Studiul influenței fracției de gheață în transferul de căldură în instalațiile de climatizare de confort

Rezumatul tezei de doctorat

Îndrumător:

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Florea Chiriac

Doctorand:

Ing. Emil Iakaboș

BUCUREȘTI, 2025

Cuprins

1. **Introducere** 3
2. **Gheața binară – caracteristici generale** 3
3. **Metode de generare a gheții binare** 4
4. **Influența temperaturii de vaporizare asupra generării gheții binare** 8
5. **Metode de evitare a aglomerării particulelor de gheață** 8
6. **Influența fracției de gheață asupra pierderilor de sarcină** 9
7. **Transferul de căldură în instalațiile de climatizare cu gheață binară** 11
8. **Proprietăți termodinamice și termofizice ale gheții binare** 12
9. **Instalația experimentală utilizată în cercetare** 20
10. **Rezultate și discuții** 23
11. **Concluzii și propuneri de cercetare continuă.** 24
12. **Bibliografie** 27

1. Introducere

Lucrarea abordează o temă esențială în contextul eficienței energetice și protecției mediului, focalizându-se asupra influenței fracției de gheață din amestecul binar apă-gheață asupra transferului de căldură în instalațiile de climatizare de confort.

Importanța climatizării eficiente și sustenabile a devenit o prioritate globală, în special în contextul reducerii consumului de energie și a emisiilor de gaze cu efect de seră. Această lucrare își propune să evidențieze beneficiile utilizării gheții binare în instalațiile de climatizare de confort. Prin utilizarea acestei soluții inovatoare, se pot obține economii energetice importante și un confort termic sporit.

Climatizarea modernă implică nu doar răcirea aerului, ci și asigurarea unei distribuții uniforme a temperaturii, menținerea umidității optime și reducerea impactului ecologic. Tehnologiile convenționale de răcire bazate pe agenți frigorifici poluanți (R134a, R404A etc.) sunt tot mai intens reglementate, datorită potențialului de încălzire globală(GWP) și de distrugere a stratului de ozon(ODS), foarte mare. În acest context, soluțiile alternative, cum este și gheața binară, devin tot mai utilizate în climatizarea de confort.

Obiectivul principal al tezei este analiza influenței fracției de gheață asupra transferului de căldură în diverse condiții operaționale, comparativ cu sistemele clasice care utilizează apă răcită glicolată. Sunt urmărite performanțele hidraulice, eficiența energetică, comportamentul termodinamic și stabilitatea în exploatare a sistemelor cu gheață binară.

2. Gheața binară – caracteristici generale

Gheața binară este o suspensie de particule fine de gheață într-un lichid purtător, de regulă apă sau apă cu aditivi (ex. etilen glicol sau propilen glicol). Acest tip de mediu de răcire se folosește pentru transportul energiei termice și pentru acumularea ei în sisteme de stocare.

Avantajele utilizării gheții binare sunt multiple:

- Capacitate mare de stocare a frigului datorită căldurii latente a gheții;

- Transport facil prin conducte clasice, cu pompe obișnuite până la concentrații de 30%;
- Temperatură de ieșire constantă și apropiată de 0°C;
- Răspuns rapid la variațiile de sarcină termică.

Printre dezavantaje se numără:

- Risc de colmatare în conducte dacă fracția de gheață este prea mare;
- Necesitatea unui control atent al temperaturilor și fracției de gheață;
- Posibilitatea apariției de abraziune mecanică asupra echipamentelor de pompare.

Fracția optimă de gheață utilizată în sistemele reale este cuprinsă între 10% și 30%, în funcție de aplicație, distanța de transport și modul de funcționare. Proprietățile fizice, cum ar fi densitatea și vâscozitatea, variază semnificativ în funcție de această fracție, influențând dimensionarea instalației și alegerea echipamentelor.

Gheața binară permite folosirea unor strategii energetice avansate, cum ar fi „load shifting” – producerea frigului în timpul nopții, când energia este mai ieftină, și utilizarea ei în timpul zilei, în special când vârfurile de sarcină sunt maxime.

3. Metode de generare a gheții binare

Generarea gheții binare presupune formarea unui amestec de gheață și lichid purtător prin diferite tehnologii care asigură dimensiuni controlate ale particulelor și o suspensie stabilă.

Cele mai utilizate metode sunt:

Vaporizatoare cu suprafață răzuită (Scraped Surface Evaporators – SSE);

Producerea gheții binare prin această metodă implică utilizarea unui generator de gheață reprezentat de un schimbător de căldură, de tip tub în tub. În spațiul dintre cele două tuburi circulă un agent frigorific, iar la interior circulă o soluție apoasă. Pe suprafața interioară a tubului interior are loc formarea gheții datorită vaporizării în exterior a agentului frigorific. Gheața astfel formată,

pe suprafața de schimb de căldură, este raclată în mod continuu de un sistem de raclare cu șnec. Răzuirea gheții este necesară pentru a preveni formarea unui strat gros de gheață pe pereții generatorului, care ar introduce o rezistentă termică suplimentară și ar putea afecta transferul de căldură. De asemenea, acumularea continuă a unui strat de gheață pe pereții generatorului ar duce în cele din urma la blocarea rotirii lamelor de răzuire și implicit la blocarea totală a generatorului de gheață.

Această metodă de generare a gheții necesită o instalație frigorifică cu comprimare mecanică de vapori într-o singură treaptă de comprimare, compusă din compresor, condensator, filtru, ventil de laminare și vaporizator fiind reprezentată în Figura 1. Vaporizatorul este reprezentat de un schimbător de căldură, tip tub în tub, care permite generarea de gheață, fapt care îi atrage și numele de generator de gheață. În spațiul inelar dintre pereții celor două tuburi se produce procesul de vaporizare a agentului frigorific primar (freon sau amoniac), preluând căldura de la soluția binară care este transportată prin interiorul țevii generatorului de gheață, cu ajutorul unui șnec de radere. Sistem de radere este format dintr-un dispozitiv de răzuire elicoidal de regulă șnec, acționat mecanic de un moto reductor, care înlătură gheața de pe suprafața interioară a tubului vaporizatorului și o transportă în fluxul principal.

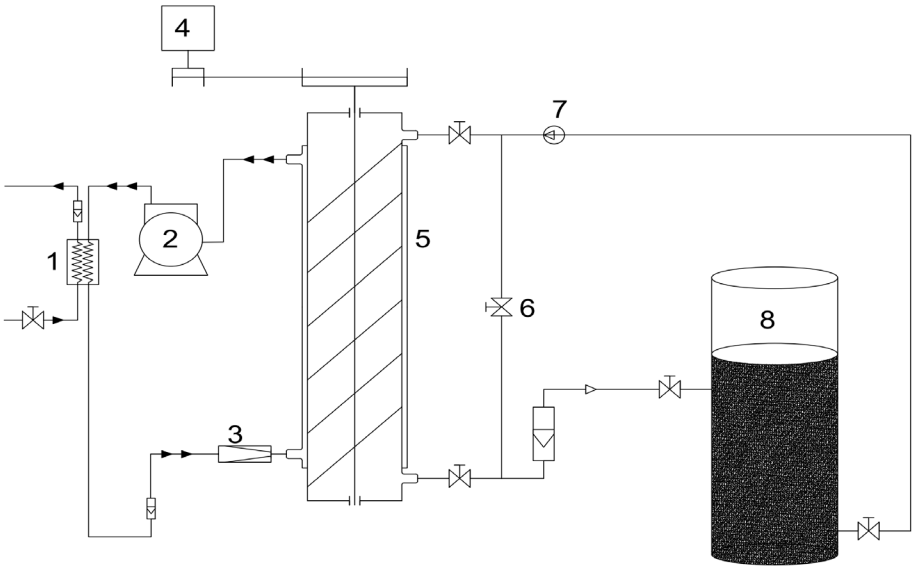


Figura 1 Schema unei instalații de producere a gheții binare suprafață răzuită

Componentele instalației de producere a gheții binare suprafață răzuită sunt: 1 - condensator; 2-compresor; 3 – ventil de reglaj termostatic; 4 – motor; 5 – vaporizator cu suprafața raclată; 6 – by – pass; 7 – pompă de recirculare; 8 – rezervor de stocare/acumulare apă-gheață [75].

Instalația experimentală pentru producerea gheții binare, prezentată în Figura 1, este un sistem destinat generării unei suspensii compuse din particule de gheață și lichid, cunoscută sub denumirea de apă-gheață. Această suspensie are aplicații în domenii precum răcirea în procesele industriale, răcirea de confort sau transportul frigorific.

Vaporizatoare în vid (Vacuum Ice Machine – VIM);

Generarea gheții binare cu vaporizatoare vacuumare la baza principiul punctului triplu de vacuum - îngheț. Soluția de alimentare va fi introdusă în camera de vacuum în care presiunea este sub valoarea punctului triplu al soluției [76] unde o parte din debitul de alimentare se va transforma apoi în vapori. Acest proces este considerat adiabatic însemnând că necesarul de căldură aferent evaporării va fi extras din apa de alimentare rămasăastfel fiind posibil formarea cristalelor de gheață. Aceste particule de gheață sunt apoi amestecate în fluid și vor duce la apariția unui lichid cu vâscozitate diferită numit, gheață binară, care poate fi pompat către consumator sau rezervorul de stocare după necesități. Pentru a se mări substanțial suprafața de vaporizare camera de amestec va fi agitată termic. Tot în acest scop se pot folosi și sisteme de introducere prin stropire (sprayere) având ca rezultat intensificarea vaporizării. Vaporii de apă și gazele necondensabile sunt evacuate din rezervor, astfel încât presiunea să fie menținută la valoarea inițială.

