



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
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

*Contribuții privind creșterea eficienței sistemelor frigorifice cu  
CO<sub>2</sub> tip Booster prin valorificarea căldurii reziduale*

*Contributions to the improvement of energy efficiency in CO<sub>2</sub>  
Booster refrigeration systems through waste heat recovery*

**Autor:** Ing. Pavel Cornel-Constantin

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

București  
septembrie 2025

## Cuprins

Cuprins .....	2
Introducere .....	2
Capitolul 1 – Studiul bibliografic privind posibilitatea recuperării de căldură și energie din cadrul instalațiilor frigorifice cu CO <sub>2</sub> .....	5
1.1 Instalații frigorifice transcritice cu CO <sub>2</sub> .....	6
1.2 Recuperare de căldură în cadrul instalațiilor frigorifice cu CO <sub>2</sub> .....	7
1.3 Recuperare de energie mecanică în cadrul instalațiilor frigorifice cu CO <sub>2</sub> .....	8
Capitolul 2 – Căldura reziduală disponibilă pentru recuperare de la instalațiile frigorifice cu CO <sub>2</sub> tip Booster .....	10
Capitolul 3 – Recuperarea căldurii reziduale produse de instalația frigorifică cu CO <sub>2</sub> tip Booster prin utilizarea sistemelor de preparare apă caldă menajeră și a instalațiilor frigorifice cu absorbție .....	11
3.1 Introducere .....	11
3.2 Sursa de căldură – Instalația frigorifică R744 Booster S .....	12
3.3 Analiza termodinamică a instalațiilor de recuperare de căldură .....	12
3.4 Analiza termodinamică a impactului pe care îl au sistemele de recuperare de căldură asupra performanțelor instalației R744 Booster S .....	14
Capitolul 4 – Recuperarea căldurii reziduale produse de instalația frigorifică cu CO <sub>2</sub> prin utilizarea sistemelor Rankine cu fluide organice (ORC) .....	15
4.1 Introducere .....	15
4.2 Analiza termodinamică a sistemelor ORC pentru recuperare de căldură .....	15
4.3 Analiza comparativă a fluidelor de lucru .....	16
4.4 Analiza comparativă a impactului pe care îl au sistemele ORC asupra performanțelor instalației frigorifice tip R744 Booster S .....	16
Concluzii .....	17
C1. Concluzii generale .....	17
C2. Contribuție personală .....	21
C1. Direcții de cercetare viitoare .....	22
Articole publicate .....	23
Bibliografie selectivă .....	23

## Introducere

Teza de doctorat intitulată CONTRIBUȚII PRIVIND CREȘTEREA EFICIENȚEI SISTEMELOR FRIGORIFICE CU CO<sub>2</sub> TIP BOOSTER PRIN VALORIFICAREA CĂLDURII REZIDUALE (CONTRIBUTIONS TO THE IMPROVEMENT OF ENERGY EFFICIENCY IN CO<sub>2</sub> BOOSTER REFRIGERATION SYSTEMS THROUGH WASTE HEAT RECOVERY) se înscrie în preocupările colectivului de cercetare al Departamentului de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice (TMETF), Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronica

(FIMM) din cadrul Universității Naționale de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București (UPB). Teza a fost elaborată în cadrul Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică din UPB și conține contribuții originale în domeniul recuperării căldurii reziduale de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster. Datorită interesului în continuă creștere a utilizării CO<sub>2</sub>-ului (R744) ca agent frigorific natural alternativ la agenții frigorifici sintetici utilizați în mod tradițional, dar și a necesității creșterii eficienței sistemelor frigorifice, în această teză s-au analizat posibilități variate de recuperare de căldură conectate la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster.

În această teza a fost abordată și studiată una dintre cele mai întâlnite direcții de cercetare în domeniul recuperării de căldură de la instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster, și anume recuperarea căldurii reziduale de pe treapta de înaltă presiune, la refularea compresoarelor, înainte de răcitorul de gaz. Parametrii de stare ridicați ai CO<sub>2</sub>-ului în acea zonă a instalației fac ca fluxul de căldură reziduală să reprezinte o sursă de căldură recuperabilă foarte atractivă pentru multe soluții de recuperare care pot produce diferite tipuri de energie termică, dar și energie mecanică.

Teza aduce contribuții originale legate de modelarea sistemelor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster, precum și crearea unor programe de calcul pentru studiul variației parametrilor în vederea analizei termodinamice și energetice comparative a instalațiilor în funcție de variația parametrilor meteorologici înregistrați în diferite orașe de pe teritoriul României.

În ceea ce privește recuperarea căldurii reziduale de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster în vederea producerii de noi tipuri de energie termică, s-au adus contribuții originale prin studiul posibilității implementării unei instalații frigorifice cu absorbție IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O pentru prepararea apei reci care alimentează bateria de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC) și pentru producerea fluxului de căldură necesar procesului de subrăcire a CO<sub>2</sub>-ului la ieșirea din răcitorul de gaz (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr), dar și combinând aceste instalații cu sistem de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC + RC ACM și IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr + RC ACM).

În vederea producerii de energie mecanică, s-au adus contribuții originale prin studiul posibilității de implementare a diferite configurații de sisteme ORC cu scopul de a recupera căldura reziduală și a produce lucru mecanic care să fie redirectionat către compresoarelor frigorifice în vederea reducerii consumului de energie. Pe lângă obiectivul principal, s-au mai adus contribuții originale prin elaborarea unei metode de determinare a temperaturii de vaporizare optime în cadrul sistemelor ORC corespunzătoare regimului de putere maximă dezvoltată la nivelul detentorelor, dar și prin analiza comparativă a fluidelor de lucru în vederea alegerii fluidului optim prin sistem de departajare în funcție de criteriile stabilite.

Teza este structurată în 4 capitole, un număr de 261 pagini redactate la 1 rând, cuprinde 29 tabele și 249 figuri. La sfârșitul lucrării sunt prezentate 161 referințe bibliografice în ordinea citării lor în text.

În capitolul 1 s-a elaborat un studiu bibliografic cu privire la identificarea și prezentarea principalele configurații de instalații frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub>, precum și modalitățile de recuperare de căldură și de energie mecanică întâlnite în cadrul acestor instalații.

În capitolul 2 este evaluată căldura reziduală disponibilă pentru recuperare de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster prin intermediul unei analize comparative a instalațiilor frigorifice utilizate în cadrul supermarketurilor. Plecând de la condiții similare de funcționare, analiza comparativă este realizată atât din punct de vedere termodinamic, unde se urmărit evoluția coeficientul de performanță al instalațiilor, cât și din punct de vedere energetic prin analiza consumului de energie al acestora. În cele din urmă, este prezentată și analizată căldura reziduală disponibilă pentru recuperare de la instalațiile frigorifice studiate.

Capitolul 3 prezintă studiul privind recuperarea căldurii reziduale produse de instalația frigorifică R744 Booster S prin utilizarea sistemelor de preparare apă caldă menajeră și a

instalațiilor frigorifice cu absorbție. Pe de o parte, se analizează un sistem clasic de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră (RC ACM), și pe de altă parte posibilitatea utilizării unei instalații frigorifice cu absorbție cu NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O pentru prepararea apei reci care alimentează bateria de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC) sau pentru producerea fluxului de căldură necesar procesului de subrăcire al CO<sub>2</sub>-ului la ieșirea din răcitorul de gaz (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr), dar și combinații de sisteme IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC + RC ACM sau IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr + RC ACM. Pe lângă analiza posibilității utilizării acestor sisteme de recuperare de căldură, un al doilea obiectiv urmărit este realizarea analizei termodinamice a impactului pe care îl au aceste sisteme asupra performanțelor instalației frigorifice R744 Booster S.

În capitolul 4 se abordează o altă metodă prin care se poate recupera căldura reziduală de la instalația frigorifică R744 Booster S, prin utilizarea mai multor configurații de sisteme. Plecând de la prezentarea principiului de funcționare al sistemelor de tip ORC, capitolul continuat cu descrierea posibilelor surse de căldură de la care acestea pot recupera căldură, clasificarea tipurilor de fluide de lucru organice utilizate, prezentarea schemelor constructive existente și analiza stadiului actual al sistemelor ORC instalate atât la nivel mondial, cât și la nivel local, pe teritoriul României. Pasul următor este reprezentat de realizarea analizei termodinamice a sistemelor ORC propuse, sistem ORC de bază (B-ORC), sistem ORC cu regenerador (R-ORC), sistem ORC cu reîncălzire (RI-ORC) și sistem ORC cu două nivele de presiune (DP-ORC). Rezultatele obținute s-au utilizat pentru analiza comparativă a fluidelor de lucru și alegerea fluidului optim în funcție de puterea mecanică dezvoltată la nivelul detentoarelor, randamentul termic al sistemelor ORC, debitul de agent utilizat, potențialul de încălzire globală al fluidelor, dar și prețul de cumpărare al fiecărui fluid organic. În final, prin analiza comparativă a cuplajelor R744 Booster S + B-ORC, R744 Booster S + R-ORC, R744 Booster S + RI-ORC și R744 Booster S + DP ORC s-a urmărit evidențierea impactului pe care îl au sistemele ORC asupra performanțelor instalației frigorifice R744 Booster S prin aportul pe care îl au asupra creșterii coeficientului de performanță și asupra consumului de energie prin recuperarea căldurii reziduale și producerea de energie mecanică pentru antrenarea compresoarelor din cadrul instalației frigorifice.

În finalul tezei de doctorat sunt prezentate concluziile generale ale lucrării, contribuții originale ale autorului precum și direcțiile de cercetare viitoare. Teza se încheie cu lista lucrărilor publicate în extenso și referințele bibliografice în ordinea citării lor în text.

## Mulțumiri

*Drumul parcurs, de la o idee și până la elaborarea acestei teze de doctorat, nu ar fi fost posibil fără ajutorul Lui Dumnezeu, căruia îi mulțumesc pentru sănătatea, puterea de muncă și setea de cunoaștere primite, dar și pentru oportunitatea excepțională de colaborare cu o parte din specialiștii din cadrul Departamentul de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice al Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică din Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București, care, prin calitățile profesionale și umane remarcabile de care au dat dovadă neîncetat, au contribuit încă din primii ani de facultate la formarea mea, cultivându-mi pasiunea pentru acest domeniu profesional și academic.*

*Mulțumesc familiei pentru că a înțeles și a acceptat toate sacrificiile care s-au impus prin implicarea mea în demersul pregătirii și realizării acestei teze de doctorat. Mulțumesc soției mele, ing. Melisa Pavel-Toader, pentru tot sprijinul, dragostea necondiționată, suportul moral, înțelegerea și încurajările oferite pe tot parcursul școlii doctorale. Mulțumesc părinților mei pentru susținerea, înțelegerea și sfaturile părintești pe care mi le-au oferit. Mulțumesc surorii mele pentru încurajare și sprijin necondiționat.*

*Țin să adresez sincere mulțumiri și recunoștință conducătorului de doctorat, domnului prof. dr. ing. Tudor Prisecaru, pentru sprijinul constant, îndrumarea atentă și pentru răbdarea cu care m-a ghidat pe parcursul întregii cercetări doctorale. Competența profesională, viziunea științifică, dar și încrederea acestuia în direcția viziunii mele asupra lucrării de cercetare au constituit pentru mine o sursă de inspirație și motivație, contribuind decisiv la dezvoltarea mea academică.*

*Domnului prof. dr. ing. Valentin Apostol doresc să îi adresez mulțumiri deosebite pentru sprijinul acordat pe întreg parcursul școlii doctorale, pentru sfaturile și îndrumările prețioase, dar și pentru disponibilitatea și deschiderea cu care a răspuns întotdeauna întrebărilor și preocupărilor mele. Totodată, îi sunt recunoscător pentru încrederea de neclintit pe care mi-a insuflat-o încă din prima zi în care ne-am cunoscut, fapt căruia îi datorez motivația mea în alegerea domeniului profesional.*

