Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică

Departamentul Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice

Nr. Decizie Senat …… din ……

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Studiu teoretic și experimental privind utilizarea materialelor cu schimbare de fază în procesele de degivrare ale sistemelor frigorifice

Theoretical and experimental study regarding the use of phase change materials in the refrigeration systems defrosting

Autor: Ing. AL DOURI Jamal F.M.K.

Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Tudor PRISECARU

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Camelia STANCIU	de la	POLITEHNICA București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Tudor PRISECARU	de la	POLITEHNICA București
Membru	Prof. Dr. Ing. Alexandru ȘERBAN	de la	POLITEHNICA București
Membru	Prof. Dr. Ing. Gabriel NĂSTASE	de la	Universitatea Transilvania din Brașov
Membru	Conf. Dr. Ing. Carmen Ema PANAITE	de la	Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași

București
2026

MULȚUMIRI

Mai presus de toate, doresc să-i mulțumesc lui Dumnezeu.
Doresc să îi mulțumesc dnului Prof. dr. ing. **Tudor Prisecaru**.
Aș dori să îmi exprim profunda apreciere față de domnul Prof. dr. ing. **Valentin Apostol** pentru sprijinul său neclintit pe parcursul studiilor doctorale și al activităților mele de cercetare. Îi sunt recunoscător pentru răbdare, încurajare, entuziasm și vasta expertiză în domeniu. Sprijinul mentorului meu a fost neprețuit pe întreaga durată a cercetării și a procesului de redactare a acestei teze. Nu mi-aș fi putut imagina un îndrumător și mentor mai bun pe durata studiilor mele doctorale.
Doresc să adresez mulțumiri deosebite domnului conf. dr. ing. **Horațiu Pop** și dnei. conf. **Claudia Ioniță**, pentru încurajare, comentariile pertinente și întrebările provocatoare, precum și pentru contribuția lor valoroasă și fundamentală, concretizată în sprijin financiar constant pentru asigurarea echipamentelor experimentale și pregătirea panoului de control, dar și în sfaturi și îndrumări prețioase pentru atingerea obiectivelor acestei lucrări.
În ceea ce privește partea experimentală, doresc să le mulțumesc domnilor tehnicieni **Laurențiu Gheoldea**, **Mircea Hera și Eugen Georgescu** pentru ajutorul lor deosebit în realizarea montajului experimental.
Am o mare datorie de recunoștință față de **soția mea** minunată, copiii mei (**Ahmed, Aye și Dania**) și pentru fratele meu, prof. **ing. KHALIL Hisham**, care au fost alături de mine necontenit, împreună cu familia noastră, pentru a finaliza și îndeplini cerințele acestei teze.
Le mulțumesc, de asemenea, tuturor prietenilor mei.

Cuprins

Cuprins 3
1 Capitolul 1 5
Introducere 5
1.1 Sistem frigorific cu comprimare mecanică de vapori (VCRS) 6
1.2 Principalele componente ale ciclului VCR 6
1.3 Ciclul sistemului frigorific cu comprimare mecanică de vapori 7
Concluzie 7
2 Capitolul 2 8
Studiu bibliografic asupra metodelor de îmbunătățire a eficienței sistemelor frigorifice cu comprimare de vapori (VCRs) 8
2.1 Metode de îmbunătățire a performanței compresorului 8
2.1.1 Adăugarea de nanoparticulelor în uleiul de lubrifiere 8
2.1.2 Utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM-uri) 8
2.2. Metode de îmbunătățire a performanței condensatorului 8
2.2.1. Efectul umbririi asupra condensatorului 8
2.2.2. Efectul condensatoarelor evaporative 8
2.2.3. Efectul subrăcirii 8
2.3. Metode de îmbunătățire a performanței ventilului de laminare 9
2.4. Metode de îmbunătățire a performanței vaporizatorului 9
2.4.1. Metode pasive de degivrare 8
2.4.2. Metode active de degivrare 8
2.4.3. Metode de degivrare bazate pe materiale cu schimbare de fază (PCM-uri) 9
2.5. Recuperarea căldurii pentru îmbunătățirea eficienței VCRS 10
2.6. Îmbunătățirea eficienței VCRS prin utilizarea PCM-urilor 10
2.6.1. Caracteristicile și clasificarea materialelor cu schimbare de fază (PCM-uri) 10
2.6.2. Cercetări privind metodele de îmbunătățire prin adăugarea PCM în sistemul frigorific 11
3 Capitolul 3 12
Studiu bibliografic privind utilizarea PCM-urilor pentru degivrarea sistemelor frigorifice cu comprimare de vapori (VCRs) pentru diferiți agenți frigorifici 12
3.1 Modul de funcționare al (VCRs) cu materiale cu schimbare de fază 12
3.2 Ciclul termodinamic în diagrama p-h a (VCRs) cu materiale cu schimbare de fază 12
3.3 Modelarea sistemului frigorific de degivrare cu PCM-uri 13
3.4. Rezultate și Discuții 14
4 Capitolul 4 16
Analiza experimentală a degivrării cu aer sau cu rezistență electrică într-un VCRS 16
4.1 Standul experimental 16
4.1.1. Vaporizatorul (Eva) 16
4.1.2. Compresorul (Cp) 16
4.1.3. Condensatorul (Cd) 16
4.1.4. Ventilul de laminare (E.v) 17
4.2 Rezultate și discuții 17
5 Capitolul 5 20
Studiu experimental privind utilizarea PCM-urilor pentru stocarea energiei termice 20
5.1 Standul experimental 20

5.1.1 Secțiunea de testare 20
5.1.2 Echipament auxiliar 21
5.1.2.1 Recipientul cu apă caldă……..21
5.1.3 Dispozitive de măsurare 21
5.1.3.1 Senzor de temperatură.....21
5.1.3.2 Debitmetru de apă.....22
5.1.3.3 Cronometru…….....…….....……..22
5.2. Rezultate și discuții.....22
6 Capitolul 6 27
Comparație între metodele de degivrare pentru diferiți agenți frigorifici 27
6.1 Introducere.....27
6.2 Modelul matematic al VCRS cu degivrare …….....……..27
6.2.1 Modelul matematic pentru degivrarea cu aer a VCRS.....28
6.2.2 Modelul matematic pentru degivrarea cu încălzire electrică a VCRS.....29
6.2.3 Modelul matematic pentru degivrarea cu gaze calde a VCRS.....30
6.2.4 Modelul matematic pentru degivrarea cu PCM a VCRS.....31
6.3 Rezultate și discuții……...……..32
Capitolul 7.....36
Concluzii și contribuții personale.....36
C.1. Concluzii generale..... 36
C.2. Contribuții originale..... 39
C.3. Direcții viitoare de cercetare 36
Articole publicate.....41
Bibliografie Selectivă 43

Capitolul 1
Introducere

Pe măsură ce economia mondială s-a dezvoltat, a apărut o creștere semnificativă a cererii de energie electrică. Deficitul energetic reprezintă o preocupare majoră pentru dezvoltarea viitoare a planetei dar, în același timp, creșterea populației generează necesitatea unei cantități mai mari de energie pentru acoperirea nevoilor acesteia, ceea ce impune sporirea producției energetice [1]. Creșterea consumului de energie determină creșterea emisiilor de gaze toxice din atmosferă, în special dioxid de carbon (CO_2), unul dintre principalii factori ai poluării și schimbărilor climatice [2]. Cea mai recentă conferință privind schimbările climatice organizată de Organizația Națiunilor Unite a avut loc la Sharm el-Sheikh, iar datele publicate la 20 noiembrie 2022 au subliniat rolul dioxidului de carbon, ca fiind principalul responsabil pentru creșterea temperaturilor la nivel global, cu o majorare anuală de aproximativ 0,5 °C [3].

Sistemele de refrigerare și climatizare (R și AC) utilizează aproximativ 30% din energia electrică consumată. În multe țări, cercetătorii sunt interesați de dezvoltarea sistemelor frigorifice pentru reducerea consumului energetic, nu doar prin optimizarea utilizării energiei, ci și prin diminuarea consumului fără a afecta confortul sau alte beneficii asociate utilizării energiei și fără a compromite eficiența sau calitatea instalațiilor [11], [12].

Sistemul de degivrare este o componentă esențială în sistemele frigorifice (RS), care consumă o cantitate semnificativă de energie electrică. Una dintre cele mai importante probleme ale sistemelor frigorifice cu comprimare de vapori (VCRs), în numeroase aplicații, precum cele casnice și pompele de căldură (HP), este formarea gheții pe suprafața vaporizatorului (Eva) [13]. Atunci când temperatura agentului frigorific (Freon) din conducta vaporizatorului atinge valori negative, vaporii de apă din aer se condensează, îngheață și formează treptat un strat de gheață pe conductă. Dezavantajele acumulării de gheață sunt:

a) Reducerea transferului de căldură: Gheața acționează ca un izolator termic, ceea ce reduce transferul de căldură între suprafața vaporizatorului și aerul înconjurător. Acest fenomen poate conduce la scăderea capacității de răcire și, în același timp, la creșterea duratei ciclurilor de răcire [3];

b) Creșterea consumului de energie: Pe măsură ce stratul de gheață devine mai gros, sistemul frigorific trebuie să funcționeze mai intens pentru a menține temperatura dorită, ceea ce determină un consum energetic mai ridicat [14];

c) Reducerea debitului de aer prin vaporizator: Atunci când gheața se acumulează, aceasta poate bloca circulația aerului prin vaporizator, reducând cantitatea de aer care trece printre aripioare. Acest lucru diminuează schimbul termic și eficiența, forțând sistemul frigorific să funcționeze mai intens.

Având în vedere toți factorii menționați mai sus, coeficientul de performanță al sistemului frigorific va scădea.

Necesitatea identificării unor noi modalități de reducere a consumului de energie electrică a devenit esențială, iar o metodă de actualitate este tehnologia de stocare a energiei termice (TES). Pentru ca TES să fie economică și sustenabilă, au fost realizate numeroase cercetări asupra componentelor sale esențiale. TES prezintă un potențial semnificativ ca soluție tehnologică ce poate facilita eficient transferul consumului energetic din perioadele de vârf către perioadele cu cerere redusă [3]. Domeniile de aplicare ale tehnologiei TES includ energia solară, climatizarea (AC), construcțiile etc. TES poate fi împărțită în trei metodologii principale: stocarea căldurii sensibile,

stocarea căldurii latente și stocarea termochimică.

Materialele cu schimbare de fază (PCM) sunt utilizate pe scară largă datorită avantajelor lor remarcabile, printre care îmbunătățirea performanței TES și capacitatea de a stoca și elibera eficient o cantitate mare de energie la temperatură aproape constantă, prin procesele de încărcare (topire) și descărcare (solidificare) [15]. Energia este acumulată în timpul tranziției de fază prin topire, apoi este eliberată în procesul de solidificare [16].

Un sistem frigorific funcționează în două etape: o etapă de răcire, care extrage căldura, și o etapă de degivrare, care topește gheața de pe suprafața vaporizatorului. Dacă gheața nu este îndepărtată, aceasta reduce eficiența sistemului și crește consumul de energie. Consumul total de energie al sistemului frigorific include două componente: consumul de energie în timpul degivrării și consumul de energie în timpul funcționării în regim de răcire. La calculul consumului energetic global, se alocă valori fiecărei componente în funcție de durata de funcționare în modul de răcire în raport cu modul de degivrare, indiferent de metoda de degivrare utilizată.

1.1. Sistem frigorific cu comprimare de vapori (VCRS)

Încă de la apariția sistemului frigorific cu comprimare de vapori (VCRS), la începutul secolului al XIX-lea, tehnologia VCRs a fost utilizată pe scară largă în frigidere casnice, congelatoare industriale și sisteme de climatizare [11]. Ciclul frigorific cu comprimare de vapori, în timpul procesului de vaporizare, preia căldură de la temperaturi scăzute, iar în timpul procesului de condensare cedează căldură la temperaturi ridicate către mediul înconjurător. Din punct de vedere schematic, Figura 1.4 prezintă cele patru componente-cheie ale unui VCR: compresorul (Cp), condensatorul (Con), elementul de laminare (Ev) și vaporizatorul (Eva), prin care agentul frigorific circulă într-un ciclu închis [17]. Sistemul VCR se bazează legea a doua a termodinamicii. Conform acesteia, „este imposibil transferul căldurii de la un corp cu temperatură joasă la un corp cu temperatură mai înaltă fără aplicarea unei forțe externe” [18]. Sistemele frigorifice, echipamente standard în sectorul rezidențial și industrial, sunt utilizate pe scară largă pentru transferul de căldură între diferite locații. Principiul de funcționare al majorității sistemelor frigorifice (RS) se bazează pe ciclul VCR. Agentul frigorific (R) vaporizează la temperaturi scăzute în vaporizator (Eva), unde absoarbe căldură în timpul fierberii/vaporizării, apoi căldura este evacuată la temperaturi ridicate în mediul ambiant prin condensator [19], [20].

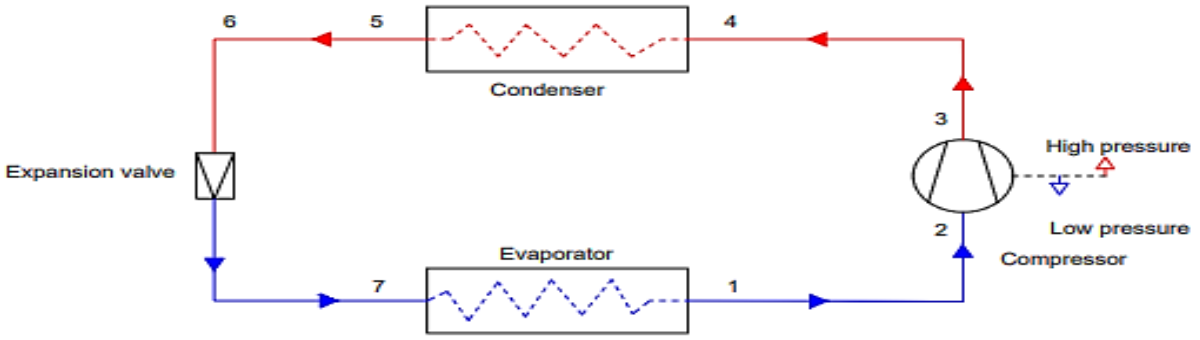


Figura 1.1 Componentele ciclului VCR

1.2 Principalele componente ale ciclului VCR

Sistemul frigorific cu comprimare de vapori (VCR) este alcătuit din patru componente principale: compresorul (Cp), condensatorul (Con), ventilul de laminare (Ev) și vaporizatorul (Eva), care funcționează într-un circuit închis, așa cum este prezentat în Figura 1.1.

1.3 Ciclul sistemului frigorific cu comprimare mecanică de vapori

Ciclul frigorific cuprinde patru procese principale: scăderea izentalpică a presiunii în ventilul de laminare, comprimarea izentropică în compresor (Cp), cedarea izobară de căldură în condensator (Con) și absorbția izobară de căldură în vaporizator (Eva). Ciclul VCR teoretic utilizat în analiza sistemului frigorific, cu supraîncălzire și subrăcire, este prezentat în Figura 1.2.

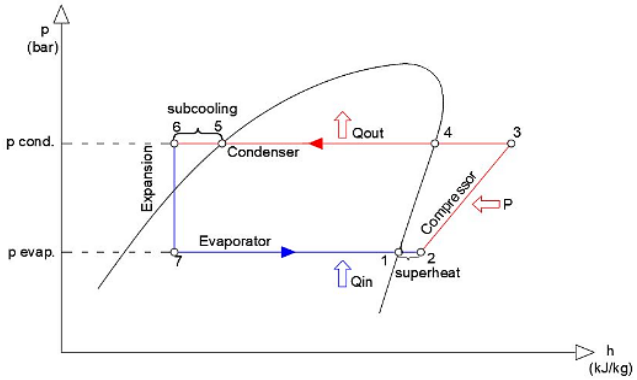


Figura 1.2 Diagrama p-h pentru ciclul termodinamic al (VCR).

Concluzie:

La nivel global, sistemele frigorifice cu compresie de vapori (VCRS) reprezintă consumatori importanți de energie. Una dintre strategiile promițătoare pentru îmbunătățirea performanței instalației este reducerea consumului energetic în etapa de degivrare.
În capitolul următor este prezentată un studiu bibliografic privind metodele de creștere a eficienței sistemelor VCR.

