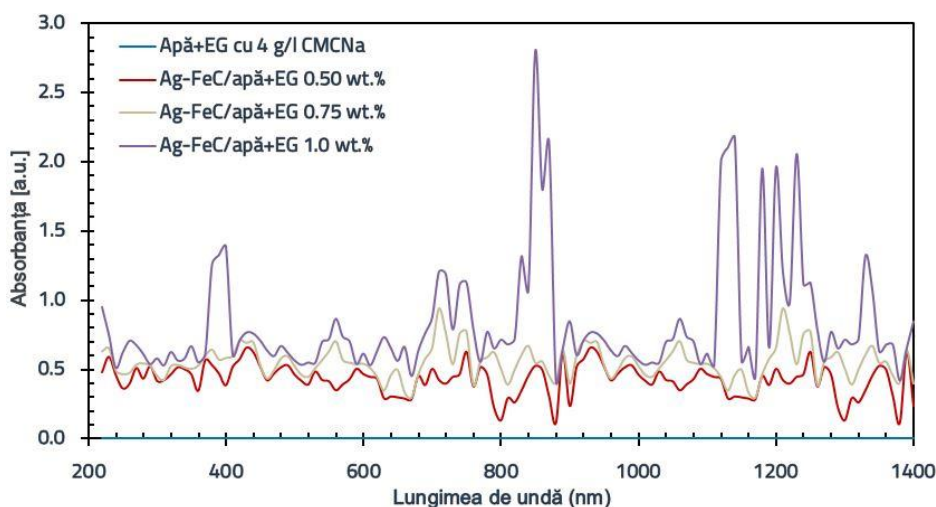


Figura 8.17. Spectrul de absorbanță al amestecului de apă+EG și al fluidului multifazic Ag-FeC/apă+EG

Figura 8.18 prezintă variația absorbantei pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG. Pentru fluidul multifazic cu o concentrație de 0.5 wt% se poate observa că absorbanta rămâne constantă în jurul valorii de 0.260 pe întreg intervalul de lungimi de undă. Pentru concentrațiile de 0.75 și 1.0 wt%, valorile maxime ale absorbantei (1.465 și 3.086) sunt observate la 220 nm. Fluidul multifazic cu 0.75 și 1.0 wt% prezintă o scădere a absorbantei pe măsură ce lungimea de undă crește, datorită absorbției mai puternice la lungimi de undă scurte. Creșterea concentrației de la 0.5 la 1.0 wt% duce la o îmbunătățire semnificativă a absorbției solare a amestecului de apă+EG cu 4 g/l de CMCNa.

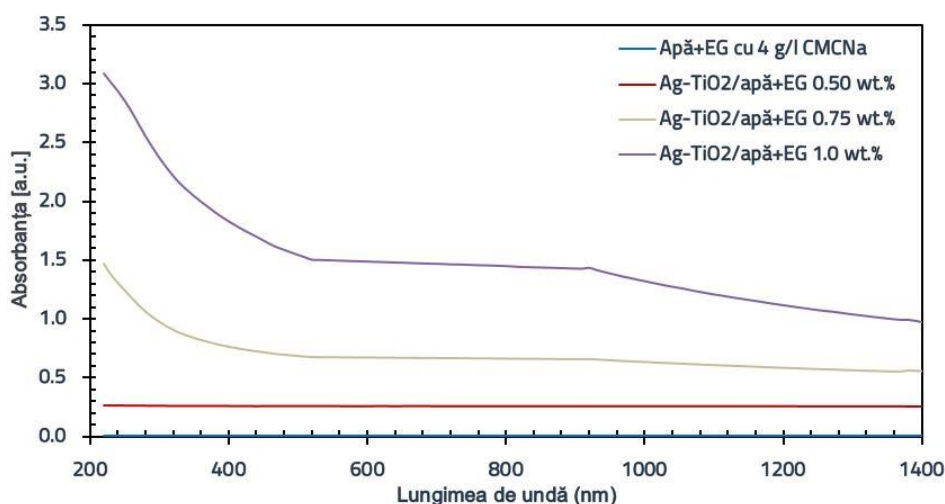


Figura 8.18. Spectrul de absorbantă al amestecului de apă+EG și al fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă+EG

De remarcat este faptul că fluidul multifazic Ag-rGO în amestec de apă cu EG cu o concentrație de 0.1 wt%, a prezentat cea mai mare absorbție în intervalul de lungimi de undă examinat, comparativ cu fluidele multifazice Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC și Ag-TiO₂, ceea ce îl face potrivit ca fluid de lucru în DASC.

8.5 Concluzii privind proprietățile optice ale fluidelor multifazice

- Rezultatele indică o creștere a absorbției fluidelor multifazice în comparație cu fluidul de bază, chiar și la concentrații foarte scăzute de nanoparticule.
- Fluidul multifazic **Ag-rGO** în apă și în amestecul de apă cu EG, la o concentrație de **0.1 wt%** a prezentat o absorbție de trei ori mai mare decât cea a fluidului de bază pentru un drum optic de 1 mm.
- Transmitanța tuturor fluidelor multifazice a scăzut semnificativ, în timp ce caracteristicile de absorbție spectrală au fost superioare celor ale fluidelor de bază.
- Fluidul multifazic **Ag-Fe₂O₃** cu o concentrație de **0.5 wt%** a înregistrat cea mai mare valoare medie a transmitanței de 65.99% în apă și 52.82% în amestecul de apă cu EG în intervalul de lungimi de undă 220-1400 nm.
- Proprietățile optice ale fluidelor multifazice sunt complexe și variate, iar înțelegerea lor este crucială pentru dezvoltarea și optimizarea aplicațiilor în domenii precum optică, energie și tehnologii de răcire.

9. CARACTERISTICILE DE CONVERSIE FOTOTERMICĂ – REZULTATE EXPERIMENTALE

În această secțiune se analizează influența concentrației, temperaturii și duratei de iradiere asupra randamentului de conversie fototermică.

Randamentul de conversie fototermică a fost determinat pentru fluidele de bază (apă și apă+EG, ambele cu 0.4, respectiv 4g/l CMCNa) și respectiv pentru fluidele multifazice (Ag-Fe₂O₃, Ag-FeC, Ag-rGO și Ag-TiO₂) cu concentrații masice diferite (0.50%, 0.75% și 1.0%), respectiv (0.05%, 0.075%, 0.1% pentru rGO) în apă și apă+EG (50:50).

9.1 Interpretarea rezultatelor

La începutul testării, imediat după pornirea simulatorului solar, fluidul de lucru a absorbit radiația solară incidentă și a transformat-o în energie termică, determinând o creștere a temperaturii sale. Temperatura lichidului a crescut rapid din cauza ritmului redus de disipare a căldurii, deoarece inițial diferența de temperatură dintre lichid și mediu este neglijabilă. Apoi viteza de creștere a temperaturii s-a redus treptat pe măsură ce diferența de temperatură a devenit din ce în ce mai mare, cu creșterea ritmului de disipare a căldurii. Procesul de mai sus poate fi numit stadiul de încălzire. Apoi temperatura a atins o valoare de echilibru la care viteza de disipare a căldurii a fost egală cu viteza de generare a căldurii. Această etapă este denumită stadiul de echilibru.

Este de remarcat că în toate cazurile temperatura fluidului crește aproape liniar cu timpul de iradiere datorită pierderii reduse de căldură [67].

Figura 9.1 prezintă creșterea temperaturii la suprafața superioară a probelor de fluide de bază (apă și apă+EG cu 0.4, respectiv 4 g/l CMCNa), precum și a fluidelor multifazice studiate, aflate în contact cu sursa de iradiere, după 65 de minute. Prezența nanoparticulelor de Ag, Fe₂O₃, FeC, rGO și TiO₂ conduce la o creștere mai mare a temperaturii în toate fluidele multifazice, comparativ cu fluidul de bază.

La același timp de iradiere (65 de minute), diferența de temperatură dintre suprafața superioară și cea inferioară a probei de fluid este ilustrată în Figura 9.2.

În Figura 9.2 se poate observa că diferența de temperatură dintre suprafața superioară și cea inferioară a probei de fluid crește odată cu concentrația de nanoparticule. Toate fluidele de lucru prezintă o creștere relativ mai mică a temperaturii la suprafața inferioară a probei, deoarece eficiența absorbției depinde de grosimea stratului de fluid [67] (26 mm în acest caz).

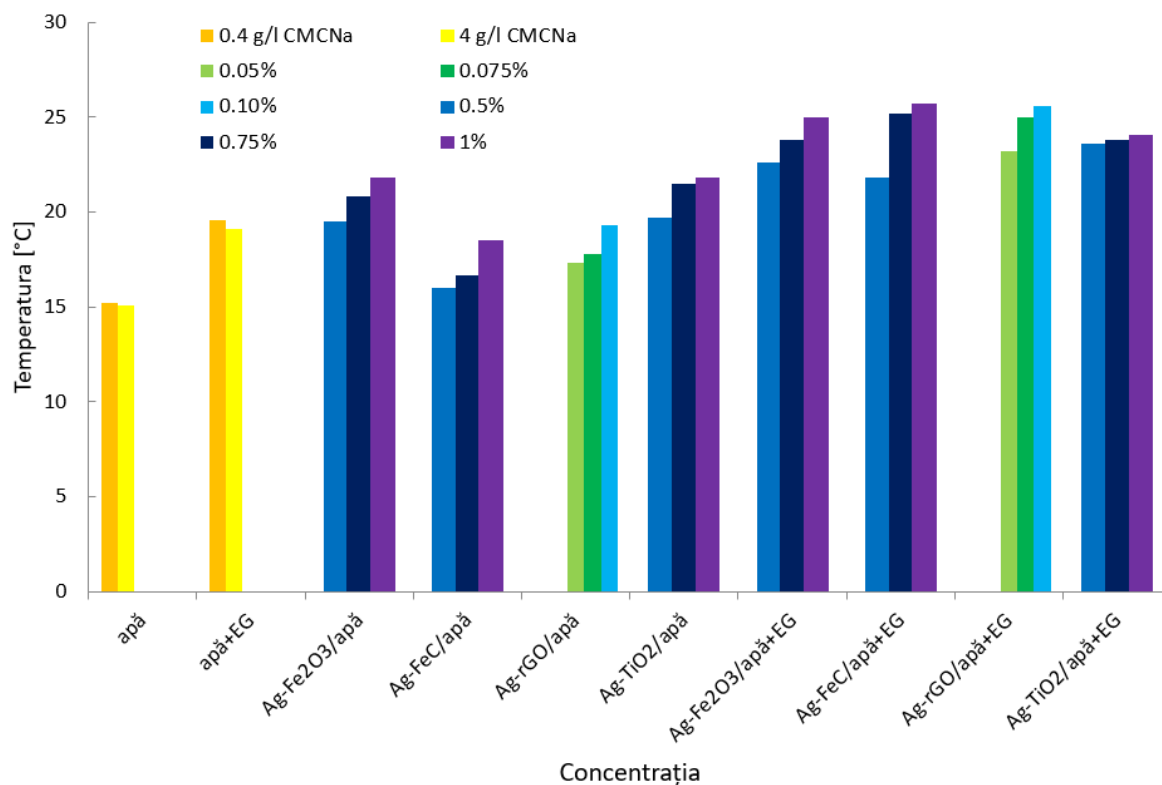


Figura 9.1. Creșterea temperaturii la suprafața superioară a probei de fluid după 65 de minute de iradiere