*Domnului conf. dr. ing. Horațiu Pop doresc să îi transmit întreaga mea recunoștință pentru sprijinul acordat de-a lungul parcursului doctoral, pentru sfaturile valoroase, răbdarea și înțelegerea de care a dat dovadă, dar și pentru atitudinea pozitivă cu care întotdeauna am pornit orice tip de colaborare pe care am avut-o împreună. Îi mulțumesc, de asemenea, pentru îndrumarea oferită în realizarea lucrărilor științifice și pentru exemplul de profesionalism și dăruire pe care îl manifestă atât în relația cu studenții, cât și cu colegii de departament.*

*De asemenea, țin să mulțumesc întregului colectiv de profesori din cadrul catedrei de TMETF, în deosebi domnului șl. dr. ing. Daniel Taban și doamnei conf. dr. ing. Ioniță Claudia pentru implicarea entuziastă, întotdeauna cu atitudine deschisă, pe care au avut-o în a mă sprijinii cu fiecare oportunitate apărută.*

*Mulțumirile mele se îndreaptă și către colegii mei din cadrul companiei Frigo-Consulting International, în deosebit domnului ing. Cristian Groseanu și doamnei ing. Cristina Constantinescu care m-au sprijinit moral încă de la alegerea mea de a începe scoală doctorală, fiind implicați de asemenea pe parcursul cercetării prin dezbateri și aport de informații. De asemenea, doresc să transmit mulțumiri deosebite către președintele companiei, Ernst Blatter, pentru interesul și monitorizarea parcursului meu doctoral încă de la început.*

*Autorul*

## **Capitolul 1 – Studiul bibliografic privind posibilitatea recuperării de căldură și energie din cadrul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub>**

Lucrarea de față se concentrează pe valorificarea căldurii reziduale de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster în vederea creșterii eficienței acestora, prin utilizarea de sisteme termice care pot produce diferite tipuri de energie termică, dar și energie mecanică.

Având în vedere implicarea extinsă a industriei de refrigerare și climatizare în multiple sectoare economice, se constată faptul că instalațiile frigorifice și cele de climatizare constituie o componentă semnificativă a consumului global de energie electrică[1]. Contribuția instalațiilor frigorifice și a celor de climatizare la consumul total energie al supermarketurilor poate depinde însă de condițiile climatice și de obiceiurile sociale. Instalațiile frigorifice reprezintă 30 - 60% din consumul total de energie al magazinelor, ceea ce duce la cel mai mare consum de energie în comparație cu alte sisteme[4].

Datorită reglementărilor în ceea ce privește utilizarea agenției frigorifice în instalațiile existente, dar și în cele ce urmează a fi puse în operare, agenții frigorifici naturali au câștigat tot mai

mult teren în fața agenților sintetici. Dioxidul de carbon (CO<sub>2</sub>) ca agent frigorific natural (R744) a revenit în atenția cercetătorilor în ultimii ani, deoarece reprezintă o alegere ecologică atunci când vine vorba de instalațiile frigorifice. R744 nu afectează stratul de ozon, iar utilizarea acestuia reprezintă cea mai simplă variantă de reducere a amprente de CO<sub>2</sub>.

Pe lângă eficiența din punct de vedere frigorific, R744 oferă un potențial semnificativ în ceea ce privește recuperarea căldurii reziduale, precum și a energiei mecanice. Acest lucru este posibil prin implementarea unor tehnologii avansate care permit valorificarea energiei altfel irosite în procesele tradiționale. Astfel, utilizarea R744 ca agent de lucru în cadrul instalațiilor frigorifice nu doar că îmbunătățește eficiența energetică a acestora, dar contribuie și la reducerea impactului asupra mediului, aliniindu-se cerințelor contemporane de sustenabilitate.

Numărul instalațiilor transcritice din aplicațiile comerciale este în creștere la ora actuală, în special, în Europa, unde legislațiile devin tot mai stricte și în care performanța energetică a instalațiilor ce utilizează CO<sub>2</sub> este fie echivalentă, fie mai bună decât a instalațiilor subcritice convenționale cu R404A[9].

Se poate spune că a devenit o regulă alegerea implementării instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> în cadrul magazinelor alimentare nou construite, dar și o soluție pentru modernizarea magazinelor existente (instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> înlocuind instalațiile existente care utilizează agenți frigorifici sintetici). Acest fapt a dus la o concentrare mai puternică asupra îmbunătățirii acestor instalații frigorifice prin creșterea eficienței energetice, reducerea costurilor, combinarea instalațiilor frigorifice cu sistemele de aer condiționat și încălzire (încălzirea spațiilor și producerea de apă caldă menajeră)[10], dar și adăugarea de noi sisteme adiacente pentru recuperarea căldurii reziduale.

## 1.1 Instalații frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub>

În funcție de tipul aplicațiilor, există mai multe tipuri de instalații frigorifice care utilizează ca agent de lucru CO<sub>2</sub>-ul. Cercetarea bibliografică s-a axat predominant pe instalațiile frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub> care sunt utilizate în aplicațiile comerciale de tip magazine alimentare (supermarketuri sau hypermarketuri) sau depozite logistice de păstrare a alimentelor refrigerate și congelate.

Pornind de la cea mai simplă configurație de instalație frigorifică cu CO<sub>2</sub>, de-a lungul timpului au fost dezvoltate diferite tipuri de instalații care satisfac cerințe complexe: instalație frigorifică în cascadă cu CO<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub> pentru procese de congelare rapidă sau păstrarea alimentelor congelate, instalație frigorifică cu CO<sub>2</sub> cu funcționare în transcritic pentru realizarea unui singur nivel de temperatură și instalație frigorifică cu CO<sub>2</sub> cu funcționare în transcritic de tip Booster pentru realizarea a două sau mai multe nivele de temperatură.

În instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> cu funcționare în transcritic, căldura cedată mediului ambiant se realizează deasupra punctului critic, în regiunea supercritică. Din această cauză, diferența dintre instalațiile frigorifice clasice subcritice și instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> transcritice este înlocuirea condensatorului cu un răcitor de gaz în care are loc răcirea agentului frigorific la presiune constantă.

Când vine vorba de instalațiile frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub> într-o treaptă sau tip Booster (Figura 1.1), modul de funcționare este dictat de temperatura ambiantă. Prin răcitorului de gaz, agentul frigorific refulat de compresor cedează căldură mediului ambiant, temperatura agentului la ieșirea din răcitorul de gaz fiind cu câteva grade mai mare decât temperatura ambiantă. Dacă temperatura ambiantă este mai mică decât temperatura critică a agentului de lucru, răcitorul de gaz condensează vaporii de CO<sub>2</sub>, iar instalația frigorifică funcționează în regim subcritic. Dacă temperatura ambiantă este mai mare decât temperatura critică a agentului de lucru, în răcitorul de

gaz vaporii de CO<sub>2</sub> cedează căldură mediului ambiant fără a mai condensa, iar instalația frigorifică funcționează în regim supracritic.

Acest sistem se poate optimiza utilizându-se un alt compresor care să preia vaporii din rezervorul intermediar și să îl comprime până la presiunea din răcitorul de gaz, cu o eficiență mai mare datorită presiunii de aspirație mai mari față de cea a compresorului principal. Astfel, prin utilizarea comprimării paralele se obține o eficiență mai ridicată a întregii instalații [17].

Un alt procedeu de optimizare îl reprezintă introducerea ejectoarelor care înlocuiesc supapa de reglare de înaltă presiune. Utilizarea ejectoarelor permite creșterea presiunii de aspirație a compresoarelor, ceea ce conduce la un consum de energie mai scăzut și la un COP mai ridicat [1, 18].

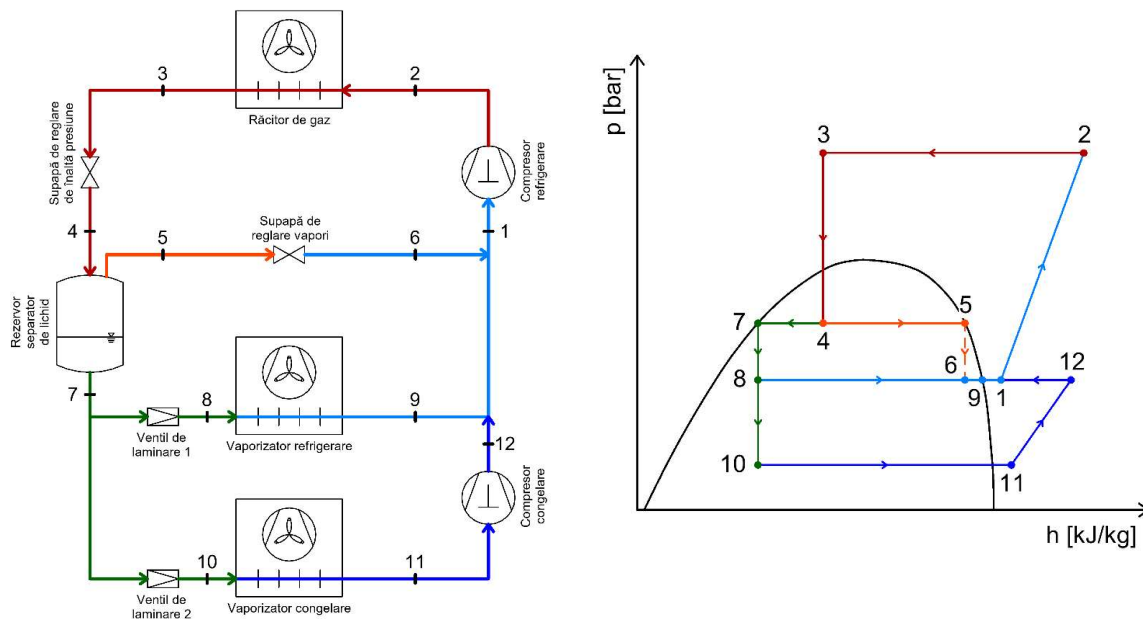


Figura 1.1 Schema și ciclul de funcționare în diagrama  $p-h$  al instalației frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster Standard (R744 Booster S)

Diferența dintre R744 Booster S și instalația frigorifică cu CO<sub>2</sub> într-o treaptă este dată de apariția suplimentară a treptei de joasă presiune care realizează procesul de congelare.

## 1.2 Recuperare de căldură în cadrul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub>

Procesele de răcire generează cantități considerabile de căldură. În situațiile în care nu este utilizată, această energie este considerată doar căldură reziduală.

Datorită presiunilor de lucru ridicate (care generează temperaturi ridicate) ale R744 folosit ca agent de lucru, acesta este agentul frigorific perfect pentru luarea în considerare a posibilității de recuperare a căldurii în instalațiile în care se utilizează.

Pe lângă recuperarea de căldură din zona refulării compresorului, se pot considera ca fiind procedee de recuperare de căldură și următoarele: utilizarea gazelor fierbinți pentru degivrarea vaporizatoarelor din camerele de congelare și utilizarea de schimbătoare de căldură interne pentru realizarea proceselor de supraîncălzire și subrăcire în diferite puncte ale instalațiilor.

Recuperarea de căldură de pe treapta de înaltă presiune este facilitată de faptul că, în mod obișnuit, la refularea compresoarelor R744 atinge temperaturi cuprinse între 80°C și 120°C, ceea ce oferă din punct de vedere al posibilității recuperării de căldură o sursă de căldură cu o temperatură ridicată.