Capitolul 2

Studiu bibliografic asupra metodelor de îmbunătățire a eficienței sistemelor frigorifice cu comprimare de vapori

2.1 Metode de îmbunătățire a performanței compresorului

Compresorul este o componentă esențială care consumă o cantitate mare de energie [23], [24], [25] și care ar trebui îmbunătățită. Mai mulți cercetători investighează metode de creștere a performanței compresorului, printre care utilizarea nanoparticulelor sau a materialelor cu schimbare de fază (PCM).

2.1.1 Adăugarea de nanoparticulelor în uleiul de lubrifiere

Creșterea cantității de nanoparticule prezente în fluidul de lubrifiere reprezintă un pas important pentru îmbunătățirea eficienței compresorului (Cp). Datorită numeroaselor avantaje ale proprietăților acestora, precum conductivitatea termică ridicată, densitatea redusă etc., nanoparticulele au putut fi utilizate în diverse componente ale sistemului frigorific.

2.1.2 Utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM-uri)

Liu et al. [34] au dezvoltat un sistem de degivrare cu ciclu by-pass pentru instalații frigorifice rezidențiale. Acest sistem a utilizat stocarea termică în carcasa compresorului (Cp) și a fost comparat cu un sistem convențional de degivrare prevăzut cu rezistență electrică. Experimentul a arătat că timpul necesar degivrării s-a redus cu 65%–77%, consumul de energie a scăzut cu 89%–92%, iar nivelul de zgomot al compresorului s-a diminuat cu aproximativ 18,5%.

2.2. Metode de îmbunătățire a performanței condensatorului

2.2.1. Efectul umbririi asupra condensatorului

În climatele calde, sistemul de aer condiționat (AC) consumă o cantitate mare de energie electrică. Prin urmare, umbrirea spațiului reprezintă o metodă eficientă de reducere a necesarului de răcire și de protecție împotriva radiației solare intense.

2.2.2. Efectul condensatoarelor evaporative

Reducerea consumului de energie este de o importanță majoră pentru sistemele VCR, în special în regiunile caracterizate de temperaturi ridicate. Creșterea eficienței energetice a unui astfel de sistem poate fi realizată prin îmbunătățirea cedării căldurii în condensator (Con), utilizând condensatoare evaporative.

2.2.3. Efectul subrăcirii

În sistemele VCR convenționale, se consideră adesea că agentul frigorific care ajunge în vaporizator (Eva) este, în stare de vapori umezi. Subrăcirea lichidului saturat la ieșirea din condensator conduce la creșterea coeficientului de performanță (COP).

2.3. Metode de îmbunătățire a performanței ventilului de laminare

Sistemul VCR este unul dintre cele mai răspândite tipuri de sisteme de răcire. Una dintre metodele de îmbunătățire a performanței sale constă în reducerea pierderilor prin laminare, prin înlocuirea ventilului de laminare (E.V.) cu un ejector de expansiune.

2.4. Metode de îmbunătățire a performanței vaporizatorului

Sistemele frigorifice și de aer condiționat (R și AC) se bazează pe vaporizatoare (Eva) pentru a absorbi căldura din mediul camerei răcite și pentru a transforma agentul frigorific din stare lichidă în vapori. În acest context, formarea gheții în sistemele frigorifice devine un fenomen inevitabil. Studiile anterioare au arătat că depunerile de gheață pe suprafața vaporizatorului afectează semnificativ eficiența sistemului [1–3].

Metode de degivrare

Există două metode principale de degivrare: pasivă și activă.

2.4.1. Metode pasive de degivrare

Tehnologiile de degivrare pasivă nu utilizează aport direct de energie în timpul procesului de degivrare. Cele mai frecvente tehnici de degivrare pasivă sunt acoperirile de suprafață și degivrarea în afara ciclului de funcționare (off-cycle defrosting) [50].

- **Metoda de degivrare prin acoperire de suprafață**

În ultimii ani, progresele în tehnologia materialelor au simplificat aplicarea și au îmbunătățit eficacitatea acoperirii suprafeței vaporizatorului ca tehnică anti-îngheț. Studiile au demonstrat că acoperirea aplicată pe suprafața vaporizatorului poate încetini formarea gheții pe aceasta [51], [52].

Metoda de degivrare în afara ciclului de funcționare (off-cycle defrost)

În tehnicile de degivrare în afara ciclului de funcționare (off-cycle), căldura este preluată din aerul din jurul vaporizatorului (Eva). Ca urmare, această tehnică poate fi utilizată pentru degivrare în medii cu temperaturi mai mari de 1°C.

2.4.2. Metode active de degivrare

Degivrarea activă implică utilizarea unor surse externe de energie sau a unor procese mecanice pentru accelerarea procesului de degivrare. Metodele active utilizate pe scară largă includ: ciclul invers, vibrațiile ultrasonice, degivrarea cu gaz fierbinte, încălzirea electrică și degivrarea cu fluid cald [50], [52].

- **Metoda de degivrare cu aer (degivrarea în afara ciclului de funcționare – off-cycle defrost)**

În acest caz, atunci când sistemul frigorific necesită degivrare, ventilatorul vaporizatorului (Eva) începe să recircule aer din camera frigorifică, care are o temperatură de peste 0°C. Această recirculare a aerului determină topirea treptată a gheții acumulată pe suprafața vaporizatorului.

- **Metoda de degivrare prin ciclu invers**

Metoda de degivrare prin ciclu invers este o tehnică frecvent utilizată în pompele de căldură, sistemele frigorifice și instalațiile de aer condiționat pentru îndepărtarea gheții care se acumulează pe schimbătorul de căldură exterior sau pe vaporizator (Eva).

- **Metoda de degivrare prin vibrații ultrasonice**

Degivrarea ultrasonică utilizează frecvențe ultrasonice [60], în general peste 20 kHz, pentru a produce vibrații în materialele pe care se acumulează gheața. Aceste vibrații generează micromișcări care permit desprinderea gheții formate pe suprafața serpentinelor vaporizatorului (Eva), fără a fi necesară o sursă de căldură pentru topirea acesteia.

- **Metoda de degivrare cu gaz fierbinte (gaze calde)**

Metoda de degivrare cu gaz fierbinte este o tehnică frecvent utilizată în sistemele frigorifice pentru topirea gheții acumulate pe serpentina vaporizatorului (Eva). În acest proces, un tub leagă compresorul (Cp) de vaporizator, pentru a permite degivrarea prin introducerea gazului fierbinte.

- **Metoda de degivrare prin încălzire cu rezistență electrică**

Metoda de degivrare prin încălzire cu rezistență electrică este utilizată frecvent atât în frigiderele de uz casnic, cât și în sistemele industriale de mari dimensiuni, pentru topirea gheții acumulată pe serpentina vaporizatorului (Eva). Această metodă se bazează pe rezistențe electrice care generează căldură atunci când sunt alimentate cu energie electrică, iar această căldură este folosită pentru a topi gheața de pe serpentină.

- **Metoda de degivrare cu fluid cald (apă)**

Metoda de degivrare cu fluid cald (apă) este utilizată frecvent în sistemele frigorifice pentru topirea gheții acumulată pe serpentina vaporizatorului (Eva). Această metodă funcționează prin circularea unui lichid cald, de obicei apă, printr-un circuit separat conectat la serpentina vaporizatorului.

2.4.3. Metode de degivrare bazate pe materiale cu schimbare de fază (PCM-uri)

Utilizarea schimbătoarelor de căldură cu materiale cu schimbare de fază (PCM) pentru stocarea căldurii necesare degivrării a devenit tot mai interesantă în ultimii ani. Degivrarea bazată pe PCM funcționează prin stocarea energiei termice în PCM în timpul funcționării normale a sistemului frigorific cu comprimare de vapori (VCRS), iar apoi această căldură stocată este utilizată pentru topirea gheții de pe serpentina vaporizatorului (Eva) în timpul ciclului de degivrare.

2.5. Recuperarea căldurii pentru îmbunătățirea eficienței VCRS

Atunci când sistemul cedează căldură către mediul înconjurător, aceasta este considerată căldură reziduală. Prin urmare, putem defini căldura reziduală ca energia generată în timpul proceselor de transfer termic, precum conducția, radiația și convecția, între diferitele componente ale unui sistem frigorific (RS).

2.6. Îmbunătățirea eficienței VCRS prin utilizarea PCM-urilor

Aplicarea materialelor cu schimbare de fază (PCM) în sistemele frigorifice, pentru îmbunătățirea eficienței acestora, reprezintă o abordare inovatoare de reducere a consumului de energie, datorită avantajelor sale intrinseci. Caracteristicile dorite ale PCM includ: căldură latentă mare de schimbare de fază, coeficient redus de variație a volumului, superrăcire redusă, absența coroziunii, stabilitate chimică ridicată în timpul topirii sau solidificării, cost scăzut, netoxicitate, neinflamabilitate și densități ridicate atât în stare solidă, cât și în stare lichidă [89].

2.6.1. Caracteristicile și clasificarea materialelor cu schimbare de fază (PCM-uri)

Interesul cercetătorilor pentru materialele cu schimbare de fază (PCM-uri) a crescut în ultimii ani datorită:

• capacității mari de stocare a energiei;

• necesarului redus de spațiu pentru stocare;

• comportamentului izoterm în timpul etapelor de încărcare și descărcare [102].

PCM-urile pot acumula sau elibera cantități mari de energie la temperatură constantă, printr-o schimbare de fază [103].

Clasificarea materialelor cu schimbare de fază (PCM)

Clasificarea materialelor cu schimbare de fază (PCM-uri) în funcție de temperatura de topire este esențială pentru stabilirea adecvării lor în aplicații specifice. PCM-urile de temperatură joasă (sub 15 °C) sunt utilizate frecvent în climatizare și în industria de depozitare a alimentelor. PCM-urile de temperatură medie (între 15–90 °C) sunt aplicate pe scară largă pentru gestionarea sarcinilor termice și încălzirea solară, iar PCM-urile de temperatură înaltă (peste 90 °C) sunt potrivite pentru refrigerare prin absorbție, stocare industrială de căldură și sisteme solare cu concentrare [122].

I. PCM-uri anorganice

PCM-urile anorganice au un interval larg de temperaturi de topire, cuprins între 10 °C și 900 °C.

Hidrați de săruri

Hidrații de săruri, care constau dintr-o combinație de apă și sare, sunt recunoscuți pe scară largă ca fiind cea mai importantă și cea mai studiată categorie de hidrați. Temperaturile de topire ale acestor substanțe variază între 15 °C și 117 °C.

II. PCM-uri organice

PCM-urile organice sunt utilizate frecvent într-o gamă largă de aplicații, având temperaturi de topire cuprinse între 35 și 70 °C.

Parafina

Formula chimică a parafinei este CH_3-(CH_2)-CH_3. Aceasta are un punct de topire ridicat, nu reacționează chimic și este sigură datorită caracterului său nereactiv.

Acizi grași

Formula chimică este $CH_3(CH_2)2nCOOH$, iar caracteristicile sale sunt asemănătoare cu cele ale parafinei. Principalul avantaj al acizilor grași este schimbarea de fază mai rapidă. Totuși, aceștia sunt ușor corozivi și mai scumpi decât parafina.

Polioli

Poliolii au avantajul unei variații reduse de volum. Principalele dezavantaje sunt temperaturile ridicate de tranziție de fază, căldura latentă mai mică și costurile ridicate [123].

III. Eutectice

Acestea sunt combinații de tip organic–organic, organic–anorganic și anorganic–anorganic. Un aspect esențial la materialele eutectice este că temperaturile de topire ale componentelor trebuie să fie aceleași; prin urmare, eutecticele se comportă ca materiale pure [125].

2.6.2. Cercetări privind metodele de îmbunătățire prin adăugarea PCM în sistemul frigorific

PCM-urile devin din ce în ce mai populare în sistemele frigorifice datorită capacității lor de a crește eficiența, de a reduce consumul de energie și de a îmbunătăți stabilitatea temperaturii.

Capitolul 3

Studiu privind utilizarea PCM-urilor pentru degivrarea sistemelor VCR pentru diferiți agenți frigorifici

În acest capitol se propune, în mod fundamental, o sursă alternativă de căldură obținută prin recuperarea energiei termice disponibilă în gazele evacuate de compresor în timpul funcționării sistemelor VCR, iar această abordare este analizată teoretic. De aici rezultă o nouă metodă de degivrare, bazată pe utilizarea energiei termice recuperate. Pentru valorificarea acestei energii în perioada de degivrare, este necesară stocarea ei, iar o opțiune adecvată este utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM). Capitolul investighează eficiența introducerii PCM-urilor în sistemele frigorifice, fiind propus un model matematic. În prima etapă, modelul a fost aplicat pentru agentul frigorific R404a, utilizând determinări experimentale realizate pe o instalație existentă din cadrul unui cunoscut lanț de restaurante de tip fast-food. Modelul analizează performanța utilizării PCM-urilor în procesul de degivrare al sistemelor frigorifice cu comprimare de vapori (VCR), pentru mai mulți agenți frigorifici, inclusiv: R600a, R600, R1234yf, R404a, R134a, R1234ze(E), R152a, precum și un alt agent frigorific menționat în document, R600. Obiectivul modelului este evaluarea performanței sistemului frigorific (RS) în condițiile integrării PCM-urilor.

3.1 Modul de funcționare al sistemelor VCR cu materiale cu schimbare de fază

Această metodă presupune introducerea unui schimbător de căldură recuperativ, cu funcție de stocare a energiei termice, între compresor și condensator. Această componentă funcțională poate recupera și stoca energia termică din agentul frigorific evacuat de compresor, utilizând materiale cu schimbare de fază (PCM). În timpul acestui proces, PCM-urile se topesc. Materialele de stocare termică prin schimbare de fază sunt integrate în schimbătorul de căldură recuperativ PCMhx, așa cum este prezentat în Figura 3.1.

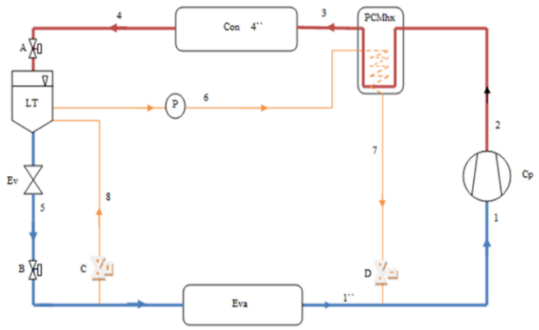


Figura 3.1 Schema sistemului de refrigerare

3.2 Ciclul termodinamic în diagrama p-h a sistemelor VCR cu materiale cu schimbare de fază

Ciclul termodinamic și procesul de degivrare ale sistemelor VCR cu PCM sunt prezentate în Figura 3.2, pe o diagramă p-h.

Stările 1", 1, 2, 3, 4 și 5 sunt caracteristice ciclului de funcționare al sistemului frigorific (RS), iar stările 6, 7 și 8 sunt caracteristice ciclului de degivrare cu PCM.

