



UNIVERSITATEA POLITEHNICA BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică

Departamentul Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice

Nr. Decizie Senat din

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

*Contribuții la studiul recuperării energiei termice deșeu
sau din surse regenerabile cu ajutorul ciclurilor Rankine
cu fluide organice*

*Contributions to the study of waste or renewable thermal
energy recovery using organic Rankine cycles*

Autor: Ing. Taban Daniel

Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Alexandru DOBROVICESCU

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Mariana-Florentina ȘTEFĂNESCU	de la	Universitatea Politehnica din București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Alexandru DOBROVICESCU	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent	Prof. Dr. Ing. Viorel POPA	de la	Universitatea Dunărea de jos din Galați
Referent	Prof. Dr. Ing. Mugur BĂLAN	de la	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Referent	Prof. Dr. Ing. Valentin APOSTOL	de la	Universitatea Politehnica București

București
2021

Cuprins

Introducere	2
Capitolul 1 - Stadiul actual al cercetării în domeniul recuperării căldurii reziduale sau utilizării căldurii din surse regenerabile	5
1.1 Recuperarea căldurii de la motoarele cu ardere internă (MAI)	6
1.2 Producerea de energie printr-un sistem Solar ORC (S-ORC).....	7
Capitolul 2 - Fluide organice compatibile utilizării în cicluri ORC	8
Capitolul 3 - Scheme de cicluri Rankine cu fluide organice	9
Capitolul 4 - Recuperarea energiei termice deșeu evacuate de gazele de ardere ale unui motor cu ardere internă	9
Capitolul 5 - Instalație experimentală pentru studiul recuperării căldurii gazelor de ardere ale MAI cu ajutorul unui sistem ORC.....	10
Capitolul 6 - Utilizarea energiei termice solare pentru producerea de energie electrică cu ajutorul ciclurilor S-ORC	12
Capitolul 7 - Analiza cuplării optimizate MAI-ORC-IFV	14
Capitolul 8 – Optimizarea exergoeconomică a sistemului cuplat ORC-IFV	16
Concluzii.....	18
C.1. Concluzii generale.....	18
C.2. Contribuție originală	22
C.3. Direcții de cercetare viitoare	22
Articole publicate.....	23
Bibliografie selectivă	23

Introducere

Teza de doctorat intitulată CONTRIBUȚII LA STUDIUL RECUPERĂRII ENERGIEI TERMICE DEȘEU SAU DIN SURSE REGENERABILE CU AJUTORUL CICLURILOR RANKINE CU FLUIDE ORGANICE (CONTRIBUTIONS TO THE STUDY OF WASTE OR RENEWABLE THERMAL ENERGY RECOVERY USING ORGANIC RANKINE CYCLES) se înscrie în preocupările colectivului de cercetare al Departamentului de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice (TMETF), Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică (FIMM) din Universitatea POLITEHNICA din București (UPB). Teza a fost elaborată în cadrul Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică din UPB și conține contribuții originale în domeniul clasificării și modelării sistemelor de recuperare a energiei termice deșeu sau din surse regenerabile, din dorința și necesitatea de a investiga noi posibilități de recuperare a energiei termice deșeu sau din surse regenerabile prin intermediul unui ciclu Rankine cu fluide organice (ORC). Datorită interesului în continuă creștere față de utilizarea sistemelor ORC pentru recuperarea energiei termice deșeu sau din surse regenerabile, în această teză s-au conceput noi scheme constructive, studiate prin intermediul modelării iterațiilor de calcul energetic și exergetic.

În această teză au fost abordate și studiate două dintre cele mai întâlnite direcții de recuperare a energiei termice deșeu sau din surse regenerabile prin intermediul unui sistem ORC, prima direcție studiază potențialul recuperării căldurii evacuate de motoarele cu ardere internă(MAI) prin intermediul gazelor de ardere rezultate în urma procesului de combustie, iar a

doua direcție studiază potențialul de recuperare a căldurii regenerabile generate de soare prin radiația solară. Studiul recuperării căldurii din cele două surse menționate anterior este de o mare importanță deoarece reprezintă în zilele noastre o alternativă de producere a energiei fără a consuma suplimentar din resursele naturale. Recuperarea căldurii din gazele evacuate de MAI printr-un sistem ORC denumite sisteme MAI-ORC livrează un surplus de energie rezultat dintr-un proces primar al cărui randament este sub 50%. Pe de altă parte, recuperarea căldurii din radiația solară printr-un sistem solar ORC denumit S-ORC se impune ca o soluție de producere a energiei ce are ca scop principal diminuarea consumului de resurse naturale epuizabile și protejarea mediului înconjurător.

Teza aduce contribuții originale legate de modelarea sistemelor MAI-ORC folosind ca date de intrare parametrii gazelor de ardere de la un motor cu aprindere prin comprimare (MAC) ce echipează standul experimental MAI-ORC din cadrul departamentului TMETF, precum și crearea unui program de calcul și a unei interfețe de lucru cu ajutorul software-urilor specializate pentru studiul comportării parametrilor energetici și exergetici de ieșire dintr-un sistem complex MAI-ORC cuplat cu o instalație frigorifică cu comprimare mecanică de vapori denumită MAI-ORC-IFV. Analiza exergetică și optimizarea exergoeconomică a sistemului MAI-ORC-IFV dezvoltate explicit în această teză sunt deasemenea contribuții originale pentru studierea sistemelor de recuperare a energiei deșeu.

În ceea ce privește sistemul solar S-ORC s-au adus contribuții originale prin studiul poziționării optime a captatorilor solari și elaborarea unui model de calcul pentru stabilirea condițiilor optime de amplasare și operare a modului ORC.

Pe parcursul celor cinci ani de școală doctorală autorul a participat activ pentru implementarea lucrărilor de înlocuire a echipamentelor neperformante și de instrumentare suplimentară a standului experimental MAI-ORC din cadrul departamentului TMETF-UPB.

Teza este structurată în 8 capitole, un număr de 214 pagini redactate la 1 rând, cuprinde 55 tabele și 157 figuri. La sfârșitul lucrării sunt prezentate 110 referințe bibliografice în ordinea citării lor în text.

În capitolul 1 s-a elaborat o cercetare bibliografică cu privire la stadiul actual al cunoașterii și au fost identificate principalele surse de energie termică și regenerabilă precum și regimul de temperaturi la care se regăsesc acestea. Au fost detaliate modalitățile de recuperare a căldurii și principiul de funcționare al schemelor întâlnite cu preponderență.

În capitolul 2 sunt prezentate principalele caracteristici de alegere a fluidului de lucru pentru ciclurile ORC, analizând fluidele compatibile pe patru direcții principale: proprietăți fizice, de mediu, termodinamice și economice. Au fost caracterizate fluidele de lucru în funcție de temperatura sursei calde, panta de saturație, protejarea mediului, siguranța în exploatare precum și din punct de vedere economic.

Capitolul 3 dezvoltă din punct de vedere constructiv și funcțional schemele ORC cu recuperarea căldurii din gazele de ardere rezultate din MAI. Au fost descrise principial schemele simple, duble, mixte, cu regenerare, cu preîncălzire, reîncălzire, scheme cu ejector și sisteme complexe.

Schema de bază ORC este analizată din punct de vedere termodinamic în capitolul 4 al tezei doctorale, unde s-a simulat funcționarea sistemului ORC ce recuperează gazele de ardere de la un MAI ce echipează un stand experimental din cadrul FIMM-TMETF. În cadrul capitolului sunt prezentate datele de intrare obținute experimental ale MAI Roman Brașov, alegerea schemei pentru simularea funcționării, modelarea sistemului ORC, precum și rezultatele obținute.

Instalația experimentală pentru studiul recuperării căldurii gazelor de ardere ale motorului cu ardere internă cu ajutorul unui sistem ORC este prezentată în capitolul 5. Sunt prezentate toate etapele premergătoare echipării grupului de microgenerare, elaborarea modelului matematic ce a permis simularea funcționării MAI, achiziționarea și instrumentarea grupului electrogen, determinarea bilanțului energetic, modul prin care se face achiziția parametrilor funcționali, stabilirea modelului funcțional de sistem ORC, alegerea fluidelor de lucru, elaborarea documentației și dimensionarea modelului funcțional, experimentarea instalației și a blocului de comandă, realizarea prototipului funcțional, îmbunătățirile aduse prototipului precum și stadiul actual de echipare al grupului de microgenerare.

În capitolul 6 se tratează din punct de vedere teoretic potențialul pe care îl reprezintă utilizarea energiei termice solare pentru producerea de energie electrică cu ajutorul ciclurilor ORC. S-a studiat influența intensității radiației solare și a fluxului de căldură pe o suprafață unitară primit de către captatorii solari de tip plan și a fost modelat sistemul de colectoare solare în funcție de poziționare. A fost prezentată schema de bază și modelarea sistemului S-ORC, în final fiind prezentată validarea modelului și a rezultatelor în comparație cu alte lucrări de referință.

Analiza cuplării optimizate MAI-ORC-IFV este prezentată în capitolul 7 al tezei doctorale. Plecând de la schema constructivă de bază și parametrii de lucru determinați experimental în capitolul 5, s-a efectuat în primă fază o analiză energetică pe baza unui model ce calcul termic, implementat cu ajutorul software-ului EES (Engineering Equation Solver). Analiza energetică cuantifică doar cantitățile de energie intrate și ieșite din sistem, ținând cont numai de pierderile externe. Pentru a identifica distrugerile de energie utilizabilă din interiorul sistemului s-a apelat la conceptul de exergie, care identifică adevărata măsură a cantității și calității unei anumite energii în corelare cu parametrii intensivi ai mediului ambiant. În finalul capitolului sunt prezentate rezultatele studiului și posibilitatea optimizării schemei constructive în vederea diminuării pierderii de exergie.

