

UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de **30.09.2024**, la ora **09:30** în **sala 01R**,
Corpul R al Facultății de Construcții și Instalații, va avea loc susținerea publică a tezei
de doctorat intitulată:

***“STUDII NUMERICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND PERFORMANȚA ENERGETICĂ ȘI
OPTIMIZAREA CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ A UNUI SISTEM DE RECUPERARE A
CĂLDURII / EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER
PERFORMANCE AND DESIGN OPTIMIZATION OF A WASTE HEAT RECOVERY
SYSTEM”***

elaborate de doamna **VIZITIU ȘTEFĂNICA-ELIZA** în vederea conferirii titlului științific de
doctor.

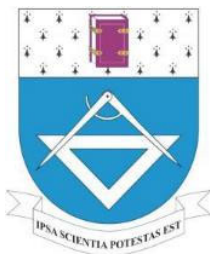
Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|--|------------------------|
| 1. ISOPESCU Dorina Nicolina
Prof.univ.dr.ing., Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași | președinte |
| 2. BURLACU Andrei
Prof.univ.dr.ing., Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași | conducător de doctorat |
| 3. ABID Chérifa
Prof.univ.dr.ing., Aix-Marseille Université | conducător de doctorat |
| 4. NĂSTASE Ilinca
Prof.univ.dr.ing., Universitatea Tehnică de Construcții București | referent oficial |
| 5. AȘCHILEAN Ioan
Prof.univ.dr.ing., Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca | referent oficial |
| 6. HARMAND Souad
Prof.univ.dr.ing., Université Polytechnique Hauts-de-France | referent oficial |
| 7. LACHI Mohammed
Prof.univ.dr.ing., Université de Reims Champagne-Ardenne | referent oficial |
| 8. KAISS Maxime-Ahmed
Conf.univ.dr.ing., Aix-Marseille Université | referent oficial |
| 9. VERDEȘ Marina
Conf.univ.dr.ing., Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași | referent oficial |

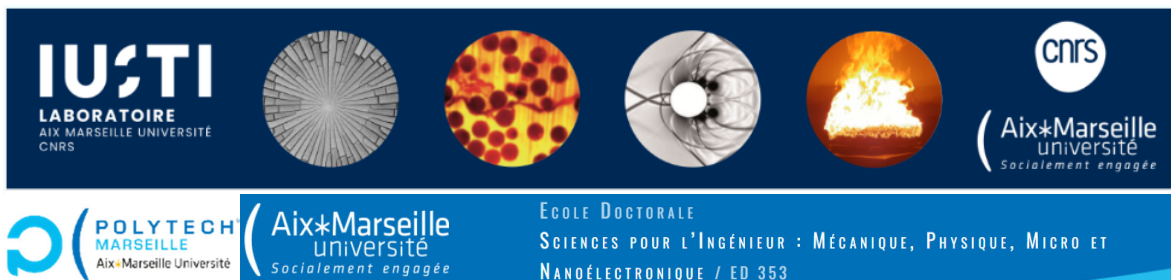
Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de
doctorat.

RECTOR,
Prof. univ.dr.ing. Dan CAȘCAVAL

Secretar universitate,
Ing. Cristina Nagiț



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



AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
L'ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR : MÉCANIQUE, PHYSIQUE, MICRO ET
NANOÉLECTRONIQUE / ED 353
Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels / IUSTI - UMR 7343

STUDII NUMERICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND PERFORMANȚA ENERGETICĂ ȘI OPTIMIZAREA CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ A UNUI SISTEM DE RECUPERARE A CĂLDURII

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE AND DESIGN OPTIMIZATION OF A WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

- REZUMAT -

Doctorand :
Ing. Ștefănica Eliza VIZITIU

Conducători de doctorat :
Prof. univ. dr. ing. Andrei BURLACU
Prof. univ. dr. ing. Chérifa ABID

IAȘI, 2024

Cuprins

1. Introducere Generală	4
1.1 Încadrarea temei în contexte naționale și internaționale.....	4
1.2 Importanța și actualitatea temei	6
1.3 Motivația cercetării.....	7
1.4 Obiective și scop.....	8
1.5 Prezentare generală a structurii tezei	9
2. Stadiul Actual al Cunoașterii Privind Recuperarea Energiei Termice Reziduale.....	11
2.1 Provocări în ceea ce privește recuperarea căldurii reziduale.....	11
2.1.1 Care este scopul recuperării energiei termice reziduale?.....	12
2.1.2 De unde recuperăm energia termică reziduală?.....	13
2.1.3 Cum poate fi recuperată energia termică reziduală?.....	14
2.2 Utilizarea energiei termice reziduale	15
2.2.1. Tehnici de utilizare a căldurii reziduale.....	16
2.2.2. Eficiență și optimizare	16
2.3 Prezentare generală a sistemelor de recuperare a căldurii reziduale	17
2.3.1 Arzătoare recuperative și regenerative	17
2.3.2 Schimbătoare de căldură.....	18
2.3.3 Economizoare	19
2.3.4 Boilere recuperatoare de căldură	19
2.3.5 Generatoare de abur pentru recuperarea căldurii (HRSGs).....	20
2.3.6 Cicluri termodinamice pentru recuperarea căldurii reziduale.....	20
2.3.7 Pompe de căldură	21
2.4 Tuburi termice	21
2.4.1 Prezentare generală a tuburilor termice	21
2.4.2 Studii de caz și aplicații	22
2.4.3 Integrarea tuburilor termice în sistemele de recuperare a căldurii reziduale	23
3. Stadiul Actual al Cunoașterii Privind Sistemele de Stocare a Energiei Termice.....	25
3.1 Stocarea energiei termice - generalități	25
3.2 Materiale cu schimbare de fază (PCMs).....	26
3.2.1 Introducere în PCMs.....	26
3.2.2 Tipuri de PCMs	27
3.2.3 Proprietățile dorite ale PCM-urilor.....	30
3.3 Sisteme de stocare a energiei termice.....	31
3.3.1 Sisteme de stocare a căldurii sensibile	32
3.3.2 Sisteme de stocare a căldurii latente.....	33

4. Optimizarea Strategică a Parametrilor Operaționali prin Simulări Numerice.....	36
4.1 Obiective.....	36
4.2 Proiectarea sistemului de recuperare a căldurii cu tuburi termice	36
4.3 Simulare numerică.....	39
4.3.1 Condițiile la limită.....	39
4.3.2 Modelarea matematică.....	41
4.3.3 Parametrii de simulare și organizarea grupurilor de analiză.....	43
4.4 Rezultate	46
4.4.1 Analiză comparativă: variația debitului agentului secundar în Grupul A	46
4.4.2 Analiză comparativă: variația lungimii serpentinei în Grupul B și Grupul C	48
4.4.3 Analiză comparativă: variația diametrului tubului termic în Grupul D.....	50
4.4.4 Analiza comparativă: variația diametrului condensatorului în Grupul E	51
4.4.5 Rezumatul analizei	54
4.4.6 Limitările studiului și direcții de cercetare	56
4.5 Concluzii.....	56
5. Cercetări Experimentale	58
5.1 Dezvoltarea sistemului de recuperare a căldurii reziduale: concept, model 3D și etape de fabricație ..	58
5.2 Implementarea și prezentarea generală a funcționării standului experimental.....	60
5.3 Validarea experimentală a sistemului de recuperare a căldurii	62
5.4 Analiza rezultatelor experimentale.....	64
5.4.1 Grupul A: Impactul izolației asupra performanței sistemului	65
5.4.2 Grupurile B și C: Analiza efectelor variabilității temperaturii agentului primar.....	67
5.4.3 Grupurile D, E și F: Analiza performanței sistemului la temperaturi constante cu durate variabile	71
5.4.4 Grup G: Influența variațiilor debitului asupra performanței sistemului	76
5.5 Eficiența și performanța sistemului	78
5.6 Concluzii parțiale.....	79
6. Concluzii Generale și Contribuții Personale Originale.....	81
6.1 Rezumatul principalelor constatări și concluzii generale	81
6.2 Contribuții originale	82
6.3 Explorarea aplicațiilor potențiale ale noului sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale.....	83
6.4 Valorificarea rezultatelor cercetării	84
6.5 Recomandări pentru cercetări ulterioare.....	86
Bibliografie selectivă	88

1. Introducere Generală

1.1 Încadrarea temei în contexte naționale și internaționale

Din cauza creșterii populației și a expansiunii economice, consumul global de energie este în continuă creștere, ceea ce aduce cu sine noi provocări și dificultăți. O preocupare majoră este faptul că utilizarea sporită a combustibililor fosili duce la emisii mai mari de gaze cu efect de seră, inclusiv dioxid de carbon (CO_2), care contribuie la încălzirea globală (OECD, 2012). Conform “Statistical Review of World Energy” (BP p.l.c., 2022) consumul global de energie și emisiile de CO_2 au crescut cu 5% în 2021 față de 2020, aceasta fiind cea mai mare creștere înregistrată în istorie. Cu toate acestea, cererea de energie regenerabilă a crescut constant din anii 1950, datorită necesității unei surse de energie curate și a unui impact redus asupra mediului, așa cum se arată în Figura 1.1. Totuși, cercetările arată că doar 14,1% din sursele actuale de energie sunt regenerabile, în timp ce combustibilii fosili reprezintă 80,9% (IEA, 2021a).

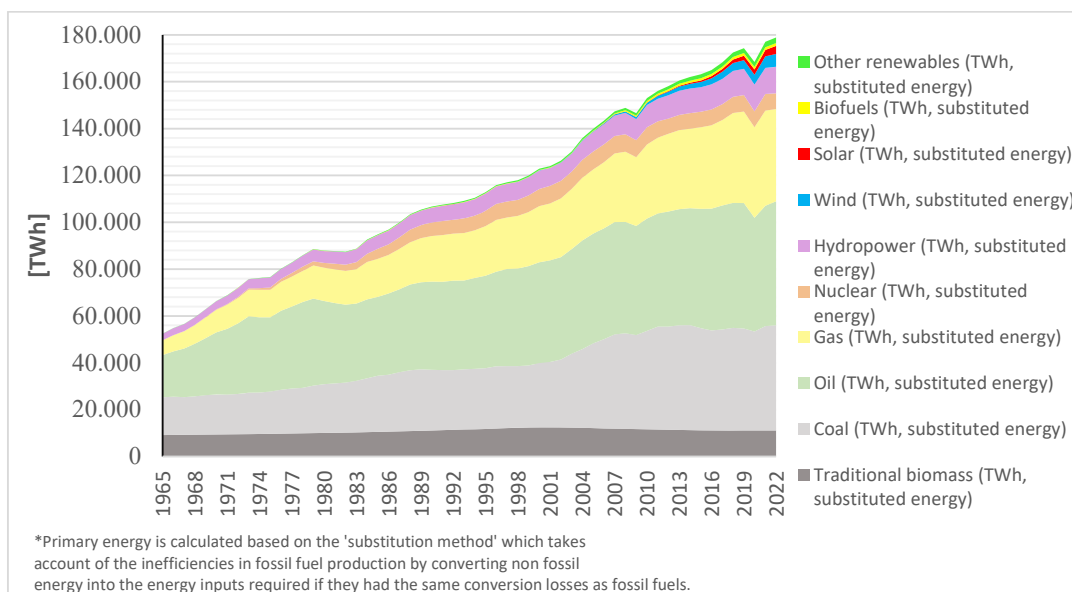


Figura 1.1. Consumul global de energie primară după sursă (Our World in Data, 2023)

Pe de altă parte, aceste provocări pot aduce și mari oportunități. Pentru un viitor dominat de energie durabilă, este esențial să adoptăm gândirea inovatoare și să îmbunătățim sistemele existente. Prin urmare, trebuie să regândim modul în care energia este produsă, distribuită și utilizată (IEA, 2021b). În acest context, Acordul de la Paris din 2015 a marcat un punct de cotitură important în răspunsul global la schimbările climatice (IEA, 2020), atunci când aproape toate națiunile lumii s-au unit în spatele unui obiectiv comun: reducerea emisiilor de gaze cu efect de

seră, care sunt principala cauză a încălzirii globale, menținând creșterea temperaturii sub 1,5 °C. Ulterior, în 2021, Uniunea Europeană a adoptat "Legea Europeană a Climei", care este o componentă cheie a „Pactului Ecologic European”, angajându-se să reducă emisiile cu până la 55% până în 2030, cu scopul final de a atinge neutralitatea climatică până în 2050 (Directorate-General for Climate Action, 2021). În același timp, „Directiva privind Energia Regenerabilă” (RES) stabilește un obiectiv mai ambițios de a genera 40% din energia noastră din surse regenerabile până în 2030. Acest lucru va necesita ca toate statele membre să lucreze pentru atingerea acestui obiectiv, iar ținte specifice sunt propuse pentru utilizarea energiei regenerabile în domenii precum transportul, încălzirea și răcirea spațiilor, clădirile și în industrie (Directorate-General for Energy, 2022).

România trebuie să-și consolideze strategiile pentru a îndeplini obiectivele colective stabilite prin Acordul de la Paris, alături de ceilalți membri ai UE. Cele mai semnificative reforme la nivel european care au impact asupra sectorului energetic din România sunt reprezentate de „Pactul Ecologic European”, care contribuie semnificativ la decarbonizarea acestui sector, conform unei analize recente (EY Romania, 2021). Resursele naturale, inclusiv gazele naturale, energia nucleară și energia regenerabilă, fac parte din mixul energetic diversificat al țării (International Trade Administration, 2024). Având în vedere acest mix energetic bine echilibrat și resursele naturale, împreună cu progresele tehnice recente în domeniul energiei regenerabile, România are potențialul de a deveni unul dintre pilonii centrali ai tranziției energetice între statele membre. Conform Planului Național Integrat în domeniul Energiei și Schimbărilor Climatice 2021–2030 (PNIESC), România și-a stabilit un obiectiv de 30,7% pentru ponderea totală a energiei din surse regenerabile în consumul final până în 2030. PNIESC are și alte priorități politice până în 2030, inclusiv reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră cu 44% comparativ cu nivelurile din 2005 și creșterea eficienței energetice cu 45,1% față de 2007 (Ministerul Energiei, 2021).

Pentru a aborda actuala criză climatică, Franța s-a angajat, la fel ca România, să devină neutră din punct de vedere al emisiilor de carbon până în 2050. Pentru a realiza acest lucru, țara intenționează să crească considerabil ponderea energiei regenerabile în sectorul său energetic (Lebrouhi et al., 2022). Cu o creștere modestă între 2005 și 2019, ponderea energiei regenerabile a ajuns la 17,2% în 2019, sub ținta națională de 33% până în 2030 (YOUNGOVA, 2021). În conformitate cu planul de investiții al țării, guvernul francez a anunțat o investiție de aproximativ 1 miliard de euro, cu obiectivul final de a crește capacitatea instalată de energie regenerabilă, ținta finală fiind de 100 GW (IEA, 2022a).

1.2 Importanța și actualitatea temei

În ciuda importanței tot mai mari a tehnologiilor de încălzire eficiente și cu emisii reduse de carbon, combustibilii fosili continuă să satisfacă mai mult de 60% din cerințele energetice globale pentru încălzire (IEA, 2023a). Arderea combustibililor fosili este o nevoie comună a activității umane, care duce la creșterea temperaturilor medii globale și a nivelului de dioxid de carbon (CO₂) din atmosferă, ambele contribuind la schimbările climatice. Având în vedere că această resursă este finită și ar putea să se epuizeze complet în următorii 50 de ani, aceasta generează preocupări semnificative, pe lângă emisiile de CO₂ produse, pe măsură ce consumul crește (BP p.l.c., 2021; Ritchie et al., 2024). Din acest motiv, în ultimele decenii s-a acordat o atenție deosebită resurselor regenerabile, în efortul de a reduce și, în cele din urmă, de a elimina treptat combustibilii fosili. Conform Agenției Internaționale a Energiei, mai puțin de 25% din cererea globală de energie pentru încălzire a fost acoperită de surse regenerabile în 2020 (IEA, 2021c). Clădirile, transportul și industria sunt cele trei mari sectoare consumatoare la nivel global, așa cum se poate observa în Figura 1.2.

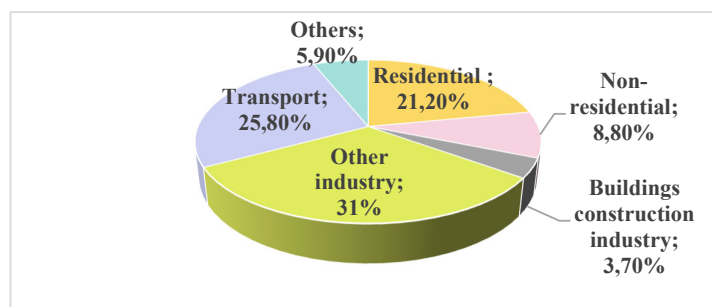


Figura 1.2 Consumul final de energie în sectorul clădirilor, 2021 (IEA, 2021d)

La nivel global, consumul de energie al clădirilor și al construcțiilor continuă să crească, reprezentând 30% din consumul final total de energie, precum și 27% din emisiile de gaze cu efect de seră ale sectorului energetic (IEA, 2023b). În 2021, aproape jumătate din consumul final total de energie la nivel mondial a fost destinat încălzirii, eliberând 2450 Mt de CO₂ direct în atmosferă, fiind evident că acest tip de consum utilizează mai multă energie decât electricitatea sau transportul (IEA, 2023a). În contextul tranziției către un viitor mai sustenabil, eficiența energetică are o importanță deosebită, astfel că, începând cu 2021, „Standardul pentru Clădiri cu Consum de Energie Aproape Zero (nZEB)” a devenit obligatoriu în România. Aceste clădiri verzi trebuie să aibă un consum de energie aproape zero, care să fie în mare parte asigurat din surse de energie regenerabilă, precum și un nivel ridicat de eficiență energetică, realizat prin utilizarea celor mai bune și ecologice materiale de construcție (Romania Eficienta, 2021).

În plus, minimizarea și recuperarea căldurii reziduale oferă un potențial uriaș de creștere a eficienței, deoarece energia termică din căldura reziduală poate fi reutilizată direct pentru preîncălzire, operațiuni de refrigerare și chiar pentru generarea de energie. Utilizarea sistemelor și echipamentelor de recuperare a căldurii poate aduce beneficii considerabile pentru majoritatea clădirilor care folosesc energie pentru încălzire, răcire, ventilație sau orice tip de operațiune industrială. Consumul de energie, costurile operaționale și emisiile de gaze cu efect de seră pot fi reduse eficient prin utilizarea sistemelor de recuperare a căldurii, motiv pentru care aceste sisteme necesită o atenție specială.

1.3 Motivația cercetării

Utilizarea sistemelor de recuperare a căldurii reziduale a primit o atenție semnificativă în contextul energetic actual, datorită importanței sale în minimizarea efectelor negative asupra mediului, precum și din punct de vedere economic și al eficienței. Termenul „căldură reziduală” se referă la energia produsă în timpul unui proces care nu este utilizată corespunzător, ci este pierdută sau eliberată în mediu (Jouhara et al., 2018). În ceea ce privește fezabilitatea sistemelor de recuperare a căldurii reziduale, temperatura căldurii reziduale și cantitatea de căldură generată sunt două aspecte esențiale, având în vedere că temperatura determină calitatea căldurii. Căldura reziduală este larg disponibilă, cu un potențial de utilizare încă neexploatat, în special în sectorul industrial. Numărul lucrărilor științifice publicate în ultimele douăzeci de ani, conform Science Direct, așa cum se arată în Figura 1.3, demonstrează creșterea semnificativă a interesului pentru sistemele de recuperare a căldurii, ca urmare a preocupărilor legate de eficiența energetică, consumul de energie și sustenabilitate. Acest număr de lucrări publicate a atins un vârf de 35.227 anul trecut, demonstrând o creștere notabilă a cercetării și a atenției acordate tehnologiilor de recuperare a energiei termice.

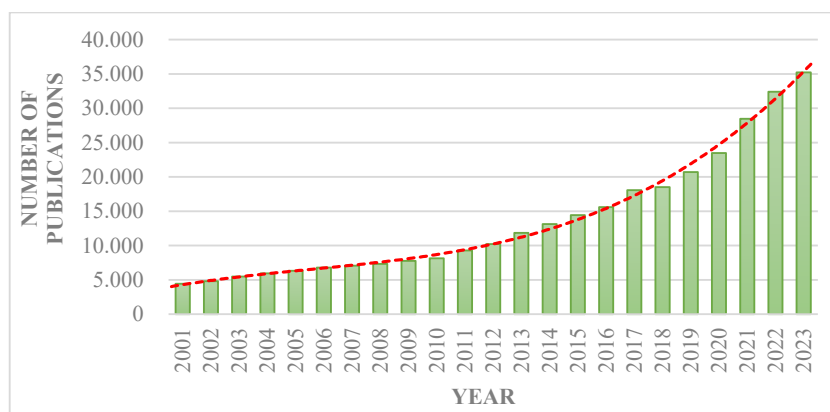


Figura 1.3 Articole științifice privind sistemele de recuperare a căldurii publicate între 2001 și 2023, conform Science Direct

1.4 Obiective și scop

Obiectivul principal al acestei cercetări și teze de doctorat este de a dezvolta, reconfigura și optimiza un sistem existent de recuperare și stocare a căldurii reziduale de tip apă-apă, care implică în principal îmbunătățirea capacității sistemului de a capta, stoca și utiliza energia termică din fluidele reziduale generate în diverse procese tehnologice. Obiectivele cheie ale acestei cercetări includ creșterea eficienței stocării energiei termice latente și optimizarea proceselor de transfer de căldură. Scopul final al acestei cercetări este de a îmbunătăți semnificativ eficiența operațională generală a sistemului, promovând astfel abordări mai durabile în gestionarea energiei.

Sistemul existent, care implică două unități separate pentru recuperarea și stocarea energiei termice din fluide reziduale, prezintă limitări, inclusiv cerințe excesive de spațiu și performanțe suboptimale de recuperare și stocare a energiei, așa cum a fost documentat de (Vizitiu, 2020). Această cercetare își propune să abordeze aceste provocări prin propunerea unei soluții noi, mai eficiente și mai compacte, care integrează funcțiile de recuperare și stocare într-o singură unitate compactă. Această abordare nu doar că păstrează funcționalitatea de bază a echipamentului existent, ci și îmbunătățește eficiența și compactitatea generală a acestuia. În plus, cercetarea explorează îmbunătățiri ale sistemului de recuperare a căldurii prin înlocuirea tuburilor termice testate în laborator cu unele de înaltă performanță pentru un transfer de căldură îmbunătățit și prin integrarea unui material cu schimbare de fază superior, pentru a crește semnificativ stocarea energiei termice latente. Inovația acestui proiect este subliniată de metoda eficientă de captare a energiei termice din apele uzate printr-o singură unitate compactă. Prin dezvoltarea acestui nou sistem optimizat, cercetarea nu doar că depășește deficiențele design-urilor anterioare, ci introduce concepte noi care duc la o soluție mai eficientă și mai economică din punct de vedere al spațiului pentru recuperarea și stocarea energiei termice.

Obiectivele secundare ale tezei de doctorat sunt prezentate astfel:

- Realizarea unei analize și sinteze cuprinzătoare a cunoștințelor existente legate de sistemele de recuperare a căldurii și de tuburile termice, având ca scop oferirea unei perspective complete asupra stadiului actual al cercetării în acest domeniu;
- Analizarea și sintetizarea stadiului actual al cunoștințelor și a celor mai recente progrese în tehnologia de stocare a energiei termice, contribuind la o înțelegere aprofundată a ultimelor tehnologii din acest domeniu;
- Îmbunătățirea detaliilor constructive și operaționale ale sistemului de recuperare a căldurii reziduale prin tehnici de optimizare, concentrându-se pe creșterea eficienței și a performanței;

- Efectuarea de simulări numerice pentru a obține informații detaliate în vederea reproiectării sistemului de recuperare și stocare a căldurii reziduale;
- Realizarea de investigații experimentale pe un sistem de recuperare-stocare a căldurii reziduale de tip apă-apă, integrat cu tuburi termice de înaltă eficiență și un material nou cu schimbare de fază, implicând construcția sistemului nou dezvoltat, cu un design original;
- Explorarea oportunităților de aplicare practică a rezultatelor cercetării în domeniul Inginerie Civilă și Instalații, având ca scop facilitarea implementării soluțiilor inovatoare derivate din studiu.

1.5 Prezentare generală a structurii tezei

Această teză de doctorat este structurată în șase capitole, fiecare dezvoltat în etape diferite ale procesului de cercetare. **Capitolul 1** oferă o introducere cuprinzătoare, stabilind contextul prin prezentarea peisajului energetic național și internațional, cu o atenție deosebită asupra acțiunilor implementate de Uniunea Europeană, România și Franța. Accentul este pus pe sustenabilitate, creșterea eficienței utilizării energiei și atingerea neutralității carbonului. Capitolul prezintă importanța și relevanța temei, concentrându-se în mod special pe recuperarea căldurii reziduale, oferind o privire de ansamblu asupra motivațiilor care au stat la baza alegerii acestui domeniu de studiu. În final, capitolul stabilește scopurile și obiectivele tezei, oferind o prezentare clară a rezultatelor planificate ale cercetării și o scurtă trecere în revistă a structurii lucrării.

Capitolul 2 al acestei teze explorează pe larg stadiul actual al cunoștințelor privind recuperarea căldurii reziduale, oferind o revizuire cuprinzătoare atât a cadrului teoretic, cât și a aplicațiilor practice. Capitolul discută provocările legate de recuperarea energiei termice din surse reziduale, luând în considerare scopul, sursele, utilizarea și diversele tehnici de recuperare a căldurii. De asemenea, detaliază diferite sisteme de recuperare a căldurii reziduale, precum arzătoarele recuperative și regenerative, schimbătoarele de căldură, economizoarele, precum și ciclurile termodinamice și pompele de căldură. În plus, capitolul analizează tuburile termice, explorând design-ul lor și integrarea în sistemele de recuperare. Acest capitol introduce peisajul complex al recuperării căldurii reziduale, esențial pentru fundamentarea cercetării.

Capitolul 3 se concentrează pe stadiul actual al cunoșterii privind stocarea energiei termice, axându-se în special pe sistemele de stocare a căldurii sensibile și latente. Această secțiune a tezei acordă o atenție deosebită materialelor cu schimbare de fază, detaliind clasificările și proprietățile acestora, esențiale pentru optimizarea eficienței stocării. Capitolul prezintă o revizuire detaliată a

celor mai recente cercetări, ilustrând implementările practice și progresele în domeniu, alături de performanțele lor de stocare în diverse sisteme de stocare a energiei termice.

Capitolul 4 se concentrează pe optimizarea strategică a parametrilor operaționali prin simulări numerice realizate folosind ANSYS 2022, versiunea academică. Modelele 3D utilizate în aceste simulări au fost create cu Autodesk Inventor 2023. Informațiile și concluziile din acest capitol servesc drept bază pentru dezvoltarea noului sistem de recuperare și stocare a căldurii.

Capitolul 5 este dedicat cercetării experimentale, axându-se pe dezvoltarea și validarea unui nou sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale, conceput pentru a recupera și stoca energia termică din apele uzate provenite din diverse procese. Acest capitol acoperă etapele complete de dezvoltare, inclusiv designul conceptual și modelarea 3D folosind Autodesk Inventor 2023, precum și procesul de fabricație. Sunt detaliate implementarea și configurarea operațională a standului experimental, urmate de validarea experimentală a performanței sistemului.

Capitolul 6 prezintă concluziile generale și contribuțiile personale originale ale tezei. Oferă un rezumat al constatărilor cheie și evidențiază contribuțiile unice aduse prin cercetare. Capitolul explorează, de asemenea, potențialele aplicații practice ale noului sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale și discută diverse metode de valorificare a rezultatelor tezei. În încheiere, sunt oferite recomandări pentru cercetări ulterioare în domeniu și sugestii pentru optimizarea suplimentară a sistemului.

2. Stadiul Actual al Cunoașterii Privind Recuperarea Energiei Termice Reziduale

2.1 Provocări în ceea ce privește recuperarea căldurii reziduale

Prin utilizarea unei tehnici cunoscute sub numele de recuperare a căldurii reziduale, căldura care, în mod obișnuit, ar fi pierdută în timpul unui proces poate fi recuperată și utilizată în diverse aplicații. Această tehnică prezintă un potențial semnificativ pentru atingerea unui mediu sustenabil prin reducerea consumului excesiv de resurse și reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. Identificarea componentelor cheie ale procesului este primul pas în implementarea cu succes a recuperării căldurii reziduale (Ononogbo et al., 2023). Prin urmare, este esențial să se ia în considerare sursa căldurii reziduale, tehnologia de recuperare a căldurii și cea mai bună modalitate de a utiliza căldura recuperată. Exploatarea eficientă a resurselor de căldură reziduală prin utilizarea unor tehnologii adecvate ar putea avea efecte pozitive remarcabile asupra economiei și mediului (Oyedepo and Fakeye, 2021). Deși tehnologiile de recuperare a căldurii reziduale au un potențial enorm, există numeroase provocări și bariere care stau în calea implementării lor industriale de succes (Christodoulides et al., 2022b). Printre aceste dificultăți, calitatea și cantitatea sursei de căldură reziduală sunt esențiale, deoarece trebuie să aibă o temperatură suficient de mare și să fie disponibile în cantitate mare, pe lângă faptul că trebuie să fie adecvate pentru designul și echipamentele utilizate, pentru ca recuperarea să fie fezabilă și rentabilă. Alte aspecte de luat în considerare sunt cele de reglementare, deoarece sistemul de recuperare a căldurii reziduale trebuie să aibă un randament justificabil al investiției și o amortizare realistă, pentru ca procesul de recuperare să fie eficient. În plus, ar putea fi necesare autorizații specifice sau reglementări legislative, și, conform unor studii, s-ar putea să nu existe suficiente motive convingătoare pentru ca firmele să-și crească investițiile în aceste tipuri de tehnologii (Oyedepo and Fakeye, 2021).

În ceea ce privește recuperarea căldurii reziduale la temperaturi scăzute și disponibilitatea sa largă în diverse sectoare industriale, este de remarcat că, în comparație cu căldura reziduală la temperaturi medii, căldura reziduală la temperaturi scăzute reprezintă mai mult de dublul procentajului, adică între 63% și 65% din totalul căldurii reziduale (Firth et al., 2019). Un dezavantaj al căldurii reziduale la temperaturi scăzute este că are mai puține aplicații în comparație cu căldura reziduală la temperaturi ridicate, datorită nivelului său scăzut de temperatură. Într-un articol recent, (Xu et al., 2019) examinează tehnologiile actuale de recuperare a căldurii reziduale la temperaturi scăzute, identifică provocările pentru promovarea lor ulterioară și oferă soluții pentru aceste

dificultăți. Conform studiului lor, aceste obstacole includ lipsa unei abordări globale de optimizare, aspectul costisitor al tehnologiilor distribuite de recuperare a căldurii reziduale și neconcordanțele dintre oferta și cererea de căldură reziduală.

Printre soluțiile sugerate pentru aceste probleme, anumite abordări se evidențiază ca fiind cruciale pentru promovarea recuperării căldurii reziduale în vederea dezvoltării unei energii globale ecologice. În studiul lor, (Oyedepo and Fakeye, 2021) subliniază necesitatea critică a finanțării inițiale în cercetarea menită să îmbunătățească dezvoltarea și implementarea practică a sistemelor inovatoare. Această strategie este esențială pentru avansul tehnologic, în special pentru a reduce decalajul semnificativ în progresul tehnic dintre națiunile în curs de dezvoltare și cele mai puțin avansate tehnologic. În plus, adoptarea sistemelor de recuperare a căldurii reziduale, un element cheie în eficiența energetică, poate fi accelerată semnificativ prin introducerea unor stimulente atractive. Prin simplificarea căilor financiare și oferirea de beneficii tangibile pentru integrarea sistemelor, industriile sunt mai predispuse să implementeze aceste măsuri ecologice și rentabile. Această strategie nu numai că promovează practici sustenabile, dar contribuie și la o mișcare globală spre conservarea energiei și utilizarea eficientă a resurselor.

2.1.1 Care este scopul recuperării energiei termice reziduale?

Pe măsură ce importanța schimbărilor climatice continuă să crească, sectoarele industriale și de generare a energiei electrice sunt obligate să implementeze măsuri pentru a reduce emisiile de dioxid de carbon. O abordare eficientă pentru reducerea acestor emisii implică optimizarea eficienței operaționale, care necesită identificarea unor metode sustenabile de a opera procesele cu un consum redus de energie, menținând în același timp aceeași performanță și rezultate. Cercetările efectuate în 2019, (Na et al., 2019) subliniază această abordare, în special în ceea ce privește consumul de energie în unitățile de producție. Mai mult, această strategie este esențială pentru reducerea emisiilor, deoarece diminuează cantitatea de căldură suplimentară eliberată în atmosferă. Procesul de reutilizare a energiei termice, care altfel ar fi pierdută în timpul funcționării mașinilor sau proceselor industriale, este cunoscut sub numele de recuperare a căldurii reziduale. Conform unui studiu recent, mai mult de jumătate din energia consumată la nivel mondial este pierdută sub formă de căldură, iar numeroase studii au arătat avantajele și potențialul utilizării energiei termice reziduale în diverse aplicații și industrii (Nandhini et al., 2022). În comparație cu alte metode de reducere a consumului de energie la nivelul unităților industriale, recuperarea energiei termice reziduale poate fi mai rentabilă, așa cum sugerează (Woolley et al., 2018) și ar trebui acordată atenție atât tehnologiilor de recuperare a căldurii reziduale, cât și sistemelor care utilizează energie regenerabilă. O mai bună conversie a energiei înseamnă că mai puțină energie este pierdută sub formă de căldură, iar o cantitate mai mare de energie

este disponibilă pentru scopuri utile. Datorită acestui fapt, cererea de energie poate fi satisfăcută cu un consum total mai mic, ceea ce duce la economii de costuri, în special în sectoare precum industria, care are un consum ridicat. În plus, contribuie la reducerea efectelor negative asupra mediului ale producției și consumului de energie.

2.1.2 De unde recuperăm energia termică reziduală?

Deoarece studiile au demonstrat că recuperarea căldurii reziduale din diferite procese sau echipamente poate fi o abordare esențială pentru atingerea unui viitor sustenabil, căldura reziduală este din ce în ce mai recunoscută ca o resursă valoroasă. În multe sectoare, captarea și utilizarea căldurii în exces oferă o oportunitate considerabilă de a reduce costurile energetice, precum și impactul asupra mediului. Sectorul industrial reprezintă aproximativ 30% din consumul total de energie la nivel mondial. Din păcate, o parte semnificativă a acestei energii este pierdută sub formă de căldură, unele estimări sugerând că până la 50% din energia utilizată în industrie se pierde în acest mod (Omer et al., 2020). e de altă parte, cantitatea semnificativă de căldură reziduală pierdută în aceste industrii demonstrează că există un potențial important pentru recuperarea industrială.

Toate industriile au nevoie de energie pentru a funcționa, dar unele au rate de consum energetic semnificativ mai mari decât altele. Acestea includ rafinăriile, industria ceramicii, sectoarele oțelului și fierului, așa cum au observat (Zhang et al., 2022) și (Zhao et al., 2021), precum și industria chimică, alături de industria automobilelor, alimentară și a băuturilor. În timpul proceselor industriale, căldura reziduală este de obicei disipată în atmosferă pe trei intervale distincte de temperatură. În literatura de specialitate, căldura reziduală poate fi clasificată în diferite grupuri în funcție de intervalele de temperatură (Papapetrou et al., 2018). Conform lui (Jouhara et al., 2018), aceste grupuri includ căldura reziduală la temperaturi înalte, caracterizată de temperaturi mai mari de 400°C, căldura reziduală la temperaturi medii, care se situează între 100°C și 400°C, și căldura reziduală la temperaturi scăzute, definită ca fiind căldura reziduală cu temperaturi sub 100°C.

Un alt studiu privind căldura reziduală relevă că, deși căldura reziduală la temperaturi înalte domină cu 40%, segmentele de temperatură medie și joasă contribuie cu 26% și, respectiv, 34%. Cu toate acestea, ratele de recuperare pentru căldura reziduală la temperaturi medii și joase sunt împiedicate de calitatea lor inferioară în comparație cu căldura reziduală la temperaturi înalte. Prin urmare, pentru a realiza conservarea resurselor, a încuraja ciclurile cu emisii reduse de carbon, a accelera tranziția energetică, a stimula dezvoltarea tehnologiei energetice și a crea un sistem energetic eficient, cercetarea privind recuperarea căldurii la temperaturi joase din deșeuri este esențială (Xiao et al., 2022). O modalitate viabilă și eficientă de a identifica cea mai potrivită tehnologie de recuperare a căldurii reziduale pentru un sector sau proces este clasificarea acestor procese în funcție de

intervalul de temperatură. Această abordare poate ajuta la asigurarea alegerii soluției ideale de recuperare a căldurii reziduale, crescând economiile de energie și minimizând risipa. De asemenea, în funcție de sursa lor, energia din căldura reziduală este în mod obișnuit clasificată în patru categorii: fluxuri lichide, gaze de ardere, abur, precum și gaze și vapori generați în timpul diferitelor procese.