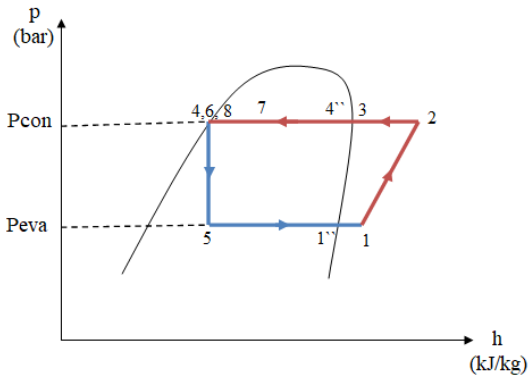


Figura 3.2 Ciclul termodinamic al VCRs cu PCM

Aplicând prima lege a termodinamicii, se calculează sarcina termică specifică a schimbătorului de căldură recuperativ:

$$q_{3-2} = h_3 - h_2 \quad 3.1$$

Aplicând prima lege a termodinamicii, se calculează fluxul termic specific a schimbătorului de căldură recuperativ:

$$q_{6-7} = h_7 - h_6 \quad 3.2$$

Se calculează lucrul mecanic specific la pompă:

$$w_{8-6} = v(p_6 - p_8) \quad 3.3$$

3.3. Modelarea sistemului frigorific cu degivrare pe bază de PCM-uri

Condițiile de operare pentru care a fost aplicat modelul matematic sunt următoarele:

t_o =-30°C, t_c =33°C, Δt_{sh}=15°C, m_{ice} =1.4 kg, Δp =0.6 bar, $\dot{Q}_o$ =4.5 kW, R404A

Fluxul de căldură transferat de la schimbătorul de caldură:

$$\dot{Q}_{pcmhx} = \dot{m}_{ref} \cdot q_{pcmhx} \quad 3.4$$

$Q_{recovery}$reprezintă capacitatea maximă de stocare a PCM-ului

$$Q_{recovery} = \dot{Q}_{pcmhx} \cdot \tau_{cooling} \quad 3.5$$

$\dot{Q}_{defrost}$ este fluxul de căldură transferat de agentul frigorific în procesul de degivrare

$$\dot{Q}_{defrost} = \dot{m}_{defrost} \cdot (h_7 - h_6) \quad 3.6$$

Q_{ice} este căldura primită de gheață în procesul de degivrare.

$$Q_{ice} = m_{ice} \cdot [c_{ice} \cdot (0 - t_{ice}) + \lambda_{ice}] + m_{drain_w} \cdot c_w \cdot (t_{w2} - 0) \quad 3.7$$

$\dot{Q}_{defrost}$ este fluxul de căldură transferat în procesul de degivrare, cedat de PCM.

$$\dot{Q}_{defrost} = m_{pcm} \cdot \frac{\lambda_{pcm}}{\tau_{soldification}} \quad 3.8$$

P_{p_1} este consumul de putere al pompei

$$P_{p_1} = \dot{m}_{ref} \cdot w_{8-6} \quad 3.9$$

Coeficientul de performanță (COP), incluzând procesul de degivrare cu PCM

$$COP_{with\ pump} = \frac{\dot{Q}_0}{P + P_{p_1}} \quad 3.10$$

3.4. Rezultate și Discuții

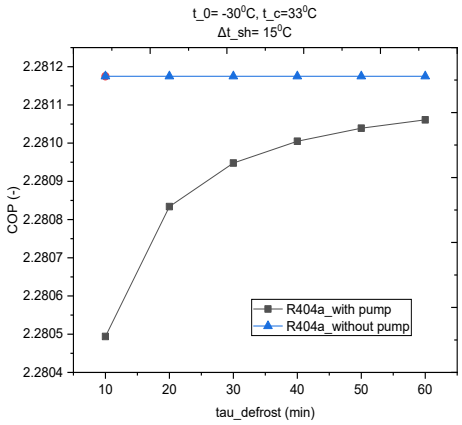


Figura 3.3 – Comparația dintre COP cu pompă și COP fără pompă

Coeficientul de performanță (COP) crește lent odată cu mărirea timpului de degivrare. Se poate observa că COP-ul cu pompă al sistemului frigorific cu degivrare pe bază de PCM este mai mic decât în cazul sistemului frigorific fără PCM. Acest lucru se datorează faptului că puterea pompei are o valoare redusă, ceea ce înseamnă că, în ambele situații, coeficientul de performanță are valori foarte apropiate

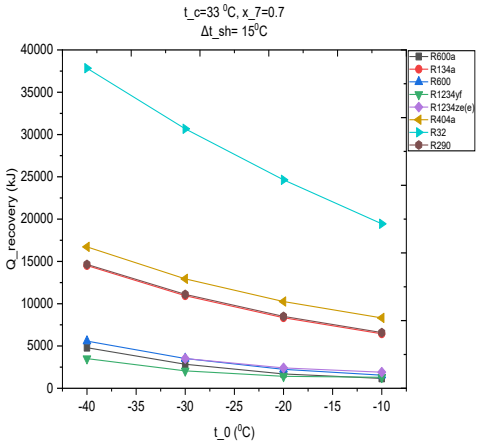


Figura 3.4 – Variația temperaturii de vaporizare cu caldura recuperată cu PCM

Figura arată că creșterea temperaturii de vaporizare conduce la scăderea căldurii recuperate. De asemenea, se poate observa că, în cazul în care sistemul frigorific funcționează la temperaturi de congelare (-15°C până la -40°C), căldura recuperată este mai mare comparativ cu situația în care acesta funcționează la temperaturi de refrigerare (-10°C până la -15°C). Acest lucru se întâmplă deoarece, atunci când temperatura de vaporizare scade, scade și presiunea de vaporizare, ceea ce înseamnă un raport de comprimare mai mare și, ca rezultat, o temperatură de refulare a compresorului (t_2) mai ridicată.

Figura 3.5 arată că creșterea temperaturii de condensare (tc) conduce la creșterea căldurii recuperate.

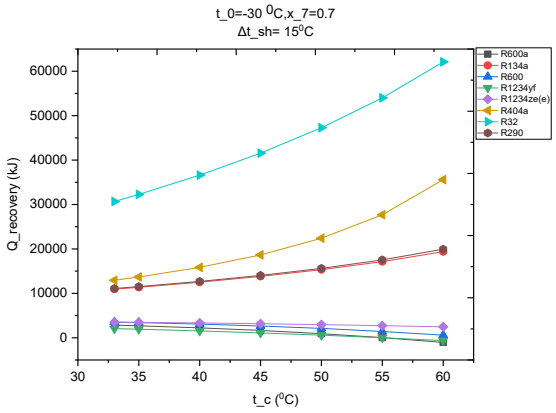


Figura 3.5 - Variația temperaturii de condensare în funcție de caldura recuperată cu PCM.

Capitolul 4

Analiza experimentală a degivrării cu aer sau cu rezistență electrică într-un VCRS

Cercetarea experimentală a fost realizată pe două instalații, având două obiective principale:

1. Stabilirea condițiilor de funcționare ale unui VCRS capabil să mențină o temperatură de 1–4 °C într-o cameră frigorifică de mici dimensiuni.
2. Determinarea proprietăților termofizice ale unui PCM adecvat pentru stocarea energiei termice din gazele de refulare ale compresorului unui VCRS, energie ce poate fi utilizată pentru degivrare.

4.1 Standul experimental

Figura 4.1 arată o reprezentare schematică a instalației experimentale VCRS utilizată în acest studiu.

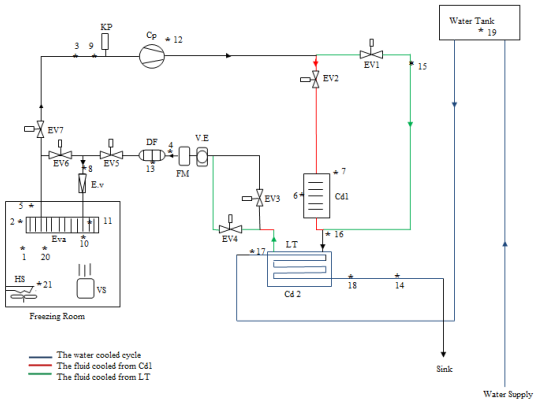


Figura 4.1 Schema instalației VCRS

- **Circuitul frigorific**

Circuitul frigorific, care este alcătuit din: compresor (Cp), condensator (Cd) , vaporizator, ventil de laminare.

4.1.1. Vaporizatorul (Eva)

Vaporizatorul (Eva) este un schimbător de căldură care transferă căldura din spațiul compartimentului frigorific, prin pereții săi sau prin tuburile utilizate în construcția sa, către agentul frigorific din interior.

4.1.2. Compresor (Cp)

Compresorul (Cp) este un dispozitiv mecanic utilizat pentru a crește presiunea și temperatura agentului frigorific care trece de la vaporizator (Eva), caracterizat prin presiune joasă, către condensator (Con), caracterizat prin presiune înaltă.

4.1.3. Condensator (Cd)

Condensatorul (Con) este utilizat pentru a prelua căldura din agentul frigorific și a o evacua în mediul înconjurător.

- **Filtru deshidrator și vizor**

Filtrul deshidrator are un rol important în fiecare sistem frigorific; funcția sa este de a reține umiditatea și impuritățile din agentul frigorific, generate în timpul funcționării VCRS, prevenind astfel blocarea canalului de curgere al agentului frigorific prin ventilul de laminare (E.v). Funcția vizorului este de a detecta prezența agentului frigorific în stare lichidă și conținutul de umiditate.

4.1.4. Ventilul de laminare (E.v)

Ventilul de laminare (E.v) este un dispozitiv utilizat pentru a reduce presiunea ridicată din condensator (Con) la presiunea scăzută din vaporizator (Eva).

- **Conducte și izolație termică**

Sistemul frigorific (RS) este alcătuit din conducte de legătură care conectează mai multe componente. Aceste conducte de legătură sunt realizate din cupru.

- **Aparate de măsură utilizate pe standul experimental VCRS**
- **Măsurarea temperaturii**

În instalația experimentală sunt utilizați doi senzori de temperatură. Sunt folosite două tipuri de senzori de temperatură: NTC de contact și senzor NTC de aer, fără contact, utilizat pentru măsurarea temperaturii aerului din interiorul camerei frigorifice.

- **Măsurarea presiunii**

Sunt utilizați doi senzori de presiune: unul pentru măsurarea presiunii de aspirație și unul pentru măsurarea presiunii de condensare.

- **Panou de control**

Panoul de control, echipat cu controlere Dixell, este utilizat pentru citirea valorilor de temperatură, presiune și umiditate în punctele selectate ale circuitului experimental.

- **Dispozitiv de achiziție a datelor**

Mărimile măsurate pe standul experimental VCRS sunt înregistrate, stocate și transmise cu ajutorul unui dispozitiv special (XWEB500-EVO).

- **Sursa de căldură**

Pentru a asigura funcționarea neîntreruptă a standului experimental VCRS și pentru a simula o sarcină termică, în interiorul camerei frigorifice a fost amplasată o sursă de căldură.

- **Dispozitiv de alimentare cu tensiune variabilă**

Reglarea funcționării încălzitorului de aer se realizează cu ajutorul regulatorului de temperatură DIXELL XR20CX. Regulatorul de temperatură este instalat într-o carcasă amplasată în interiorul camerei frigorifice.

- **Funcționarea standului experimental**

Funcționarea standului utilizând Cd1 necesită deschiderea vanelor electromagnetice EV1, EV4, EV5, EV6 și EV7 (Figura 4.1), respectiv închiderea EV2 și EV3.

4.2 Rezultate și discuții

Această secțiune prezintă rezultatele studiului experimental. Ea conține o analiză comparativă a parametrilor funcționali ai VCRS, utilizând degivrare cu încălzire electrică și degivrare cu aer. Din această analiză experimentală au fost extrase mai multe determinări, realizate în următoarele condiții (Tabelul 4.1).

Tabel 4.1 Condițiile fizice și termice în care au fost realizate determinările experimentale

	Degivrarea electrica	Degivrare cu aer
Temperatura mediului ambiant	25ºC	25ºC
Umiditatea relativă a mediului ambiant	65%	30%
Conținutul de umiditate a mediului ambiant	$6 \cdot 10^{-3} kg_v/kg_{aus}$	$6 \cdot 10^{-3} kg_v/kg_{aus}$
Temperatura din interiorul spațiului răcit	4ºC	4ºC

Figurile 4.2a și **4.2b** prezintă variația consumului instantaneu de putere al compresorului pe parcursul unui ciclu complet de funcționare, pentru ambele metode de degivrare. În zona Ia, puterea consumată de compresor este mai mică în varianta a (degivrare electrică) decât în varianta b (degivrare cu aer), până când sistemul atinge o stare stabilă de funcționare. Totuși, puterea medie consumată de compresor în ambele situații este aproximativ aceeași: 484 W pentru degivrarea electrică și 482 W pentru degivrarea cu aer.

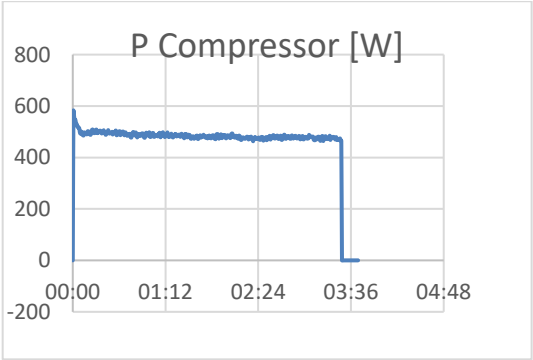


Figura 4.2a Variația în timp a puterii la compresor (degivrare cu încălzire electrică)

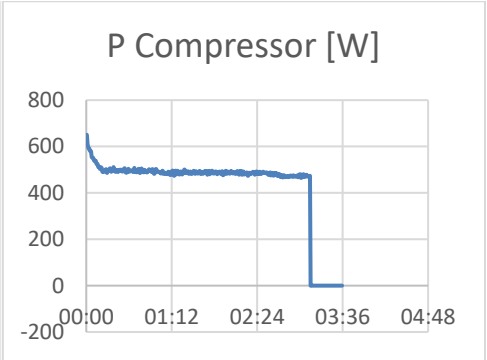


Figura 4.2b Variația în timp a puterii la compresor (degivrare cu aer)

Figurile 4.3a și **4.3b** prezintă modul în care puterea electrică necesară procesului de degivrare variază în timp. Așa cum era de așteptat, puterea instantanee consumată în varianta (a) este mai mare decât în varianta (b). Totuși, și durata procesului de degivrare este importantă, deoarece influențează atât consumul mediu, cât și consumul total de energie.

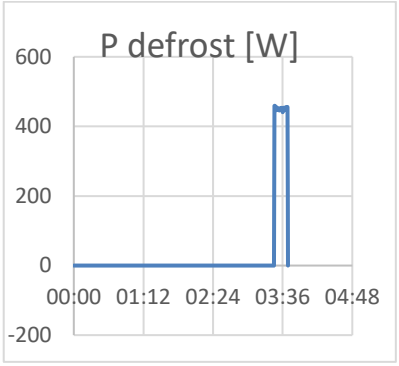


Figura 4.3a Variația în timp a puterii de degivrare (degivrare cu încălzire electrică)

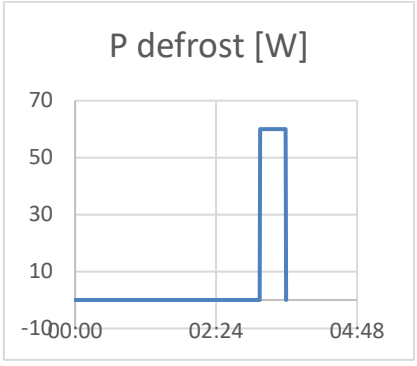


Figura 4.3b Variația în timp a puterii de degivrare (degivrare cu aer)

Figurile 4.4a și **4.4b** arată variația în timp a consumului total de energie pentru două sisteme. Se observă că sistemul care utilizează degivrarea electrică consumă mai multă energie decât cel care folosește degivrarea cu aer. Mai exact, consumul de energie al sistemului cu degivrare electrică este de 2,6 kWh, comparativ cu 2,4 kWh pentru sistemul cu degivrare cu aer, rezultând o diferență de aproximativ 8%. Această diferență poate fi atribuită rezistenței electrice, care consumă de aproximativ șapte ori mai multă energie decât ventilatorul. Deși rezistența electrică funcționează jumătate din timpul de funcționare al ventilatorului în perioada de degivrare, consumul total de energie pe durata unui ciclu complet răcire–degivrare rămâne mai ridicat în cazul sistemului cu degivrare electrică decât în cazul sistemului cu degivrare cu aer.