Pentru a găsi soluțiile funcționale și constructive optime ale cuplajului MAI-ORC-IFV în capitolul 8 al tezei s-a apelat la analiza exergoeconomică. Această analiză implică realizarea unui model matematic laborios ce ține cont de absolut toți parametrii, având ca rezultat evidențierea reală a zonelor sau a echipamentelor componente în care energia utilizabilă (exergia) este distrusă. Procedura de găsire a soluțiilor optime bazate pe analiza exergoeconomică face joncțiunea între Termodinamica proceselor ireversibile și Analiza economică.

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

Mulțumiri

Mulțumesc lui Dumnezeu pentru sănătatea și puterea de muncă primite pentru elaborarea acestei lucrări, în cadrul căreia am avut privilegiul și m-am bucurat de colaborarea unor specialiști cu calități profesionale și umane de excepție din cadrul Departamentului de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică din Universitatea POLITEHNICA din București, cărora doresc să le mulțumesc.

Mulțumesc familiei mele pentru că a acceptat toate sacrificiile impuse de implicarea mea în activitățile legate de pregătirea și elaborarea acestei lucrări. Mulțumesc tatălui meu pentru îndrumarea, răbdarea și sfaturile părintești, fratelui meu pentru sprijinul necondiționat, soției și fiului meu pentru căldura și suportul cu care m-au susținut în tot ceea ce am întreprins pentru realizarea mea pe plan spiritual și profesional.

Doresc să exprim recunoștința, respectul și mulțumirile mele conducătorului de doctorat, domnului prof. dr. ing. Alexandru DOBROVICESCU pentru răbdarea cu care m-a susținut, pentru competența profesională și calitățile umane deosebite, pentru sprijinul profesional cu care m-a îndrumat pe parcursul elaborării tezei de doctorat și nu în ultimul rând pentru motivarea și determinarea pe care mi le-a insuflat atât pe parcursul anilor de licență și master precum și în perioada studiilor de doctorat.

Domnului prof. dr. ing. Valentin APOSTOL doresc să îi mulțumesc în mod deosebit pentru sprijinul necondiționat atât pe plan profesional și mai ales pe plan spiritual cu care m-a îndrumat încă din prima zi în care ne-am cunoscut. Îi mulțumesc deasemenea pentru încrederea pe care mi-a acordat-o și pentru căldura cu care am fost primit atunci când am hotărât, sub îndrumarea domniei sale să susțin primele ore de laborator și seminar în calitate de asistent doctorand, în cadrul catedrei de TMETF.

Mulțumesc în mod special și doresc să îmi exprim recunoștința domnului conf. dr. ing. Horațiu POP pe care îl consider în primul rând prieten și coleg, pentru ajutorul și suportul oferit pentru întocmirea tezei de doctorat, pentru sfaturile și răbdarea pe care a avut-o pe parcursul ultimilor 10 ani, în care am interacționat atât în calitate de student – profesor și mai ales în calitate de colegi de departament. Îi mulțumesc pentru consultațiile și îndrumarea de care am beneficiat în întocmirea articolelor publicate și susținute și nu în ultimul rând pentru dedicația și dăruința pe care o manifestă pe plan profesional și uman față de studenți și colegii de departament.

Mulțumesc tuturor profesorilor și colegilor mei din departamentul de termotehnică al FIMM, în special șl. dr. ing. Claudia IONIȚĂ, prof. dr. ing. Eugenia VASILESCU, șl. dr. ing. Beatrice IBREAN, șl. dr. ing. Cătălina DOBRE, șl. dr. ing. Adina GHEORGHIAN, șl. dr. ing. Mihaela CONSTANTIN, ing. Mariana STAN, ing. Laurențiu GHEOLDEA, ing. Mircea HERA, ing. Ștefan MITREA, ing. Mugurel OPREA pentru ajutorul profesional, prietenia lor, precum și pentru colaborarea științifică.

Autorul

Capitolul 1 - Stadiul actual al cercetării în domeniul recuperării căldurii reziduale sau utilizării căldurii din surse regenerabile

Lucrarea de față se concentrează pe studiul producerii energiei mecanice utilizând o sursă de energie regenerabilă sau recuperarea căldurii reziduale (RCR) cu ajutorul unui ciclu Rankine cu fluide organice (ORC).

Unul dintre cele mai răspândite sisteme ce degajă în mediul ambiant mai mult de jumătate din energia obținută în procesul de combustie este motorul cu ardere internă (MAI). Pe de altă parte energia solară reprezintă o formă de energie inepuizabilă care așteaptă soluția potrivită pentru a fi colectată. Ciclul Rankine Organic (ORC) urmează aceleași principii ca și ciclul tradițional Rankine cu abur utilizat în majoritatea centralelor termice pentru producerea de electricitate, dar folosește un fluid organic în loc de apă. Fluidele de lucru aferente acestor cicluri pot fi selectate dintr-o listă lungă de candidați, inclusiv freoni, hidrocarburi, hidrofluorcarburi, siloxani și amestecuri ale acestor componente. Aceste caracteristici distinctive fac din ORC cea mai fiabilă opțiune pentru recuperarea energiei din surse neconvenționale de căldură, cum ar fi apele geotermale fierbinți, arderea biomasei, RCR din procesele industriale și aplicațiile solare termice. Putem afirma că

sistemele bazate pe cicluri ORC au atins maturitatea tehnologică de dezvoltare la scări de dimensiuni medii și mari pentru sursele de căldură geotermale și aplicații de recuperare a căldurii reziduale din arderea biomasei, dar sunt încă rar întâlnite la scări de dimensiuni mici până la micro. Ciclul Rankine organic se poate utiliza cu orice sursă de la care se obține căldură la un nivel scăzut și mediu de temperatură pentru a produce energie mecanică respectiv electrică. Principalele surse de căldură pentru ciclurile ORC au fost enumerate în capitolul de introducere și sunt, în general, reprezentate de debite de abur, de lichide sau de gaze de ardere ce rezultă în urma funcționării altor sisteme termice [25].

1.1 Recuperarea căldurii de la motoarele cu ardere internă (MAI)

Aproximativ 30%-40% din energia combustibilului în motoarele cu ardere internă este convertită în lucru mecanic util, iar restul este căldură reziduală expulzată în mediul ambiant prin gazele de ardere și sistemele de răcire ale motorului [14]. Recuperarea și utilizarea acestei călduri reziduale economisește combustibilii fosili, reduce cantitatea de gaze cu efect de seră eliberate în mediul înconjurător și poate fi utilizată pentru generarea de electricitate [6,15].

Cele două surse primare de căldură reziduală de la un MAI sunt gazele de ardere rezultate (cu un nivel de temperatură mediu) și lichidul de răcire al motorului (cu un nivel de temperatură mai scăzut). Studii anterioare în acest domeniu implică recuperarea fiecărei surse, precum și potențialul de recuperare a căldurii simultane atât din lichidul de răcire a motorului cât și din gazele de evacuare[6].

O trecere în revistă a literaturii de specialitate cu privire la RCR arată că de la MAI se poate obține căldură cu suficientă exergie pentru a justifica punerea în aplicare a unui ciclu secundar. Mulți cercetători recunosc faptul că recuperarea reziduurilor de căldură din eșapamentul motorului au potențialul de a reduce consumul de combustibil fără creșterea emisiilor, precum și progresele tehnologice recente au făcut aceste sisteme viabile și rentabile. Recunoașterea ciclului și a fluidului de lucru reprezintă subiectul principal al cercetării, deoarece acestea sunt considerate ca având cel mai mare impact asupra performanței sistemului.

Un sistem construit pe principiul unui ciclu Rankine organic are patru componente principale: vaporizatorul, detentorul sau turbina, condensatorul și pompa, prezentat în figura 1.1.

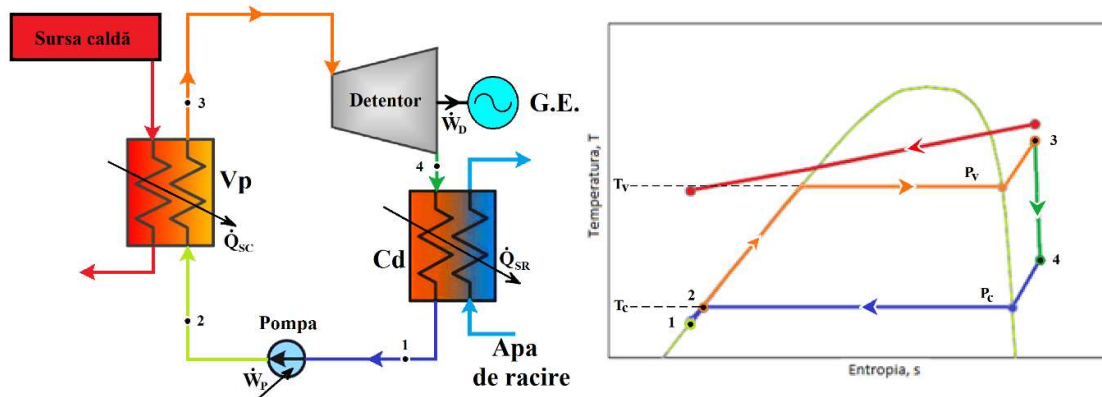


Figura 1.1 Schema ORC și reprezentarea ciclului în diagrama T-s

Fluidul de lucru preia fluxul de căldură de la sursa caldă (SC) se încălzește și apoi vaporizează în schimbătorul de căldură denumit vaporizator (V_p), vaporii rezultați se destind apoi

de la presiunea de vaporizare p_v , în turbină sau detentor (D), până la o presiune p_c generând astfel lucru mecanic, vaporii cu presiune scăzută de la ieșirea din detentor intră în condensatorul instalației (Cd) unde condensează cedând căldură mediului de răcire – sursei reci (SR), lichidul rezultat este pompat de pompa P de la presiunea de condensare notată p_c până la presiunea de vaporizare notată p_v reluându-se apoi ciclul.

În literatura de specialitate pot fi găsite diferite configurații de scheme pentru sisteme ORC atât scheme clasice din minimul de componente cât și diverse adaptări, îmbunătățiri și optimizări ale acestora în funcție de parametrii sursei de căldură și de proprietățile termo-fizice și termodinamice ale fluidului de lucru. Aceste scheme vor fi detaliate în capitolul 3 al tezei doctorale.