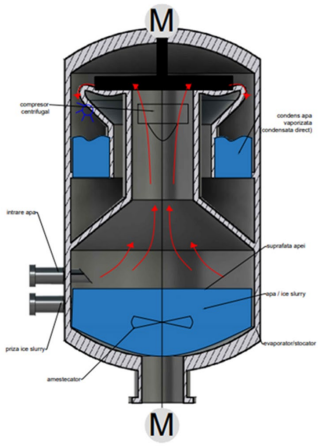


Figura 2 Schema unui generator de apă-gheață cu vaporizatoare vacuum

Vaporizatoare cu pat fluidizat (Fluidized Bed Evaporators – FBE).

Comparativ, vaporizatoarele cu suprafață răzuită oferă cel mai bun control asupra dimensiunii particulelor și sunt cele mai des utilizate în instalațiile industriale. Cele cu pat fluidizat prezintă un randament termic ridicat, dar sunt mult mai complexe constructiv.

Selectarea metodei optime depinde de aplicație, volumul necesar de gheață, eficiența dorită și costurile de operare și mentenanță.

Această metodă de obținere a amestecului binar este asemănătoare cu cel al vaporizatorului cu șnec de raclare (SSE), particulele solide formând în acest caz sistemul de raclare local. Avantajul principal al acestui tip de schimbător de căldură este că nu are limitări ale suprafeței de transfer de căldură. Tot circuitul de mai sus poate fi pus în funcțiune cu ajutorul unei pompe de recirculare clasice. Putem spune că în comparație cu vaporizatorul cu suprafața raclată (SSE), în aceste conducte din acest tip de vaporizator se pot obține viteze mari fără a genera probleme mecanice.

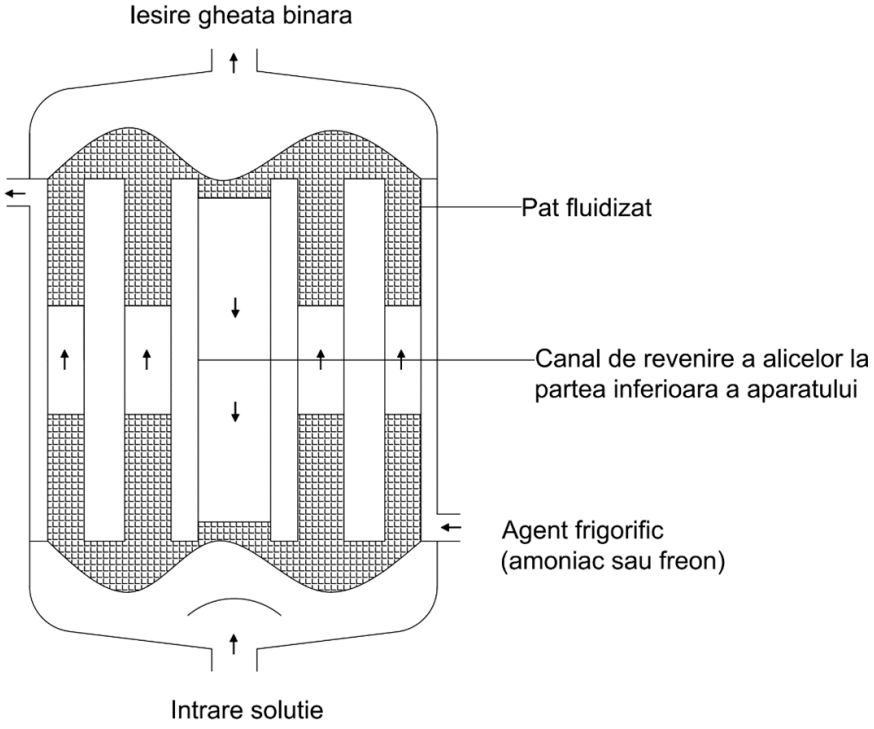


Figura 3 Schema unui generator de gheață cu vaporizator în pat fluidizat

4. Influența temperaturii de vaporizare asupra generării gheții binare

Temperatura de vaporizare este unul dintre parametrii cheie în procesul de formare a gheții binare. Alegerea temperaturii optime influențează dimensiunea particulelor, viteza de producere, eficiența schimbului termic și stabilitatea suspensiei.

Studiile experimentale au evidențiat că o temperatură de vaporizare cuprinsă între -9°C și -14°C oferă cele mai bune rezultate pentru formarea eficientă a particulelor. Sub această valoare, eficiența globală a ciclului frigorific scade din cauza consumului ridicat de energie electrică. La temperaturi mai ridicate de -8°C, fracția de gheață obținută este insuficientă pentru a asigura un regim optim de funcționare al instalației.

Curba performanței în funcție de temperatura de vaporizare este neliniară, iar alegerea punctului de funcționare trebuie să țină cont atât de performanța termică, cât și de consumul electric, durata ciclurilor și stabilitatea amestecului binar.

Acest capitol fundamentează importanța definirii corecte a punctului de lucru în instalațiile de climatizare bazate pe gheață binară, fiind strâns legat de alegerea agentului frigorific și de proiectarea optimă a vaporizatorului.

5. Metode de evitare a aglomerării particulelor de gheață

Unul dintre principalele riscuri în funcționarea instalațiilor cu gheață binară este aglomerarea particulelor de gheață, fenomen care poate conduce la colmatarea conductelor, scăderea eficienței transferului de căldură și deteriorarea echipamentelor.

Pentru evitarea acestui fenomen, se utilizează următoarele metode:

Agitarea continuă în rezervoarele de stocare: agitatoare elicoidale, paletate sau sisteme cu recirculare asigură menținerea suspensiei omogene a particulelor de gheață;

Circulația amestecului la viteze ridicate: menținerea unei viteze de curgere peste 1,5 m/s în conducte previne depunerea particulelor pe pereți și formarea de aglomerări;

Utilizarea de pompe specializate pentru suspensii : pompe cu rotor deschis sau pompe centrifuge cu toleranță la particule solide, care nu distrug gheața și mențin integritatea suspensiei;

Evitarea coturilor strânse și a secțiunilor înguste: traseele de conducte trebuie proiectate astfel încât să nu favorizeze stagnarea fluidului sau separarea fazelor;

Senzori de monitorizare a presiunii și debitului: integrarea unui sistem de control automat care detectează devieri de la parametrii normali și corectează funcționarea instalației în timp real;

Aditivi pentru stabilizarea gheții: în anumite cazuri, se pot adăuga agenți de dispersie sau stabilizatori care îmbunătățesc comportamentul reologic al amestecului.

Implementarea acestor metode crește semnificativ fiabilitatea instalației, reducând necesitatea intervențiilor de mentenanță și crescând durata de viață a echipamentelor. De asemenea, asigură o funcționare predictibilă și sigură în regimuri variate de sarcină termică.

6. Influența fracției de gheață asupra pierderilor de sarcină

Fracția de gheață are un impact direct asupra comportamentului hidraulic al amestecului binar și, implicit, asupra pierderilor de sarcină în rețeaua de distribuție. Creșterea procentului de particule solide conduce la variații semnificative ale vâscozității, densității și regimului de curgere.

Până la o fracție de 20–25%, pierderile de sarcină rămân apropiate de cele ale apei reci, cu condiția menținerii unei viteze minime de circulație. În această zonă, comportamentul suspensiei este relativ previzibil, iar curgerea se menține turbulentă, asigurând un bun transport și omogenizare.

Provocarea majoră asociată funcționării instalațiilor cu amestec de apă-gheață este asigurarea omogenității amestecului binar, atât în rezervorul de stocare, cât și în conductele sistemului de distribuție. Deși este indispensabilă, amestecarea soluției de apă-gheață în rezervorul de stocare, poate presupune un consum destul de ridicat de energie. Literatura de specialitate oferă o câteva de soluții de prevenire a aglomerării particulelor și a fenomenului de stratificare a

acestora:Acesta din urmă datoritându-se diferenței de densitate între particulele de gheață și soluția apoasă cu care acestea se află în contact.

O posibilă soluție de contracarare a acestui fenomen a fost experimentată de Meil et al., care au recurs la amestecarea intermitentă. Având în vedere că o parte din gheața prezentă în rezervor se ridică la nivelul suprafeței libere.O soluție de rezolvare a problemei poate fi reprezentată de recircularea amestecului apă-gheață prin exteriorul rezervorului și amestecarea lui cu o fracție volumetrică de gheață mai densă , extrasă de la partea inferioară a acestuia.

1.1.1 Pierderea de sarcină în tuburi.

Pierderea de sarcină (ΔP) într-un sistem de tuburi este un indicator al rezistenței la curgere pe care un fluid o întâmpină în timpul deplasării prin tub. Această rezistență la curgere poate fi influențată de mai mulți factori, inclusiv vâscozitatea fluidului, viteza de curgere, diametrul și rugozitatea interiorului tubului, precum și regimul de curgere (laminar sau turbulent).