De regulă, acest tip de recuperare de căldură se folosește în cadrul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster deoarece aceste instalații sunt cel mai des utilizate în aplicațiile comerciale de tip magazine alimentare, aici fiind prezentă și necesitatea de recuperare de căldură cu scopul de preparare de apă caldă menajeră și/sau încălzire a spațiilor, dar totodată și reducerea consumului de energie, eliminând astfel utilizarea altor sisteme mai costisitoare din punct de vedere energetic. Prin montarea a unul sau două schimbătoare de căldură conectate în serie pe treapta de înaltă presiune înaintea răcitorului de gaz, conectate la circuite intermediare de stocare și distribuire a căldurii se poate recupera căldură pe diferite nivele de temperatură cum ar fi: apă caldă menajeră (temperatura circuitului dintre schimbătorul pentru apă caldă menajeră și rezervorul de stocare este de 70-50°C) și încălzirea directă a spațiilor (temperatura circuitului dintre schimbătorul pentru încălzirea spațiilor și rezervorul de stocare este de 50-40°C)[23].

Prin integrarea unui schimbător de căldură înaintea rezervorului separator de lichid se poate obține parțial sau total necesarul de răcire al instalației de condiționare a aerului din clădirea în care este instalat sistemul frigorific. Acest procedeu se aplică, de obicei, instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster, unde se pot produce capacități de răcire pentru instalația de aer condiționat de până la 50 – 250 kW[26].

Metodele de degivrare utilizând gaze fierbinți sau glicol cald pot fi considerate procese de recuperare de căldură deoarece aceste surse de căldură provin din instalația frigorifică. Utilizarea unei astfel de metode de degivrare aduce un plus în ceea ce privește coeficientul global de performanță al instalației frigorifice. Totodată, utilizarea acestora în detrimentul degivrării electrice aduce un aport substanțial la reducerea consumului de energie.

Prin utilizarea metodei de degivrare cu gaze fierbinți, s-a constatat că timpul de degivrare scade în comparație cu alte metode, deoarece capacitatea de încălzire necesară degivrării crește. Metoda de degivrare cu gaze fierbinți crește COP-ul instalației cu până la 8,5%[27].

Metoda de degivrare cu glicol cald presupune existența unui circuit independent de glicol între rezervorul de stocare apă caldă din cadrul sistemului de recuperare de căldură pentru încălzirea spațiilor și vaporizatoare care necesită degivrare. Cu ajutorul unei serpentine integrate în rezervorul de stocare apă caldă, glicolul este încălzit și apoi transportat cu ajutorul unei pompe de circulație către vaporizatoarele echipate cu o serpentină independentă care încălzește bateria de răcire din interiorul vaporizatoarelor. De regulă, pentru circuitul de degivrare se folosește propilen glicol cu concentrație de 45%.

Schimbătoarele de căldură interne din cadrul instalațiilor frigorifice se utilizează pentru supraîncălzirea sau subrăcirea agentului frigorific în anumite puncte ale instalației. Procesele de supraîncălzire și subrăcire sunt necesare atunci când se dorește optimizarea și creșterea performanțelor instalațiilor frigorifice, însă este necesară impunerea unei limite a gradului de supraîncălzire/subrăcire peste care aceste procese pot afecta negativ coeficientul de performanță.

În instalațiile frigorifice comerciale de tip R744 Booster, datorită configurației complexe și a numărului mare de compresoare care deservește cele două trepte de presiune, schimbătoarele de căldură interne sunt integrate cu rolul de a supraîncălzi sau subrăci CO<sub>2</sub>-ul. Astfel, se regasesc schimbătoare de caldura interne pentru supraîncalzirea CO<sub>2</sub>-ului la aspiratia compresoarelor de congelare, refrigerare și a celor paralele care au rol și de subracitoare pentru CO<sub>2</sub> la iesirea din racitorul de gaz și la iesirea din rezerverul separator de lichid.

### 1.3 Recuperare de energie mecanică în cadrul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub>

Recuperarea de energie mecanica in cadrul instalatiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> se poate face prin integrarea ejectoarelor sau a detentoarelor in diferite locatii din configuratia instalatiilor.

Ejectorul este o piesă simplă, fără componente în mișcare, formată dintr-un ajutor, o cameră de amestec și un difuzor. Principiul de funcționare al ejectorului poate fi descris astfel: debitul de



fluid primar cu presiune ridicată se destinde și accelerează printr-un ajutor într-o cameră de amestec cu viteză supersonică, astfel se creează o zonă cu presiune foarte scăzută la ieșirea din ajutor. Debitul de fluid primar cu viteză mare atrage în camera de amestec debitul de fluid secundar. Amestecul dintre cele două debite se consideră complet la sfârșitul secțiunii de aspirație din care iese cu viteză supersonică. În zona secțiunii de amestec se creează o undă de șoc care produce un efect de comprimare, iar viteza de curgere este redusă la un nivel subsonic. Mai departe, comprimarea amestecului de fluid este completă la trecerea prin difuzor[43,44].

În cadrul instalațiilor frigorifice CO<sub>2</sub> cu funcționare în regim transcritic, introducerea ejectorului în instalație se face prin înlocuirea supapei de reglare de înaltă presiune cu acesta. Prin intermediul ejectorului, presiunea de aspirație a compresorului crește comparativ cu un ciclu standard, ceea ce duce la o mai mare eficiență a instalației (se consumă mai puțin lucru mecanic de comprimare)[43]. Configurația cu ejector reprezintă o îmbunătățire a instalației frigorifice, însă prezintă dificultăți în ceea ce privește controlul parametrilor de funcționare[46].

Ejectoarele recuperează lucrul mecanic rezultat în urma destinderii în supapa de înaltă presiune, care în mod normal se pierde. Lucrul mecanic recuperat este aplicat pentru a returna lichidul și vaporii din rezervorul acumulator de aspirație al compresorului de refrigerare din aval de vaporizatorului de refrigerare înapoi în rezervorul separator de lichid. Datorită ejectoarelor și a rezervorului acumulator de aspirație, temperatura de aspirație a compresorului de refrigerare al instalației frigorifice crește cu 6K.

De altfel, în urma analizelor exergetice realizate în literatura de specialitate, prin integrarea ejectorului în cadrul instalației frigorifice s-a constatat că pierderile de exergie la nivelul compresorului s-au redus considerabil[48].

Cercetările privind integrarea ejectoarelor în cadrul instalațiilor frigorifice tip CO<sub>2</sub> Booster cu comprimare paralelă au condus la concluzia că instalația frigorifică prezintă o reducere a consumului de energie cu până la 12%[51]. O astfel de configurație permite obținerea unei creșteri a eficienței instalației cu până la 30% față de o soluție tip CO<sub>2</sub> Booster simplă, în special în perioadele cu temperaturi exterioare ridicate[52].

Pentru reducerea pierderilor și recuperarea lucrului mecanic de destindere se pot implementa detentore care să înlocuiască ventilul de laminare[55]. În general, ejectorul este mai simplu de construit decât un detentor, dar prezența acestuia necesită modificări mai complexe în cadrul ciclului de funcționare. Detentorele sunt mai ușor de instalat și totodată mai eficiente decât ejectoarele[56].

Utilizarea detentorului produce efecte benefice instalației prin creșterea capacității frigorifice fără a se modifica căldura cedată în mediul ambiant, iar lucrul mecanic produs în urma destinderii în detentor este captat și utilizat pentru a reduce sarcina electrică a motorului compresorului sau pentru a produce energie electrică cu ajutorul unui generator[55]. Detentorele au cunoscut o atenție sporită în ceea ce privește cercetarea lor odată cu apariția instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> transcritice, în cadrul cărora există pierderi de presiune foarte mari la nivelul ventilelor de laminare, deoarece în funcționare diferențele de presiuni sunt foarte ridicate[57].

În instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> într-o treaptă sau tip Booster, detentorul poate fi amplasat în locul supapei de reglare de înaltă presiune sau în locul ventilelor de laminare. În urma studiilor, s-a constatat faptul că poziția detentorului are o influență considerabilă în ceea ce privește coeficientul de performanță. Valorile cele mai ridicate ale coeficientului de performanță se atinge atunci când detentorul este poziționat între treptele de medie și joasă presiune, cu excepția cazului în care temperatura de vaporizare este foarte ridicată[59].

## Capitolul 2 – Căldura reziduală disponibilă pentru recuperare de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster

Pentru a îndeplini cerințele pe care le are un supermarket în ceea ce privește palierul de temperaturi la care trebuie stocate alimentele în diferite camere de depozitare, instalațiile frigorifice trebuie să permită realizarea de procese de refrigerare, dar și de congelare.

Instalațiile frigorifice cu freon nu pot realiza în cadrul unei singure instalații ambele tipuri de procese, fiind necesare două instalații separate, care să realizeze fiecare câte un proces (refrigerare / congelare).

Odată cu necesitatea utilizării agenților frigorifici naturali în cadrul supermarketurilor, s-a reușit dezvoltarea unei instalații care să permită realizarea simultană atât a procesului de refrigerare cât și a procesului de congelare într-o singură instalație. Instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> de acest tip sunt R744 Booster S, R744 Booster SP și R744 Booster SPE, iar datorită proprietăților termo-fizice ale dioxidului de carbon aceste instalații prezintă funcționare transcritică.

În acest capitol sunt prezentate analizele termodinamice ale principalelor instalații frigorifice utilizate în cadrul supermarketurilor: cuplaj de instalații frigorifice cu freon R404A pentru refrigerare și congelare, instalația frigorifică R744 Booster S, instalația frigorifică R744 Booster SP și instalația frigorifică R744 Booster SPE. Pe baza rezultatelor se analizează comparativ atât din punct de vedere termodinamic cât și din punct de vedere energetic instalațiile propuse, iar în final se evaluează căldura disponibilă pentru recuperare de la instalațiile cu CO<sub>2</sub>.

Pentru realizarea studiului termodinamic al celor patru instalații și pentru a avea rezultate care pot fi comparate, se utilizează parametrii de funcționare similari, aceleași capacități frigorifice de congelare și refrigerare, dar și aceleași condiții de lucru din punct de vedere al mediului ambiant.

Analiza termodinamică a instalațiilor frigorifice utilizate în cadrul supermarketurilor începe cu o scurtă descriere a fiecărei instalații, continuând cu prezentarea parametrilor de funcționare și a ecuațiilor termodinamice care descriu funcționarea instalațiilor și încheind cu analiza variației principalelor mărimi caracteristice ale fiecărei instalații în funcție de temperatura mediului ambiant.

Așa cum era de așteptat, rezultatele arată ca instalația R744 Booster SPE este cea mai eficientă, având coeficientul de performanță cel mai ridicat pe tot intervalul considerat de temperaturi ambiante ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

În ceea ce privește coeficientul de performanță al celorlalte instalații, se remarcă faptul că atât instalația R744 Booster S cât și R744 Booster SP au un coeficient de performanță considerabil mai mare decât cuplajul R404A refriger + cong, dar doar cât timp  $t_{amb} < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , după care toate cele trei instalații prezintă valori apropiate până la finalul intervalului studiat.

Pentru realizarea comparației din punct de vedere energetic s-au utilizat datele meteorologice (temperatura ambiantă) din oră în oră de-alungul a doi ani (01.09.2019 – 31.08.2020 și 01.09.2020 – 31.08.2021) pentru trei orașe mari de pe teritoriul României[71]. Criteriul de selecție al orașelor a fost acela de a obține pe cât posibil trei climate diferite de pe teritoriul țării. Astfel, pentru studiul energetic al celor patru instalații s-au folosit datele meteorologice din Cluj-Napoca (oraș situat în nordul Depresiunii Transilvaniei), București (oraș situat în zona de câmpie) și Constanța (oraș situat la malul Mării Negre).

Rezultatele arată că, indiferent de instalație, consumul total de energie mecanică al compresoarelor este mai redus în orașul Cluj-Napoca, cel mai mare consum fiind înregistrat preponderent în Constanța.