Există numeroase lucrări de cercetare care s-au concentrat pe tehnologiile de recuperare a căldurii reziduale, împreună cu aplicațiile și potențialul lor, având în vedere disponibilitatea tot mai mare a căldurii reziduale de calitate inferioară în diverse sectoare și industrii. În lucrarea lor de revizuire aprofundată, (Ononogbo et al., 2023) au explorat și prezentat descoperiri recente privind diverse tehnici, aplicații, limitări și soluții, precum și perspectivele, provocările și viabilitatea economică a tehnologiilor de recuperare a căldurii reziduale. (Farhat et al., 2022) au realizat o revizuire sistematică a metodologiilor de recuperare a căldurii reziduale și a aplicațiilor lor în diferite sectoare, inclusiv sectorul auto, rezidențial și industrial. În urma unei investigații amănunțite, (Benedetti et al., 2021) au identificat care sectoare industriale au cel mai mare potențial pentru utilizarea căldurii reziduale la temperaturi medii și joase. În mod deosebit, (Bianchi et al., 2019) subliniază că industrii precum cea chimică și petrochimică reprezintă 25,9% din potențialul de căldură reziduală, în timp ce industria fierului și oțelului contribuie cu 25,0%. De asemenea, industriile de hârtie, celuloză și tipărire, precum și cea alimentară și de tutun, contribuie fiecare cu 19,3% la acest potențial, oferind o oportunitate considerabilă pentru conservarea energiei și creșterea eficienței operaționale. Facilitând recuperarea și utilizarea acestei călduri pentru aplicații de preîncălzire sau încălzire, această abordare se aliniază cu practicile industriale durabile din punct de vedere ecologic, promovând astfel un peisaj industrial mai responsabil.

2.1.3 Cum poate fi recuperată energia termică reziduală?

Căldura reziduală poate fi recuperată utilizând o gamă largă de tehnologii, iar progresele recente în tehnologie au dus la dezvoltarea unor numeroase strategii pentru maximizarea utilizării acestei surse importante, dar uneori neglijate, de energie. Aceste tehnologii se împart în două categorii generale: sisteme active și pasive. Categoriile corespund tehnicilor de utilizare: utilizare directă și conversie a căldurii (Živković et al., 2021). Tehnologiile pasive, sau utilizarea directă, folosesc căldura reziduală în procese cu o temperatură identică sau redusă, în forma sa originală, nealterată. Aceste metode, care includ tehnologii precum schimbătoare de căldură, economizoare și stocarea energiei termice, sunt utilizate în principal în industrii pentru a reutiliza căldura în exces pentru încălzirea sau preîncălzirea altor procese. Utilizarea tuburilor termice îmbunătățește semnificativ transferul de căldură în cadrul sistemelor de recuperare a căldurii reziduale, contribuind astfel la reduceri semnificative ale consumului de combustibil (Yodrak et al., 2010).

În contrast, metodele de conversie a căldurii implică tehnologii active. Acestea transformă căldura reziduală în alte tipuri de energie, inclusiv electricitate sau energie termică transformată, care pot fi utilizate pentru diverse scopuri. Tehnologiile de conversie a căldurii în energie includ diferite metode, printre care se remarcă ciclul organic Rankine (ORC) și ciclul Kalina (Atashbozorg et al., 2022). Alegerea între aceste două metode depinde adesea de temperatura căldurii reziduale disponibile: ciclul Kalina este mai potrivit pentru utilizarea căldurii reziduale la temperaturi ridicate, în timp ce ORC este de obicei aplicat pentru conversia căldurii reziduale la temperaturi mai scăzute în energie electrică (Victor et al., 2013). În acest context, un studiu recent realizat de (Su et al., 2021), evidențiază importanța utilizării tehnologiilor avansate de recuperare a căldurii reziduale pentru a aborda provocările actuale, subliniind avantajele lor potențiale în ceea ce privește beneficiile economice, conservarea energiei și reducerea poluării. Prin clasificarea a 12 industrii tipice în funcție de gradul energiei reziduale, studiul oferă o analiză cuprinzătoare a potențialului de recuperare a căldurii reziduale în diverse sectoare. De asemenea, oferă recomandări utile atât pentru industrie, cât și pentru cercetătorii care lucrează în domeniul utilizării căldurii reziduale, discutând direcții viitoare de cercetare și oferind perspective asupra minimizării emisiilor de gaze cu efect de seră.

În funcție de sursa și calitatea căldurii reziduale, fiecare dintre aceste tehnologii oferă abordări distincte pentru recuperarea căldurii și furnizează soluții specifice. Utilizarea acestor tehnici nu doar că îmbunătățește eficiența utilizării energiei, ci răspunde și cererii tot mai mari de metode industriale sustenabile.

2.2 Utilizarea energiei termice reziduale

Una dintre cele mai mari provocări pentru industriile din întreaga lume este oportunitatea adesea neglijată care vine din energia irosită. Optimizarea utilizării energiei reziduale în industrie este esențială atât pentru fezabilitatea economică, cât și pentru dezvoltarea sustenabilă la scară globală. Căldura reziduală, care este un produs secundar al proceselor industriale și care este de obicei eliberată în mediul înconjurător sub formă de aer fierbinte, gaze de eșapament, lichide sau ape reziduale, precum și căldura pierdută de la mașini de înaltă temperatură și produse care trec prin procese de încălzire, reprezintă o parte semnificativă a potențialului de energie pierdută.

Prin utilizarea tehnologiilor de recuperare a căldurii reziduale, această energie poate fi captată și reutilizată, fiind direcționată către scopuri productive în cadrul aceluiași proces sau în diferite procese. Aceste tehnologii oferă, de asemenea, o modalitate eficientă pentru organizații de a reduce consumul de energie fără a fi necesare ajustări costisitoare ale infrastructurii, mai ales în contextul tiparelor comune de utilizare a energiei în industrie (O’Rielly and Jeswiet, 2015).

2.2.1. Tehnici de utilizare a căldurii reziduale

În contextul utilizării căldurii reziduale, strategiile de proiectare sunt esențiale pentru maximizarea recuperării acesteia, transformând căldura recuperată în energie utilă pentru diverse aplicații. Există două metode principale: reutilizarea căldurii în cadrul aceluiasi proces (utilizare internă) și utilizarea surplusului de căldură în alte echipamente din aceeași unitate, ambele având avantaje economice semnificative (W. Chen et al., 2022; Xu et al., 2021). Atunci când utilizarea directă nu este posibilă, se apelează la metode indirecte, precum schimbătoare de căldură sau cicluri Organice Rankine (ORC), care facilitează transferul căldurii către alte aplicații și îmbunătățesc eficiența sistemului (Farhat et al., 2022; Ling-Chin et al., 2018; Loni et al., 2021). Tehnologiile de recuperare a căldurii reziduale (WHR), precum tuburile termice plate sau sistemele sCO₂, au un potențial mare de reducere a emisiilor și economii de combustibil (Christodoulides et al., 2022a). Studiile au subliniat importanța integrării ciclului ORC pentru a spori producția de energie din căldura reziduală, contribuind la sustenabilitatea energetică în diverse industrii.

2.2.2. Eficiență și optimizare

Optimizarea tehnologiilor de recuperare a căldurii reziduale a devenit un focus major în cercetare, având scopul de a îmbunătăți eficiența energetică în diverse industrii. Strategiile eficiente implică luarea în considerare a implicațiilor operaționale și economice pentru a asigura utilizarea optimă a căldurii reziduale. (Farhat et al., 2022) subliniază importanța metodologiilor de recuperare a căldurii reziduale în abordarea problemelor de mediu și în identificarea surselor alternative de energie. În sistemele bazate pe ciclul organic Rankine (ORC), selectarea corectă a fluidului de lucru este esențială pentru maximizarea eficienței energetice și respectarea standardelor de mediu. Această selecție trebuie să echilibreze proprietățile termodinamice ale fluidului cu cerințele operaționale ale sistemului (Douadi et al., 2022). În optimizarea schimbătoarelor de căldură, accentul cade pe indicatorii de performanță critici pentru a asigura un design eficient și rentabil. Schimbătoarele de căldură cu plăci sunt recunoscute pentru eficiența excepțională în transferul de căldură și versatilitatea lor, necesitând considerații atente de proiectare pentru a minimiza coroziunea (Bull et al., 2020). Optimizarea schimbătoarelor de căldură se concentrează pe eficiența transferului de căldură și pe reducerea costurilor. Schimbătoarele de căldură cu plăci, recunoscute pentru eficiența lor, necesită un design atent pentru a minimiza coroziunea și alte pierderi de eficiență (Kharaji, 2021)

Stocarea energiei termice joacă un rol esențial în maximizarea eficienței sistemelor de recuperare a căldurii reziduale, permițând o separare eficientă între generarea și consumul de căldură, abordând astfel discrepanțele dintre disponibilitatea căldurii și cererea de energie în procesele industriale (Ooka și Ikeda, 2015). Un progres notabil în optimizarea practicilor de recuperare a

căldurii este încorporarea materialelor avansate cu schimbare de fază (PCMs) în dispozitivele de stocare a energiei termice (TES). Cercetătorii au îmbunătățit proprietățile termice ale materialelor cu schimbare de fază prin adăugarea de aripioare și alți aditivi conductivi (Ibrahim et al., 2017).

2.3 Prezentare generală a sistemelor de recuperare a căldurii reziduale

Sistemele de recuperare a căldurii reziduale joacă un rol esențial în gestionarea energiei, transformând căldura în exces din procesele industriale în energie utilizabilă. Aceste sisteme capturează eficient căldura din surse precum generatoarele de energie, motoarele cu combustie internă și pompele de căldură, contribuind la reducerea consumului de energie și la creșterea eficienței operaționale (Farhat et al., 2022). Avantajele recuperării căldurii includ economii financiare, conservarea resurselor și protecția mediului, prin reducerea consumului de combustibil și a emisiilor de gaze cu efect de seră, ceea ce contribuie la sustenabilitatea industrială (Agathokleous et al., 2019). Există o varietate de tehnologii disponibile pentru captarea căldurii reziduale, fiecare fiind potrivită pentru diferite surse și medii industriale. Acestea includ schimbătoare de căldură, boilere de căldură reziduală, cicluri Rankine și Kalina, și generatoare de abur. Fiecare tehnologie are avantaje unice și poate fi optimizată pentru a maximiza recuperarea energiei termice, mai ales când se lucrează cu temperaturi mai ridicate, ceea ce facilitează optimizarea proceselor (Christodoulides et al., 2022a).

Tehnologiile de recuperare a căldurii sunt grupate în trei categorii principale: transferul de energie termică între fluxuri, creșterea temperaturii pentru utilizare practică și transformarea căldurii în energie electrică, cum ar fi ciclul Rankine (Agathokleous et al., 2019). Tehnologiile emergente, precum ciclonul Brayton cu dioxid de carbon supercritic (sCO₂) și ciclul Kalina, oferă performanțe îmbunătățite și eficiență superioară, fiind capabile să funcționeze pe un spectru larg de temperaturi. Lucrările recente au subliniat atât beneficiile, cât și limitările tehnologiilor convenționale de recuperare a căldurii, dar și inovațiile recente, precum generatoarele termoelectrice și termo-fotovoltaice, care sunt aplicabile într-un spectru larg de temperaturi (Jouhara et al., 2018).

În secțiunile următoare, vom explora sistemele de recuperare a căldurii frecvent utilizate, oferind informații detaliate despre funcționarea, utilizările și beneficiile lor esențiale, subliniind rolul acestora în îmbunătățirea eficienței energetice în mediile industriale.

2.3.1 Arzătoare recuperative și regenerative

Arzătoarele recuperative și regenerative joacă un rol crucial în maximizarea eficienței energetice în procesele industriale de încălzire, datorită capacității lor de a recupera căldura reziduală din gazele de ardere. Aceste sisteme folosesc schimbătoare de căldură pentru a capta și reutiliza energia generată în procesul de combustie. Recuperatoarele sunt potrivite pentru aplicații cu

temperaturi medii și înalte, utilizând tehnologia fluxului opus pentru a extrage eficient căldura din gazele de evacuare ale cuptoarelor. Arzătoarele regenerative, pe de altă parte, operează cu un sistem de ardere dual și folosesc materiale refractare pentru a stoca temporar căldura, ceea ce le face ideale pentru aplicații la temperaturi ridicate, îmbunătățind recuperarea energiei termice și reducând costurile operaționale (GlobalSpec, 2023; Jouhara et al., 2018).

Studiile de specialitate au evidențiat multiple beneficii ale tehnologiei de combustie regenerativă, cum ar fi eficiența energetică sporită și reducerea emisiilor de NOx. De exemplu, în industria oțelului, arzătoarele regenerative, operând la 1000°C, au demonstrat economii energetice superioare și o recuperare rapidă a investiției. Alte cercetări au arătat că optimizarea designului schimbătoarelor de căldură în cuptoarele industriale poate reduce consumul de combustibil cu aproximativ 5%, fără a afecta calitatea producției. În sectorul aluminiului, deși arzătoarele regenerative au generat fluxuri termice semnificative, economiile de gaz au fost modeste, evidențiind necesitatea îmbunătățirii eficienței operaționale pentru a spori viabilitatea economică a acestor tehnologii (Xie et al., 2023), (Tangjitsitcharoen et al., 2013), (Agnani et al., 2015).

2.3.2 Schimbătoare de căldură

Schimbătoarele de căldură sunt dispozitive esențiale în multe sectoare industriale, proiectate pentru a transfera căldura între două medii, fie ele lichide sau gazoase, fie direct, fie printr-o barieră solidă care împiedică interacțiunea fluidelor (Mahmoudinezhad et al., 2023). Acestea sunt utilizate pe scară largă în operațiuni de răcire și încălzire și sunt clasificate în funcție de structură (tubulare, cu plăci, cu suprafață extinsă), natura transferului de căldură (direct sau indirect), compactitate, aranjament de flux (paralel, contracurent, încrucișat) și mecanisme de transfer de căldură (Hou et al., 2017). Schimbătoarele de căldură cu plăci sunt cunoscute pentru designul lor compact și eficiența superioară în transferul de căldură, fiind ideale pentru aplicații industriale diverse (Arsenyeva et al., 2023; Kumar et al., 2022). Schimbătoarele de căldură cu tevi și mantă sunt potrivite pentru temperaturi înalte și oferă o varietate de modele. Cercetările actuale se concentrează pe optimizarea acestor sisteme pentru a spori eficiența și adaptabilitatea lor într-o gamă largă de aplicații industriale (Upadhyay, 2019). Metodologiile de optimizare, cum ar fi algoritmi genetici, au demonstrat beneficii financiare semnificative, reducând costurile inițiale cu până la 7,4% și costurile operaționale cu până la 93% în cazul schimbătoarelor de căldură cu tevi și mantă (Caputo et al., 2008). În industria bioprocесelor, schimbătoarele de căldură sunt esențiale pentru aplicații precum procesarea alimentelor și producția de etanol, unde optimizarea transferului de căldură, reducerea pierderilor de energie și minimizarea înfundării sunt critice pentru performanța și eficiența costurilor (Agarwal and Sikand, 2014). Evaluările aprofundate ale diferitelor tipuri de schimbătoare de căldură arată că

schimbătoarele pipe-in-pipe oferă o performanță superioară în ceea ce privește debitul de răcire și ușurința întreținerii, dar prezintă dezavantaje legate de costuri și dificultăți de instalare (Edreis and Petrov, 2020). Schimbătoarele de căldură cu tevi și mantă, deși durabile, au o eficiență scăzută de aproximativ 70% și sunt vulnerabile la coroziune, ceea ce le face dificil de întreținut. În contrast, schimbătoarele de căldură cu plăci sunt apreciate pentru eficiența lor ridicată, de până la 95%, și pentru designul lor compact, deși au o durată de viață relativ scurtă din cauza tendinței de înfundare, necesitând întreținere la fiecare trei ani.

2.3.3 Economizoare

Un economizor este un schimbător de căldură conceput special cu tuburi cu aripioare, plasat între cazan și coșul de fum pentru a capta energia termică generată de gazele de evacuare (Jouhara et al., 2018). Energia recuperată este utilizată pentru a crește temperatura apei din cazan, reducând astfel energia necesară pentru a ajunge la nivelul operațional dorit, ceea ce promovează eficiența energetică generală a cazanului (ThermTech, 2017). (Atabani et al., 2013) subliniază avantajele economizoarelor, atât directe, precum costurile operaționale reduse și eficiența îmbunătățită, cât și indirecte, cum ar fi reducerea emisiilor poluante și a dimensiunii echipamentelor. Un studiu recent din industria producției de făină de pește a demonstrat că utilizarea unui economizor a crescut eficiența energetică cu 55,5%, economisind anual 4537,57 GJ și reducând emisiile de CO₂ cu 58,37% pe tonă de producție (Tung et al., 2023). Un alt studiu a arătat că economizorul a îmbunătățit eficiența cazanului cu 19% și a redus consumul de combustibil, economisind 2,334 kg/oră (Muchlishi and Erivianto, 2023).

2.3.4 Boilere recuperatoare de căldură

Un cazan pentru căldură reziduală folosește o configurație cu tuburi de apă aranjate paralel pentru a capta căldura din gazele de evacuare la temperaturi înalte, generând astfel abur. Acest abur poate fi utilizat pentru încălzire, generarea de energie electrică sau redirectionat în sistem pentru a optimiza recuperarea energiei (Jouhara, 2021; Jouhara et al., 2018). Problemele comune ale cazanelor pentru căldură reziduală includ coroziunea accelerată de flux, care afectează părțile critice ale schimbătoarelor de căldură (Ardy et al., 2021; Dooley and Chexal, 2000), (Hu et al., 2015). Pentru a controla coroziunea, (Ebara et al., 2013) au investigat coroziunea cauzată de punctul de rouă al acidului sulfuric în tuburile cazanelor de cupatoare de topire a cuprului și au identificat că elemente de aliere precum cromul, nichelul, molibdenul și cuprul îmbunătățesc rezistența la coroziune. (Lee et al., 2007) u oferit o prezentare generală a tehnicilor de gestionare a coroziunii în cazanele pentru căldură reziduală din SUA, sugerând ajustări ale controlului procesului, modificări de design și utilizarea de

materiale și acoperiri rezistente la coroziune, cum ar fi spray-ul termic cu combustibil de oxigen de mare viteză și tehnici inovatoare precum injectarea țintită în cuptor.

2.3.5 Generatoare de abur pentru recuperarea căldurii (HRSGs)

Generatoarele de abur pentru recuperarea căldurii (HRSGs) sunt schimbătoare de căldură special concepute pentru a recupera eficient căldura la temperaturi înalte din gazele de ardere, de obicei provenite de la turbinele pe gaz sau din procese industriale cu randament termic ridicat. Acestea transformă căldura captată în abur, care este utilizat ulterior pentru generarea de energie sau alte scopuri. HRSG-urile combină patru componente esențiale: tamburul, supraîncălzitorul, evaporatorul și economizorul (Schroeder, 2017). Cercetările au arătat că HRSG-urile cu presiune duală sunt mai eficiente decât cele cu presiune simplă, reducând pierderile de energie și optimizând eficiența centralelor electrice în ciclu combinat. Studiile recente au sugerat strategii de proiectare optimă pentru sisteme trigenerație, cum ar fi utilizarea unui HRSG cu presiune duală pentru a maximiza eficiența sistemului, distribuind căldura recuperată pentru răcire și încălzire (Tippawan P. and Arpornwichanop A., 2016). Cercetările în curs se concentrează pe îmbunătățirea capacităților de presiune și dimensionarea precisă a acestor sisteme pentru a maximiza performanța și beneficiile economice în centralele electrice actuale (Chantasiriwan, 2024 și Sterkhov et al., 2019).

2.3.6 Cicluri termodinamice pentru recuperarea căldurii reziduale

Ciclurile termodinamice sunt utilizate pe scară largă în industrie pentru a recupera eficient căldura reziduală și a o transforma în energie utilizabilă. Printre cele mai notabile exemple se numără ciclul Organic Rankine, ciclul Kalina, ciclul Trilateral Flash și ciclul Brayton. Ciclul Organic Rankine (ORC) este deosebit de atractiv datorită capacității sale de a recupera energie termică de calitate inferioară și de a o transforma în energie electrică (Zhang et al., 2021). Performanța optimă în ORC depinde de selectarea atentă a fluidelor de lucru, care trebuie evaluate în funcție de proprietățile lor termodinamice, securitatea mediului și impactul economic (Lin et al., 2015). Un studiu a arătat că ORC, utilizând n-pentan ca fluid de lucru, a obținut cea mai mare eficiență termică (26,5%) comparativ cu alte cicluri studiate, demonstrând economii semnificative de costuri la energie (Chowdhury et al., 2019). În contrast cu ORC, ciclul Kalina folosește un amestec de amoniac și apă ca fluid de lucru. Studiile compară adesea performanța ambelor cicluri, evidențiind capacitățile operaționale distincte. Într-o analiză a recuperării căldurii reziduale într-un sistem de cogenerare, ORC s-a dovedit a fi superior, datorită designului mai simplu și presiunii optime mai scăzute a evaporatorului, ceea ce a condus la o putere netă crescută și la o fiabilitate mai mare a turbinei (Nemati et al., 2017).

2.3.7 Pompe de căldură

Pompele de căldură joacă un rol esențial atât în aplicațiile de încălzire, cât și în cele de răcire. Acestea sunt mașini capabile să extragă căldura din surse precum aerul, apa sau deșeurile industriale și să ridice temperatura la niveluri mai ridicate, folosind principii similare cu cele ale unui frigider. Procesul implică absorbția căldurii de grad scăzut de un agent frigorific, urmată de comprimarea vaporilor pentru a crește temperatura și eliberarea căldurii în mediul țintă prin condensare. După condensare, agentul frigorific este decomprimat și ciclul se reia. Pompele de căldură pot fi utilizate și inversat pentru răcire, făcându-le utile în mod continuu (IEA, 2022b; Muth et al., 2021). Eficiența conversiei energiei într-o pompă de căldură se măsoară prin calcularea coeficientului de performanță (COP), care indică relația dintre cantitatea de căldură produsă și puterea electrică consumată (Marina et al., 2021). Pompele de căldură pot fi clasificate în patru tipuri principale în funcție de sursa de căldură: pompe de căldură geotermale (care utilizează energia termică din sol), pompe de căldură aeriene (care folosesc aerul ambiental), pompe de căldură acvatice (care folosesc apa din lacuri și iazuri) și altele care utilizează surse variate de energie termică, inclusiv deșeuri industriale (Abbasi et al., 2021). Aceste sisteme sunt populare în sectorul industrial datorită capacității lor de a îmbunătăți eficiența proceselor (Jiang et al., 2022). Pompele de căldură de înaltă temperatură sunt utilizate în mod special în procese industriale care necesită temperaturi de peste 100°C. Un studiu din sectorul alimentar și al băuturilor din Germania a arătat că utilizarea acestor sisteme poate satisface până la 12 TWh de cerințe anuale de căldură, reducând emisiile de gaze cu efect de seră cu până la 9%, iar dacă energia electrică provine din surse neutre din punct de vedere al carbonului, reducerea emisiilor poate ajunge la 26% (Dumont et al., 2023). Un alt studiu din China a evaluat eficiența unei pompe de căldură de înaltă temperatură ca substitut pentru cazanele cu ulei în încălzirea petrolului brut, obținând un coeficient de performanță între 3,5 și 4,4 pentru temperaturi între 86°C și 95°C. Studiul a concluzionat că înlocuirea cazanelor cu HTHP la unitatea de tratare a petrolului din Jinzhou ar putea reduce considerabil consumul de energie și emisiile de CO₂ (He et al., 2017). Potențialul mare al pompelor de căldură industriale este subliniat și de o altă investigație care estimează că aceste dispozitive pot acoperi 1,5% din cererea de căldură a Uniunii Europene, rezultând 28,37 TWh anual (Kosmadakis, 2019).

2.4 Tuburi termice

2.4.1 Prezentare generală a tuburilor termice

Tuburile termice sunt dispozitive sigilate recunoscute pentru conductivitatea termică excelentă și eficiența lor. Acestea funcționează pe baza unui proces simplu de evaporare și condensare

a fluidului de lucru din interior. Conceptul de tub termic a fost introdus de Gaugler în 1944, dar a primit recunoaștere importantă abia în 1964, când George Grove a dezvoltat un dispozitiv funcțional pentru aplicații spațiale (Zohuri, 2016). Tuburile termice fără fitil, cunoscute și ca termosifoane, sunt compuse din trei secțiuni principale: evaporatorul, secțiunea adiabatică și condensatorul. Materialul cel mai utilizat pentru container este cuprul, dar pot fi folosite și oțelul sau aluminiul (Sakthi Priya and Sakthivadivel, 2023). Apa este cel mai popular fluid de lucru, însă au fost studiate și alte fluide precum etanolul, metanolul și acetona (Lataoui and Jemni, 2017; Russo et al., 2018).

Când căldura este aplicată în zona evaporatorului, fluidul de lucru se evaporă datorită presiunii scăzute din interiorul tubului. Vaporii se ridică spre secțiunea condensatorului, unde se condensează, eliberând căldura latentă. Lichidul condensat revine apoi la evaporator prin gravitație, ciclul repetându-se continuu (Yang et al., 2012). Spre deosebire de termosifoane, tuburile termice cu fitil au o structură care permite returnarea fluidului de lucru la evaporator, indiferent de orientare (Boyd, 2021). Tuburile termice sunt clasificate în funcție de principiul de construcție și pot fi utilizate într-o gamă largă de aplicații, în funcție de intervalul de temperatură. Tuburile termice criogenice funcționează între -270°C și -70°C , cele de temperatură joasă între -70°C și 270°C , cele de temperatură medie între 175°C și 470°C , iar cele de temperatură înaltă, peste 470°C , folosind metale precum sodiul pentru a permite un transport termic eficient (Faghri, 2014; Jouhara et al., 2017).

Printre limitările operaționale identificate se numără limita capilară, limita sonică (legată de atingerea vitezei sunetului de către vaporii de lucru), limita de fierbere (unde un flux de căldură excesiv poate usca fitilul) și limita de antrenare (unde vitezele mari ale vaporilor pot cauza uscarea evaporatorului). Aceste limitări sunt esențiale pentru determinarea capacității de transfer termic a tuburilor termice și sunt cruciale în procesul de proiectare și utilizare a acestora în diferite aplicații (Faghri, 2014).

2.4.2 Studii de caz și aplicații

Tuburile termice sunt recunoscute pentru capacitatea lor de a transfera eficient căldura între surse și scurgeri îndepărtate, asigurând un control și o stabilitate a temperaturii superioare, datorită conductivității lor termice ridicate (Faghri, 2014). Aceste dispozitive au fost intens studiate pentru a îmbunătăți eficiența energetică în diverse tehnologii de energie regenerabilă, în special în energia solară, unde sunt integrate în sisteme solare termice, cum ar fi termosifoanele, tuburile cu fitil, plăcile plane și tuburile pulsatorii, fiecare fiind adaptat specific aplicațiilor solare (Khairnasov and Naumova, 2016). Colectoarele solare cu tuburi termice au devenit tot mai utilizate în aplicații precum încălzirea apei, aerului și spațiului, desalinizarea și gătitul solar, având capacitatea de a transfera eficient energia termică absorbită către fluidul de lucru. Aceste colectoare combină avantajele tuburilor termice cu

proprietățile izolante ale tuburilor vidate pentru a îmbunătăți colectarea energiei solare. Studii recente au demonstrat că utilizarea nano-fluidelor în colectoarele solare cu tuburi termice poate îmbunătăți semnificativ eficiența și puterea, un exemplu notabil fiind TiO₂-apa, care a arătat o creștere semnificativă a eficienței instantanee și a puterii (Ünvar et al., 2021). Tuburile termice sunt de asemenea aplicate cu succes în sistemele de desalinizare solară, unde integrarea acestora cu colectoare solare parabolice a crescut eficiența producției de apă, atingând valori de până la 65,2% (Jafari Mosleh et al., 2015). În domeniul geotermal, tuburile termice sunt folosite pentru a îmbunătăți extracția căldurii din surse geotermale, contribuind la reducerea consumului de energie cu până la 21.1% comparativ cu sistemele convenționale (Lim et al., 2017). În plus, tuburile termice au fost integrate în aplicații de răcire pentru echipamente electronice și LED-uri de mare putere, unde au demonstrat o capacitate superioară de gestionare a căldurii. De exemplu, utilizarea tuburilor termice în modulele de transmitere/recepționare a redus semnificativ temperaturile componentelor și a îmbunătățit uniformitatea distribuției termice (Nikolaenko et al., 2019), iar în răcirea LED-urilor, un tub termic pulsant cu apă a arătat o eficiență sporită, fiind ideal pentru aplicații de gestionare a căldurii în LED-uri de mare putere (Lv et al., 2017).

2.4.3 Integrarea tuburilor termice în sistemele de recuperare a căldurii reziduale

Cercetările și dezvoltările recente în domeniul tuburilor termice au demonstrat potențialul considerabil al acestora pentru integrarea în sistemele de recuperare a căldurii reziduale, datorită eficienței lor ridicate în transferul de căldură, costurilor operaționale scăzute, siguranței și flexibilității. În industrie, o mare parte din energie se pierde sub formă de căldură reziduală din surse precum apa de răcire, aerul evacuat sau radiația din cuptoare. Integrarea tuburilor termice în aceste sisteme permite utilizarea căldurii recuperate pentru încălzire, preîncălzire sau conversie în energie electrică, contribuind astfel la îmbunătățirea eficienței energetice și reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. Un exemplu notabil este integrarea tuburilor termice în cazanele de recuperare a căldurii reziduale pentru a îmbunătăți producția de abur, oferind avantaje semnificative precum un design mai compact, stresuri termice reduse și o izolare mai bună a aburului de sursa de căldură (Littwin and McCurley, 1981). Într-o analiză numerică realizată de (Burlacu et al., 2018) s-a dezvoltat un schimbător de căldură cu tuburi termice pentru recuperarea căldurii în clădiri, demonstrând eficiență ridicată în diverse condiții operaționale. Un alt studiu (Di et al., 2024) a investigat aplicarea tuburilor termice tridimensionale pentru a îmbunătăți eficiența recuperării căldurii în sistemele HVAC, arătând o creștere a eficienței de recuperare a căldurii cu 65-85% în condiții variabile. De asemenea, în domeniul centrelor de date, (She et al., 2024) a analizat un nou sistem de răcire care combină tuburile termice cu refrigerarea prin adsorbție, rezultând economii semnificative de energie și eficiență

îmbunătățită în managementul termic. În sectorul ceramicii, studiile (Delpech et al., 2018) au demonstrat eficiența schimbătoarelor de căldură pe bază de tuburi termice în recuperarea căldurii și reducerea consumului de combustibil, cu economii anuale substanțiale și o perioadă de amortizare de aproximativ doi ani. Alte cercetări au explorat utilizarea tuburilor termice în recuperarea căldurii din procesele din industria aluminiului și oțelului, evidențiind potențialul acestora de a reduce consumul de energie și emisiile de CO₂ (Jouhara et al., 2023).

În sectorul vehiculelor, integrarea tuburilor termice în generatoarele termoelectrice a îmbunătățit semnificativ performanța, obținând o creștere a eficienței de conversie a energiei și a densității de putere (Cao et al., 2018). De asemenea, aplicarea tehnologiei tuburilor termice în desalinizare și recuperarea energiei termice din dealurile de gangue de cărbune a demonstrat eficiența acestora în reducerea temperaturilor interne și generarea de energie utilă, contribuind la reducerea riscurilor de mediu (Peng and Jia, 2022).

3. Stadiul Actual al Cunoașterii Privind Sistemele de Stocare a Energiei Termice

3.1 Stocarea energiei termice - generalități

În contextul dezvoltării unor alternative energetice ecologice, stocarea energiei termice (TES) a devenit o tehnologie esențială pentru echilibrarea producției și cererii de căldură. În 2022, sectorul energiei termice a reprezentat aproape 50% din consumul global de energie și 38% din emisiile de CO₂, subliniind necesitatea unor progrese tehnologice pentru a gestiona și îmbunătăți consumul de energie (IEA, 2024). Sistemele de stocare a energiei termice sunt clasificate în trei categorii principale: stocarea energiei termice prin căldură sensibilă (SHTES), stocarea energiei termice prin căldură latentă (LHTES) și stocarea termochimică (TCS) (Thonon et al., 2024). Dintre acestea, metoda cea mai utilizată este stocarea căldurii sensibile, care implică modificarea temperaturii unui material fără a schimba faza acestuia. Aceasta utilizează de obicei fluide precum apa sau materiale solide precum rocile naturale sau betonul. Capacitatea de stocare depinde de masa materialului, capacitatea termică specifică și variația temperaturii (Dincer and Rosen, 2010):

$$Q_{sensible} = \Delta H_{i-f} = H_f - H_i = \int_{T_i}^{T_f} m C_p(T) dt \quad (3.1)$$

, unde:

- $Q_{sensible}$ – cantitatea de căldură sensibilă stocată [J];
- m – masa mediului de stocare a căldurii [kg];
- $C_p(T)$ – capacitatea termică specifică a mediului de stocare [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{K}$];
- T_f – temperatura finală a mediului de stocare [K];
- T_i – temperatura inițială a mediului de stocare [K];

Stocarea căldurii latente (LHTES) utilizează materiale cu schimbare de fază (PCM) care absorb sau eliberează cantități mari de căldură la temperaturi constante în timpul tranzițiilor de fază, oferind o capacitate mare de stocare a energiei, ceea ce o face ideală pentru aplicațiile care necesită gestionarea eficientă a energiei și controlul precis al temperaturii (Belyakov, 2019; (Gondre, 2016; Sharma et al., 2009)). Cantitatea de energie stocată sau eliberată în timpul schimbării de fază poate fi determinată prin expresii matematice care iau în considerare capacitatea termică a materialului și căldura latentă de fuziune (Dekhil, 2020):

$$Q_{latent} = H_f - H_i = \int_{T_i}^{T_M} m C_{p,s}(T) dt + m l_M(T_M) + \int_{T_M}^{T_f} m C_{p,L}(T) dt \quad (3.4)$$

, unde:

- Q_{latent} – cantitatea de căldură latentă stocată în material [J];
- $C_{p,s}$ – capacitatea termică specifică a fazei solide [J/ kg];
- $C_{p,L}$ – capacitatea termică specifică a fazei lichide [J/kg];
- m – masa materialului [kg];
- $l_M(T_M)$ – căldura latentă de fuziune la temperatura de topire T_M [J/kg];
- T_i – temperatura inițială a mediului de stocare [K];
- T_f – peratura finală a mediului de stocare [K].

Stocarea termochimică (TCS) se distinge prin densitatea energetică ridicată și eficiența în stocarea unor cantități mari de căldură fără pierderi termice semnificative. Provocarea principală pentru această metodă este menținerea stabilității pe termen lung a energiei stocate chimic. Materialele precum silica gel/apa și bromura de litiu/apa s-au dovedit a îmbunătăți semnificativ performanța sistemelor TCS. Capacitatea de stocare a unui material termochimic este determinată prin formula care include masa materialului și căldura de reacție (Rivero et al., 2023):

$$Q = m\Delta H_R \quad (3.3)$$

, unde:

- Q – cantitatea de energie termică stocată în material [J];
- m – masa materialului de stocare termochimică [kg];
- ΔH_R – ăldura de reacție și/sau procesul de adsorbție [J/kg].

3.2 Materiale cu schimbare de fază (PCMs)

3.2.1 Introducere în PCMs

Substanțele există în stare naturală sub formă solidă, lichidă sau gazoasă, iar în timpul schimbărilor de fază, acestea absorb sau eliberează o anumită cantitate de căldură, denumită căldură latentă (Bayraktar and Köse, 2022). Materialele cu schimbare de fază (PCMs) sunt componente esențiale în stocarea energiei termice, fiind foarte eficiente în stocarea și eliberarea unor cantități mari de energie termică la o temperatură aproape constantă și sunt disponibile pe un spectru larg de temperaturi. Comparativ cu alte transformări de fază, cele mai eficiente materiale pentru stocarea latentă sunt cele de tip solid-lichid (Zhang et al., 2016). Deși transformările de fază gaz-gaz, inclusiv

solid-gaz și lichid-gaz, au capacități latente ridicate, acestea nu sunt utilizate frecvent datorită complexității sistemului și expansiunii volumului.

În schimb, conversiile solid-solid oferă o capacitate redusă de stocare a energiei din cauza temperaturilor latente mai scăzute, deși sunt mai ușor de gestionat din punct de vedere al volumului. Tranziția solid-lichid, care utilizează căldura latentă de fuziune, este cea mai eficientă tehnică de stocare a energiei, datorită capacității sale de a absorbi o cantitate mare de energie înainte de topire sau răcire, făcând-o potrivită pentru integrarea în materialele cu schimbare de fază (Regin et al., 2008). Materialele cu schimbare de fază au fost intens studiate și sunt cunoscute pentru îmbunătățirea eficienței energetice și a stocării în diverse domenii. Aplicarea lor în clădiri poate ajuta la reglarea temperaturilor interioare, reducând nevoia de sisteme tradiționale de încălzire și răcire (Frigione et al., 2019). În recuperarea căldurii reziduale, PCMs capturează și reutilizează energia care altfel s-ar pierde, iar în aplicațiile de energie solară, aceste materiale sporesc eficiența și eficacitatea sistemelor de energie regenerabilă (Gupta et al., 2021). Aceste materiale au fost, de asemenea, implementate cu succes în alte aplicații precum textilele utilizate pentru îmbrăcăminte (Malaquias et al., 2023), aplicații medicale (Bao et al., 2022), răcirea calculatoarelor (Shanmuganathan et al., 2022), dar în funcție de aplicație, este necesar să se aleagă un PCM adecvat.