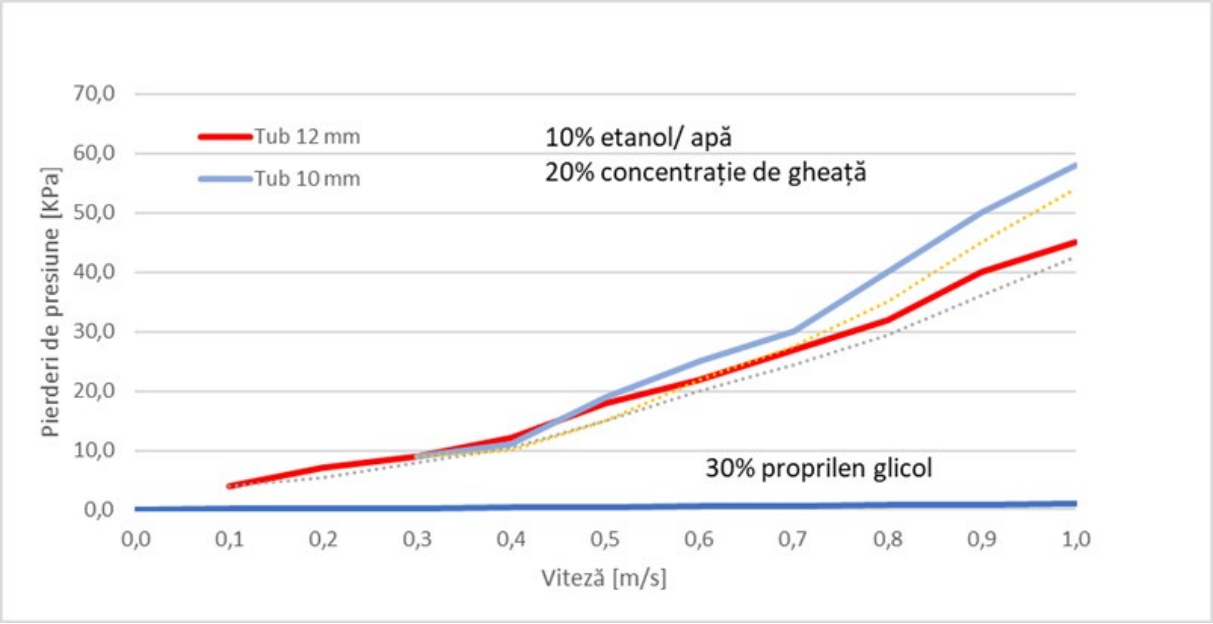


Figura 4 Comparație între pierderea de sarcină la curgerea monofazică și pierderea de sarcină la curgerea bifazică (apă-gheață)

Pierderi de sarcină în funcție de fracția de gheață și viteza de curgere.

Se observă o creștere exponențială a pierderilor de presiune pentru fracții de peste 30%, în special

la viteze reduse (< 1 m/s), unde apar tendințe de segregare și acumulare a particulelor în zonele cu debit scăzut.

Pentru menținerea performanței sistemului, este necesară:

- dimensionarea adecvată a diametrelor conductelor;
- utilizarea de pompe cu caracteristici compatibile cu suspensii biphasice;
- evitarea traseelor lungi cu diferențe mari de nivel sau multe coturi;
- control automatizat al presiunii diferențiale pentru menținerea curgerii uniforme.
- Concluziile arată că, deși utilizarea fracțiilor mai mari de gheață aduce beneficii termice, acestea implică un cost hidraulic care trebuie atent gestionat prin proiectare și operare corectă.

7. Transferul de căldură în instalațiile de climatizare cu gheață binară

Transferul de căldură reprezintă funcția principală a utilizării gheții binare în instalațiile de climatizare. Eficiența termică a acestui agent de lucru este mult superioară apei sau soluțiilor cu glicol, datorită capacității mari de absorbție a energiei prin topirea particulelor solide de gheață.

Procesul de transfer termic are loc simultan prin două mecanisme:

- convecția între lichidul purtător și suprafața de schimb;
- topirea particulelor de gheață la contactul cu pereții schimbătorului, ceea ce implică transferul de căldură latentă a gheții.

Acest mecanism dublu conduce la o îmbunătățire semnificativă a coeficientului global de transfer de căldură. În studiile experimentale, s-au înregistrat valori cu 2 până la 4 ori mai mari decât în cazul apei sau al soluției glicolate.

Variația temperaturii aerului în funcție de fracția de gheață utilizată în bateriile de răcire. Graficul evidențiază o răcire mai rapidă și mai eficientă pentru fracții de 20-30%, cu temperaturi de ieșire ale aerului sub 12°C la condiții constante de debit și temperatură inițială.

Alte avantaje ale utilizării gheții binare pentru transferul de căldură includ:

- stabilitate mai mare a temperaturii de ieșire, ceea ce crește confortul termic în spațiile deservite;
- posibilitatea de funcționare cu debite reduse și temperaturi joase, ceea ce permite reducerea dimensiunii instalațiilor;
- reducerea ciclurilor ON/OFF ale compresoarelor, contribuind la creșterea duratei de viață a echipamentelor.

În schimb, proiectarea schimbătoarelor de căldură trebuie să țină cont de vâscozitatea crescută a amestecului și de riscul de formare a peliculelor de gheață pe pereți, care pot reduce eficiența dacă nu sunt gestionate corespunzător. Alegerea unui regim de curgere turbulentă și controlul precis al fracției de gheață sunt esențiale pentru obținerea unui transfer termic optim.

8. Proprietăți termodinamice și termofizice ale gheții binare

Proprietățile termodinamice ale gheții binare sunt esențiale în dimensionarea și eficientizarea instalațiilor de climatizare care o utilizează. Aceste proprietăți depind în principal de fracția de gheață, de temperatură și de compoziția amestecului purtător.

Printre cele mai relevante proprietăți se numără:

- **Căldura specifică**

$$c_p = \frac{h(T) - h(T+\delta T)}{\delta T}$$

Căldura specifică a agenților frigorifici intermediari convenționali monofazici este de aproximativ opt ori mai mică, decât cea a gheții binare. Ca rezultat, diametrul și viteza acestora în interiorul conductelor, pot fi reduse cu aproximativ jumătate.

- **Conductivitatea termică**

$$\lambda = \lambda_l * \frac{1+2*f_{vol}*y}{1-f_{vol}*y}$$

în care:

λ = conductivitatea termică a gheţii, [W/mK];

λl = conductivitatea termică a soluţiei, [W/mK];

$f\,vol$ = formula de calcul pentru fracţia volumetrică de gheață este:

$$\boldsymbol{f_{vol} = \frac{f}{f+(1-f)*\frac{\rho_g}{\rho_l}}}$$

$$\boldsymbol{y = \frac{1-\frac{\lambda_l}{\lambda_g}}{2*\frac{\lambda_l}{\lambda_g}+1}}$$

în care:

y = coeficient calculat dupa Eucksen – Hansen;

λl = conductivitatea termică a solutiei, [W/mK];

λg = conductivitatea termică a gheţii, [W/mK];

Metodele obișnuite utilizate pentru a măsura conductivitatea termică sunt inadecvate, deoarece orice ușoară încălzire reduce concentrația gheții binare.

Nu au existat referințe în literatura consultată până acum la determinarea experimentală a conductivității termice.

Până în prezent, modelele studiate care au fost și utilizate se bazează pe conductivitatea termică a fazei lichide, care este influențată de conductivitatea termică a amestecului binar.

Reid [104] oferă o relație frecvent utilizată:

$$\boldsymbol{\lambda_l = f * \lambda_{l1} + (1-f) * \lambda_{l2} - 0,72 * f * (1-f) * (\lambda_{l2} - \lambda_{l1}) \quad \lambda_{l2} > \lambda_{l1}}$$

Ordóñez-Miranda ş.a. [105] au aplicat analogia Maxwell între câmpul electric şi câmpul de temperaturi pentru a stabili o relaţie de calcul a conductivităţii termice a gheţii binare (în stare bifazică lichid-solid).

Experimentele realizate de autori s-au bazat pe un model analog dezvoltat de Antononi (1985) pentru un amestec de cărbuni cu apă:

$$\boldsymbol{\lambda = \lambda_l * \frac{2*\lambda_l+\lambda_g-2*\varphi*(\lambda_l-\lambda_g)}{2*\lambda_l+\lambda_g+\varphi*(\lambda_l-\lambda_g)}}$$

în care:

λ = conductivitatea termică a gheţii binare, [W/mK];

λl = conductivitatea termică a soluţiei, [W/mK];

λg = conductivitatea termică a gheţii , [W/mK];

ϕ , β , γ = coeficienţi de calcul

Vl = volumul lichidului din amestec

Vg = volumul gheţii din amestec

Berg (1995, 1999), a dezvoltat o corelaţie pe baza modelului lui Jeffrey [106] care i-a în considerare şi interacțiunea termică între particulele de gheață:

$$\boldsymbol{\lambda = \lambda_l * [1 + 3 * \varphi * \beta * (1 + \varphi * \beta * \gamma)]}$$

$$\boldsymbol{\varphi = \frac{V_g}{V_l};\ \beta = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2};\ \alpha = \frac{\lambda_g}{\lambda_l};\ \gamma = 1 + 0,25 * \beta + \frac{3 * \beta}{16} * \left(\frac{\alpha + 2}{2 * \alpha + 3}\right)}$$

Căldura specifică echivalentă: se modifică în funcție de proporția de fază solidă, având o valoare medie de 2,2–2,8 kJ/kg·K pentru fracții între 20–30%;

Entalpia: oferă o imagine a energiei totale disponibile în procesul de topire și răcire;

Entalpia masică a unui mix de apă-gheață poate fi determinată prin însumarea entalpiilor masice ale celor două componente principale: gheața pură și mixul de lichid (soluție apă-aditiv), măsurate toate la aceeași temperatură.

Relația matematică care descrie acest calcul este următoarea:

$$\boldsymbol{h = f_g * h_g + (1 - f_g) * h_l}$$

în care:

f_g = fracția masică de agheață [%];;

h_g = entalpia masică a gheţii, [J/kg];

h_l = entalpia masică a soluţiei apoase, [J/kg].

Proporția de gheață dintr-un astfel de amestec este influențată direct de concentrația masică inițială a substanței adăugate (aditivului) în apă și de concentrația finală a aditivului în cantitatea de lichid rămasă după formarea gheții. Aceste concentrații sunt determinate de diagrama de fază solid-lichid.

Considerând că entalpia masică a apei pure și a aditivului pur la 0°C este nulă, entalpia specifică a gheții poate fi calculată utilizând următoarea relație.

$$\boldsymbol{h_g = c_{pg} * t - r_s}$$

în care

r_s = căldura latentă de topire a gheţii, la 0°C (cu valoarea de 333000 J/kg).