Comparând instalațiile frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub> între ele, în funcție de fiecare oraș selectat, pe durata de doi ani, se constată că instalația R744 Booster SP are un consumul total de energie mecanică al compresoarelor mai redus cu 1,6 – 2,7% față de instalația R744 Booster S, iar

instalația R744 Booster SPE are un consum total mai redus cu până la 22,3 - 23,1% față de instalația R744 Booster S și cu 20,6 - 21% față de instalația R744 Booster SP.

Pentru a evalua disponibilitatea de căldură ce poate fi recuperată de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub>, se analizează parametrii din zona treptei de înaltă presiune (zona răcitorului de gaz) în funcție de temperatura ambiantă: presiunea de lucru din răcitorul de gaz (presiunea de pe treapta de înaltă presiune), temperatura agentului frigorific la intrarea în răcitorul de gaz, debitul de agent frigorific la intrarea în răcitorul de gaz și căldură eliminată în mediul ambiant prin răcitorul de gaz.

Deoarece instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster au același condiții impuse de funcționare pe treapta de înaltă presiune, presiunea din răcitorul de gaz este egală pentru toate cele trei instalații.

Comparând cele trei instalații, se observă că temperatura agentului prezintă valori apropiate în funcționare pentru instalațiile R744 Booster S și R744 Booster SP, iar instalația cu ejector deși are aceeași variație a temperaturii, aceasta este întotdeauna mai mică cu câteva grade. La temperaturi ambiante de peste +25 °C, la intrarea în răcitorul de gaz CO<sub>2</sub>-ul atinge temperaturi de peste +100 °C, ceea ce facilitează integrarea proceselor de recuperare de căldură.

Debitul masic de agent care intră în răcitorul de gaz crește odată cu temperatura mediului ambiant, având valori foarte apropiate pentru toate cele trei instalații, pentru R744 Booster S și R744 Booster SP prezentând chiar valori egale ale debitului.

Odată cu creșterea temperaturii ambiante, căldură eliminată prin intermediul răcitorului de gaz este din ce în ce mai mare datorită presiunii și temperaturii ridicate a agentului la nivelul treptei de înaltă presiune, dar și din cauza entalpiei ridicate a CO<sub>2</sub>-ului în această zonă de funcționare.

Debitul de agent și fluxul de căldură disponibil pe treapta de înaltă presiune prezintă valori care permit recuperarea de căldură cu o eficiență ridicată.

## **Capitolul 3 – Recuperarea căldurii reziduale produse de instalația frigorifică cu CO<sub>2</sub> tip Booster prin utilizarea sistemelor de preparare apă caldă menajeră și a instalațiilor frigorifice cu absorbție**

### **3.1 Introducere**

Recuperarea de căldură pentru producerea de apă caldă menajeră este tot mai des utilizată în cazul aplicațiilor comerciale (magazinele de tip supermarket) deoarece oferă posibilitatea de a reduce și mai mult consumul de energie al clădirii[21], dar și al amprentei de carbon, deoarece elimină necesitatea utilizării unor instalații clasice de producere a apei calde care folosesc arderea gazului metan, cărbunilor, etc. Principalele componente ale sistemului de recuperare de căldură pentru apă caldă menajeră sunt: schimbătorul de căldură conectat la sursa caldă, pompă de circulație și rezervor de stocare a apei calde menajere.

În ceea ce privesc instalațiile frigorifice cu absorbție, acestea sunt instalații în care agentul frigorific este separat de absorbantul lichid printr-un aport de căldură de la o sursă caldă. Pentru asigurarea funcționării continue a instalației, este necesară recombinarea ulterioară a agentului frigorific cu absorbantul lichid, acest proces având loc prin cedare de căldură către o sursă rece.

Cele mai des întâlnite instalații frigorifice cu absorbție sunt instalațiile cu NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O și instalațiile cu LiBr-H<sub>2</sub>O[73,74], dar există și numeroase cercetări pentru extinderea cuplurilor de substanțe (agent frigorific – absorbant) utilizate ca agenți de lucru în cadrul IFA: metalină – apă, metanol – bromură de litiu, dar și alte combinații formate din câte trei substanțe[75].

Instalațiile frigorifice cu absorbție au ca avantaj faptul că principalele componente nu sunt piese în mișcare ceea ce conduce la o funcționare mai silențioasă și mai fiabilă, dar și o durată de

viață mai lungă decât alte instalații frigorifice. Faptul că se pot utiliza surse de căldură regenerabile sau reziduale face ca IFA să fie utilizate frecvent în cadrul aplicațiilor industriale, comerciale, dar și în zone fără acces facil la electricitate.

Ca și dezavantaje, IFA are un randament mai scăzut decât instalațiile frigorifice cu compresie mecanică de vapori, dimensiuni mai mari ale componentelor și ale instalației în sine, iar costurile inițiale sunt mai ridicate decât în cazul instalațiilor frigorifice clasice.

În cadrul acestui capitol se va realiza prezentarea și analiza termodinamică a unor sisteme care recuperează căldura reziduală de la instalația frigorifică transcritică cu CO<sub>2</sub>: sistem de recuperare de căldură pentru apă caldă menajeră (RC ACM); o instalație frigorifică cu absorbție, într-o treaptă, cu NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O pentru prepararea apei reci care alimentează bateria de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed[76], producere de aer condiționat (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC) și una pentru producerea fluxului de căldură necesar procesului de subrăcire al CO<sub>2</sub>-ului la ieșirea din răcitorul de gaz (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr). Pe lângă aceste trei sisteme, se va realiza și analiza termodinamică a combinațiilor: IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC + RC ACM și IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr + RC ACM. Acest studiu se va realiza prin efectuarea unui calcul termodinamic al fiecărui tip de instalație destinată recuperării de căldură, realizarea unei comparații a rezultatelor și, prin integrarea în instalația frigorifică, analiza impactului pe care îl are fiecare instalație de recuperare asupra performanțelor sistemului frigorific.

### 3.2 Sursa de căldură – Instalația frigorifică R744 Booster S

În urma analizei comparative a instalațiilor frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub> efectuată, s-a constatat faptul că toate cele trei instalații comparate au un potențial ridicat de recuperare de căldură reziduală din zona treptei de înaltă presiune. Deși debitul masic de agent și fluxul de căldură disponibil în acea zonă a instalațiilor prezintă valori mai ridicate pentru instalațiile R744 Booster SP și R744 Booster SPE, faptul că instalația R744 Booster S prezintă cea mai ridicată temperatură a agentului a condus la decizia că această instalație să fie considerată mai departe în această lucrare că fiind sursă de căldură pentru sistemele de recuperare de căldură prezentate în cele ce urmează. Un alt argument în luarea deciziei îl reprezintă faptul că debitul masic și fluxul de căldură disponibil în cadrul treptei de înaltă presiune al instalației R744 Booster S nu sunt cu mult mai mici față de celelalte instalații, ceea ce nu va afecta foarte mult potențialul sursei de căldură.

Pentru a avea o eficiență ridicată în procesul de recuperare de căldură, este necesar ca sursa de căldură (R744 Booster S) să prezinte valori ale parametrilor cât mai ridicate, astfel s-a considerat că sistemele de recuperare de căldură (sistemul de preparare apă caldă și instalația cu absorbție) să funcționeze doar în sezonul cald, în intervalul de temperaturi ambiante +20 ... + 40 °C, atunci când sursa de căldură prezintă cea mai ridicată temperatură, debit masic și flux de căldură disponibile.

### 3.3 Analiza termodinamică a instalațiilor de recuperare de căldură

Conectarea sistemelor de recuperare de căldură la instalația frigorifică R744 Booster S (sursa caldă), fie că este vorba despre sistemul RC ACM sau instalațiile frigorifice cu absorbție IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, se realizează pe conducta dintre compresorul de refrigerare și răcitorul de gaz.

În cazul sistemului RC ACM, pentru cuplarea acestuia la instalația frigorifică se utilizează un schimbător de căldură în plăci prin care se realizează transferul de căldură de la R744 Booster S la sistemul de recuperare. Ca agent de lucru utilizat în cadrul circuitului de recuperare pentru ACM se poate utiliza apă sau glicol. Agentul de lucru este antrenat de o pompă cu control variabil amplasată pe conducta de ieșire din schimbătorul de căldură. Căldura preluată de la CO<sub>2</sub> este stocată în rezervor și apoi distribuită către consumatori.

S-a constatat că prin recuperarea de căldură în condiții normale de funcționare a instalației frigorifice, adică fără a crește debitul masic al instalației sau presiunea de refulare a compesoarelor,

se poate obține o reducere de până la 48% a consumului de gaze naturale utilizate în sistemele de încălzire a unei clădiri, dar și reducerea costurilor de exploatare cu până la 6,2%[72].

Sistemul de recuperare de căldură pentru apă caldă menajeră a rezultat că reușește să recupereze între 12% și 50% din disponibilul de căldură reziduală produs de instalația frigorifică R744 Booster S, restul căldurii rămase fiind eliminate în mediul ambiant prin răcitorului de gaz.

Odată cu creșterea temperaturii sursei calde, disponibilul de căldură ce poate fi recuperat implicit și fluxul de căldură recuperate cresc, însă este necesar și un debit mai mare de apă în circuitul de recuperare. Practic, RC ACM poate produce un flux de căldură de 45 – 256 kW apă caldă menajeră cu parametrii: temperatură +65 °C/+25 °C și debit 983 L/h – 5583 L/h.

În cazul instalației IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC, analiza efectuată pleacă de la premisa că aceasta preia căldura reziduală de la instalația R744 Booster S la nivelul generatorului fierbător și este destinată preparării apei reci pentru alimentarea unei baterii de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed (CTA). Conectarea IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC la instalația frigorifică R744 Booster S se face direct, fără un schimbător de căldură intermediar, conducta de CO<sub>2</sub> fiind conectată direct la generatorul fierbător.

Pentru a pune în evidență performanțele instalației IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC în funcție de temperatura sursei de căldură, se evaluează fluxul de căldură produs pentru bateria de răcire din CTA, debitul masic de agent pentru bateria de răcire a CTA-ului, fluxul de căldură reziduală recuperat, dar și coeficientul de performanță al instalației.

Gradul de recuperare de căldură crește aproape liniar odată ce temperatura sursei calde crește și ea. Cu ajutorul IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC se poate recupera între 32% și 100% din căldura reziduală de la instalația R744 Booster S, iar coeficientul de performanță al instalației IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC crește ca o funcție logaritmică odată ce sursa de căldură prezintă parametrii tot mai ridicați.

În cazul în care este urmată de un sistem de recuperare de căldură pentru apă caldă menajeră, instalația IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC nu își schimbă configurația, având aceleași componente și același mod de funcționare. Conectarea IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC și RC ACM la instalația frigorifică R744 Booster S se face în serie pe treapta de înaltă presiune, între compresorul de refrigerare și răcitorul de gaz.

Pentru a asigura condițiile minime de funcționare ale sistemul RC ACM, și anume producerea de apă caldă cu temperatura de  $t_{iesire,ACM} = +65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura de intrare a sursei calde în schimbătorul de căldură al sistemului trebuie să fie de minim  $t_{intrare,SC'} = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , asigurându-se astfel realizarea procesului de transferul de căldură.

Prin urmare, temperatura sursei calde ce iese din generatorul fierbător al IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC este fixată la  $t_{iesire,SC} = t_{intrare,SC'} = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Fixarea temperaturii sursei calde la ieșirea din instalația IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC și intrarea în sistemul RC ACM asigură posibilitatea implementării acestei soluții combinate, însă performanțele obținute individual sunt mai scăzute decât în cazul aplicării singular a fiecărei soluții de recuperare de căldură, deoarece fluxul de căldură reziduală disponibil pentru recuperare cu fiecare tip de instalației este redus și condiționat de acest punct intermediar de temperatură +80 °C.