3.2.2 Tipuri de PCMs

Materialele cu schimbare de fază sunt clasificate în trei grupuri principale în funcție de compoziția lor: organice, anorganice și amestecuri eutectice, care reprezintă o combinație între primele două tipuri (Ravikiran et al., 2023). Materialele organice cu schimbare de fază, care includ parafinele și acizii grași, sunt obținute din produse secundare ale petrolului și sunt recunoscute pentru stabilitatea lor termică și chimică, subrăcirea limitată și caracteristicile necorozive. Cu toate acestea, aceste materiale sunt inflamabile și au o entalpie de topire și o densitate mai scăzute. Materialele anorganice cu schimbare de fază, cum ar fi hidrații de sare, sunt create folosind săruri naturale și apă. Aceste materiale au o densitate și o entalpie de topire ridicate, dar au limitări precum subrăcirea și coroziunea. Amestecurile eutectice, inclusiv amestecul de apă și etilen glicol, sunt compuse din compuși care se solidifică la temperaturi mai mici comparativ cu componentele lor separate. Acestea pot fi organice-anorganice, organice-organice sau anorganice-anorganice (Anusha, 2016).

3.2.2.1 Materiale organice cu schimbare de fază

Materialele organice cu schimbare de fază, cum ar fi parafinele și acizii grași, sunt printre cele mai utilizate materiale pentru stocarea energiei termice datorită proprietăților lor favorabile. Aceste materiale sunt recunoscute pentru disponibilitatea lor pe un interval larg de temperaturi, entalpia

ridicată, stabilitatea chimică și lipsa de corozivitate în majoritatea cazurilor, ceea ce le face potrivite pentru diverse aplicații industriale și de construcții (Pop, 2019), (Vakhshouri, 2019). Parafinele, care includ ceara, n-eicosanul și n-octadecanul, sunt preferate în mod special datorită costului lor redus și lipsei de toxicitate, fiind frecvent utilizate în dispozitivele de stocare termică. Cu toate acestea, principala limitare a parafinelor este conductivitatea lor termică scăzută, care duce la o rată redusă de transfer de căldură, crescând astfel timpul necesar pentru procesele de topire și solidificare și reducând cantitatea de energie care poate fi stocată și eliberată (Sharma et al., 2021). Pentru a aborda această problemă, literatura de specialitate sugerează diverse metode, inclusiv utilizarea materialelor compozite cu schimbare de fază, combinarea mai multor materiale cu schimbare de fază și utilizarea nanoparticulelor pentru a îmbunătăți transferul de căldură (Eanest Jebasingh and Valan Arasu, 2020). Pe de altă parte, acizii grași, derivați în general din surse animale sau vegetale, sunt alte materiale organice utilizate ca materiale cu schimbare de fază. Aceștia sunt apreciați pentru stabilitatea lor superioară în ciclurile termice și pentru faptul că sunt mai puțin corozivi comparativ cu parafinele. Cu toate acestea, acizii grași au un cost mai ridicat, ceea ce poate limita utilizarea lor pe scară largă (Magendran et al., 2019). Acizii grași prezintă, de asemenea, un risc redus de incompatibilitate cu materialele în care sunt conținuți, ceea ce îi face potriviți pentru o gamă largă de aplicații. În concluzie, atât parafinele, cât și acizii grași au avantaje și dezavantaje în funcție de contextul aplicării lor. Parafinele sunt mai accesibile și mai ușor de utilizat, dar au limitări legate de conductivitatea termică. În schimb, acizii grași oferă o stabilitate mai bună și o corozivitate redusă, dar la un cost mai mare. Figura 3.1 prezintă o comparație vizuală a avantajelor și dezavantajelor acestor materiale, evidențiind diferențele cheie între ele.

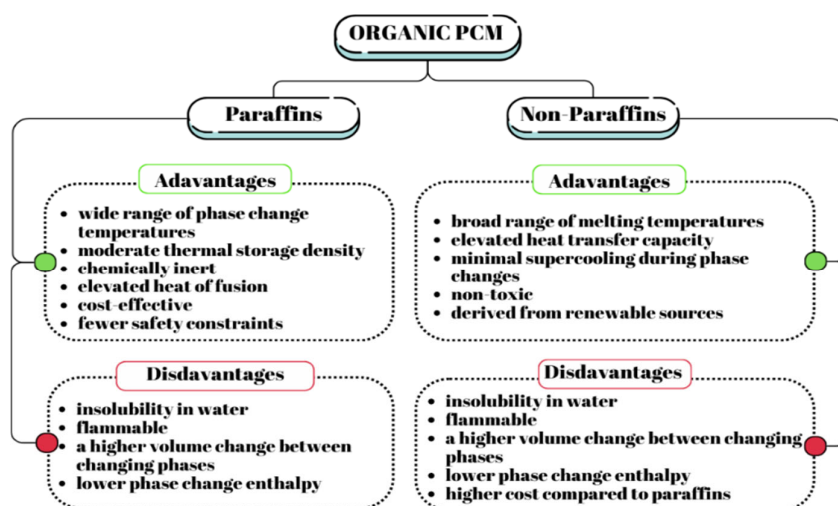


Figura 3.1 Comparație între avantajele și dezavantajele parafinelor și ale acizilor grași ca materiale cu schimbare de fază (PCMs) (Magendran et al., 2019; Podara et al., 2021)

3.2.2.2 Materiale anorganice cu schimbare de fază

Materialele anorganice cu schimbare de fază, care au o capacitate crescută de stocare a energiei termice și o conductivitate termică superioară față de cele organice, se împart de obicei în două categorii principale: hidrații de sare și metalele (Vakhshouri, 2019). Printre avantajele lor, merită menționată capacitatea crescută de stocare termică, o conductivitate termică care este aproape de două ori mai mare decât cea a parafinei, intervalele mai mari de temperatură de lucru și un cost mai accesibil (Ling et al., 2017). Cu toate acestea, principala problemă cu hidrații de sare este topirea incongruentă, care apare atunci când sarea solidă se separă și se depune la fund, făcând dificilă refacerea amestecului și, astfel, reducând eficiența cu fiecare ciclu (Podara et al., 2021). Materialele metalice prezintă provocări, parțial din cauza greutateii lor mari, în ciuda unei bune conductivități termice și a unui căldură de fuziune ridicată.

Compușii anorganici cu schimbare de fază pot avea probleme de subrăcire, incompatibilitate cu anumite materiale și tendințe corozive față de metale (Babay et al., 2009; Cabeza et al., 2011). Decahidratul de sulfat de sodiu, cunoscut sub denumirea de sarea lui Glauber, este un material cu schimbare de fază folosit în mod obișnuit pentru încălzirea clădirilor. Cu un punct de topire de aproximativ 32,4°C, acest material este o opțiune atractivă pentru stocarea și eliberarea energiei termice la temperaturi adecvate pentru încălzirea interioară. Alte materiale cu schimbare de fază au intervale de temperatură de topire similare, ceea ce le face opțiuni ideale pentru utilizare în sistemele de încălzire a spațiilor. Hexahidratul de clorură de calciu și dodecahidratul de fosfat de sodiu sunt două exemple specifice care au potențialul de a demonstra performanțe excelente în aceste aplicații, cu temperaturi cuprinse între 24°C și 36,5°C. Tricloroat de litiu, cu un punct de topire relativ scăzut de 8°C, are un mare potențial ca material pentru stocarea energiei termice în sistemele de răcire și frigidere (Hirschey et al., 2018).

3.2.2.3 Amestecuri eutectice

Materialele de schimbare de fază eutectice (PCM) reprezintă o categorie versatilă formată din amestecul a două sau mai multe compuși organici, anorganici sau hibrizi, permițând crearea de materiale adaptate pentru aplicații termice specifice. Aceste amestecuri pot varia de la combinații pur organice, cum ar fi acidul lauric-stearic, la amestecuri anorganice precum Hidroxidul de Litiu și Hidroxidul de Potasiu, și chiar combinații hibride care îmbină materiale organice și anorganice (Li et al., 2020). Printre acestea, amestecurile eutectice organice sunt adesea preferate datorită entalpiei de schimbare de fază îmbunătățite, stabilității pe termen lung și compatibilității bune cu materialele poroase (Podara et al., 2021). Totuși, aceste materiale de stocare se confruntă și cu provocări precum

costurile ridicate, posibile scurgeri în timpul schimbării de fază și o conductivitate termică slabă (Ghani et al., 2020).

3.2.3 Proprietățile dorite ale PCM-urilor

Selectarea materialului adecvat de schimbare de fază (PCM) pentru stocarea energiei termice necesită luarea în considerare atentă a mai multor factori, inclusiv proprietăți termice, fizice, cinetice, chimice și aspecte economice, după cum urmează:

A. Proprietăți termice:

- conductivitate termică ridicată: esențială pentru ciclurile eficiente de încărcare și descărcare a energiei.;
- căldura latentă de fuziune mare: permite stocarea unei cantități semnificative de energie pe unitate de masă, crescând astfel eficiența sistemului.
- capacitate specifică mare de căldură: asigură o capacitate suplimentară de stocare a căldurii sensibile.
- temperatura adecvată de schimbare de fază: temperatura de tranziție trebuie să fie strâns aliniată cu aplicația dorită.

B. Proprietăți fizice:

- echilibru de fază stabil: asigură performanțe consistente și stocare eficientă a căldurii pe durata de viață a materialului.
- densitate mare: facilitează soluții de stocare compacte, reducând cerințele de spațiu.
- presiune redusă de vapori: minimizează riscul problemelor legate de presiune, care pot afecta stabilitatea sistemului.
- schimbare minimă de volum: important pentru menținerea integrității și eficienței sistemului de stocare.

C. Proprietăți cinetice:

- super-răcire minimă sau absentă: îmbunătățește eliberarea căldurii și eficiența termică.
- rată suficientă de cristalizare: asigură că pcm-ul poate trece eficient între faze.

D. Proprietăți chimice:

- stabilitate chimică: previne descompunerea și menține performanța în timp.
- compatibilitate cu materialele: asigură că pcm-ul nu reacționează negativ cu materialele containerului sau alte componente.

- non-toxic: important pentru siguranță, mai ales în aplicațiile rezidențiale sau comerciale.
- neinflamabil: reduce riscul de incendii și îmbunătățește siguranța;

E. Factori economici:

- disponibilitate largă: asigură că materialul poate fi aprovizionat ușor și fiabil.
- accesibilitate: materialele trebuie să fie ușor de obținut și de utilizat.
- cost redus: rentabilitatea este crucială pentru aplicațiile pe scară largă și utilizarea pe termen lung.

3.3 Sisteme de stocare a energiei termice

În prezent, stocarea energiei rămâne o provocare importantă în cadrul sistemelor moderne, având în vedere tranziția către soluții energetice inovatoare și materiale de schimbare de fază avansate (PCMs) care să permită stocarea eficientă a surplusului de energie pentru a fi utilizată ulterior, când sursa inițială nu mai este disponibilă. Cu o cerere tot mai mare pentru încălzire și răcire, sistemele de stocare a energiei termice atrag o atenție deosebită, fiind capabile să recupereze excesul de căldură din diverse procese, să-l stocheze și să-l elibereze atunci când este necesar. În literatură, au fost cercetate și studiate numeroase abordări privind stocarea energiei termice. Acestea includ stocarea de căldură latentă, care utilizează materiale de schimbare de fază pentru a absorbi și elibera căldură, tehnicile de stocare a căldurii sensibile, care folosesc medii precum aerul, apa și resursele subterane, și stocarea termochimică, care captează și eliberează energie prin reacții chimice și procese de sorbție. Stocarea de căldură sensibilă este adesea utilizată datorită simplității de implementare și a costurilor reduse, în timp ce stocarea de căldură latentă se distinge prin capacitatea mare de stocare a energiei și funcționarea la temperaturi aproape constante (Luu et al., 2017). Fiecare tehnică are avantaje și dezavantaje distincte și este potrivită pentru anumite aplicații în diverse sectoare.

Principalele componente ale sistemelor de stocare a energiei termice includ mediul de stocare a căldurii, un sistem de schimb de căldură care facilitează transferul de căldură între materialul de stocare și fluidul de transfer termic și, în final, un container de stocare și un mecanism de izolare pentru prevenirea pierderilor (Adio et al., 2016). La alegerea unui sistem de stocare a energiei termice, este esențial să fie evaluate implicațiile financiare posibile și dacă acestea sunt potrivite sau nu pentru anumite aplicații. Aceste sisteme pot ajuta la reducerea impactului asupra mediului în mai multe sectoare, precum producția de energie, clădiri, dar și în industrii precum textile și îmbrăcăminte, și chiar în medicină. Materialele de stocare a căldurii, cum ar fi apa, sărurile anorganice sau materialele de schimbare de fază precum parafina, sunt exemple de materiale care performează cel mai bine

atunci când sunt alese în conformitate cu temperatura de operare a sistemului și capacitatea de stocare necesară.

3.3.1 Sisteme de stocare a căldurii sensibile

Stocarea căldurii sensibile este una dintre cele mai comune metode utilizate pentru stocarea energiei termice. Un exemplu clasic de sistem de stocare sensibilă este utilizarea rezervoarelor de apă sau alte materiale precum betonul sau fibra de sticlă, care sunt implementate atât în aplicații solare rezidențiale cât și industriale (Tawalbeh et al., 2023). Aceste rezervoare sunt esențiale pentru stocarea sezonieră a energiei, așa cum a fost demonstrat într-un studiu realizat în Ottawa, Canada, unde un rezervor de apă a permis satisfacerea a 86% din necesarul de apă caldă menajeră și 100% din cerințele de încălzire a spațiului (Meister and Beausoleil-Morrison, 2021). Sistemele de stocare sensibilă cu două rezervoare, precum cel de la Gemasolar Thermosolar Plant din Spania, sunt de asemenea relevante, deoarece utilizează săruri topite pentru stocarea căldurii la temperaturi extrem de ridicate, permițând generarea de energie chiar și atunci când radiația solară nu este disponibilă (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022a; Renewable Technology, 2021).

În contrast, sistemele indirecte cu două rezervoare operează diferit, utilizând un mediu secundar pentru stocarea energiei termice. În acest proces, sunt necesare componente suplimentare, cum ar fi un schimbător de căldură, pentru a facilita procesul de transfer. În acest fel, se facilitează absorbția căldurii de către fluidul de stocare, care apoi se întoarce la rezervorul de înaltă temperatură pentru a genera abur pentru producerea de energie, similar cu sistemele directe (González-Roubaud et al., 2017). Sarea topită este adesea utilizată ca mediu de stocare, în timp ce uleiurile organice sunt alese pentru transferul de căldură (Güney, 2016). Andasol, situată în Spania, este în prezent una dintre cele mai mari centrale solare de acest tip din Europa, cu un total de trei centrale. Facilitățile convertesc energia solară în căldură folosind ulei termo-conductor în tuburile absorbante, care apoi transferă această căldură unui amestec de săruri topite pentru stocare. Acest amestec, compus din 60% nitrat de sodiu și 40% nitrat de potasiu, este păstrat în două mari rezervoare care pot stoca până la 28.500 de tone de sare. Încălzite la 386°C, energia stocată permite centralei să continue să genereze electricitate chiar și atunci când radiația solară nu este disponibilă (Dinter and Gonzalez, 2014; National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022b; Renewable Technology, n.d.). Un alt sistem inovator este sistemul de stocare termocline cu un singur rezervor, care permite economii semnificative de costuri în producția de energie electrică și îmbunătățește eficiența în comparație cu sistemele tradiționale cu două rezervoare (Pizzolato et al., 2017). Analiza lor a arătat că această configurație inovatoare ar putea reduce semnificativ costurile de producție a energiei electrice cu 15%, în Roma, Italia, comparativ cu sistemul cu două rezervoare. Mai mult, au evidențiat potențialul

sistemului pentru cogenerare, care ar putea fi deosebit de benefic pentru zone comunitare mici, precum campusurile universitare, oferind o perioadă de recuperare de șase ani și satisfacând 80% din cerințele de încălzire și răcire. Un alt sistem relevant este sistemul de stocare cu pat compact, care folosește materiale ieftine precum pietrele sau betonul, recunoscut pentru simplitatea și costul redus în aplicațiile solare la temperaturi scăzute. Acesta a demonstrat o eficiență energetică de 67% la o temperatură de încărcare de 150°C, fiind o soluție viabilă și rentabilă pentru aplicații solare industriale (Gautam and Saini, 2020), (Kocak and Paksoy, 2020).

3.3.2 Sisteme de stocare a căldurii latente

Stocarea căldurii latente este o soluție eficientă care utilizează materiale de schimbare de fază (PCM) pentru a capta și elibera energie termică. PCM-urile sunt clasificate în funcție de temperatura de funcționare în patru categorii principale: temperaturi ridicate (+80°C to +200°C), medii (40°C and +80°C), mediu-scăzute(+5°C to +40°C) și temperaturi scăzute (-20° C to +5° C), fiecare fiind potrivite pentru aplicații specifice, de la recuperarea căldurii reziduale la refrigerare comercială (Elias and Stathopoulos, 2019). Pentru a îmbunătăți eficiența acestor sisteme, cercetările recente s-au concentrat pe integrarea PCM-urilor cu proprietăți cât mai bune de stocare, dezvoltarea metodelor de îmbunătățire a conductivității acestora și explorarea parametrilor operaționali și a geometriei sistemelor (Jouhara et al., 2020). Tehnici precum utilizarea tuburilor cu aripioare sau capsularea materialelor au fost explorate pentru a crește eficiența schimbului de căldură și pentru a preveni scurgerile și coroziunea. (Modi et al., 2021). Eficiența sistemelor de stocare a căldurii latente este puternic influențată de designul și configurația tuburilor utilizate în aceste sisteme. Studiile au investigat numeroase configurații, inclusiv tuburi simple, multi-tub, tip shell-and-tube, tuburi cu spirale elicoidale, tuburi cu aripioare și tuburi de tip U, pentru a determina efectele acestora asupra performanței sistemelor de stocare a energiei termice. De exemplu, s-a constatat că tuburile cu aripioare longitudinale pot îmbunătăți semnificativ transferul de căldură, reducând timpul de topire cu 34% comparativ cu sistemele fără aripioare, oferind astfel perspective valoroase pentru optimizarea configurațiilor în aceste sisteme (Modi et al., 2021).

În același timp, încapsularea este o tehnică bine studiată, utilizată pentru a îmbunătăți performanțele materialelor de schimbare de fază (PCM), fie prin micro-încapsulare, macro-încapsulare sau nano-incapsulare. Aceste tehnici au propriile avantaje și limitări, dar toate vizează creșterea conductivității termice, care tinde să fie scăzută la aceste materiale. De exemplu, studii au demonstrat că integrarea de aditivi, nano-aditivi și medii poroase poate îmbunătăți semnificativ proprietățile termice ale PCM-urilor. Într-un studiu, integrarea nanoparticulelor de oxid de cupru (CuO) în ceara de parafină a crescut coeficientul de transfer de căldură în timpul solidificării cu până

la 78% (Jesumathy et al., 2012). Într-un alt studiu, utilizarea nanoparticulelor de SiO₂ în acidul miristic a arătat îmbunătățiri semnificative în performanța termică, accelerând atât fazele de topire cât și de solidificare (Harikrishnan et al., 2017). O altă abordare pentru îmbunătățirea stocării căldurii latente este utilizarea mai multor materiale de schimbare de fază cu puncte de topire diferite într-un singur sistem, cunoscută sub numele de stocare latentă de căldură în cascadă sau bazată pe multiple PCM-uri. Studiile au arătat că utilizarea a două, trei sau cinci PCM-uri poate îmbunătăți semnificativ eficiența exergiei comparativ cu utilizarea unui singur material (Gong and Mujumdar, 1997). Sistemele cu două sau PCM-uri au îmbunătățit semnificativ ratele de încărcare și descărcare, ceea ce a dus la o performanță îmbunătățită a sistemelor de stocare a energiei termice latente (Aldoss and Rahman, 2014). Un alt studiu a demonstrat eficiența unui sistem de stocare latentă a căldurii în cascadă în recuperarea căldurii reziduale industriale la temperaturi medii, utilizând materiale de schimbare de fază precum eritritol și ceară de parafină. Acest sistem a crescut eficiența recuperării căldurii reziduale de la 15,8% la 63,4% și a ridicat temperatura medie de furnizare a căldurii de la 37°C la 53,6°C, optimizând debitul în timpul descărcării (Yang et al., 2023).

De asemenea, tuburile termice, cunoscute pentru conductivitatea lor excepțional de ridicată, sunt incluse printre strategiile utilizate pentru a îmbunătăți stocarea termică în aceste sisteme. Un model avansat de rețea termică aplicat de (Shabgard et al., 2012) evaluat transferul de căldură în sistemele care integrează conducte termice asistate gravitațional. Eficiența sistemelor de stocare a căldurii latente poate fi semnificativ îmbunătățită prin utilizarea unor configurații avansate de tuburi termice și prin integrarea unor materiale cu schimbare de fază (PCM). De exemplu, un studiu realizat de (Khalifa et al., 2014), a evaluat eficiența tuburilor termice cu aripioare comparativ cu cele neacoperite în cadrul unui sistem de stocare a căldurii latente. Rezultatele au arătat că utilizarea tuburilor termice cu aripioare a dus la o creștere de 86% a extracției de energie și o creștere de 24% a eficienței sistemului. În continuare, cercetările în acest domeniu au dus la dezvoltarea unor sisteme hibride inovative. (Hayat et al., 2020) au investigat un astfel de sistem care utilizează spumă de cupru și un material cu schimbare de fază, RT-35HC, alături de tuburi termice asistate de gravitație pentru răcirea electronică. Studiul a arătat că integrarea unei ventilație de răcire în acest sistem hibrid a redus temperaturile cu până la 54% în faza de încărcare la fluxuri de căldură mai mari.

Studiile recente au demonstrat că integrarea tuburilor termice în sistemele de stocare a căldurii latente îmbunătățește semnificativ performanța termică. (Dong et al., 2024) au arătat că utilizarea unei configurații cu micro-tuburi termice plate, dispuse în mod dublu și eșalonat, a crescut capacitatea totală de stocare a căldurii cu 11% și eficiența cu 21%. (Mahdavi et al., 2020) au demonstrat că introducerea tuburilor termice orizontale și a nanoparticulelor în sistemele de stocare verticală reduce

timpul necesar pentru topire și solidificare cu 83%, respectiv 96%. (Ladekar et al., 2017) au evidențiat că tuburile termice optimizate, comparativ cu barele de cupru, au îmbunătățit eficiența încărcării și descărcării cu aproape 180% într-un sistem de stocare a căldurii pentru apă caldă menajeră. (Naghavi et al., 2017) au investigat un sistem de încălzire a apei cu colectoare solare și tuburi termice, obținând o eficiență termică între 34% și 42%, asigurând o sursă continuă de energie.

Capitolul dedicat stocării energiei termice subliniază importanța acestor tehnologii în gestionarea eficientă a energiei, în contextul unei cereri crescute de soluții sustenabile. Sistemele de stocare a căldurii, fie prin căldură sensibilă, latentă sau termochimică, permit recuperarea și reutilizarea energiei reziduale din diverse procese industriale, contribuind astfel la reducerea consumului de combustibil și a emisiilor de gaze cu efect de seră. Inovațiile recente, cum ar fi integrarea tuburilor termice și utilizarea materialelor cu schimbare de fază adecvată aplicației, au demonstrat o îmbunătățire semnificativă a eficienței acestor sisteme, maximizând recuperarea energiei și reducând timpii de încărcare și descărcare. Aceste tehnologii au potențialul de a crește considerabil performanța și rentabilitatea sistemelor de stocare a energiei termice.

4. Optimizarea Strategică a Parametrilor Operaționali prin Simulări Numerice

4.1 Obiective

Principalul obiectiv al acestei teze este de a reproiecta, reconfigura și optimiza un sistem existent de recuperare și stocare a căldurii reziduale de tip apă-apă. Pentru a atinge acest obiectiv, un sistem de recuperare a căldurii a fost analizat sistematic printr-o serie de 12 simulări numerice, fiecare având scopul de a optimiza diferiți parametri operaționali. Performanța termică a sistemului a fost evaluată prin modificarea variabilelor, cum ar fi debitul agentului secundar, lungimea serpentinei, diametrul tubului termic, dimensiunea condensatorului și temperatura la intrare a agentului primar. Această abordare metodică a oferit informații esențiale despre efectele acestor variabile asupra eficienței sistemului, atât individual cât și colectiv, cu scopul final de a proiecta un sistem îmbunătățit de recuperare și stocare a căldurii reziduale. Obiectivele specifice ale acestor simulări numerice au fost:

- Determinarea parametrilor operaționali optimi care maximizează eficiența transferului de căldură în cadrul sistemului;
- Creșterea capacității și eficienței stocării energiei termice latente, îmbunătățind astfel capacitățile generale de stocare a energiei ale sistemului;
- Optimizarea configurației sistemului pentru a spori eficiența operațională și a reduce costurile materiale și de construcție;
- Dezvoltarea unui sistem optimizat de recuperare a căldurii reziduale, care va fi construit și testat experimental în laborator;

Aceste simulări au jucat un rol crucial în conceperea designului sistemului, conducând la construcția unei soluții de recuperare și stocare a căldurii reziduale mai eficiente și mai eficace. *Rezultatele prezentate în acest capitol au fost evaluate și publicate în jurnalul Sustainability. Lucrarea completă poate fi găsită în forma: Vizitiu, Ș.E.; Abid, C.; Burlacu, A.; Vizitiu, R.Ș.; Balan, M.C. Strategic Optimization of Operational Parameters in a Low-Temperature Waste Heat Recovery System: A Numerical Approach. Sustainability 2024, 16, 7013. <https://doi.org/10.3390/su16167013>.*

4.2 Proiectarea sistemului de recuperare a căldurii cu tuburi termice

Studiul se concentrează pe optimizarea unui sistem de recuperare și stocare a căldurii bazat pe tuburi termice, cu scopul de a îmbunătăți performanța transferului de căldură și de a spori eficiența

energetică. Am utilizat programele ANSYS 2022 (versiunea educațională) pentru simulările numerice și Autodesk Inventor 2023 pentru modelarea 3D, ceea ce ne-a permis să obținem informații detaliate despre comportamentul sistemului sub diverse condiții de operare.

Simulările numerice au fost folosite pentru a investiga plasarea alternativă a serpentinelor și debitele agentului secundar, precum și diverse scenarii de proiectare și operare. Analiza a implicat mai mulți pași pentru a evalua sistematic performanța sistemului în diverse condiții. Sistemul studiat este compus din două secțiuni principale: zona de evaporare și zona de condensare, ambele străbătute vertical de un singur tub termic din cupru, cu un diametru de 15 mm și o lungime de 1000 mm. Zona de evaporare are o înălțime de 400 mm și o lățime de 100 mm, în timp ce zona de condensare are o înălțime de 600 mm și un diametru de 150 mm. Materialul de schimbare de fază (PCM) utilizat este uleiul de cocos, cunoscut pentru punctul său de topire de 25°C. Serpentina este realizată din cupru, iar carcasele evaporatorului și condensatorului sunt din oțel.

În prima parte a cercetării, au fost examinate două design-uri distincte ale serpentinelor, cu dimensiuni diferite, pentru a înțelege cum influențează aceste aspecte comportamentul de topire al PCM-ului și temperatura finală a agentului secundar. Sistemul funcționează prin transferarea energiei termice de la agentul primar în evaporator către tubul termic, care ulterior transferă căldura către uleiul de cocos aflat în tot volumul condensatorului. În același timp, agentul secundar circulă prin serpentină din condensator, extrăgând căldura din PCM-ul topit. Detaliile constructive sunt prezentate în tabelul 4.1.

Tabel 4.1

Detaliile constructive ale echipamentului

Case no.	Component Specifications									
	Evaporator		Condenser		Heat Pipe		Coil			
	Height [mm]	Width [mm]	Height [mm]	Diameter [mm]	Length [mm]	Diameter [mm]	Height [mm]	Length [mm]	Diameter [mm]	
Case 1	400	100	600	150	1000	15	1916	474	15	
Case 2							1096	244		
Case 3						25	1916	474		
Case 4				100						
Case 5				85						

Aceste simulări și modele 3D au contribuit la identificarea celor mai promițătoare setări de design și operaționale, conducând la dezvoltarea unui sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale mai eficient și optimizat pentru performanță. Figura 4.1 prezintă o prezentare vizuală a primelor două scenarii pentru sistemul analizat de recuperare și stocare a căldurii și componentele sale, modele realizate în Autodesk Inventor 2023.

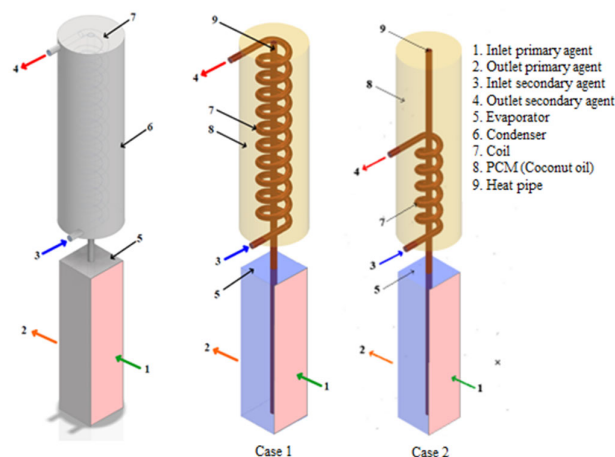


Figura 4.1 Modelele 3D ale sistemului de recuperare și stocare a căldurii pentru Cazul 1 și Cazul 2

După simulările inițiale pentru Cazul 1 și Cazul 2, metodologia a fost rafinată prin modificări ale dimensiunilor condensatorului și ale tubului termic, conducând la trei cazuri suplimentare, ilustrate în Figura 4.2.

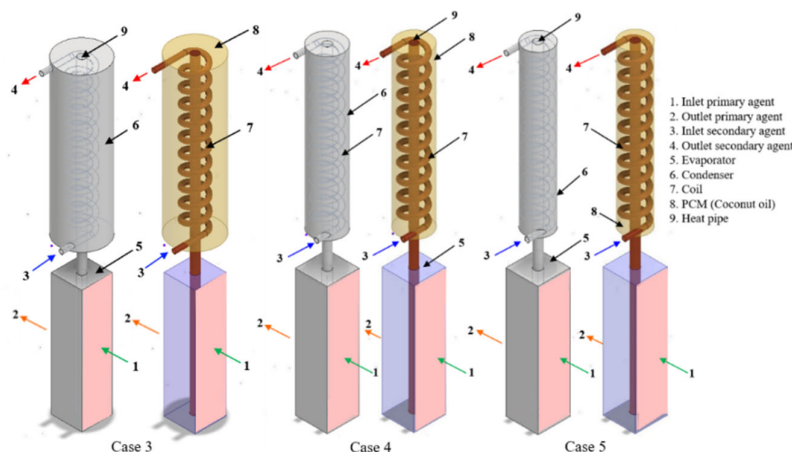


Figura 4.2 Modelele 3D ale sistemului de recuperare și stocare a căldurii pentru Cazul 3, Cazul 4 și Cazul 5

În Cazul 3, diametrul condensatorului a fost menținut la 150 mm, în timp ce diametrul tubului termic a fost mărit de la 15 mm la 25 mm. În Cazul 4, pentru a îmbunătăți schimbul de căldură, diametrul condensatorului a fost redus de la 150 mm la 100 mm. În Cazul 5, pentru a obține o eficiență termică superioară și un transfer de căldură mai bun, diametrul condensatorului a fost redus în continuare de la 100 mm la 85 mm. Aceste ajustări ilustrează metodologia utilizată pentru a optimiza performanța sistemului în diverse condiții, cu Cazul 1 servind drept punct de referință pentru toate rafinările și evaluările ulterioare. Pentru a evalua sistematic impactul fiecărui parametru de design și operațional, simulările au fost grupate pe baza variației unui singur parametru, permițând o analiză clară a influenței fiecărui parametru asupra performanței sistemului. Grupul A a investigat cum varierea debitului agentului secundar a afectat comportamentul de topire al sistemului și

caracteristicile transferului de căldură, în timp ce Grupurile B și C au examinat impactul diferitelor lungimi ale serpentinelor asupra sistemului. Grupul D a evaluat modul în care schimbarea diametrului tubului termic a influențat transferul termic în cadrul sistemului, iar Grupul E a analizat efectul diferitelor diametre ale condensatorului asupra eficienței schimbului de căldură al sistemului. Grupurile F și G au examinat răspunsul termic al sistemului la variațiile temperaturilor de intrare ale agentului primar. Aceste grupuri și detaliile lor corespunzătoare sunt prezentate în Subsecțiunea 4.3.3, împreună cu tabelele și parametrii relevanți.

4.3 Simulare numerică

În faza de simulare, geometria 3D inițial creată cu Autodesk Inventor 2023 a fost importată în mediul Ansys-Fluent pentru a efectua simulările numerice. Procesul de realizare a mesh-ului, care are o influență majoră asupra rezultatelor simulărilor numerice, a fost realizat în cadrul limitărilor versiunii academice, care restricționează rețeaua la 500.000 de elemente. Structurile de rețea, formate din 130.000 până la 200.000 de noduri, au fost dezvoltate folosind o metodă de rafinare graduală. Aceasta a implicat pornirea cu o rețea având mai puține elemente și creșterea treptată a densității în zonele critice, după cum era necesar. Obiectivul a fost de a crea o rețea de înaltă calitate care să reprezinte cu acuratețe comportamentul termic, menținând totodată eficiența calculului. În analiza computațională, aranjamentul nodurilor în mediul Ansys-Fluent a fost planificat pentru a captura comportamentele termice complexe atât în zonele de evaporare, cât și în cele de condensare. În zonele cheie unde erau anticipate gradienti termici semnificativi, schimbări de fază sau variații ale fluxului de fluid, nodurile au fost plasate mai dens. Regiunile din jurul interfețelor tubului termic și serpentinei au primit o atenție deosebită, dată fiind importanța lor în procesul de transmitere a căldurii. Rețeaua a fost rafinată pentru a îmbunătăți densitatea nodurilor în zonele care necesitau mai multe detalii, inclusiv în jurul curbilor sau joncțiunilor unde fluxul de căldură și fluid suferă modificări bruște. Distribuția nodurilor a fost personalizată pentru a reprezenta cu exactitate complexitatea geometrică a fiecărui caz, ținând cont de configurațiile variate. Aranjamentul nodurilor a fost un element esențial al metodologiei noastre de simulare, permițând obținerea unei înțelegeri detaliate și precise a eficienței transferului de căldură a sistemului cu tuburi termice în diferite scenarii conceptuale și operaționale.

4.3.1 Condițiile la limită

Obiectivul principal a fost evaluarea dinamicii termice a sistemului și identificarea configurațiilor optime în condiții operaționale variate. Următorul pas în inițierea simulărilor a implicat selectarea materialelor adecvate și stabilirea condițiilor la limită. Oțelul a fost ales ca material

pentru carcasele evaporatorului și condensatorului și cuprul pentru serpentină și tubul termic, datorită conductivității lor termice ridicate. Recunoscând limitările computaționale și amploarea investigației, am optat să nu simulăm procesele interne de schimbare de fază pentru tubul termic. Astfel, acesta a fost modelat ca un cilindru de cupru, cu o conductivitate termică foarte ridicată pentru a simula capacitățile sale de transfer de căldură în cadrul sistemului. Ne-am concentrat pe asigurarea faptului că rolul tubului termic în transferul de căldură între componentele sistemului era reprezentat cu acuratețe, simplificând modelul, dar capturând în continuare funcționalitatea esențială necesară pentru analiza noastră. Fluidele de lucru, desemnate ca agenți primari și secundari, au fost ambele modelate ca apă. În plus, uleiul de cocos a fost introdus ca material de schimbare de fază (PCM) în condensator. Caracteristicile termice ale uleiului de cocos au fost importate pe baza literaturii existente (Saleel, 2022) deoarece atributele acestuia nu erau disponibile în baza de date Ansys-Fluent.

Pentru a reprezenta răspunsurile dependente de timp ale sistemului în fața diferitelor circumstanțe operaționale, un Solver tranzitoriu bazat pe presiune a fost utilizat în simulări. Modelul de flux laminar a fost selectat pentru a se potrivi cu scara fizică a sistemului și cu condițiile anticipate de flux. Parametrii pentru intrările sistemului, incluzând valorile vitezei și temperaturii, au fost selectați pentru fiecare scenariu de simulare pentru a reprezenta diferite condiții operaționale, așa cum se arată în Tabelul 4.2.