Relația lui Bel&Lallemand [100] este folosită pentru calculul căldurii specifice masice a gheţii la 0°C și este de forma :

$c_{pg} = 2{,}1162 + 0{,}0078 \cdot t$, [J/(kg K)]

Concentrația masică a aditivului și de temperatura mixului apă-gheață au un efect direct asupra entalpiei fazei lichide $h_l = h_l \cdot (\text{cr}, T)$, relația de calcul acesteia fiind:

$$\boldsymbol{h_l = c_{pl} * T}$$

în care:

c_{pl} = căldura specifică masică, la presiune constantă a soluției apoase.

Entalpia specifică a mixului apă-aditiv poate fi obținută din tabelele sau nomogramele specifice, valorile fiind determinate funcție de concentrația volumetrică sau masică a aditivului și funcțe de temperatura amestecului. Entalpia unui amestec de apă-gheață este influențată în principal de proporția de gheață prezentă,și într-o măsură mai mică, de capacitatea termică a mixului apă-aditiv.

Vâscozitatea: are o creștere exponențială cu fracția de gheață și influențează direct regimul de curgere.

- **Vâscozitatea dinamică** (după Thomas [107])

Vâscozitatea gheții binare este determinată de o serie de factori, inclusiv fracția volumetrică medie de gheață din amestecul binar, viteza medie, diametrul tubului, dimensiunea particulelor de gheață și proprietățile termofizice și de transport ale soluției caloportoare.

Calcularea vâscozității fluidelor bifazice este un proces complicat, în special atunci când este vorba de un amestec lichid-solid, cum este gheța binară. Este de luat în calcul că distribuția fracției volumetrice de gheață în lichid nu este niciodată uniformă, ci heterogenă. În aceste circumstanțe, proprietățile reologice ale gheții aflate în suspensie sunt afectate și au impact asupra proprietăților de transport ale fluidului. Din această cauză în funcție de condițiile de lucru, amestecul apă-gheață poate acționa ca un fluid newtonian, sau nu. Conform experimentelor efectuate în cadrul laboratorului [10, 51], amestecul apă-gheața se comportă ca un fluid Newtonian la viteze medii și

fracții volumetrice reduse. Vâscozitatea este influențată atât de viteza medie, cât și de diametrul tubului, pe lângă fracția masică de apă-gheață, care crește odată cu viteza amestecului. De aici rezultă că gheața binară se comportă ca un fluid Bingham sau ca un fluid nenewtonian. Vâscozitatea amestecului apă-gheață crește odată cu diametrul tubului la viteze medii mai mici.

Pentru proiectarea sistemelor care folosesc gheața binară ca agent secundar, este esențial să se țină cont de comportamentul reologic al amestecurilor binare de tip apă-gheață. Acest comportament poate fi ca fluid newtonean până când fracția volumetrică de gheață atinge o valoare critică sau un anumit prag. Acesta este motivul pentru care vâscozitatea amestecului apă-gheață variază în timp, deoarece dimensiunea particulelor de gheață din amestec se modifică în timp. Experimentele realizate de Thomas [107] au demonstrat că dimensiunile diferite ale particulelor de apă-gheață din amestec au impact asupra vâscozității la fracții volumetrice de apă-gheață mai mici de 6%. Influența diametrului particulelor crește odată cu creșterea fracției volumetrice de gheață. În consecință, dimensiunea particulelor este extrem de importantă în cazul în care curgerea devine heterogenă. Acest lucru este valabil mai ales în situațiile în care viteza medie a amestecului este extrem de scăzută situație în care există riscul ca particulele de gheață să se stratifice la partea superioară. Influența forțelor de interacțiune este mai mare în curgerea amestecului heterogen decât în curgerea amestecurilor omogene. Datorită acestor forțe valoarea locală a vâscozității amestecului apă-gheață din partea superioară crește rapid, influențând astfel valoarea medie a vâscozității amestecului.

De exemplu, ecuația lui Einstein poate fi folosită pentru a calcula vâscozitatea dinamică a amestecului bifazic de tip apă-gheață:

$$\boldsymbol{\eta = \eta_l * (1 + 2,5 * f_v)}$$

în care:

ηl = vâscozitatea dinamică a lichidului format din apă și aditiv;

fv = fracţia volumică de gheață în amestecul binar.

Vâscozitatea dinamică a soluţiei apă – aditiv (propilenglicol, etilenglicol sau etanol), ηl, se găsește în manuale sau nomograme de specialitate, în funcţie de concentraţia masică a aditivului utilizat şi implicit de temperatura soluţiei apoase.

Fracţia volumică de gheață, *fv* , este calculată cu formula:

$$\boldsymbol{f_v = f_g * \frac{\rho}{\rho_g}} \quad (1)$$

În plus vâscozitatea dinamică a amestecului apă-gheață poate fi ușor calculată, şi cu ajutorul ecuaţiei Jeffrey:

$$\boldsymbol{\eta = \eta_l * (1 + A * f_v)}$$

în care 2,5<A<10

Atunci când vine vorba de calcularea valorii locale a vâscozității pentru o curgere eterogenă, nici ecuațiile Einstein, nici ecuațiile Jeffrey [106] nu iau în considerare interacțiunea dintre particulele de gheață. Acest lucru este esențial pentru vitezele medii scăzute, combinate cu fracții volumetrice ridicate de gheață.

Din cele menționate mai sus, rezultă că ecuația Jeffrey simulează curgerea suspensiei omogene, care este reprezentată de amestecul bifazic cunoscut sub numele de apă-gheață; Aceasta se întâmplă la viteze mari, așa că efectul interacțiunii dintre particulele de gheață este insignifiant.

Alte experimente au demonstrat că, la viteze ridicate ale amestecului bifazic și la fracții volumetrice de gheață reduse, de exemplu mai mici de 10% din valoarea medie, vâscozitatea amestecului binar este independentă de viteza medie a gheții binare, la fel ca în cazul fluidelor Newtoniene. Cu toate acestea, vâscozitatea amestecului apă-gheață crește rapid pe măsură ce viteza amestecului scade și fracția masică de gheață crește.

Curgerile bifazice de tip omogen, ale căror vâscozitate depinde doar de fracția volumică medie de apă-gheață, au fost create prin viteze ale amestecului binar de aproximativ 2 m/s,; prin urmare, vâscozitatea poate fi obținută folosind ecuația lui Thomas [107]:

$$\boldsymbol{\eta = \eta_l * (1 + 2,5 * f_v + 10,05 * f_v^2 + 0,00273 * e^{16,6 * f_v})}$$

în care:

μ = vâscozitatea amestecului apă-gheață, [N*s/m^2];

μ*l* = vâscozitatea gheţii în stare lichidă, [N*s/m^2];

fv = fracţia volumetrică de gheață, [%].

În plus, experimentele au demonstrat că mărimea particulelor de gheață nu au nici o influență asupra vâscozității gheții binare odată ce curgerea este asigurată ca fiind de tip omogen.

Mărimea particulelor de gheață și a diametrului tubului reduc vâscozitatea amestecului apă-gheață cu aproximativ 3 până la 6%. Acest lucru se întâmplă doar dacă viteza medie a amestecului apă-gheață scade, ceea ce poate duce la aglomerarea cristalelor de gheață la partea de sus a tubului.

Pentru fracții volumice de gheață mai mari de 15%, ecuația lui Thomas [107] indică valori mai mari decât cele măsurate.

- **Pierdereri de sarcină**

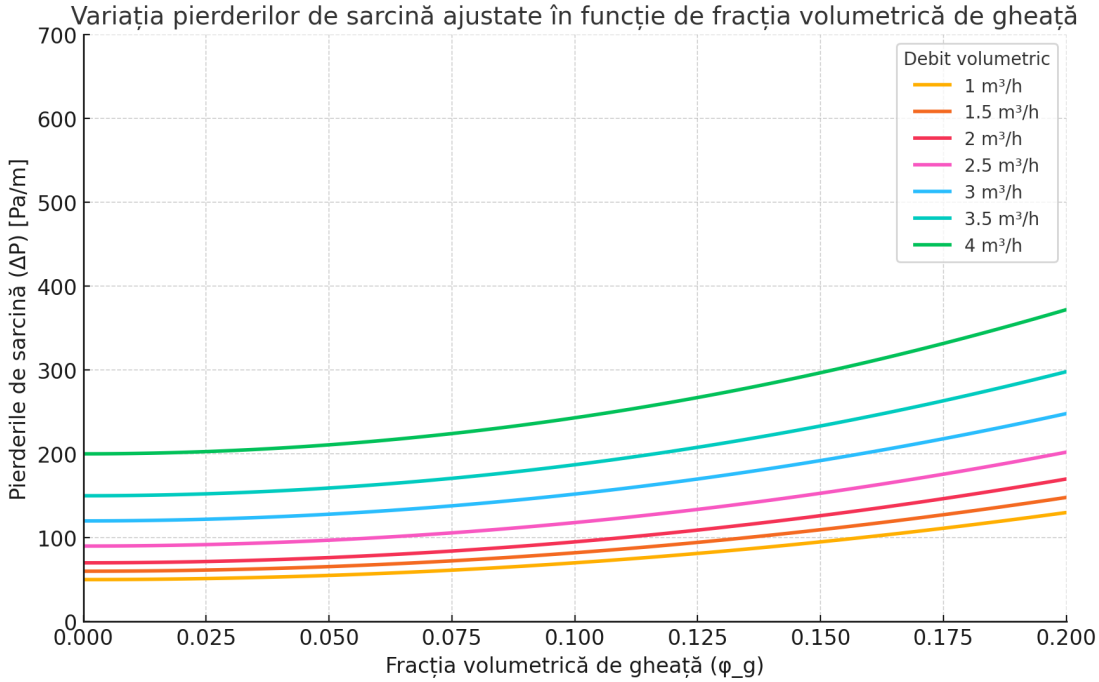
Pierderile de sarcină aferente celor cinci tipuri de agenți intermediari, sunt aproximativ egale la concentrații scăzute de gheață, care variază între 10 și 15%. Soluțiile de clorură de calciu și de magneziu au pierderi de presiune mai mari decât soluțiile de etilen-glicol, etanol și propilen-glicol la concentrații de gheață mai mari de 15%. În consecință, concentrația soluțiilor a fost aleasă pentru a garanta un punct de congelare identic în fiecare dintre cele cinci cazuri.