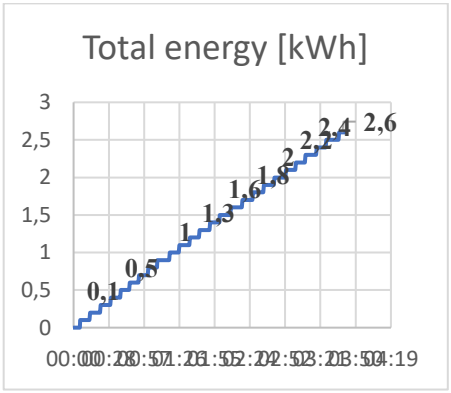


Figura 4.4a Variația în timp a energiei totale (degivrare cu încălzire electrică)

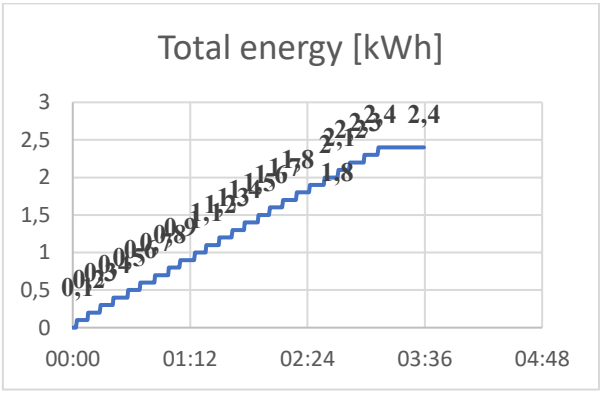


Figura 4.4b Variația în timp a energiei totale (degivrare cu aer)

Capitolul 5

Studiu experimental privind utilizarea PCM-urilor pentru stocarea energiei termice

Acest capitol se concentrează pe cel de-al doilea obiectiv experimental, care constă în determinarea căldurii latente de fuziune a unui PCM specific, precum și în analiza funcțională a unei unități de stocare a energiei termice de tip țeavă în țeavă, care utilizează acest PCM.

5.1 Standul experimental

Configurația experimentală a fost concepută pentru a investiga efectele variațiilor temperaturii de intrare și ale debitului asupra performanței proceselor de topire și solidificare ale PCM-ului în interiorul sistemelor de schimbătoare de căldură verticale de tip manta-țeavă (VSTHX). Figurile 5.2 și 5.1 prezintă schema și fotografia buclei experimentale.

5.1.1 Secțiunea de testare

Această investigație experimentală a utilizat o configurație verticală pentru schimbătorul de căldură de tip manta și țeavă; secțiunea de testare a inclus manta, țeava, capacul superior din plastic și PCM.

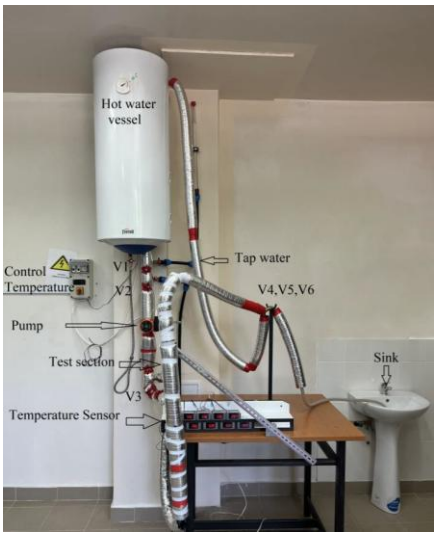


Figure 5.1 The components of the experimental rig

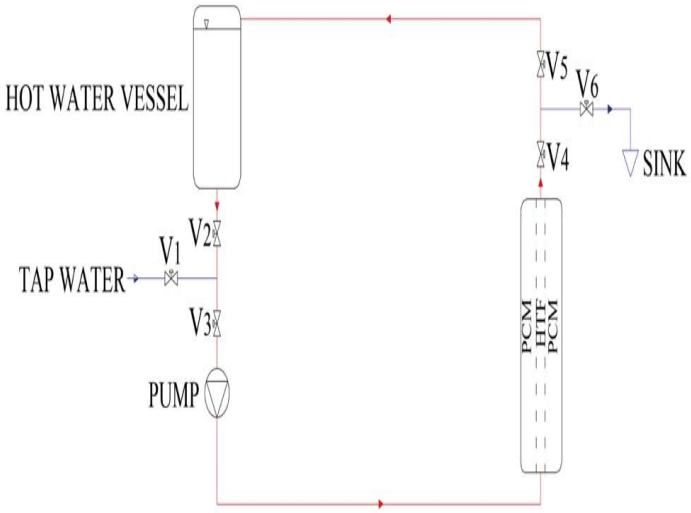


Figure 5.2 Schematic diagram of the experimental Loop

- **Manta**

Este un tub din cupru, cu lungimea de 1 m, diametrul exterior de 28 mm și grosimea peretelui de circa 1 mm.

- **Țeavă**

Este o țeavă de cupru cu lungimea de 1,2 m, diametrul exterior de 10 mm și grosimea de aproximativ 1 mm.

- **Capac**

A fost utilizat un capac din plastic pentru etanșarea capătului superior al țevii, pentru a preveni orice posibilă scurgere a materialului cu schimbare de fază (PCM) în stare lichidă în timpul procesului de topire.

- **Materiale cu schimbare de fază (PCM)**

În prezenta lucrare au fost utilizate cinci tipuri de PCM-uri pentru stocarea energiei termice: RT 54 HC, RT 44 HC, RT 35 HC, SP 50 și SP 31 (Rubitherm).

5.1.2 Echipament auxiliar

Scopul principal al tubului de test este stocarea energiei termice acumulate în sistemul de stocare a energiei termice (TES), reprezentat de PCM. Energia stocată este transferată de un agent de transfer termic (HTF), reprezentat de apă, care circulă în buclă închisă prin secțiunea de test.

5.1.2.1 Recipientul cu apă caldă

Recipientul cu apă caldă utilizat în instalația experimentală este un boiler electric. Încălzitorul electric funcționează ca sursă de energie termică, prin transformarea energiei electrice în căldură.

- **Procesul de încărcare (procesul de topire)**

Debitul de apă caldă necesar procesului de topire a PCM-ului este furnizat de boilerul descris anterior. Apa caldă (HTF) a fost preparată la temperaturi mai mari decât temperatura de topire a PCM-ului testat. Pentru PCM-ul SP50, testele au fost realizate cu apă la 60, 65 și 70 °C, asigurând o diferență de temperatură la topire de aproximativ 5, 10 și 15 °C. Testele au fost efectuate pentru debite diferite ale apei, în intervalul 0,009–0,020 kg/s. În testele cu SP50, debitul apei calde pentru încălzire a fost de 0,097 kg/s la o temperatură a apei de 60 °C. În acest caz, supapele V2, V3, V4 și V5 sunt deschise, iar V1 și V6 sunt închise. Debitul este reglat cu ajutorul supapelor V2 și V3.

- **Procesul de descărcare (procesul de solidificare)**

Apa rece este utilizată într-un sistem cu circuit deschis, fiind alimentată din rețeaua municipală. În timpul fazei de descărcare (solidificare a PCM-ului), supapele V1, V3, V4 și V6 sunt deschise, iar V2 și V5 sunt închise.

- **Materiale cu schimbare de fază**

În acest studiu, au fost utilizate ca PCM-uri cinci tipuri diferite de parafină comercială: RT 54 HC, RT 44 HC, RT 35 HC, SP 50 și SP 31 (Rubitherm). Pentru aceste tipuri de parafină au fost realizate investigații experimentale în vederea determinării punctelor de început și de final ale topirii și solidificării, precum și a valorilor corespunzătoare ale căldurii latente. Datele experimentale obținute au fost utilizate ulterior în analiza teoretică [171] pentru a evalua cantitatea de căldură ce poate fi recuperată și stocată eficient pentru procesul de degivrare al VCRS, luând în considerare următorii agenți frigorifici: R600a, R600, R1234yf, R1234ze, R152a, R290 și R32.

5.1.3 Dispozitive de măsurare

În desfășurarea studiului experimental, au fost utilizate echipamente pentru măsurarea temperaturii (senzori de contact și senzori de imersie), un debitmetru pentru apă caldă și controlere digitale pentru achiziția și procesarea semnalelor.

5.1.3.1 Senzor de temperatură

Pentru monitorizarea proceselor care au loc în PCM, VSTHX-ul a fost echipat cu nouă senzori de temperatură, așa cum este prezentat în Figura 5.3. În acest mod, temperatura PCM-ului a fost monitorizată pe cinci niveluri (vezi Tabelul 5.1), corespunzătoare punctelor 1, 2, 3, 4 și 5. Semnificația senzorilor de temperatură montați de-a lungul VSTHX este prezentată în Tabelul 5.1. Senzorii T_1 și T_2 măsoară temperatura apei la intrarea și ieșirea din tub.

Senzorii T_4, T_5, T_6 și T_7 măsoară temperatura la cele cinci niveluri de pe suprafața exterioară a VSTHX, iar senzorii T_8 și T_9 măsoară temperatura PCM-ului în spațiul intertubular.

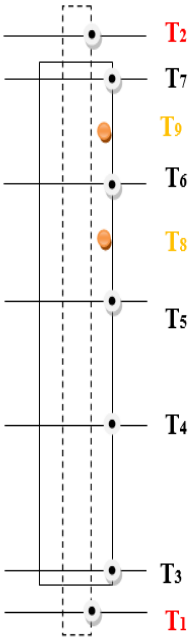


Figura 5.3 Amplasarea senzorilor de temperatură pe VSTHX

Tabel 5.1. Senzori de temperatură pe VSTHX

VSTHX nivel	Puncte de măsurare	Descrierea punctului de măsurare
	T_1	Temperatura apei calde/reci la intrare
	T_2	Temperatura apei calde/reci la ieșire
1	T_3	Temperatura la nivelul 1 pe suprafața VSTHX
2	T_4	Temperatura la nivelul 2 pe suprafața VSTHX
3	T_5	Temperatura la nivelul 3 pe suprafața VSTHX
4	T_6	Temperatura la nivelul 4 pe suprafața VSTHX
5	T_7	Temperatura la nivelul 5 pe suprafața VSTHX
	T_8	Temperatura PCM-ului între nivelurile 3 și 4
	T_9	Temperatura PCM-ului între nivelurile 4 și 5

5.1.3.2 Debitmetru de apă

Debitul apei calde în timpul ciclului de topire, precum și debitul apei reci în timpul ciclului de solidificare, este măsurat cu ajutorul unui debitmetru.

5.1.3.3 Cronometru

Baza de timp pentru efectuarea măsurătorilor experimentale a fost asigurată de consola EMERSON și de calculatorul utilizat pentru descărcarea datelor.

5.2. Rezultate și discuții

Acest capitol prezintă datele experimentale obținute pentru PCM-ul SP50. Figura 5.4 ilustrează variația temperaturii PCM-ului. Graficul prezintă două temperaturi medii. Temperatura medie totală reprezintă media tuturor temperaturilor care caracterizează PCM-ul pe toate cele șapte niveluri. Temperatura medie externă reprezintă media celor cinci temperaturi măsurate la exteriorul tubului.

Din grafic se identifică șapte zone care caracterizează un ciclu complet de încălzire, topire, supraîncălzire, echilibru termic, răcire după supraîncălzire, solidificare, subrăcire și echilibru termic. Diferența dintre cele două temperaturi medii poate fi explicată prin faptul că temperatura măsurată de senzorii imersați în PCM crește valoarea temperaturii medii. Evaluarea temperaturii cu senzori montați pe exteriorul tubului introduce o eroare datorată rezistenței termice a peretelui, rezultând o diferență de temperatură între PCM și exteriorul tubului.

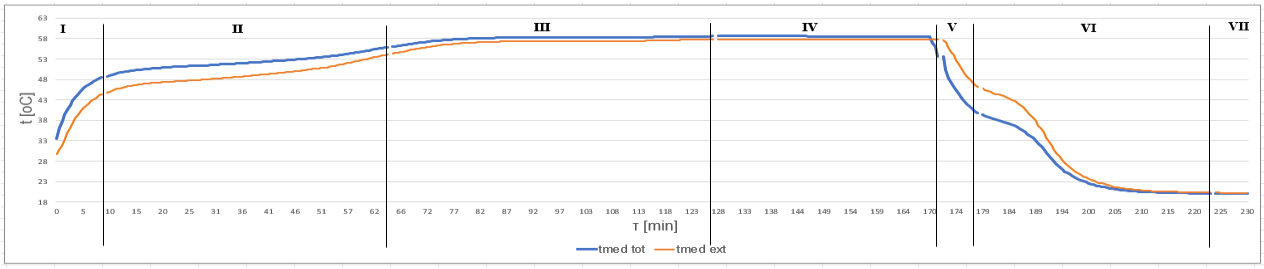


Figura 5.4 Evoluția în timp a temperaturii medii a PCM-ului

În Figura 5.5 este prezentată variația temperaturii apei la intrarea și ieșirea din VSTHX. Se poate observa diferența de temperatură, care este inițial mare, de aproximativ 20 °C, până când părțile componente ating echilibrul termic, după care aceasta scade semnificativ. În zona de echilibru termic IV, diferența se stabilizează la 1 °C.

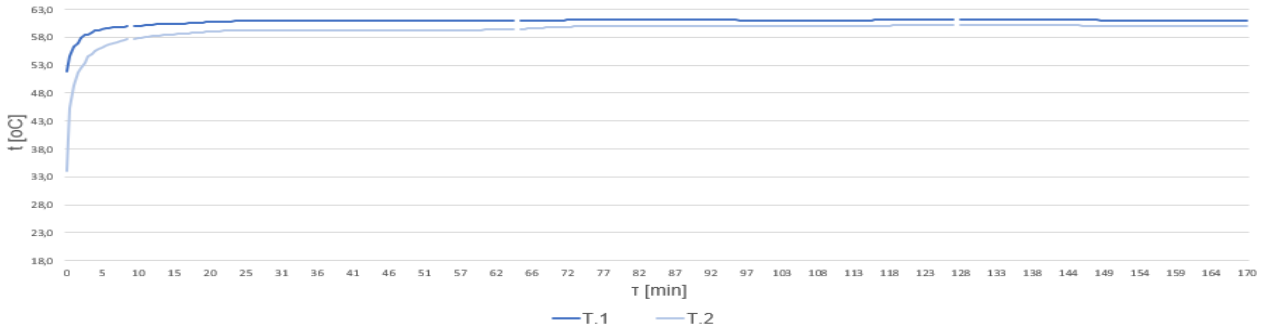


Figura 5.5 Variația temperaturii apei la intrare și ieșire în timpul procesului de topire al PCM

Figura 5.6 este relevantă deoarece arată că procesul de topire, precum și procesul de solidificare, nu au loc continuu pe toate secțiunile tubului. Aceasta înseamnă că, la nivelurile inferioare, topirea nu avansează uniform pe înălțimea tubului. Există zone inferioare în care PCM-ul rămâne solid, în timp ce în zonele superioare topirea a început deja. Acest comportament poate fi explicat prin două ipoteze: conducție rapidă la nivelul tubului exterior și deplasarea ascendentă a PCM-ului topit și supraîncălzit către secțiunile superioare ale tubului, ceea ce favorizează inițierea topirii parafinei.

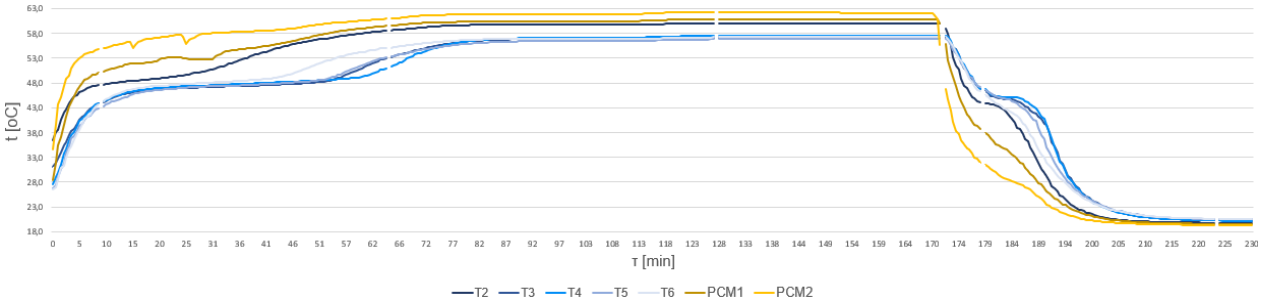


Figura 5.6 Variația temperaturii SP50 de-a lungul tubului, pe cele șapte secțiuni analizate

Din ecuația bilanțului termic se calculează o căldură latentă medie de topire și solidificare pentru întregul proces.

$$Q_{PCM} = \left(\dot{Q}_w - \dot{Q}_{amb}\right) \cdot \tau_{process} - Q_{cooper} \quad 5.1$$

Fluxul de căldură furnizat de apa caldă:

$$\dot{Q}_W = \dot{m}_w \cdot \bar{c}_w \cdot \overline{\Delta t}_w \quad 5.2$$

Fluxul de căldură furnizat de apa caldă:

$$\dot{Q}_{amb} = \dot{m}_w \cdot \bar{c}_w \cdot \overline{\Delta t}_{weq} \quad 5.3$$

Căldura absorbită de tub și de componentele din cupru:

$$Q_{cooper} = m_{cooper} \cdot c_{cooper} \cdot \Delta t_{cooper} \quad 5.4$$

Așa cum s-a menționat la începutul capitolului, determinările experimentale efectuate oferă informații interesante privind modul în care schimbarea de fază are loc pe verticală în tub. Temperatura medie oferă informații importante în acest sens.