Tabel 4.2
Condițiile la limită

Case number	Simulation number	Boundary conditions						
		Primary Agent - WATER		Secondary agent - WATER		Phase Change Material - COCONUT OIL		
		Inlet temp. [°C]	Flow rate [l/min]	Inlet temp. [°C]	Flow rate [l/min]	Melting temp. [°C]	Solidification temp. [°C]	
Case 1	S1	70	24	15	1	25	15	
	S2				0.1			
	S3				0.05			
Case 2	S4	70			1			
	S5				0.1			
Case 3	S6				70			0.05
Case 4	S7							
	S8							
	S9							
Case 5	S10	70						
	S11	50						
	S12	90						

Au fost stabilite “Pressure-Outlets” atât pentru evaporator, cât și pentru condensator, permițând fluidelor să părăsească sistemul într-un mod controlat. În cadrul investigațiilor numerice, au fost utilizate cinci scenarii diferite, variind temperatura la intrarea agentului primar și debitul agentului secundar în fiecare caz. Această abordare a permis evaluarea în mod cuprinzător a eficienței sistemului în diverse condiții, de la debite și temperaturi crescute până la configurații multiple. Ca bază de referință pentru experimente, am stabilit un debit constant al agentului primar de 24 l/min și o temperatură constantă de 15°C pentru agentul secundar. Utilizând versiunea academică a ANSYS Fluent 2022, am aplicat scheme „up-wind” de ordin doi pentru discretizarea ecuațiilor de moment și energie, în combinație cu algoritmul SIMPLE pentru o rezolvare eficientă a interacțiunii presiune-viteză. Abordările numerice alese au reușit să mențină un echilibru între eficiența computațională și precizia necesară pentru a identifica efectele subtile ale modificărilor de design și operare asupra performanței sistemului.

4.3.2 Modelarea matematică

În acest studiu, am utilizat ANSYS Fluent pentru a simula transferul de căldură dinamic și schimbarea de fază într-un sistem de recuperare și stocare a căldurii. Pentru a modela sistemul, acesta poate fi împărțit în trei componente principale: (Figure 4.1 și 4.2):

- **Evaporatorul:** În această secțiune, fluidul fierbinte, denumit fluidul primar, circulă cu un debit specific de 24 l/min, intră la o temperatură dată (temperatura sursei de căldură) și iese la o temperatură T_0 °C. Răcirea acestui fluid (apa) facilitează evaporarea fluidului din tubul termic;
- **Condensatorul:** Această secțiune este umplută cu material cu schimbare de fază (PCM) și este traversată de partea superioară a tubului termic. O serpentină, imersată în PCM și care înconjoară tubul termic, permite apei reci să intre și să absoarbă energia atât din tubul termic, cât și din PCM, încălzindu-se astfel;
- **Tubul termic:** Pentru a simplifica calculele, tubul termic a fost modelat ca un cilindru solid cu o conductivitate termică foarte mare, de 5000 W/m·K, pentru a simula un transfer de căldură la fel de eficient ca cel al unui tub termic real.;

Ansamblul este izolat, pierderile termice de la pereți către exterior fiind neglijabile. Ecuațiile fundamentale ale mecanicii fluidelor și transferului de căldură stau la baza simulărilor realizate în Ansys-Fluent în cadrul acestui studiu. Ecuațiile guvernante pentru aceste procese sunt derivate și adaptate din metodologiile existente, cum ar fi metodele cu domeniu fix și metoda entalpiei pentru

schimbarea de fază. În simulările cu domeniu fix, domeniul computațional rămâne constant, chiar și atunci când au loc schimbările de fază. Ecuația principală de guvernare pentru energia din aceste sisteme, care ține cont de schimbarea de fază, este dată de:

$$\rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}h) \right] = \nabla \cdot q - S \quad (1)$$

, unde:

- $\frac{\partial h}{\partial t}$ - termen nepermanent;
- $\nabla \cdot (\vec{v}h)$ - transport convectiv al energiei;
- q – fluxul de căldură difuziv;
- S – termen sursă;

Metoda entalpiei, propusă de Voller (Soupart-Caron, 2015) este utilizată frecvent pentru modelarea schimbărilor de fază și este integrată în ANSYS. Această abordare simplifică problema prin considerarea entalpiei ca sumă a căldurii sensibile și latente, eliminând necesitatea condițiilor de interfață. Aceasta transformă ecuația guvernantă într-una echivalentă cu ecuația pentru o singură fază, permițând urmărirea precisă a fronturilor de fuziune și solidificare.

- Ecuația de conservare a masei este fundamentală în simulările de dinamică a fluidelor și este exprimată ca:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

, unde ρ este densitatea fluidului și $\vec{v}$ reprezintă câmpul de viteză.

- Ecuația legii de conservare:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}v_x) \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}v_y) \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_y) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}v_z) \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_z) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (5)$$

, unde $\vec{S}$ reprezintă termenii sursă datorită schimbării de fază. Acești termeni sursă sunt influențați

în special de modelul zonei "mushy", unde PCM-ul trece între stările solidă și lichidă. Acesta poate fi exprimat ca:

$$\vec{S} = \frac{M(1-f)^2}{f^3 + c} \vec{v} \quad (6)$$

• Conservarea energiei în PCM:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{q} - \rho \Lambda \frac{\partial f}{\partial t} \quad (7)$$

, unde ρ reprezintă densitatea materialului cu schimbare de fază, $\frac{\partial h}{\partial t}$ este rata de schimbare a entalpiei în timp, și $\frac{\partial f}{\partial t}$ reprezintă rata de schimbare a fracției de fază.

În sistemele care trec prin tranziții de fază, entalpia totală este suma dintre căldura sensibilă ($h_{sensible}(T)$) și căldura latentă ($h_{latent}(T)$). Această relație este definită de următoarele ecuații:

$$h(T) = h_{sensible}(T) + h_{latent}(T) \quad (8)$$

Căldura sensibilă reprezintă energia acumulată datorită creșterii temperaturii materialului, fie în stare solidă, fie lichidă. Poate fi calculată ca:

$$h_{sensible}(T) = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} C_p, S dT + \int_{T_{fusion}}^{T_{final}} C_p, L dT \quad (9)$$

Căldura latentă reprezintă energia absorbită sau eliberată în timpul tranziției de fază. Se exprimă astfel:

$$h_{latent}(T) = f(T) \Delta h_{S-L} \quad (10)$$

Combinând ecuațiile pentru căldura sensibilă și căldura latentă, ecuația de conservare a energiei pentru un sistem care trece prin schimbare de fază este dată de:

$$\rho \left[\frac{\partial h_{sensible}(T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} h_{sensible}(T)) + \Delta h_{S-L} \frac{\partial f(T)}{\partial t} + \Delta h_{S-L} \nabla \cdot (\vec{v} f(T)) \right] \quad (11)$$

4.3.3 Parametrii de simulare și organizarea grupurilor de analiză

Pentru a înțelege mai bine modul în care anumite variabile influențează comportamentul sistemului, am clasificat sistematic simulările în grupuri, fiecare fiind bazat pe un singur parametru variabil. Figura 4.3 ilustrează simulările organizate și grupurile respective, oferind claritate prin categorisirea sistematică. Rațiunea acestei abordări a fost de a izola influența fiecărei variabile asupra sistemului, ceea ce ne-a permis să tragem concluzii precise despre impactul fiecărui parametru variat.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE AND DESIGN OPTIMIZATION OF A WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

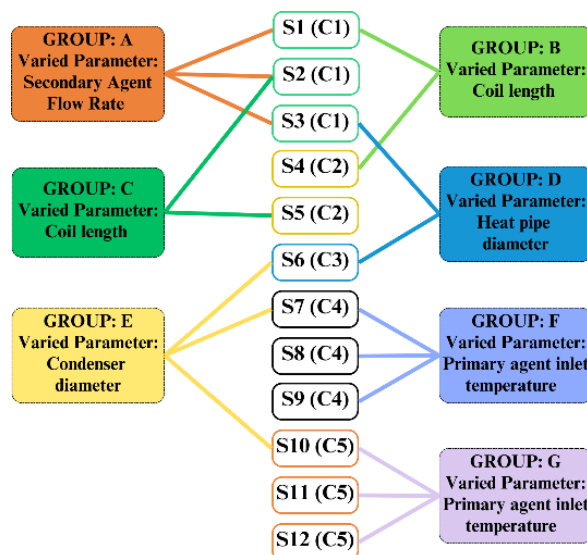


Figura 4.3 Diagramă schematică a grupurilor de simulare

Rezultatele sunt prezentate sub forma unor grupuri comparative, care reflectă strategia de a examina câte o variabilă pe rând. Studiul de simulare a început prin crearea unui scenariu de referință, denumit simularea S1. Detaliile acestui prim grup de simulări pot fi văzute în tabelul 4.3.

Tabel 4.3

Parametrii de simulare din Grupul A

Comparison Group	ID	Parameter variation and values		Constant Parameters			
				Coil Height [mm]	Condenser diameter [mm]	HP diameter [mm]	T _{pin} [°C]
Group A	S1	Secondary Agent Flow Rate (Q _{sa})	1l/min	1916	150	15	70
	S2		0.1l/min				
	S3		0.05l/min				

Extinzând caracteristicile fundamentale ale simulării S1, simulările S2 și S3 au fost realizate sistematic, având ca singur parametru variabil debitul agentului secundar. Menținând toți ceilalți parametri constanți, aceste ajustări au permis concentrarea asupra examinării modului în care variațiile de debit afectează transferul de căldură și eficiența generală a sistemului. Pe baza constatărilor din Grupul A, s-a investigat impactul variațiilor lungimii serpentinei asupra performanței sistemului în Grupurile B și C. Parametrii specifici care au rămas neschimbați, împreună cu cei care au fost modificați, sunt descriși metodic în Tabelul 4.4.

Tabel 4.4

Parametrii de simulare din Grupul B și Grupul C

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE AND DESIGN OPTIMIZATION OF A WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

Comparison Group	ID	Parameter variation and values		Constant Parameters			
				Q _{sa} [l/min]	Condenser diameter [mm]	HP diameter [mm]	T _{pin} [°C]
Group B	S1	Coil Length	1916 mm	1	150	15	70
	S4		1096 mm				
Group C	S2		1916 mm	0.1			
	S5		1096 mm				

După grupurile axate pe variațiile lungimii serpentinei, atenția din Grupul D s-a mutat asupra diametrului tubului termic. Pentru claritate, parametrii constanți și variabili specifici sunt prezentați în Tabelul 4.5.

Tabel 4.5

Parametrii de simulare din Grupul D

Comparison Group	ID	Parameter Variation and values		Constant Parameters			
				T_{pin} [°C]	Condenser diameter [mm]	Coil height	Q_{sa} [l/min]
Group D	S3	Heat pipe diameter	15 mm	70	150	1916	0.05
	S6		25 mm				

Tabelul 4.6 prezintă Grupul E, care se va concentra asupra implicațiilor asociate cu diferite diametre ale condensatorului, extinzând concluziile din cercetarea diametrului tubului termic din Grupurile D. Accentul principal aici a fost să analizăm cum se schimbă performanța sistemului prin ajustarea dimensiunii condensatorului de la 150 mm, 100 mm și 85 mm în Simulările S6, S7 și S10, respectiv, menținând diametrul optim al tubului termic de 25 mm din comparațiile anterioare. Prin menținerea tuturor celorlalți parametri constanți, am asigurat că orice variații în eficiență și transmiterea căldurii pot fi atribuite în principal ajustărilor dimensiunii condensatorului.

Tabel 4.6

Parametrii de simulare din Grupul E

Comparison Group	ID	Parameter variation and values		Constant Parameters			
				Coil Height [mm]	Q_{sa} [l/min]	HP diameter [mm]	T_{pin} [°C]
Group E	S6	Condenser diameter	150 mm	1916	0.05	25	70
	S7		100 mm				
	S10		85 mm				

Tabelul 4.7 oferă o analiză detaliată a impactului diferitelor temperaturi de intrare ale agentului primar asupra Grupurilor F și G.

Tabel 4.7
Parametrii de simulare din Grupul F și Grupul G

Comparison Group	ID	Parameter Variation and values		Constant Parameters			
				Condenser diameter [mm]	Qsa [l/min]	HP diameter [mm]	Coil Height [mm]
Group F	S8	Primary agent inlet temperature	90 [°C]	100	0.05	25	1916
	S7		70 [°C]				
	S9		50 [°C]				
Group G	S12		90 [°C]	85			
	S10		70 [°C]				
	S11		50 [°C]				

4.4 Rezultate

Acest capitol prezintă analiza rezultatelor obținute din cele 12 simulări numerice realizate pentru a evalua caracteristicile termice ale sistemului de recuperare și stocare a căldurii, cu scopul de a dezvolta un sistem optimizat. Simulările au fost efectuate prin modificarea sistematică a câte unui singur parametru față de un caz de referință (S1), pentru a facilita comparațiile și analizele detaliate. Vizualizările grafice rezultate din simulări ilustrează procesul de topire și variațiile de temperatură în sistem după 4 ore de funcționare. Deși nu s-a atins o stare de echilibru în acest interval, perioada a fost aleasă pentru a echilibra cerințele computaționale cu obiectivele studiului. Discuțiile ulterioare analizează impactul modificărilor parametrilor asupra performanței sistemului, grupate și reprezentate grafic pentru a evidenția procentul de material topit și temperatura agentului secundar. Toate scenariile simulate au indicat un regim de curgere laminar, cu numere Reynolds sub valoarea critică de 2300.

4.4.1 Analiză comparativă: variația debitului agentului secundar în Grupul A

Ajustările debitului agentului secundar în Grupul A au evidențiat relația dintre debitul de apă și performanța termică a sistemului, precum și fracția de topire a materialului cu schimbare de fază, secțiunile transversale fiind prezentate în Figura 4.4.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE AND DESIGN OPTIMIZATION OF A WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

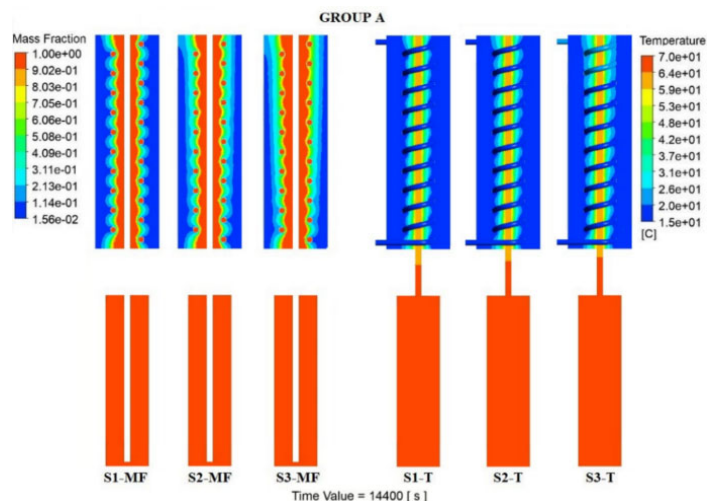


Figura 4.4 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul A

Pe parcursul celor 4 ore de simulare, s-a observat că o reducere a debitului de curgere a agentului secundar a dus la o creștere a fracției de topire a PCM. Simularea cu cel mai mic debit (0,05 l/min) a atins o fracție de topire de 30,71%, semnificativ mai mare comparativ cu simularea la un debit de 1 l/min, care a înregistrat o fracție de topire de 20,49% (Figura 4.5-(a)). Temperaturile la ieșirea agentului secundar au urmat un tipar similar, crescând odată cu scăderea debitului. În simularea S1, temperatura de ieșire a fost ușor mai mare decât temperatura inițială, indicând un transfer termic redus. În contrast, simularea S3 a atins o temperatură de ieșire de 21,15°C, ceea ce indică un proces de transfer termic mai eficient (Figura 4.5-(b)). Creșterea temperaturii la ieșire a agentului secundar reflectă o absorbție termică sporită, aliniindu-se astfel obiectivului sistemului de a optimiza extracția de căldură.

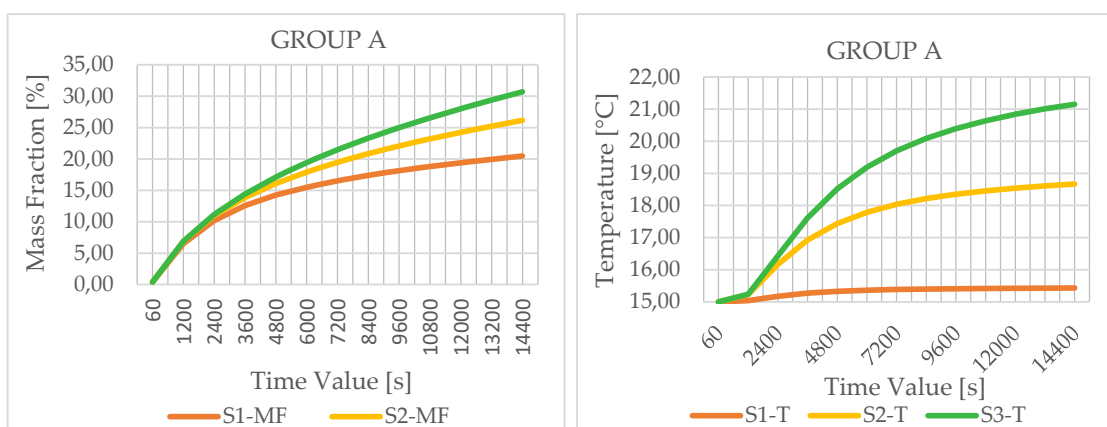


Figura 4.5. (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul A

4.4.2 Analiză comparativă: variația lungimii serpentinei în Grupul B și Grupul C

În Figura 4.6 sunt prezentate secțiuni transversale ale sistemului, evidențiind modul în care lungimea serpentinei influențează aceste aspecte în simulările din Grupul B.

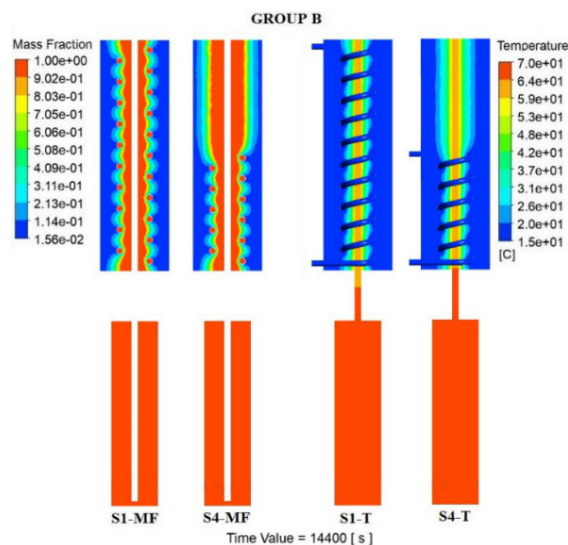


Figura 4.6 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul B

Conform datelor din Grupul B, se observă că serpentina cu jumătate de lungime din Simularea S4 duce în cele din urmă la o fracție de topire mai mare decât serpentina completă din Simularea S1. După 4 ore, fracția de topire pentru S4-MF ajunge la 30,64%, considerabil mai mare decât cea de 20,49% observată în S1-MF (Figura 4.7 –(a)). Comparând datele privind temperatura la ieșirea agentului secundar din Figura 4.7 –(b), este evident că S1-T performează mai bine decât S4-T. S1-T a înregistrat o temperatură de 15,43°C după 4 ore, în timp ce S4-T a înregistrat o temperatură de 15,24°C, așa cum este prezentat mai jos.

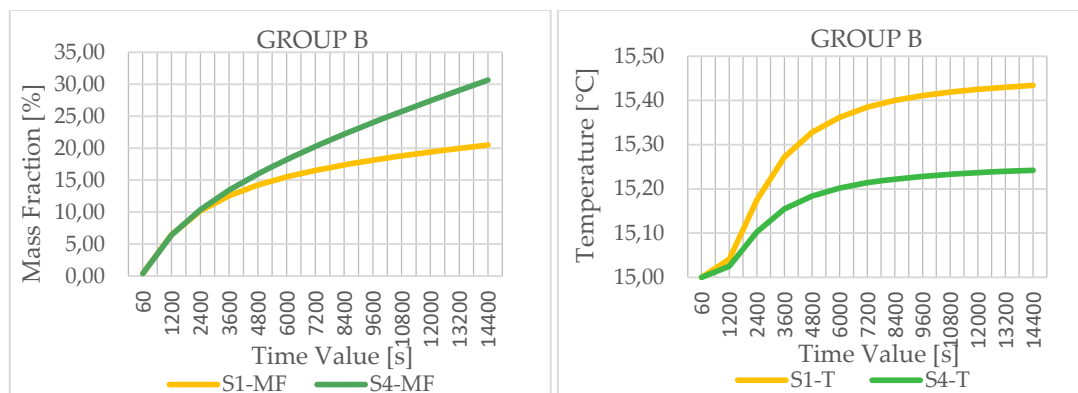


Figura 4.7 (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul B

Contururile fracției de topire (MF) și temperaturii (T) pentru Grupul C sunt prezentate în Figura 4.10, unde rata de curgere a agentului secundar este setată la 0,1 l/min.

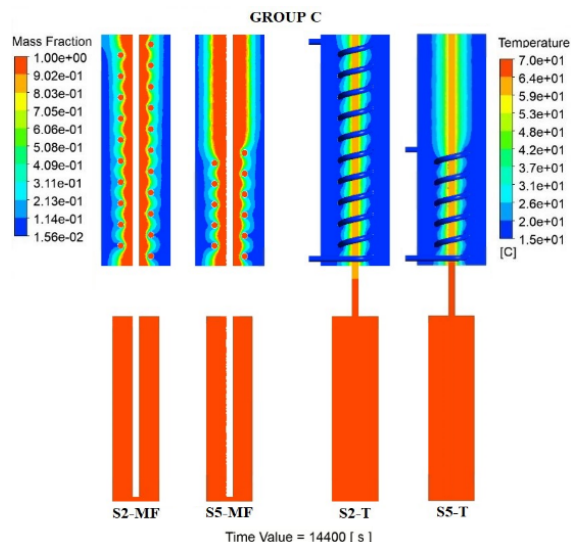


Figura 4.8 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul C

Comparația dintre serpentina cu lungime completă din Simularea S2 și serpentina cu jumătate de lungime din Simularea S5 demonstrează impacturile diferite asupra eficienței termice și comportamentului de topire al materialului cu schimbare de fază în sistem. Rezultatele prezentate în Figura 4.9 (b) arată că reducerea ratei de curgere la 0,1 l/min are un efect semnificativ asupra fracției de topire a uleiului de cocos. În cazul utilizării serpentinei cu jumătate de lungime în S5-MF, se observă o proporție mai mare de material topit în timp, atingând un maxim de 30,80% după 4 ore. În schimb, S2-MF, cu serpentina de lungime completă, ajunge doar la un procent de topire de 26,17%.

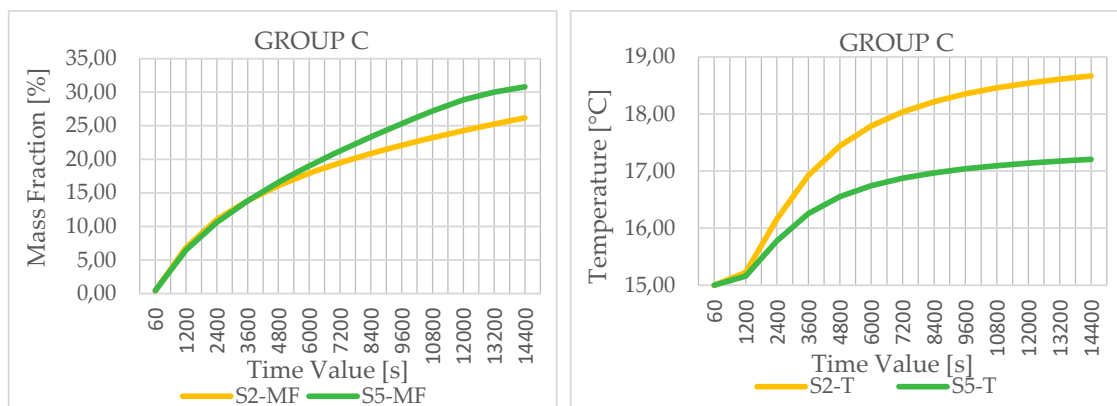


Figura 4.9 (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul C

După analizarea temperaturilor la ieșire pentru S2-T și S5-T, devine clar că serpentina cu lungime completă din S2-T produce o creștere mai substanțială a temperaturii la ieșire comparativ cu

serpentina cu jumătate de lungime din S5-T (Figura 4.9 -b). După o perioadă de 4 ore, S5-T atinge o temperatură de ieșire de 17,21°C, în timp ce S2-T obține o temperatură ușor mai mare de 18,67°C. Utilizarea unei serpentine cu jumătate din lungimea obișnuită, menținând o rată de curgere redusă, poate spori cantitatea de ulei de cocos care se topește. Cu toate acestea, utilizarea unei serpentine de lungime mai mare are potențialul de a îmbunătăți procesul de transfer de căldură al agentului secundar, rezultând o temperatură de ieșire mai ridicată, ceea ce poate fi deosebit de benefic în sistemele care necesită temperaturi de ieșire mai mari..

4.4.3 Analiză comparativă: variația diametrului tubului termic în Grupul D

Pentru Grupul D, Figura 4.10 prezintă analiza comparativă a variației diametrului tubului termic, de la 15 mm în cazul S3 la 25 mm în cazul S6, menținând un debit constant al agentului secundar de 0,05 l/min și bobina de lungime completă din simulările anterioare. Rezultatele din Figura 4.11-(a) arată că S6-MF, cu un tub termic de 25 mm, are o fracție de topire ușor mai mică decât S3-MF, care folosește un tub de 15 mm. După 4 ore, S3-MF înregistrează o fracție de topire de 30,71%, demonstrând că tubul cu diametru mai mic îmbunătățește transferul de căldură către uleiul de cocos din condensator în această aplicație.

Temperatura agentului secundar în simularea cu un tub termic de 15 mm (S3-T) este constant ușor mai mare decât în S6-T pe parcursul celor 4 ore, conform tendințelor de temperatură la ieșire (Figura 4.11-(b)). În simularea S3-T, temperatura la ieșire este de 21,15°C, depășind temperatura de 20,47°C din cazul S6-T.

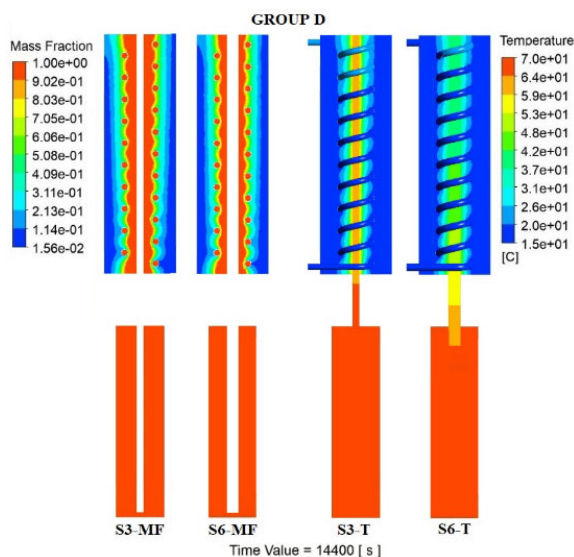


Figura 4.10 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul D

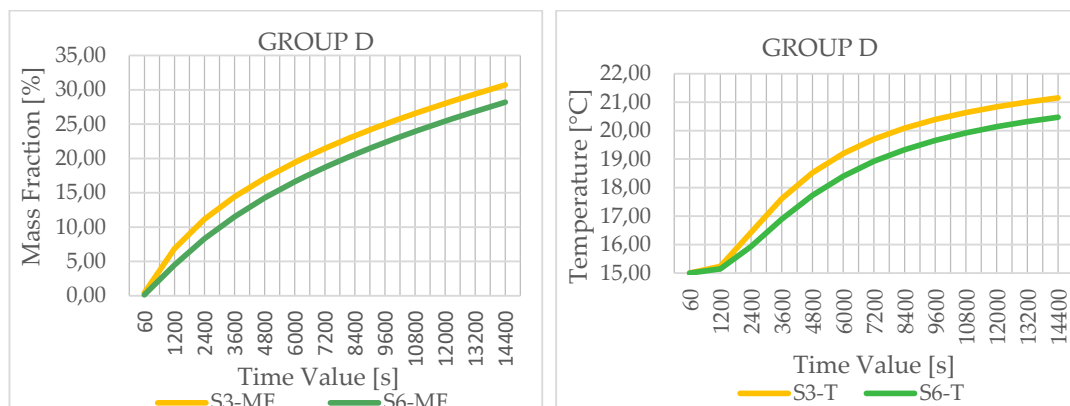


Figura 4.11 (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul D

4.4.4 Analiza comparativă: variația diametrului condensatorului în Grupul E

Figura 4.12 prezintă analiza comparativă a variației diametrului condensatorului în cadrul Grupului E.

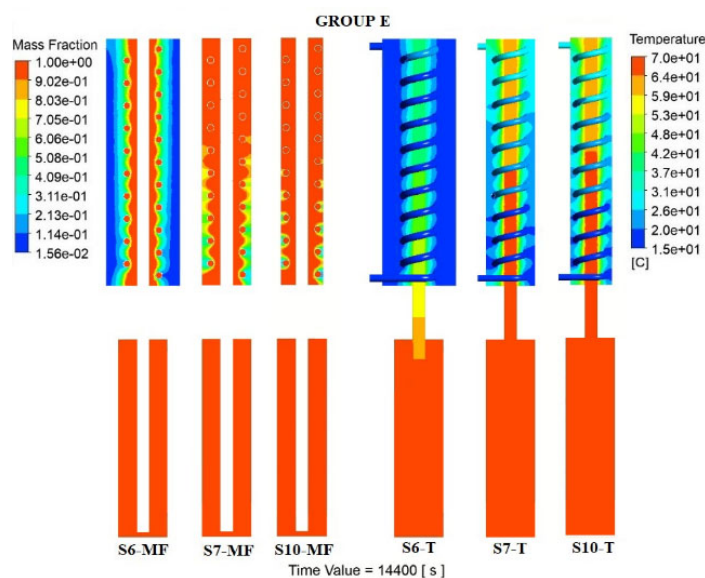


Figura 4.12 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul E

În această analiză, s-au investigat efectele modificării diametrului condensatorului în timp ce s-a utilizat un tub termic de 25 mm, păstrând constant un debit de 0,05 l/min și aceeași configurație a serpentinei. Studiul a evaluat impactul reducerii diametrului condensatorului, de la 150 mm în cazul S6, la 100 mm în S7 și, ulterior, la 85 mm în S10. Rezultatele, prezentate în Figura 4.13-(a), arată clar că diametrul condensatorului influențează semnificativ fracția de topire. Pe măsură ce diametrul condensatorului scade, fracția de topire crește semnificativ. După 4 ore de funcționare, simularea S10-MF, care utilizează un condensator cu diametrul de 85 mm, înregistrează cea mai mare fracție

de topire, de 95,24%. Aceasta este urmată de scenariul S7-MF, cu un diametru de 100 mm, care obține o fracție medie de topire de 88,32%, în timp ce scenariul S6-MF, cu un diametru de 150 mm, atinge doar 28,19%.

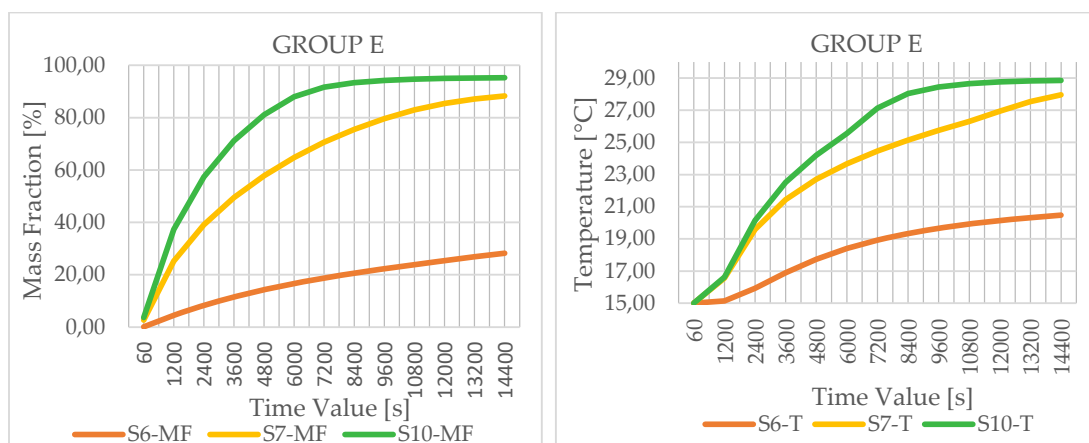


Figura 4.13 (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul E

Temperaturile agentului secundar la ieșire, ilustrate în Figura 4.13-(b), subliniază clar efectele reducerii diametrului condensatorului. Scenariul S10-T arată cea mai mare creștere a temperaturii la ieșire, ajungând la 28,85°C, ceea ce indică o absorbție semnificativă de căldură de către agentul secundar. În schimb, temperaturile finale din scenariile S7-T și S6-T sunt de 27,95°C, respectiv 20,47°C. Aceste date demonstrează că, pe măsură ce diametrul condensatorului se reduce, agentul secundar absoarbe o cantitate mai mare de căldură din materialul cu schimbare de fază topit, rezultând o temperatură mai ridicată la ieșirea din sistem.

4.4.4.1 Analiza comparativă: variația temperaturii de intrare a agentului primar în Grupurile F și G

În Grupul F, s-a investigat impactul variației temperaturii de intrare a agentului primar asupra performanței sistemului, menținând constanți alți parametri optimi. S-au analizat trei scenarii: S7 la 70 °C, S8 la 90 °C și S9 la 50 °C. Rezultatele au arătat că temperaturile mai ridicate de intrare cresc semnificativ fracția de topire a materialului cu schimbare de fază. S8-MF, la 90 °C, a obținut cea mai mare fracție de topire, de 95,22%, în timp ce S7-MF, la 70 °C, a înregistrat 88,32%, iar S9-MF, la 50 °C, doar 68,64% (Fig. 4.15-(a)). De asemenea, temperaturile agentului secundar la ieșire au urmat același tipar, cu S8-T atingând 33,66°C, indicând o eficiență ridicată a sistemului în transferul de căldură la temperaturi mai mari ale agentului primar (Fig. 4.15-(b)).

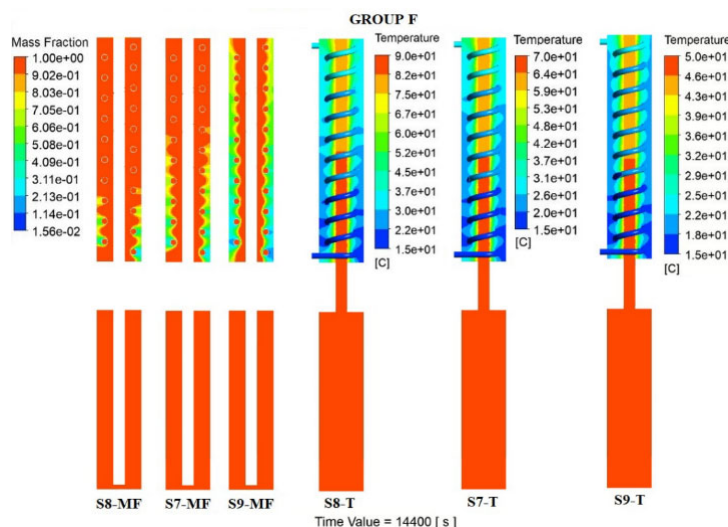


Figura 4.14 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul F

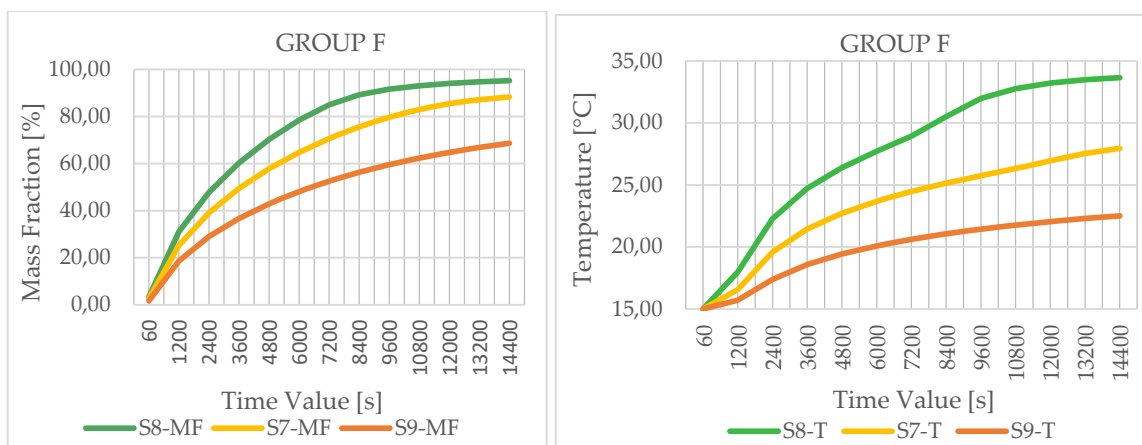


Figura 4.15 (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul F

În Grupul G, s-a continuat investigarea sistematică a comportamentului sistemului la diferite temperaturi de intrare ale agentului primar, menținând diametrul condensatorului la 85 mm. Au fost analizate răspunsurile termice și caracteristicile schimbării de fază la trei temperaturi de intrare distincte: 70°C pentru S10, 90°C pentru S12 și 50°C pentru S11. Rezultatele, ilustrate în Figura 4.17-(a), arată că topirea uleiului de cocos este puternic influențată de temperatura la care agentul primar intră în sistem, în special în cazul condensatorului cu diametru redus. Simularea S12-MF, cu o temperatură de 90°C, a înregistrat cea mai mare fracție de topire, ajungând la 98,80% după 4 ore. Simularea S10-MF, la 70°C, a obținut o fracție de topire de 95,27%, în timp ce simularea S11-MF, la 50°C, a atins doar 84,14%. În ceea ce privește temperaturile la ieșire ale agentului secundar (Fig. 4.17-(b)), simularea S12-T a înregistrat cea mai mare temperatură, de 33,95°C, indicând o absorbție mai mare de căldură la temperaturi mai ridicate datorită fracției mai mari de topire a uleiului.