Soluția de etanol-apă este responsabilă de cea mai scăzută pierdere de sarcină. Fotografia la microscop a particulelor de gheață care au fost create în fiecare dintre cele cinci soluții diferite arătând că dimensiunile particulelor de gheață au rămas aceleași în fiecare dintre cazuri. Prin urmare, nu au putut indicat că sunt pierderile diferite de presiune sunt produse de diferențe în dimensiunile particulelor de gheață.

Tot din analiza microscopică s-a observat că, indiferent de tipul de generator de gheață folosit, particulele de gheață au aceeași dimensiune, dacă condiția de înghețare a soluției este aceeași.Experimentele au fost efectuate cu un amestec de apă cu etanol.

O diagramă care prezintă variația căderilor de presiune în funcție de fracția volumetrică de gheață din amestecul bifazic a fost creată de Bel (1999) [108]. Comportamentul reologic al amestecului se

schimbă pentru fracții volumetrice de gheață între 10 și 15%, așa cum se arată în figură.



Variaţia pierderilor de sarcină în funcţie de fracţia volumetrică de gheaţă

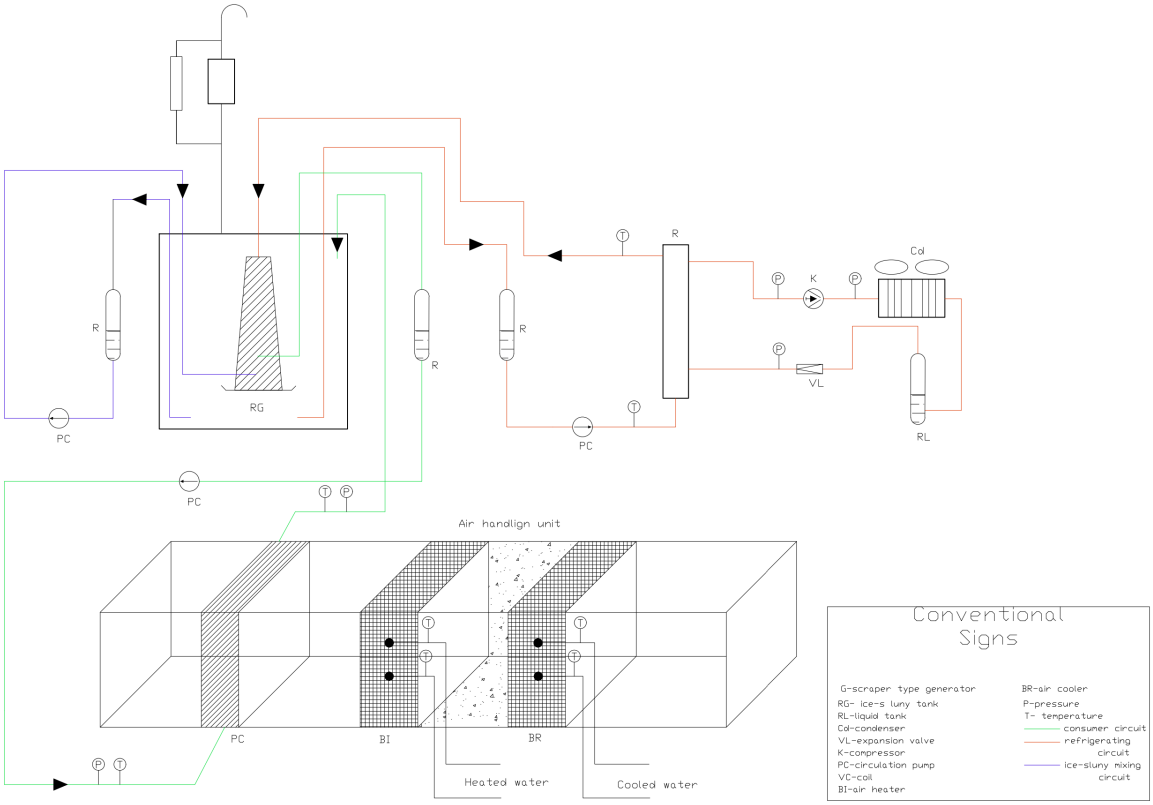
Acest lucru duce la o creștere liniară a căderii de sarcină, (ξ), conform relației:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho^2 * w}{2}} * \frac{D_h}{L}$$

Variația entalpiei și vâscozității în funcție de fracția de gheață. Graficul prezintă două curbe principale: una indică variația entalpiei totale în funcție de fracția de gheață, iar cealaltă curba vâscozității dinamice. Se observă o scădere graduală a entalpiei, concomitent cu o creștere exponențială a vâscozității peste pragul de 30% gheață.S-a analizat comportamentul unui ciclu frigorific experimental cu R448A, în care gheața binară a fost utilizată ca mediu intermediar. Rezultatele au arătat o eficiență globală îmbunătățită cu 17% față de sistemele clasice, datorită recuperării energiei latente de topire în timpul regimului de funcționare discontinuă.

9. Instalația experimentală utilizată în cercetare

Pentru validarea ipotezelor teoretice și a concluziilor analitice, s-a folosit o instalație experimentală existent în cadrul laboratorului UTCB, destinată producerii și testării gheții binare în condiții controlate.



Schema 2D a instalației frigorifice experimentale de generare a gheții binare

Descrierea componentelor principale ale instalației:

- Generator de gheață binară tip SSE (Scraped Surface Evaporator), cu o capacitate de răcire de 7 kW;
- Rezervor tampon de 1000 litri, prevăzut cu agitator axial pentru menținerea omogenității suspensiei;
- Schimbător de căldură coaxial, utilizat pentru extracția energiei reci din amestec;

- Baterie de răcire pentru aer, echipată cu senzori de temperatură la intrare și ieșire;
- Pompe de recirculare, cu controlul automat al frecvenței;
- Senzori pentru măsurarea presiunii, debitului, temperaturii;
- Sistem de automatizare cu PLC Moeller și interfață HMI pentru control și monitorizare în timp real.
- Controlerul programabil (PLC - Moeller Logic Controller) - acest dispozitiv este creierul sistemului de automatizare, gestionând logica de control pentru întreaga instalație. Este prevăzut cu ieșiri digitale și analogice pentru controlul pompelor, compresorului și al ventilatoarelor de condensare. Integrează senzori de temperatură și presiune, colectând date precum temperatură și presiune pentru a controla procesele frigorifice.

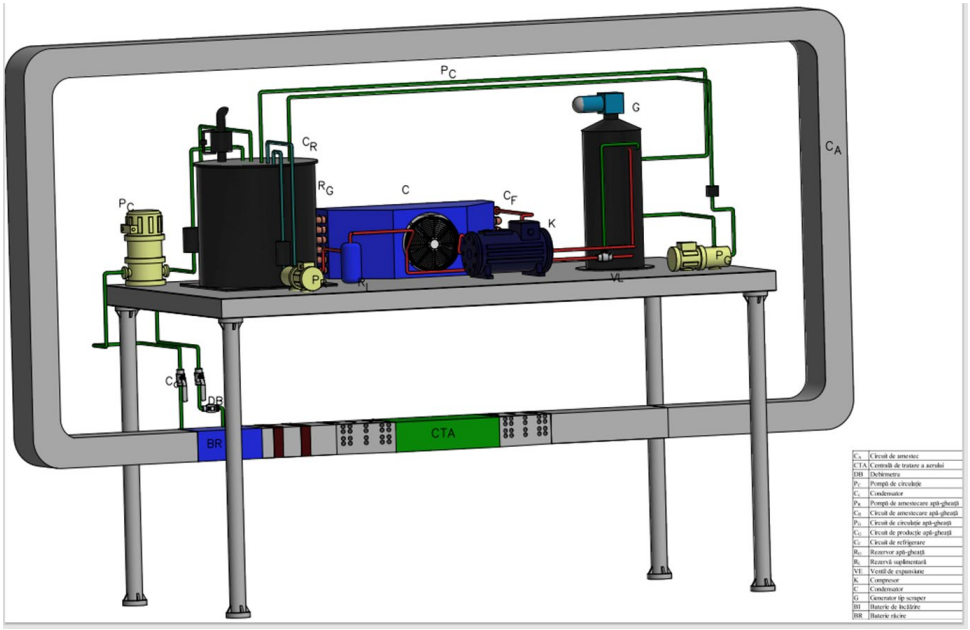


z



- Modulele de protecție și releele. Relee modulare sunt vizibile în partea dreaptă sus a tabloului ne oferă protecție pentru motoarele pompelor sau compresorului împotriva suprasarcinilor, scurtcircuitelor sau a altor defecțiuni. Siguranțe dispozitivele din partea stângă sus oferă protecție suplimentară pentru circuitele electrice.
- Afișajele digitale pentru temperatură. Cele două controllere de tip Dixell (în partea de jos) ne indică temperaturile din instalația frigorifică de producere a gheții cât și a amestecului binar din rezervorul de 1000 de litri. Aceste controllere au conectate senzorii de temperatură de tip PT100 din diferite puncte ale instalației astfel: unul pentru rezervorul de gheață binară, iar cel de al doilea pentru circuitul de apă-gheață către consumator.