Pentru o temperatură a apei de 60°C, Figura 5.7 prezintă evoluția procesului de topire a SP50 în cele 5 secțiuni în care senzorii sunt montați pe exteriorul tubului. Zona portocalie reprezintă intervalul de topire al PCM-ului (50–51°C), determinat în cele cinci secțiuni de măsurare. Se observă că temperatura de topire este atinsă mai întâi în secțiunea de bază, secțiunea 1, apoi, „surprinzător", următoarea secțiune în care are loc topirea este la nivelul 5, în partea superioară a tubului. Topirea continuă la nivelul 2, către bază, apoi la nivelul 4, către capătul tubului. Secțiunea în care topirea are loc cel mai târziu este secțiunea 3, aflată la mijlocul tubului. Procesul nu este surprinzător dacă luăm în considerare cele două ipoteze menționate anterior: o rată ridicată de transfer termic prin conducție de-a lungul tubului exterior și o mișcare gravitațională ascendentă a parafinei topite și supraîncălzite, care favorizează topirea parafinei în secțiunile superioare 4 și 5.

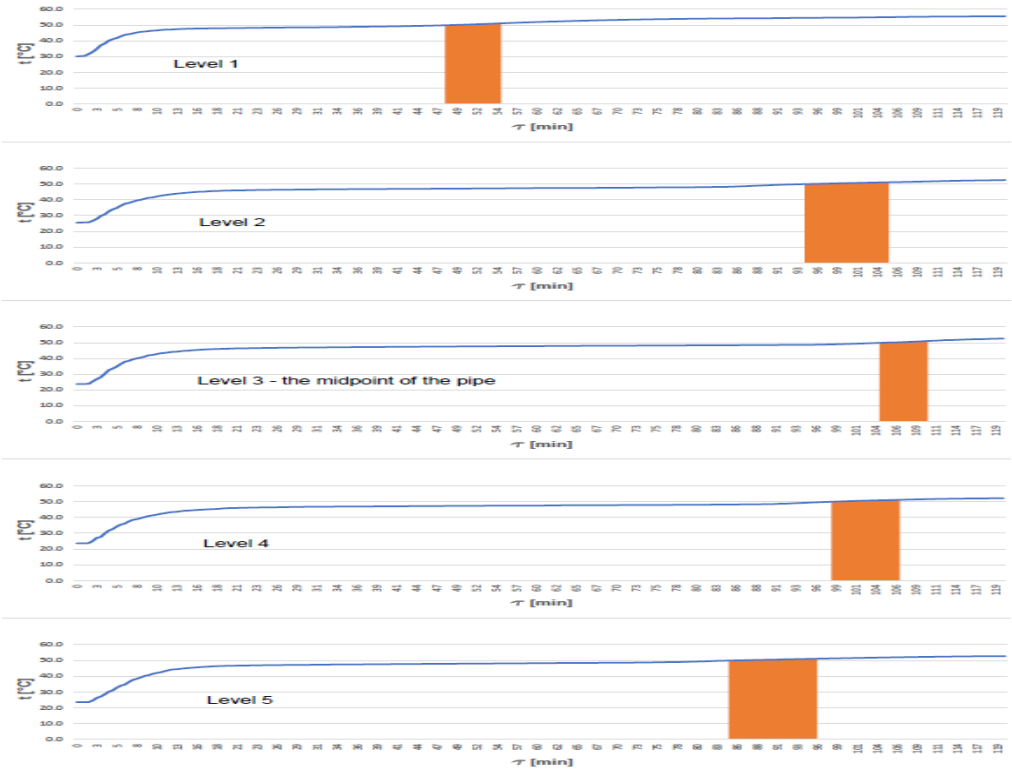


Figura 5.7. Analiza profilurilor de temperatură de-a lungul conductei în timpul schimbării de fază a PCM-ului la o temperatură a apei de 60°C.

Utilizarea unei temperaturi a apei de 65°C accelerează procesul de topire a parafinei. Acest aspect este evidențiat în Figura 5.8.

În secțiunea de bază, topirea este inițiată după 26 de minute, comparativ cu 48 de minute în cazul utilizării unei temperaturi a apei de 60°C. De asemenea, topirea este finalizată în secțiunea mediană după 64 de minute, comparativ cu 110 minute în cazul utilizării unei temperaturi a apei de 60°C.

Figura 5.9 prezintă evoluția topirii SP50 în cazul alimentării VSTHX cu apă la 70°C. Ca și în cazul anterior, creșterea temperaturii apei reduce timpul de topire. Topirea începe în secțiunea de bază după 20 de minute. Finalizarea are loc tot în secțiunea mediană 3 și se realizează după 42 de minute.

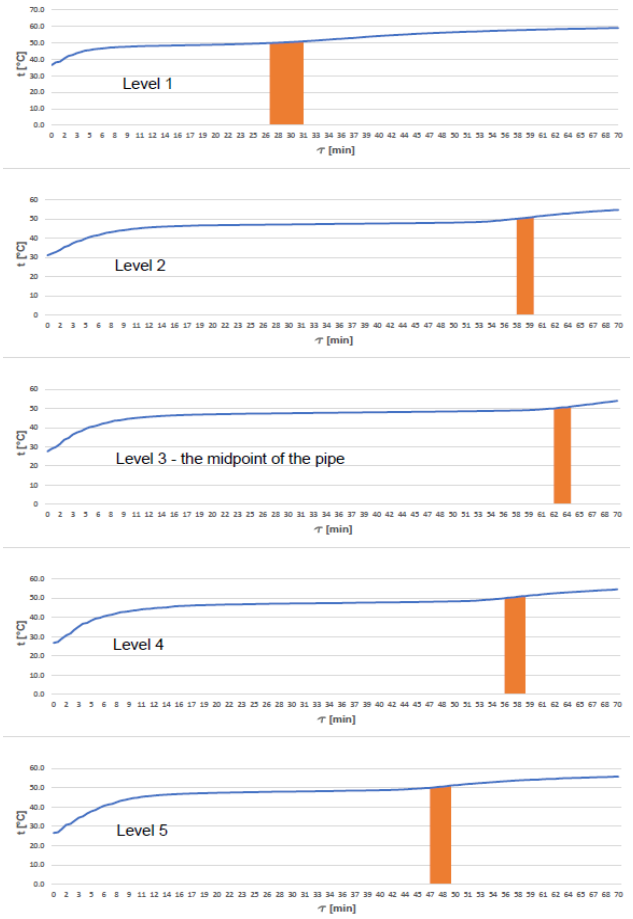


Figura 5.8 Analiza profilurilor de temperatură de-a lungul conductei în timpul schimbării de fază a PCM-ului la o temperatură a apei de 65°C

Ca sinteză a rezultatelor prezentate în Figurile 5.6, 5.7 și 5.8, Figura 5.9 evidențiază impactul temperaturii apei asupra intervalului de schimbare de fază al PCM-ului SP50.

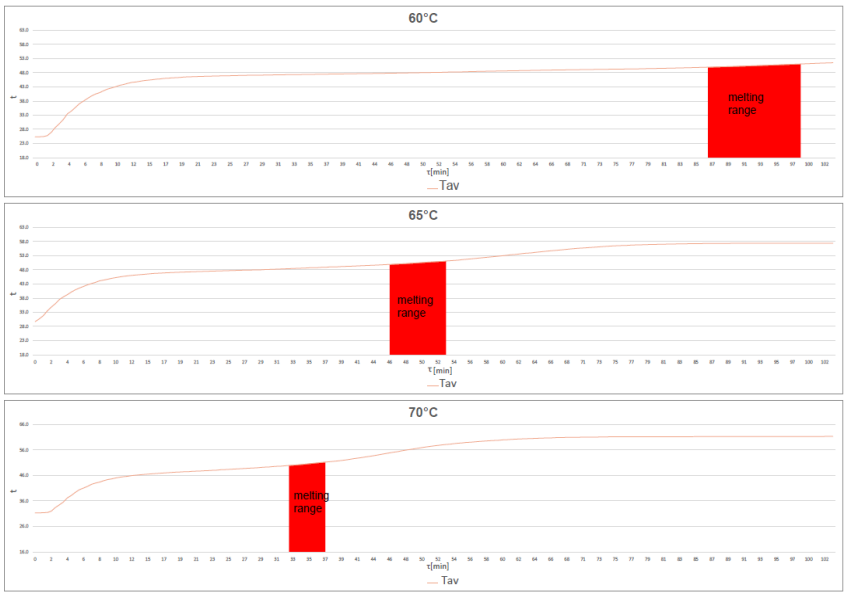


Figura 5.9 Impactul temperaturii apei asupra intervalului de schimbare de fază al PCM-ului SP50

Se observă că, pe măsură ce temperatura apei crește, inițierea și finalizarea procesului de topire au loc mai rapid, iar intervalul de topire este mai scurt. Aceste concluzii pot fi formulate din analiza modului în care temperatura medie din tub evoluează în timp. Intervalele de început și de sfârșit ale topirii sunt definite de temperaturile de 50, respectiv 51°C.

Capitolul 6
Comparație între metodele de degivrare pentru diferiți agenți frigorifici

În acest capitol a fost realizată analiza performanțelor unui sistem frigorific care funcționează cu diferiți agenți frigorifici, pentru patru metode de degivrare (cu aer, încălzire electrică, gaze calde și PCM), în cadrul unui sistem frigorific existent în laboratorul de Termodinamică Tehnică, Departamentul de Termodinamică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, România. Au fost efectuate analize termodinamice pentru agenții frigorifici: R290, R134a, R600a, R600, R404A, R32, R1234yf și R1234ze(E), pe o perioadă de 24 de ore de funcționare în regim de răcire.

6.1. Introducere

Metoda de degivrare constă în stocarea energiei termice din gazele de refulare ale compresorului, utilizând un material cu Schimbare de Fază (PCM). Aceasta poate fi aplicată sistemelor VCR în anumite condiții de funcționare și pentru anumiți agenți frigorifici (așa cum este prezentat în acest capitol). Avantajele acestui sistem combină beneficiile degivrării cu gaze calde cu un consum redus de energie și protecția vaporizatorului, deoarece temperatura mediului de degivrare este mai scăzută decât în cazul degivrării cu gaze calde.

6.2. Modelul matematic al unui VCRS cu proces de degivrare

În acest paragraf, efectele diferitelor metode de degivrare (cu aer, încălzire electrică, gaze calde și PCM) pentru rezolvarea problemei formării gheții au fost investigate teoretic [167]. Abordarea este realizată în două etape:

- din următoarea listă de agenți frigorifici — R134a, R32, R404A, R1234yf, R1234ze(E), R600, R600a, R290 — sunt selectați cei care, din punct de vedere teoretic, îndeplinesc condiția de stocare a unei energii termice suficiente pentru a permite degivrarea bazată pe PCM (temperatura de refulare și energia termică recuperabilă și stocabilă);

- pentru agenții frigorifici selectați, se realizează un studiu comparativ privind eficiența energetică (COP) pentru patru metode de degivrare: degivrare cu aer, degivrare electrică, degivrare cu gaze calde și degivrare cu PCM. Deoarece este același sistem, funcționarea VCRS în regim de răcire este identică, în timp ce funcționarea în regim de degivrare diferă. Ca urmare, modelul matematic pentru regimul de răcire este același, însă diferă pentru perioada de degivrare.

Ciclul de funcționare al VCRS în regim de răcire, pentru cele patru metode de degivrare, este prezentat în Figura 6.1, unde:

1–2: proces de comprimare, 2–3: de-supraîncălzire, 3–4: condensare și subrăcire, 4–5: laminare, 5–1": vaporizare, 1"–1: supraîncălzire.

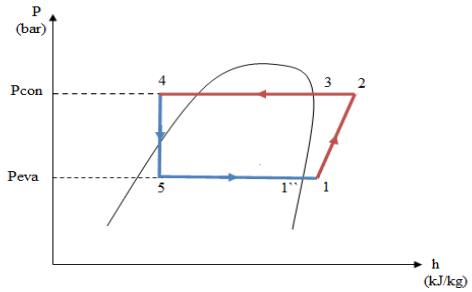


Figura 6.1. Ciclul termodinamic al VCRS cu PCM

Figurile 6.2, 6.3, 6.4 și 6.5 prezintă schemele de funcționare ale VCRS cu cele patru sisteme de degivrare, unde Eva este vaporizatorul, Cp compresorul, Con condensatorul, E.v ventilul de laminare, F1 ventilatorul vaporizatorului, F2 ventilatorul condensatorului, LR rezervorul de lichid, EH încălzitorul electric, CT tubul capilar, P pompa, LS separatorul de lichid, iar PCMhx schimbătorul de căldură cu PCM.

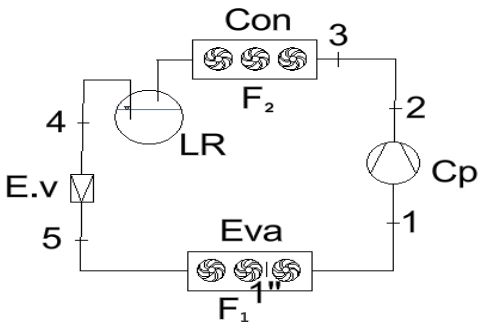


Figura. 6.2. Metoda de degivrare cu aer

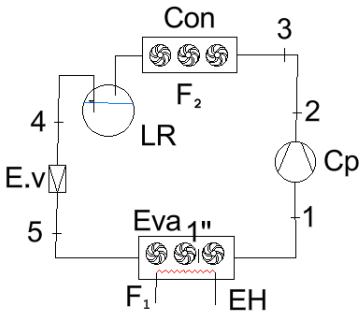


Figura 6.3. Metoda de degivrare cu încălzire electrica

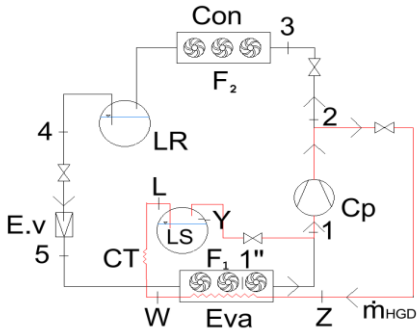


Figura. 6.4. Metoda de degivrare cu gaze calde

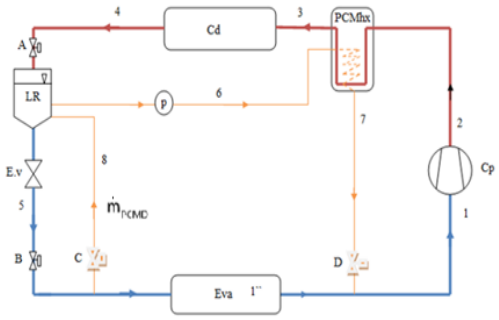


Figura. 6.5. Metoda de degivrare cu PCM

Echipamentul a fost utilizat pentru analiza celor patru tipuri de degivrare, luând în considerare următorii agenți frigorifici: R290, R134a, R600a, R600, R404A, R32, R1234yf și R1234ze(E). Analiza a fost realizată utilizând software-ul Engineering Equation Solver [168]. Modelul matematic a fost construit pe baza articolelor științifice [164, 167, 169, 170].

6.2.1 Modelul matematic pentru degivrarea cu aer a VCRS

Puterea electrică totală necesară, $\dot{E}_{cons}$ așa cum este exprimată în Ecuația (6.1), a fost calculată pentru degivrarea cu aer:

$$\dot{E}_{cons} = z_{24h}^{cycle} \cdot \left[\frac{\tau_{cooling}}{\tau_{cycle}} \cdot (P_{cp} + P_{F_1} + P_{F_2}) + \frac{\tau_{defrost}}{\tau_{cycle}} \cdot P_{F_1} \right] \quad 6.1$$

Coeficientul de performanță (COP) al ciclului frigorific, cu și fără degivrare, este dat de relațiile [167]:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_0}{P_{cp}} \quad [-] \tag{6.2}$$

$$COP_{with\,defrost} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{E}_{cons}} \quad [-] \tag{6.3}$$

Modelul matematic a fost construit pe baza schemei logice prezentate în Figura 6.6.