1.2 Producerea de energie printr-un sistem Solar ORC (S-ORC)

Iradianța solară este o formă de energie liberă imensă care ar putea fi exploatată și transformată într-o formă de energie utilizabilă cu ajutorul diferitelor tipuri de captatori de radiație. Energia solară prin aplicațiile ei este acum întrebuințată într-o varietate foarte mare de domenii precum încălzirea clădirilor, răcirea clădirilor, generarea căldurii pentru industrii, generare de energie electrică, refrigerarea alimentară, încălzirea apei, distilare, uscare, gătit și alte procese diverse. Printre altele, energia solară ar putea fi „combustibilul” pentru diferite tehnologii de răcire cum ar fi: mașina Stirling sau instalațiile frigorifice cu absorbție și ejecție. Folosind energia termică pentru a asigura absorbția, sistemul oferă posibilitatea de a considera soarele ca și combustibil pentru acest sistem asigurând răcirea vara când această sursă este disponibilă din abundență [26].

Iradieria orizontală globală (GHI) este cel mai important parametru pentru calcularea randamentului de energie și evaluarea performanței tehnologiilor fotovoltaice cu plăci plate și a colectoarelor solare plate. Pe de altă parte Iradierea normală directă (DNI) este unul dintre parametrii de o mare importanță pentru calcularea randamentului de energie și evaluarea performanței tehnologiilor de concentrare a energiei solare (CSP) și a concentratoarelor solare fotovoltaice (CPV). DNI este, de asemenea, importantă pentru calcularea iradierii globale primite de modulele fotovoltaice înclinate sau pentru cele cu urmărire solară.

Având în vedere abundența radiației solare, dezvoltarea pieței colectoarelor și varietatea fluidelor de lucru, ORC-urile acționate de colectoarele solare sunt deosebit de atrăgătoare pentru diferite aplicații precum producerea de energie electrică pentru rețea, desalinizarea apei, climatizarea și refrigerarea, producerea de căldură și energie electrică pentru uz casnic, trigenerarea, etc [28]. În teza de doctorat au fost studiate diferite tipuri de colectoare pentru sistemele S-ORC, ecuația ce stă la baza calculului randamentului colectoarelor plane și au fost prezentate cele mai întâlnite scheme de funcționare. S-a observat că pentru fiecare aplicație îmbunătățită față de schema de bază S-ORC, se vor pune în balanță cheltuielile suplimentare și complexitatea instalației (suprafața colectoarelor și numărul lor, dispozitivele de tip geo-tracking, dispozitivele de stocare, preîncălzitoarele, recuperatoarele de căldură, pompele suplimentare, al doilea detentor, etc) față de creșterea randamentului rezultat în urma acestor implementări. Selectarea fluidului de lucru joacă un rol determinant în ceea ce privește eficiența sistemului S-ORC. Cele mai multe aplicații studiate ating cel mai bun randament folosind fluide de lucru isentropice și uscate cu temperatura critică cât mai coborâtă. Apa și fluidele organice cu temperatura critică superioară conduc la obținerea unui randament similar cu cel al sistemelor de recuperare a căldurii de tipul MAI-ORC, la nivelele de temperatură ridicată, ce se regăsesc și în sistemele S-ORC cu captatoare solare de tip concentrator

sau parabolice. De asemenea, este clar că fluidele organice sunt mai interesante decât apa atunci când sunt utilizate ca fluid de lucru în ciclul ORC, deoarece apa necesită presiuni de funcționare mult mai mari, prezintă instabilitate datorită variației foarte mari a volumului specific în timpul schimbării fazei din lichid în vapori. Fluidele organice, în starea de saturație, pot funcționa în domeniul supracritic evitându-se astfel gradul ridicat de supraîncălzire necesar în ciclurile de apă/abur evitându-se astfel problemele asociate cu conținutul de umiditate ridicat în faza finală a destinderii aburului în turbină sau detentor [43].

Capitolul 2 - Fluide organice compatibile utilizării în cicluri ORC

Fluidul de lucru are un rol decisiv asupra performanței sistemelor MAI-ORC sau S-ORC, fiind necesară o analiză aprofundată din punct de vedere termodinamic cât și o analiză exergetică a sistemului în vederea selectării unui fluid cu caracteristici optime în exploatare. Au fost prezentate principalele criterii de selecție ale fluidului de lucru pentru sistemele ORC. Cu toate acestea, performanța sistemului ORC rămâne parametrul cel mai important ce trebuie avut în vedere în ceea ce privește caracterizarea și apoi selectarea fluidelor de lucru ideale în exploatare.

Deoarece utilizarea ciclurilor ORC este totdeauna asociată recuperării căldurii cu nivel de temperatură scăzut, fluidele organice trebuie să prezinte temperaturi de fierbere relativ scăzute. Punctul de îngheț trebuie să fie mai mic decât cea mai mică temperatură pe care o poate atinge fluidul în instalație. Fluidele cu masă molară mare au un impact pozitiv asupra eficienței turbinei. Totuși fluidele cu presiune critică mare și masă molară mare necesită suprafețe de schimb de căldură mai mari. Vâscozitatea scăzută în faza de lichid cât și în cea de vapori este necesară pentru a reduce căderile de presiune în schimbătoarele de căldură și în țevi.

De asemenea foarte importante pentru selecția fluidului de lucru sunt caracteristicile de securitate ale fluidului. Fluidele care nu sunt toxice și inflamabile sunt preferate la utilizarea ca agent de lucru celor cu risc ridicat. Pentru ca un agent să poată fi utilizat ca fluid de lucru trebuie să fie caracterizat de ODP (potențialul de subțiere a stratului de ozon) egal cu 0, GWP (potențialul de încălzire globală) mai mic sau egal cu 150 (începând cu anul 2022) [46] și durată de viață atmosferică scăzută [47]. Funcționarea într-un ciclu subcritic sau transcritic a unui sistem ORC este determinată de temperatura sursei de căldură și de proprietățile fluidului de lucru. Potrivirea între tipul ciclului termodinamic, fluidul de lucru și sursa de căldură este importantă pentru optimizarea sistemului ORC.

Ca și în cazul sistemelor MAI-ORC fluidele de lucru pentru ciclurile S-ORC se pot clasifica din punct de vedere al temperaturii sursei de căldură sau a curbei de saturație a vaporilor în diagrama T-s, care impune starea fluidului la ieșirea din detentor în urma destinderii adiabate.

Particularitatea fluidelor organice compatibile pentru sistemele ORC este că pot fi folosite la o temperatură de vaporizare mai mică decât temperatura de lucru uzuală pentru o turbină convențională de apă, furnizând astfel o eficiență ridicată. Fluidele organice utilizate în mod frecvent în sistemele ORC sunt: agenții frigorifici de tipul hidro-fluoro-carbonați (HFC), amoniacul, butanul, izopentanul, toluenul ș.a.m.d., care au, în general, un nivel ridicat al masei moleculare.

Peste 40 de fluide de lucru care sunt folosite în prezent în aplicațiile ORC au fost caracterizate în această lucrare. Clasificarea acestor fluide s-a făcut după temperatura critică, un parametru foarte important atunci când sursa caldă are o temperatură scăzută și se dorește recuperarea unei cantități de căldură cât mai mari. Principalele fluide întâlnite în ciclurile MAI-ORC și S-ORC au fost caracterizate după o serie de criterii actuale cum ar fi: panta curbei de vapori saturați uscați, protejarea mediului, siguranța în exploatare și criteriul economic.

Capitolul 3 - Scheme de cicluri Rankine cu fluide organice

În acest capitol sunt clasificate și detaliate principalele configurații și scheme de funcționare ale sistemelor ORC întâlnite în literatura de specialitate, ce au ca sursă de căldură primară gazele de ardere degajate în urma arderii combustibilului în MAI. Din punct de vedere constructiv, în exploatare se evidențiază sistemele ce folosesc minimul de echipamente din considerente financiare dar și modele îmbunătățite și optimizate ale schemei de bază.

Cele mai întâlnite scheme ORC au fost prezentate în acest capitol, începând cu schemele simple, au mai fost prezentate scheme cu preîncălzire, cu regenerare, cu două detentore, cu un detentor și un ejector, cicluri mixte și cicluri duble.

Prin fiecare echipament adăugat suplimentar la schema de bază, ce are ca scop maximizarea eficienței sistemului, se pune problema recuperării și amortizării investiției suplimentare pe durata exploatării echipamentului. De multe ori s-a dovedit că există un optim de echipamente pentru recuperarea căldurii de josă și medie temperatură printr-un ciclu ORC, fluxul de căldură preluat fiind un parametru decizional în acest caz.

Pentru fiecare aplicație îmbunătățită față de schema de bază ORC, se vor pune în balanță cheltuielile suplimentare și complexitatea (preîncălzitoare, recuperatoare, al doilea detentor, etc) față de creșterea randamentului rezultat în urma acestor implementări. Nicio configurație nu este optimă pentru fiecare sursă de căldură reziduală, prin urmare trebuie efectuată mai întâi o analiză termodinamică direcționată în funcție de sursa specifică de căldură ce se dorește a fi recuperată.

Cercetările sugerează că, un sistem ORC proiectat în mod corespunzător pentru RCR a motorului din gazele de evacuare poate reduce emisiile și să plătească pentru sine, prin economii de combustibil într-o perioadă relativ scurtă de timp (aproximativ 2-5 ani), în funcție în primul rând de călătoriile anuale, aceste cercetări fiind efectuate pe autotrenuri de transport marfă de cursă lungă. Prin urmare, sistemul poate ajuta la atingerea standardelor viitoare de emisii reducând în același timp costurile de exploatare.

Capitolul 4 - Recuperarea energiei termice deșeu evacuate de gazele de ardere ale unui motor cu ardere internă

În acest capitol s-a simulat și analizat teoretic funcționarea unui ciclu simplu ORC, având ca date de intrare parametrii gazelor de ardere de la un MAC montat pe un stand experimental. Tipul de motor folosit pe stand este D2156MTN8 Roman Brașov echipat cu turbocompresor și este montat pe o configurație experimentală de la Universitatea POLITEHNICA din București, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Departamentul de Termodinamică, Motoare, Termică și Echipamente Frigorifice.