- Schema funcțională a instalației experimentale de generare și utilizare a gheții binare. Schema prezintă traseul complet al agentului frigorific și al amestecului de gheață binară, evidențiind punctele de măsurare, schimbul termic și controlul fracției de gheață.



Schema 3D a standului experimental utilizat în cercetare



Fotografia standului real utilizat.

Standul experimental utilizat permite:

- testarea variației randamentului în funcție de parametri operaționali (temperatură de vaporizare, fracție de gheață);
- observarea pierderilor de sarcină în funcție de trasee, viteze și proporția de particule solide;
- analiza comportamentului termodinamic al ciclului de răcire indirectă cu gheață binară;
- validarea modelelor teoretice dezvoltate în cadrul lucrării.

Prin intermediul acestei instalații s-au colectat datele ciclurilor de funcționare, în diverse configurații. Acestea au stat la baza evaluării performanțelor sistemului și a influenței fracției de gheață asupra eficienței globale.

10. Rezultate și discuții

Analiza datelor experimentale a permis evaluarea performanței sistemului cu gheață binară în diferite regimuri de funcționare.

Principalele rezultate evidențiate sunt:

- Creșterea eficienței globale cu 20–25% față de soluțiile clasice;

- Reducerea timpului necesar pentru atingerea temperaturilor țintă în bateriile de răcire cu 30–40%;
- Stabilitatea temperaturii agentului de răcire la ieșirea din schimbătoare, chiar în condiții de sarcină variabilă;
- Pierderi de sarcină acceptabile până la fracții de gheață de 30% și viteze peste 1,5 m/s.
- Randamentul ciclului frigorific în funcție de fracția de gheață.

Se observă o creștere semnificativă a randamentului între 15% și 30% fracție de gheață, cu o plafonare la valori peste 30% din cauza creșterii vâscozității și a scăderii debitului util.
Evoluția temperaturii aerului la ieșirea din baterie, în funcție de timpul de expunere și tipul agentului de răcire.

Interpretarea acestor rezultate confirmă avantajele folosirii gheții binare în climatizarea de confort și permite conturarea unor recomandări de dimensionare și exploatare pentru aplicațiile reale.

11. Concluzii și propuneri de cercetare continuă.

În urma cercetărilor experimentale prezentate în acestă teză au rezultat următoarele concluzii:

- pentru aceeași fracție volumetrică de gheață în amestec, puterea frigorifică crește odată cu creșterea debitului de amestec apă-gheață care alimentează bateria de răcire a aerului;
- necesarul de frig la consumator a fost validat experimental;
- acesta având valorii medii de 5.17 kW pentru o fracție volumetrică de gheață de 15.00 %;
- 5.42 kW pentru o fracție volumetrică de gheață de 16.00 %;
- 5.74 kW pentru o fracție volumetrică de gheață de 17.00 %, iar debitul de aer în această situație analizată fiind constant de $Qaer = 3000\ m^3/h$.

Referitor la proprietăților termofizice și de transport ale gheții binare trebuie subliniat că s-a admis o serie de ipoteze legate de:

- Absența modificării în timp a dimensiunii particulelor de gheață;
- Comportarea amestecului binar ca un amestec omogen;
- Absența forțelor de interacțiune între particule, respectiv ignorarea tendințelor de aglomerare din stocator, consumator și prin conducte.

- Diseminării rezultatelor experimentale, în raport cu cele teoretice în intervale neadmisibil de largi.

Referitor la problematica de tip experimental sunt de luat în considerare o serie de aspecte greu controlabile, cum ar fi:

- Conducerea unui regim de funcţionare cu fracţie masică impusă la ieşirea din schimbătorul de căldură, inclusiv în cazul topirii totale a particulelor de gheață;
- Prevenirea aglomerării particulelor în interiorul rezervorului de stocare;
- Curgerea omogenă a amestecului binar în reţeaua de distribuţie şi de alimentare a consumatorului de apă-gheață;
- Instalarea fenomenului de supraîncălzire a fazei lichide din amestec, la ieşirea din schimbătorul de căldură.

Referitor la modelarea matematică a transferului de căldură şi masă la circulaţia amestecului apă-gheață prin diferite tipuri de schimbătoare de căldură, trebuie subliniat faptul că ecuaţiile criteriale disponibile modelează fenomenul de o manieră mai curând punctuală, altfel spus, limitată de condiţii excesiv de particulare, de specifice, atât de tip constructiv, cât şi de tip funcţional. Acest tip de modelare îngustează drastic aria de aplicare a ecuaţiilor respective în calcule reale de funcționare și dimensionare a acestor tipuri de instalații de climatizare.

Acesta este contextul în care, cred că în prezent sunt încă de mare actualitate cercetări experimentale privind modelarea transferului de căldură şi masă la circulaţia amestecului apă-gheață prin diferite tipuri de schimbătoare de căldură, conducte și ale echipamentelor circuitelor de climatizare de confort, cât și pentru obținerea unor ecuații criteriale universal valabile.

Ca și avantaj putem spune în urma cercetărilor, că pentru fracțiile de gheață studiate nu este necesar a se modifica nici un echipament sau parametru al circuitului hidraulic de transport al amestecului apă-gheață în raport cu apa-răcită.

Un alt avantaj al utilizării gheții binare este reprezentat de faptul că transferul de căldură are loc la temperatură cvasi - constantă, fapt care aduce o îmbunătățire substanțială a gradului de confort. Puterea frigorifică transportată pe unitatea de volum crește odată cu creșterea fracției de gheață și astfel se poate reduce încă din faza de proiectare, secțiunea conductelor de transport cât și suprafața de schimb de căldură de la consumator, obținându-se aceleași puteri frigorifice.

Capacitatea frigorifică instalată pentru aceste sisteme este mult redusă deoarece folosește acumularea căldurii latente a amestecului apă-gheață, în orele fără sarcină și eliberarea acesteia la nevoie în perioadele de vârf de sarcină.

In contextul actual al sustenabilității și creșterii eficienței energetice, folosirea agentului refrigerant de tipul R 448A a redus impactul potențial de încălzire global de aproximativ 3 ori, de la un GWP egal cu 3922 la un GWP egal cu 1387, iar presiunea de lucru din instalația frigorifică s-a redus și ea cu aproximativ 6%. Datorită efectuării acestui retrofit s-a redus atât amprenta de carbon cât și consumul de energie electrică al compresorului, obținându-se același lucru util.

Contribuția mea personală a constat în promovarea și efectuarea înlocuirii agentului refrigerant R 404A foarte poluant. cu agentul frigorific R 448A care are multiple avantaje, dovedite pe parcursul lucrării de doctorat. Realizarea analizei comparative între cei doi agenți frigorifici R 404A și respectiv R 448A, prezentând avantajele și dezavantajele folosirii acestuia din urmă.

Automatizarea pompei de circulație a amestecului apă-gheață, prin introducerea unui variator de frecvență, cu ajutorul căruia am controlat foarte precis frecvența, respectiv debitul amestecului de apă-gheață și am protejat și pompa de eventualele suprasarcini.

Repararea motoreductorului aferent generatorului de gheață și refacerea etanșeității acestuia. Refacerea etanșeității circuitului frigorific, înlocuirea filtrului dezumidificator. Reglarea supraîncălzirii în circuitul frigorific unde am ținut seama de glisarea de 6 grade Celsius a noului agent frigorific. Refacerea concentației aditivului pentru scăderea punctului de îngheț.

Parcurgera, analizarea și sistematizarea informațiilor a multor lucrări stiințifice citite din domeniul termotehnic, al ingineriei mecanice și legislație.

Participarea activă la conferințe, seminare și congrese stiințifice din domeniul climatizării de confort din SUA, Turcia, China, Danemarca, Republica Moldova, Italia, Serbia și România, unde am diseminat avantajele și dezavantajele utilizării amestecului apă-gheață în instalațiile de climatizare.Rezultatele prezentate în această lucrare evidențiază în mod convingător potențialul gheții binare ca agent de răcire eficient în instalațiile de climatizare. Utilizarea acestei tehnologii conduce la îmbunătățirea performanței energetice, la reducerea timpului de răcire, precum și la creșterea flexibilității operaționale a instalațiilor.

Sinteză a concluziilor și direcțiilor de cercetare.

Aspect evaluat	Concluzie	Propunere de cercetare
Transfer de căldură	Îmbunătățit cu până la 4x față de apă	Studii avansate CFD pe schimbătoare
Eficiență energetică	+25% față de soluții clasice	Integrarea cu surse regenerabile
Stabilitate și control	Bună, dacă fracția și debitul sunt optimizate	Sisteme adaptive cu inteligență artificială
Costuri de operare	Mai reduse pe termen lung	Analize de ciclu de viață (LCA)
Scalabilitate	Posibilă în aplicații industriale	Studii pe instalații de mari dimensiuni

Propuneri pentru dezvoltări viitoare:

- Integrarea gheții binare în sisteme hibride (climatizare + stocare energie);
- Utilizarea senzorilor inteligenți pentru controlul fracției de gheață;
- Adaptarea tehnologiei la climatul mediteranian și tropical pentru eficiență maximă;
- Extinderea aplicațiilor către industria alimentară, IT, agro-industrie sau domeniul medical.

12. Bibliografie

1. Bellas, J., I. Chaer, and S.A. Tassou, *Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers.* Applied Thermal Engineering, 2002. **22**(7): p. 721-732.
2. Shire, G.S.F., G.L. Quarini, and T.S. Evans, *Pressure drop of flowing ice slurries in industrial heat exchangers.* Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(8): p. 1500-1506.