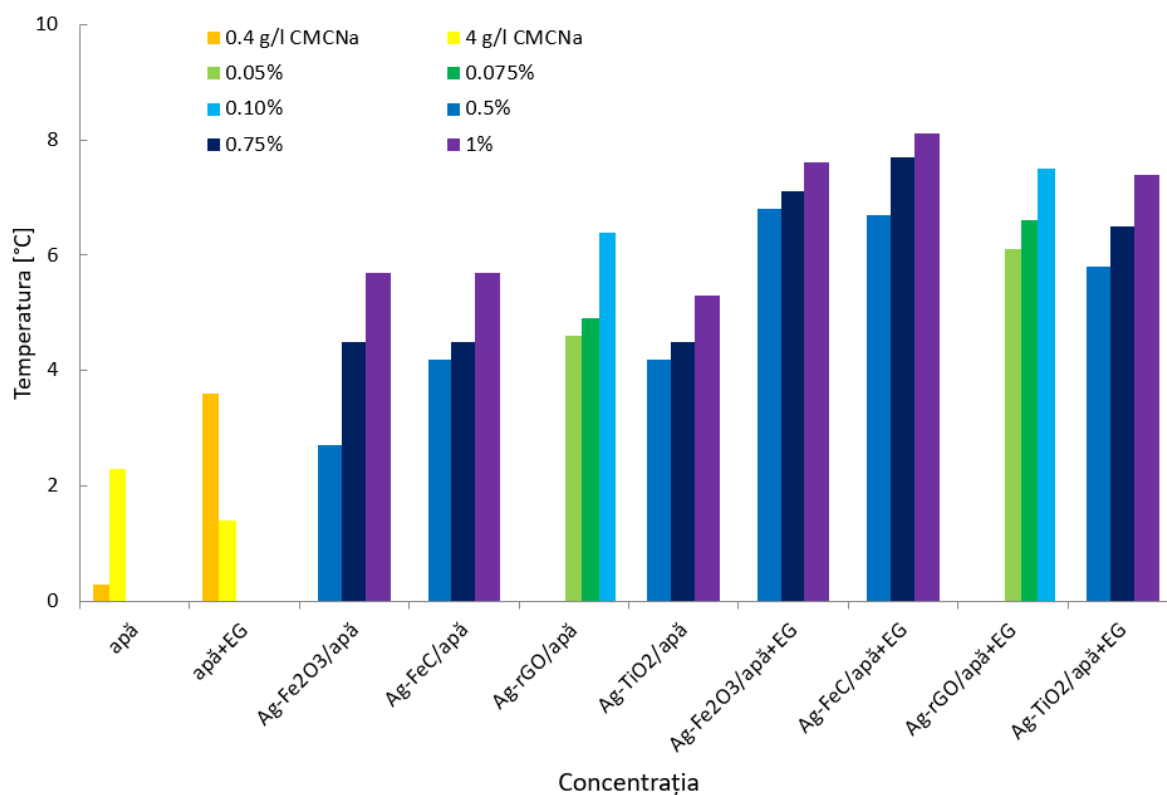


Figura 9.2. Diferența de temperatură dintre suprafața superioară și inferioară a probei de fluid după 65 de minute de iradiere

Variația temperaturii pe parcursul întregului proces de testare a fost înregistrată pentru a evalua proprietățile de conversie fototermică ale fluidelor multifazice.

Energia totală stocată de fluidul de lucru în timpul experimentului de conversie a energiei fototermice depinde de variația maximă a temperaturii, de masă și de căldura specifică a fluidului de lucru. Aceasta este exprimată astfel:

$$Q = m * c_p * (T_m - T_0) \quad (9.1)$$

unde: T_0 și T_m reprezintă temperatura inițială și temperatura medie instantanee măsurată cu două termocuple, iar m și c_p sunt masa ($m=0.075$ kg) și căldura specifică a fluidului studiat.

Pentru a determina capacitatea de conversie fototermică a fluidelor multifazice considerate, randamentul a fost calculat cu ajutorul ecuației (9.2):

$$\eta = \frac{Q}{G_s * A * \Delta\tau} \quad (9.2)$$

unde: G_s -iradierea solară (618 W/m^2), A -aria suprafeței expuse (0.00384 m^2), $\Delta\tau$ -timpul de iradiere

Randamentul fluidelor multifazice în aplicațiile termice solare depinde în mare măsură de dependența variației temperaturii cu timpul de iradiere. Caracteristicile fototermice ale fluidului de bază și ale fluidelor multifazice sunt studiate în condiții similare de iradiere solară (618 W/m^2).

9.2 Performanța de conversie fototermică a fluidelor multifazice pe bază de apă

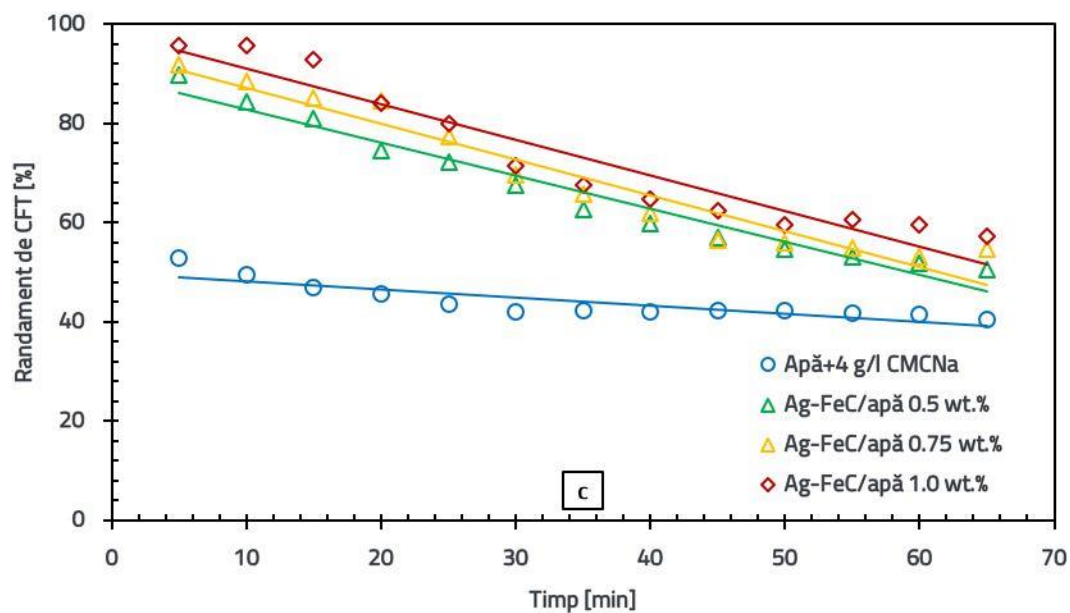
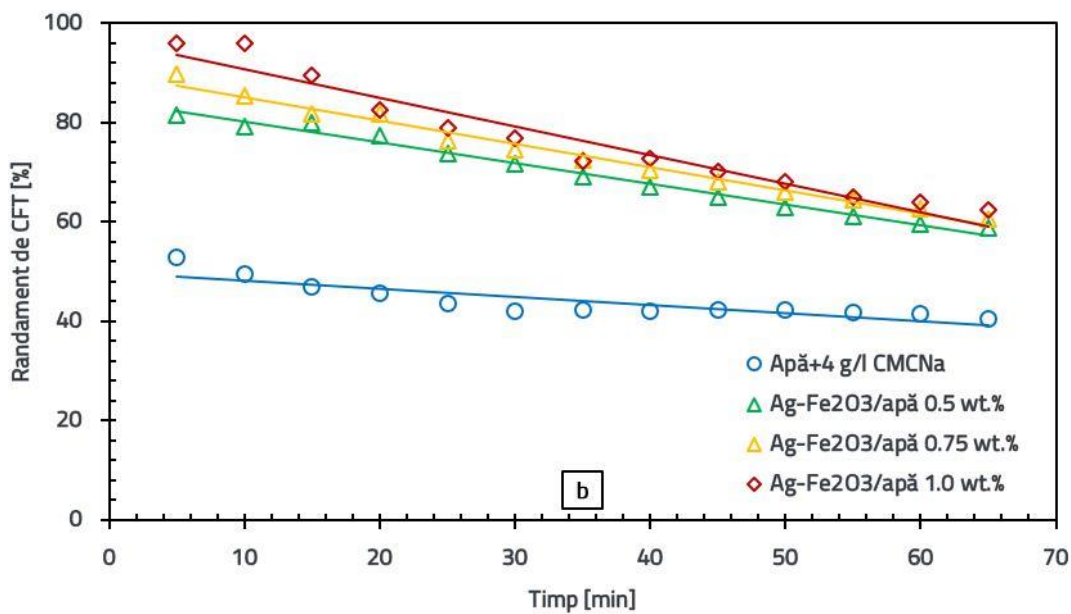
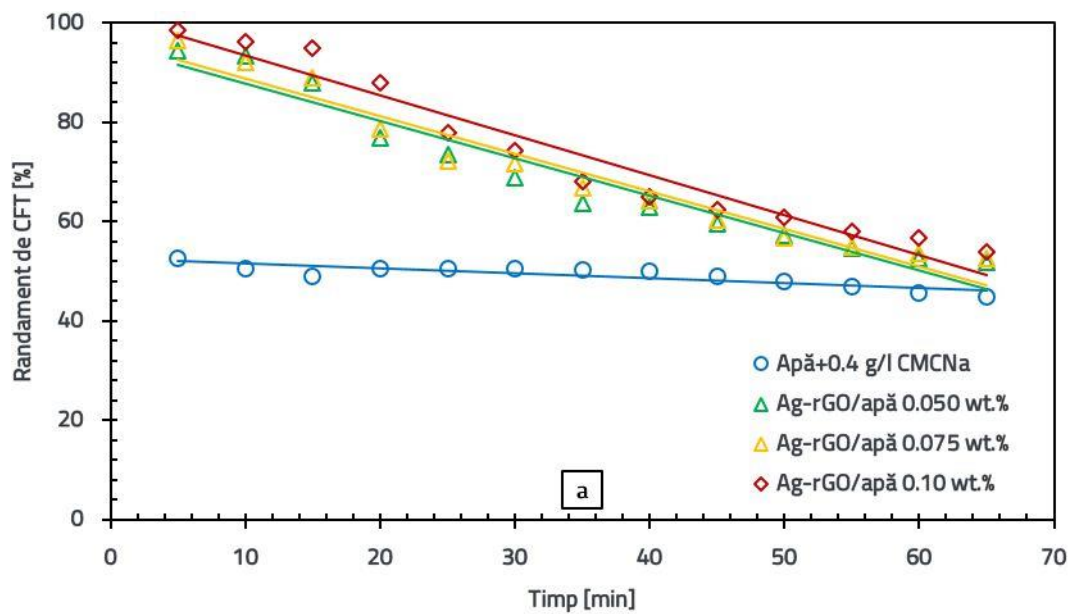
Randamentul de conversie fototermică al apei cu 0.4 și 4 g/l CMCNa și al fluidelor multifazice pe bază de apă la diferite concentrații în funcție de timpul de iradiere este prezentat în Figura 9.3. Conform graficelor din Figura 9.3, randamentul de conversie fototermică al fluidelor a scăzut odată cu timpul de iradiere și a crescut cu concentrația în toate cazurile studiate. Această scădere poate fi atribuită pierderilor crescute de căldură către mediu înconjurător pe măsură ce temperatura fluidului crește. Adăugarea de nanoparticule în fluidul de bază conduce la o îmbunătățire a randamentului de conversie fototermică în toate cazurile studiate, datorită proprietăților bune de absorbție.