În funcție de datele de intrare experimentale ale MAI Roman a fost efectuat un calcul termic teoretic pentru ciclul ORC utilizând în simulare o serie de fluide de lucru compatibile regimului de temperaturi ale sursei calde, la sarcini diferite de încărcare.

Au fost prezentate datele obținute experimental în urma măsurării cu echipamente specifice ce corespund cu 40%, 55% și 70% sarcină a motorului și turația de 1750 rpm. S-a observat că pentru unele dintre fluidele de lucru eficiența termică scade pe măsură ce crește supraîncălzirea, iar pentru alte fluide de lucru, eficiența termică crește și apoi scade, prezentând astfel o valoare optimă.

În finalul studiului s-a observat că valorile obținute pentru randamentul termic nu pot fi asociate direct cu un anumit grup de fluide de lucru. Fluidul de lucru trebuie selectat cu grijă, în funcție de aplicație. Pentru analiza efectuată în acest capitol folosind ca și date de intrare parametrii motorului cu ardere internă D2156MTN8 Roman Brașov se observă că cel mai potrivit fluid de lucru este R1233zd (E) nu numai pentru cel mai ridicat randament termic al sistemului ORC, ci și pentru că are un GWP foarte scăzut și este clasificat ca parte a grupului de siguranță A1.

Studiul a arătat ca sistemul ORC, ca soluție tehnică, poate fi aplicată cu succes pentru recuperarea căldurii evacuate de gazele de ardere ale MAI. Această tehnologie poate fi aplicată cu ușurință în cazul motoarelor staționare și mai greu în cazul motoarelor auto datorită schimbării rapide a condițiilor de funcționare. Cu toate acestea, producția de energie electrică obținută, în cazul motoarelor staționare, ar putea fi folosită pentru alimentarea sistemelor auxiliare ale echipamentului, sau ar putea fi utilizată pentru consumul sau iluminatul unei clădiri private sau livrată la rețeaua principală de electrificare.

Capitolul 5 - Instalație experimentală pentru studiul recuperării căldurii gazelor de ardere ale MAI cu ajutorul unui sistem ORC

Acest capitol continuă studiul și pune în practică la nivel experimental, optimizarea ciclului de recuperare a căldurii reziduale obținute de la un motor cu ardere internă (MAI) prin intermediul unui ciclu Rankine organic (ORC), având ca scop generarea de electricitate prin intermediul unui generator electric (GE) sau antrenarea unei instalații frigorifice cu comprimare mecanică de vapori (IFV).

În vederea stabilirii unei scheme de bază cât mai simple s-a impus dezvoltarea unui model de calcul pentru identificarea și optimizarea soluțiilor constructive ale cuplării ciclului mixt MAI-ORC prin intermediul unei analize exergetice și energetice. Analiza a urmărit găsirea structurii optime de operare și de proiectare pentru acest sistem în vederea obținerii puterii maxime. Datele de intrare pentru analiza cuplării optimizate au fost preluate de la motorul cu ardere internă ce echipează standul experimental MAI-ORC aflat în cadrul Departamentului Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice. Standul a fost conceput și realizat pentru a cerceta experimental care sunt posibilitățile de ameliorare a coeficientului de performanță al unui motor cu ardere internă prin cuplarea acestuia cu o instalație ORC cu rolul de a recupera căldura disipată de motor. Execuția acestui stand a fost finanțată în cadrul contractului de cercetare cod PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-0059 "Grup hibrid de micro-cogenerare de înaltă eficiență echipat cu ORC asistat electronic" acronim – GRUCOHYB.

În capitol s-a prezentat o sinteză a cercetărilor realizate în cadrul proiectului. În primă etapă căldura recuperată se preconizează a fi folosită (i) pentru obținerea de energie electrică cu un sistem bazat pe ciclul Rankine, folosind drept agent de lucru o substanță organică, și/sau (ii) pentru încălzirea unui agent termic sau activarea unui ciclu frigorific. Din punct de vedere al schemelor și ciclurilor analizate funcționarea s-a limitat la două variante: a) Ciclul ORC cu panta curbei de saturație a vaporilor nenegativă fără supraîncălzirea vaporilor la intrarea în detentor, în care s-a observat că ciclul, în varianta funcțională aleasă, funcționează cu subrăcirea lichidului condensat; b) Ciclul ORC cu panta curbei de saturație a vaporilor nenegativă cu supraîncălzirea vaporilor la intrarea în detentor și cu schimbător de căldură intern recuperator.

Dimensionarea modelului funcțional s-a realizat în urma unui studiu amplu în care s-au analizat 60 de variante prin 6 scheme funcționale aplicate pentru 10 fluide de lucru. Fluidele de lucru au fost selectate printr-o cercetare bibliografică având la bază criterii specifice aplicației. Datorită particularităților constructive, economice și de siguranță ale aplicației care a făcut obiectul cercetării, s-au ales la momentul respectiv ca fluide de lucru SES36 – Solkatherm și R245fa.

Pentru achiziția și stocarea datelor s-a utilizat sistemul PLC existent pentru grupul electrogen care a fost extins atât din punct de vedere hardware cât și software corespunzător necesităților instalației ORC, acest PLC este conectat la un PC pentru a permite o utilizare facilă a sistemului de operare al PLC-ului.

Datorită problemelor ridicate de achiziționarea fluidului de lucru SES36 și R245fa, constrângerilor legate de legislația care prevede ca din anul 2030 aceste fluide să fie înlocuite cât și a unor defecțiuni de ordin mecanic apărute la nivelul detentorului Thonson, Departamentul Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice a hotărât reabilitarea standului experimental din punct de vedere constructiv prin achiziționarea unor noi echipamente componente. Urmărind acest scop s-a avut în vedere găsirea unor soluții fezabile atât din punct de vedere tehnic cât și de ordin financiar.

S-a hotărât ca fluidul de lucru ce va deservi standul reabilitat să fie R134a, pentru a elimina în acest fel orice constrângere privind achiziționarea, exploatarea și gradul de poluare al mediului. Fluidul de lucru R134a este cel mai folosit fluid de lucru pe plan mondial în domeniul refrigerării și climatizării dar și în instalațiile de tip ORC pentru regimuri de joasă temperatură.

În urma efectuării calculului termic teoretic aplicat pe schema standului experimental și cu noul fluid de lucru modelat în EES (Engineering Equation Solver) [94], s-a dovedit că acesta prezintă bune caracteristici termodinamice în ceea ce privește COP-ul [47].

Din schema inițială s-a avut în vedere păstrarea tuturor componentelor ce pot funcționa la parametri normali cu fluidul de lucru R134a. Pentru o funcționare optimă s-a decis înlocuirea condensatorului și a detentorului echipamentului ORC. Deasemenea datorită presiunii ridicate (aproximativ presiunea de 28 bar la temperatura de 85 °C) ce se va atinge la nivelul schimbătorului de căldură vaporizator pentru R134a, s-a luat în calcul achiziționarea unui nou vaporizator dimensionat corespunzător pentru noul regim de funcționare. În urma efectuării calculului termic și a simulării funcționării ciclului s-a decis înlocuirea condensatorului în plăci, cu un condensator multitubular model Bitzer K203H.

Odată cu montajul Detentorului și a Condensatorului pe standul experimental, s-au făcut îmbunătățiri și asupra tabloului de automatizare și citire a datelor PLC. Parametrii energetici ai

curentului electric de ieșire produs prin intermediul generatorului ce echipează detentorul Bitzer vor fi citiți de modulele Phoenix Contact din PLC.

Toate aceste demersuri au avut ca scop determinarea bilanțului energetic al standului experimental echipat cu ORC, respectiv pentru funcționarea automată a acestuia. Se vor interpreta și valida datele obținute experimental în vederea găsirii soluției optime pentru cuplarea sistemului MAI-ORC cu o instalație frigorifică de tip IFV sau IFA. În acest scop deja se analizează posibilitățile de cuplare între cele două sisteme din punct de vedere tehnic dar și financiar, luându-se în calcul și multitudinea de echipamente frigorifice ce fac parte din inventarul laboratoarelor Departamentului Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice.

Capitolul 6 - Utilizarea energiei termice solare pentru producerea de energie electrică cu ajutorul ciclurilor S-ORC

Pentru modelarea sistemului S-ORC, în primul rând s-a efectuat o analiză a influenței intensității radiației solare și implicit a fluxului de căldură primit de către colectoarele solare amplasate în plan vertical [97] și în plan orizontal [98] pe o platformă cu o suprafață unitară cu ajutorul datelor tabelare din standardul român SR 6648-1:2014 și SR 6648-2:2014 [99,100]. Scopul analizei este de a stabili din punct de vedere tehnic, soluția optimă de amplasare în plan vertical sau orizontal a colectoarelor solare. Datele de intrare pentru stabilirea poziționării optime reprezintă un caz particular detaliat în lucrarea [97].

În cadrul platformei din lucrarea menționată mai sus, suprafețele de amplasare a colectoarelor sunt foarte restrictive, rezumându-se la două zone: una în plan vertical la 90^0 formată din 3 dispuneri cu suprafețe dreptunghiulare egale totalizând 15m^2 și cea de a doua dispunere în plan orizontal cu aceeași suprafață disponibilă.

Pentru stabilirea poziției optime de montaj a colectoarelor, prima modelare s-a făcut ținând cont de suprafața disponibilă în plan vertical dispusă pe trei tronsoane de formă dreptunghiulară, exterioare, amplasate în formă de U, iar pentru a doua modelare s-a utilizat o suprafață care este situată în plan orizontal de formă dreptunghiulară. S-au ales pentru studiu colectoare solare plane deoarece întrunesc toate condițiile specifice zonei în care se doresc a fi montate.