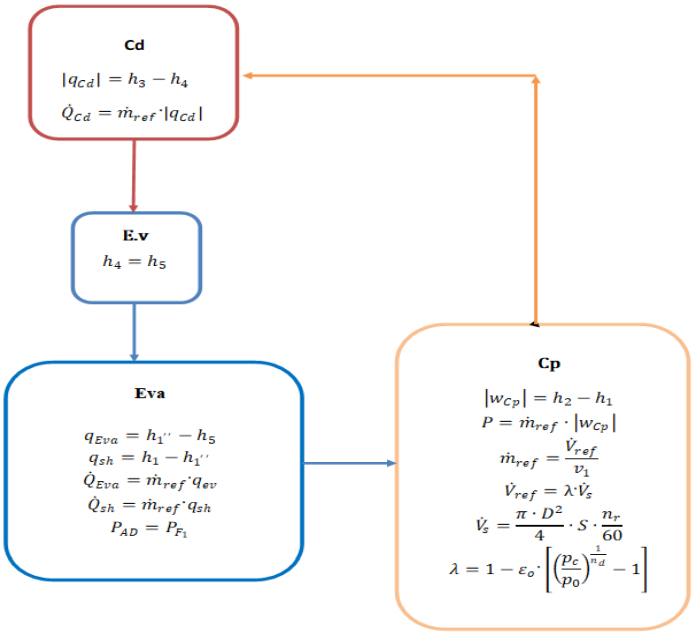


Figura 6.6. Schema logică a modelului matematic al VCRS cu degivrare cu aer

6.2.2 Modelul matematic pentru degivrarea cu încălzire electrică a VCRS

Puterea electrică totală necesară, $\dot{E}_{cons}$ așa cum este exprimată în Ecuațiile (6.4)

$$\dot{E}_{cons} = z_{24h}^{cycle} \cdot \left[\frac{\tau_{cooling}}{\tau_{cycle}} \cdot (P_{cp} + P_{F_1} + P_{F_2}) + \frac{\tau_{defrost}}{\tau_{cycle}} \cdot P_{EHD} \right] \tag{6.4}$$

Coeficientul de performanță (COP) al ciclului frigorific, cu și fără degivrare, este dat de relațiile [167]:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_0}{P_{cp}} \quad [-] \tag{6.5}$$

$$COP_{with\,defrost} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{E}_{cons}} \quad [-] \tag{6.6}$$

Modelul matematic a fost construit pe baza schemei logice prezentate în Figura 6.7.

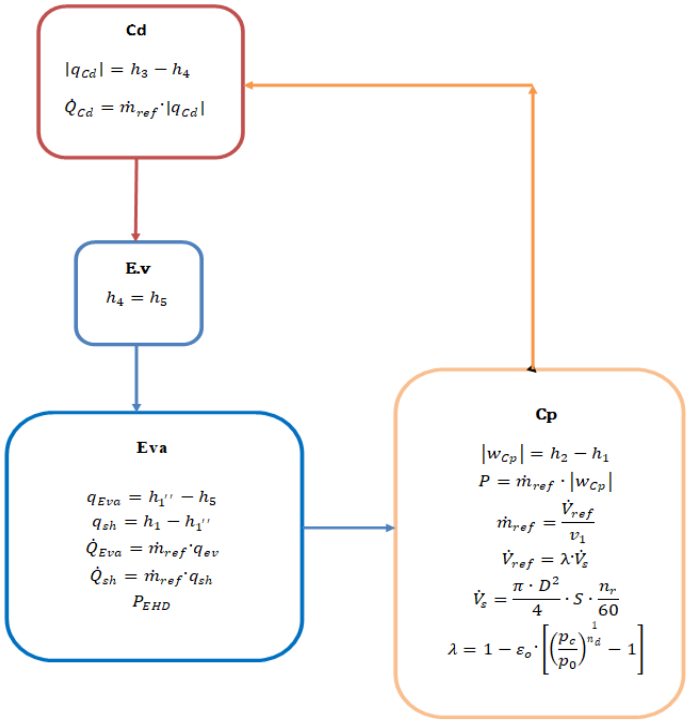


Figura 6.7. Schema logică a modelului matematic al VCRS cu degivrare cu încălzire electrică

6.2.3 Modelul matematic pentru degivrarea cu gaze calde a VCRS

Puterea electrică totală necesară, $\dot{E}_{cons}$ așa cum este exprimată în Ecuațiile (6.7) calculate pentru degivrarea cu gaze calde: $\dot{E}_{cons} = z_{24h}^{cycle} \cdot \left[\frac{\tau_{cooling}}{\tau_{cycle}} \cdot (P_{cp} + P_{F_1} + P_{F_2}) + \frac{\tau_{defrost}}{\tau_{cycle}} \cdot P_{HGD} \right]$ 6.7

Coeficientul de performanță (COP) al ciclului frigorific, cu și fără degivrare, este dat de relațiile [167]:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_0}{P_{cp}} \quad [-] \qquad 6.8$$

$$COP_{with\,defrost} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{E}_{cons}} \quad [-] \qquad 6.9$$

Modelul matematic a fost construit pe baza schemei logice prezentate în Figura 6.8.

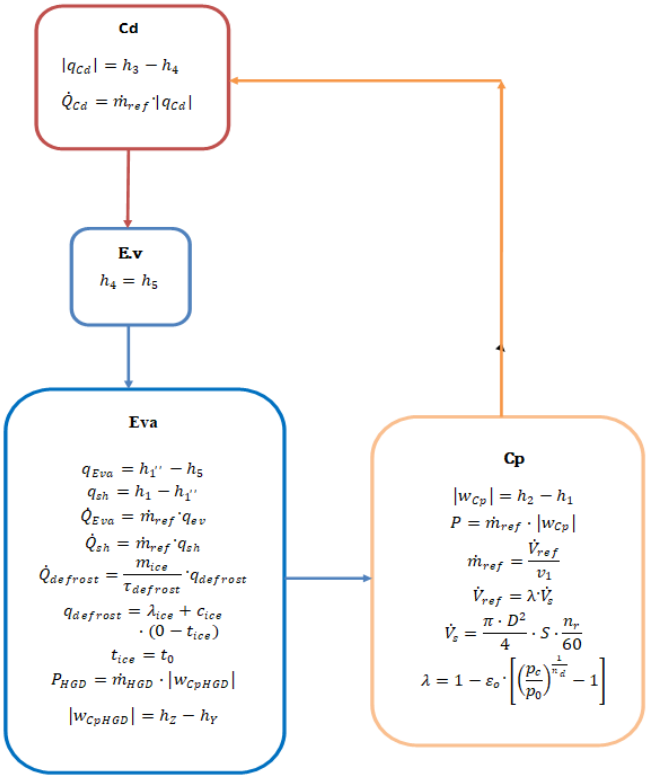


Figure 6.8. Schema logică a modelului matematic al VCRS cu degivrare cu gaze calde

6.2.4 Modelul matematic pentru degivrarea cu PCM a VCRS

Puterea electrică totală necesară, $\dot{E}_{cons}$ așa cum este exprimată în Ecuațiile (6.10) calculată pentru degivrarea cu PCM

$$\dot{E}_{cons} = z_{24h}^{cycle} \cdot \left[\frac{\tau_{cooling}}{\tau_{cycle}} \cdot (P_{cp} + P_{F_1} + P_{F_2}) + \frac{\tau_{defrost}}{\tau_{cycle}} \cdot P_{PCM\,D} \right] \quad 6.10$$

Coeficientul de performanță (COP) al ciclului frigorific, cu și fără degivrare, este dat de relațiile [167]:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_0}{P_{cp}} \quad [-] \quad 6.11$$

$$COP_{with\,defrost} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{E}_{cons}} \quad [-] \quad 6.12$$

Modelul matematic a fost construit pe baza schemei logice prezentate în Figura.6.9.

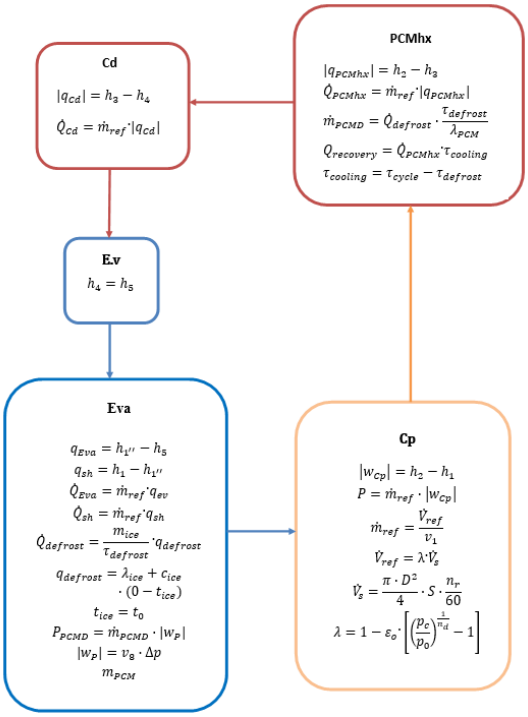


Figure 6.9. Schema logică a modelului matematic al VCRS cu degivrare cu PCM

6.3. Rezultate și discuții

În prima etapă, capacitatea de recuperare a energiei termice din gazele de refulare pentru degivrarea cu PCM a fost evaluată prin doi parametri: temperatura de refulare și cantitatea de căldură care poate fi recuperată și stocată. Pe baza proprietăților termofizice specifice PCM SP50, a fost realizată selecția agenților frigorifici pentru care utilizarea acestei substanțe în degivrarea cu PCM este fezabilă.

În a doua etapă, modelele matematice au fost rulate pentru toate tipurile de degivrare (cu aer, rezistență electrică, gaze calde și PCM), realizându-se o analiză comparativă a funcționării VCRS pe o perioadă de 24 de ore pentru agenții frigorifici selectați.

Modelele matematice pentru toți agenții frigorifici selectați au fost rulate pe baza temperaturilor determinate experimental, considerând comprimare izentropică. Pentru regimul „R404 exp", consumul specific și puterea compresorului au fost determinate pe baza temperaturii de refulare măsurate pe instalație.

Figura 6.10 prezintă, în mod centralizat, temperaturile de refulare ale compresorului obținute din calcule pentru toți agenții frigorifici analizați. Se poate observa că doar o parte dintre aceștia se caracterizează printr-o temperatură mai mare decât temperatura de topire a PCM SP50 (t_{topire} = 50–51 °C).

Nivelul temperaturii de refulare al celorlalți agenți frigorifici (vezi Figura 6.10) și Δh din procesul de de-supraîncălzire, care determină energia termică stocabilă (vezi Figura 6.11), nu permit recuperarea căldurii din procesul de comprimare în regim de răcire; prin urmare, analiza a fost realizată doar pentru agenții frigorifici R290, R404A, R32 și R134a.

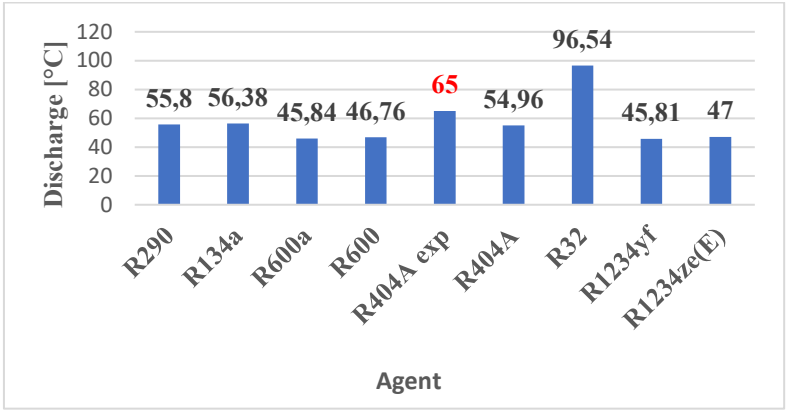


Figura 6.10 prezintă temperatura de refulare la ieșirea din compresor pentru toți agenții frigorifici.

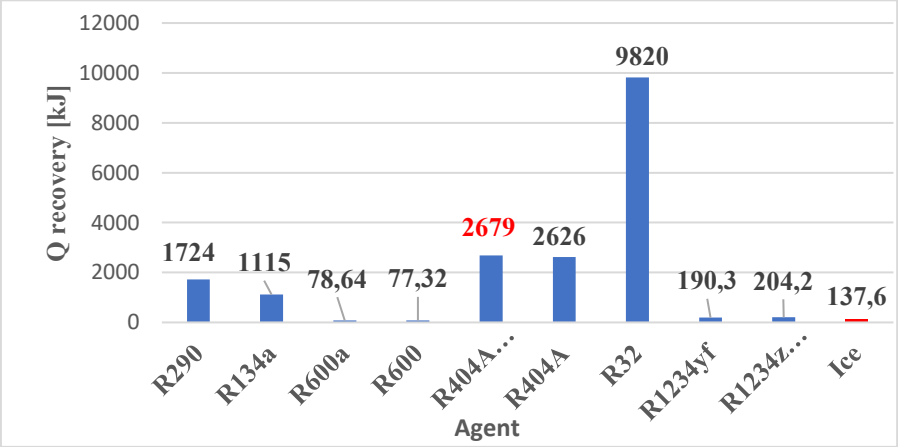


Figure 6.11 prezinta Q recuperată pentru toți agenții frigorifici.

Din Figura 6.11 se poate observa că, din punctul de vedere al furnizării energiei termice prin recuperare și stocare, agentul frigorific R32 se evidențiază semnificativ, urmat de R404A, R290 și R134a. Atât din perspectiva nivelului de temperatură, cât și a cantității de căldură recuperate și stocate, agentul frigorific R32 este cel mai potrivit pentru degivrarea cu PCM-SP50 (vezi Figura 6.11), urmat de R404A, R290 și R134a. Cantitatea de căldură necesară pentru topirea celor 400 g de gheață depusă pe vaporizator, în determinările experimentale din Capitolul 4, este de 137,6 kJ. Din acest punct de vedere, agenții frigorifici R1234yf și R1234ze(E) pot, de asemenea, furniza această cantitate de căldură, însă nu la temperatura necesară pentru topirea PCM SP50.

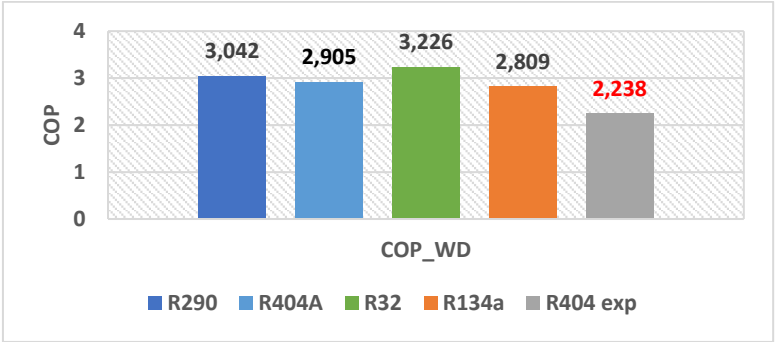


Figura. 6.12 COP pentru metoda degivrării cu aer

Figura 6.12 prezintă coeficientul de performanță (COP), calculat cu ecuația (6.3), pentru metoda de degivrare cu aer utilizând diferiți agenți frigorifici. În aceste condiții de funcționare, agentul frigorific R32 se evidențiază ca având cea mai ridicată eficiență energetică. Agentul frigorific R290 are un COP bun, apropiat de cel al R32, ceea ce îl face atractiv, mai ales având în vedere GWP-ul său scăzut, însă este inflamabil. Agenții frigorifici R404A și R134a au valori mai reduse, dar comparabile între ele (sub cele ale R290 și R32).