În Figura 9.3 (a) este ilustrat randamentul de conversie fototermică al fluidului multifazic Ag-rGO/apă la trei concentrații de 0.050, 0.075 și 0.1 wt%, care a înregistrat o creștere de 78.91%, 82.76% și 86.72% în comparație cu fluidul de bază, după 5 minute de iradiere, iar după 65 de minute, această creștere a fost de 15.95%, 17.25% și 20.13%

Randamentul de conversie fototermică pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă este prezentat în Figura 9.3 (b). Pentru concentrațiile masice de 0.5, 0.75 și 1%, randamentul de conversie fototermică al fluidului de bază se îmbunătățește cu 54.63%, 70.18% și 81.91%, respectiv 45.30%, 50.18% și 54.58% după 5, respectiv 65 de minute de iradiere.

Randamentul de conversie fototermică al fluidului multifazic Ag-FeC/apă (Figura 9.3 (c)), pentru cele trei concentrații analizate (0.5, 0.75 și 1.0 wt%), a înregistrat creșteri de 70.23%, 74.18% și 81.24%, după 5 minute și de 25.20%, 35.34% și 41.97%, după 65 de minute, față de fluidul de bază.

Conform graficului din Figura 9.3 (d) se poate observa că randamentul de conversie fototermică pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă la trei concentrații (0.5, 0.75 și 1 wt%) a înregistrat o îmbunătățire de 65.64%, 73.21% și 81.07% în comparație cu fluidul de bază, după 5 minute de iradiere, iar după 65 de minute, îmbunătățirile au fost de 45.78%, 52.39% și 53.72%.



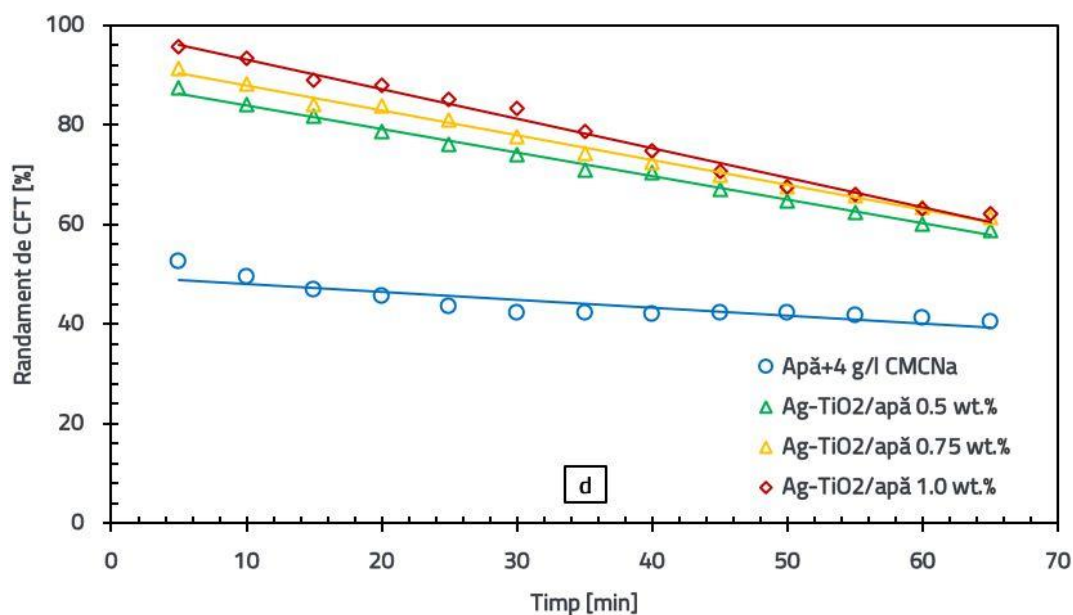


Figura 9.3. Randamentul fluidelor multifazice pe bază de apă: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂ în funcție de timpul de iradiere

Randamentul de conversie fototermică al apei cu 0.4, respectiv 4 g/l CMCNa, precum și al fluidelor multifazice pe bază de apă la diferite concentrații masice în funcție de temperatură este prezentat în Figura 9.4.

Conform graficelor din Figura 9.4, se poate observa că randamentul de conversie fototermică al tuturor fluidelor scade odată cu creșterea temperaturii și crește odată cu concentrația.

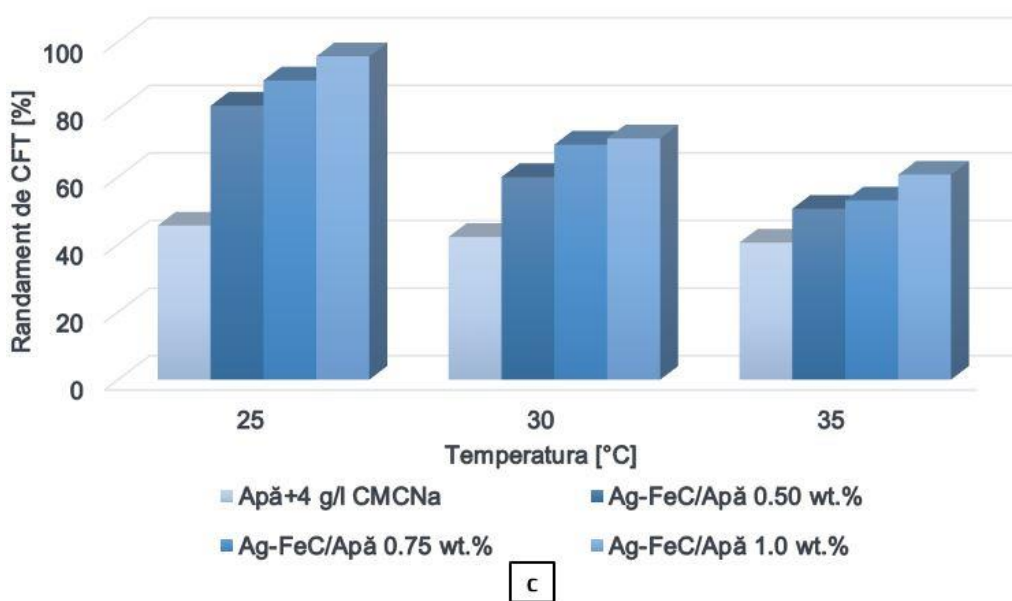
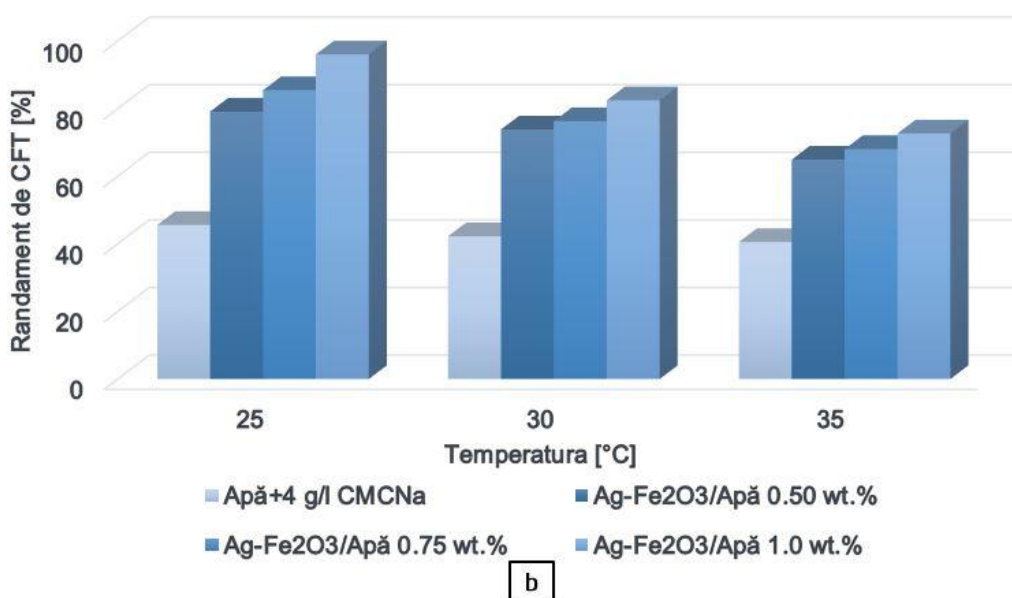
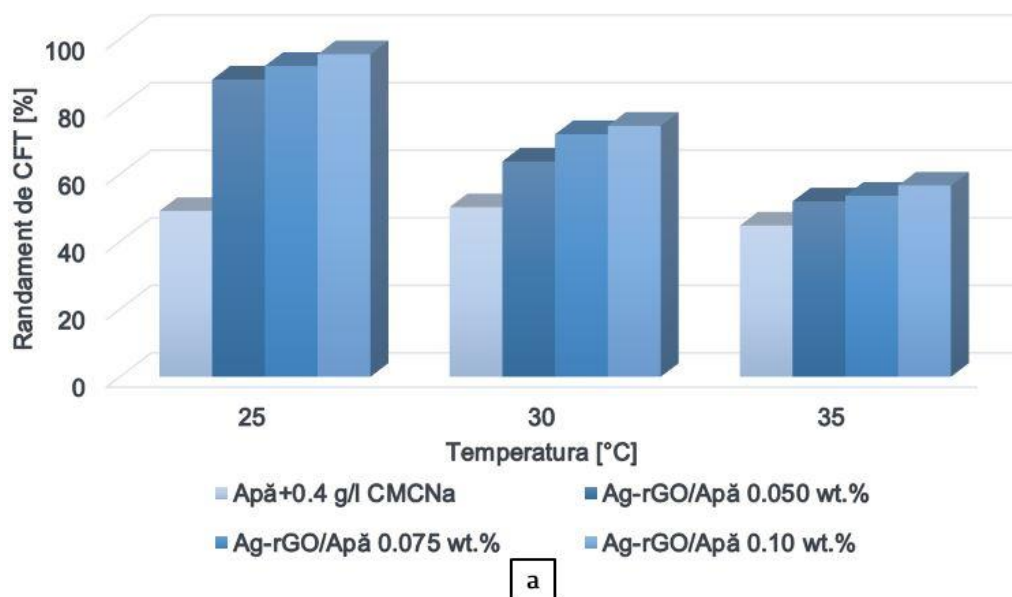
Pentru fluidul multifazic Ag-rGO/apă (Figura 9.4 (a)) la o concentrație de 0.1 wt%, randamentul maxim de conversie fototermică este de 95.50% la 25 °C și 56.64% la 35 °C [65].