Din comparația datelor obținute s-au observat avantajele poziționării panourilor solare în plan orizontal. Au fost analizate valorile medii ale intensității radiației solare pentru cele două poziționări în lunile însorite, mai precis din Martie până în Octombrie. În lunile de iarnă se înregistrează valori neglijabile ale intensității medii a radiației solare, ce nu justifică punerea în funcțiune a sistemului complex.

Sistemul solar ORC propus pentru studiu este prezentat în figura 6.1 și va conține în primă fază minimumul de echipamente necesare funcționării. Acesta este compus dintr-un colector solar plan (FPSC), un rezervor de stocare (ST) în circuit închis în care apa este circulată de pompă (Pw) și din modulul ORC. Principalele componente ale modulului ORC sunt: Vaporizatorul (Ev), Detentorul (Ex), Condensatorul (Cd) și Pompa (P). Pe măsură ce răsare Soarele, FPSC primește energia solară sub formă de irradiație directă și indirectă, ducând la creșterea temperaturii apei din interiorul ST.

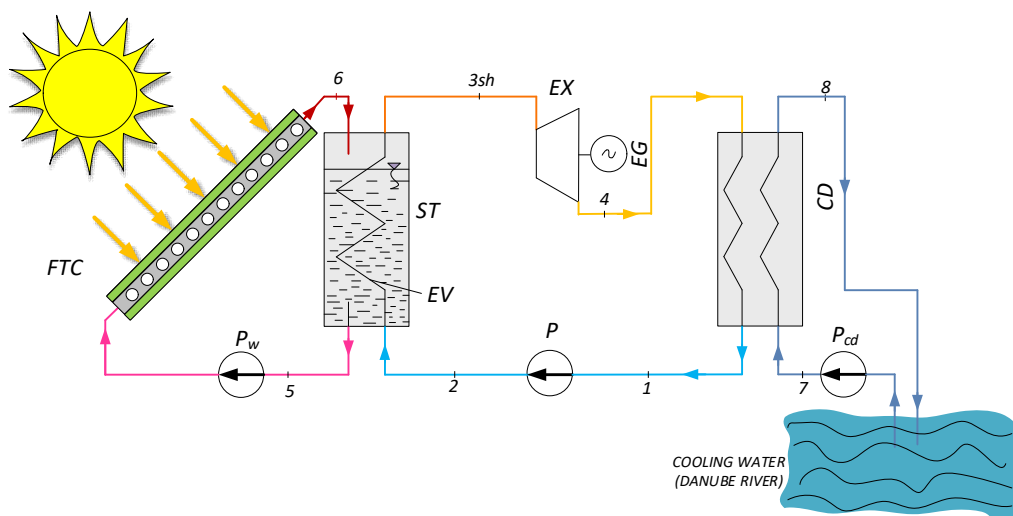


Figura 6.1 Schema de funcționare a sistemului S-ORC

Sistemul solar ORC a fost modelat prin împărțirea acestuia în două secțiuni principale, o primă secțiune FPSC - rezervorul de stocare - pompa de apă și a doua, modulul ORC. Ambele secțiuni au fost modelate pe baza ecuațiilor echilibrului energetic și au fost interconectate. Pentru modulul ORC a fost dezvoltat un model termodinamic simplu. Datele de intrare utilizate pentru generarea rezultatelor pe baza schemei corespund situației în care sistemul complex de producere a energiei regenerabile este amplasat pe fluviul Dunărea, lângă orașul Galați.

Doar fluidele de lucru uscate au fost selectate datorită temperaturii scăzute de vaporizare și a micilor grade de supraîncălzire care pot fi realizate în modulul ORC. Utilizarea fluidelor de lucru uscate va asigura că la ieșirea din Detentor starea termodinamică este de vapori supraîncălziți evitând astfel problemele de formare a picăturilor.

Pe măsură ce perioada de analiză se apropie de vară, punctul de plecare al modulului ORC se apropie de răsăritul soarelui, ceea ce înseamnă un timp de funcționare mai lung și, prin urmare, o producție mai mare de energie.

Sistemul solar ORC a fost modelat și a fost implementat un program în Microsoft Excel și conectat cu software-ul Engineering Equation Solver. Validarea rezultatelor a fost efectuată pe baza altor lucrări similare efectuate și raportate în literatură. Rezultatele au fost obținute pentru patru fluide de lucru și anume: R1234yf, R1233zd(E), HFE7100 și R290. Fluxul de căldură absorbit de modulul ORC la nivelul evaporatorului a fost setat la 7 kW. Modulul ORC începe să funcționeze atunci când temperatura apei din rezervorul de stocare ajunge la 70 °C și se oprește când temperatura scade la 45 °C. Rezultatele subliniază că:

- pentru condițiile specifice fluviului Dunărea din apropierea orașului Galați, modulul ORC va funcționa din martie până în septembrie. Timpul de funcționare depinde de disponibilitatea energiei solare, fiind mai mare la mijlocul verii;

- volumul de apă din interiorul rezervorului are o influență importantă asupra timpului de funcționare al modulului ORC și, de asemenea, asupra producției de energie. Din cele patru cazuri alese, 200 L, 350 L, 400 L și 600 L, analiza arată că volumul de 350 L este un compromis între timpul de funcționare și puterea netă de ieșire a modulului ORC;

- din cele patru fluide se obține cea mai mare putere de ieșire a modului ORC pentru R1233zd (E) urmată de R290, R1234yf și HFE7100;
- R1233zd (E) produce cea mai mare eficiență termică a sistemului ORC, urmată de R290, R1234yf și HFE7100;
- în iulie, pentru condițiile specifice fluviului Dunărea din apropierea orașului Galați, cea mai mare producție de energie de 2,22 kWh se realizează atunci când modulul solar ORC funcționează cu fluid R1233zd (E), urmat de 2,17 kWh pentru R290, 2,13 kWh R1234yf și 2,10 kWh pentru HFE7100, respectiv;
- producția de energie din martie până în septembrie pentru condiții specifice fluviului Dunărea din orașul Galați este: 254,19 kWh când modulul solar ORC funcționează cu fluid R1233zd (E), urmat de 249,38 kWh pentru R290, 244,93 kWh R1234yf și 241,62 kWh pentru HFE7100.

Capitolul 7 - Analiza cuplării optimizate MAI-ORC-IFV

Obiectivul acestui capitol este de a identifica și optimiza soluțiile constructive ale cuplării ciclului mixt ORC-IFV prin intermediul unei analize exergetice și energetice.

Conceptul propus pentru analiză combină un ciclu ORC cu o instalație frigorifică cu comprimare mecanică de vapori (IFV) pentru a forma un sistem de răcire activat termic (ORC-IFV). Arborele cotit al detentorului ORC-ului și cel al compresorului IFV-ului sunt cuplate direct pentru a reduce pierderile prin conversia de energie. O altă particularitate a schemei ORC-IFV este folosirea unui singur fluid de lucru pentru antrenarea ambelor cicluri termodinamice. În acest sens s-a implementat un traseu hidraulic care va vehicula fluidul de lucru necesar ambelor cicluri, cu un singur schimbător de căldură condensator.

Sistemul combinat ORC-IFV are potențiale avantaje față de alte instalații frigorifice activate termic în termeni de performanță și simplitate. De asemenea comparativ cu instalațiile cu absorbție sau adsorbție (IFA) sistemul combinat ORC-IFV are flexibilitate deoarece atunci când nu este cerință de frig poate produce energie electrică. Acest lucru este valabil pentru aplicații în care energia termică de la sursa de căldură este disponibilă în toate anotimpurile. Pe perioadele calde de vară toată energia termică disponibilă poate fi convertită în energie mecanică și apoi în efect frigorific, iar în timpul iernii când nu este nevoie de frig sistemul poate produce energie electrică.

Configurația instalației ORC-IFV precum și fluidul de lucru au fost stabilite în urma unui studiu amplu în care s-au analizat schemele funcționale întâlnite în literatura de specialitate. Fluidele de lucru au fost selectate printr-o cercetare bibliografică având la bază criteriile specifice aplicației ORC dar și bune rezultate în sistemele IFV. Fluidul de lucru ales pentru modelarea sistemului combinat ORC-IFV este R245fa. Datele de intrare pentru analiza cuplării optimizate au fost preluate de la MAI Yanmar detaliat în capitolul 5. Modelul matematic se bazează pe bilanțuri de masă, energie și exergie pentru diferite structuri constructive ale schemei ORC-IFV.

Schema constructivă de bază și reprezentarea ciclului în diagrama P-h a instalației ORC-IFV este prezentată în figura 7.1.

S-au efectuat analize energetice și exergetice detaliate amănunțit în teza de doctorat. Exergia exprimă adevărata măsură a cantității și calității unei anumite energii în corelarea cu parametrii intensivi ai mediului. Exergia este distrusă într-un proces specific de conversie a

energiei. Minimizarea distrugerilor de exergie în componentele cheie ale unui sistem energetic oferă strategia de urmat pentru optimizarea structurii și modul în care sistemul funcționează.

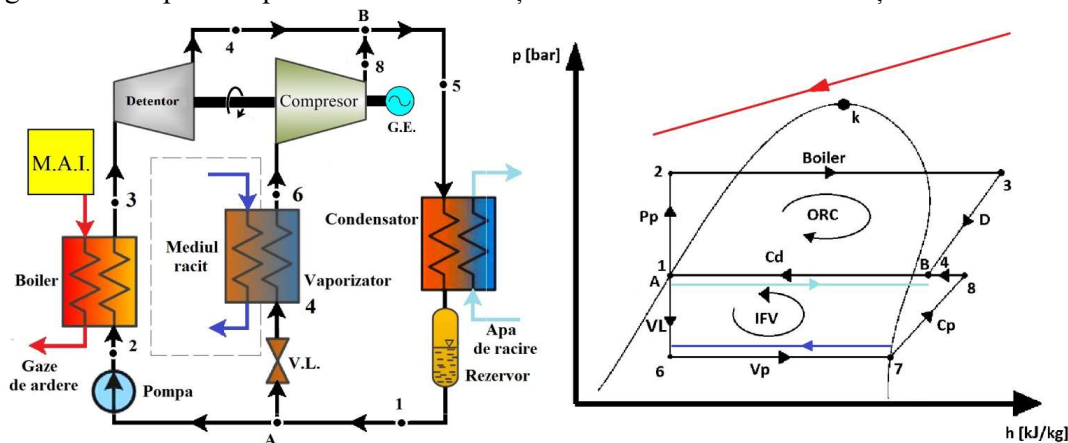


Figura 7.1 Schema de bază și ciclul termodinamic al sistemului ORC-IFV propus pentru analiză

Din analiza exergetică s-a concluzionat că pentru a diminua, suprafața corespunzătoare distrugerii exergiei în încălzitor, temperatura de admisie a fluidului ORC ar trebui să fie mărită.