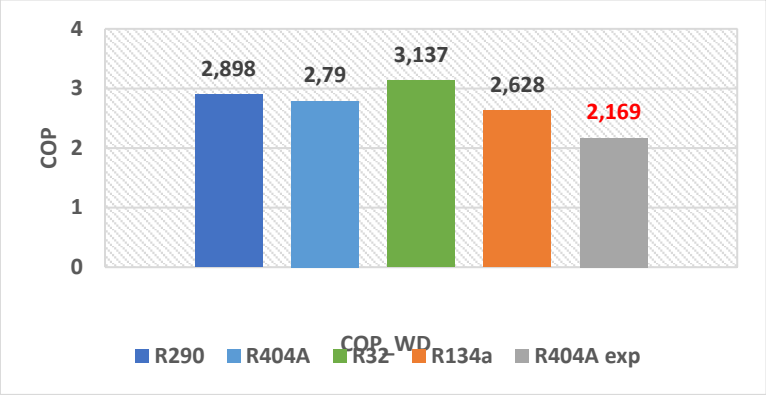


Figura 6.13. COP pentru metoda cu încălzire electrică

În Figura 6.13, corespunzătoare metodei de degivrare cu încălzire electrică, se observă că R32 rămâne liderul absolut în eficiență energetică, R290 are un COP apropiat de 2,9, ceea ce confirmă performanțe bune, iar R404A și R134a prezintă eficiențe moderate, sub R290 și clar sub R32. Valoarea experimentală pentru R404A este mai mică, din același motiv menționat anterior. Din Figura 6.13 se poate observa că COP-ul a scăzut cu aproximativ 10% comparativ cu degivrarea cu aer.

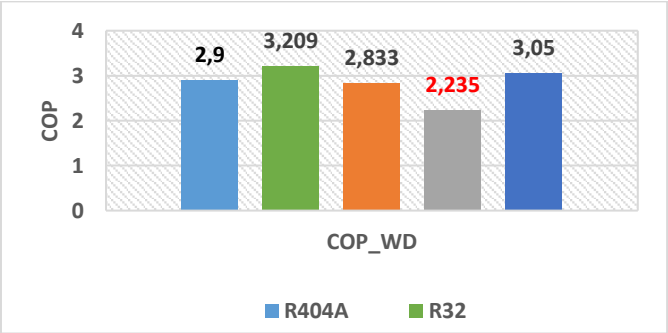


Figure 6.14 COP pentru metoda degivrării cu gaze calde

În Figura 6.14, pentru degivrarea cu gaze calde, se poate observa că se menține aceeași ierarhie a agenților frigorifici utilizați, R32 având cel mai ridicat COP, urmat de R290. Agenții frigorifici R404A și R134a rămân în intervalul 2,8–2,9.

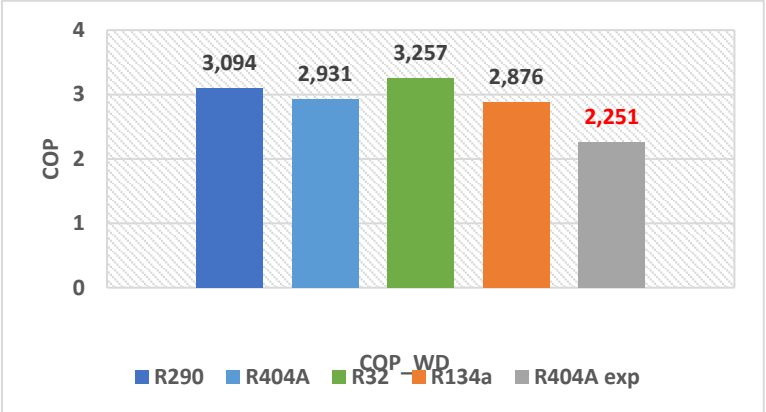


Figure 6.15 COP pentru metoda degivrării cu PCM

În Figura 6.15, pentru degivrarea cu PCM, se poate observa că se menține aceeași ierarhie a agenților frigorifici utilizați, R32 având cel mai ridicat COP, urmat de R290, R404A și R134a.

În studiile convenționale privind performanța VCRS este analizat doar regimul de funcționare la răcire, în timp ce regimul de degivrare este neglijat. Pentru a permite o comparație între performanța VCRS cu și fără degivrare, a fost definit COP-ul ciclului fără degivrare. Acest coeficient a fost determinat pentru fiecare agent frigorific utilizând ecuațiile (6.2), (6.5), (6.8) și (6.11).

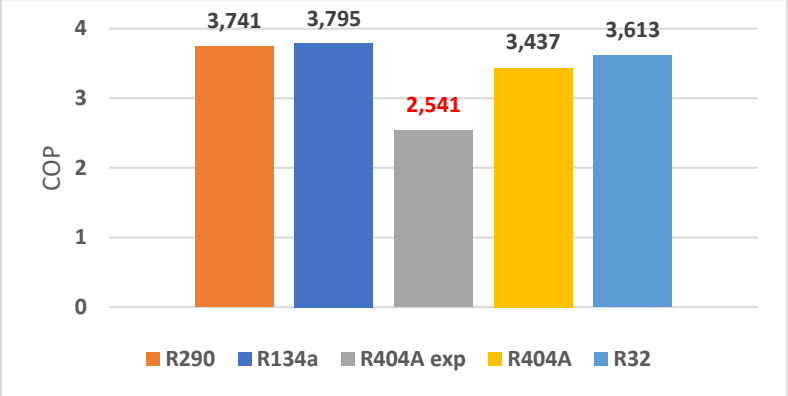


Figura 6.16. COP al ciclului fără degivrare

Așa cum se arată în Figura 6.16., se observă că R134a și R290 au valoarea cea mai ridicată, în timp ce cea mai scăzută valoare este înregistrată de R404A și R404A exp.

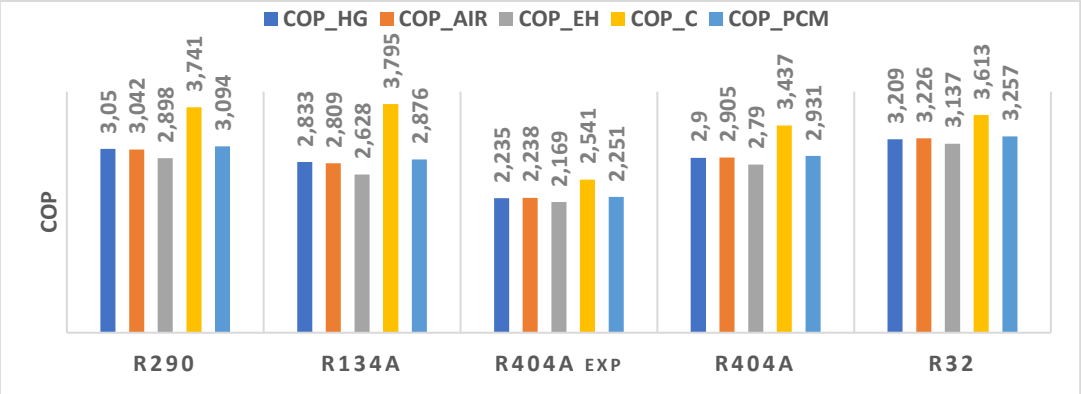


Figura 6.17. COP comparativ – degivrare cu aer, degivrare cu încălzire electrică, degivrare cu gaze calde, degivrare cu PCM și COP al ciclului.

Figura 6.17 prezintă o comparație între cele patru metode de degivrare, unde se poate observa că cel mai ridicat COP este obținut de agentul frigorific R32 în cazul degivrării cu PCM, urmat de COP-ul la degivrarea cu aer, COP-ul la degivrarea cu gaze calde, iar cea mai mică valoare se înregistrează la degivrarea cu încălzire electrică.

Din Figura 6.17 se poate observa că, pentru toți agenții frigorifici considerați, cea mai mică valoare a COP este obținută în cazul metodei de degivrare cu încălzire electrică. De asemenea, se observă că, pentru toți agenții frigorifici analizați, cea mai mare valoare a COP este obținută în cazul metodei de degivrare cu PCM.

Pentru agenții frigorifici R134a și R290, se constată că metoda de degivrare cu gaze calde are un COP mai mare decât metoda de degivrare cu aer, valorile fiind foarte apropiate între ele. În schimb, pentru ceilalți agenți frigorifici, COP-ul degivrării cu gaze calde este mai mic decât cel al degivrării cu aer.

Capitolul 7
Concluzii și contribuții personale

C.1. Concluzii generale

Obiectivul principal al lucrării este de a analiza, din punct de vedere teoretic, posibilitatea creșterii eficienței VCRS prin implementarea unui sistem de degivrare cu PCM.

Obiectivele secundare sunt următoarele:

- estimarea experimentală a cantității de gheață depusă pe vaporizatorul sistemului VCRS analizat;
- stabilirea experimentală a tipului de PCM adecvat pentru acumularea energiei termice din gazele refulate de compresorul (Cp) al VCRS și utilizarea acestuia în sistemul de degivrare al vaporizatorului (EV) al VCRS;
- analiza influenței diferitelor sisteme de degivrare (cu aer, cu rezistență electrică, cu gaze calde), inclusiv a celui cu PCM, asupra COP-ului global al VCRS.

Capitolul 1 evidențiază faptul că cererea tot mai mare pentru sistemele de refrigerare, combinată cu avansul tehnologic rapid, a contribuit semnificativ la creșterea consumului global de energie, ceea ce a dus la sporirea emisiilor de gaze toxice și la accentuarea încălzirii globale. Este esențială înțelegerea componentelor și a modului de funcționare ale sistemelor frigorifice cu comprimare de vapori (VCRS), pentru a identifica modalitățile de creștere a eficienței fiecărei componente, în vederea reducerii impactului asupra mediului și asupra încălzirii globale. La nivel mondial, VCRS-urile reprezintă consumatori importanți de energie. Una dintre strategiile interesante pentru îmbunătățirea performanței instalației este minimizarea consumului energetic în etapa de degivrare.

În **Capitolul 2** este realizată o analiză a literaturii de specialitate privind metodele de creștere a eficienței sistemelor VCR. Integrarea materialelor cu schimbare de fază (PCM) în sistemele de refrigerare (RS) reprezintă o opțiune promițătoare pentru îmbunătățirea performanței sistemului, a eficienței energetice și a controlului temperaturii.

Cercetările au demonstrat că încorporarea PCM-urilor în unitățile frigorifice poate conduce la prelungirea timpului de refrigerare, îmbunătățirea distribuției temperaturii, economii de energie și creșterea rezilienței sistemului. Valorificând capacitatea PCM-urilor de stocare a căldurii latente, sistemele frigorifice pot realiza o răcire mai eficientă, pot reduce consumul energetic și pot îmbunătăți fiabilitatea operațională. Caracterul personalizabil al PCM-urilor permite dezvoltarea unor soluții adaptate cerințelor specifice ale sistemelor de refrigerare, ceea ce le face o opțiune versatilă și eficientă pentru optimizarea proceselor frigorifice. În ansamblu, utilizarea PCM-urilor în sistemele de refrigerare reprezintă o strategie valoroasă pentru creșterea eficienței răcirii, reducerea costurilor energetice și îmbunătățirea performanței generale a unităților frigorifice.

Capitolul 3 prezintă efectul utilizării stocării termice cu PCM pentru degivrarea vaporizatorului unui sistem frigorific care utilizează diferiți agenți frigorifici. A fost investigat impactul diverșilor agenți frigorifici și al parametrilor de sistem asupra performanței energetice a degivrării bazate pe PCM, în aceleași condiții de lucru.

S-a observat că, pe măsură ce timpul de degivrare crește, debitul masic de agent frigorific necesar pentru degivrarea cu PCM scade. Dintre agenții frigorifici analizați, R600 a prezentat cel mai mic debit masic, iar R404A cel mai mare, pentru degivrarea aceleiași mase de gheață. În plus, COP-ul cu pompă al sistemului frigorific cu degivrare pe bază de PCM crește treptat odată cu timpul de degivrare, însă rămâne ușor mai mic decât în cazul sistemului fără degivrare, având totuși valori comparabile în ambele situații.

Rezultatele indică faptul că o creștere a temperaturii de vaporizare conduce la o scădere a

căldurii recuperabile. Totuși, pentru temperaturi de vaporizare cuprinse între -10°C și -40°C, căldura recuperabilă este suficientă pentru a realiza degivrarea completă a gheții acumulate pe vaporizator. În schimb, o creștere a temperaturii de condensare îmbunătățește cantitatea de căldură recuperabilă pentru agenții frigorifici uscați și umezi, precum R32, R404A, R134a și R290, dar o reduce pentru agenții frigorifici izentropici, inclusiv R600a, R600, R1234yf și R1234ze(E).

Supraîncălzirea joacă un rol esențial în îmbunătățirea recuperării de căldură. Un grad mai mare de supraîncălzire crește semnificativ cantitatea de căldură recuperabilă, făcând fezabilă degivrarea bazată pe PCM și pentru agenții frigorifici izentropici. În schimb, gradul de desupraîncălzire variază în funcție de temperatura de condensare: crește pentru R32, rămâne aproape constant pentru agenții frigorifici din grupa b) și scade pentru cei din grupa c). Acest lucru sugerează că majorarea temperaturii de condensare poate influența diferit procesul de degivrare, în funcție de agentul frigorific utilizat. Analizele anterioare arată că R32 este cel mai potrivit agent frigorific pentru degivrarea cu PCM, urmat de agenții frigorifici din grupele b) și c).

În plus, titlul agentului frigorific în starea 7 (la ieșirea din schimbătorul de căldură cu PCM, în timpul degivrării) are o influență minimă asupra COP-ului cu pompă, valoarea cea mai mare fiind înregistrată pentru R600. Pe măsură ce titlul agentului frigorific crește, debitul masic necesar pentru degivrare scade, ceea ce conduce la reducerea puterii consumate de pompa de circulație.

Degivrarea joacă un rol important în reducerea consumului de energie, concluzie evidențiată în **Capitolul 4** pe baza determinărilor experimentale realizate pe standul experimental din cadrul Departamentului de Termodinamică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București. Datele experimentale obținute sunt esențiale pentru analiza finală privind utilizarea unui sistem de degivrare bazat pe PCM, analiză prezentată în Capitolul 6 al acestei lucrări.

Rezultatele experimentale arată că masa de gheață acumulată pe vaporizator este de 0,400 kg (Tabelul 4.14). Gheața se acumulează pe vaporizator în aproximativ 3,5 h de funcționare a VCRS în modul de degivrare electrică și în aproximativ 3,13 h în modul de degivrare cu aer.
Rezultatele experimentale arată că degivrarea cu aer necesită un timp mai lung (26 minute față de 15 minute) din cauza disponibilității termice mai reduse a aerului comparativ cu degivrarea electrică. Ca urmare, timpul de funcționare al sistemului în regim de răcire este mai scurt în cazul degivrării cu aer (188 minute față de 208 minute), ceea ce are implicații asupra parametrilor funcționali.
Presiunea de vaporizare la sfârșitul perioadei de degivrare este mai mare în cazul degivrării electrice decât în cazul degivrării cu aer (9 bar față de 7 bar).
Se poate observa că presiunea de condensare nu este influențată semnificativ de tipul de degivrare. Aceasta poate fi explicată prin faptul că este controlată de presostatul ventilatorului. Totuși, merită menționată creșterea de aproximativ 0,8 bar, de la 16 bar la 16,8 bar, în cazul degivrării electrice, la începutul perioadei de pornire a sistemului Ia.

Temperatura de supraîncălzire scade de la o valoare medie de -3,6 °C în cazul degivrării cu rezistență electrică la un minim de -7 °C (Figura **4.26a**), iar în cazul degivrării cu aer, temperatura medie de supraîncălzire scade de la -3,4 °C la un minim de -7,4 °C (Figura **4.26b**). Acest lucru indică faptul că, în ambele scenarii, depunerea de gheață afectează transferul de căldură, conducând la reducerea gradului de supraîncălzire în timpul ciclului de funcționare în regim de răcire.

Pentru regimurile studiate experimental în ambele cazuri — degivrare electrică (a) și degivrare cu aer (b) - temperaturile medii de refulare sunt ridicate, de 65,9 °C pentru degivrarea electrică și 66 °C pentru degivrarea cu aer. Aceste valori susțin fezabilitatea degivrării cu PCM în aceste moduri de funcționare (Figurile 4.27a și 4.17b). Aceeași tendință de creștere a temperaturii de refulare se observă imediat după pornirea instalației, în zonele a și b. În perioada de degivrare, însă, apare o tendință de scădere, deoarece conducta de refulare se răcește până la 30–35 °C, valoare influențată de temperatura mediului ambiant.