În Figura 9.4 (b) se poate observa că fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă la o concentrație de 1.0 wt%, atinge o valoare maximă a randamentului de conversie fototermică de 96.05%, respectiv 72.69% la 25 °C, respectiv 35 °C.

Pentru o concentrație de 1.0 wt%, randamentul de conversie fototermică al fluidului multifazic Ag-FeC/apă (ilustrat în Figura 9.4 (c)) este de 95.70% la 25 °C și 57.35% la 35 °C.

Conform graficului din Figura 9.4 (d) se poate observa că randamentul de conversie fototermică pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă la o concentrație de 1 wt% atinge o valoare maximă de 89.08% la 25 °C și 70.77% la 35 °C.

Deoarece pierderea de căldură prin convecție a probei crește treptat odată cu creșterea temperaturii, randamentul de conversie fototermică al tuturor fluidelor scade, ceea ce arată că pierderea de căldură este factorul cheie în îmbunătățirea proprietăților fototermice.



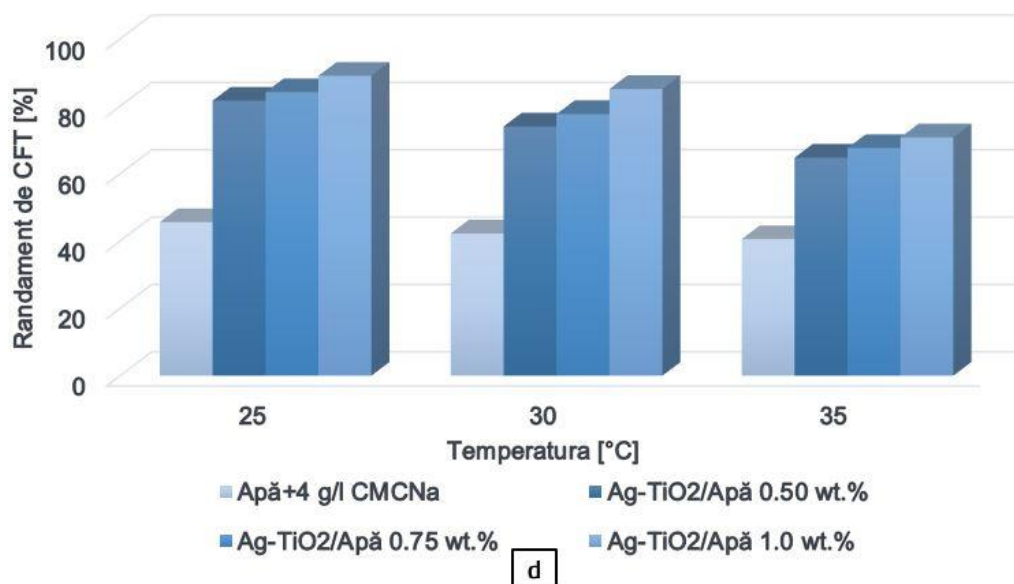


Figura 9.4. Variația randamentului cu temperatura pentru fluidele multifazice pe bază de apă:
 a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

9.3 Performanța de conversie fototermică a fluidelor multifazice pe bază de apă+EG

Figura 9.5 prezintă randamentul de conversie fototermică al amestecului de apă+EG cu 0.4 și 4 g/l CMCNa și al fluidelor multifazice pe bază de apă+EG, la diferite concentrații în funcție de timp de iradiere. După cum se poate observa în Figura 9.5, randamentul de conversie fototermică al tuturor fluidelor multifazice este mai mare decât al fluidului de bază. Acesta a înregistrat o scădere pe durata expunerii la lumină și a crescut proporțional cu concentrația de nanoparticule.

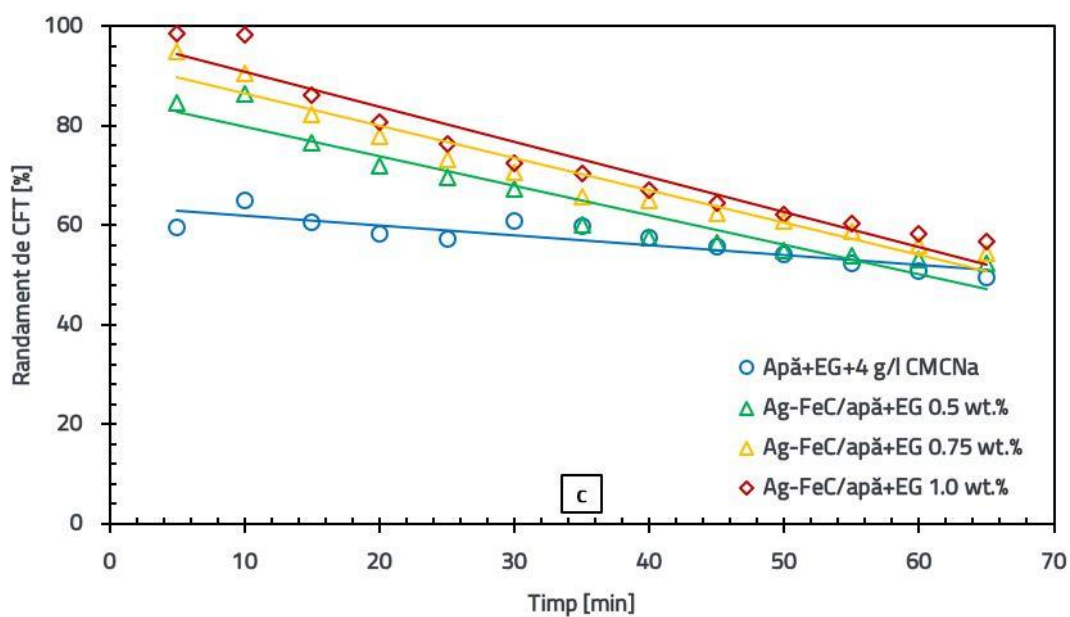
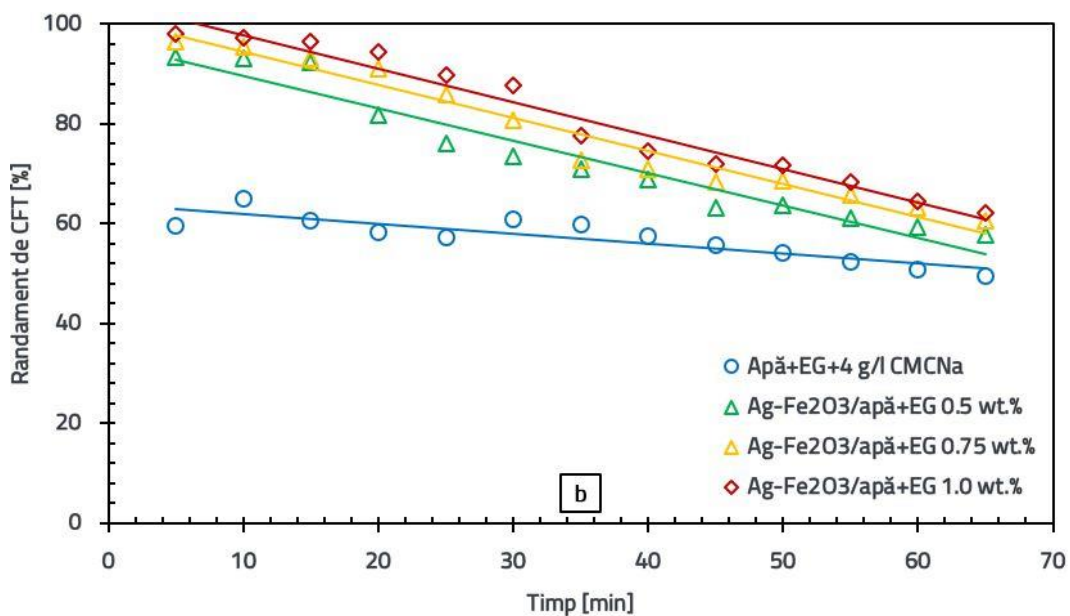
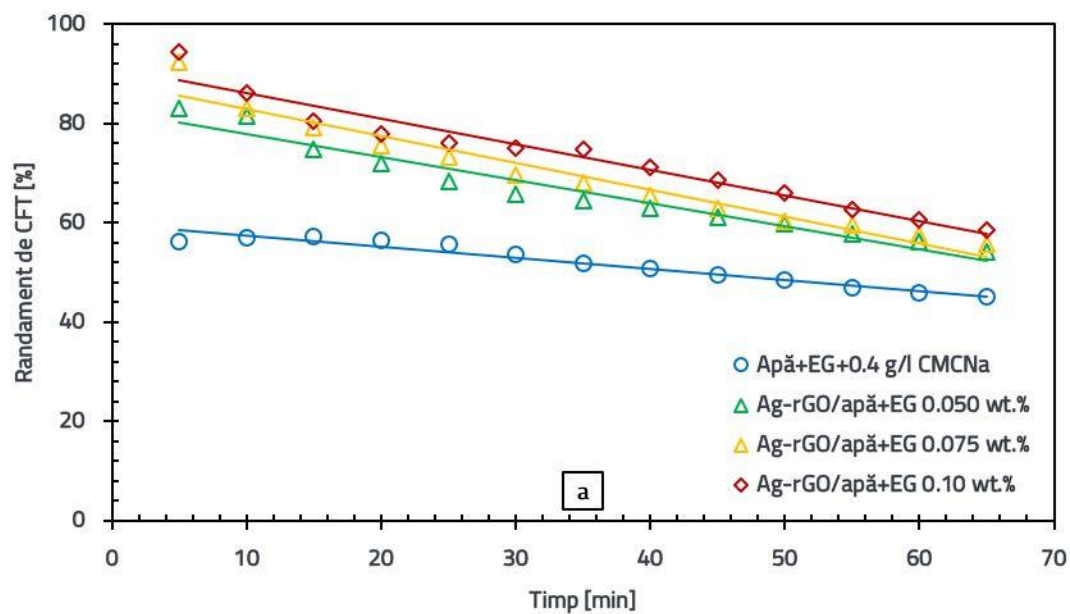
În Figura 9.5 (a) este prezentat randamentul de conversie fototermică al fluidului multifazic Ag-rGO/apă+EG la concentrațiile de 0.050, 0.075 și 0.1 wt%, care a înregistrat o creștere de 48.11%, 64.27% și 68.03%, după 5 minute, iar după 65 de minute, această creștere a fost de 20.29%, 23.37% și 29.93%, în comparație cu fluidul de bază (apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa).