Se poate diminua pierderea de exergie în încălzirea fluidului de lucru astfel încât de la Boiler să preluăm mai puțină căldură de la gazele de ardere pentru încălzirea fluidului de lucru. Această preîncălzire se poate efectua montând un schimbător de căldură înaintea boilerului prin care va trece fluidul de lucru de temperatură destul de ridicată de la ieșirea din detentor, deasemenea această schemă se poate îmbunătăți montând un schimbător de căldură regenerativ între ieșirea fluidului de lucru din Detentor înainte de Condensator. În figura 7.2 este prezentată schema cu Regenerator.

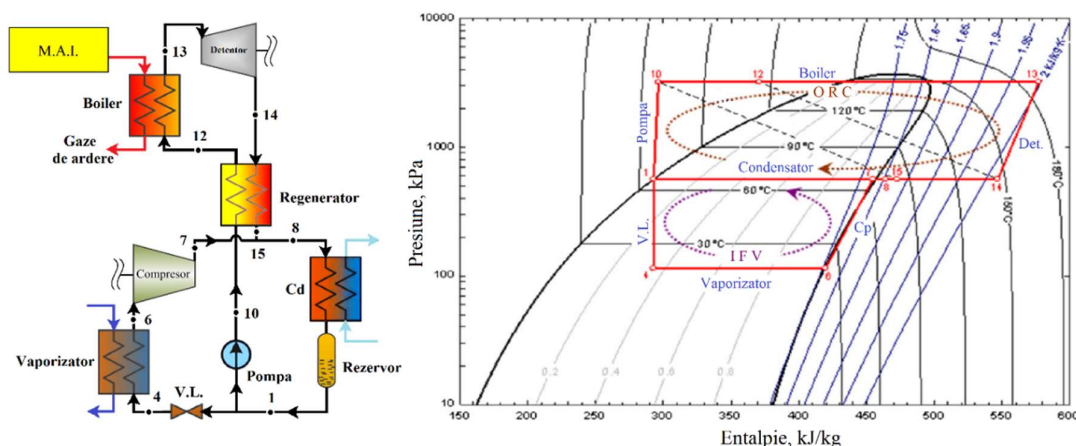


Figura 7.2 Schema și ciclul termodinamic al sistemului ORC-IFV cu Regenerator

Datorită diferenței mari de temperatură între ieșirea fluidului de lucru din Detentor înainte de Condensator și intrarea acestuia în vaporizatorul Boiler, se justifică introducerea unui schimbător de căldură denumit în continuare Regenerator, pe circuitul instalației ORC, ce poate face o preîncălzire a fluidului de lucru înainte de Boiler, scopul fiind micșorarea pierderilor de exergie înregistrate în procesul de încălzire, vaporizare și supraîncălzire din Boiler, acestea materializându-se implicit în creșterea randamentului energetic și exergetic al sistemului compus.

Rezultatele modelării matematice pe baza analizei exergetice a funcționării ciclului ORC cu R245fa, fără supraîncălzire, cu schimbător de căldură Regenerator, pentru o sarcină a motorului de 100%, au fost obținute pe baza calculului energetic și exergetic și sunt prezentate în teza de doctorat.

Capitolul 8 – Optimizarea exergoeconomică a sistemului cuplat ORC-IFV

Analiza exergoeconomică este singura metodă de investigare și procedură de optimizare care ia în considerare faptul că orice sistem termodinamic se găsește în interacțiune cu două medii:

- a) un mediu fizic determinat printr-un sistem de parametri intensivi cum ar fi presiunea, temperatura și potențialul chimic, și
- b) un mediu economic caracterizat prin prețuri ale materiilor prime și echipamentelor și seturi de reglementări pentru asigurarea unei dezvoltări durabile.

Având în vedere că energia este o măsură conservativă (Principiul I al termodinamicii) și că ea, în principal, nu se consumă și deci nu poate apărea, conceptual, în bilanțuri economice trebuie găsit un alt concept, neconservativ care să definească consumul de energie utilizabilă, acesta este exergia. Analiza exergoeconomică realizează bilanțul economic contabilizând atât fluxurile monetare legate de procesul de operare cât și cele de investiție. Metoda de optimizare exergoeconomică urmărește identificarea distrugerii de exergie a fiecărei zone funcționale și atribuirea costului monetar al acestuia.

Zonele cu cost ridicat ale distrugerii de exergie vor fi primele ținte ale procedurilor de optimizare, efectul fiecărei reduceri locale de cost va fi verificat la nivel global.

Pentru a cuantifica valoarea unei distrugerii zonale s-au evaluat pentru fiecare zonă operațională în parte, combustibilul, produsul, pierderea și coeficientul de performanță exergetică.

Schema instalației IFV acționată cu sistem ORC a fost împărțită în șapte zone de funcționare: 1) Vaporizator ORC (Boiler); 2) Detentor; 3) Compresor; 4) Condensator; 5) Ventil de laminare; 6) Vaporizator IFV; 7) Pompa de lichid ORC.

Pentru a aprecia modul în care cheltuiala cu investiția salvează costul monetar al distrugerilor de exergie zonal, s-a calculat pentru fiecare echipament factorul exergoeconomic f_k [106], unde indicele k reprezintă echipamentul.

Pentru a calcula exergia chimică a motorinei cu formula chimică $C_{12}H_{23}$ s-a imaginat un dispozitiv ideal cunoscut sub numele de cutia de echilibru a lui Van't Hoff [107] în care reactanții cât și produșii intră și ies la parametrii mediului ambiant T_0 și p_0 . Procesele care au loc în cutia de echilibru (camera de reacție) se desfășoară staționar și în condiții de echilibru termodinamic.

Spre deosebire de corelațiile termoeconomice de cost în care costul de cumpărare al unui echipament se estimează printr-o funcție de cantitate a resurselor materiale folosite, în cazul corelațiilor exergo-economice costul se precizează în funcție de coeficientul de performanță exergetic (sau definit pe baza Principiului al Doilea al Termodinamicii) sau al variabilelor de decizie care definesc performanța exergetică (cum ar fi distrugerea de exergie) și funcție de un factor care determină produsul exergetic al echipamentului.

Ținând cont de considerentele și reglementările de mediu actuale (în principal GWP-ul crescut), care nu mai permit folosirea fluidelor de lucru SES36 - Solkatherm și R245fa în toate tipurile de instalații, s-a impus găsirea unor înlocuitori care să prezinte aceleași caracteristici

termodinamice, dar și respectarea criteriilor de mediu și siguranță în exploatare. Pentru a alege cel mai potrivit fluid de lucru pentru sistemul MAI-ORC-IFV, în urma unei analize din punct de vedere al criteriilor de alegere: mediu, siguranță în exploatare, tehnic și economic, care au fost descrise și în capitolul 2, s-a efectuat un studiu actualizat asupra fluidelor de lucru ce au o temperatură critică cuprinsă între 150 și 200 °C. S-a observat că R1224yd(Z) și R1233zd(E) întrunesc toate criteriile menționate mai sus și sunt în momentul de față fluidele de lucru cu caracteristicile termodinamice cele mai apropiate de predecesorii SES 36 și R234fa.

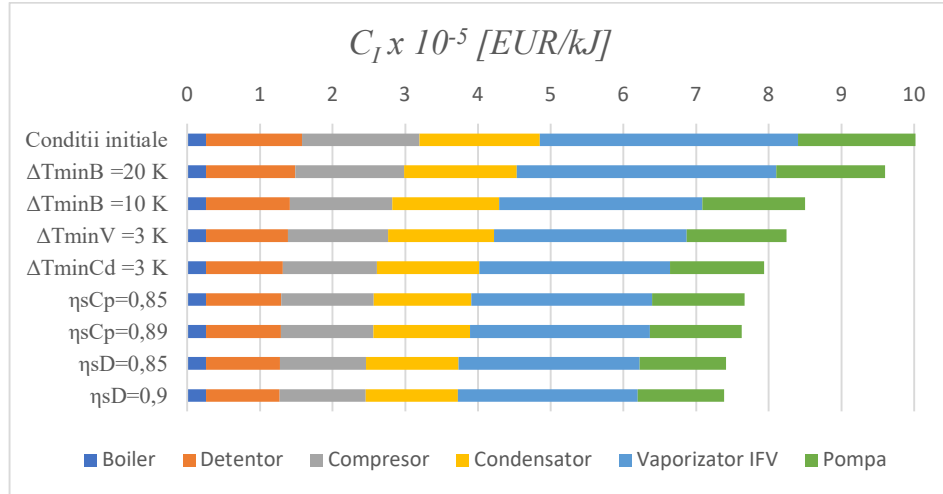


Figura 8.1 Variația costului unitar de distrugere de exergie $C_I \times 10^{-5}$ [EUR/kJ] pentru fiecare echipament, în funcție de parametrii de optimizare impuși

Au fost prezentate rezultatele obținute pentru fluidul de lucru R1224yd(Z) în funcție de variația mai multor parametrii decizionali, printre care diferența minimă de temperatură în Condensator ΔT_{minCd} , diferența minimă de temperatură în Vaporizator ΔT_{minV} , diferența minimă de temperatură în Boiler ΔT_{minB} , precum și variația randamentului Compresorului η_{sCp} sau a Pompei η_{sP} .