În perioada de pornire a sistemului (zona I-a, Figurile 4.24b, 4.30a și 4.30b), puterea consumată de compresor este mai mică în modul de degivrare electrică decât în modul de degivrare cu aer, până când sistemul atinge o stare stabilă de funcționare. Totuși, puterea medie consumată de compresor în cele două situații este aproximativ aceeași: 484 W pentru degivrarea electrică și 482 W pentru degivrare cu aer.

Sistemul care utilizează degivrarea electrică consumă mai multă energie decât cel cu degivrare cu aer. Mai exact, consumul de energie este de 2,6 kWh pentru sistemul cu degivrare electrică, față de 2,4 kWh pentru sistemul cu degivrare cu aer, ceea ce înseamnă o diferență de aproximativ 8%. Această diferență poate fi explicată prin rezistența electrică, care consumă de aproximativ șapte ori mai multă energie decât ventilatorul. Deși rezistența electrică funcționează doar jumătate din timpul de funcționare al ventilatorului în perioada de degivrare, consumul total de energie pe întreg ciclul răcire–degivrare rămâne mai mare în cazul sistemului cu degivrare electrică decât în cazul celui cu degivrare cu aer (Figurile 4.32a și 4.32b).

Capitolul 5 prezintă efectul temperaturii de intrare și al debitului asupra proceselor de topire și solidificare ale PCM-ului utilizat într-un schimbător de căldură vertical de tip manta–țeavă.

Efectul temperaturii de intrare:

Temperaturile de intrare mai ridicate cresc semnificativ rata de topire a materialelor PCM, aspect important pentru optimizarea sistemelor de stocare a energiei termice. Pe măsură ce temperatura de intrare crește, crește și fracția lichidă a PCM-ului, ceea ce conduce la reducerea timpului total de topire.

Variații ale debitului:

Debitul fluidului de transfer termic (apa) influențează semnificativ eficiența transferului de căldură, precum și vitezele de topire și solidificare ale materialelor cu schimbare de fază (PCM). În general, creșterea debitului îmbunătățește transferul termic, ceea ce poate accelera procesul de topire.

Dinamica topirii și solidificării:

Studiul indică faptul că, în faza inițială a topirii, conducția este mecanismul dominant; totuși, pe măsură ce PCM-ul trece într-o stare vâscoasă, convecția devine mai semnificativă. Această tranziție evidențiază importanța înțelegerii ambelor mecanisme — conducția și convecția — în aplicațiile cu PCM.

Transferul de căldură în tubul vertical are un caracter complex, datorită mișcării ascendente a PCM-ului topit. Acest fenomen favorizează topirea rapidă a PCM-ului în partea superioară a VSTHX.

Experimentul evidențiază importanța optimizării temperaturii de intrare și a debitului pentru îmbunătățirea performanței PCM în aplicațiile de stocare a energiei termice.

Temperatura medie oferă informații importante în acest sens. În perioada de acumulare a căldurii, temperatura de topire este atinsă mai întâi în secțiunea de bază, secțiunea 1 (partea inferioară a tubului), apoi, „surprinzător”, următoarea secțiune în care are loc topirea este la nivelul 5, în partea superioară a tubului (Figura 5.15). Topirea continuă apoi la nivelul 2, către bază, iar ulterior la nivelul 4, către capătul tubului. Secțiunea în care topirea are loc cel mai târziu este secțiunea 3, situată la mijlocul tubului. Procesul nu este însă surprinzător dacă luăm în considerare cele două ipoteze menționate: o rată ridicată a transferului termic prin conducție de-a lungul tubului exterior și mișcarea gravitațională ascendentă a parafinei topite și supraîncălzite, care favorizează topirea parafinei în secțiunile superioare 4 și 5.

.

Utilizarea apei la 65 °C accelerează procesul de topire a parafinei (Figura 5.16). În secțiunea de bază, topirea începe după 26 de minute, comparativ cu 48 de minute în cazul utilizării apei la 60 °C. De asemenea, topirea se finalizează în secțiunea mediană după 64 de minute, comparativ cu 110 minute pentru apa la 60 °C.

Se observă că, pe măsură ce temperatura apei crește, inițierea și finalizarea procesului de topire au loc mai rapid, iar intervalul de topire devine mai scurt.

Capitolul 6 arată că procesul de degivrare reduce COP-ul ciclului, indiferent de metoda de degivrare aplicată, comparativ cu funcționarea fără degivrare. Dintre tehnicile investigate, degivrarea bazată pe PCM prezintă cel mai ridicat coeficient de performanță, în timp ce degivrarea cu rezistență electrică conduce la cele mai scăzute valori. Așa cum era de așteptat, degivrarea modifică coeficientul de performanță, determinând o depreciere a COP-ului ciclului, care devine mai mic în prezența degivrării, indiferent de metoda de degivrare și de agentul frigorific utilizat.

Există agenți frigorifici pentru care degivrarea cu aer este mai eficientă decât degivrarea cu gaze calde (de exemplu, R32 și R404A), însă aceasta are dezavantajul că nu asigură degivrarea completă a întregii cantități de gheață, ceea ce conduce la creșterea umidității în spațiul răcit

Există agenți frigorifici pentru care degivrarea cu gaze calde este mai eficientă decât degivrarea cu aer (de exemplu, R290 și R134a), însă aceasta conduce la uzura accentuată a compresorului și, implicit, la costuri de operare mai ridicate.

Atât agentul frigorific, cât și metoda de degivrare pot modifica valoarea optimă globală a coeficientului de performanță al ciclului.

Teoretic, ciclul de degivrare bazat pe PCM atinge cel mai ridicat COP; totuși, implementarea sa implică costuri ridicate din cauza complexității sistemului, ceea ce o face prohibitivă pentru instalațiile VCRS de capacitate foarte mică. În schimb, pentru sistemele frigorifice de capacitate medie (între 2 kW și 50 kW), degivrarea cu PCM apare ca o soluție viabilă, deoarece elimină dezavantajul uzurii premature a compresorului, specific în mod obișnuit degivrării cu gaze calde.

Pentru R32 și R404A, a doua cea mai mare valoare a COP-ului se obține în cazul degivrării cu aer. Pentru R290 și R134a, degivrarea cu gaze calde oferă cel mai mare COP. Degivrarea electrică este cea mai slabă din punctul de vedere al COP-ului.

Modelul matematic aplicat rezultatelor experimentale din Capitolul 4 confirmă rezultatele obținute din ciclul teoretic pentru agentul frigorific R404A, și anume că valorile COP urmează ordinea: degivrare cu PCM (cea mai mare), urmată de degivrare cu aer, degivrare cu gaze calde și degivrare electrică (cea mai mică).

C.2. Contribuții originale

Contribuția originală a acestei teze de doctorat constă în studiul teoretic și experimental al utilizării materialelor cu schimbare de fază (PCM) pentru degivrare în sistemele frigorifice cu comprimare de vapori (VCRS). Cercetarea introduce metode inovatoare de creștere a eficienței energetice a sistemelor frigorifice prin recuperarea căldurii reziduale din gazele de refulare ale compresorului și stocarea acesteia în PCM-uri pentru degivrare. Această abordare urmărește reducerea consumului de energie și a emisiilor de căldură către incinta refrigerată în timpul procesului de degivrare .

Contribuțiile cheie includ:

1. **Rezultate**
2. **Contribuții originale**

Rezultate

- Model matematic pentru sistemul frigorific cu degivrare cu PCM (subcapitolul 3.3)
- Model matematic pentru sistemul frigorific cu degivrare cu aer (subcapitolul 6.2.1)
- Model matematic pentru sistemul frigorific cu degivrare cu încălzire electrică (subcapitolul 6.2.2)
- Model matematic pentru sistemul frigorific cu degivrare cu gaze calde (subcapitolul 6.2.3)
- Standurile experimentale din Capitolul 4 și Capitolul 5.
- Datele experimentale obținute pentru cele două standuri experimentale din Capitolul 4 și Capitolul 5.

Contribuții originale

- Schema de degivrare cu PCM (Capitolul 3, Figura 3.1)
- Degivrarea cu PCM crește COP-ul, indiferent de tipul de PCM utilizat.

Pentru grupa c) de agenți frigorifici – cei izentropici – dezghețarea cu PCM nu se poate realiza fără creșterea gradului de supraîncălzire la intrarea în compresor, indiferent de tipul de PCM utilizat.

- Pentru agenții frigorifici studiați — R290, R134a, R404A și R32 — la un grad de supraîncălzire de aproximativ 10,67 °C pentru degivrarea electrică, cea mai mare valoare a COP se obține în cazul degivrării cu PCM și al degivrării electrice pentru R32.
- Pentru R32 și R404A, a doua cea mai mare valoare a COP se obține în cazul degivrării cu aer.
- Pentru R290 și R134a, degivrarea cu gaze calde oferă cel mai ridicat COP. Degivrarea electrică este cea mai slabă din punctul de vedere al COP.
- Modelul matematic aplicat rezultatelor experimentale din Capitolul 4 confirmă rezultatele obținute din ciclul teoretic pentru agentul frigorific R404A, și anume că cel mai ridicat COP este obținut în cazul degivrării cu PCM, urmată de degivrarea cu aer, cu gaze calde și electrică.
- Consumul de energie pentru VCRS (0–4 °C) cu degivrare electrică este cu 8% mai mare decât în cazul degivrării cu aer (Capitolul 4, Figura 4.32 a,b).
- Determinarea experimentală a profilului de temperatură în timpul topirii PCM SP50, utilizând apă caldă (60°C, 65°C, 70°C) (Capitolul 5, pag. 96).

Per ansamblu, teza contribuie la domeniul instalațiilor frigorifice prin propunerea unei soluții de degivrare sustenabile și eficiente energetic, susținută atât prin modelare teoretică, cât și prin validare experimentală. Această abordare inovatoare are potențialul de a reduce consumul de energie și impactul asupra mediului în sistemele de refrigerare.

C.3. Direcții viitoare de cercetare

Teza de doctorat privind utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM) pentru degivrare în sistemele frigorifice cu comprimare de vapori (VCRS) deschide mai multe direcții de cercetare viitoare. Aceste direcții urmăresc îmbunătățirea suplimentară a eficienței, aplicabilității și sustenabilității sistemelor de degivrare bazate pe PCM. Principalele direcții de cercetare viitoare includ:

Explorarea materialelor PCM alternative:

- Investigarea unor noi materiale PCM cu puncte de topire mai scăzute, capacități mai mari de stocare a căldurii latente și conductivitate termică îmbunătățită, pentru optimizarea recuperării căldurii și a eficienței degivrării.

- Develop Dezvoltarea unor PCM compozite avansate, cu proprietăți termice crescute, pentru reducerea timpilor de topire și solidificare.

Integrarea cu surse de energie regenerabilă:

Studierea integrării sistemelor de dezghețare bazate pe PCM cu surse de energie regenerabilă, precum energia solară sau eoliană, pentru a reduce și mai mult impactul asupra mediului și dependența de sursele convenționale de energie.

Implementarea în sisteme frigorifice de mari dimensiuni:

Extinderea cercetării către sisteme frigorifice de capacitate mai mare, utilizate în aplicații industriale și comerciale, pentru evaluarea scalabilității și a fezabilității economice a degivrării bazate pe PCM.

Configurații avansate de schimbătoare de căldură:

- Explorarea unor configurații inovatoare pentru schimbătoarele de căldură cu PCM, în vederea îmbunătățirii eficienței transferului termic și reducerii rezistenței termice.
- Analizarea aplicării nanotehnologiei pentru creșterea conductivității termice a carcaselor pentru PCM și a schimbătoarelor de căldură..

Analiza economică:

- Realizarea unor analize detaliate cost–beneficiu pentru evaluarea fezabilității economice a sistemelor de degivrare bazate pe PCM în diverse aplicații.
- Investigarea potențialului de reducere a costurilor prin producție de masă și optimizarea materialelor.

Evaluarea impactului asupra mediului:

- Evaluarea beneficiilor de mediu ale sistemelor de degivrare bazate pe PCM, inclusiv reducerea emisiilor de CO_2 și a consumului de energie.
- Analizarea posibilității de utilizare a agenților frigorifici ecologici împreună cu sistemele de degivrare pe bază de PCM.

Recuperarea energiei din alte surse:

- Explorarea posibilității de recuperare a căldurii reziduale din alte componente ale sistemului frigorific, precum condensatorul, pentru creșterea eficienței energetice globale.

Prin abordarea acestor direcții viitoare de cercetare, potențialul sistemelor de degivrare bazate pe PCM poate fi valorificat într-o măsură mai mare, contribuind la dezvoltarea unor tehnologii frigorifice mai sustenabile și mai eficiente energetic.

Articole publicate

1. **Jamal AL DOURI**, Kamel S. HMOOD, Valentin APOSTOL, Horatiu POP, Saleh J. ALQAISY, and Elena Beatrice IBREAN, "Literature review regarding defrosting methods for household refrigeration", 10th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, TE-RE-RD 2021, E3S Web of Conferences **286**, 01012 (2021), doi.org/10.1051/e3sconf/202128601012).
2. **J AL Douri**, H Pop, V Apostol, N K Fadhil, K S Hmood, S J AL Qaisy, A Nabbat, C Ionita and T Prisecaru, "Preliminary experimental assessment of a vertical shell and tube heat exchanger based on phase change materials .IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1262, The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022) 09/06/2022 - 10/06/2022 Online
3. A L Tarish, **J Al Douri**, V Apostol, H L Pop and C Ionita "Exergy and performance analyses of impact subcooling for vapor compression refrigeration system utilizing eco-friendly refrigerants". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 997, The 9th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering - ACME 2020 4-5 June 2020, Iasi , Romania
4. **Jamal AL DOURI**, Valentin APOSTOL, Horatiu POP, Tudor PRISECARU, Cornel Constantin PAVEL, Iulian UTA, Claudia IONITA," Improving performance of cold room refrigeration system by desuperheating energy recovery using PCMs" INMATEH Agricultural Engineering, Vol. 70, No. 2 / 2023, DOI: https://doi.org/10.35633/inmateh-70-53.

Bibliografie Selectivă

[1] R. Rybár, D. Kudelas, and M. Beer, "Selected problems of classification of energy sources – What are renewable energy sources?," *Acta Montan. Slovaca*, vol. 20, no. 3, pp. 172–180, 2015.

[2] F. Nadeem, S. M. S. Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami, and T. S. Ustun, "Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 4555–4585, 2019.

[17] C. Park, H. Lee, Y. Hwang, and R. Radermacher, "Recent advances in vapor compression cycle technologies," *Int. J. Refrig.*, vol. 60, pp. 118–134, 2015.

[18] S. P. Chavhan and P. S. D. Mahajan, "A Review of an Alternative to R134a Refrigerant in Domestic Refrigerator," vol. 3, no. 9, 2013.

[51] M. Amer and C. C. Wang, "Review of defrosting methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. December 2015, pp. 53–74, 2017.

[52] J. Al Douri, K. S. Hmood, V. Apostol, H. Pop, S. J. Alqaisy, and E. B. Ibrean, "Review regarding defrosting methods for refrigeration and heat pump systems," *E3S Web Conf.*, vol. 286, pp. 1–13, 2021

[86] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, "Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 850–866, 2016.

[87] P. S. Raveendran and S. J. Sekhar, "Performance studies on a domestic refrigerators retrofitted with building-integrated water-cooled condenser," *Energy Build.*, vol. 134, pp. 1–10, 2017.

[121] H. Ge, H. Li, S. Mei, and J. Liu, "Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 331–346, 2013.

[122] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009.

[167] Jamal Al Douri, Adrian Chiriac, Tudor Prisecaru, Horatiu Pop, Valentin Apostol, Claudia Ionita, Comparison between defrosting methods using different refrigerants, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering Vol. 86, Iss. 2, 2024, ISSN 1454-2358

[168] Pop H, Apostol V, Alqaisy S J, Hmood K S, Al Douri J And Badescu *V* 2021, Mass flow rate evaluation of a hermetic compressor from a smallscale vapour compression refrigeration system, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering 83 pp 1454-2358.

[171] Jamal al Douri, V. Apostol, H Pop, T. Prisecaru, C. C, Pavel, I. Uta, C. Ionita, L. Popa, Improving performance of cold room refrigeration system by desuperheating energy recovery using PCMs, doi: https://doi.org/10.35633/inmateh-70-5