În cazul fluidului multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG (Figura 9.5 (b)), creșterile sunt de 56.29%, 61.77% și 64.34%, după 5 minute, respectiv 16.83%, 22.46% și 25.51%, după 65 de minute, pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%, comparativ cu fluidul de bază (apă+EG cu 4 g/l CMCNa).

Randamentul de conversie fototermică al fluidului multifazic Ag-FeC/apă+EG (Figura 9.5 (c)) la concentrațiile analizate (0.5, 0.75 și 1.0 wt%), a înregistrat creșteri de 41.93%, 59.15% și 65.34%, după 5 minute și de 5.75%, 9.74% și 14.46%, după 65 de minute.

Pentru fluidul multifazic Ag-TiO₂/apă+EG (Figura 9.5 (d)), s-au observat îmbunătățiri de 50.63%, 59.01% și 61.71%, după 5 minute și de 17.68%, 20.36% și 24.82%, după 65 de minute, pentru concentrațiile de 0.5, 0.75 și 1.0 wt%.

Se poate considera ca și în cazul fluidelor multifazice pe bază de apă că principalul motiv pentru scăderea randamentului de conversie a energiei fototermice odată cu timpul de iradiere este creșterea pierderilor de căldură din cauza creșterii diferenței de temperatură dintre fluidul de lucru și mediul ambiant.



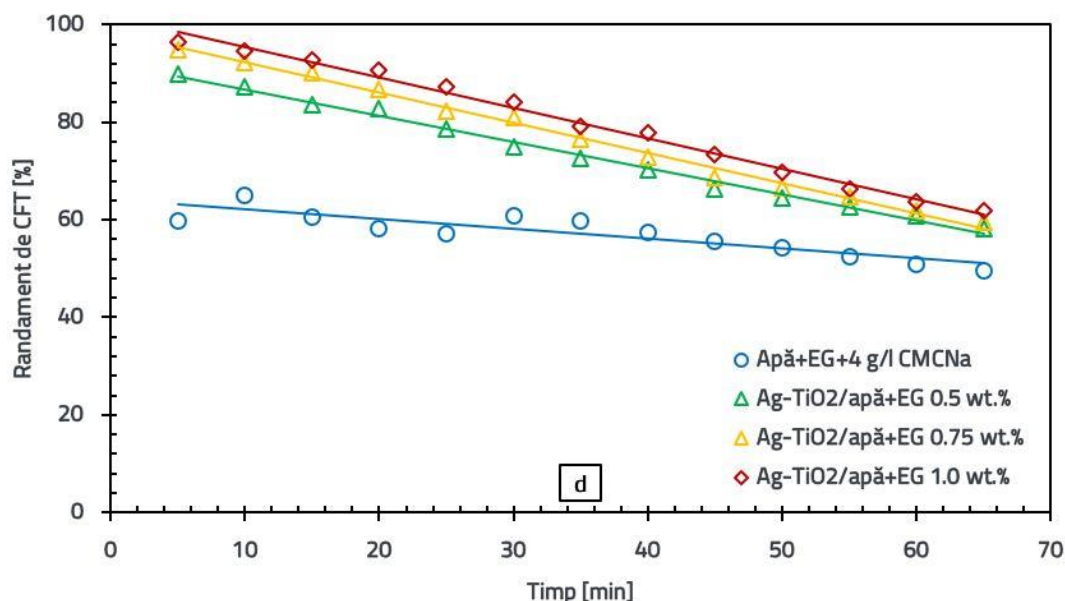
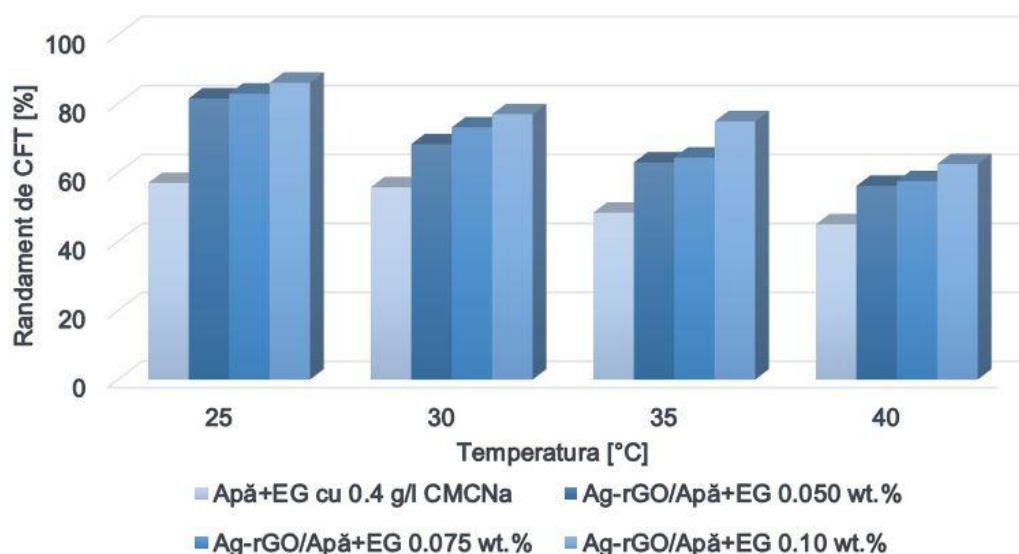


Figura 9.5. Randamentul fluidelor multifazice pe bază de apă+EG: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂ în funcție de timpul de iradiere

Randamentul de conversie fototermică al amestecului de apă+EG cu 0.4 și 4 g/l CMCNa și al fluidelor multifazice pe bază de apă+EG la diferite concentrații în funcție de temperatură este prezentat în Figura 9.6. În Figura 9.6 (a) se poate observa că fluidul multifazic Ag-rGO/apă+EG la o concentrație de 0.1 wt% prezintă o valoare maximă a randamentului la 25 și 40 °C de 86.12%, respectiv 62.57% [65]. Pentru fluidul multifazic Ag-Fe₂O₃/apă+EG (Figura 9.6 (b)) la o concentrație de 1.0 wt%, randamentul maxim este de 97.24% la 25 °C și 71.60% la 40 °C. În graficul din Figura 9.6 (c) se poate observa că randamentul pentru Ag-FeC/apă+EG la o concentrație de 1.0 wt% atinge o valoare maximă de 98.35% la 25 °C și 58.29% la 40 °C. Pentru o concentrație de 1.0 wt%, randamentul fluidului multifazic Ag-TiO₂/apă+EG (ilustrat în Figura 9.6 (d)) este de 94.47% la 25 °C și 69.59% la 40 °C.

Toate fluidele multifazice au un randament de conversie fototermică mai mare decât fluidul de bază la aceleași temperaturi, indicând astfel proprietăți îmbunătățite în procesul de conversie fototermică.



a

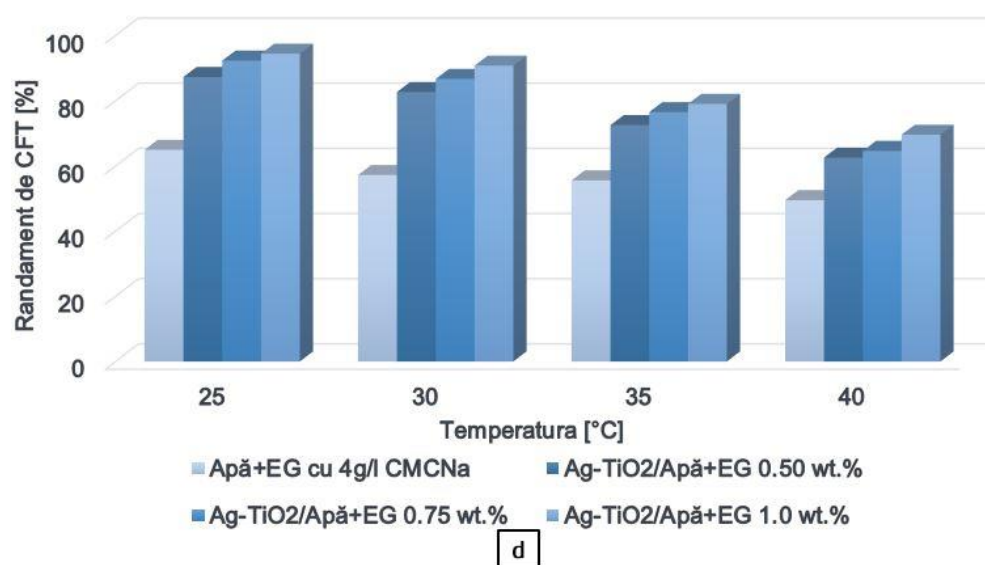
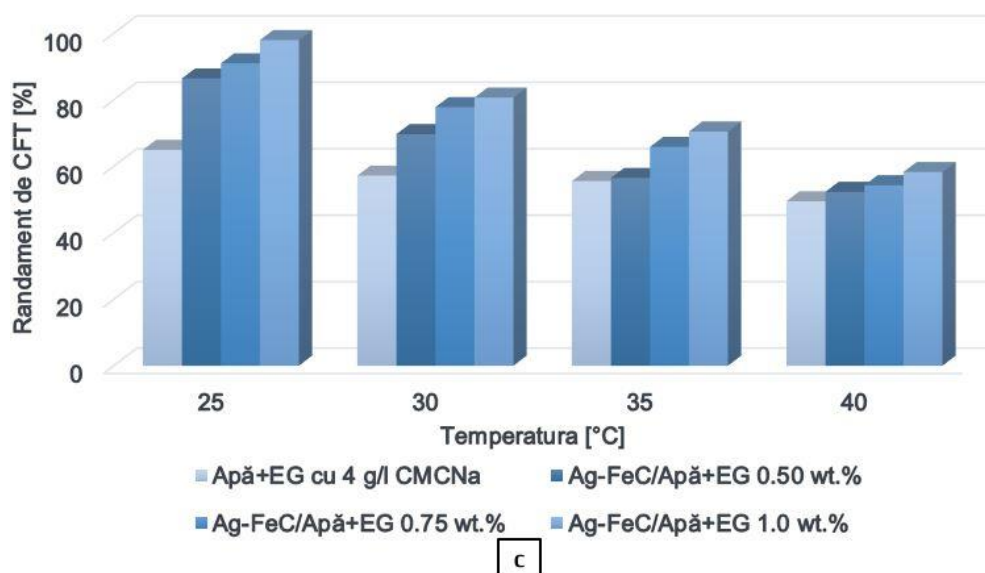
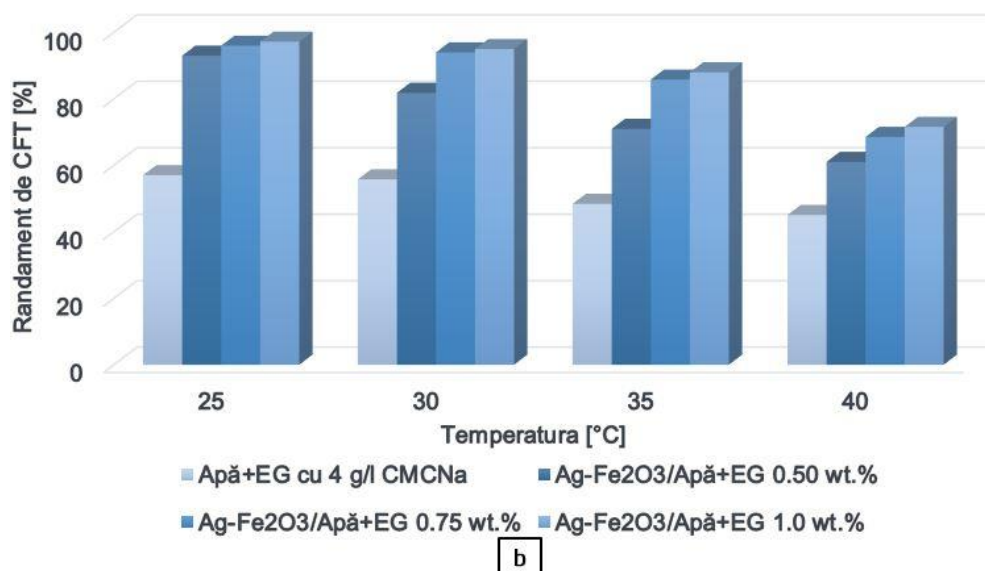