Simulările S10-T și S11-T au urmat acest tipar, cu temperaturi de 28,85°C și, respectiv, 23,46°C. Rezultatele sugerează că utilizarea unui condensator cu diametrul de 85 mm este eficientă în transferul energiei termice de la agentul primar la agentul secundar, iar o temperatură mai mare a sursei de căldură duce la obținerea unor temperaturi mai ridicate la ieșirea agentului secundar, benefice pentru sistemele care necesită astfel de performanțe.

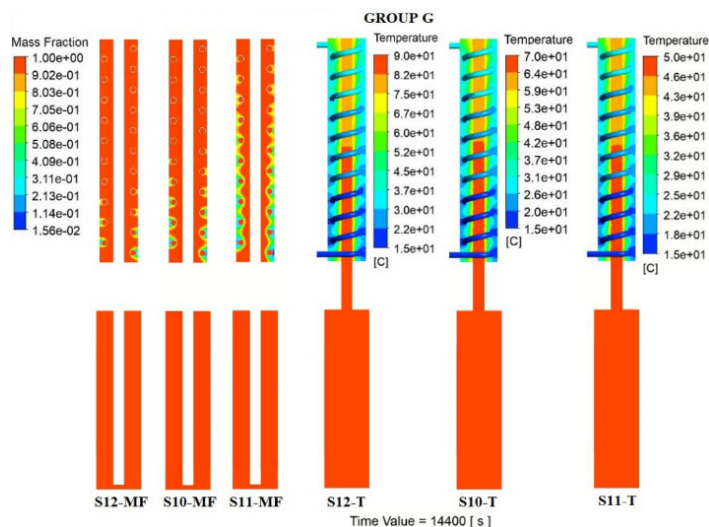


Figura 4.16 Secțiuni transversale ale contururilor fracției de topire (MF) și ale temperaturii (T) pentru Grupul G

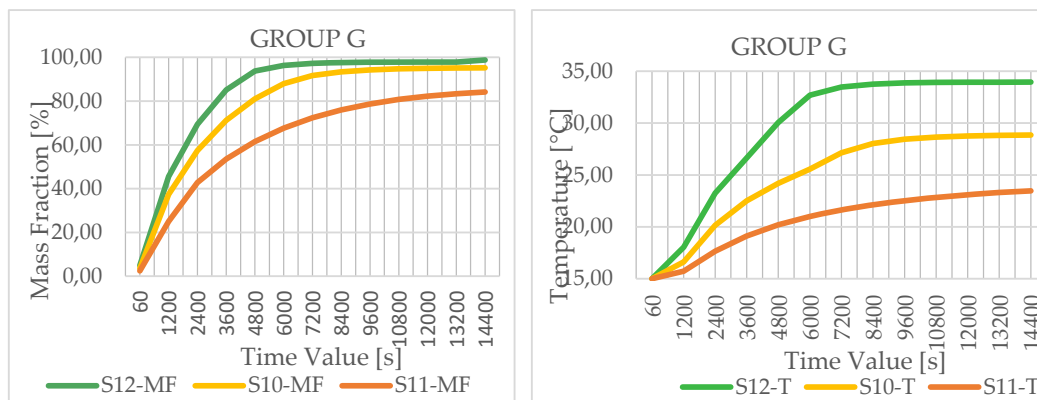


Figura 4.17 (a) Procentul de topire și (b) temperatura la ieșirea agentului secundar în funcție de timp pentru simulările din Grupul G

4.4.5 Rezumatul analizei

Acest subcapitol prezintă o analiză detaliată a parametrilor cheie care influențează performanța sistemelor de recuperare a căldurii, cu accent pe optimizarea fluxului agentului secundar, dimensiunea condensatorului și a tubului termic, precum și temperatura de intrare a agentului primar. Studiul se bazează pe simulări care explorează efectele acestor variabile asupra eficienței termice globale și asupra capacității de stocare a energiei.

- Debitul agentului secundar: Rezultatele din Grupul A au demonstrat că un debit mai mic al agentului secundar duce la o fracție de topire mai mare și la temperaturi mai ridicate la ieșire, ceea ce sugerează o absorbție și un transfer de căldură îmbunătățite. Cu toate acestea, atingerea unui echilibru între aceste avantaje și alte cerințe operaționale este esențială pentru optimizarea eficienței globale a sistemului;
- Lungimea serpentinei: Grupurile B și C au arătat că lungimea serpentinei joacă un rol crucial în echilibrul dintre stocarea energiei și transferul de căldură. Deși o serpentină mai scurtă permite topirea unui volum mai mare de material cu schimbare de fază, o serpentină mai lungă asigură un transfer mai eficient al căldurii către agentul secundar. Această constatare subliniază necesitatea de a selecta lungimea serpentinei în funcție de obiectivele specifice ale sistemului;
- Diametrul tubului termic: Analiza din Grupul D a evidențiat importanța diametrului tubului termic pentru a asigura un echilibru optim între absorbția căldurii de la agentul primar și transferul eficient al acesteia către materialul cu schimbare de fază și agentul secundar. Deși un tub termic de diametru mai mic a arătat o eficiență ușor mai mare, utilizarea unui tub cu un diametru mai mare în simulările ulterioare a permis explorarea beneficiilor potențiale legate de o suprafață mai mare pentru transferul de căldură în condensator;
- Diametrul condensatorului: Grupul E a demonstrat că un diametru mai mic al condensatorului îmbunătățește atât fracția de topire, cât și temperaturile la ieșirea agentului secundar. Totuși, este crucial să se mențină un echilibru între eficiența transferului de căldură și capacitatea de stocare a energiei, având în vedere volumul materialului cu schimbare de fază;
- Temperatura de intrare a agentului primar: Grupurile F și G au subliniat impactul major al temperaturii de intrare a agentului primar asupra eficienței topirii materialului cu schimbare de fază și asupra temperaturilor la ieșirea agentului secundar. Temperaturile mai ridicate ale agentului primar au condus la creșterea semnificativă a fracției de topire și a temperaturilor de ieșire, evidențiind importanța alegerii corecte a temperaturii sursei de căldură pentru optimizarea performanței sistemului;

În concluzie, debitul redus al agentului secundar, temperaturile ridicate de intrare ale agentului primar și diametrele mai mici ale condensatorului îmbunătățesc în mod constant eficiența termică a sistemului. Cu toate acestea, pentru a maximiza performanța, este esențial să se evalueze cu atenție parametrii specifici de proiectare, cum ar fi lungimea serpentinei și diametrul tubului termic, în funcție de configurația particulară și de condițiile de operare ale sistemului. Aceste constatări oferă

perspective valoroase pentru proiectarea și optimizarea sistemelor de recuperare a căldurii, însă trebuie să fie aplicate în contextul specific al fiecărui sistem.

4.4.6 Limitările studiului și direcții de cercetare

Studiul prezent oferă perspective semnificative pentru optimizarea sistemelor de recuperare a căldurii, însă are anumite limitări care trebuie recunoscute. Simulările numerice au fost restrânse la parametri și configurații specifice, care nu reflectă toate scenariile din realitate. Totodată, simplificările necesare în modelul numeric, precum excluderea proceselor interne de schimbare de fază din tubul termic, au fost aplicate pentru a facilita analiza, dar acestea pot influența precizia rezultatelor. În plus, utilizarea versiunii academice a software-ului ANSYS a impus limitări asupra complexității modelului.

Pentru a îmbunătăți aceste constatări, studiile viitoare ar trebui să se concentreze pe validarea experimentală a rezultatelor numerice, extinderea gamei de parametri și configurații analizate, precum și pe includerea proceselor interne de schimbare de fază în modelul global. De asemenea, explorarea pe termen lung a performanței sistemelor și integrarea cu surse de energie regenerabilă sunt necesare pentru a evalua viabilitatea practică și sustenabilitatea acestor sisteme. Analize economice detaliate ar fi, de asemenea, esențiale pentru a determina fezabilitatea financiară a implementării acestor tehnologii. Aceste direcții de cercetare vor contribui la o mai bună înțelegere și dezvoltare a sistemelor eficiente de recuperare a căldurii..

4.5 Concluzii

În acest capitol, a fost realizată o evaluare sistematică a unui sistem de recuperare și stocare a căldurii bazat pe tuburi termice, utilizând ulei de cocos ca material cu schimbare de fază (PCM). Evaluarea a fost realizată prin 12 simulări distincte, care au avut drept scop optimizarea parametrilor operaționali. Analiza a implicat modificarea unor variabile esențiale, precum debitul agentului secundar (între 1 l/min și 0,05 l/min), lungimea serpentinei (474 mm sau 244 mm), diametrul tubului termic (15 mm și 25 mm) și dimensiunea condensatorului (150 mm, 100 mm și 85 mm). De asemenea, au fost studiate efectele variației temperaturii de intrare a agentului primar (90°C, 70°C și 50°C).

Principalele concluzii ale studiului sunt următoarele:

- Reducerea debitului agentului secundar a dus la o îmbunătățire semnificativă a transferului de căldură și a absorbției de energie, evidențiată prin temperaturi finale mai ridicate ale agentului secundar și fracții de topire mai mari ale uleiului de cocos;
- Lungimea serpentinei a avut un impact direct asupra eficienței stocării și transferului de căldură. Serpentinele mai scurte au promovat o topire mai eficientă a PCM, în timp ce

serpentinele mai lungi au facilitat un transfer de căldură mai eficient către agentul secundar;

- Diametrele mai mici ale tubului termic și ale condensatorului au favorizat transferul de căldură și au crescut fracția de topire a uleiului de cocos. Totuși, este esențial să se mențină un volum adecvat de PCM pentru a asigura o capacitate suficientă de stocare a energiei;
- Temperaturile de intrare mai ridicate ale agentului primar au fost asociate cu o topire mai eficientă a PCM și cu creșteri ale temperaturii de ieșire a agentului secundar;
- Configurația din simularea S12 a oferit cele mai bune rezultate, obținând o fracție de topire de 98,8% și o creștere de 18,95°C a temperaturii de ieșire a agentului secundar după 4 ore de simulare. În contrast, simularea S5 a avut performanțe mai slabe, cu o fracție de topire de doar 30,80% și o creștere de 2,21°C a temperaturii, ceea ce indică necesitatea unor optimizări suplimentare;

Simulările au fost esențiale pentru a avansa înțelegerea comportamentului termic și a eficienței energetice în cadrul sistemului de recuperare a căldurii reziduale. Manipularea sistematică a parametrilor critici a permis o înțelegere mai profundă a impactului fiecărui component asupra eficienței generale a sistemului. Deși uleiul de cocos a oferit anumite avantaje ca PCM, performanța sa în ceea ce privește eficiența transferului de căldură și dinamica topirii nu a fost optimă. Această observație a fost crucială, ducând la alegerea unui material cu schimbare de fază mai adecvat pentru cerințele operaționale ale sistemului. În plus, rezultatele referitoare la variația diametrului tubului termic au condus la adoptarea unor tuburi de înaltă eficiență pentru noul sistem, optimizând spațiul și menținând performanțe ridicate. O altă limitare identificată a fost incapacitatea agentului secundar de a extrage suficientă energie termică din uleiul de cocos topit, în special la debite mari. Acest aspect a fost abordat prin reproiectarea sistemului, astfel încât agentul secundar să fie preîncălzit în condensator înainte de a circula prin serpentină, îmbunătățind astfel procesul de topire și extracția energiei termice din PCM.

Designul optimizat, bazat pe aceste constatări, a fost dezvoltat și prezentat în capitolul următor ca un prototip, care promite o îmbunătățire semnificativă a eficienței operaționale.

5. Cercetări Experimentale

5.1 Dezvoltarea sistemului de recuperare a căldurii reziduale: concept, model 3D și etape de fabricație

În partea experimentală a cercetării, s-a pus accentul pe dezvoltarea unui nou sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale, destinat să răspundă nevoii tot mai mari de gestionare îmbunătățită a energiei termice în mediul industrial. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost creat un design inovator, caracterizat prin natura sa compactă, capabil să recupereze căldura din apele reziduale, să stocheze surplusul de energie termică și, simultan, să producă instantaneu apă caldă pentru diverse utilizări. Acest sistem utilizează tuburi termice de înaltă eficiență și un material cu schimbare de fază superior, selectat special pentru temperaturile specifice acestei aplicații. Astfel, scopul principal nu a fost doar optimizarea sistemului existent, ci reconfigurarea completă a acestuia, asigurând o mai bună adaptabilitate la aplicațiile din viața reală. În prima etapă a dezvoltării acestui sistem, a fost creat un model 3D folosind software-ul Autodesk Inventor 2023, utilizat sub licență educațională. Figura 5.1 prezintă modelul 3D al designului inovator al sistemului dual de recuperare și stocare a căldurii reziduale, împreună cu o descriere a componentelor sale.

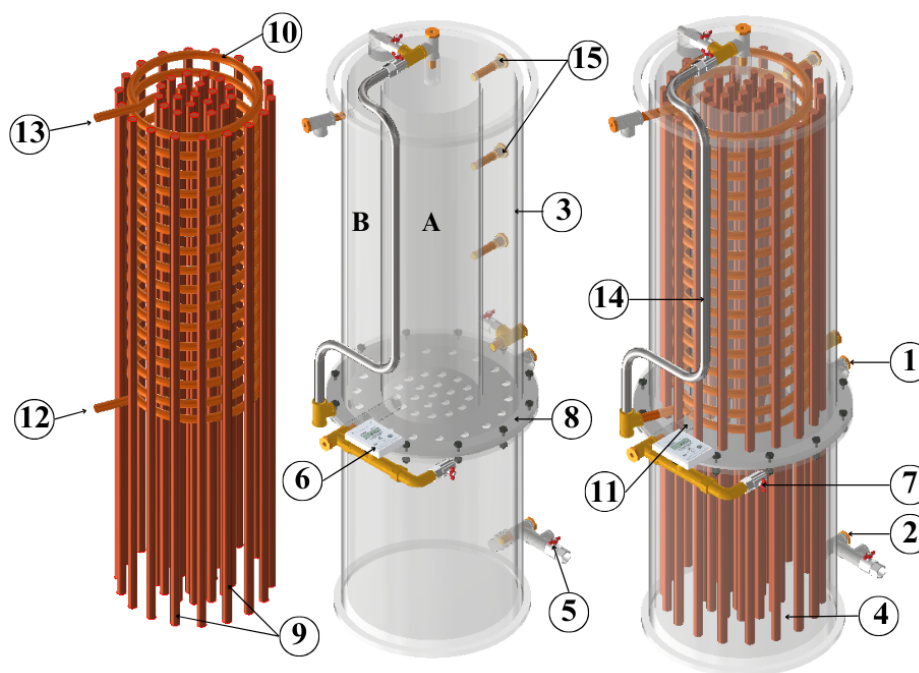


Figura 5.1 Modelul 3D al noului sistem dual de recuperare și stocare a căldurii reziduale: 1 - Intrare agent primar; 2 - Ieșire agent primar; 3 - Condensator: A - Zona interioară (agent secundar) și B - Zona exterioară (PCM); 4 - Evaporator; 5 - Vană de alimentare/golire; 6 - Debitmetru; 7 - Vană de control al debitului - agent secundar; 8 - Flanșă de etanșare; 9 - Tuburi termice; 10 - Serpentină; 11 - Intrare agent secundar; 12 - Intrare agent secundar preîncălzit; 13 - Ieșire agent secundar; 14 - Cordon flexibil din oțel; 15 - Manșoane pentru senzori de imersie.

În cadrul acestei cercetări, a fost dezvoltat un sistem inovator de recuperare și stocare a căldurii reziduale, utilizând tuburi termice de înaltă eficiență și un material cu schimbare de fază (PCM) selectat special pentru aplicațiile industriale. Sistemul este proiectat pentru a recupera căldura din apele uzate, a stoca energia termică și a furniza apă caldă instantaneu.

Principalele componente ale sistemului sunt condensatorul și evaporatorul, conectate printr-o flanșă din oțel care asigură atât separarea, cât și etanșarea. Sistemul include 38 de tuburi termice poziționate vertical, care facilitează un schimb de căldură eficient. Condensatorul este împărțit în două zone: zona interioară, prin care circulă agentul secundar pentru a prelua căldura de la tuburile termice, și zona exterioară, unde materialul cu schimbare de fază absoarbe și stochează căldura latentă. Această configurație asigură o alimentare neîntreruptă cu apă caldă, chiar și atunci când sursa principală de căldură nu este disponibilă.

Componenta inovatoare a sistemului constă în utilizarea unei serpentine de cupru în zona exterioară a condensatorului, care permite agentului secundar să absoarbă căldura stocată în materialul cu schimbare de fază. Sistemul este construit în principal din oțel inoxidabil pentru durabilitate, cu tuburi termice și serpentine din cupru pentru eficiența transferului de căldură. Acest sistem avansat asigură o recuperare eficientă a căldurii și o stocare fiabilă a energiei termice, fiind ideal pentru aplicații industriale care necesită o gestionare optimă a resurselor energetice. Dimensiunile constructive sunt prezentate în tabelul 5.1.

Tabel 5.1

Detaliile constructive ale sistemului de recuperare și stocare a căldurii

Componentă	Înălțime [m]	Diametru [m]
Evaporator	0.4	0.3
Condensator (A)	0.63	0.17
Condensator (B)	0.63	0.3
Flanșă	0.005	0.35
Tuburi termice	0.97	0.016
Serpentină	0.545	0.015

Materialul cu schimbare de fază selectat este parafina organică RT44HC, care are un interval de temperatură de topire cuprins între 42,13–43,28 °C, conform (Fadl and Eames, 2019), și între 41–44°C, conform fișei sale tehnice. Alegerea acestui material pentru aplicația noastră s-a bazat pe capacitatea sa superioară de stocare a energiei termice, stabilitatea termofizică ridicată, proprietățile non-corozive și natura non-toxică. De asemenea, oferă un interval de temperatură adecvat pentru sistemul pe care l-am dezvoltat (“Rubitherm GmbH,” 2024). Tuburile termice utilizate în acest sistem

sunt proiectate și fabricate de către Kenfatech în China. Fiecare tub este construit din cupru, având o grosime a peretelui de 1,0 mm, un diametru de 16 mm și o lungime de 970 mm. Apa este fluidul de lucru utilizat în aceste tuburi. Cu sprijinul profesional al companiei CRIOMEC S.A. din Galați, echipamentul propriu-zis a fost construit după finalizarea schițelor conceptuale și a specificațiilor detaliate de construcție.

5.2 Implementarea și prezentarea generală a funcționării standului experimental

După ce echipamentul a ajuns în laborator, a fost instalat pe standul experimental existent, împreună cu toate dispozitivele necesare pentru efectuarea experimentelor. Standul, confecționat din oțel inoxidabil, a fost reutilizat după demontarea sistemului vechi pentru a face loc noului sistem de recuperare a căldurii. Această abordare a permis integrarea rapidă și eficientă a noului echipament, utilizând infrastructura existentă pentru a reduce întârzierile și costurile suplimentare.

Pentru a recrea cu acuratețe condițiile de temperatură ale agentului primar, a fost utilizat o centrală electrică VISION de 8 kW, amplasat pe partea dreaptă a standului, esențial pentru setările termice necesare experimentelor. Figura 5.3 ilustrează o comparație între modelul 3D realizat în Autodesk Inventor 2023 (stânga) și configurarea efectivă a sistemului în laborator (dreapta), integrat pe standul experimental din oțel. Această comparație oferă o imagine clară asupra trecerii de la conceptul de design la implementarea practică a sistemului. O prezentare detaliată a specificațiilor tehnice ale centralei electrice poate fi găsită în teza de doctorat.

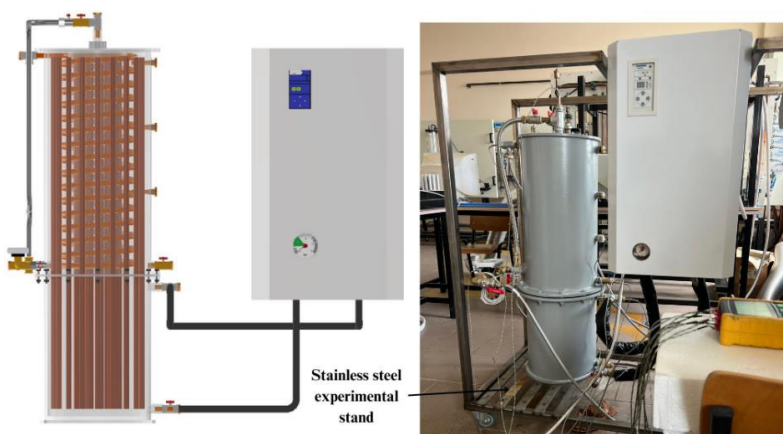


Figura 5.2 Reprezentarea 3D a sistemului cuplat cu centrala electrică și configurarea reală a standului experimental în laborator

Următorul pas a constat în realizarea conexiunilor sistemului și încărcarea parafinei RT44HC în zona exterioară a condensatorului prin capacul de alimentare. Conexiunea dintre centrala electrică și evaporatorul sistemului a fost realizată prin țevi din oțel izolate, cu un diametru de 3/4". Pe circuitul de retur a fost instalată o supapă pentru alimentare și/sau golire. Apa din rețeaua de alimentare, care

acționează ca agent secundar, este introdusă în condensator printr-un furtun flexibil. Un debitmetru compact, amplasat înainte de intrarea în condensator, monitorizează debitul agentului secundar, iar o vană de control permite reglarea manuală a debitului. Ieșirea din partea superioară a condensatorului este împărțită în două circuite distincte, fiecare cu propria vană de control. Primul circuit permite utilizarea imediată a apei calde, iar când acesta este închis, agentul secundar este redirectionat prin al doilea circuit către serpentina din zona exterioară a condensatorului, unde poate absorbi căldură din materialul cu schimbare de fază, asigurând astfel continuitatea furnizării de apă caldă chiar și în absența sursei primare de căldură.

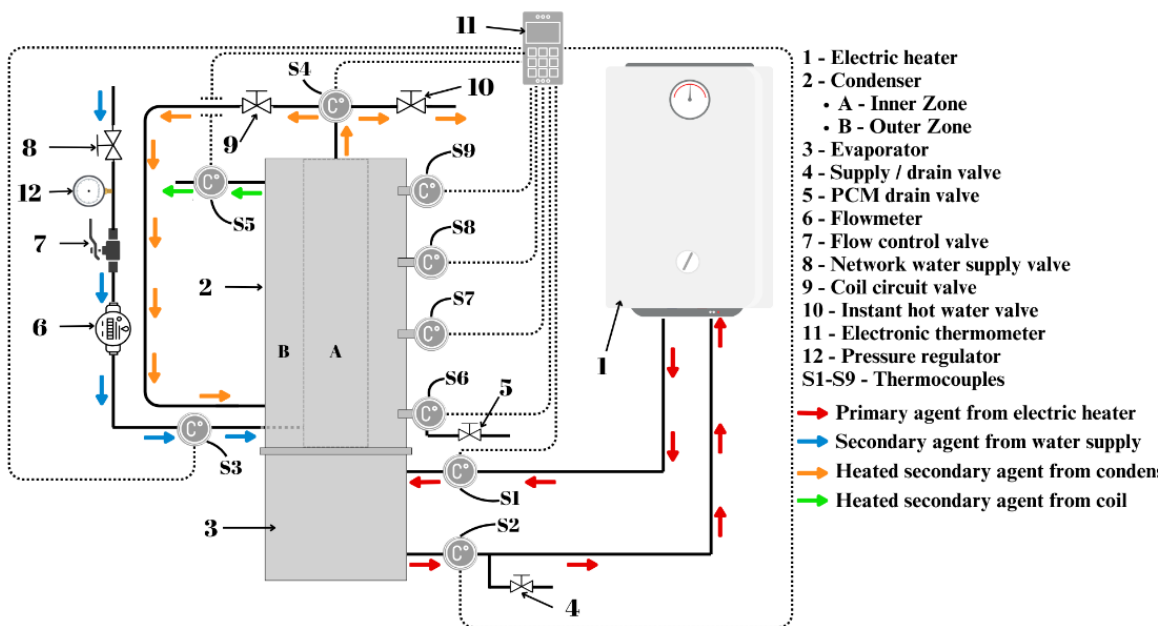


Figura 5.3 Schema de funcționare a sistemului de recuperare și stocare a căldurii

Figura 5.3 oferă o reprezentare schematică a montajului experimental și o descriere detaliată a fiecărei componente.

Fluidul primar, reprezentat de apa încălzită de centrala electrică (1), intră în evaporator (3) prin partea superioară și iese prin zona inferioară. În acest proces, tuburile termice absorb energia termică din fluidul primar și o transferă către fluidul secundar din Zona A a condensatorului (2). Simultan, în Zona B a condensatorului, tuburile termice cedează căldura către parafina RT44HC, declanșând procesul de topire. Apa încălzită, care iese din partea superioară a Zonei A a condensatorului, poate fi utilizată direct dacă vana 9 este închisă. Alternativ, dacă vana 9 este deschisă și vana 10 închisă, apa caldă este redirectionată prin circuitul serpentinei, unde preia căldură suplimentară din parafina topită din Zona B, asigurând astfel continuitatea furnizării de apă caldă chiar și în absența sursei primare de căldură. Sistemul este echipat cu senzori termocuplu de tip K, amplasați strategic la intrările și ieșirile sistemului, precum și pe partea din spate a condensatorului, pentru monitorizarea

precisă a temperaturii. Datele sunt colectate la intervale de 60 de secunde de un termometru electronic LT BTM-4208SD, cu o precizie de $\pm 0,4\%$. Acești senzori sunt aranjați pentru a maximiza colectarea de date esențiale privind transferul de căldură în materialul cu schimbare de fază, precum și în fluidul primar și secundar. Detalii suplimentare privind amplasarea senzorilor și punctele de măsurare monitorizate sunt prezentate în teză.

Pentru a optimiza grosimea izolației și a minimiza pierderile termice, s-au efectuat calcule detaliate. Procesul a început prin evaluarea transferului de căldură de bază fără izolație, determinat prin calcularea fluxului termic generat de convecția dintre suprafața externă a sistemului și aerul ambiental. Calculul detaliat al acestor aspecte este prezentat în teză. Figura 5.4 prezintă grafic relația dintre grosimea izolației, rezistențele termice (conductivă și convectivă), și fluxul termic rezultat. Intersecția liniilor de rezistență conductivă și termică totală evidențiază grosimea critică a izolației, unde transferul de căldură devine predominant conductiv, reducând semnificativ pierderile de energie termică. Pe baza acestor analize, a fost selectată o grosime optimă a izolației de 10 cm din vată minerală, care echilibrează eficient costul materialului și performanța termică.

Acesta recuperează energia termică din surse reziduale și permite producerea aproape instantanee de apă caldă, folosind tuburi termice de înaltă eficiență și un material cu schimbare de fază superior, care stochează căldura în surplus. Astfel, sistemul asigură o furnizare continuă de apă caldă chiar și în absența unei surse constante de căldură. Eficiența acestor optimizări este demonstrată prin testele experimentale detaliate în capitolul următor.

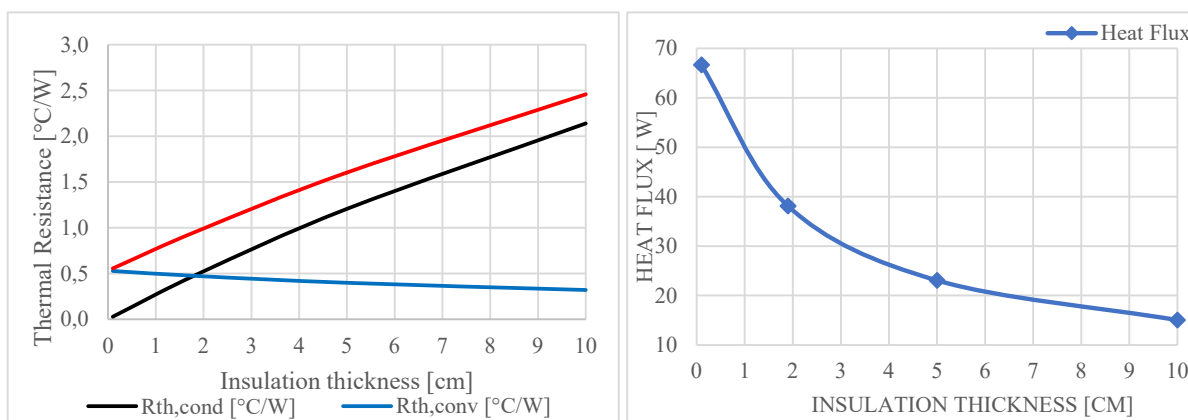


Figura 5.4 Relația dintre grosimea izolației, rezistențele termice (conductivă și convectivă), și fluxul termic rezultat.

5.3 Validarea experimentală a sistemului de recuperare a căldurii

Acest capitol detaliază o serie de experimente controlate realizate pentru a evalua performanța noului sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale. Scopul principal a fost testarea capacității sistemului de a transfera și stoca eficient căldura. Pentru aceasta, s-au variat temperatura agentului

primar (apa încălzită de centrala electrică), durata fazei de topire și debitul agentului secundar (apa din rețeaua de alimentare). Din cauza variațiilor naturale ale temperaturii apei din rețea, controlul perfect al acestui parametru nu a fost posibil, ceea ce a dus la fluctuații minore în temperaturile testate. Debitului agentului primar a fost menținut constant la 22 l/min, în timp ce debitul agentului secundar a fost ajustat manual și monitorizat pentru precizie, utilizând un debitmetru și un regulator de presiune pentru stabilitate. Tabelul 5.2 rezumă setările specifice pentru cele 10 teste efectuate, incluzând detalii despre temperaturi, debite volumetrice și durata fiecărui experiment (între 3 și 4 ore). Primul test a fost realizat cu sistemul neizolat, iar următoarele 9 teste au fost efectuate cu sistemul izolat conform condițiilor specificate. Această structurare facilitează o înțelegere clară a parametrilor variați în cadrul testelor.

Tabel 5.2

Parametri teste experimentale

Condiție termică	Nr. test	Temperatură agent primar [°C]	Temperatură medie agent secundar [°C]	Debit agent secundar [l/min]	Durată [hours]	Debit agent primar [l/min]
Neizolat	Test 1	60	25.0	2	4	22
Izolat	Test 2	50	28.8	2	4	
	Test 3	60	29.5	2	3	
	Test 4	60	28.5	2	4	
	Test 5	65	26.7	2	3	
	Test 6	65	25.8	2	4	
	Test 7	70	30,6	1	3	
	Test 8	70	29.0	2	3	
	Test 9	70	30.7	3	3	
	Test 10	70	25.9	2	4	

Fiecare test a fost realizat pe o durată de 3 sau 4 ore, pentru a evalua performanța sistemului de recuperare a căldurii și capacitatea de stocare a energiei termice a materialului cu schimbare de fază, parafina RT44HC. Durata testelor a variat în funcție de cerințele operaționale: un test de 3 ore a inclus câte o oră pentru topire, încălzire și răcire, în timp ce un test de 4 ore a cuprins două ore de topire, urmate de câte o oră de încălzire și răcire. Etapele detaliate ale acestor procese sunt prezentate în Figura 5.5.

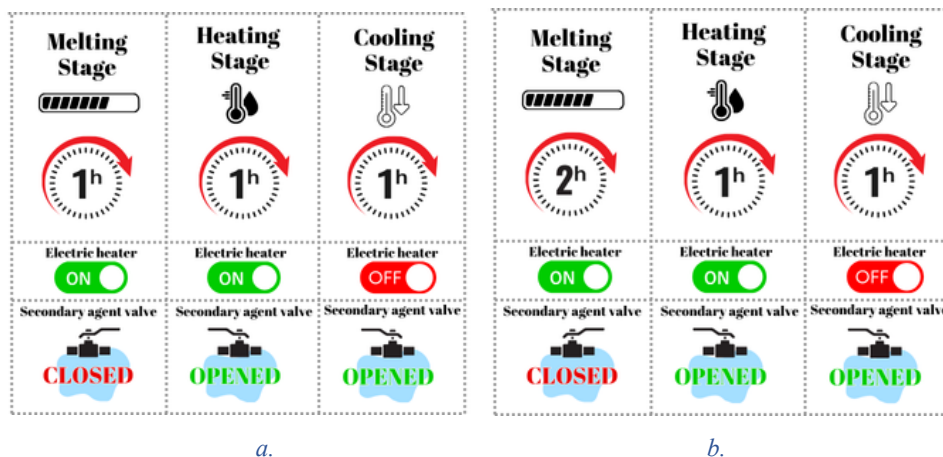


Figura 5.5 Etapele testelor experimentale (a) test de 3 ore, (b) test de 4 ore

Etapele testelor experimentale au fost structurate astfel:

- Etapa de topire: S-a concentrat pe topirea parafinei în condensator. Menținerea valvelor închise a asigurat că toată căldura generată de centrala electrică și absorbită de tuburile termice a fost direcționată către topirea materialului cu schimbare de fază.
- Etapa de încălzire: Valva pentru agentul secundar a fost deschisă, permițând circulația apei prin zona interioară a condensatorului, unde a absorbit energia termică transferată de tuburile termice. În același timp, apa a circulat prin serpentina imersată în parafina topită, absorbind energie termică suplimentară stocată în materialul cu schimbare de fază. În această etapă, sistemul a valorificat capacitatea termică a atât a materialului cu schimbare de fază, cât și a tuburilor termice, pentru a maximiza recuperarea energiei.
- Etapa de răcire: Centrala electrică a fost oprită, permițând observarea eficienței sistemului în utilizarea energiei stocate, atunci când nu mai este furnizată căldură suplimentară materialului cu schimbare de fază și agentului secundar. Agentul secundar a continuat să circule prin sistem, absorbind căldura stocată în materialul cu schimbare de fază, simulând scenarii reale în care sursele externe de căldură sunt intermitente, iar energia termică stocată devine esențială.

5.4 Analiza rezultatelor experimentale

În această secțiune, analizăm și discutăm rezultatele experimentale obținute din cele 10 teste realizate pe noul nostru sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale. Pentru a facilita o înțelegere completă și o comparație eficientă a capacităților sistemului, testele au fost clasificate în grupuri pe baza parametrilor variați. Această organizare ne permite să comparăm dinamica transferului de căldură în cadrul sistemului și să observăm comportamentul de topire al materialului

cu schimbare de fază (PCM) în diferite condiții. Rezultatele experimentale extinse din acest capitol se regăăsesc în teza de doctorat.

Rezumatul acestor grupuri de teste și parametrii corespunzători este prezentat în Tabelul 5.3.

Tabel 5.3

Prezentare generală a grupurilor de teste experimentale și a parametrilor

Grup	Parametru analizat	Nr. Test	Temp. agent primar [°C]	Debit agent secundar [l/min]	Durață [ore]	Subcapitol
Grup A	Impactul Izolației	Test 1	60	2	4	Grupul A: Impactul Izolației asupra Performanței Sistemului
		Test 4				
Grup B	Temperatura Agentului Primar - Durață de 3 ore	Test 3	60	2	3	Grupurile B și C: Analiza Efectelor Variabilității Temperaturii Agentului Primar
		Test 5	65			
		Test 8	70			
Grup C	Temperatura Agentului Primar - Durață de 4 ore	Test 2	50		4	
		Test 4	60			
		Test 6	65			
		Test 10	70			
Grup D	Durață Variabilă a Etapei de Topire	Test 3	60	2	3	Grupurile D, E și F: Analiza Performanței Sistemului la Temperaturi Constante cu Durate Variabile
Test 4		4				
Grup E		Test 5	65	2	3	
		Test 6			4	
Grup F		Test 8	70	2	3	
		Test 10			4	
Grup G	Debitul Agentului Secundar	Test 7	70	1	3	Grupul G: Influența Variabilității Debitului asupra Performanței Sistemului
		Test 8		2		
		Test 9		3		

5.4.1 Grupul A: Impactul izolației asupra performanței sistemului

Grupul A a fost evaluat prin compararea directă a rezultatelor din două teste: unul efectuat fără izolație (Testul 1) și celălalt cu sistemul izolat (Testul 4). Obiectivul principal a fost să se observe

modul în care izolația afectează eficiența transferului de căldură și capacitatea de stocare a energiei termice în materialul cu schimbare de fază (PCM), parafina RT44HC.

Tabel 5.4

Parametrii experimentali pentru grupul A - comparație între sistemul neizolat și cel izolat

Grup	Condiție termică	Nr. Test	Temp. agent primar [°C]	Temp. medie agent secundar [°C]	Debit agent secundar [l/min]	Durață [ore]	Debit agent primar [l/min]
GRUP A	Neizolat	Test 1	60	25.0	2	4	22
	Izolat	Test 4		28.5			

Rezultatele au arătat că izolația a îmbunătățit semnificativ performanța sistemului. În Testul 4, PCM-ul a atins punctul de topire mult mai rapid și a reținut căldura pentru o perioadă mai îndelungată comparativ cu Testul 1.