Astfel, cu ajutorul IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC se poate recupera între 6% și 41%, iar cu ajutorul sistemului RC ACM se poate recupera între 6% și 16% din căldura reziduală produsă de instalația frigorifică R744 Booster S.

Coeficientul de performanță al IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC și randamentul sistemului RC ACM cresc odată ce sursa de căldură prezintă parametrii tot mai ridicați. Este de remarcat că IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC are același coeficient de performanță indiferent dacă este urmată sau nu de sistemul RC ACM.

În ceea ce privește IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr, CO<sub>2</sub>-ul refulat de la compresoarele de înaltă presiune trece prin generatorul fierbător unde cedează căldură instalației IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr, apoi elimină căldura reziduală rămasă prin intermediul răcitorului de gaz, iar la ieșirea din acesta, pentru a se subrăci intră în vaporizatorul instalației cu absorbție după care trece prin supapa de reglare de înaltă

presiune și ciclul frigorific se continuă. Pentru procesul de subrăcire s-au analizat trei situații referitoare la gradul de subrăcire realizat:  $\Delta t_{subr} = 3\text{ K}$ ,  $\Delta t_{subr} = 5\text{ K}$ ,  $\Delta t_{subr} = 10\text{ K}$ .

Prin aplicarea unei subrăciri agentului de lucru din cadrul instalației R744 Booster S la ieșirea din răcitorul de gaz debitul masic de CO<sub>2</sub> și fluxul de căldură reziduală ce poate fi recuperat scad considerabil, dar temperatura și presiunea de refulare a compresoarelor rămân aceleași.

Coeficientul de performanță al IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr crește odată ce sursa de căldură prezintă parametrii tot mai ridicați. Cu cât gradul de subrăcire considerat este mai mic, cu atât coeficientul de performanță prezintă valori mai mari, iar instalația funcționează mai eficient.

În cazul în care este urmată de un sistem de recuperare de căldură pentru apă caldă menajeră, instalația IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr nu își schimbă configurația, având aceleași componente și același mod de funcționare. Conectarea IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr și RC ACM la instalația frigorifică R744 Booster S se face în serie pe treapta de înaltă presiune, între compresorul de refrigerare și răcitorul de gaz.

La fel ca în cazul precedent, pentru a asigura condițiile minime de funcționare ale sistemului RC ACM, temperatura de intrare a CO<sub>2</sub>-ului în schimbătorul de căldură al sistemului trebuie să nu scadă sub +80 °C, asigurându-se astfel realizarea procesului de transfer de căldură.

Gradul de recuperare de căldură crește odată cu creșterea temperaturii sursei calde, atât pentru IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr, cât și pentru sistemul RC ACM. Se observă, de asemenea, că dacă gradul de subrăcire este mai mic, cele două instalații recuperează un flux de căldură reziduală mai mare.

Coeficientul de performanță al IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr și randamentul sistemului RC ACM cresc odată ce sursa de căldură prezintă parametrii tot mai ridicați. Cu cât gradul de subrăcire considerat este mai mic, cu atât coeficientul de performanță al IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr și randamentul sistemului RC ACM prezintă valori mai mari, iar sistemele funcționează mai eficient.

### **3.4 Analiza termodinamică a impactului pe care îl au sistemele de recuperare de căldură asupra performanțelor instalației R744 Booster S**

Pentru realizarea analizei termodinamice comparative a impactului pe care îl au sistemele de recuperare de căldură asupra performanțelor instalației R744 Booster S se definesc formulele de calcul pentru coeficientul de performanță global al cuplajelor formate din instalația frigorifică și sistemele de recuperare de căldură propuse în vederea urmăririi evoluției acestuia de-a lungul intervalului de temperaturi ambiante studiat.

Deși RC ACM cuplat singular crește coeficientul de performanță global cu până la 81% la temperatură ambiantă maximă, este de menționat faptul că necesarul de apă caldă menajeră a magazinelor de tip supermarket nu este foarte mare, iar această metodă de recuperare de căldură nu este pretabilă atât timp cât cererea nu este pe măsura a cât poate produce sistemul.

Rezultatele arată faptul că sistemul R744 Booster S + IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC + RC ACM este mai performant decât sistemul fără RC ACM (R744 Booster S + IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC), dar doar până în jurul  $t_{amb} = +32,5\text{ °C}$ , după care este devansat de R744 Booster S + IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC.

În cazul în care se adaugă la instalația frigorifică R744 Booster Standard o instalație cu absorbție pentru subrăcire IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr, impactul acesteia asupra coeficientului de performanță global este vizibil pozitiv deoarece conferă o creștere substanțială indiferent de gradul de subrăcire considerat. Dacă se mai adaugă și o recuperare de tip RC ACM, coeficientul de performanță global prezintă o creștere și mai pronunțată, cu atât mai mare cu cât gradul de subrăcire ales este mai mare.

## **Capitolul 4 – Recuperarea căldurii reziduale produse de instalația frigorifică cu CO<sub>2</sub> prin utilizarea sistemelor Rankine cu fluide organice (ORC)**

### **4.1 Introducere**

Sistemele ORC sunt sisteme termice prin intermediul cărora căldura (energia termică) preluată de la o sursă de căldură este transformată în energie mecanică care poate fi utilizată în mod direct sau transformată în energie electrică prin intermediul unui generator electric[84].

Utilizând un sistem ORC pentru recuperarea căldurii reziduale de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub>, se poate produce energie electrică care poate fi reintrodusă în sistemul frigorific sau poate fi utilizată de către alte sisteme care necesită alimentarea cu energie electrică.

Ciclul Rankine Organic este un ciclu termic care funcționează după aceleași principii ca și ciclul Rankine (ciclul instalațiilor de turbine cu abur), având ca diferență majoră aspectul că agentul de lucru nu este apa, ci un fluid organic. Agenții termodinamici de lucru organici sunt de tipul agenților frigorifici, utilizați în instalațiile frigorifice[85]. Ciclul Rankine Organic funcționează între două paliere de presiune: presiunea agentului de lucru la nivelul vaporizator (presiunea de vaporizare) și presiunea acestuia la nivelul condensatorului (presiunea de condensare). Diferența dintre aceste două presiuni de lucru determină și căderea (diferența) de entalpie din detentor.

Un aspect important atunci când discutăm despre sistemele ORC îl reprezintă alegerea fluidului de lucru potrivit. Fluidul de lucru ales va avea impact asupra eficienței sistemului, dimensiunea componentelor, stabilitatea și siguranța instalației, dar și atunci când se ia în considerare impactul acestuia asupra mediului[89].

Analizând cele mai recente date, sistemele ORC sunt în prezent utilizate la scară largă în foarte multe regiuni din întreagă lume. Principalele surse de căldură utilizate pentru sistemele ORC la nivel mondial sunt energia geotermală, arderea biomasei, energia solară și căldura reziduală.

### **4.2 Analiza termodinamică a sistemelor ORC pentru recuperare de căldură**

În cadrul acestei analize s-au luat în calcul patru sisteme ORC: sistem ORC în configurație de bază (B-ORC), sistem ORC cu regenerat (R-ORC), sistem ORC cu reîncălzire (RI-ORC) și sistem ORC cu două nivele de presiune (DP-ORC).

Din punct de vedere al fluidului organic pe care îl folosesc sistemele ORC cuplate la instalația R744 Booster S, s-a optat ca studiul să fie unul comparativ, analizându-se posibilitatea utilizării mai multor agenți de lucru (R124, R142b, R236ea, R236fa, R600, R600a), urmând ca mai apoi să se aleagă un fluid de lucru optim din punct de vedere al tuturor condițiilor impuse.

Pentru analiza termodinamică a sistemelor ORC studiate s-a utilizat o metodă prin care alegerea temperaturii de vaporizare se face prin intermediul simulării numerice a funcționării sistemului ORC, utilizând un calcul iterativ în care temperatura de vaporizare este variabilă. În cazul acesta, temperatura de vaporizare se alege corespunzător puterii mecanice maxime dezvoltate de detentorul sistemului ORC, chiar dacă sistemele ORC nu reușesc să recupereze toată cantitatea de căldură reziduală disponibilă de la instalația R744 Booster S. Acest mod de funcționare a fost setat pentru a eficientiza la maxim funcționarea sistemelor ORC.

Cuplarea sistemelor ORC la instalația frigorifică R744 Booster S (sursa caldă) se face la nivelul treptei de înaltă presiune, pe segmentul dintre refularea compresorului de refrigerare și intrarea în răcitorul de gaz, în mod direct, fără o buclă de agent intermediar, agentul frigorific trecând direct prin vaporizatorul ORC, urmând mai apoi să cedeze căldura reziduală rămasă prin intermediul răcitorului de gaz în mediul ambiant.

Analiza termodinamică urmărește evidențierea variației principalilor parametri ai sistemelor ORC în funcție de temperatura sursei calde: debitul masic de agent, fluxul de căldură recuperat de la sursa caldă, puterea mecanică produsă de detentoare, puterea mecanică necesară antrenării pompelor, randamentul termic, dar și debitul masic de agent și fluxul de căldură necesar disponibil la nivelul sursei reci.

Rezultatele obținute arată că performanțele sistemele ORC studiate depind de temperatura CO<sub>2</sub>-ului de pe treapta de înaltă presiune, reușind să producă din ce în ce mai multă energie mecanică cu cât temperatura CO<sub>2</sub> este mai ridicată.

### 4.3 Analiza comparativă a fluidelor de lucru

Pentru a alege cel mai bun agent de lucru dintre cele utilizate, s-a realizat o analiză comparativă a fluidelor de lucru în care s-au folosit câteva criterii de departajare cărora li s-au atribuit ponderi procentuale cu scopul de a reflecta importanța fiecărui criteriu. Iar pentru a se realiza un clasament al fluidelor în dreptul fiecărui sistem ORC, în cazul fiecărui criteriu s-au acordat note de la 1 la 6, fiind studiate șase fluide.

Pentru o comparație corectă a parametrilor termodinamici dezvoltați de agenții de lucru studiați (puterea mecanică dezvoltată la nivelul detentorului, randamentul termic și debitul de agent utilizat în sistemul ORC) s-au folosit valorile medii ale rezultatelor obținute în studiul termodinamic precedent, pe tot intervalul de temperaturi ale sursei calde.

Tabel 4.1 Scorul general obținut de fluidele de lucru

Sisteme	R124	R142b	R236ea	R236fa	R600	R600a
B-ORC	4,50	2,95	2,65	3,15	2,95	4,20
R-ORC	4,35	2,35	2,95	3,60	3,10	4,40
RI-ORC	4,65	3,05	2,40	3,30	2,95	4,40
DP-ORC	3,65	2,60	3,35	4,30	2,20	4,65
Scor general	4,29	2,74	2,84	3,59	2,80	4,41

Analizând scorurile obținute pentru fiecare sistem în parte, dar și scorul general, se poate trage concluzia că nu există un fluid de lucru organic ideal pentru toate tipurile de sisteme ORC (niciun fluid studiat nu a obținut un scor general apropiat de 6), însă dintre fluidele de lucru studiate pentru sistemele ORC propuse, fluidele de lucru care tind să atingă performanțe remarcabile în toate cele patru sisteme ORC sunt R600a și R124.

### 4.4 Analiza comparativă a impactului pe care îl au sistemele ORC asupra performanțelor instalației frigorifice tip R744 Booster S

Compararea sistemelor de recuperare de căldură de tip ORC cuplate la instalația frigorifică R744 Booster S, are ca obiectiv din punct de vedere termodinamic, evidențierea impactului pe care aceste sisteme ORC îl au asupra coeficientului de performanță global al cuplajului dintre instalația frigorifică R744 Booster S și sistemele ORC.