Tabel 8.1 Rezultatele energetice și exergetice obținute pentru schema ORC-IFV folosind fluidul de lucru R1224yd(Z)

COP_{IFV} [-]	COP_{ORC} [-]	COP_{ORCIFV} [-]	η_{ex} [%]	$\dot{m}_{fluidIFV}$ [kg/s]	$\dot{m}_{fluidORC}$ [kg/s]	$\dot{m}_{fluidORCIFV}$ [kg/s]	ψ_{Cp} [%]	Ψ_D [%]	$\psi\Delta_{TB}$ [%]
8.89	0.1797	1.529	7.003	0.1681	0.073	0.2411	2.667	2.613	34.68
Ψ_P [%]	Ψ_{PiCd} [%]	Ψ_{VL} [%]	Ψ_{am} [%]	Q_B [kW]	Q_{Cd} [kW]	Q_{Vp} [kW]	$\dot{W}_D$ [kW]	$\dot{W}_{Cp}$ [kW]	$\dot{W}_P$ [kW]
0.2237	13.66	1.991	0.3358	17.05	43.1	26.06	3.063	2.931	0.1315

În rezultatele prezentate în figurile 8.1 și 8.2 a fost specificată și valoarea parametrului modificat, față de condițiile inițiale de calcul. Condițiile inițiale de calcul au luat în considerare următoarele date de intrare: $\Delta T_{minCd} = 8 \text{ K}$; $\Delta T_{minV} = 8 \text{ K}$; $\Delta T_{minB} = 30 \text{ K}$; $\eta_{sCp} = 0,8$; $\eta_{sP} = 0,8$. În rezultatele prezentate în figurile 8.10 și 8.11 a fost specificată și valoarea parametrului modificat, față de condițiile inițiale de calcul.

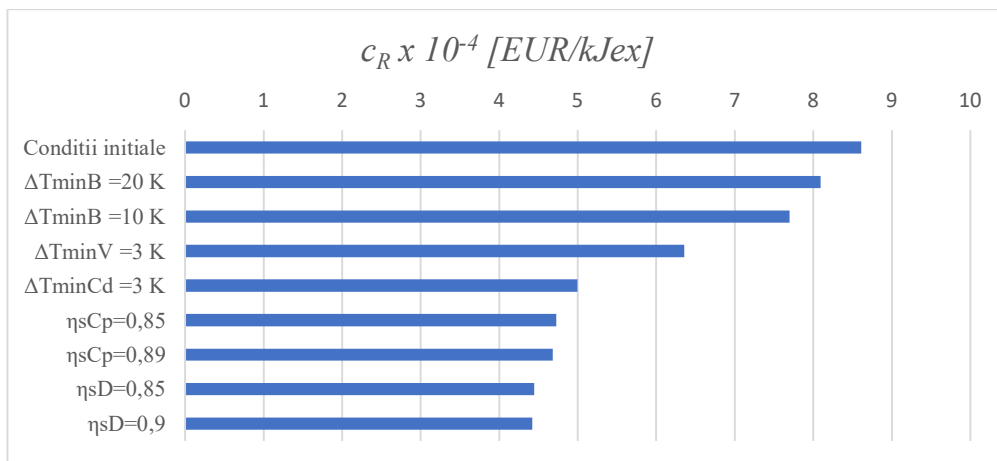


Figura 8.2 Variația costului unitar de exergie de produs $c_R \times 10^{-4} [EUR/kJ]$ pentru fiecare echipament, în funcție de parametrii de optimizare impuși

Costul unității de exergie de produs $c_R [EUR/kJex]$ scade la aproape jumătate în urma optimizărilor menționate mai sus după cum se observă și în graficul din figura 8.2. În tabelul 8.1 sunt prezentate principalele rezultate energetice și exergetice ale optimizării exergoeconomice folosind fluidul de lucru R1224yd(Z).

Concluzii

C.1. Concluzii generale

Lucrarea de față a avut ca principal scop identificarea, studierea și optimizarea din punct de vedere teoretic cât și experimental a potențialului de recuperare a căldurii deșeu sau din surse regenerabile prin intermediul unui ciclu Rankine cu fluide organice(ORC).

În **capitolul 1** au fost prezentate soluțiile constructive actuale de recuperare a căldurii reziduale sau regenerabile, printre care enumerăm: injecția de abur, efectul termoelectric, recuperarea căldurii prin instalații frigorifice cu absorbție sau printr-un ciclu Rankine cu fluide organice. Căldura degajată prin intermediul gazelor de ardere și temperatura ridicată a acestora justifică folosirea unui sistem de recuperare a căldurii de tip ORC ce are ca scop producerea de energie mecanică sau electrică.

Fluidele organice compatibile utilizării în ciclurile ORC au fost prezentate în **capitolul 2** al tezei de doctorat. Dat fiind multitudinea de fluide de lucru ce pot fi folosite, s-a elaborat o caracterizare a acestora în funcție de principalele criterii de selecție, ce țin cont de proprietățile termodinamice (temperatura sursei calde și panta curbei de vapori saturați uscați), de caracteristicile de siguranță în exploatare, caracteristicile de protejare a mediului înconjurător și nu în ultimul rând de criteriul economic. Printre principalele caracteristici pe care fluidul de lucru ideal trebuie să le îndeplinească putem enumera impactul redus asupra mediului înconjurător, bune caracteristici de siguranță, stabilitate termică și chimică, să fie un fluid izentropic sau uscat, să aibă o căldură latentă de vaporizare cât mai ridicată, o densitate mare, căldură specifică cât mai ridicată, temperatura critică peste temperatura maximă de funcționare a ciclului, temperatură și presiune rezonabilă, un cost redus și disponibilitate bună. Cu toate acestea nu există un fluid care să întrunească toate condițiile enumerate mai sus. În studiul de față s-au remarcat două fluide de lucru, R1233zd(E)

respectiv R1224 yd(Z) care se apropie de condițiile impuse pentru studiu, cum ar fi: temperatura critică, criteriile de mediu și siguranță în exploatare, precum și bune caracteristici tehnice. Aceste fluide au fost folosite în modelările din capitolele următoare.

Clasificarea și detalierea principalelor configurații și scheme de funcționare ale sistemelor ORC întâlnite în literatura de specialitate, ce au ca sursă de căldură primară gazele de ardere rezultate în urma procesului de ardere a combustibilului în MAI, au fost detaliate în **capitolul 3**. Au fost enumerate și descrise principalele scheme constructive ORC, printre care cele simple, cu regenerator, cu preîncălzitor, scheme cu reîncălzire, ejector, sisteme complexe, etc. Din punct de vedere constructiv, în exploatare se evidențiază sistemele ce folosesc minimul de echipamente din considerente financiare dar și modele îmbunătățite și optimizate ale schemei de bază. Prin fiecare echipament adăugat suplimentar la schema de bază, ce are ca scop maximizarea eficienței sistemului, se pune problema recuperării și amortizării investiției suplimentare pe durata exploatării echipamentului. De multe ori s-a dovedit că există un optim de echipamente pentru recuperarea căldurii de josă și medie temperatură printr-un ciclu ORC, fluxul de căldură preluat fiind un parametru decizional în acest caz. În urma studiului bibliografic s-a decis modelarea matematică prin calcul termic și exergetic al schemelor simple ORC, compuse din minimul de echipamente.

Pentru studiul teoretic al recuperării energiei termice deșeu, în **capitolul 4** s-a apelat la un studiu de caz folosind ca și date de intrare parametrii gazelor de ardere de la un MAC D2156MTN8 Roman Brașov cu o putere nominală de 57,3 kW. În urma stabilirii condițiilor de funcționare, a alegerii fluidelor de lucru efectuării calcului termic implementat cu ajutorul software-ului Engineering Equation Solver (EES) au rezultat puterea netă obținută și randamentul sistemului. S-a observat că dacă crește încărcarea MAC, crește și puterea netă a sistemului ORC. Cea mai mare putere netă se obține folosind fluidul de lucru R1233zd(E). S-a obținut o putere de ieșire de 3,6 kW a sistemului ORC atunci când motorul funcționează la o sarcină de 40%, 5,7kW la o încărcare de 55% și 6,7 kW la o sarcină de încărcare de 70%. Când aceste valori obținute sunt comparate cu puterea nominală a motorului pentru sarcinile de încărcare respective se observă că procentul de recuperare a căldurii deșeu are o valoare medie de 6,5% din puterea nominală a motorului. Aceste valori nu sunt de neglijat. Dacă puterea de ieșire netă este transformată în energie electrică prin utilizarea unui generator electric și se alege un factor de conversie de 0,98, atunci producția de energie electrică ar putea fi: în cazul unei încărcări de 40% a MAC de 3,5 kWe, în cazul încărcării 55% ar fi de 5,5 kWe și în cazul sarcinii 70% de 6,5 kWe. Sistemul ORC ca soluție tehnică de recuperare a căldurii deșeu a MAI poate fi aplicată cu succes și ușurință în cazul motoarelor staționare, dar mai greu în cazul motoarelor auto datorită schimbării rapide a condițiilor de funcționare.

Capitolul 5 prezintă în prima parte o sinteză a cercetărilor realizate pentru proiectarea și construirea instalației experimentale pentru studiul recuperării căldurii gazelor de ardere ale MAI cu ajutorul unui sistem ORC. Sistemul de microgenerare a energiei electrice și a căldurii este echipat cu un MAC staționar Yanmar Diesel în patru timpi cu o putere maximă de 40 kW prevăzut cu generator electric. Au fost prezentate etapele de simulare, elaborare, dimensionare precum și de stabilire a schemei modelului funcțional și a blocului de comandă. Proiectul a fost finalizat în anul 2015 odată cu punerea în funcțiune a sistemului experimental ORC. Datorită randamentului slab și al pierderilor cauzate de neetanșeitățile din detentorul Tonson, dar și a noilor reglementări în

privința protecției mediului, s-a impus upgradarea standului experimental și schimbarea fluidului de lucru ce deservește sistemul ORC. Pentru a se păstra o mare parte din echipamentele existente s-a simulat funcționarea sistemului ORC cu fluide de lucru ce respectă toate criteriile de mediu și siguranță în exploatare. S-a decis înlocuirea fluidului de lucru SES36 cu R134a, schimbarea detentorului Tonson cu un detentor Bitzer cu generator electric încorporat, schimbarea condensatorului precum și upgradarea sistemului de control și citire a datelor de tip PLC. Pentru partea de achiziție date noul tablou de comandă și citire a datelor a fost îmbunătățit cu mai multe echipamente printre care un convertizor de frecvență model Danfoss, iar pentru colectarea datelor de consum de energie electrică s-a achiziționat un analizor energetic pentru măsurarea parametrilor electrici. S-a urmărit updatarea și upgradarea programului PLC ILC 190 ETH2, upgradarea programului Human Machine Interface(HMI), upgradarea programului de stocare date și efectuarea testelor funcționale. Toate aceste demersuri au ca final scop determinarea bilanțului energetic al grupului hibrid de micro-cogenerare echipat cu ORC, respectiv pentru funcționarea automată a acestuia.