3. Girip, A., et al. *Environmental impact of some possible substitutes for R22 in refrigeration and heat pump systems*. in *Proceedings of the National Conference on the Installations for beginning of three millennium*. 2013.
4. Calotă, R., et al., *Study on Energy Efficiency of an Off-Grid Vending Machine with Compact Heat Exchangers and Low GWP Refrigerant Powered by Solar Energy.* Energies, 2022. **15**(12): p. 4433.
5. Kauffeld, M. and S. Gund, *Ice slurry – History, current technologies and future developments.* International Journal of Refrigeration, 2019. **99**: p. 264-271.
6. *Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. "refrigeration." Encyclopedia Britannica, July 9, 2024.*.
7. *Refrigeration Nation: A History of Ice, Appliances, and Enterprise in America.* Journal of American History, 2015. **102**(3): p. 892-893.
8. Calotă, R., et al., *Hybrid Absorption Heat Pump System Using Renewable Energy.* Procedia Engineering, 2017. **181**: p. 738-745.
9. Nichita, M.T., R. Dumitrescu, and F. Chiriac, *Aspects concerning the use of binary ice for comfort air-conditioners.* Romanian Journal of Civil Engineering/Revista Română de Inginerie Civilă, 2016. **7**(3).
10. Dumitrescu, R., A. Ilie, and F. Chiriac, *Experimental comparative research on ice-slurry vs. cooled water in comfort air-conditionig systems* 2009.
11. Chiriac, F., et al., *Low power absorption refrigeration systems, with storage, for air conditioning, driven by renewable energy sources*
12. Arenas-Larrañaga, M., et al., *Performance of solar-ice slurry systems for residential buildings in European climates.* Energy and Buildings, 2024. **307**: p. 113965.
13. Ilie, A., et al., *Study on Technical and Economical Solutions for Improving Air-conditioning Efficiency in Building Sector.* Energy Procedia, 2017. **112**: p. 537-544.
14. Girip, A. and A. Ilie, *Comparative analysis on the energy use of different refrigeration systems for supermarket application.*
15. Rayhan, F.A., Yanuar, and A.S. Pamitran, *Effect of ice mass fraction on ice slurry flow for cold energy storage application.* Energy Reports, 2020. **6**: p. 790-794.
16. Niezgoda-Żelasko, B., *Transport of ice slurry in the pipelines of central air conditioning systems in mining plants.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023. **142**: p. 106636.
17. Girip, A., A. Ilie, and R. Calotă. *Comparative study regarding retrofitting with a low GWP refrigerant in an ice rink with energy recovery implementation*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. IOP Publishing.
18. Shen, C., et al., *The effect of plasma-activated ice slurry with both pre-cooling and antifungal activity on postharvest sweet cherry fruit.* Postharvest Biology and Technology, 2024. **212**: p. 112867.
19. Wang, Q., et al., *Ice slurry preparation methods and their applicability to fruit and vegetable precooling systems: A critical review.* International Journal of Refrigeration, 2024. **157**: p. 60-72.
20. Egolf, P.W. and M. Kauffeld, *From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications.* International Journal of Refrigeration, 2005. **28**(1): p. 4-12.
21. Dumitrescu, R., A. Ilie, and F. Ciriac, *Ice Slurry vs cooled water as a refrigerant in confort air conditioning sistems.* Diunggah, 2013.
22. Ilie, A., R. Dumitrescu, and F. Chiriac, *Experimental stand for research on thermo-hydraulic processes and equipment for refrigeration systems, air-conditioning systems and heat pumps.* Research Project funded by the Romanian National University Research Council, 2007. **2009**.
23. Paul, J., L. Malter, and U. Münster. *Generation and utilization of liquid ice (binary ice)*. in *IIR 20th International Conference on Refrigeration into the Third Millennium, Sept. 19-24, 1999, Sydney, Australia*. 1999.
24. Ure, Z. and M. Mashrae, *Slurry ice based cooling systems.* AIRAH JOURNAL, 2001. **55**(9): p. 24-27.
25. Girip, A., et al., *Theoretical aspects regarding energy efficiency in foods refrigeration and freezing.* Romanian Journal of Civil Engineering/Revista Română de Inginerie Civilă, 2021. **12**(4).
26. Chiriac, F., A. Ilie, and R. Dumitrescu. *Ammonia condensation heat transfer in air-cooled mesochannel heat exchangers*. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2003.
27. Niezgoda-Żelasko, B. and W. Zalewski, *Momentum transfer of ice slurry flows in tubes, experimental investigations.* International Journal of Refrigeration, 2006. **29**(3): p. 418-428.

28. Zhang, P. and X.J. Shi, *Thermo-fluidic characteristics of ice slurry in horizontal circular pipes.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015. **89**: p. 950-963.
29. Girip, A., et al. *Centralized cooled water production systems for comfort air conditionig* in *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016*. 2016.
30. Calotă, R., et al. *Study on the heat transfer with regard to an off-grid vending machine having a low impact on the environment*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. IOP Publishing.
31. Nichita, M., *Teză de doctorat - Contribuții la studiul proceselor de producere și stocare a gheții binare Conducător științific: Prof. univ. dr. ing. Florea CHIRIAC*. 2011.
32. Chiriac, F., et al., *Romanian research on refrigeration and air-conditioning.* Technical Sciences, 2016. **1**(1): p. 17-33.
33. Meewisse, J.W. and C.A. Infante Ferreira, *Validation of the use of heat transfer models in liquid/solid fluidized beds for ice slurry generation.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**(19): p. 3683-3695.
34. Ilie, A., R. Dumitrescu, and F. Chiriac, *Theoretical And Experimental Study Of Ammonia Condensation Heat Transfer In Air-Cooled Mesochannel Heat Exchangers.* 2005.
35. Zhang, P. and Z.W. Ma, *An overview of fundamental studies and applications of phase change material slurries to secondary loop refrigeration and air conditioning systems.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(7): p. 5021-5058.
36. Sidik, N.A.C., et al., *Performance enhancement of cold thermal energy storage system using nanofluid phase change materials: A review.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018. **94**: p. 85-95.
37. Kauffeld, M., et al., *Ice slurry applications.* International Journal of Refrigeration, 2010. **33**(8): p. 1491-1505.
38. Onokoko, L., et al., *Experimental and numerical investigation of isothermal ice slurry flow.* International Journal of Thermal Sciences, 2018. **126**: p. 82-95.
39. Shire, G.S.F., et al., *The anomalous pressure drop behaviour of ice slurries flowing through constrictions.* International Journal of Multiphase Flow, 2008. **34**(5): p. 510-515.
40. Mika, Ł., *Ice slurry flow in a poppet-type flow control valve.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2013. **45**: p. 128-135.
41. Wang, J., T. Zhang, and S. Wang, *Heterogeneous ice slurry flow and concentration distribution in horizontal pipes.* International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013. **44**: p. 425-434.
42. Kitanovski, A., et al. *Flow patterns of ice slurry flows*. in *Fifth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration, Stockholm, Sweden*. 2002.
43. Kitanovski, A. and A. Poredoš, *Concentration distribution and viscosity of ice-slurry in heterogeneous flow.* International Journal of Refrigeration, 2002. **25**(6): p. 827-835.
44. Wang, J., et al., *Mathematical and experimental investigation on pressure drop of heterogeneous ice slurry flow in horizontal pipes.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. **108**: p. 2381-2392.
45. Lugo, R., et al., *An excess function method to model the thermophysical properties of one-phase secondary refrigerants.* International Journal of Refrigeration, 2002. **25**(7): p. 916-923.
46. Manninen, M., V. Taivassalo, and S. Kallio, *On the mixture model for multiphase flow.* 1996.
47. Gidaspow, D., *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. 1994: Academic press.
48. Kolev, N.I., *Multiphase flow dynamics 4: turbulence, gas adsorption and release, diesel fuel properties*. Vol. 4. 2011: Springer Science & Business Media.
49. Egolf, P.W., et al., *Thermodynamics and heat transfer of ice slurries.* International Journal of Refrigeration, 2005. **28**(1): p. 51-59.
50. Bédécarrats, J.-P., F. Strub, and C. Peuvrel, *Thermal and hydrodynamic considerations of ice slurry in heat exchangers.* International Journal of Refrigeration, 2009. **32**(7): p. 1791-1800.
51. Chiriac, F., et al., *Maşini şi instalaţii frigorifice.* Editura Agir, Bucureşti, 2006.
52. Quarini, J., *Ice-pigging to reduce and remove fouling and to achieve clean-in-place.* Applied Thermal Engineering, 2002. **22**(7): p. 747-753.
53. Dwivedi, D., K. Lepková, and T. Becker, *Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods.* RSC Advances, 2017. **7**(8): p. 4580-4610.