Se consideră că puterea mecanică dezvoltată de detentoarele ORC este introdusă în instalația frigorifică pentru a contribui la necesarul de putere mecanică de antrenare al compresoarelor.

Valorile coeficientului de performanță global în cazul instalației frigorifice R744 Booster S cuplată cu sistemele ORC sunt mai mari decât în cazul în care instalația frigorifică funcționează fără sistem de recuperare. Se remarcă un COP net superior în cazul sistemului R744 Booster S + DP-ORC, celelalte sistemele având valori mai mici și apropiate între ele.

Puterea mecanică dezvoltată de detentoarele sistemelor ORC impactează creșterea coeficientului de performanță al instalației frigorifice la care sunt cuplate. Sistemul DP-ORC



prezintă o creștere medie a COP-ului cu +7,83%, sistemele B-ORC și R-ORC cu +6,00%, iar sistemul RI-ORC cu +5,55%.

Comparația sistemelor din punct de vedere energetic se realizează pentru identificarea impactului pe care îl au din punct de vedere energetic sistemele de recuperare de căldură de tip ORC asupra instalației frigorifice R744 Booster S. Comparația energetică este realizată urmărind consumul total de energie al sistemelor combinate R744 Booster S + sistem ORC față de consumul total de energie al instalației frigorifice R744 Booster S. Pentru efectuarea comparației energetice s-au utilizat datele meteorologice (temperatura ambiantă) colectate din Cluj-Napoca, București și Constanța pe parcursul a doi ani: anul I (01.09.2019 – 31.08.2020) și anul II (01.09.2020 – 31.08.2021), luând în considerare doar intervalul  $t_{amb} = +20 \dots +40$  °C.

Din punct de vedere al perioadei totale de timp studiate (AN I + AN II), sistemele ORC cuplate la instalația frigorifică R744 Booster S pot aduce o reducere a consumului de energie de până la 4,72% (@ Cluj-Napoca), 5,66% (@ București) și 4,89% (@ Constanța). Sistemul DP-ORC prezintă cea mai mare scădere a energiei consumate de către instalația frigorifică, având cel mai mare procent de scădere a consumului de energie mecanică înregistrat în orașul București.

## Concluzii

### C1. Concluzii generale

Lucrarea de față are ca principal scop identificarea și studierea de sisteme termice care pot valorifica căldura reziduală generată de instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster, utilizate în magazinele de tip supermarket, în vederea creșterii eficienței frigorifice. Recuperarea căldurii reziduale de la instalațiile frigorifice reprezintă în zilele noastre una dintre soluțiile pentru reducerea consumului global de energie prin valorificarea energiei termice altfel irosite, dar totodată aduce și un aport semnificativ la îmbunătățirea performanțelor instalațiilor frigorifice. Teza de doctorat s-a concentrat pe recuperarea și valorificarea căldurii reziduale de la instalația frigorifică cu CO<sub>2</sub> tip Booster prin intermediul sistemelor de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră, a instalațiilor frigorifice cu absortie pentru prepararea apei reci care alimentează bateria de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed sau pentru producerea fluxului de căldură necesar procesului de subrăcire al CO<sub>2</sub>-ului la ieșirea din răcitorul de gaz și a sistemelor ORC cu diferite configurații constructive pentru producerea de energie mecanică. Cea mai importantă sursă de căldură reziduală generată de instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster se găsește la nivelul treptei de înaltă presiune, unde agentul de lucru are temperatură și presiune foarte ridicate, iar fluxul de căldură reziduală care în mod tradițional este eliminat către mediul ambiant este foarte mare.

Studiul bibliografic realizat în **capitolul 1** a avut ca obiectiv prezentarea posibilităților de recuperare de căldură și energie mecanică din cadrul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> utilizate în aplicațiile comerciale și industriale. Utilizarea a cât mai multe metode de recuperare de căldură și energie mecanică are un rol important asupra creșterii eficienței instalațiilor frigorifice și reduce impactul negativ asupra mediului. Deși integrarea sistemelor de recuperare a căldurii și energiei mecanice în cadrul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> presupune un cost suplimentar, aceste soluții contribuie semnificativ la reducerea consumului energetic al clădirilor în care operează și, totodată, permit obținerea unor produse energetice secundare (precum apă caldă menajeră sau energie termică pentru încălzirea spațiilor), care, în mod obișnuit, sunt obținute prin intermediul altor sisteme termice care au impact negativ asupra mediului.

Cele mai des utilizate instalații frigorifice cu CO<sub>2</sub> au fost prezentate și analizate comparativ atât din punct de vedere termodinamic, cât și din punct de vedere energetic în **capitolul 2**. Această analiză a avut ca obiectiv principal determinarea căldurii reziduale disponibile pentru recuperare.

Includerea în analiza comparativă și a cuplaj de instalații tradiționale cu freon R404A pentru refrigerare și congelare a arătat că, deși instalațiile cu CO<sub>2</sub> tip Booster sunt mai complexe decât cele cu R404A, acestea sunt mai compacte, având posibilitatea de a realiza atât procesul de refrigerare cât și de congelare în cadrul aceleiași instalații, aspect foarte important în aplicațiile tip supermarket unde este necesară păstrarea alimentelor pe diferite nivele de temperatură.

Conform analizei termodinamice, cuplajul R404A refig+cong și instalațiile R744 Booster S, R744 Booster SP prezintă performanțe comparabile atât timp cât temperatura ambiantă este mai mare de +10 °C, iar instalația cu ejectoare R744 Booster SPE este net superioară din punct de vedere al coeficientului de performanță indiferent de valoarea temperaturii ambiante. Conform analizei energetice, comparând instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub>, s-a constatat faptul că prin îmbunătățirea sistemului standard prin adăugarea de compresoare paralele și apoi ejectoare, consumul de energie se reduce considerabil. Astfel, compresorul paralel oferă o economie de energie mecanică cu până la 2,70% față de configurația standard, iar instalația cu compresor paralel și ejectoare reduce consumul de energie mecanică cu până la 23,10% față de instalația standard și cu până la 21,00% față de instalația echipată doar cu compresoare paralele, rezultate obținute în urma condițiilor de funcționare impuse. Rezultatele obținute în urma utilizării profilului de temperaturi ambiante înregistrat în orașele București, Cluj-Napoca și Constanța în perioada 01.09.2019 – 31.08.2021 a confirmat faptul că instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster prezintă performanțe mai ridicate atunci când temperatura ambiantă este mai scăzută. În acest caz, s-a obținut cel mai scăzut consum de energie mecanică în Cluj-Napoca datorită poziției geografice a orașului care facilitează temperaturi ambiante mai scăzute pe toată durata anului.

Din punct de vedere al căldurii disponibile pentru recuperare de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> se poate concluziona faptul că aceste instalații au un potențial ridicat în ceea ce privește posibilitatea recuperării căldurii reziduale datorită faptului că la temperaturi ambiante de peste +25 °C, instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster ating temperaturi ale agentului pe treapta de înaltă presiune la intrarea în răcitorul de gaz de peste +100 °C, ceea ce facilitează integrarea proceselor de recuperare de căldură, iar pe de altă parte, debitul de agent și fluxul de căldură disponibil au valori care permit recuperarea de căldură cu o eficiență ridicată. De menționat faptul că instalația cu parametrii cei mai ridicați ai căldurii reziduale s-a constatat a fi R744 Booster S, iar studiul efectuat în continuare a fost bazat pe această instalație ca sursă de căldură pentru sistemele de recuperare de căldură propuse.

În **capitolul 3** a fost analizat un sistem clasic de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră și s-a studiat posibilitatea implementării unor instalații frigorifice cu absorbție cu NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O pentru prepararea apei reci care alimentează bateria de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed și pentru producerea fluxului de căldură necesar procesului de subrăcire al CO<sub>2</sub>-ului la ieșirea din răcitorul de gaz, dar și combinații de sisteme compuse dintr-o instalație frigorifică cu absorbție și un sistem clasic de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră. Rezultatele au aratat faptul că pe lângă capacitate frigorifică de refrigerare și congelare este necesară și alimentarea unei baterii de răcire a unei centrale de tratare a aerului pentru aer condiționat, se poate utiliza fără probleme o instalație cu absorbție care poate să acopere cel puțin parțial necesarul de aer condiționat al clădirii. Dacă este necesară producerea de apă caldă menajeră, sistemul RC ACM va acoperi cu succes, cel puțin în cazul în care este adăugat singular, tot consumul clădirii. Iar dacă condițiile ambiante sunt nefavorabile (temperatura mediului ambiant foarte mare), o instalație cu absorbție pentru subrăcire va îmbunătăți considerabil eficiența instalației frigorifice prin obținerea unei reduceri a debitului masic de agent ce intră în vaporizatoare, crescând totodată capacitatea frigorifică a instalației și permițând scăderea valorii presiunii optime de lucru de pe treapta de înaltă presiune.

Fie că este vorba de sistemul de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră, fie că este vorba de instalațiile frigorifice cu absorbție sau fie că este vorba de combinații între acestea, analiza comparativă a arătat faptul că, în primul rând, acestea pot produce anumite produse energetice utilizabile în cadrul clădirilor în care funcționează, iar în al doilea rând, acestea au impact pozitiv asupra coeficientului global de performanță al sistemului. Astfel, instalația frigorifică R744 Booster S se transformă într-un sistem termodinamic integral, care poate produce mai multe fluxuri de căldură pe diferite nivele de temperatură și care este prietenos cu mediul prin utilizarea doar de agenți de lucru naturali (CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, apă).

În urma analizei sistemelor de recuperare propuse, s-a constatat că dacă sistemele de recuperare sunt integrate singular la R744 Booster S, atunci performanțele acestora sunt foarte ridicate. Însă, dacă sistemele sunt cuplate în serie, IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC + RC ACM sau IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr + RC ACM, atunci performanțele acestora scade considerabil datorită limitărilor impuse în mod necesar pentru a facilita funcționarea simultană a ambelor sisteme de recuperare. Chiar și așa, există aplicații în care aceste cuplaje pot fi foarte utile, impactul instalației cu absorbție fiind vizibil asupra instalației frigorifice, iar fluxul de căldură produs de RC ACM poate fi îndeajuns în cazul în care este vorba de un magazin tip supermarket de dimensiuni și consumuri mai reduse de energie.

Analiza impactului pe care îl au sistemele de recuperare asupra instalației frigorifice arată faptul că sistemul RC ACM cuplat singular la R744 Booster S crește coeficientul de performanță global cu până la 81,37% datorită faptului că sistemul de recuperare are la dispoziție o sursă de căldură cu parametri foarte ridicați, permițând astfel recuperarea unui flux de căldură foarte mare. În cazul în care R744 Booster S este cuplat cu IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC, coeficientul de performanță global crește cu până la 36,17%, iar dacă aceste este cuplat cu IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC + RC ACM, coeficientul de performanță global crește cu până la 30,01%. Scăderea procentului de creștere în urma adăugării sistemului RC ACM după IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O AC este datorat limitărilor impuse la nivelul temperaturilor de lucru. În ceea ce privește IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O subr, aceasta crește coeficientul de performanță global cu până la 5,39% la o subrăcire de 3K, cu până la 15,07% la o subrăcire de 5K și cu până la 29,53% la o subrăcire de 10K. Dacă se mai adaugă și o recuperare de tip RC ACM, coeficientul de performanță global crește și mai pronunțat, cu până la 18,73% la o subrăcire de 3K, cu până la 29,53% la o subrăcire de 5K și cu până la 52,84% la o subrăcire de 10K.