Figura 9.6. Variația randamentului cu temperatura pentru fluidele multifazice pe bază de apă+EG: a) Ag-rGO; b) Ag-Fe₂O₃; c) Ag-FeC; d) Ag-TiO₂

9.4 Concluzii privind caracteristicile de conversie fototermică ale fluidelor multifazice

S-au efectuat măsurători pentru determinarea randamentului de conversie fototermică pentru apă, amestecul de apă+EG (50:50) şi pentru fluidele multifazice Ag-rGO/apă, Ag-rGO/apă+EG, Ag-Fe₂O₃/apă, Ag-Fe₂O₃/apă+EG, Ag-FeC/apă, Ag-FeC/apă+EG, Ag-TiO₂/apă, Ag-TiO₂/apă+EG la trei concentraţii masice (0.50, 0.75 şi 1.0%), respectiv (0.05, 0.075 şi 0.1% pentru Ag-rGO), în intervalul de timp 5-65 min. Rezultatele privind caracteristicile de conversie fototermică ale fluidelor multifazice pot fi rezumate după cum urmează:

- Pe măsură ce concentraţia masică a crescut, fluidele multifazice au prezentat un randament de conversie fototermică mai ridicat. Randamentul maxim de conversie fototermică de 98.5%, a fost obţinut pentru fluidul multifazic **Ag-rGO/apă** la o concentraţie de **0.1 wt%**, după 5 minute, fiind cu 86.72% mai mare decât cel al apei cu 0.4 g/l CMCNa.
- Fluidul multifazic **Ag-Fe₂O₃/apă** cu o concentraţie de **1 wt%** a atins un randament de conversie fototermică de 96.05%, după 5 de minute, care a fost cu 81.91% mai mare decât cel al fluidului de bază (apă cu 4 g/l CMCNa).
- Fluidul multifazic **Ag-rGO** în apă+EG cu 0.4 g/l CMCNa, la o concentraţie de **0.1 wt%**, a înregistrat un randament maxim de conversie fototermică de 94.4%, după 5 minute, cu 68.03% mai mare decât cel al fluidului de bază.
- În cazul fluidelor pe bază de apă+EG cu 4 g/l CMCNa, **Ag-FeC/apă+EG** cu **1.0 wt%** a atins cel mai mare randament de conversie fototermică de 98.69%, după 5 minute, care a fost cu 65.34% mai mare decât cel al fluidului de bază.

10. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE

Teza de doctorat a abordat ca temă principală creșterea eficienței colectoarelor solare prin utilizarea fluidelor multifazice. În acest scop, a fost efectuat un studiu experimental detaliat, în cadrul căruia au fost evaluate proprietățile termofizice, optice și capacitatea de conversie fototermică a acestor fluide. Obiectivul principal al tezei a fost dezvoltarea unor noi tipuri de fluide multifazice care să contribuie la îmbunătățirea eficienței energetice a colectoarelor solare cu absorbție directă.

Fluidele multifazice reprezintă o inovație în domeniul cercetării la nivel național, fiind un subiect relativ nou și în plină expansiune la nivel internațional. În România, studiile pe tema fluidelor multifazice sunt încă la început, ceea ce subliniază caracterul inovator al acestei lucrări. Această cercetare reprezintă un pas important în consolidarea bazei de cunoștințe privind fluidele multifazice, fiind printre primele de acest fel desfășurate pe plan național.

Abordarea acestui subiect implică integrarea unor elemente din ingineria materialelor, chimie și fizică. Cercetările au fost realizate atât din perspectivă teoretică, cât și experimentală, având ca scop analiza detaliată a caracteristicilor acestor fluide. Rezultatele obținute au evidențiat potențialul fluidelor multifazice de a aduce îmbunătățiri semnificative în eficiența energetică, acestea fiind potrivite pentru aplicații în industria energetică.

Lucrarea îmbină o revizuire detaliată a literaturii de specialitate cu rezultatele cercetărilor proprii. Rezultatele prezentate în această teză de doctorat au fost obținute în cadrul proiectului PN-III-P4-ID-PCE-2020-0353, CNCS-UEFISCDI, coordonat de d-na prof. Dr. habil. ing. Gabriela Huminic și au fost publicate în reviste de prestigiu, conform Anexei 1. Astfel, activitatea de cercetare a fost concretizată prin publicarea a 7 articole în reviste cu factor de impact mai mare de 4, precum și prin prezentarea a 2 lucrări la conferințe naționale și internaționale.

Principalele concluzii ale tezei de doctorat sunt:

În ceea ce privește proprietățile termofizice ale fluidelor multifazice se poate concluziona că pentru cele trei concentrații de nanoparticule adăugate în fluidele de bază (apă și apă+EG), s-au înregistrat următoarele creșteri ale conductivității termice ale fluidelor multifazice:

- 6.14-10.69 % pentru Ag-rGO/apă; 9.12-13.02 % pentru Ag-rGO/apă+EG;
- 1.10-3.38 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă; 1.56-4.70 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă+EG;
- 6.61-8.92 % pentru Ag-FeC/apă; 2.23-5.89 % pentru Ag-FeC/apă+EG;
- 3.84-8.10 % pentru Ag-TiO₂/apă; 2.06-5.51 % pentru Ag-TiO₂/apă+EG;

Pentru vâscozitatea dinamică a fluidelor multifazice studiate, s-au înregistrat următoarele creșteri:

- 0.29-18.77 % pentru Ag-rGO/apă; 62.43-141.56 % pentru Ag-rGO/apă+EG;
- 13.43-39 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă; 3.64-13.65 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă+EG;
- 8.44-16.34 % pentru Ag-FeC/apă; 7.16-18.08 % pentru Ag-FeC/apă+EG;
- 9.75-23.26 % pentru Ag-TiO₂/apă; 7.54-19.14 % pentru Ag-TiO₂/apă+EG;

Pentru densitatea fluidelor multifazice, s-au înregistrat următoarele creșteri:

- 0.1-0.4 % pentru Ag-rGO/apă; 5.22-5.99 % pentru Ag-rGO/apă+EG;
- 0.1-0.9 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă; 1.34-1.99 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă+EG;

- 0.2–1.01 % pentru Ag-FeC/apă; 1.14–1.98 % pentru Ag-FeC/apă+EG;
- 0.4–1.2 % pentru Ag-TiO₂/apă; 1.15–2.18 % pentru Ag-TiO₂/apă+EG;

Pentru tensiunea superficială a fluidelor multifazice, s-au înregistrat următoarele scăderi/creşteri:

- Ag-rGO/apă: La 0.05 şi 0.075 wt%, a scăzut cu 5.00% şi 3.38%. La 0.1 wt%, a crescut cu 5.01%.
- Ag-rGO/apă+EG: A crescut cu 8.12%, 8.82%, şi 9.37% pentru 0.05, 0.075 şi 0.1 wt%.
- Ag-Fe₂O₃/apă: La 0.5, 0.75 şi 1.0 wt%, a scăzut cu 11.95%, 10.02% şi 8.74%.
- Ag-Fe₂O₃/apă+EG: La 0.5 wt%, a scăzut cu 1.06%, iar la 0.75 şi 1.0 wt% a crescut cu 1.25% şi 4.73%.
- Ag-FeC/apă: La 0.5 wt%, a scăzut cu 5.79%, iar la 0.75 şi 1.0 wt% a crescut cu 9.81% şi 14.14%.
- Ag-FeC/apă+EG: A crescut cu 11.63%, 12.25% şi 12.49% pentru 0.5, 0.75 şi 1.0 wt%.
- Ag-TiO₂/apă: La 0.5 wt%, a scăzut cu 9.32%, iar la 0.75 şi 1.0 wt% a crescut cu 4.62% şi 15.85%.
- Ag-TiO₂/apă+EG: A scăzut cu 8.10%, 4.50% şi 1.65% pentru 0.5, 0.75 şi 1.0 wt%.

Pentru căldura specifică a fluidelor multifazice, s-au înregistrat următoarele scăderi:

- 0.01–0.72 % pentru Ag-rGO/apă; 4.97–5.67 % pentru Ag-rGO/apă+EG;
- 0.02–0.93 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă; 1.33–1.96 % pentru Ag-Fe₂O₃/apă+EG;
- 0.21–1.02 % pentru Ag-FeC/apă; 1.13–1.96 % pentru Ag-FeC/apă+EG;
- 0.43–1.24 % pentru Ag-TiO₂/apă; 1.16–2.17 % pentru Ag-TiO₂/apă+EG;

Referitor la proprietăţile optice ale fluidelor multifazice se poate concluziona că fluidul multifazic Ag-rGO a prezentat cele mai bune proprietăţi optice comparativ cu celelalte fluide multifazice studiate. Acesta a prezentat o absorbţie de trei ori mai mare decât fluidul de bază, chiar şi la o concentraţie scăzută de 0.1 wt%, atât în apă, cât şi în amestecul de apă cu EG, pentru un drum optic de 1 mm. După adăugarea nanoparticulelor, transmitanţa fluidului multifazic Ag-rGO a scăzut semnificativ, iar coeficientul mediu de extincţie a atins valoarea maximă de 179.93 cm⁻¹ în apă şi 178.70 cm⁻¹ în apă+EG, la concentraţia de 0.1 wt%. Prin urmare, acest fluid multifazic s-a evidenţiat ca având cele mai bune proprietăţi optice pentru aplicaţii în optică şi energie, în comparaţie cu celelalte fluide multifazice analizate.