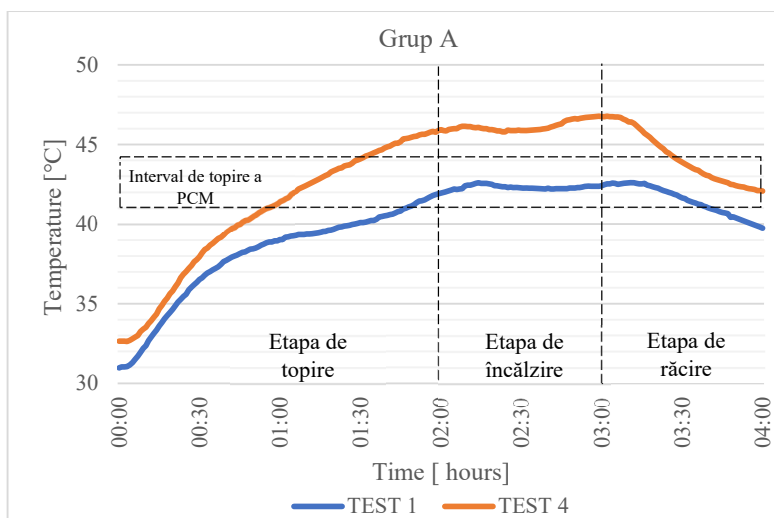


Figura 5.6 Evoluția temperaturii medii a PCM în timpul testelor 1 și 4

De asemenea, în etapa de răcire, sistemul izolat a demonstrat o capacitate superioară de a menține temperaturi ridicate, ceea ce a dus la o furnizare prelungită de apă caldă. Izolația a redus semnificativ pierderile de căldură și a îmbunătățit transferul termic către agentul secundar, rezultând în temperaturi mai ridicate și o utilizare mai eficientă a energiei stocate. Așadar, aplicarea izolației s-a dovedit a fi crucială pentru îmbunătățirea performanței globale a sistemului, maximizând eficiența termică și prelungind durata de furnizare a apei calde. Acest aspect subliniază importanța izolației în proiectarea și optimizarea sistemelor de recuperare a căldurii. Reprezentările grafice ale rezultatelor sunt detaliate în teza de doctorat.

5.4.2 Grupurile B și C: Analiza efectelor variabilității temperaturii agentului primar

Această secțiune evaluează răspunsul sistemului la variațiile temperaturii agentului primar, pe parcursul unor intervale de timp diferite. Analiza a fost împărțită în două grupuri, detaliate în Tabelul 5.5:

*Tabel 5.5
Parametrii experimentali pentru Grupurile B și C*

Grup	Nr. Test	Temp. agent primar [°C]	Temp. medie agent secundar [°C]	Debit agent secundar [l/min]	Durață [ore]	Debit agent primar [l/min]
GRUP B	Test 3	60	29.5	2	3	22
	Test 5	65	26.7			
	Test 8	70	29.0			
GRUP C	Test 2	50	28.8	2	4	22
	Test 4	60	25.8			
	Test 6	65	25.8			
	Test 10	70	25.9			

• GRUPUL B

Grupul B a analizat eficiența sistemului în cadrul unui interval de 3 ore, cuprinzând câte o oră pentru topire, încălzire și răcire. Testele 3, 5 și 8 au fost efectuate la temperaturi ale agentului primar de 60°C, 65°C și 70°C, având ca scop evaluarea dinamicii termice și a eficienței la diferite temperaturi, precum și a capacității PCM-ului de a răspunde rapid și eficient la diferite temperaturi ale agentului primar.

Rezultatele principale pentru Grupul B sunt următoarele:

- Testul 3 (60°C): PCM-ul a atins treptat intervalul de topire în 30 de minute, iar în etapa de încălzire, temperatura a continuat să crească, ajungând la 47,5°C, indicând o absorbție și stocare eficientă a căldurii. În etapa de răcire, temperatura PCM-ului a scăzut lent, menținându-se peste 40°C, demonstrând capacitatea sistemului de a reține căldura. Diferența de temperatură între intrarea și ieșirea agentului secundar a fost de 10,6°C în prima jumătate a fazei de răcire și de 6,1°C la final.
- Testul 5 (65°C): PCM-ul a atins pragul de 41°C mai rapid, în doar 23 de minute, iar temperatura a rămas constantă peste 45°C pe parcursul etapei de încălzire, demonstrând o absorbție și retenție eficientă a căldurii. În această etapă, agentul secundar a fost încălzit aproape instantaneu la trecerea prin condensator, cu temperaturi înregistrate de 60,9°C la ieșirea din condensator (S4) și 47,4°C la ieșirea din serpentină (S5). În etapa

de răcire, fără aport suplimentar de căldură, temperatura agentului secundar la ieșirea din serpentină a scăzut la 38,4°C, cu un câștig termic de 2,6°C datorat energiei stocate în PCM, evidențiind o performanță ușor mai bună comparativ cu Testul 3.

- Testul 8 (70°C): A demonstrat cea mai rapidă topire a PCM-ului, acesta atingând 45,8°C la baza condensatorului (S6) în doar 47 de minute. În etapa de încălzire, temperaturile la ieșirile S4 și S5 au crescut semnificativ, ajungând la 65,7°C și 53,4°C, respectiv, indicând un transfer termic eficient. În etapa de răcire, temperaturile au scăzut la 35,8°C (S4) și 38,5°C (S5), cu un câștig termic de 2,7°C datorat energiei stocate în PCM, similar cu Testul 5.

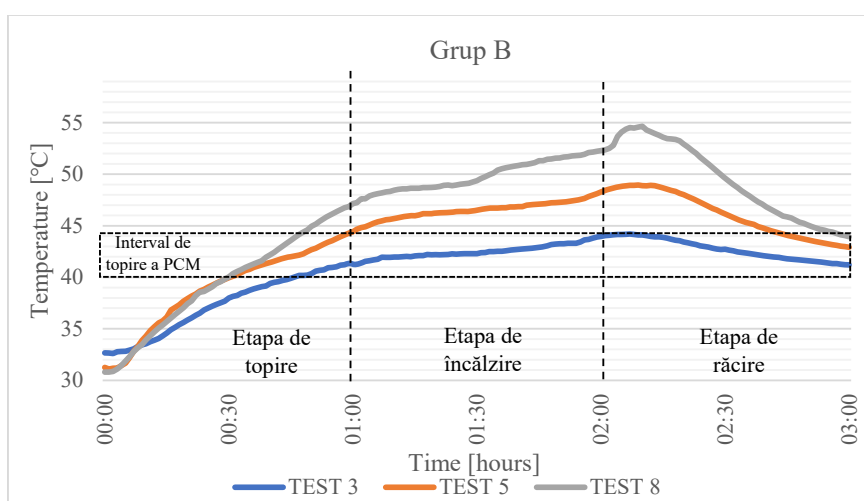


Figura 5.7 Evoluția temperaturii medii a PCM în timpul testelor 3, 5 și 8

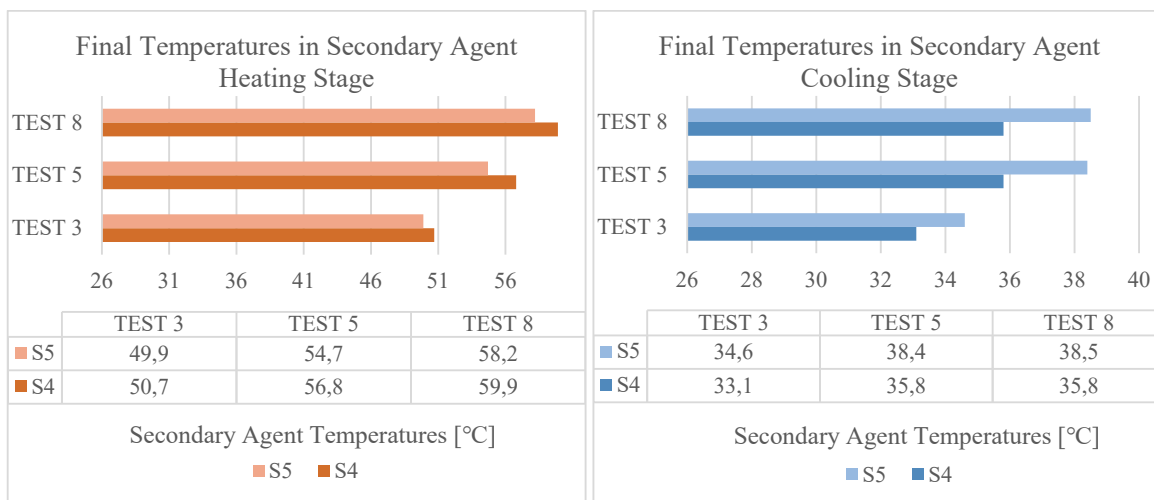


Figura 5.8 Profilele de temperatură ale agentului secundar în timpul etapelor de încălzire și răcire în Grupul B

Analiza rezultatelor experimentale arată că sistemul este foarte eficient în extragerea și stocarea căldurii din surse cu temperaturi variabile. Testul 8, realizat la 70°C, a demonstrat cea mai bună performanță globală, cu o topire mai rapidă a PCM-ului, câștiguri termice mai mari și un transfer de căldură mai eficient comparativ cu Testele 3 și 5. De asemenea, Testul 5 a evidențiat o retenție termică eficientă, menținând temperaturi similare cu Testul 8, în ciuda unei temperaturi inițiale mai scăzute a agentului secundar. Testul 3, deși eficient, a arătat câștiguri termice mai mici, reflectând performanța constantă a sistemului la niveluri termice mai scăzute.

• GRUPUL C

În Grupul C, durata fazei de topire a fost extinsă de la 1 oră la 2 ore, rezultând într-o durată totală de testare de 4 ore, incluzând 2 ore de topire, urmate de 1 oră de încălzire și 1 oră de răcire. Această ajustare a fost făcută pentru a explora capacitatea sistemului de a recupera și stoca căldură eficient pe perioade mai lungi, în special pentru sursele de căldură de temperatură mai scăzută, așa cum a fost demonstrat în Testul 2, unde agentul primar a fost setat la 50°C. Testele 4, 6 și 10, realizate la temperaturi de 60°C, 65°C și 70°C, permit o comparație între diferite condiții termice.

Rezultatele principale pentru Grupul C sunt următoarele:

- Testul 2 (50°C): Materialul cu schimbare de fază (PCM) s-a topit complet la sfârșitul fazei de topire de 2 ore, demonstrând că o durată extinsă este mai eficientă pentru sursele de căldură de temperatură mai scăzută. În etapa de încălzire, temperatura PCM-ului s-a menținut aproape de limita de topire, iar la sfârșitul etapei de răcire, temperatura la ieșirea sistemului a fost de 32.8°C, indicând o retenție termică eficientă.
- Testul 4 (60°C): PCM-ul a atins faza completă de topire în 1 oră și 25 de minute, mai rapid decât în Testul 2. În timpul etapei de încălzire, agentul secundar a atins temperaturi mai ridicate comparativ cu Testul 2, iar în faza de răcire, s-a înregistrat o retenție termică mai bună, cu temperaturi la ieșire ale agentului secundar de 33.3°C și 35.7°C.
- Testul 6 (65°C): PCM-ul a topit complet în 53 de minute, indicând că o temperatură mai mare a agentului primar accelerează procesul de topire. În faza de încălzire, temperaturile au atins valori mai mari comparativ cu testele anterioare, iar în faza de răcire, PCM-ul a menținut temperaturi ridicate, cu o retenție termică superioară.
- Testul 10 (70°C): PCM-ul din partea inferioară a condensatorului a atins starea complet topită după doar 30 de minute, cu o topire completă realizată în 43 de minute. În etapa de încălzire, temperaturile maxime au fost de 66.0°C și 49.8°C la S4 și S5, respectiv, indicând o absorbție de căldură mai eficientă de către agentul secundar. În etapa de

răcire, sistemul a menținut temperaturi ridicate, similar cu Testul 6, demonstrând o capacitate excelentă de a reține căldura.

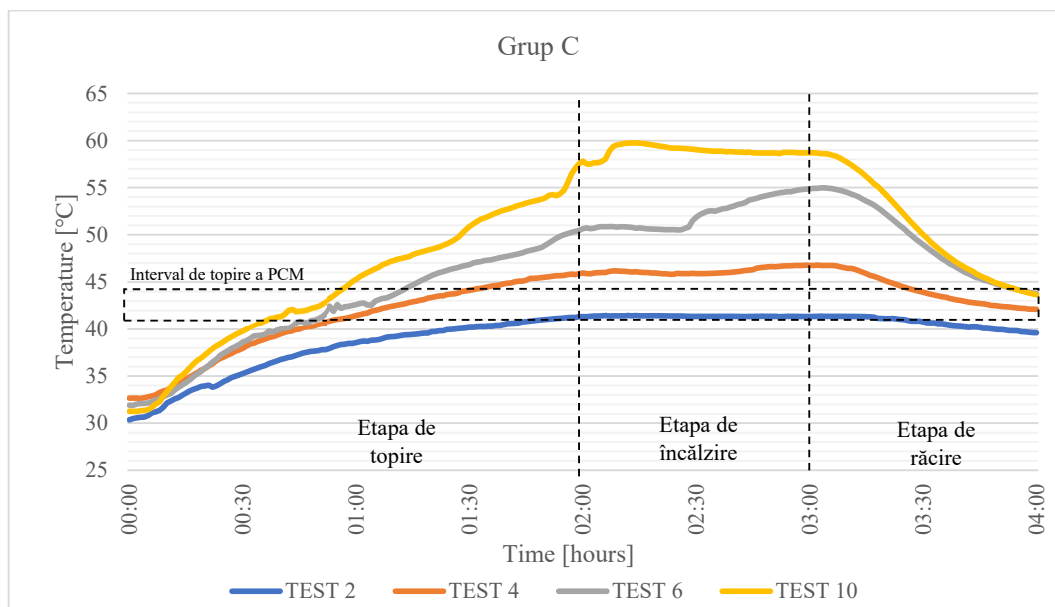


Figura 5.9 Evoluția temperaturii medii a PCM în timpul testelor 2, 4, 6 și 10

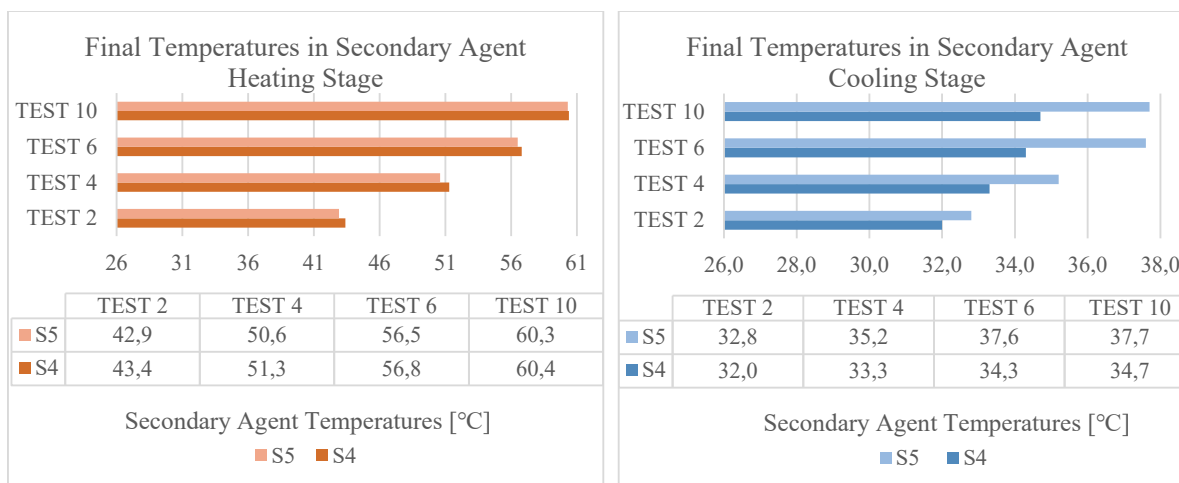


Figura 5.10 Profilele de temperatură ale agentului secundar în timpul etapelor de încălzire și răcire în Grupul C

Analiza testelor din Grupul C arată că extinderea duratei fazei de topire îmbunătățește eficiența sistemului în recuperarea și stocarea căldurii, în special pentru sursele de căldură de temperatură mai scăzută. Testele au demonstrat că temperaturile mai ridicate ale agentului primar accelerează procesul de topire și îmbunătățesc transferul termic, cu Testul 10 (70°C) oferind cele mai bune rezultate în ceea ce privește retenția termică și transferul de căldură. De asemenea, s-a evidențiat că sistemul este capabil să funcționeze eficient chiar și la temperaturi mai scăzute, precum în Testul 2 (50°C), deși cu o eficiență termică generală mai scăzută.

5.4.3 Grupurile D, E și F: Analiza performanței sistemului la temperaturi constante cu durate variabile

Această secțiune investighează efectele duratei fazei de topire asupra performanței sistemului la aceeași temperatură a agentului primar. Fiecare grup examinează o setare de temperatură distinctă, analizând modul în care variația duratei testului influențează eficiența termică și stabilitatea, după cum urmează:

*Tabel 5.6
Parametrii experimentali pentru Grupurile D, E și F*

Grup	Nr. Test	Temp. agent primar [°C]	Temp. medie agent secundar [°C]	Debit agent secundar [l/min]	Durată [ore]	Debit agent primar [l/min]
GRUP D	Test 3	60	29.5	2	3	22
	Test 4		28.5		4	
GRUP E	Test 5	65	26.7	2	3	22
	Test 6		25.8		4	
GRUP F	Test 8	70	29.0	2	3	22
	Test 10		25.9		4	

• GRUPUL D

Grupul D explorează impactul duratei testului asupra comportamentului termic prin compararea Testului 3, cu o durată standard de 3 ore, cu Testul 4, care se extinde la 4 ore (2 ore de topire, 1 oră de încălzire și 1 oră de răcire). Ambele teste utilizează o temperatură a agentului primar de 60°C, permițând o comparație directă a modului în care durata extinsă influențează capacitatea sistemului de a recupera, stoca și utiliza energia termică.

Rezultatele principale pentru Grupul D sunt următoarele:

- Faza de topire: Prelungirea duratei fazei de topire de la 1 oră (Testul 3) la 2 ore (Testul 4) a condus la o absorbție și retenție termică îmbunătățite ale PCM-ului. La sfârșitul fazei de topire, Testul 4 a arătat o temperatură medie cu 4.6°C mai mare decât Testul 3, indicând o absorbție mai eficientă a căldurii.
- Faza de încălzire: Testul 4 a menținut o temperatură cu 2.8°C mai mare decât Testul 3 (46.8°C vs. 44.0°C), ceea ce reflectă o retenție continuă a căldurii. Acest lucru sugerează că prelungirea fazei de topire crește energia termică stocată în PCM, rezultând într-un transfer de căldură mai eficient în timpul fazei de încălzire.

- Faza de răcire: Testul 4 a prezentat o diferență de temperatură de 0.9°C față de Testul 3 (42.1°C vs. 41.2°C), indicând o retenție termică ușor mai bună. Aceasta demonstrează că extinderea perioadei de topire nu doar a îmbunătățit absorbția de căldură în timpul fazei de încălzire, ci a contribuit și la o retenție mai bună a energiei termice în PCM, permițând o eliberare mai susținută de căldură către agentul secundar în timpul fazei de răcire.

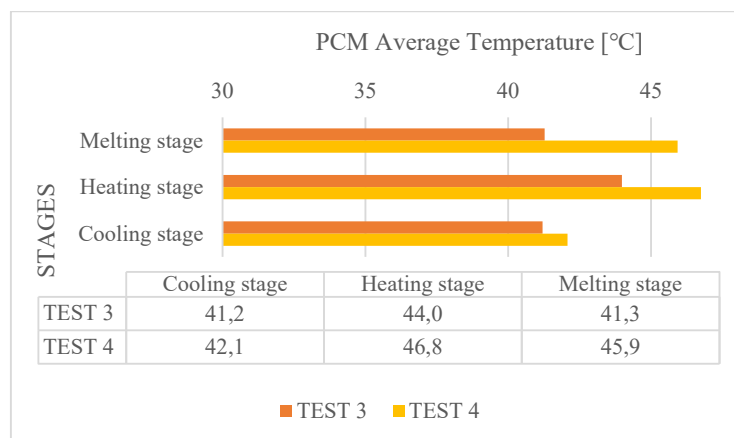


Figura 5.11 Temperaturile medii ale PCM la sfârșitul etapelor de topire, încălzire și răcire pentru grupul D

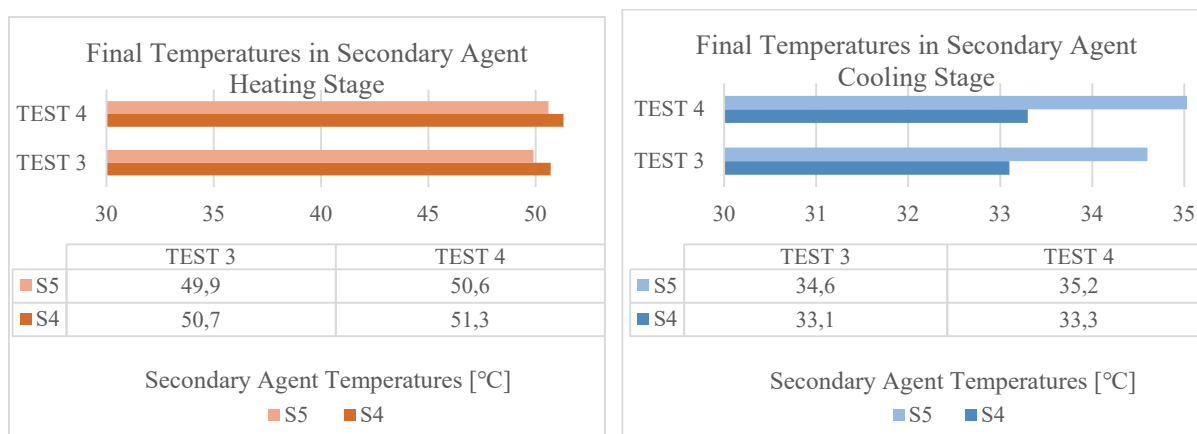


Figura 5.12 Profilele de temperatură ale agentului secundar în timpul etapelor de încălzire și răcire în Grupul D

Prelungirea duratei fazei de topire a demonstrat o îmbunătățire semnificativă a capacității PCM-ului de a absorbi și stoca energie termică, ceea ce a dus la o eficiență termică sporită pe parcursul întregii durate a testului. În plus, această extindere a permis un transfer de căldură mai eficient către agentul secundar în timpul fazei de încălzire și o retenție termică ușor superioară în timpul fazei de răcire. Aceste rezultate sugerează că durata extinsă de topire poate optimiza performanța sistemului în condiții de temperatură constantă a agentului primar.

• GRUPUL E

În Grupul E, ambele teste funcționează la o temperatură constantă a agentului primar de 65°C, dar diferă în durata fazei de topire. Testul 5 a urmat o durată standard de 1 oră pentru topire, 1 oră de încălzire și 1 oră de răcire, în timp ce Testul 6 a extins faza de topire la 2 ore, menținând aceleași durate pentru fazele ulterioare de încălzire și răcire.

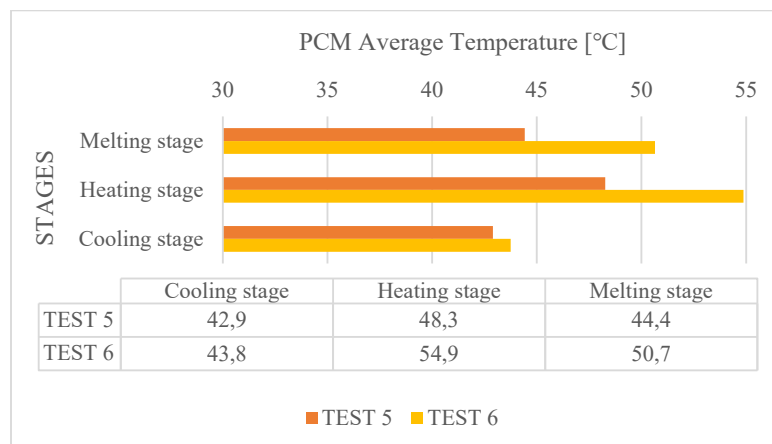


Figura 5.13 Temperaturile medii ale PCM la sfârșitul etapelor de topire, încălzire și răcire pentru grupul E

Rezultatele principale pentru Grupul E sunt următoarele:

- Comportamentul PCM-ului: În Testul 6, extinderea duratei fazei de topire la 2 ore a permis PCM-ului să atingă o temperatură medie mai mare în toate etapele. În timpul fazei de topire, PCM-ul a ajuns la 50,7°C, comparativ cu 44,4°C în Testul 5, indicând o absorbție mai eficientă a căldurii. Această diferență s-a menținut și în faza de încălzire, unde PCM-ul din Testul 6 a înregistrat o temperatură medie de 54,9°C, față de 48,3°C în Testul 5. În faza de răcire, PCM-ul din Testul 6 a reținut mai bine căldura, răcindu-se până la 43,8°C, comparativ cu 42,9°C în Testul 5.
- Temperaturile agentului secundar: În timpul fazei de încălzire, Testul 6 a prezentat temperaturi ușor mai ridicate la ieșirea agentului secundar, cu S5 atingând 56,5°C, comparativ cu 54,7°C în Testul 5. Aceasta sugerează că faza extinsă de topire a îmbunătățit transferul de căldură de la PCM către agentul secundar. În faza de răcire, deși Testul 5 a arătat temperaturi inițial mai ridicate la ieșire, Testul 6 a demonstrat un câștig de temperatură mai mare din PCM, cu o diferență de 3,3°C între ieșirile S5 și S4, comparativ cu 2,6°C în Testul 5.

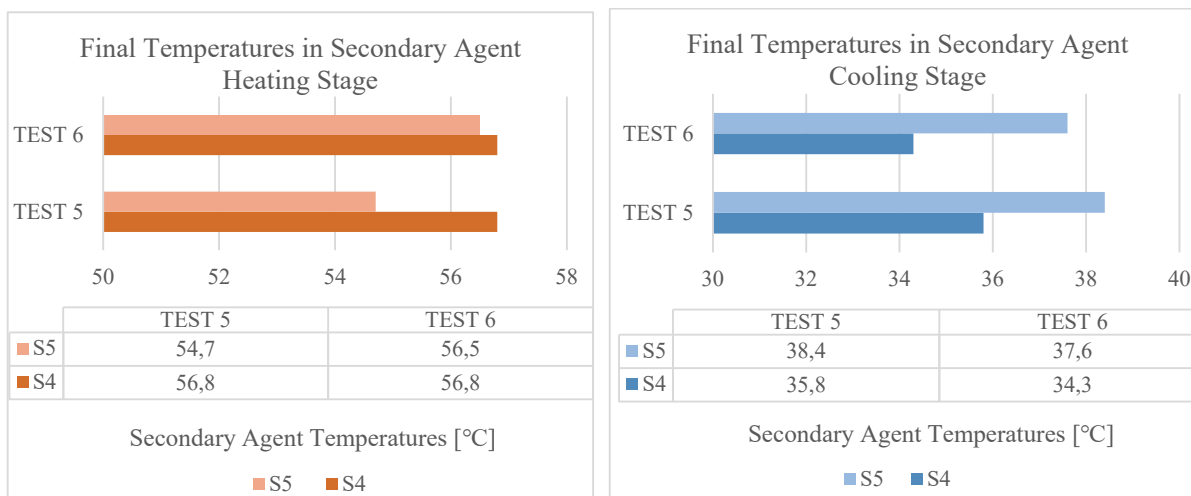


Figura 5.14 Profilele de temperatură ale agentului secundar în timpul etapelor de încălzire și răcire în Grupul E

Extinderea duratei fazei de topire în Testul 6 a dus la o absorbție mai eficientă a căldurii de către PCM și la o retenție termică superioară. Aceasta a avut un impact direct asupra temperaturilor agentului secundar, care a beneficiat de un transfer de căldură mai eficient atât în faza de încălzire, cât și în faza de răcire. Astfel, prelungirea duratei de topire la 65°C optimizează performanța sistemului, îmbunătățind atât stocarea termică în PCM, cât și eficiența în livrarea de apă caldă prin agentul secundar.

• GRUPUL F

În Grupul F, Testele 8 și 10 sunt evaluate la o temperatură constantă a agentului primar de 70°C, dar cu durate totale de testare diferite: 3 ore pentru Testul 8 și 4 ore pentru Testul 10. Rezultatele principale pentru Grupul F sunt următoarele:

- **Comportamentul PCM-ului:** În Testul 10, temperatura medie a PCM-ului în timpul fazei de topire a atins 57,8°C, semnificativ mai mare decât cei 47,2°C înregistrați în Testul 8. Aceasta indică o absorbție mai eficientă a căldurii datorită expunerii prelungite la agentul primar de 70°C în Testul 10, ceea ce a dus la o stocare termică mai bună. În faza de încălzire, Testul 10 a menținut o temperatură medie de 58,7°C, depășind din nou Testul 8, care s-a stabilizat la 52,3°C. Totuși, în faza de răcire, temperaturile PCM-ului au scăzut în ambele teste, Testul 10 menținând temperaturi ușor mai scăzute (43,6°C) comparativ cu Testul 8 (44,0°C). Acest lucru sugerează că, deși Testul 10 a absorbit mai multă căldură în timpul fazelor extinse de topire și încălzire, Testul 8 a demonstrat o retenție mai bună și o eliberare mai graduală a energiei termice către agentul secundar în faza de răcire.

- Temperaturile agentului secundar: În faza de încălzire, Testul 10, cu durata sa extinsă, a atins temperaturi ușor mai mari la ieșire, ajungând la 60,3°C la S5 și 60,4°C la S4, comparativ cu 58,2°C și 59,9°C în Testul 8. Acest lucru indică un transfer de căldură mai eficient în faza de încălzire, datorită energiei mai mari stocate în PCM. În faza de răcire, Testul 8 a arătat temperaturi ușor mai ridicate la ieșirile S5 (38,5°C) și S4 (35,8°C), comparativ cu Testul 10, unde temperaturile finale au fost de 37,7°C și 34,7°C. Deși Testul 10 a avut o stocare termică mai mare, temperatura inițială mai ridicată a agentului secundar în Testul 8 a contribuit la o retenție mai bună a căldurii în faza de răcire.

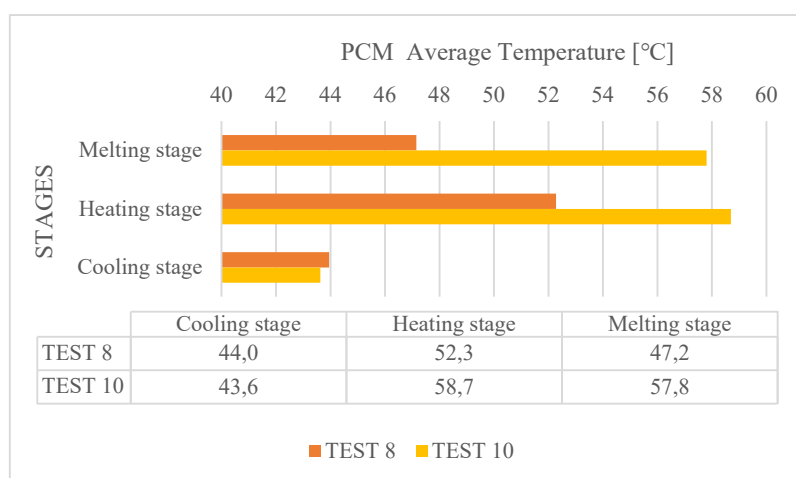


Figura 5.15 Temperaturile medii ale PCM la sfârșitul etapelor de topire, încălzire și răcire pentru Grupul F

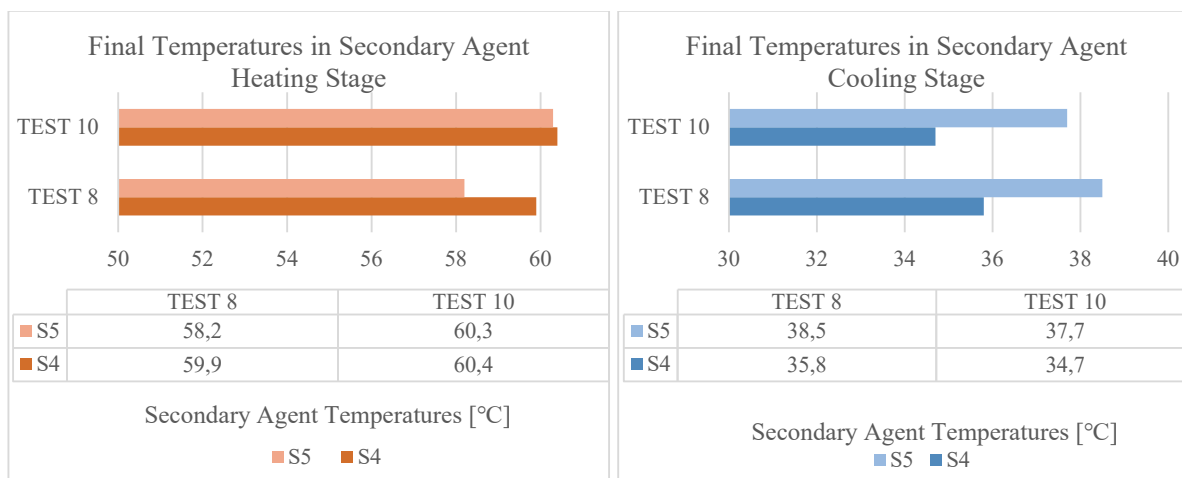


Figura 5.16 Profilele de temperatură ale agentului secundar în timpul etapelor de încălzire și răcire în Grupul F

Testul 10, cu durata sa extinsă, a demonstrat o absorbție superioară a căldurii în PCM și temperaturi mai ridicate în timpul fazei de încălzire, ceea ce sugerează o eficiență termică mai bună în această etapă. Cu toate acestea, Testul 8 a arătat o retenție termică mai bună în faza de răcire, cu o

eliberare mai graduală a căldurii către agentul secundar. Aceasta indică faptul că, deși prelungirea duratei testului poate îmbunătăți stocarea inițială a energiei termice, o durată mai scurtă poate fi mai eficientă în menținerea temperaturilor mai ridicate ale agentului secundar pe termen lung.

5.4.4 Grup G: Influența variațiilor debitului asupra performanței sistemului

În Grupul G, am analizat sistematic efectul variației debitului agentului secundar asupra performanței sistemului, menținând o temperatură constantă a agentului primar de 70°C pe durata fiecărui test de 3 ore.

Tabel 5.7
Parametrii experimentali pentru Grupurile D, E și F

Grup	Nr. Test	Temp. agent primar [°C]	Temp. medie agent secundar [°C]	Debit agent secundar [l/min]	Durată [ore]	Debit agent primar [l/min]
GRUP G	Test 7	70	30.6	1	3	22
	Test 8		29.0	2		
	Test 9		30.7	3		

Rezultatele principale pentru Grupul G sunt următoarele:

- Comportamentul PCM-ului: Testele au arătat că durata fazei de topire este influențată doar ușor de variația debitului agentului secundar. De exemplu, în Testul 7 (debit de 1 l/min), PCM-ul atinge pragul de topire de 41°C la 26 de minute, similar cu Testul 8 (debit de 2 l/min), unde această temperatură este atinsă în 23 de minute. Deși timpul de topire este comparabil, Testul 7 a prezentat o absorbție de căldură mai eficientă și o retenție termică superioară în timpul fazei de încălzire și răcire.
- Temperaturile agentului secundar: În timpul fazei de încălzire, Testul 7, cu un debit de 1 l/min, a demonstrat o absorbție termică mai eficientă, cu temperaturi la ieșirea agentului secundar de 61.9°C la S4 și 59.8°C la S5, comparativ cu 59.9°C și 58.2°C în Testul 8 (debit de 2 l/min) și 56.5°C și 55.7°C în Testul 9 (debit de 3 l/min). Acest lucru sugerează că un debit mai redus permite un contact mai prelungit între agentul secundar și PCM, facilitând o absorbție și retenție termică mai eficientă.
- Faza de răcire: Testul 7 a menținut o temperatură mai ridicată la ieșire în timpul fazei de răcire, cu valori de 41.8°C la S5 și 39.5°C la S4, comparativ cu Testele 8 și 9, care au înregistrat o scădere mai rapidă a temperaturilor. Această tendință subliniază faptul

că un debit mai redus contribuie la o utilizare mai eficientă a energiei termice stocate în PCM, menținând temperaturi mai ridicate pe o perioadă mai lungă de timp.