Nu în ultimul rând, s-a observat că indiferent de produsul util pentru care sunt proiectate, cele două soluții de recuperare propuse pentru recuperarea căldurii reziduale de la instalația frigorifică R744 Booster S, reprezintă o alegere excelentă din punct de vedere energetic, deoarece singurele consumatoare de lucru mecanic pe care le au acestea sunt pompele de circulație care prezintă un consum aproape neglijabil.

**Capitolul 4** s-a concentrat pe o analiză detaliată a patru configurații de cicluri Rankine cu fluide organice care să preia căldura reziduală de la R744 Booster S și pe care să o transforme în lucru mecanic care să ajute la antrenarea compresoarelor, reducându-se astfel consumul de energie al instalației frigorifice. Valorile parametrilor termodinamici pe care îi prezintă CO<sub>2</sub>-ul pe treapta de înaltă presiune au indicat faptul că acesta poate îndeplini rolul de sursă de căldură pentru configurații de sisteme ORC care utilizează o sursă de căldură cu nivel scăzut de temperatură.

Performanțele sistemelor ORC sunt variabile, depinzând de mai mulți factori, printre care se pot enumera: fluidul de lucru organic utilizat, tipul și nivelul de temperatură al sursei calde, tipul și nivelul de temperatură al sursei reci, dar și configurația constructivă.

Pentru ca analiza să fie cât mai completă, s-au luat în calcul patru configurații de sisteme ORC regăsite în literatura de specialitate pentru diferite aplicații de recuperare de căldură: B-ORC, R-ORC, RI-ORC și DP-ORC. Analiza a fost efectuată comparativ pentru șase fluide de lucru organice cu diferite caracteristici termodinamice și de impact asupra mediului (R124, R142b,

R236ea, R236fa, R600, R600a), în vederea determinării fluidului de lucru optim pentru sistemele ORC din cadrul cuplajului R744 Booster S + ORC.

Din punct de vedere al analizei termodinamice comparative a sistemelor ORC propuse, rezultatele au scos în evidență faptul că indiferent de agentul de lucru utilizat, puterea mecanică dezvoltată de detentoare prezintă valorile cele mai ridicate la sistemul DP-ORC, iar cele mai scăzute la sistemul RI-ORC. Deși ținta principală a fost recuperarea căldurii reziduale de la instalația frigorifică R744 Booster S și producerea unei cantități cât mai mari de lucru mecanic, evaluarea și compararea celorlalți parametri de funcționare ai sistemelor ORC oferă o imagine de ansamblu mai detaliată asupra comportamentului acestora în cadrul cuplajului R744 Booster S + ORC. Astfel, este de menționat faptul că dintre cele patru sisteme ORC, randamentul termic cel mai ridicat a fost dat de RI-ORC, în timp ce B-ORC a înregistrat valorile cele mai scăzute. În ceea ce privește debitul masic de agent utilizat în aceste sisteme, s-a observat că în cadrul sistemului DP-ORC debitul masic este cel mai mare, iar în cazul sistemului RI-ORC valorile debitului masic sunt cele mai mici. De remarcat faptul că, în urma rezultatelor, sistemul R-ORC s-a clasat întotdeauna între celelalte sisteme ORC, indiferent de parametri de funcționare evaluați.

În ceea ce privește analiza comparativă a fluidelor de lucru în vederea determinării fluidului optim, aceasta a arătat faptul că nu exista un fluid ideal pentru toate cele patru sisteme ORC studiate. Sistemul de evaluare propus a fost un sistem de notare în funcție de mai multe criterii, fiecare criteriu având o pondere diferită în funcție de scopul pentru care sunt utilizate sistemele ORC: puterea mecanică dezvoltată la nivelul detentorului cu o pondere de 40%, randamentul termic al sistemului ORC cu o pondere de 15%, debitul de agent utilizat în sistemul ORC cu o pondere de 15%, potențialul de încălzire globală al fluidului cu o pondere de 25% și prețul de cumpărare al fluidului cu o pondere de 5%. Astfel, în urma rezultatelor, printr-un sistem de notare de la 1 la 6, fluidele organice R600a și R124 au obținut notele cele mai ridicate, cu valori peste 3,50 în dreptul fiecărui sistem ORC. Dat fiind faptul că impactul asupra mediului reprezintă un criteriu important în alegerea fluidului de lucru, s-a concluzionat că R600a este cel mai potrivit agent dintre cele propuse pentru sistemele ORC studiate în această lucrare, datorită faptului că  $GWP_{R600a} = 3$ , iar  $GWP_{R124} = 527$ .

În cadrul evaluării impactul pe care îl au sistemele ORC asupra instalației frigorifice R744 Booster S s-a efectuat o analiză comparativă a impactului din punct de vedere termodinamic prin evaluarea coeficientului de performanță al instalației frigorifice înainte și după integrarea sistemelor ORC, dar și o analiză comparativă din punct de vedere energetic prin evaluarea consumului de energie al instalației frigorifice singular și cuplată cu sistemele ORC utilizând profilului de temperaturi ambiante înregistrat în orașele București, Cluj-Napoca și Constanța în perioada 01.09.2019 – 31.08.2021, prezentat în capitolul 2.

Astfel, în urma analizei termodinamice s-a observat faptul că sistemele ORC cresc coeficientul de performanță global al cuplajului R744 Booster S + ORC în condițiile de funcționare impuse cu până la 10,24% în cazul sistemelor B-ORC și R-ORC, cu până la 9,00% în dreptul sistemului RI-ORC și cu până la 13,46% în cazul sistemului DP-ORC. Se observă faptul că sistemul DP-ORC se remarcă printr-un impact mai mare asupra coeficientului de performanță al instalației frigorifice față de celelalte sisteme studiate.

Din punct de vedere energetic, ținând cont de profilul de temperaturi ambiante înregistrate în cei doi ani studiați, sistemele ORC pot produce până la 11 MWh în Cluj-Napoca, 35 MWh în București și 24 MWh în Constanța. Așa cum era de așteptat, sistemul DP-ORC poate produce cea mai multă energie mecanică, superior față de celelalte sisteme: cu până la +29% față de sistemele B-ORC sau R-ORC și cu până la +35% față de sistemul RI-ORC. Integrarea sistemelor ORC în cadrul instalației frigorifice R744 Booster S reduce consumul de energie al acesteia în doi ani cu până la 4,72% dacă instalația funcționează în Cluj-Napoca, cu până la 5,66% dacă funcționează în

București și cu până la 4,89% dacă funcționează în Constanța. Cel mai mare procent de reducere a consumului de energie este obținut de fiecare dată de sistemul DP-ORC deoarece acesta produce cantitatea cea mai mare de energie mecanică care apoi este introdusă în instalația frigorifică.

Rezultatele obținute în urma analizei posibilității integrării sistemelor ORC în cadrul instalației frigorifice R744 Booster arată faptul că cel puțin în condițiile impuse de funcționare, acestea reușesc să crească în medie coeficientul de performanță al instalației frigorifice în medie cu 11% și oferă o reducere a consumului de energie în medie cu 5%, în special în zonele cu un climat mai cald, cu temperaturi ambiante predominant mai ridicate. Aceste rezultate fac ca sistemele ORC pentru recuperarea căldurii reziduale de la R744 Booster S să reprezinte o alternativă viabilă pentru reducerea cantității de căldură reziduală care este eliberată în mediul ambiant prin intermediul răcorului de gaz și o soluție de luat în considerare pentru îmbunătățirea performanțelor instalației.

Parametrii inițiali și condițiile de funcționare impuse sistemelor de recuperare de căldură studiate au urmărit o funcționare eficientă a sistemelor, chiar dacă din această cauză, așa cum au arătat rezultatele, sistemele nu reușesc să recupereze în totalitate căldura reziduală disponibilă de la instalația frigorifică R744 Booster S.

În cazul instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> cu funcționare în regim supracritic din cadrul aplicațiilor de tip supermarket, potențialul termic disponibil pentru recuperare este considerabil. Totuși, valorificarea acestuia prin prepararea apei calde menajere este limitată, comparativ cu aplicațiile industriale, datorită necesarului mult mai redus. Prin urmare, pentru instalațiile destinate sectorului comercial este esențială identificarea unor soluții alternative de recuperare a energiei termice. În intervalul nocturn, instalațiile frigorifice funcționează la sarcini parțiale, iar consumul de apă caldă menajeră este neglijabil. În acest context, integrarea unei instalații frigorifice cu absorbție destinată subrăcirii se justifică, întrucât subrăcirea permite reducerea consumului energetic și creșterea coeficientului de performanță, chiar și la funcționarea cu sarcini reduse. De asemenea, energia electrică disponibilă pe timpul nopții, obținută prin intermediul ciclurilor Rankine cu fluide organice (ORC), poate fi utilizată pentru alimentarea iluminatului de serviciu, a sistemelor de senzori sau a altor consumuri auxiliare ale instalației frigorifice, iar prin cuplarea cu un sistem fotovoltaic aceasta poate contribui la încărcarea acumulatorilor electrici.

În funcție de specificul zonei geografice și, implicit, de valorile înregistrate ale temperaturii ambiante, se justifică adoptarea unor metode diferite de recuperare a energiei. Astfel, în regiunile caracterizate prin temperaturi ridicate, integrarea unei instalații frigorifice cu absorbție destinată subrăcirii se dovedește a fi soluția optimă, întrucât contribuie la reducerea consumului de energie electrică și la creșterea coeficientului de performanță al sistemului.

În contextul schimbărilor climatice accelerate și al schimbărilor legislative din ultimii ani, implementarea unor sisteme termice precum instalațiile frigorifice cu absorbție sau sistemele ORC care cresc eficiența sistemelor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster prin valorificarea căldurii reziduale reprezintă pași importanți în găsirea de soluții alternative de eficientizare și reducere a consumului de energie, dar și în realizarea obiectivelor climatice, atât la nivelul EU, cât și la nivel mondial.

## C2. Contribuție personală

Pe baza concluziilor generale prezentate mai sus, contribuțiile personale din cadrul tezei de doctorat se pot sumariza după cum urmează:

- realizarea clasificării detaliate a instalațiilor frigorifice transcritice cu CO<sub>2</sub> și cercetarea stadiului actual al tuturor posibilităților de recuperare de căldură și energie mecanică din cadrul acestora;
- elaborarea programelor de calculul termodinamic al sistemelor termice studiate prin intermediul bibliotecii open-source Coolprop și a software-ului EES cu posibilitatea modificării datelor de intrare și obținerea rezultatelor instant;

- modelarea matematică a funcționării din punct de vedere termodinamic a ejectoarelor de gaz din cadrul instalației frigorifice R744 Booster SPE;
- efectuarea unei analize din punct de vedere energetic a funcționării instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster în trei orașe cu climat diferit de pe teritoriul României (Cluj-Napoca, București, Constanța), utilizând date meteo reale care reflectă evoluția temperaturii ambiante în orașele respective în perioada 01.09.2019 – 31.08.2021;
- integrarea în cadrul instalației frigorifice R744 Booster S, în vederea recuperării căldurii reziduale, a unei instalații frigorifice cu absorbție (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O) pentru prepararea apei reci care alimentează bateria de răcire din cadrul unei centrale de tratare a aerului umed și pentru producerea fluxului de căldură necesar procesului de subrăcire al CO<sub>2</sub>-ului la ieșirea din răcitorul de gaz;
- integrarea în cadrul instalației frigorifice R744 Booster S în vederea recuperării căldurii reziduale a unei instalații frigorifice cu absorbție combinat cu un sistem de recuperare de căldură pentru prepararea de apă caldă menajeră (IFA NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O + RC ACM);
- elaborarea unei metode de determinare a temperaturii de vaporizare optime în cadrul sistemelor ORC corespunzătoare regimului de putere maximă dezvoltată la nivelul detentoarelor;
- analiza comparativă a fluidelor de lucru în vederea alegerii fluidului optim prin sistem de departajare în funcție de criteriile stabilite;
- integrarea în cadrul instalației frigorifice R744 Booster S a patru configurații de cicluri Rankine cu fluide organice (B-ORC, R-ORC, RI-ORC, DP-ORC) cu scopul de recupera căldura reziduală și a produce lucru mecanic care să fie redirecționat către compresoarelor frigorifice în vederea reducerii consumului de energie;
- realizarea unei analize a impactului pe care îl au sistemele B-ORC, R-ORC, RI-ORC și DP-ORC asupra eficienței instalației frigorifice R744 Booster S, dacă aceasta ar funcționa în Cluj-Napoca, București, Constanța în perioada 01.09.2019 – 31.08.2021.