În ceea ce priveşte proprietăţile de conversie fototermică:

Dintre toate fluidele multifazice studiate, fluidul multifazic Ag-rGO/apă a arătat cea mai bună performanţă, obţinând un randament maxim de conversie fototermică de 98.5% la o concentraţie de 0.1 wt%. Acest rezultat remarcabil a fost atins în doar 5 minute, fiind cu 86.72% mai mare decât randamentul obţinut pentru apă cu 0.4 g/l CMCNa. Prin urmare, Ag-rGO s-a evidenţiat ca cel mai eficient fluid multifazic în ceea ce priveşte conversia fototermică, în comparaţie cu celelalte fluide multifazice analizate.

Pe baza rezultatelor experimentale obţinute, se poate concluziona că fluidul multifazic Ag-rGO/apă, la o concentraţie de 0.1 wt%, a prezentat cele mai bune performanţe dintre toate fluidele multifazice analizate. Acest fluid multifazic a excelat în toate aspectele esenţiale, atât din punct de vedere al proprietăţilor termofizice şi optice, cât şi al celor de conversie fototermică, prezentând un comportament mai bun în comparaţie cu celelalte fluide multifazice studiate.

Având în vedere aceste rezultate, fluidul multifazic Ag-rGO/apă s-a conturat ca o soluție viabilă pentru utilizarea în colectoare solare cu absorbție directă, datorită proprietăților sale termice, optice și de conversie fototermică îmbunătățite.

Contribuțiile personale:

- În cadrul acestei cercetări, au fost studiate în premieră la nivel internațional 8 tipuri de fluide multifazice, care combină argint (Ag) cu oxid de grafen redus (rGO), oxid de fier (Fe_2O_3), carbură de fier (FeC) și dioxid de titan (TiO_2), la trei concentrații diferite (0.5, 0.75 și 1.0 wt%, respectiv 0.05, 0.075 și 0.1 wt% pentru Ag-rGO). Acestea au fost dispersate atât în apă, cât și într-un amestec de apă cu EG în proporție de 50:50.
- Au fost dezvoltate tehnicile experimentale de caracterizare a proprietăților termofizice ale fluidelor multifazice pe bază de argint. A fost elaborată o bază de date detaliată, care include parametri termofizici precum conductivitatea termică, vâscozitatea dinamică, densitatea, tensiunea superficială și căldura specifică.
- Au fost dezvoltate ecuații care descriu dependența conductivității termice, vâscozității dinamice, densității și tensiunii superficiale de temperatură și de concentrația masică a nanoparticulelor.
- Au fost dezvoltate tehnicile experimentale de caracterizare a proprietăților optice ale fluidelor multifazice. A fost elaborată o bază de date care include proprietăți optice esențiale, precum transmitanța, absorbanta spectrală și coeficienții de extincție.
- A fost realizată o evaluare detaliată a capacității de conversie fototermică a fluidelor multifazice, cu scopul de a înțelege și valorifica potențialul acestora în aplicații solare. Analiza a urmărit măsurarea și optimizarea modului în care fluidele multifazice transformă energia luminoasă în energie termică, precum și creșterea randamentului sistemelor solare.

Posibilele **direcții de cercetare** rezultate din această teză sunt următoarele:

- Intensificarea cercetărilor pentru dezvoltarea fluidelor multifazice cu proprietăți îmbunătățite (în special prin creșterea conductivității termice și reducerea vâscozității), astfel încât acestea să poată fi utilizate eficient în DASC-uri.
- Analizarea impactului compoziției și concentrației fluidelor multifazice asupra performanței colectoarelor solare cu absorbție directă, în condiții reale de funcționare.
- Dezvoltarea unor modele teoretice și simulări numerice pentru predicția comportamentului termic al fluidelor multifazice în DASC, cu scopul de a optimiza proiectarea acestor sisteme și de a crește eficiența energetică generală.
- Investigarea potențialului de integrare a fluidelor multifazice în alte sisteme de energie regenerabilă, precum și extinderea cercetării către noi fluide de bază sau surfactanți care pot îmbunătăți caracteristicile acestora.
- Analiza efectelor ecologice ale fluidelor multifazice în sistemele DASC, prin evaluarea potențialelor consecințe asupra mediului și crearea unor soluții sustenabile care să minimizeze consumul de resurse naturale și emisiile de carbon.

Bibliografie

- [1] S. Choi, J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Asme Fed*, 66 (1995), pp. 99-105.
- [2] S. Kakac, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52 (2009), pp. 3187-3196.
- [3] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21 (2000), pp. 58-64.
- [4] R.P. Feynman, "There's plenty of room at the bottom" at California institute of technology, *Caltech Eng. Sci.*, 23 (1959), pp. 22-36.
- [5] G. Huminic, A. Huminic, F. Dumitrache, C. Fleacă, I. Morjan, Study of the thermal conductivity of hybrid nanofluids: recent research and experimental study, *Powder Technol.*, 367 (2020), pp. 347-357.
- [6] P.K. Nagarajan, J. Subramani, S. Suyambazhahan, R. Sathyamurthy, Nanofluids for solar collector applications: a review, *Energy Proc.*, 61 (2014), pp. 2416-2434.
- [7] P. Alphonse, K. Muthukumarasamy, S. Elumalai, M. Kadamban, R. Dhairiyasamy, Optimization of heat transfer in heat pipes using nanofluids at various inclinations and filling levels, *Case Stud. Therm. Eng.*, 65 (2024), Article 105624.
- [8] R. Jibhakate, N. Nirwan, Y. Nandanwar, K.S. Rambhad, Thermal analysis of hybrid nanofluid flowing inside the automobile radiator, *Mater. Today.: Proc.*, Available online 29 June 2023.
- [9] H. Mehrarad, M.R.S. Emami, K. Afsari, Thermal performance and flow analysis in a brazed plate heat exchanger using MWCNT@ water/EG nanofluid, *Int. Communicat. Heat Mass Transfer.*, 146 (2023), Article 106867.
- [10] Y. Jia, G. Alva, G. Fang, Development and applications of photovoltaic-thermal systems: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 102 (2019), pp. 249-265.
- [11] Y.A. Cengel, A.J. Ghajar, "Introduction and basic concept" in *Heat and Mass Transfer Fundamental and Applications* (5th ed.), McGraw-Hill Education, New York, NY, USA (2015), pp. 7-10.
- [12] F. Selimefendigil, D. Okulu, H.F. Oztop, Application of ternary nanofluid and rotating cylinders in the cooling system of photovoltaic/thermoelectric generator coupled module and computational cost reduction, *Appl. Therm. Eng.*, 250 (2024), Article 123436.
- [13] Y.A. Cengel and J.M. Cimbala, Properties of fluids, in *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill (2014), pp. 37-73.
- [14] Y.A. Cengel, M.A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach* (fourth ed.), McGraw-Hill (2002)
- [15] A.W. Adamson, A.P. Gast, *Physical Chemistry of Surfaces*, Interscience Publishers, New York (1967), p. 150
- [16] A. Aziz, A. Agha, S. Anwer, E. Abu-Nada, A. Alazzam, Numerical and experimental investigation of optimized triangular microchannels using mxene-based nanofluids for enhanced microfluidic thermal performance, *Int. J. Thermofluids*, 26 (2025), Article 101074.
- [17] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley and Sons, New York, NY, USA (1996).

- [18] F. Ren, Q. Li, P. Wang, Optimizing heat transfer in phase change thermal energy storage systems: A bionic method using alveolar vessel fins and nanofluids, *Appl. Therm. Eng.*, 266 (2025), Article 125668.
- [19] T.P. Otanicar, P.E. Phelan, J.S. Golden, Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems, *Sol. Energy*, 83 (2009), pp. 969–977.
- [20] N. Brekke, J. Dale, D. DeJarnette, P. Hari, M. Orosz, K. Roberts, E. Tunkara, T. Otanicar, Detailed performance model of a hybrid photovoltaic/thermal system utilizing selective spectral nanofluid absorption, *Renew. Energy*, 123 (2018), pp. 683–693.
- [21] R. Taylor, T. Otanicar, Y. Herukerrupu, F. Bremond, G. Rosengarten, E. Hawkes, X. Jiang, S. Coulombe, Feasibility of nanofluid-based optical filters, *Appl. Opt.*, 52 (7) (2013), pp. 1413–1422.
- [22] Z. Meng, D. Wu, L. Wang, H. Zhu, Q. Li, Carbon nanotube glycol nanofluids: photo-thermal properties, thermal conductivities and rheological behavior, *Particuology*, 10 (2012), pp. 614–618.
- [23] P.G. Kumar, V. Kumaresan, R. Velraj, Stability, viscosity, thermal conductivity, and electrical conductivity enhancement of multi-walled carbon nanotube nanofluid using gum Arabic, *Fullerene Sci. Technol.*, 25 (2017), pp. 230–240.
- [24] A. Karthikeyan, S. Coulombe, A.M. Kietzig, Wetting behavior of multi-walled carbon nanotube nanofluids, *Nanotechnology*, 28 (2017), Article 105706.
- [25] L. Wang, M. Wu, D. Wu, C. Zhang, Q. Zhu, H. Zhu, Optical absorption and photo-thermal conversion properties of CuO/H₂O nanofluids, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 15 (2015), pp. 3178–3181.
- [26] M.U. Sajid, H.M. Ali, Thermal conductivity of hybrid nanofluids: a critical review, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 126 (2018), pp. 211–234.
- [27] J. Sarkar, P. Ghosh, A. Adil, A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 43 (2015), pp. 164–177.
- [28] N.A.C. Sidik, I.M. Adamu, M.M. Jamil, G.H.R. Kefayati, G. Najafi, Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: a comprehensive review, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 78 (2016), pp. 68–79.
- [29] J. Qu, R. Zhang, Z. Wang, Q. Wang, Photo-thermal conversion properties of hybrid CuO-MWCNT/H₂O nanofluids for direct solar thermal energy harvest, *Appl. Therm. Eng.*, 147 (2019), pp. 390–398.
- [30] J.E. Minardi, H.N. Chuang, Performance of a “black” liquid flat-plate solar collector, *Sol. Energy*, 17 (1975), pp. 179–183.
- [31] NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP), <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm> (2007) (accessed on 22 November 2024).
- [32] ASHRAE Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Engineers Inc., Atlanta, GA (2017).
- [33] A. Vărdaru, G. Humnic, A. Humnic, C. Fleaca, F. Dumitrache, I. Morjan, Aqueous hybrid nanofluids containing silver-reduced graphene oxide for improving thermo-physical properties, *Diam. Relat. Mater.*, 132 (2023), Article 109688.
- [34] G. Humnic, A. Humnic, A. Vărdaru, F. Dumitrache, C. Fleacă, Experimental investigation on Ag NPs-rGO-water/ethylene-glycol hybrid nanofluids used in solar applications, *Diam. Relat. Mater.*, 143 (2024), Article 110851.