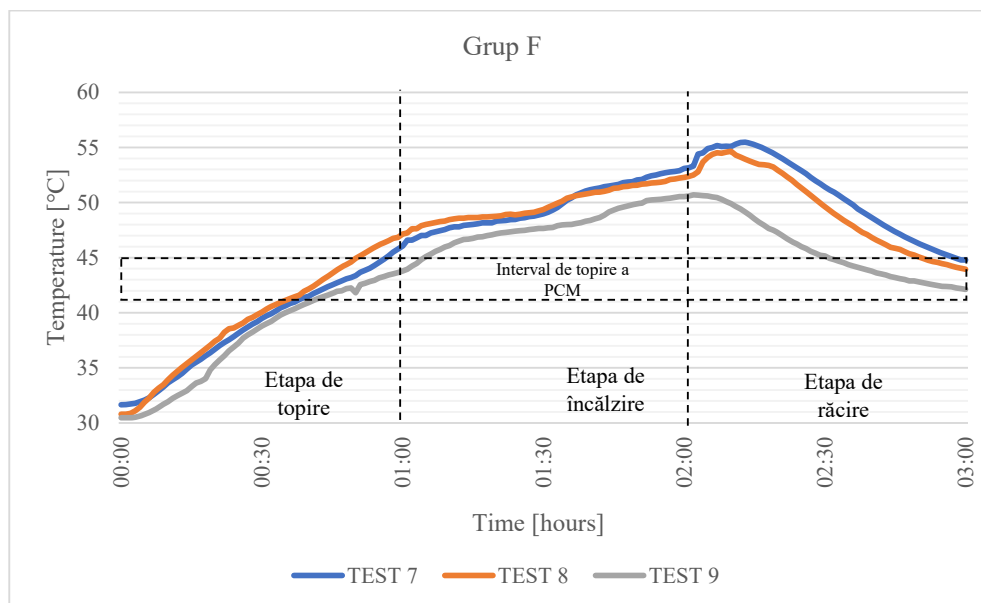


Figura 5.17 Evoluția temperaturii medii a PCM în timpul testelor 7, 8 și 9

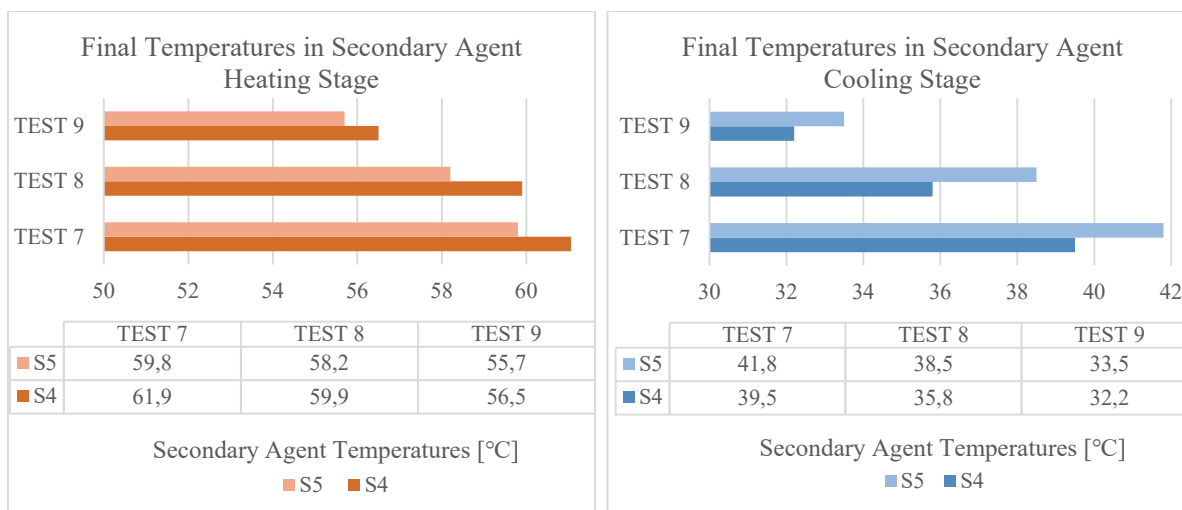


Figura 5.18 Pofilele de temperatură ale agentului secundar în timpul etapelor de încălzire și răcire în Grupul G

Analiza arată că un debit mai redus al agentului secundar, cum este cazul în Testul 7 (1 l/min), îmbunătățește semnificativ eficiența transferului de căldură și retenția termică în sistem. Aceasta se datorează timpului mai îndelungat de contact dintre agentul secundar și PCM, ceea ce permite o absorbție și stocare termică mai eficientă. În contrast, debitele mai mari, observate în Testele 8 și 9, au dus la o scădere mai rapidă a temperaturilor, indicând o utilizare mai puțin eficientă a energiei termice stocate în PCM. Astfel, debitul agentului secundar este un parametru critic care influențează

performanța globală a sistemului, iar un debit redus se dovedește a fi mai eficient pentru maximizarea transferului de căldură și retenției energetice.

5.5 Eficiența și performanța sistemului

Eficiența sistemului de recuperare a căldurii este evaluată prin eficacitatea sa termică, definită ca raportul dintre rata reală de transfer de căldură și rata maximă posibilă de transfer de căldură. Eficiența sistemului variază în funcție de temperatura agentului primar și de debitul agentului secundar.

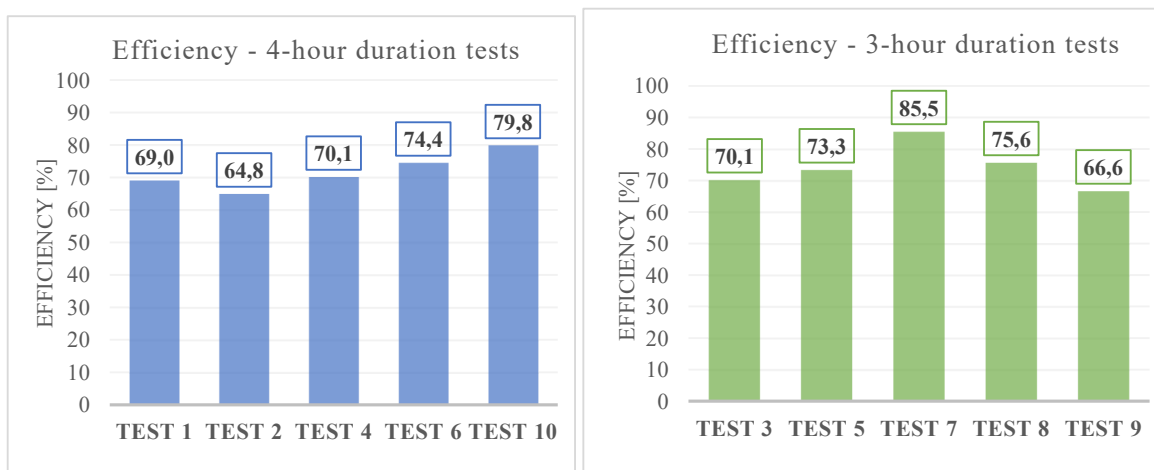


Figura 5.19 Eficiența medie a sistemului de recuperare a căldurii pe diferite durate de testare

Rezultatele principale:

- Eficiența sistemului: În testele de 4 ore, eficiența sistemului a crescut odată cu temperaturile mai ridicate ale agentului primar. Testul 10, efectuat la 70°C, a înregistrat cea mai mare eficiență de 79,8%, urmat de Testul 6 la 74,4% și Testul 4 la 70,1%. Testul 1, fără izolație, a avut o eficiență de 69,0%, în timp ce Testul 2, la cea mai scăzută temperatură a agentului primar de 50°C, a avut cea mai mică eficiență de 64,8%. Aceste rezultate indică faptul că temperaturile mai ridicate ale agentului primar îmbunătățesc performanța sistemului.
- Debitul agentului secundar: În testele de 3 ore, Testul 7, cu un debit de 1 l/min și o temperatură a agentului primar de 70°C, a obținut cea mai mare eficiență de 85,5%. Creșterea debitului la 2 l/min în Testul 8 a dus la o eficiență de 75,6%, iar un debit mai mare de 3 l/min în Testul 9 a redus eficiența la 66,6%. Acest lucru sugerează că debitele mai mici ale agentului secundar contribuie la optimizarea performanței sistemului, permițând o absorbție mai eficientă a căldurii.

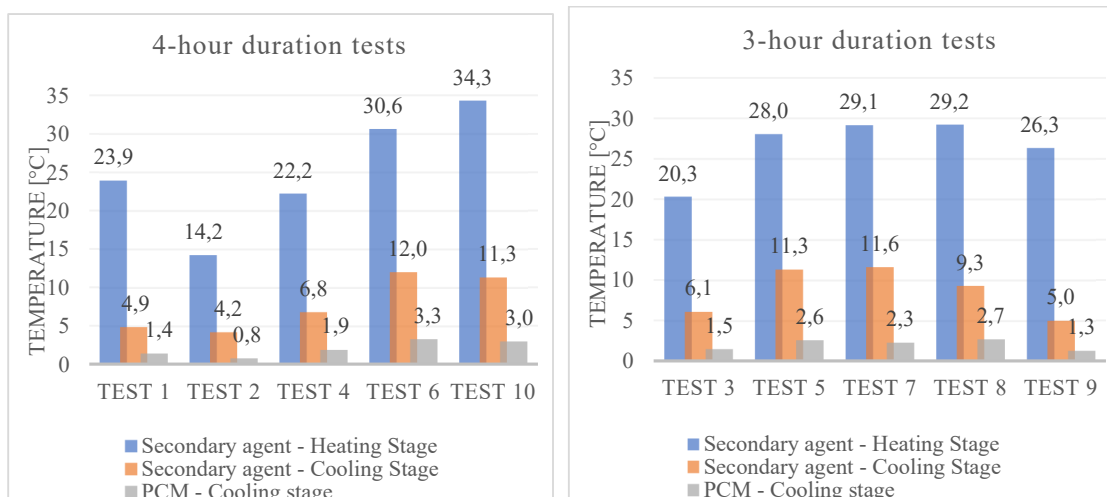


Figura 5.20 Rezumatul diferențelor de temperatură în timpul etapelor de încălzire și răcire pentru diferite durate de testare

Diferențiale de temperatură în timpul fazelor de încălzire și răcire:

- Faza de încălzire: Diferențele de temperatură ale agentului secundar în timpul fazei de încălzire arată o corelație clară cu durata și temperatura agentului primar. Testul 10, cu o temperatură a agentului primar de 70°C, a atins cea mai mare diferență de temperatură de 34,3°C, evidențiind capacitatea sistemului de a maximiza absorbția căldurii în condiții de temperaturi ridicate și expunere prelungită;
- Faza de răcire: În faza de răcire, Testul 6 (65°C, 4 ore) a prezentat o diferență de temperatură de 12,0°C, indicând o retenție și o eliberare eficientă a căldurii de către PCM. Contribuția PCM-ului la eliberarea căldurii a fost cea mai pronunțată în Testele 6 și 10, unde diferențialele de temperatură între S4 și S5 au fost de 3,3°C și, respectiv, 3,0°C, sugerând o stocare și o eliberare mai eficientă a căldurii latente.

5.6 Concluzii parțiale

În cadrul cercetării, au fost realizate 10 teste experimentale pe un sistem inovator de recuperare și stocare a căldurii reziduale, având ca obiectiv maximizarea recuperării, stocării și utilizării energiei termice. Testele au fost desfășurate pe perioade de 3 sau 4 ore și au evaluat performanța sistemului, precum și capacitatea materialului cu schimbare de fază, parafina RT44HC, de a stoca energie termică. Analiza a fost organizată în grupuri, fiecare axându-se pe aspecte specifice, cum ar fi izolația, temperatura agentului primar, durata fazei de topire și variațiile debitului agentului secundar. Din aceste teste, se pot trage câteva concluzii parțiale esențiale:

- Grupul A (Izolație): Izolația s-a dovedit a fi esențială pentru îmbunătățirea capacității sistemului de a reține căldura. Testul 4, care a utilizat izolație, a arătat o topire mai rapidă a PCM-ului și o răcire mai lentă, confirmând astfel eficiența termică superioară și retenția prelungită a căldurii în sistemul izolat comparativ cu Testul 1, neizolat.
- Grupul B (Temperatura agentului primar): Temperaturile mai ridicate ale agentului primar au accelerat procesul de topire a parafinei și au îmbunătățit stocarea căldurii. Testul 8, efectuat la 70°C, a demonstrat cea mai bună performanță, obținând cele mai mari câștiguri de temperatură și cel mai eficient transfer de căldură, subliniind astfel că temperaturile mai ridicate ale agentului primar sporesc eficiența sistemului în captarea și stocarea energiei termice.
- Grupul C (Durata fazei de topire): Extinderea duratei fazei de topire la 2 ore a fost deosebit de benefică în Testul 2 (50°C), unde timpul suplimentar a permis parafinei să absoarbă și să stocheze eficient căldura latentă. În schimb, la temperaturi mai ridicate, cum ar fi în Testul 10 (70°C), sistemul a demonstrat o gestionare termică superioară, realizând topirea completă într-un timp mult mai scurt și menținând temperaturi mai ridicate în agentul secundar.
- Grupurile D, E și F (Durata fazei de topire la temperaturi constante): Rezultatele au arătat că prelungirea fazei de topire de la 1 oră la 2 ore îmbunătățește semnificativ capacitatea PCM-ului de a absorbi și stoca căldură. Totuși, performanța optimă depinde de temperatura agentului primar, iar durata fazei de topire trebuie echilibrată atent pentru a maximiza eficiența termică.
- Grupul G (Variațiile debitului agentului secundar): Debitele mai mici ale agentului secundar, cum s-a observat în Testul 7 (1 l/min), au îmbunătățit atât eficiența transferului de căldură, cât și retenția termică. Testele au arătat că debitele mai mari duc la o pierdere mai rapidă a energiei termice, subliniind importanța optimizării debitului pentru a echilibra eficiența transferului de căldură și retenția energiei în sistemele bazate pe PCM.

6. Concluzii Generale și Contribuții Personale Originale

6.1 Rezumatul principalelor constatări și concluzii generale

Obiectivul principal al acestei cercetări a fost reproiectarea, reconfigurarea și optimizarea unui sistem existent de recuperare și stocare a căldurii reziduale de tip apă-apă. Scopul a fost îmbunătățirea capacității sistemului de a capta, stoca și utiliza energia termică din fluidele reziduale generate în diverse procese tehnologice. Principalele obiective abordate și soluționate în această teză au inclus combinarea funcțiilor de recuperare și stocare a căldurii într-o unitate compactă, pentru a reduce necesarul de spațiu, creșterea eficienței stocării energiei termice latente și îmbunătățirea transferului de căldură, cu scopul final de a îmbunătăți eficiența operațională a sistemului.

Metodologia cercetării a fost împărțită în două etape principale:

1. Simulări numerice

În prima etapă, au fost realizate 12 simulări numerice pentru optimizarea unui sistem de recuperare și stocare a căldurii utilizând tuburi termice și ulei de cocos ca material cu schimbare de fază (PCM). Simulările au arătat că debitele mai mici ale agentului secundar, diametrele mai mici ale tuburilor termice și temperaturile mai ridicate ale agentului primar au îmbunătățit semnificativ transferul și absorbția de căldură, conducând la o performanță superioară a sistemului. Cu toate acestea, uleiul de cocos s-a dovedit suboptimal în ceea ce privește eficiența transferului de căldură, ceea ce a condus la reproiectarea sistemului, inclusiv la selectarea unui PCM mai potrivit și integrarea unor tuburi termice de înaltă eficiență.

2. Testarea în laborator

Pe baza rezultatelor simulărilor, a fost construit și testat în laborator un sistem optimizat. Testele experimentale au fost structurate pentru a evalua diferite aspecte ale performanței sistemului. Izolația s-a dovedit esențială pentru îmbunătățirea retenției de căldură, în timp ce temperaturile mai ridicate ale agentului primar au sporit eficiența generală a sistemului. Extinderea duratei fazei de topire s-a dovedit benefică pentru absorbția și stocarea căldurii, în special la temperaturi mai scăzute, iar debitele mai mici ale agentului secundar au optimizat transferul de căldură și stocarea termică.

Concluzia finală a cercetării efectuate în această teză de doctorat este că noul sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale a fost dezvoltat cu succes ca o soluție compactă care integrează funcțiile de recuperare și stocare într-o singură unitate eficientă. Acest sistem inovator încorporează tuburi termice eficiente și un nou material cu schimbare de fază, îmbunătățindu-i

semnificativ eficiența generală. Sistemul optimizat a atins o eficiență de 85,5% în cel mai bun scenariu și a demonstrat capacitatea de a recupera, stoca și utiliza căldura chiar și din surse cu temperatură scăzută, cum ar fi 50°C, cu o eficiență de 64,8%. Această cercetare a introdus o metodă inovatoare și extrem de eficientă de gestionare a energiei termice, deschizând calea pentru abordări mai sustenabile în domeniul Inginerie Civilă și Instalații.

6.2 Contribuții originale

Această secțiune rezumă contribuțiile personale și originale realizate în urma cercetării desfășurate în cadrul programului meu de doctorat în Inginerie Civilă și Instalații la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași și Aix-Marseille Université. În urma finalizării cercetării doctorale, am realizat următoarele contribuții semnificative:

- Am examinat un volum extins de literatură de specialitate pentru a înțelege pe deplin importanța fundamentală a acestei cercetări, explorând provocările în recuperarea căldurii reziduale, sursele potențiale și tehnicile pentru o recuperare și utilizare eficientă a energiei.
- Am realizat o analiză și sinteză cuprinzătoare a celor mai recente progrese în domeniul tuburilor termice, evaluând utilizările și limitele acestora în sistemele de recuperare a căldurii reziduale.
- Am investigat stadiul actual al cunoașterii privind materialele cu schimbare de fază, concentrând sinteza pe proprietățile, tipurile și aplicațiile acestora, ceea ce a condus la selecția parafinei RT44HC pentru sistemul nou, datorită caracteristicilor sale termice superioare.
- Am analizat și sintetizat informații despre sistemele de stocare a căldurii sensibile și latente, contribuind la o înțelegere mai profundă a tehnologiilor de stocare existente și a limitărilor acestora.
- Am utilizat ANSYS 2022 pentru a efectua simulări numerice în vederea optimizării metodice a parametrilor sistemului de recuperare a căldurii reziduale, aceste simulări fiind esențiale în dezvoltarea bazei conceptuale a modelului experimental.
- Am colaborat cu un expert din industrie pentru a dezvolta și implementa tuburi termice adaptate specific pentru această aplicație, depășind limitările impuse de tuburile termice fabricate în laborator.
- Am construit și testat un nou sistem de recuperare și stocare a căldurii de design original, care integrează într-o unitate compactă tuburi termice de înaltă eficiență și un material cu schimbare de fază nou, combinând eficient funcțiile de recuperare și stocare.

- Am explorat aplicațiile posibile ale sistemului nou de recuperare a căldurii reziduale, prezentând sectoarele viabile unde acest sistem ar putea fi implementat.

Aceste contribuții subliniază abordarea inovatoare adoptată în această cercetare, avansând semnificativ domeniul recuperării căldurii reziduale și al stocării energiei termice.

6.3 Explorarea aplicațiilor potențiale ale noului sistem de recuperare și stocare a căldurii reziduale

Acest capitol explorează aplicațiile posibile și sursele de căldură pentru sistemul inovator de recuperare și stocare a căldurii dezvoltat în cadrul cercetării, demonstrând scalabilitatea și posibilitatea utilizării acestuia în diverse sectoare. Având în vedere tendințele globale actuale în producția și consumul de energie, precum și politicile care promovează utilizarea surselor regenerabile și reducerea emisiilor de dioxid de carbon, atenția este concentrată pe valorificarea energiei din surse reziduale.

- Caracteristicile cheie ale sistemului:
 - Sistemul este capabil să capteze eficient energia termică din surse cu temperaturi cuprinse între 50°C și 70°C, făcându-l potrivit pentru o gamă largă de surse de căldură reziduală.
 - Sistemul utilizează tuburi termice de înaltă eficiență, care maximizează transferul de căldură și permit producerea instantanee de apă caldă.
 - Sistemul integrează parafina RT44HC ca material cu schimbare de fază, pentru a stoca eficient energia termică pentru utilizări pe termen scurt, asigurând funcționarea continuă atunci când sursa principală de căldură nu este disponibilă.
 - Sistemul combină funcțiile de recuperare și stocare a energiei termice într-o singură unitate compactă, îmbunătățind eficiența generală și adaptabilitatea pentru diverse aplicații.

- Aplicații potențiale:

1. **Aplicația 1: Uz rezidențial**

- **Sursă de căldură:** Sistemul poate captura excesul de căldură din apa caldă produsă de panourile solare PV/T, care sunt comune în aplicațiile rezidențiale și încălzesc apa la aproximativ 50°C (Mellor et al., 2018).
- **Utilizare:** Sistemul reduce energia necesară pentru prepararea apei calde menajere, făcând procesul mai eficient din punct de vedere energetic și mai rentabil;

- **Stocare:** Sistemul permite stocarea căldurii captate pentru utilizare pe termen scurt, asigurând disponibilitatea apei calde chiar și în perioadele cu iradiere solară scăzută;

2. Aplicația 2: Uz industrial

- **Industrii:** Industria celulozei și hârtiei, industria textilă, industria produselor lactate și industria alimentară;
- **Sursa de căldură:** Sistemul poate recupera căldura din apele reziduale generate în diverse procese industriale, cum ar fi spălarea și înălbirea în industria celulozei și hârtiei, vopsirea și finisarea în industria textilă, pasteurizarea și curățarea în industria lactatelor, și procesele de răcire în industria alimentară;
- **Utilizare:** Căldura recuperată poate fi utilizată pentru preîncălzirea apei de alimentare a boilerelor, încălzirea spațiilor sau preîncălzirea apei pentru cicluri ulterioare, reducând astfel consumul total de energie al instalațiilor industriale;
- **Stocare:** Sistemul permite stocarea căldurii reziduale din procesele industriale pentru a fi utilizată ulterior, optimizând utilizarea energiei și contribuind la practici industriale mai sustenabile;

6.4 Valorificarea rezultatelor cercetării

Sistemul inovator de recuperare și stocare a căldurii reziduale dezvoltat în cadrul acestei cercetări reprezintă un progres semnificativ în domeniul gestionării energiei termice. Prin oferirea unei soluții eficiente pentru captarea și utilizarea căldurii reziduale în diverse sectoare, acest sistem contribuie în mod substanțial la eforturile globale de sporire a sustenabilității energetice și de reducere a emisiilor de carbon. Capacitatea sistemului de a reduce consumul de energie pentru prepararea apei calde menajere și preîncălzirea agenților termici subliniază valoarea sa practică. Rezultatele numerice și experimentale prezentate în această teză oferă o bază solidă pentru optimizări ulterioare, permițând adaptarea sistemului pentru aplicații specifice. Această cercetare nu doar că propune o abordare inovatoare, dar creează și oportunități pentru implementarea sa în alte industrii, având potențialul de a genera practici mai sustenabile și eficiente energetic la nivel global. Constatările acestei teze pot servi drept model pentru viitoarele avansări în tehnologia de recuperare și stocare a căldurii, promovând creșterea atât în mediul academic, cât și în cel industrial. Pe parcursul cercetării doctorale, rezultatele au fost diseminate prin următoarele publicații și contribuții:

- Echiparea Departamentului de Instalații de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași cu un nou sistem de recuperare și stocare a căldurii. Acest sistem, care include

tuburi termice de înaltă eficiență și un material cu schimbare de fază superior, contribuie direct la dezvoltarea și eforturile continue de cercetare ale universității;

- Promovarea adoptării sistemelor inovatoare de recuperare și stocare a căldurii, pentru implementarea în sectoarele industrial și rezidențial. Aceste sisteme sunt concepute pentru a valorifica excesul de căldură sau căldura reziduală din diverse procese, transformând-o în energie utilizabilă, îmbunătățind astfel eficiența energetică și sustenabilitatea;
 - Publicarea unui articol în “Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași”, un jurnal național indexat în BDI:
1. **Vizitiu Ștefănică-Eliza**, Burlacu Andrei and Vizitiu Robert Ștefan. "THERMAL COMFORT ANALYSIS IN ROOMS USING LOW TEMPERATURE CONVECTIVE AND RADIANT HEATING TERMINALS" *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section*, vol.68, no.1, 2022, pp.141-150
<https://doi.org/10.2478/bipca-2022-0009>
 - Publicarea unui articol în revista "Materials", MDPI (ISSN 1996-1944), un jurnal indexat ISI Web of Science, în zona roșie, cu un factor de impact de 3.748:
 2. Vizitiu Robert Ștefan, Andrei Burlacu, Chérifa Abid, Marius Costel Balan, **Ștefănică Eliza Vizitiu**, Marius Branoaea, and Nicoleta Elena Kaba. "INVESTIGATING THE EFFICIENCY OF A HEAT RECOVERY-STORAGE SYSTEM USING HEAT PIPES AND PHASE CHANGE MATERIALS". *Materials*, 2023, 16, 2382.
<https://doi.org/10.3390/ma16062382>
 - Publicarea unei lucrări în "Proceedings of the 17th International Conference on Interdisciplinarity in Engineering (Inter-ENG 2023)", publicate în jurnalul Lecture Notes in Networks and Systems al Springer Nature (ISSN: 2367-3370), indexat ISI Web of Science:
 3. Mihai, R.G., Barbuta, M., Burlacu, A., Vizitiu, **Ș.E.**, **Vizitiu**, R.Ș. (2024). “INCORPORATING ECO-FRIENDLY MATERIALS IN WALL CONSTRUCTION: ENHANCING THERMAL PERFORMANCE AND SUSTAINABILITY”. In: *Moldovan, L., Gligor, A. (eds) The 17th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-ENG 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 929. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-54674-7_9
 - Publicarea unui articol științific în jurnalul "Sustainability" (ISSN 2071-1050), indexat ISI Web of Science , cu un factor de impact de 3.3, clasificat în zona galbenă:
 4. **Ștefănică-Eliza Vizitiu**, Chérifa Abid, Andrei Burlacu, Robert Ștefan Vizitiu, Marius-Costel Balan. 2024. "Strategic Optimization of Operational Parameters in a Low-Temperature Waste

Heat Recovery System: A Numerical Approach" *Sustainability* 16, no. 16: 7013.
<https://doi.org/10.3390/su16167013>

- Publicarea a 4 articole în volumele unor manifestări și conferințe științifice:
- 5. **Ștefănica-Eliza Vizitiu**, Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Marius Brănoaea, Marina Verdeș, Vasilică Ciocan, Marius-Costel Bălan, ANALIZA EFICIENȚEI UNUI RECUPERATOR DE CĂLDURĂ CU TUBURI TERMICE DE TIP APĂ-AER PRIN SIMULARE NUMERICĂ, Revista Ingineria Instalațiilor, Nr.3/2022, https://www.aiiro.ro/upload/files/reviste/RII_3-2022_compressed.pdf
- 6. Marius Brănoaea, Andrei Burlacu, Marina Verdeș, Vasilică Ciocan, Marius-Costel Bălan, Robert Ștefan Vizitiu, **Ștefănica-Eliza Vizitiu**, "SISTEME FOTOVOLTAIC-TERMICE HIBRIDE CU EFICIENȚĂ ENERGETICĂ RIDICATĂ", Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională INSTALAȚII PENTRU CONSTRUCȚII ȘI ECONOMIA DE ENERGIE EDIȚIA a-XXXII a , 7-8 Iulie 2022, IAȘI, ROMÂNIA
- 7. Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, **Ștefănica-Eliza Vizitiu**, Marius Branoaea, Vasilica Ciocan, Marius- Costel Bălan, "ANALIZA COMPARATIVĂ A UNOR MATERIALE CU SCHIMBARE DE FAZĂ FOLOSITE ÎNTR-UN RECUPERATOR DE CĂLDURĂ", Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională INSTALAȚII PENTRU CONSTRUCȚII ȘI ECONOMIA DE ENERGIE EDIȚIA a-XXXI a , 1-2 Iulie 2021, IAȘI, ROMÂNIA.
- 8. **Ștefănica-Eliza Vizitiu**, Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Marius Branoaea, Marina Verdes, Vasilica Ciocan, Marius-Costel Balan, „ANALIZA CONFORTULUI TERMIC ÎN ÎNCĂPERI CE UTILIZEAZĂ SISTEME DE ÎNCĂLZIRE PRIN CONVECȚIE ȘI RADIAȚIE DE JOASĂ TEMPERATURĂ”, Conferința tehnico-științifică națională cu participare internațională INSTALAȚII PENTRU CONSTRUCȚII ȘI ECONOMIA DE ENERGIE EDIȚIA a-XXXI a , 1-2 Iulie 2021, IAȘI, ROMÂNIA.
- 2 articole științifice aflate în curs de revizuire pentru publicare în jurnalul "Sustainability", indexat ISI Web of Science, cu un factor de impact de 3.3, clasificat în zona galbenă [ID9: sustainability-3147037 si ID10 : sustainability-3172184]:
- 9. Robert Ștefan Vizitiu, **Ștefănica-Eliza Vizitiu**, Andrei Burlacu, Chérifa Abid, Marius-Costel Balan, Nicoleta Elena Kaba. „Experimental Investigation of a Water–Air Heat Recovery System”. *Sustainability* **2024**
- 10. Nicoleta Elena Kaba, Adrian Retezan, **Ștefănica-Eliza Vizitiu**, Robert Ștefan Vizitiu, Andrei Burlacu, Marius-Costel Balan, „ADVANCED THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS”. *Sustainability* **2024**
- Inițierea procesului de aplicare pentru brevet pentru noul sistem de recuperare și stocare a căldurii dezvoltat în această cercetare, subliniind importanța sa ca potențială proprietate intelectuală și aplicabilitatea sa în contexte industriale și rezidențiale reale;

6.5 Recomandări pentru cercetări ulterioare

Pe baza rezultatelor și dezvoltării sistemului de recuperare și stocare a căldurii reziduale prezentat în această teză, există mai multe direcții de cercetare care pot fi explorate pentru optimizarea continuă a sistemului:

- Investigarea unor materiale cu capacități de stocare îmbunătățite și puncte de topire diferite care ar putea crește eficiența stocării căldurii;
- Optimizarea numărului, configurației și poziționării tuburilor termice, care ar putea influența semnificativ eficiența transferului de căldură și performanța generală a sistemului, făcând această direcție o zonă importantă pentru explorare ulterioară;
- Optimizarea poziționării termocuplurilor în materialul cu schimbare de fază ar putea oferi citiri mai precise ale dinamicii topirii, îmbunătățind astfel acuratețea evaluărilor comportamentului termic;
- Creșterea suprafeței de transfer de căldură prin introducerea unor aripioare sau alte metode de creștere a suprafeței de transfer ar putea îmbunătăți capacitatea sistemului de a transfera căldură în timpul fazei de răcire, abordând în special absorbția limitată de căldură de către agentul secundar observată în acest studiu;
- Evaluarea potențialului sistemului pentru aplicații industriale mai mari și unități rezidențiale mai mici, extinzând aplicabilitatea sistemului prin adaptarea sa pentru diferite dimensiuni și tipuri de utilizatori;
- Îmbunătățirea designului constructiv și dezvoltarea unor configurații inovatoare care să permită utilizarea și investigarea altor agenți termici;
- Cercetări privind integrarea sistemului cu surse de energie regenerabilă, cum ar fi energia solară sau geotermală, care ar putea maximiza sustenabilitatea și eficiența sistemului;
- Realizarea de studii pe termen lung care să ofere date despre durabilitatea, eficiența și fiabilitatea sistemului în timp, subliniind potențialul acestuia în condiții reale;
- Analiza viabilității financiare și a rentabilității investiției pentru a determina fezabilitatea implementării sistemului;
- Identificarea parametrilor operaționali cei mai eficienți, cum ar fi timpii de topire, temperaturile agentului primar și debitele, pentru a asigura adaptabilitatea sistemului la diverse scenarii de recuperare a căldurii.

Bibliografie selectivă

1. Abbasi, M.H., Abdullah, B., Ahmad, M.W., Rostami, A., Cullen, J., 2021. Heat transition in the European building sector: Overview of the heat decarbonisation practices through heat pump technology. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 48, 101630. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101630>
2. Abdelkareem, M.A., Maghrabie, H.M., Sayed, E.T., Kais, E.-C.A., Abo-Khalil, A.G., Radi, M.A., Baroutaji, A., Olabi, A.G., 2022. Heat pipe-based waste heat recovery systems: Background and applications. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 29, 101221. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101221>
3. Abdulateef, A.M., Mat, S., Abdulateef, J., Sopian, K., Al-Abidi, A.A., 2018. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 1620–1635. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.009>
4. Adio, M., Liberatore, R., Giannuzzi, G., Veca, E., Nicolini, D., Lanchi, M., Chieruzzi, M., 2016. ENEA research and innovation on Thermal Energy Storage for CSP plants.
5. Agarwal, P., Sikand, A., 2014. APPLICATION OF HEAT EXCHANGERS IN BIOPROCESS INDUSTRY: A REVIEW. *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.* 6.
6. Agathokleous, R., Bianchi, G., Panayiotou, G., Aresti, L., Argyrou, M.C., Georgiou, G.S., Tassou, S.A., Jouhara, H., Kalogirou, S.A., Florides, G.A., Christodoulides, P., 2019. Waste Heat Recovery in the EU industry and proposed new technologies. *Energy Procedia, Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains including Workshop on Energy Recovery Conversion and Management; ICSEF 2018, 17 – 19 October 2018, Paphos, Cyprus* 161, 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.064>
7. Agnani, E., Cavazzuti, M., Corticelli, M., 2015. Optimization of recuperative burners for industrial kilns through CFD simulation.
8. Akram, M.W., Hoque, M., 2019. Towards the Potential Applications of Waste Heat Energy: A Review. Presented at the International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2019 (ICMIME2019), Rajshahi, Bangladesh.
9. Aldoss, T.K., Rahman, M.M., 2014. Comparison between the single-PCM and multi-PCM thermal energy storage design. *Energy Convers. Manag.* 83, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.047>
10. Alva, G., Lin, Y., Fang, G., 2018. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* 144, 341–378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
11. Anusha, A.S., 2016. Phase Change Materials. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.* 4, 332–338.
12. Ardy, H., Putra, Y.P., Anggoro, A.D., Wibowo, A., 2021. Failure analysis of primary waste heat boiler tube in ammonia plant. *Heliyon* 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06151>
13. Arsenyeva, O., Tovazhnyanskyy, L., Kapustenko, P., Klemeš, J.J., Varbanov, P.S., 2023. Review of Developments in Plate Heat Exchanger Heat Transfer Enhancement for Single-Phase Applications in Process Industries. *Energies* 16, 4976. <https://doi.org/10.3390/en16134976>
14. Atabani, A., Saidur, R., Mekhilef, S., 2013. Energy Economical and Environmental Analysis of Industrial Boilers using Economizers. *Int. J. Energy Eng.* 3, 33–38.
15. Atashbozorg, D., Arasteh, A.M., Salehi, G., Azad, M.T., 2022. Analysis of Different Organic Rankine and Kalina Cycles for Waste Heat Recovery in the Iron and Steel Industry. *ACS Omega* 7, 46099–46117. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03922>
16. Babay, S., Bouguettaia, H., Bechki, D., Boughali, S., Bouchekima, B., Mahcene, H., 2009. REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS 1.
17. Bao, J., Tu, H., Li, Jing, Li, Y., Yu, S., Gao, J., Lei, K., Zhang, F., Li, Jinghua, 2022. Applications of phase change materials in smart drug delivery for cancer treatment. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10, 991005. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.991005>
18. Bayraktar, F.S., Köse, R., 2022. PHASE CHANGE MATERIALS: TYPES, PROPERTIES and APPLICATIONS in BUILDINGS. *Kırklareli Üniversitesi Mühendis. Ve Fen Bilim. Derg.* 8, 190–210. <https://doi.org/10.34186/klujes.1126167>

19. Belyakov, N., 2019. Chapter Twenty-Three - Sustainable electricity management beyond generation, in: Belyakov, N. (Ed.), *Sustainable Power Generation*. Academic Press, pp. 539–563.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00038-4>
20. Benedetti, M., Dadi, D., Giordano, L., Introna, V., Lapenna, P.E., Santolamazza, A., 2021. Design of a Database of Case Studies and Technologies to Increase the Diffusion of Low-Temperature Waste Heat Recovery in the Industrial Sector. *Sustainability* 13, 5223. <https://doi.org/10.3390/su13095223>
21. Bianchi, G., Panayiotou, G.P., Aresti, L., Kalogirou, S.A., Florides, G.A., Tsamos, K., Tassou, S.A., Christodoulides, P., 2019. Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry. *Energy Ecol. Environ.* 4, 211–221. <https://doi.org/10.1007/s40974-019-00132-7>
22. Boyd, 2021. Thermosiphons vs Heat Pipes [WWW Document]. Boyd Trust. Innov. URL <https://www.boydcorp.com/blog/thermosiphons-vs-heat-pipes.html> (accessed 4.16.24).
23. BP p.l.c., 2022. Statistical Review of World Energy 2022.
24. BP p.l.c., 2021. Statistical Review of World Energy 2021.
25. Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L.F., Lävemann, E., 2015. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Appl. Energy* 151, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>
26. Bull, J., Buick, J.M., Radulovic, J., 2020. Heat Exchanger Sizing for Organic Rankine Cycle. *Energies* 13, 3615. <https://doi.org/10.3390/en13143615>
27. Burlacu, A., Soso, G., Vizitiu, R., Ștefan, Bărbuță, M., Lăzărescu, C.D., Ciocan, V., Șerbănoiu, A.A., 2018. Energy efficient heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in buildings. *Procedia Manuf.*, 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu Mures, Romania 22, 714–721. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.103>
28. Cabeza, L.F., 2012. 3.07 - Thermal Energy Storage, in: Sayigh, A. (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, Oxford, pp. 211–253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00307-3>
29. Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., Fernández, A.I., 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
30. Cao, Q., Luan, W., Wang, T., 2018. Performance enhancement of heat pipes assisted thermoelectric generator for automobile exhaust heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 130, 1472–1479. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.134>
31. Caputo, A.C., Pelagagge, P.M., Salini, P., 2008. Heat exchanger design based on economic optimisation. *Appl. Therm. Eng.* 28, 1151–1159. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.08.010>
32. Chantasiriwan, S., 2024. Determination of optimal total area of heat recovery steam generator. *Case Stud. Therm. Eng.* 53, 103909. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103909>
33. Chen, B.-Q., Pan, Y.-J., Zhang, D.-G., Xia, H.-Y., Kankala, R.K., 2022. Phase-change materials-based platforms for biomedicine. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10, 989953. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.989953>
34. Chen, W., Huang, Z., Chua, K.J., 2022. Sustainable energy recovery from thermal processes: a review. *Energy Sustain. Soc.* 12, 46. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2>
35. Chowdhury, J.I., Asfand, F., Hu, Y., Balta-Ozkan, N., Varga, L., Patchigolla, K., 2019. Waste heat recovery potential from industrial bakery ovens using thermodynamic power cycles. Presented at the ECOS 2019 - Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, pp. 2435–2441.
36. Christodoulides, P., Agathokleous, R., Aresti, L., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., Florides, G.A., 2022a. Waste Heat Recovery Technologies Revisited with Emphasis on New Solutions, Including Heat Pipes, and Case Studies. *Energies* 15, 384. <https://doi.org/10.3390/en15010384>
37. Christodoulides, P., Aresti, L., Panayiotou, G.P., Tassou, S., Florides, G.A., 2022b. Adoption of Waste Heat Recovery Technologies: Reviewing the Relevant Barriers and Recommendations on How to Overcome Them. *Oper. Res. Forum* 3, 3. <https://doi.org/10.1007/s43069-021-00108-6>
38. Dekhil, M.A., 2020. Développement d'échangeurs thermiques innovants pour le stockage dynamique de la chaleur (phdthesis). Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai.
39. Delpech, B., Milani, M., Montorsi, L., Boscardin, D., Chauhan, A., Almahmoud, S., Axcell, B., Jouhara, H., 2018. Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by

- means of the heat pipe technology: Case of the ceramic industry. *Energy* 158, 656–665.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.041>
40. Di, Y., Di, H., Zhao, C., Lu, Z., Li, X., Leng, J., 2024. An Experimental Study on Heat Recovery Performances of Three-Dimensional Heat Pipes in Air-Conditioning Systems. *Buildings* 14, 355.
<https://doi.org/10.3390/buildings14020355>
 41. Dincer, I., Erdemir, D., 2021. Chapter 1 - Fundamentals and Concepts, in: Dincer, I., Erdemir, D. (Eds.), *Heat Storage Systems for Buildings*. Elsevier, pp. 1–35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823572-0.00007-2>
 42. Dincer, I., Rosen, M., 2010. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, Second Edition. <https://doi.org/10.1002/9780470970751>
 43. Dinter, F., Gonzalez, D.M., 2014. Operability, Reliability and Economic Benefits of CSP with Thermal Energy Storage: First Year of Operation of ANDASOL 3. *Energy Procedia, Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference* 49, 2472–2481.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.262>
 44. Directorate-General for Climate Action, 2021. European Climate Law - European Commission [WWW Document]. URL https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en (accessed 5.29.24).
 45. Directorate-General for Energy, 2022. Renewable Energy Directive [WWW Document]. URL https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (accessed 5.29.24).
 46. Dong, P., Wang, G., Yu, W., Liu, E., Han, Y., 2024. Investigation on heat transfer performance of flat plate micro-heat pipe phase change heat storage/release device. *Green Energy Resour.* 2, 100071. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2024.100071>
 47. Dooley, R.B., Chexal, V.K., 2000. Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 77, 85–90. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(99\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(99)00087-3)
 48. Douadi, O., Ravi, R., Faqir, M., Essadiqi, E., 2022. A conceptual framework for waste heat recovery from compression ignition engines: Technologies, working fluids & heat exchangers. *Energy Convers. Manag.* X 16, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100309>
 49. Dumont, M., Wang, R., Wenzke, D., Blok, K., Heijungs, R., 2023. The techno-economic integrability of high-temperature heat pumps for decarbonizing process heat in the food and beverages industry. *Resour. Conserv. Recycl.* 188, 106605.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106605>
 50. Eanest Jebasingh, B., Valan Arasu, A., 2020. A comprehensive review on latent heat and thermal conductivity of nanoparticle dispersed phase change material for low-temperature applications. *Energy Storage Mater.* 24, 52–74. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.031>
 51. Ebara, R., Tanaka, F., Kawasaki, M., 2013. Sulfuric acid dew point corrosion in waste heat boiler tube for copper smelting furnace. *Eng. Fail. Anal.* 33, 29–36.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.04.007>
 52. Edreis, E., Petrov, A., 2020. Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 963, 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012027>
 53. Elias, C.N., Stathopoulos, V.N., 2019. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia, Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains including Workshop on Energy Recovery Conversion and Management; ICSEF 2018, 17 – 19 October 2018, Paphos, Cyprus* 161, 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.101>
 54. Encon, 2023. Regenerative Burners | Benefits and Applications - Encon. URL <https://encon.co.in/regenerative-burners-benefits-and-applications/> (accessed 4.10.24).
 55. EY Romania, 2021. EY Romania report: Renewables can accelerate the decarbonisation of the Romanian energy sector, but public initiatives must be synchronised with business intentions [WWW Document]. URL https://www.ey.com/en_ro/news/2021/04/ey-romania-report--renewables-can-accelerate-the-decarbonisation (accessed 5.29.24).