## **C1. Direcții de cercetare viitoare**

Direcțiile de cercetare viitoare pot implica:

- analiza impactului pe care îl au instalațiile frigorifice cu absorbție și sistemele ORC asupra instalațiilor frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster luând în considerare o plajă largă de capacități frigorifice uzual întâlnite în cadrul magazinelor de tip supermarket, dar și în cazul altor tipuri de aplicații frigorifice;
- verificarea posibilității integrării sistemelor de recuperare de căldură propuse în cadrul unor instalații frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster care sunt deja în funcțiune;
- evaluarea căldurii reziduale disponibile pentru recuperare de la instalațiile frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster atunci când acestea funcționează în diferite regimuri de funcționare, precum zi – noapte sau sezon cald - sezon rece, și verificarea posibilității integrării instalațiilor frigorifice cu absorbție și a sistemelor ORC în toate aceste cazuri;
- analiza situației în care sistemele de recuperare de căldură propuse se cuplează în paralel la două sau mai multe instalații frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster, în vederea creșterii debitului masic al sursei de căldură;
- verificarea posibilității utilizării altor tipuri de surse reci, în loc de apă, pentru instalațiile frigorifice cu absorbție și sistemele ORC propuse, în contextul actual al crizei resurselor naturale;
- identificarea pentru sistemele ORC a unor fluide organice mai performante și cercetarea posibilității utilizării CO<sub>2</sub>-ului ca agent în cadrul acestor sisteme;

- realizarea unei analize economice a integrării sistemelor de recuperare propuse în cadrul instalației frigorifice cu CO<sub>2</sub> tip Booster noi, dar și existente, luând în considerare toate costurile aferente (de implementare, de exploatare, etc.).

## Articole publicate

Uță Iulian; Apostol Valentin; Pop Horațiu; **Pavel Constantin**; Alqaisy Saleh Jassim Saleh; Bădescu Viorel; Taban Daniel; Ioniță Claudia, „Mathematical modeling of an Evaporator by using different criterial equations”, **INMATEH-AGRICULTURAL ENGINEERING**, Vol. 67, Issue 2, Page 562-572, Plubished MAY-AUG 2022, Indexed 2022-11-21. Lucrarea este indexată în **BDI (Scopus)** DOI [10.35633/inmateh-67-55](https://doi.org/10.35633/inmateh-67-55) și ISI Thomson Reuters **WOS:000883607300001**, ISSN 2068-4215, eISSN 2068-2239. Conform JCI Category AGRICULTURAL ENGINEERING in ESCI edition, Category Rank 14/17, Category Quartile Q4.

Uță Iulian; Apostol Valentin; Pop Horațiu; Bădescu Viorel; **Pavel Constantin**; Ioniță Claudia, „Heat transfer characteristics of an evaporator equipping an air handling units for cereal seed storage facility”, **INMATEH-AGRICULTURAL ENGINEERING**, Vol. 69, Issue 1, Page 597-608, Published JAN-APR 2023, ISSN 2068-2239. Lucrarea este indexată în **BDI (Scopus)** DOI [10.35633/inmateh-69-57](https://doi.org/10.35633/inmateh-69-57) și ISI Thomson Reuters **WOS:000996501400046**, ISSN 2068-4215, eISSN 2068-2239. Conform JCI Category AGRICULTURAL ENGINEERING in ESCI edition, Category Rank 14/17, Category Quartile Q4.

Al Douri Jamal; Apostol Valentin; Pop Horațiu; Prisecaru Tudor; **Pavel Cornel Constantin**; Uță Iulian; Ioniță Claudia, „Improving performance of cold room refrigeration system by desuperheating energy recovery using PCMs”, **INMATEH-AGRICULTURAL ENGINEERING**, Vol. 70, Issue 2, Page 549-556, Plubished 2023. Lucrarea este indexată în **BDI (Scopus)** DOI [10.35633/inmateh-70-53](https://doi.org/10.35633/inmateh-70-53) și ISI Thomson Reuters **WOS:001061835600004**, ISSN 2068-4215, eISSN 2068-2239.

Apostol Valentin; Pop Horațiu; Prisecaru Tudor; Ioniță Claudia; Al Douri Jamal; Chiriac Adrian; **Pavel Cornel Constantin**, „Preliminary thermodynamic assesment of a refrigeration system with a PCM based defrosting”, **INMATEH - AGRICULTURAL ENGINEERING**, Vol. 75, Issue 1, Page 515-526, Plubished 2025. Lucrarea este indexată în **BDI (Scopus)** DOI [10.35633/inmateh-75-44](https://doi.org/10.35633/inmateh-75-44) și ISI Thomson Reuters **WOS:001485401300037**, ISSN 2068-4215, eISSN 2068-2239.

Alte lucrări publicate:

Pop Horațiu Lucian (prim autor), Apostol Valentin (coordonator), **Pavel Constantin**, Toader Melisa Gabriela, Uță Iulian, „Procese în instalațiile de condiționare a aerului”, ISBN 978-606-9608-57-9, CIP nr. 18027/03.08.2023, Editura POLITEHNICA PRESS, București, 2023, 151 pagini.

## Bibliografie selectivă

[1] Bruno F., Belusko M., Halawa Ed., 2019. CO<sub>2</sub> Refrigeration and Heat Pump Systems - A Comprehensive Review. Energies, 12 (15), 29-59. <https://doi.org/10.3390/en12152959>

[4] Tassou S.A., Ge Y., Hadawey A., Marriott D., 2011. Energy consumption and conservation in food retailing. Applied Thermal Engineering 31, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.023>

- [9] Darmanaden Soobena, Niles Purohitb, Romeela Moheec, Francis Meunierd, Mani Sankar Dasgupta, 2019. R744 refrigeration as an alternative for the supermarket sector in small tropical island developing states: The case of Mauritius. *International Journal of Refrigeration* 103, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.03.034>
- [10] K. Zolcer Skacanová, M. Battesti, 2019. Global market and policy trends for CO<sub>2</sub> in refrigeration. *International Journal of Refrigeration* 107: 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.08.010>
- [17] Danfoss, 2010. Industrial refrigeration - Ammonia and CO<sub>2</sub> applications (Application Handbook). Available at: [www.danfoss.com/ir](http://www.danfoss.com/ir)
- [18] Stefan Elbel, Pega Hrnjak, 2008. Ejector Refrigeration: An Overview of Historical and Present Developments with an Emphasis on Air-Conditioning Applications. Available online at: <https://pdfs.semanticscholar.org/f86a/c935c92fdd4aba8cb65f79506e1caf60fac2.pdf>
- [21] Samer Sawalha, 2013. Investigation of heat recovery in CO<sub>2</sub> trans-critical solution for supermarket refrigeration. *International Journal of Refrigeration* 36: 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.020>
- [23] Alessio Polzot, Paola D'Agaro, Giovanni Cortella, 2017. Energy analysis of a transcritical CO<sub>2</sub> supermarket refrigeration system with heat recovery. *Energy Procedia* 111: 648-657. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.227>
- [26] Mazyar Karampour, Samer Sawalha, 2015. Theoretical analysis of CO<sub>2</sub> trans-critical system with parallel compression for heat recovery and air conditioning in supermarkets. The 24th IIR International Congress of Refrigeration - ICR2015. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/281583937>
- [27] N. Hoffenbecker, S.A. Klein, D.T. Reindl, 2005. Hot gas defrost model development and validation. *International Journal of Refrigeration* 28: 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.08.016>
- [43] Giorgio Besagni, Riccardo Mereu, Fabio Inzoli, 2016. Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 373-407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.059>
- [44] Xiangjie Chen, Siddig Omer, Mark Worall, Saffa Riffat, 2013. Recent developments in ejector refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19: 629-651. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.028>
- [46] Jahar Sarkar, 2012. Ejector enhanced vapor compression refrigeration and heat pump systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 6647-6659. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.007>
- [48] Jian-qiang Deng, Peixue Jiang, Tao Lu, Wei Lu, 2007. Particular characteristics of transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration cycle with an ejector. *Applied Thermal Engineering* 27(2-3):381-388. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.07.016
- [51] Hafner, A., Shönenberger, J., Banasiak, K., Girotto, S., 2014c. R744 ejector supported parallel vapour compression system. In: *Proceedings of the 3rd IIR International Conference on Sustainability and Cold Chain*, 23rd – 25th June; London, United Kingdom. ID: 129



- [52] Armin Hafner, Sven Försterling, Krzysztof Banasiak, 2014. Multi-ejector concept for R-744 supermarket refrigeration. *International Journal of Refrigeration* 43: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.015>
- [55] Anarghya Ananda Murthy, Alison Subiantoro, Stuart Norris, Mitsuhiro Fukuta, 2019. A review on expanders and their performance in vapour compression refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration* 106: 427-446. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.019>
- [57] Gustav Lorentzen, Jostein Pettersen, 1993. A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning. *International Journal of Refrigeration* 16: 4-12. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(93\)90014-Y](https://doi.org/10.1016/0140-7007(93)90014-Y)
- [59] Baomin Dai, Shengchun Liu, Kai Zhu, Zhili Sun, Yitai Ma, 2017. Thermodynamic performance evaluation of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle integrated with thermoelectric subcooler and expander. *Energy* 122: 787-800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.029>
- [71] Weather Data & Weather API | Visual Crossing. Available at: <https://www.visualcrossing.com>
- [72] Y.T. Ge, S.A. Tassou, 2014. Control optimizations for heat recovery from CO<sub>2</sub> refrigeration systems in supermarket. *Energy Conversion and Management* 78: 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.071>
- [73] K.C. Ng, T.Y. Bong, H.T. Chua, H.L. Bao, 1993. Theoretical and experimental analysis of an absorption chiller. *International Journal of Refrigeration* 17: 351-358. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0140-7007(94)90066-3)
- [74] X.Q. Zhai, R.Z. Wang, 2009. A review for absorption and adsorption solar cooling system in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1523-1531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.022>
- [75] Gh. Popescu, V. Apostol, S. Porneală, A. Dobrovicescu, E. Vasilescu, C. Ioniță, 2005. *Echipamente și instalații frigorifice*. Editura PRINTECH, București. ISBN 973-718-207-3
- [84] A. Alexandru, D. Taban, I. Uță, 2014. Sinteză asupra schemelor constructive ale sistemelor energetice de tip ORC. *Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică București*
- [85] Conf. dr. ing. Pop Horațiu, Prof. dr. ing. Apostol Valentin, Conf. dr. ing. Stanciu Camelia, Ș.l. dr. ing. Racovițan Alexandru, Ș.l. dr. ing. Pop Elena, As. univ. drd. ing. Taban Daniel, Ș.l. dr. ing. Ionița Claudia, Ș.l. dr. ing. Tănase Beatrice, 2022. *Sisteme Rankine cu fluide organice (ORC) utilizate pentru recuperarea căldurii reziduale de la motoarele cu ardere internă (MAI) - Elemente de teorie*. *Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea Politehnică București*
- [89] Junjiang Bao, Li Zhao, 2013. A review of working fluid and expander selection for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24: 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>