- [35] M. Chereches, A. Vărdaru, G. Huminic, E.I. Chereches, A.A. Minea, A. Huminic, Thermal conductivity of stabilized PEG 400 based nanofluids: An experimental approach, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 130 (2022), Article 105798.
- [36] P. Kanti, K.V. Sharma, R.S. Khedkar, Tauseef-ur Rehman, Synthesis, characterization, stability, and thermal properties of graphene oxide based hybrid nanofluids for thermal applications: experimental approach, *Diam. Relat. Mater.*, 128 (2022), Article 109265.
- [37] G. Huminic, A. Vărdaru, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Water-based graphene oxide–silicon hybrid nanofluids—experimental and theoretical approach, *Int. J. Mol. Sci.*, 23 (2022), p. 3056.
- [38] A. Vărdaru, G. Huminic, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Synthesis, characterization and thermal conductivity of water based graphene oxide–silicon hybrid nanofluids: An experimental approach, *Alexan. Eng. J.*, 61 (12) (2022 Dec 1), pp. 12111-12122.
- [39] H. Yarmand, S. Gharehkhani, G. Ahmadi, S.F.S. Shirazi, S. Baradaran, E. Montazer, et al., Graphene nanoplatelets silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer, *Energy Convers. Manage.*, 100 (2015), pp. 419-428.
- [40] S. Askari, et al., Rheological and thermophysical properties of ultra-stable kerosene-based Fe₃O₄/graphene nanofluids for energy conservation, *Energy Convers. Manag.*, 128 (2016), pp. 134-144.
- [41] S.N. Shoghl, J. Jamali, M.K. Moraveji, Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: an experimental study, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 74 (2016), pp. 339-346.
- [42] R.S. Vajjha, D.K. Das, B.M. Mahagaonkar, Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory, *Pet. Sci. Technol.*, 27 (6) (2009), pp. 612-624.
- [43] O. Mahian, A. Kianifar, S. Wongwises, Dispersion of ZnO nanoparticles in a mixture of ethylene glycol-water, exploration of temperature-dependent density, and sensitivity analysis, *J. Clust. Sci.*, 24 (4) (2013), pp. 1103-1114.
- [44] B. Saleh, L.S. Sundar, Entropy generation and exergy efficiency analysis of ethylene glycol-water based nanodiamond + Fe₃O₄ hybrid nanofluids in a circular tube, *Powder Technol.*, 380 (2021), pp. 430-442.
- [45] L.S. Sundar, S. Mesfin, E.V. Ramana, Z. Said, A.C. Sousa, Experimental investigation of thermophysical properties, heat transfer, pumping power, entropy generation, and exergy efficiency of nanodiamond+ Fe₃O₄/60: 40% water-ethylene glycol hybrid nanofluid flow in a tube, *Thermal Sci. Eng. Prog.*, 21 (2021), Article 100799.
- [46] G. Huminic, A. Huminic, A. Vărdaru, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Surface tension of rGO-Ag based hybrid nanofluids, *J. Mol. Liq.*, 390 (2023), Article 123002.
- [47] J.J. Jasper, Surface Tension of Pure Liquid Compounds, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1 (1972), pp. 841-1009.
- [48] A.K. Connors, L.J. Wright, Dependence of Surface Tension on Concentration of Binary Aqueous-Organic Solutions, *Anal. Chem.*, 61 (1989), pp. 194-198.
- [49] A.R. Harikrishnan, P. Dhar, P.K. Agnihotri, S. Gedupudi, S.K. Das, Effects of interplay of nanoparticles, surfactants and base fluid on the surface tension of nanocolloids, *Eur. Phys. J. E*, 40 (2017), pp. 53-67.

- [50] D. Cabaleiro, et al., Dynamic viscosity and surface tension of stable graphene oxide and reduced graphene oxide aqueous nanofluids, *J. Nanofluids*, 7 (2018), pp. 1081-1088.
- [51] G. Huminic, A. Huminic, F. Dumitrache, C. Fleaca, Ion Morjan, Experimental study of thermo-physical properties of nanofluids based on γ -Fe₂O₃ nanoparticles for heat transfer applications, *Heat Transfer Eng.*, 38 (2017), pp. 1496-1505.
- [52] A. Huminic, G. Huminic, C. Fleaca, F. Dumitrache, I. Morjan, Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles, *Powder Technol.*, 284 (2015), pp.78-84.
- [53] S. Zhang, X. Han, Y. Tan, K. Liang, Effects of hydrophilicity/lipophilicity of nano-TiO₂ on surface tension of TiO₂-water nanofluids, *Chem. Phys. Lett.*, 691 (2018), pp. 135-140.
- [54] I. Fazeli, M.R. Sarmasti Emami, A. Rashidi, Investigation and optimization of the behavior of heat transfer and flow of MWCNT-CuO hybrid nanofluid in a brazed plate heat exchanger using response surface methodology, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 122 (2021), Article 105175.
- [55] I.M. Shahrul, I.M. Mahbubul, S.S. Khaleduzzaman, R. Saidur, M.F.M. Sabri, A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 38 (2014), pp. 88-98.
- [56] M. Devarajan, et al., Thermophysical properties of CNT and CNT/Al₂O₃ hybrid nanofluid, *Micro Nano Lett.*, 13 (2018), pp. 617-621.
- [57] Y. Gao, Y. Xi, Y. Zhenzhong, A. Sasmito, A. Mujumdar, L. Wang, Experimental investigation of specific heat of aqueous graphene oxide Al₂O₃ hybrid nanofluid, *Therm. Sci.*, 25 (1B) (2021), pp. 515-525.
- [58] N. Ahammed, L.G. Asirvatham, S. Wongwises, Entropy generation analysis of graphene-alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 103 (2016), pp. 1084-1097.
- [59] L.S. Sundar, M.K. Singh, A.C.M. Sousa, Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 52 (2014), pp. 73-83.
- [60] E.C. Okonkwo, I. Wole-Osho, D. Kavaz, M. Abid, T. Al-Ansari, Thermodynamic evaluation and optimization of a flat plate collector operating with alumina and iron mono and hybrid nanofluids, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 37 (2020), Article 100636.
- [61] H. Yarmand, et al., Study of synthesis, stability and thermo-physical properties of graphene nanoplatelet/platinum hybrid nanofluid, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 77 (2016), pp. 15-21.
- [62] G.M. Moldoveanu, A.A. Minea, Specific heat experimental tests of simple and hybrid oxide-water nanofluids: Proposing new correlation, *J. Mol. Liq.*, 279 (2019), pp. 299-305.
- [63] S. Kannaiyan, C. Boobalan, A. Umasankaran, A. Ravirajan, S. Sathyan, T. Thomas, Comparison of experimental and calculated thermophysical properties of alumina/cupric oxide hybrid nanofluids, *J. Mol. Liq.*, 244 (2017), pp. 469-477.
- [64] V.V. Wanatasanappan, M.Z. Abdullah, P. Gunnasegaran, Thermophysical properties of Al₂O₃-CuO hybrid nanofluid at different nanoparticle mixture ratio: An experimental approach, *J. Mol. Liq.*, 313 (2020), Article 113458.
- [65] G. Huminic, A. Vărdaru, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, Broad-band absorption and photo-thermal conversion characteristics of rGO-Ag hybrid nanofluids, *J. Mol. Liq.*, 408 (2024), Article 125347.

- [66] Z.Y. Sun, N.N. Dong, K.P. Wang, D. Konig, T.C. Nagaiah, M.D. Sanchez, et al., Ag-stabilized few-layer graphene dispersions in low boiling point solvents for versatile nonlinear optical applications, *Carbon*, 62 (2013), pp. 182-192.
- [67] R. Zhang, J. Qu, M. Tian, X. Han, Q. Wang, Efficiency improvement of a solar direct volumetric receiver utilizing aqueous suspensions of CuO, *Int. J. Energy Res.*, 42 (2018), pp. 2456-2464.

ANEXA 1. Rezultatele cercetării prezentate în articole publicate în jurnale științifice sau expuse în cadrul conferințelor

Articole publicate în reviste indexate în Web of Science, cu factor de impact (FI):

- [1] M. Chereches, **A. Vărdaru**, G. Huminic, E.I. Chereches, A.A. Minea, A. Huminic, Thermal conductivity of stabilized PEG 400 based nanofluids: An experimental approach, Int. Commun. Heat Mass Transf, 130 (2022), Article 105798, FI = 6.4.
- [2] G. Huminic, **A. Vărdaru**, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Water-based graphene oxide–silicon hybrid nanofluids—experimental and theoretical approach, Int. J. Mol. Sci., 23 (2022), p. 3056, FI = 4.9.
- [3] **A. Vărdaru**, G. Huminic, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Synthesis, characterization and thermal conductivity of water based graphene oxide–silicon hybrid nanofluids: An experimental approach, Alexan. Eng. J., 61 (12) (2022 Dec 1), pp. 12111–12122, FI = 6.2.
- [4] **A. Vărdaru**, G. Huminic, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Aqueous hybrid nanofluids containing silver-reduced graphene oxide for improving thermo-physical properties, Diam. Relat. Mater., 132 (2023), Article 109688, FI = 4.3.
- [5] G. Huminic, A. Huminic, **A. Vărdaru**, C. Fleacă, F. Dumitrache, I. Morjan, Surface tension of rGO-Ag based hybrid nanofluids, J. Mol. Liq., 390 (2023), Article 123002, FI = 5.3.
- [6] G. Huminic, A. Huminic, **A. Vărdaru**, F. Dumitrache, C. Fleacă, Experimental investigation on Ag NPs-rGO-water/ethylene-glycol hybrid nanofluids used in solar applications, Diam. Relat. Mater., 143 (2024), Article 110851, FI = 4.3.
- [7] G. Huminic, **A. Vărdaru**, A. Huminic, C. Fleacă, F. Dumitrache, Broad-band absorption and photo-thermal conversion characteristics of rGO-Ag hybrid nanofluids, J. Mol. Liq., 408 (2024), Article 125347, FI = 5.3.

Lucrări comunicate la conferințe:

- [8] **A. Vărdaru**, G. Huminic și A. Huminic, Thermal conductivity of water based silver-graphene oxide hybrid nanofluids, The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering "ACME 2022", 6–7 June 2022, Iasi, România, 2022.
- [9] **A. Vărdaru**, G. Huminic și A. Huminic, Study of hybrid nanofluids used in direct absorption solar collectors, XXIIIrd National Conference on Thermodynamics with International Participation "NACOT 2023", 11–13 May 2023, Galați, România, 2023.