56. Fadl, M., Eames, P.C., 2019. An experimental investigations of the melting of RT44HC inside a horizontal rectangular test cell subject to uniform wall heat flux. *Int. J. Heat Mass Transf.* 140, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.047>
57. Faghri, A., 2014. HEAT PIPES: REVIEW, OPPORTUNITIES AND CHALLENGES. *Front. Heat Pipes* 5, 1–48. <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
58. Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., Khaled, M., 2022. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations. *Clean. Eng. Technol.* 6, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387>
59. Firth, A., Zhang, B., Yang, A., 2019. Quantification of global waste heat and its environmental effects. *Appl. Energy* 235, 1314–1334. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.102>
60. Frigione, M., Lettieri, M., Sarcinella, A., 2019. Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars. *Materials* 12, 1260. <https://doi.org/10.3390/ma12081260>
61. Gautam, A., Saini, R.P., 2020. A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications. *Sol. Energy* 207, 937–956. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>
62. Ghani, S., Jamari, S., Zainal Abidin, S., 2020. Waste materials as the potential phase change material substitute in thermal energy storage system: a review. *Chem. Eng. Commun.* 208, 1–21. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1715960>
63. GlobalSpec, 2023. Common industrial waste heat recovery systems [WWW Document]. URL <https://insights.globalspec.com/article/19826/common-industrial-waste-heat-recovery-systems> (accessed 4.10.24).
64. Gondre, D., 2016. Numerical modeling and analysis of heat and mass transfers in an adsorption heat storage tank : Influences of material properties, operating conditions and system design on storage performances (phdthesis). Université de Lyon.
65. Gong, Z.-X., Mujumdar, A.S., 1997. Thermodynamic optimization of the thermal process in energy storage using multiple phase change materials. *Appl. Therm. Eng.* 17, 1067–1083. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(97\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(97)00012-4)
66. González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D., Prieto, C., 2017. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80, 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.084>
67. Güney, M., 2016. Solar power and application methods. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3329.5447>
68. Gupta, B., Bhalavi, J., Sharma, S., Bisen, A., 2021. Phase change materials in solar energy applications: A review. *Mater. Today Proc., International Conference on Innovations in Clean Energy Technologies (ICET2020)* 46, 5550–5554. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.343>
69. Harikrishnan, S., Imran Hussain, S., Devaraju, A., Sivasamy, P., Kalaiselvam, S., 2017. Improved performance of a newly prepared nano-enhanced phase change material for solar energy storage. *J. Mech. Sci. Technol.* 31, 4903–4910. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0938-y>
70. Hassan, M.I., Al Kindi, R., 2014. Feasibility Study of Regenerative Burners in Aluminum Holding Furnaces. *JOM* 66, 1603–1611. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1110-0>
71. Hayat, M.A., Ali, H.M., Janjua, M.M., Pao, W., Li, C., Alizadeh, M., 2020. Phase change material/heat pipe and Copper foam-based heat sinks for thermal management of electronic systems. *J. Energy Storage* 32, 101971. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101971>
72. He, Y., Cao, F., Jin, L., Yang, D., Wang, X., Xing, Z., 2017. Development and field test of a high-temperature heat pump used in crude oil heating. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.* 231, 392–404. <https://doi.org/10.1177/0954408915599109>
73. Hirschey, J., Gluesenkamp, K.R., Mallow, A., Graham, S., 2018. Review of Inorganic Salt Hydrates with Phase Change Temperature in Range of 5 to 60°C and Material Cost Comparison with Common Waxes. *Int. High Perform. Build. Conf.*
74. Hou, T.K., Kazi, S.N., Mahat, A.B., Teng, C.B., Al-Shamma'a, A., Shaw, A., Hou, T.K., Kazi, S.N., Mahat, A.B., Teng, C.B., Al-Shamma'a, A., Shaw, A., 2017. Industrial Heat Exchanger: Operation and Maintenance to Minimize Fouling and Corrosion, in: *Heat Exchangers - Advanced Features and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66274>

75. Hu, S.-M., Wang, S.-H., Yang, Z.-G., 2015. Failure analysis on unexpected wall thinning of heat-exchange tubes in ammonia evaporators. *Case Stud. Eng. Fail. Anal.* 3, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2015.01.002>
76. Ibrahim, N.I., Al-Sulaiman, F.A., Rahman, S., Yilbas, B.S., Sahin, A.Z., 2017. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 26–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>
77. IEA, 2024. *Renewables 2023*. Paris.
78. IEA, 2023a. *Heating [WWW Document]*. IEA. URL <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heating> (accessed 5.30.24).
79. IEA, 2023b. *Buildings [WWW Document]*. IEA. URL <https://www.iea.org/energy-system/buildings> (accessed 5.30.24).
80. IEA, 2022a. “France 2030 investment Plan”- Investment in renewable energy innovation – Policies [WWW Document]. IEA. URL <https://www.iea.org/policies/15025-france-2030-investment-plan-investment-in-renewable-energy-innovation> (accessed 5.29.24).
81. IEA, 2022b. *How a heat pump works – The Future of Heat Pumps – Analysis [WWW Document]*. IEA. URL <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/how-a-heat-pump-works> (accessed 4.15.24).
82. IEA, 2021a. *Key World Energy Statistics 2021*. Paris.
83. IEA, 2021b. *Net Zero by 2050*. Paris.
84. IEA, 2021c. *Renewables 2021*. Paris.
85. IEA, 2021d. *Final energy consumption in the buildings sector, 2021*. Paris.
86. IEA, 2020. *As we mark the Paris Agreement’s 5th anniversary, we continue to expand our work on energy and climate – Analysis*. Paris.
87. International Trade Administration, 2024. *Romania - Country Commercial Guide [WWW Document]*. URL <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/romania-energy> (accessed 5.30.24).
88. Jafari Mosleh, H., Jahangiri Mamouri, S., Shafii, M.B., Hakim Sima, A., 2015. A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic trough collector. *Energy Convers. Manag.* 99, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.028>
89. Jesumathy, S., Udayakumar, M., Suresh, S., 2012. Experimental study of enhanced heat transfer by addition of CuO nanoparticle. *Heat Mass Transf.* 48, 965–978. <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0945-y>
90. Jiang, J., Hu, B., Wang, R.Z., Deng, N., Cao, F., Wang, C.-C., 2022. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 161, 112106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>
91. Jouhara, H., 2021. *Waste Heat Recovery in Process Industries*. John Wiley & Sons.
92. Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B., Wrobel, L.C., 2017. Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy* 128, 729–754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>
93. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S.A., 2018. Waste heat recovery technologies and applications. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 6, 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>
94. Jouhara, H., Nieto, N., Egilegor, B., Zuazua, J., González, E., Yebra, I., Igesias, A., Delpech, B., Almahmoud, S., Brough, D., Malinauskaite, J., Vlasopoulos, A., Hill, M., Axcell, B., 2023. Waste heat recovery solution based on a heat pipe heat exchanger for the aluminium die casting industry. *Energy* 266, 126459. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126459>
95. Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., Lipinski, T., 2020. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *Int. J. Thermofluids* 5–6, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>
96. Kalaiselvam, S., Parameshwaran, R., 2014. Chapter 6 - Thermochemical Energy Storage, in: Kalaiselvam, S., Parameshwaran, R. (Eds.), *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*. Academic Press, Boston, pp. 127–144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417291-3.00006-2>

97. Kannan, M., Senthil, R., Baskaran, R., Deepanraj, B., 2014. An experimental study on heat transport capability of a two phase thermosyphon charged with different working fluids. *Am. J. Appl. Sci.* 11, 584–591. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2014.584.591>
98. Kauko, H., Rohde, D., Knudsen, B.R., Sund-Olsen, T., 2020. Potential of Thermal Energy Storage for a District Heating System Utilizing Industrial Waste Heat. *Energies* 13, 3923. <https://doi.org/10.3390/en13153923>
99. Khairnasov, S.M., Naumova, A.M., 2016. Heat pipes application to solar energy systems. *Appl. Sol. Energy* 52, 47–60. <https://doi.org/10.3103/S0003701X16010060>
100. Khalifa, A., Tan, L., Date, A., Akbarzadeh, A., 2014. A numerical and experimental study of solidification around axially finned heat pipes for high temperature latent heat thermal energy storage units. *Appl. Therm. Eng.* 70, 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.080>
101. Khalilmoghadam, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., Shafii, M.B., 2021. A novel energy storage system for latent heat recovery in solar still using phase change material and pulsating heat pipe. *Renew. Energy* 163, 2115–2127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.073>
102. Kharaji, S., 2021. Heat Exchanger Design and Optimization, in: *Heat Exchangers*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100450>
103. Kim, Y., Lim, J., Shim, J.Y., Lee, H., Cho, H., Kim, J., 2022. Optimizing wastewater heat recovery systems in textile dyeing processes using pinch analysis. *Appl. Therm. Eng.* 214, 118880. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118880>
104. Kizildag, N., 2023. 11 - Smart textiles with PCMs for thermoregulation, in: Pielichowska, K., Pielichowski, K. (Eds.), *Multifunctional Phase Change Materials*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, pp. 445–505. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85719-2.00013-4>
105. Koçak, B., Fernandez, A.I., Paksoy, H., 2020. Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects. *Sol. Energy* 209, 135–169. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081>
106. Kocak, B., Paksoy, H., 2020. Performance of laboratory scale packed-bed thermal energy storage using new demolition waste based sensible heat materials for industrial solar applications. *Sol. Energy* 211, 1335–1346. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.070>
107. Kosmadakis, G., 2019. Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries. *Appl. Therm. Eng.* 156, 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082>
108. Kulish, V., Aslfattahi, N., Schmirler, M., Sláma, P., 2023. New library of phase-change materials with their selection by the Rényi entropy method. *Sci. Rep.* 13, 10446. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37701-0>
109. Kumar, S., Singh, S.K., Sharma, D., 2022. A Comprehensive Review on Thermal Performance Enhancement of Plate Heat Exchanger. *Int. J. Thermophys.* 43, 109. <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03036-7>
110. Kumar, S.S., Kumar, K.M., Kumar, S.R.S., 2017. Design of Evacuated Tube Solar Collector with Heat Pipe. *Mater. Today Proc.*, 2nd International Conference on Solar Energy Photovoltaic, 17th–19th December, 2016 4, 12641–12646. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.075>
111. Ladekar, C., Choudhary, S.K., Khandare, S.S., 2017. Experimental investigation for the optimization of heat pipe performance in latent heat thermal storage. *J. Mech. Sci. Technol.* 31, 2627–2634. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0505-6>
112. Lataoui, Z., Jemni, A., 2017. Experimental investigation of a stainless steel two-phase closed thermosyphon. *Appl. Therm. Eng.* 121, 721–727. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.135>
113. Lebrouhi, B.E., Schall, E., Lamrani, B., Chaibi, Y., Kousksou, T., 2022. Energy Transition in France. *Sustainability* 14, 5818. <https://doi.org/10.3390/su14105818>
114. Lee, S.-H., Themelis, N.J., Castaldi, M.J., 2007. High-Temperature Corrosion in Waste-to-Energy Boilers. *J. Therm. Spray Technol.* 16, 104–110. <https://doi.org/10.1007/s11666-006-9005-4>
115. Li, D., Wu, Y., Wang, B., Liu, C., Arıcı, M., 2020. Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review. *Constr. Build. Mater.* 233, 117327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117327>

116. Liang, X., Xu, Y., Yin, L., Wang, R., Li, P., Wang, J., Liu, K., 2023. Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water* 15, 4135. <https://doi.org/10.3390/w15234135>
117. Lim, H., Kim, C., Cho, Y., Kim, M., 2017. Energy saving potentials from the application of heat pipes on geothermal heat pump system. *Appl. Therm. Eng.* 126, 1191–1198. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.086>
118. Lin, D., Zhu, Q., Li, X., 2015. Thermodynamic Comparative Analyses between (organic) Rankine Cycle and Kalina Cycle. *Energy Procedia, Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015)* 75, 1618–1623. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.385>
119. Ling, Z., Liu, J., Wang, Q., Lin, W., Fang, X., Zhang, Z., 2017. $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ eutectic/ SiO_2 composite phase change material with improved thermal reliability and enhanced thermal conductivity. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 172, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.07.019>
120. Ling-Chin, J., Bao, H., Ma, Z., Roskilly, W.T. and A.P., Ling-Chin, J., Bao, H., Ma, Z., Roskilly, W.T. and A.P., 2018. State-of-the-Art Technologies on Low-Grade Heat Recovery and Utilization in Industry, in: *Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78701>
121. Littwin, D.A., McCurley, J., 1981. Heat pipe waste heat recovery boilers. *J. Heat Recovery Syst.* 1, 339–348. [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(81\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0198-7593(81)90045-X)
122. Loni, R., Najafi, G., Bellos, E., Rajaei, F., Said, Z., Mazlan, M., 2021. A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook. *J. Clean. Prod.* 287, 125070. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125070>
123. Luo, Y., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., 2023. A Framework for Recovering Waste Heat Energy from Food Processing Effluent. *Water* 15, 12. <https://doi.org/10.3390/w15010012>
124. Luu, M.T., Milani, D., Nomvar, M., Abbas, A., 2017. Computer-aided design for high efficiency latent heat storage – a case study of a novel domestic solar hot water process, in: Espuña, A., Graells, M., Puigjaner, L. (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering*, 27 European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50194-X>
125. Lv, L., Li, J., Zhou, G., 2017. A robust pulsating heat pipe cooler for integrated high power LED chips. *Heat Mass Transfer/Wärme- Stoffübertragung* 53, 3305–3313. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2050-3>
126. Magendran, S.S., Khan, F.S.A., Mubarak, N.M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., Abdullah, E.C., Nizamuddin, S., Karri, R.R., 2019. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano-Struct. Nano-Objects* 20, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399>
127. Mahdavi, M., Tiari, S., Pawar, V., 2020. A numerical study on the combined effect of dispersed nanoparticles and embedded heat pipes on melting and solidification of a shell and tube latent heat thermal energy storage system. *J. Energy Storage* 27, 101086. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101086>
128. Mahmoudi, A., Fazli, M., Morad, M.R., 2018. A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Appl. Therm. Eng.* 143, 660–675. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136>
129. Mahmoudinezhad, S., Sadi, M., Ghiasirad, H., Arabkoohsar, A., 2023. A comprehensive review on the current technologies and recent developments in high-temperature heat exchangers. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 183, 113467. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113467>
130. Malaquias, A.F., Neves, S.F., Campos, J.B.L.M., 2023. Incorporation of phase change materials in fire protective clothing considering the presence of water. *Int. J. Therm. Sci.* 183, 107870. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107870>
131. Malinauskaite, J., Jouhara, H., 2024. Chapter 4 - A theoretical analysis of waste heat recovery technologies, in: Malinauskaite, J., Jouhara, H. (Eds.), *Sustainable Energy Technology, Business Models, and Policies*. Elsevier, pp. 99–144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18454-3.00001-1>

132. Marina, A., Spoelstra, S., Zondag, H.A., Wemmers, A.K., 2021. An estimation of the European industrial heat pump market potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 139, 110545. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>
133. Mehling, H., Cabeza, L.F., 2008. Basic thermodynamics of thermal energy storage, in: Mehling, H., Cabeza, L.F. (Eds.), *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction into Basics and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–10. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9_1
134. Meister, C., Beausoleil-Morrison, I., 2021. Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank. *Sol. Energy* 222, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.025>
135. Mellor, A., Alonso Alvarez, D., Guarracino, I., Ramos, A., Riverola Lacasta, A., Ferre Llin, L., Murrell, A.J., Paul, D.J., Chemisana, D., Markides, C.N., Ekins-Daukes, N.J., 2018. Roadmap for the next-generation of hybrid photovoltaic-thermal solar energy collectors. *Sol. Energy* 174, 386–398. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.004>
136. Ministerul Energiei, 2021. Planul Național Integrat în domeniul Energiei și Schimbărilor Climatice 2021-2030.
137. Modi, N., Wang, X., Negnevitsky, M., Cao, F., 2021. Melting characteristics of a longitudinally finned-tube horizontal latent heat thermal energy storage system. *Sol. Energy* 230, 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.043>
138. Mohammdd, M., Petrovic, M., 2015. Thermo-economic optimization of triple pressure heat recovery steam generator operating parameters for combined cycle plants. *Therm. Sci.* 19, 447–460. <https://doi.org/10.2298/TSCI131124040M>
139. Muchlishi, M., Erivianto, D., 2023. Efficiency Analysis using Economizer Alternative Energy in Boilers. *Formosa J. Sci. Technol.* 2, 2225–2238. <https://doi.org/10.55927/fjst.v2i8.5802>
140. Muniandy, V., Aziz, M.S.A., Latip, H.F.M., 2022. Study on The Improvement of Heat Recovery Steam Generator Efficiency – A Review. *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.* 94, 89–98. <https://doi.org/10.37934/arfmts.94.2.8998>
141. Muth, C.J., Aalto, P., Mylläri, F., Rönkkö, T., Harsia, P., 2021. Chapter 2 - Globally and locally applicable technologies to accelerate electrification, in: Aalto, P. (Ed.), *Electrification*. Academic Press, pp. 25–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822143-3.00005-6>
142. Na, S.-I., Kim, M.S., Baik, Y.-J., Kim, M., 2019. Optimal allocation of heat exchangers in a Supercritical carbon dioxide power cycle for waste heat recovery. *Energy Convers. Manag.* 199, 112002. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112002>
143. Naghavi, M.S., Ong, K.S., Badruddin, I.A., Mehrali, M., Metselaar, H.S.C., 2017. Thermal performance of a compact design heat pipe solar collector with latent heat storage in charging/discharging modes. *Energy* 127, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.097>
144. Nandhini, R., Sivaprakash, B., Rajamohan, N., 2022. Waste heat recovery at low temperature from heat pumps, power cycles and integrated systems – Review on system performance and environmental perspectives. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 52, 102214. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102214>
145. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022a. Gemasolar Thermosolar Plant / Solar TRES | Concentrating Solar Power Projects | NREL [WWW Document]. *Conc. Sol. Power Proj.* URL <https://solarpaces.nrel.gov/project/gemasolar-thermosolar-plant-solar-tres> (accessed 5.28.24).
146. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022b. Andasol 3 | Concentrating Solar Power Projects | NREL [WWW Document]. URL <https://solarpaces.nrel.gov/project/andasol-3> (accessed 5.29.24).
147. Navarro Rivero, M.E., Ge, Z., Jiang, Z., Zhao, Y., Weng, L., Ding, Y., 2023. 7 - Thermal energy storage options, in: Markides, C.N., Wang, K. (Eds.), *Power Generation Technologies for Low-Temperature and Distributed Heat*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 419–471. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818022-8.00002-8>
148. Nemati, A., Nami, H., Ranjbar, F., Yari, M., 2017. A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system. *Case Stud. Therm. Eng.* 9, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.11.003>

149. Nikolaenko, Yu.E., Baranyuk, A.V., Reva, S.A., Pis'mennyi, E.N., Dubrovka, F.F., Rohachov, V.A., 2019. Improving air cooling efficiency of transmit/receive modules through using heat pipes. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 14, 100418. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100418>
150. OECD, 2012. *Energy Statistics of OECD Countries 2012*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
151. Omer, G., Yavuz, A.H., Ahiska, R., Calisal, K.E., 2020. Smart thermoelectric waste heat generator: Design, simulation and cost analysis. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 37, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100623>
152. Ononogbo, C., Nwosu, E.C., Nwakuba, N.R., Nwaji, G.N., Nwifo, O.C., Chukwuezie, O.C., Chukwu, M.M., Anyanwu, E.E., 2023. Opportunities of waste heat recovery from various sources: Review of technologies and implementation. *Heliyon* 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13590>
153. O'Rielly, K., Jeswiet, J., 2015. Improving industrial energy efficiency through the implementation of waste heat recovery systems. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 39, 125–136. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2015-0010>
154. Our World in Data, 2023. Global direct primary energy consumption [WWW Document]. Our World Data. URL <https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy> (accessed 5.30.24).
155. Oyedepo, S.O., Fakeye, B.A., 2021. WASTE HEAT RECOVERY TECHNOLOGIES: PATHWAY TO SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT. *J. Therm. Eng.* 7, 324–348. <https://doi.org/10.18186/thermal.850796>
156. Palacios, A., Navarro-Rivero, M.E., Zou, B., Jiang, Z., Harrison, M.T., Ding, Y., 2023. A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications. *J. Energy Storage* 72, 108597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108597>
157. Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U., Micale, G., 2018. Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. *Appl. Therm. Eng.* 138, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043>
158. Peng, H., Jia, X., 2022. Experimental study on heat energy recovery and utilization of coal gangue hill based on gravity heat pipe. *Energy Rep.*, The 2022 International Symposium on New Energy Technology Innovation and Low Carbon Development 8, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.084>
159. Pizzolato, A., Donato, F., Verda, V., Santarelli, M., Sciacovelli, A., 2017. CSP plants with thermocline thermal energy storage and integrated steam generator – Techno-economic modeling and design optimization. *Energy* 139, 231–246. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.160>
160. Podara, C., Kartsonakis, I., Charitidis, C.A., 2021. Towards Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Classification, Improvements and Applications in the Building Sector. *Appl. Sci.* 11, 1490. <https://doi.org/10.3390/app11041490>
161. Pop, O.-G., 2019. Studiu privind eficiența utilizării materialelor cu schimbare de fază în climatizare. Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Cluj-Napoca.
162. Ravi, K., Rama, K., Sita, R., 2007. Thermodynamic analysis of heat recovery steam generator in combined cycle power plant. *Therm. Sci.* 11, 143–156. <https://doi.org/10.2298/TSCI0704143R>
163. Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12, 2438–2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
164. Renewable Technology, 2021. Gemasolar Concentrated Solar Power, Seville - Renewable Technology [WWW Document]. URL <https://www.renewable-technology.com/projects/gemasolar-concentrated-solar-power-seville/> (accessed 5.28.24).
165. Renewable Technology, n.d. Andasol Solar Power Station, Andalusia [WWW Document]. URL <https://www.renewable-technology.com/projects/andasol-solar-power-station-andalusia/> (accessed 5.29.24).
166. Ritchie, H., Rosado, P., Roser, M., 2024. Fossil fuels. Our World Data.

167. Romania Eficienta, 2021. Clădirile de tip nZEB asigură beneficii pe termen lung pentru consumatori. Rom. Efic. URL <https://www.romania-eficienta.ro/cladirile-de-tip-nzeb-asigura-beneficii-pe-termen-lung-pentru-consumatori/> (accessed 5.30.24).
168. Rubitherm GmbH [WWW Document], 2024. URL <https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt> (accessed 6.7.24).
169. Russo, G., Krambeck, L., Nishida, F., Santos, P., Antonini Alves, T., 2018. THERMAL PERFORMANCE OF THERMOSYPHON FOR DIFFERENT WORKING FLUIDS. *Rev. Eng. Térmica* 15, 03. <https://doi.org/10.5380/reterm.v15i1.62150>
170. Sakthi Priya, M., Sakthivadivel, D., 2023. Experimental investigation on the thermal performance of a novel thermosyphon heat pipe with truncated cone for heat recovery systems. *Energy Convers. Manag.* 276, 116522. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116522>
171. Saleel, C.A., 2022. A review on the use of coconut oil as an organic phase change material with its melting process, heat transfer, and energy storage characteristics. *J. Therm. Anal. Calorim.* 147, 4451–4472. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10839-7>
172. Schroeder, J.E., 2017. 11 - Fast-start and transient operation, in: Eriksen, V.L. (Ed.), *Heat Recovery Steam Generator Technology*. Woodhead Publishing, pp. 231–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101940-5.00011-7>
173. Shabgard, H., Robak, C.W., Bergman, T.L., Faghri, A., 2012. Heat transfer and exergy analysis of cascaded latent heat storage with gravity-assisted heat pipes for concentrating solar power applications. *Sol. Energy* 86, 816–830. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.008>
174. Shanmuganathan, M., Sandeep Kumar, S., Hosanna Princye, P., Aravind, A.R., Chhabria, S., Jyothirmayee, C.A., 2022. Improving the cooling performance of the straight finned heat sink (SHS) for computer processor using an inorganic PCM. *Mater. Today Proc., International Conference on Newer Engineering Concepts and Technology (ICONNECT 2022)* 69, 749–753. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.156>
175. Sharma, A., Chauhan, R., Ali Kallioğlu, M., Chinnasamy, V., Singh, T., 2021. A review of phase change materials (PCMs) for thermal storage in solar air heating systems. *Mater. Today Proc., International Conference on Advances in Materials Processing & Manufacturing Applications* 44, 4357–4363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.560>
176. Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
177. She, X., Li, X., Xu, M., Zhou, J., Chen, J., Huai, X., He, Z., 2024. Thermodynamic analysis for new solutions of data center cooling with adsorption refrigeration and heat pipe. *Int. J. Refrig.* 160, 341–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.01.016>
178. Shete, B., Shinkar, N.P., 2013. Dairy industry wastewater sources, characteristics & its effects on environment. *Int J Curr Eng Technol* 3, 1611–1615.
179. Soupart-Caron, A.S., 2015. Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase (phdthesis). Université Grenoble Alpes.
180. Sterkhov, K.V., Khokhlov, D.A., Pleshanov, K.A., Zaichenko, M.N., 2019. High-Pressurized Heat Recovery Steam Generator for Combined Cycle Gas Turbine plant, in: 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Presented at the 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/REEPE.2019.8708764>
181. Stijepovic, M.Z., Linke, P., 2011. Optimal waste heat recovery and reuse in industrial zones. *Energy* 36, 4019–4031.
182. Su, Z., Zhang, M., Xu, P., Zhao, Z., Wang, Z., Huang, H., Ouyang, T., 2021. Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review. *Energy Convers. Manag.* 229, 113769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113769>
183. Tangjitsitharoen, S., Ratanakuakangwan, S., Khonmeak, M., Fuangworawong, N., 2013. Investigation of Regenerative and Recuperative Burners for Different Sizes of Reheating Furnaces. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.* 7, 2027–2031.

184. Tawalbeh, M., Khan, H.A., Al-Othman, A., Almomani, F., Ajith, S., 2023. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *Int. J. Thermofluids* 18, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>
185. ThermTech, 2017. Reducing energy costs with economisers improve operating efficiency. *ThermTech Waste Heat Recovery Spec.* URL <https://thermtch.co.uk/reducing-energy-costs-with-economisers/> (accessed 4.12.24).
186. Thonon, M., Fraisse, G., Zalewski, L., Pailha, M., 2024. Simultaneous charging and discharging processes in latent heat thermal energy storage: A review. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 47, 102299. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102299>
187. Tippawan P., Arpornwichanop A., 2016. Maximizing the efficiency of a heat recovery steam generator for solid oxide fuel cell-based trigeneration systems. *Chem. Eng. Trans.* 52, 1051–1056. <https://doi.org/10.3303/CET1652176>
188. Totala, Prof.N.B., 2013. Analysis for critical radius of insulation for a cylinder. *IOSR J. Eng.* 03, 32–38. <https://doi.org/10.9790/3021-03913238>
189. Tung, T.V., Nga, N.T.T., Van, H.T., Vu, T.H., Kuligowski, K., Cenian, A., Tuan, N.Q., Le, P.-C., Tran, Q.B., 2023. Energy Efficiency and Environmental Benefits of Waste Heat Recovery Technologies in Fishmeal Production Plants: A Case Study in Vietnam. *Sustainability* 15, 12712. <https://doi.org/10.3390/su151712712>
190. Ünvar, S., Menlik, T., Sözen, A., Ali, H.M., 2021. Improvement of Heat Pipe Solar Collector Thermal Efficiency Using Al₂O₃/Water and TiO₂/Water Nanofluids. *Int. J. Photoenergy* 2021, e5546508. <https://doi.org/10.1155/2021/5546508>
191. Upadhyay, H., 2019. “A review on heat exchanger design.”
192. Vakhshouri, A.R., 2019. Paraffin as Phase Change Material, in: *Paraffin - an Overview*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90487>
193. Victor, R.A., Kim, J.-K., Smith, R., 2013. Composition optimisation of working fluids for Organic Rankine Cycles and Kalina cycles. *Energy* 55, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.069>
194. Vizitiu, R.S., 2020. STUDII PRIVIND INTEGRAREA MATERIALELOR CU SCHIMBARE DE FAZĂ ÎN RECUPERATOARE DE CĂLDURĂ ÎN VEDEREA CREȘTERII EFICIENȚEI ENERGETICE. UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI, Iasi.
195. Wang, H., Chen, Y., Li, J., Guo, L., Fang, M., 2020. Review of Encapsulated Salt Hydrate Core-Shell Phase Change Materials. *KONA Powder Part. J.* 37, 85–96. <https://doi.org/10.14356/kona.2020010>
196. Wang, R., Zhang, W., Yang, S., Zhang, Z., Fan, S., Lai, C.S., 2023. A novel approach for utilizing waste heat resources in the steel industry. *Front. Energy Res.* 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1257344>
197. Woolley, E., Luo, Y., Simeone, A., 2018. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 29, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.001>
198. Xiao, Y., Zhang, K., Zhang, Y., Zhou, W., Liu, W., Wan, F., 2022. Research on Control Method of Waste Heat Utilization System Based on Multi-parameter Coupling. *Sci. Rep.* 12, 11497. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15808-0>
199. Xie, Y., Qin, C., Guo, S., Chen, Z., 2023. Experimental research of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners. *Case Stud. Therm. Eng.* 41, 102613. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102613>
200. Xu, W., Jin, Y., Zhu, L., Li, Z., 2021. Performance Analysis of the Technology of High-Temperature Boiler Feed Water to Recover the Waste Heat of Mid-Low-Temperature Flue Gas. *ACS Omega* 6, 26318–26328. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03465>
201. Xu, Z.Y., Wang, R.Z., Yang, C., 2019. Perspectives for low-temperature waste heat recovery. *Energy* 176, 1037–1043. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.001>
202. Yang, S., Shao, X.-F., Luo, J.-H., Baghaei Oskouei, S., Bayer, Ö., Fan, L.-W., 2023. A novel cascade latent heat thermal energy storage system consisting of erythritol and paraffin wax for deep recovery of medium-temperature industrial waste heat. *Energy* 265, 126359. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126359>

203. Yang, X., Yan, Y.Y., Mullen, D., 2012. Recent developments of lightweight, high performance heat pipes. *Appl. Therm. Eng.* 33–34, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.006>
204. Yodrak, L., Rittidech, S., Poomsa-ad, N., Meena, P., 2010. Waste Heat Recovery by Heat Pipe Air-Preheater to Energy Thrift from the Furnace in a Hot Forging Process. *Am. J. Appl. Sci.* 7, 675–681. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.675.681>
205. YOUNGOVA, D., 2021. Climate action in France: Latest state of play.
206. Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G., Degreè, J., Lv, Y., 2016. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Prog. Energy Combust. Sci.* 53, 1–40.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.003>
207. Zhang, H., Dong, J., Wei, C., Cao, C., Zhang, Z., 2022. Future trend of terminal energy conservation in steelmaking plant: Integration of molten slag heat recovery-combustible gas preparation from waste plastics and CO₂ emission reduction. *Energy* 239.
208. Zhang, J., Cho, H., Mago, P.J., 2021. 7 - Energy conversion systems and Energy storage systems, in: Borge-Diez, D., Rosales-Asensio, E. (Eds.), *Energy Services Fundamentals and Financing, Energy Services and Management*. Academic Press, pp. 155–179.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820592-1.00007-5>
209. Zhao, J., Ma, L., Zayed, M.E., Elsheikh, A.H., Li, W., Yan, Q., Wang, J., 2021. Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry. *Process Saf. Environ. Prot.* 147, 1209–1228. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.045>
210. Živković, D., Končalović, D., Vukasinovic, V., Josijevic, M., Nikolic, J., Novaković, I., 2021. Preliminary cost-benefit analysis for the heat pump application in industry, in: 2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) March 17-19, 2021, Jahorina, East Sarajevo, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina : Proceedings. Presented at the 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, IEEE.
211. Zohuri, B., 2016. Basic Principles of Heat Pipes and History. pp. 1–41.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-29841-2_1