54. Xu, D., et al., *A CFD-PBM approach for modeling ice slurry flow in horizontal pipes.* Chemical Engineering Science, 2018. **176**: p. 546-559.
55. Yang, S., et al., *Experimental study on effects of particle melting and micro-convection on measurement of thermal conductivity of ice slurry.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022. **136**: p. 106178.
56. Mellari, S., *Study of the convective heat transfer during full melt off of ice slurry in laminar and non-Newtonian flows.* International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2022. **30**(1): p. 10.
57. Niezgoda-Żelasko, B., *Heat transfer in the melting of ice slurry during flow in a vertical slit channel.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2024. **153**: p. 111133.
58. Mellari, S., *Experimental investigation and modeling of the pressure drop of ice slurry flow in horizontal pipe.* International Journal of Refrigeration, 2023. **147**: p. 134-142.
59. Lin, C.X. and M.A. Ebadian, *A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe.* Computers & Fluids, 2008. **37**(8): p. 965-974.
60. Bordet, A., et al., *Flow visualizations and pressure drop measurements of isothermal ice slurry pipe flows.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2018. **99**: p. 595-604.
61. Kumano, H., et al., *Experimental study on flow characteristics of ice slurry through a T-junction Part I: Laminar flow.* International Journal of Refrigeration, 2020. **116**: p. 89-95.
62. Dumitrescu, R., et al., *Experimental Study on Heat and Mass Transfer in Ammonia Evaporative Condensers.* Energy Procedia, 2017. **112**: p. 126-133.
63. Wang, H., G. He, and R. Feng, *An effective method for preventing ice-blockage in dynamic generation system with supercooling water.* International Journal of Refrigeration, 2014. **46**: p. 114-122.
64. Monteiro, A.C.S. and P.K. Bansal, *Pressure drop characteristics and rheological modeling of ice slurry flow in pipes.* International Journal of Refrigeration, 2010. **33**(8): p. 1523-1532.
65. Wang, J., et al., *Flow and heat transfer characteristics of ice slurry in typical components of cooling systems: A review.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. **141**: p. 922-939.
66. Ma, F. and P. Zhang, *A review of thermo-fluidic performance and application of shellless phase change slurry: Part 1–Preparations, properties and applications.* Energy, 2019. **189**: p. 116246.
67. Ma, F. and P. Zhang, *A review of thermo-fluidic performance and application of shellless phase change slurry: Part 2–Flow and heat transfer characteristics.* Energy, 2020. **192**: p. 116602.
68. Zou, L., X. Zhang, and Q. Zheng, *Research progress on preparation of binary ice by vacuum flash evaporation: A review.* International Journal of Refrigeration, 2021. **121**: p. 72-85.
69. Hongfen, C., et al., *Vacuum ice-making technology and characteristic analysis.* Journal of Molecular Liquids, 2022. **360**: p. 119360.
70. Hu, R., et al., *Research status of supercooled water ice making: A review.* Journal of Molecular Liquids, 2022. **347**: p. 118334.
71. Huang, Y., et al., *Review of Ice Slurry Pigging Techniques for the Water Supply Industry: Engineering Design and Application.* ACS ES&T Engineering, 2022. **2**(7): p. 1144-1159.
72. Lv, Y., X. Zhang, and L. Zou, *Research progress on the effect of additives on ice slurry.* Heat and Mass Transfer, 2022. **58**(8): p. 1279-1287.
73. Lyu, F., et al., *Progress of ice slurry in food industry: application, production, heat and mass transfer.* International Journal of Food Science & Technology, 2022. **57**(2): p. 842-855.
74. Samah, W., et al., *Review on ice crystallization and adhesion to optimize ice slurry generators without moving components.* Applied Thermal Engineering, 2023. **223**: p. 119974.
75. Bordet, A., et al., *Advanced numerical modeling of turbulent ice slurry flows in a straight pipe.* International Journal of Thermal Sciences, 2018. **127**: p. 294-311.
76. Poling, B.E., *Vapor pressure prediction and correlation from the triple point to the critical point.* Fluid Phase Equilibria, 1996. **116**(1): p. 102-109.
77. *Vacuum ice slurry production: efficiency and versatility, Refrigeration World 2021 availe online:*
78. *Klaren, D.G. (2000). Self-Cleaning Heat Exchangers: Principles, Industrial Applications and Operating Installations, Industrial Heat Transfer Conference, Dubai, UAE, September.*
79. Witkamp, G.J., C.A.I. Ferreira, and P. Pronk. *Fluidized bed heat exchangers to prevent fouling in ice slurry systems and industrial crystallizers*. 2006.

80. Solnař, S., M. Dostál, and T. Jirout, *A novel contactless transient method for measuring local values of heat transfer coefficient.* Heat and Mass Transfer, 2021. **57**(6): p. 1025-1038.
81. Liu, X., et al., *Performance Study and Efficiency Improvement of Ice Slurry Production by Scraped-Surface Method.* Applied Sciences, 2019. **9**(1): p. 74.
82. Fukuda, Y., E. Okazaki, and R. Wada, *Effect of fluctuations of temperature during frozen storage on denaturation of fish myofibrillar protein.* Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2011. **23**(3): p. 335-340.
83. Zharov, A.A., et al., *Cold accumulators using binary ice in air conditioning systems.* Chemical and Petroleum Engineering, 2024.
84. SNOEK, C., *The Design and Operation of Ice-Sury based District Cooling Systems. International Energy Agency.* Report No.: 1993, 1993. **7**.
85. Rayhan, F.A. and R. Rizal, *Pressure drop and non-Newtonian behavior of ice slurry in a horizontal pipe.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022. **44**(5): p. 200.
86. "Kasza, K.E. and K. "Hayashi, *Ice slurry cooling research: Storage tank ice agglomeration and extraction*. 1999, United States: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (US); Argonne National Lab., IL (US). Medium: X; Size: page(s) 260-266.
87. Mellari, S., *Experimental investigations of ice slurry flows in horizontal pipe based on monopropylene glycol.* International Journal of Refrigeration, 2016. **65**: p. 27-41.
88. Ji, C., et al. *The Study on the Influence of the Containing Ice Ratio on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Ice Slurry in Coil Tubes*. 2020. Singapore: Springer Singapore.
89. Filip, A. and A. Ilie, *The Pressure Losses for Two Phase Flow of Air-Water in Horizontal Tubes.* Revista Romana de Inginerie Civila, 2016. **7**(3): p. 291.
90. Dumitrescu, R., et al., *Experimental Investigation on Frost Formation in Ammonia Finned Air-Coolers.* Revista Romana de Inginerie Civila, 2016. **7**(3): p. 282.
91. *Chiriac ,F.+ colaboratori: Procese de transfer de căldură şi masă în instalaţiile industriale,.Editura Tehnică Bucureşti-1982*.
92. Mota-Babiloni, A., et al., *Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems.* Energy Conversion and Management, 2015. **105**: p. 756-762.
93. Lillo, G., et al., *Experimental thermal and hydraulic characterization of R448A and comparison with R404A during flow boiling.* Applied Thermal Engineering, 2019. **161**: p. 114146.
94. Yang, J., et al., *Condensation heat transfer characteristics and generalized correlations of R404A, R448A, and R454C in a plate heat exchanger.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023. **147**: p. 106975.
95. *Montreal Protocol: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-2-a&chapter=27&clang=_en*. 1987.
96. *Kyoto Pprotocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf*. 1998.
97. *United Nations Kigali Protocoll: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=_en*. 2016.
98. *Regulamentul (UE) 2024/573 privind gazele fluorurate cu efect de seră, de modificare a Directivei (UE) 2019/1937 și de abrogare a*

Regulamentului (UE) nr. 517/2014. 2024.
99. Mendoza-Miranda, J.M., A. Mota-Babiloni, and J. Navarro-Esbrí, *Evaluation of R448A and R450A as low-GWP alternatives for R404A and R134a using a micro-fin tube evaporator model.* Applied Thermal Engineering, 2016. **98**: p. 330-339.
100. Bel, O. and A. Lallemand, *Study of a two phase secondary refrigerant. 1: Intrinsic thermophysical properties of an ice slurry.* International Journal of Refrigeration, 1999. **22**(3): p. 164-174.
101. Khattab, I.S., et al., *Density, viscosity, and surface tension of water+ethanol mixtures from 293 to 323K.* Korean Journal of Chemical Engineering, 2012. **29**(6): p. 812-817.

102. Don, W.G. and H.P. Robert, *Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition*. 8th / ed. 2008, New York: McGraw-Hill Education.
103. de Oliveira, M.J., *Binary Mixtures*, in *Equilibrium Thermodynamics*. 2017, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 171-200.
104. Reid, R.C., J.M. Prausnitz, and B.E. Poling, *The properties of gases and liquids*. 1987, United States: McGraw Hill Book Co.,New York, NY. Medium: X; Size: Pages: 741 2008-02-08 McGraw Hill Book Co., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020.
105. Ordóñez-Miranda, J., J.J. Alvarado-Gil, and R. Medina-Ezquivel, *Generalized Bruggeman Formula for the Effective Thermal Conductivity of Particulate Composites with an Interface Layer.* International Journal of Thermophysics, 2010. **31**(4): p. 975-986.
106. Jeffrey, D.J. and G.K. Batchelor, *Conduction through a random suspension of spheres.* Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1973. **335**(1602): p. 355-367.
107. Thomas, D.G., *Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles.* Journal of Colloid Science, 1965. **20**(3): p. 267-277.
108. Bel, O. and A. Lallemand, *Étude d'run fluide frigoporteur diphasique: 2: Analyse expérimentale du comportement thermique et rhéologique.* International Journal of Refrigeration, 1999. **22**(3): p. 175-187.
109. Chiriac, F., *Contractului de cercetare Nr.122/23.12.1999,"Cercetări privind utilizarea amoniacului ca agent ecologic în sisteme frigorifice cu generatoare de gheată binară (ice-slurry) si acumulare de frig"*. 1999.
110. Calota, R., *Contribuţii la studiul maşinilor frigorifice cu absorbţie de amoniac - apă cu schimbătoare compacte acţionate cu energie solară*. 2011.
111. *Gheaţa binară – soluţie alternativă, energetic şi ecologic, în climatizarea de confort. Grant CNCSIS 2007÷2008: Contract UTCB: GR19/2007*.
112. *Sisteme frigorifice cu compresie mecanica de puteri foarte mici pentru componente microelctronice. Grant CNCSIS COD 1146, Contract UTCB nr. 27652 / 2005*.
113. *Ice – Slurry as a Working Fluid in Small Capacity Air Conditioning Systems. Grant in Aid ASHRAE. Beneficiar : American Society Of Heating, Refrigerating & Air– Conditioning Engineers, Inc.. Proiect international, Contract UTCB nr. 6331: 2003*
114. *Cercetări privind reglarea puterii frigorifice prin utilizarea de cuplaje electromagnetice la acţionarea compresoarelor. Program national RELANSIN, Contract UTCB nr. 1212 / 12.02.2001*.
115. Snoek, C., *Heat transfer measurements of ice slurry in tube flow.* Exp. Heat Transf. Fluid Mech. Thermodyn. 1997, 4, 1997.