În **capitolul 6** s-a realizat un studiu teoretic privind utilizarea energiei termice solare pentru producerea de energie electrică cu ajutorul ciclurilor S-ORC. Pentru modelarea sistemului S-ORC s-a efectuat o analiză a influenței intensității iradianței solare, prin fluxul de căldură ce poate fi primit de un sistem format din colectoare solare ce pot amplasate pe o suprafață unitară formată dintr-un plan vertical sau dintr-un plan orizontal având ca date de intrare o serie de date statistice din standardul român SR 6648-1:2014 și SR 6648-2:2014 pe parcursul unui an pe fluviul Dunărea lângă orașul Galați. În urma studiului s-a observat că o serie de factori conduc la obținerea valorilor intensității medii a radiației solare directe sunt. Printre aceștia se pot enumera: condițiile climaterice, poziționarea în funcție de altitudine, orientarea colectoarelor în cele două planuri și desigur unghiul de incidență al razelor solare ce ține cont de luna calendaristică și poziționarea Soarelui față de pământ. Au fost analizate și prelucrate datele aferente lunilor în care sau înregistrat valori suficiente ale fluxului global de iradianță solară pentru angrenarea unui ciclu solar ORC. Din comparația se făcută cu ajutorul modelării matematice se observă avantajele poziționării panourilor solare în plan orizontal. Pe parcursul lunilor prezentate în studiu s-a observat că intensitatea medie a radiației solare pentru planul vertical, are valori apropiate, pentru fiecare lună, situate în medie la aproximativ 150 Wh/m^2 . În cazul amplasării panourilor solare în plan orizontal, valorile obținute pentru aceleași luni calendaristice sunt mult mai mari, înregistrându-se chiar și 400 Wh/m^2 în lunile de vară. De aici rezultă foarte clar avantajele poziționării panourilor solare în planul orizontal. În continuare s-a modelat sistemul solar S-ORC prin împărțirea acestuia în două secțiuni principale, o primă secțiune FPSC - rezervorul de stocare - pompa de apă și a doua, modulul ORC. Ambele secțiuni au fost modelate pe baza ecuațiilor echilibrului energetic și au fost interconectate. Pentru modulul ORC a fost dezvoltat un model termodinamic simplu. Funcționarea modulului ORC este legată de temperatura apei la ieșirea rezervorului de stocare care va avea o valoare impusă pentru activarea modulul ORC. Din simulările efectuate s-a fixat un volum optim de 350L pentru rezervorul de stocare. Validarea modelării a fost efectuată considerând ca fluid de lucru R1233zd(E) și cazul colectoarelor FPSC. Fluidul de lucru a fost selectat în urma unei analize pe direcțiile descrise și în capitolul 2 și anume caracteristici termodinamice, de mediu și siguranță în exploatare. Din studiu a rezultat că modulul ORC atinge starea de pornire în lunile cuprinse între martie și

septembrie. Cea mai mare producție de energie de 254,19 kWh se realizează atunci când modulul solar ORC funcționează cu fluid R1233zd(E). Producția de energie nu este foarte mare, dar ar putea acoperi parțial o parte din consumul de energie necesar pentru funcționarea platformei sau transformat în energie electrică și furnizat rețelei principale. Rezultatele arată că modulul solar ORC poate fi utilizat și integrat într-un sistem complex de producere a energiei regenerabile din surse naturale situat pe fluviul Dunărea, lângă orașul Galați sau în localitatea Năvodari din România.

O analiză aprofundată a cuplării optimizate motor cu ardere internă-ciclu Rankine cu fluide organice-instalație frigorifică cu comprimare mecanică de vapori(MAI-ORC-IFV) s-a efectuat în **capitolul 7** din teza de doctorat. Obiectivul acestui capitol a fost identificarea și optimizarea soluțiilor constructive ale cuplării ciclului mixt ORC-IFV prin intermediul unei analize exergetice și energetice. Datele de intrare pentru analiza cuplării optimizate au fost preluate de la motorul cu ardere internă staționar MAC Yanmar model 4TNV98TGGEHR folosind fluidul SES36. Pentru a analiza și optimiza schema de bază a instalației ORC-IFV s-au ridicat diagrame cu pierderile de exergie în funcție de variația parametrilor adecizionali Δt_{minB} , Δt_{minCd} , Δt_{siB} , ce determină în mod direct randamentul exergetic și energetic. Astfel că Δt_{minB} impune temperatura de vaporizare iar Δt_{minCd} impune temperatura de condensare și se observă că o mare parte din cantitatea de exergie introdusă prin intermediul gazelor de ardere se consumă în boilerul vaporizator astfel: 22,14% în încălzitor, în vaporizator 32,41% și numai 2,89% în supraîncălzitor. Analiza exergetică a ciclului de bază evidențiază deficiențele schemei constructive dezvăluind posibile modificări operaționale și constructive pentru îmbunătățirea performanțelor sale. După stabilirea schemei prevăzută și cu schimbătorul de căldură Regenerator a sistemului ORC-IFV, s-a reconfigurat modelul matematic dezvoltat anterior și pe baza datelor rezultate se observă diminuarea pierderilor de exergie în special în etapa de încălzire și vaporizare a fluidului de lucru. Această diminuare a pierderilor în cele două zone de schimb de căldură duce la creșterea randamentului exergetic cu 0,7% și implicit a COP-ului instalației ORC-IFV.

Capitolul 8 se concentrează pe optimizarea exergoeconomică a sistemului cuplat ORC-IFV. Procedura de optimizare exergoeconomică impune efectuarea unei analize exergoeconomice asupra zonelor funcționale, determinarea valorilor exergiei chimice a combustibilului și a gazelor de ardere, iar în final sunt modelate corelațiile exergoeconomice de cost. Fluidul de lucru R1224yd(Z) a fost implementat în programul de calcul exergoeconomic în funcție de variația mai multor parametri decizionali, printre care diferența minimă de temperatură în Condensator ΔT_{minCd} , diferența minimă de temperatură în Vaporizator ΔT_{minV} , diferența minimă de temperatură în Boiler ΔT_{minB} , precum și variația randamentului Compresorului η_{sCp} sau a Pompei η_{sP} . S-a constatat că cel mai mic randament exergetic η_{ex} și cea mai mare distrugere relativă este în Boiler. Optimizarea suprafeței de schimb de căldură a dus la obținerea unui cost al unității de exergie de produs $c_R = 7,694 \cdot 10^{-4} [EUR/kJex]$. Condensatorul are al doilea cel mai mic factor exergoeconomic. Trebuie redusă distrugerea de exergie. Optimizarea suprafeței de schimb de căldură a Condensatorului a condus la obținerea unui cost al unității de exergie de produs $c_R = 6,355 \cdot 10^{-4} [EUR/kJex]$. Costul distrugerii de exergie în Pompă, la fel ca și costul amortizării cheltuielii cu achiziția pompei sunt cele mai mici din sistem. Compresorul are cost de achiziție redus dar induce un cost ridicat al distrugerii de exergie ceea ce sugerează alegerea unui compresor mai scump cu un randament izentropic de comprimare mai mare. Rezultatul costului unității de exergie

de produs în urma creșterii randamentului izentropic al Compresorului este $c_R = 4,683 \cdot 10^{-4} [EUR/kJex]$. În zona Detentorului, atât costul amortizării cheltuielii cu achiziția cât și costul distrugerii de exergie sunt ridicate ceea ce indică posibilitatea reducerii cheltuielii, cu distrugerea de exergie prin alegerea unui detentor mai performant, tendință temperată totuși de costul Detentorului mai ridicat decât de exemplu, costul Compresorului. Optimizarea randamentului izentropic al Detentorului conduce la obținerea unui cost al unității de exergie de produs $c_R = 4,422 \cdot 10^{-4} [EUR/kJex]$.

Costul unității de exergie de produs $c_R [EUR/kJex]$ scade la aproape jumătate în urma optimizărilor menționate mai sus. Pentru sistemul complex MAI-ORC-IFV, în urma optimizărilor a rezultat un $COP_{ORCIFV} = 1,529$ și o putere frigorifică $Q_{vp} = 26 \text{ kW}$.

C.2. Contribuție originală

Pornind de la concluziile prezentate anterior, contribuțiile originale pot fi sintetizate după cum urmează:

- modelarea unui sistem MAI-ORC folosind ca date de intrare parametrii gazelor de ardere de la un MAC model D2156MTN8 Roman-Brașov;
- modelarea unui sistem optimizat MAI-ORC folosind ca date de intrare parametrii gazelor de ardere de la un MAC model Yanmar model 4TNV98TGGEHR de 40 kW;
- crearea unui program de calcul cu ajutorul software-ului EES și a unei interfețe de lucru de tip HMI pentru studiul comportării parametrilor energetici și exergetici de ieșire dintr-un sistem MAI-ORC-IFV cu posibilitatea modificării datelor de intrare și obținerea rezultatelor în cel mai scurt timp;
- elaborarea unui model de calcul pentru stabilirea condițiilor optime de amplasare și operare a modulului ORC din cadrul unui sistem solar S-ORC;
- modelarea unui sistem solar S-ORC amplasat pe fluviul Dunărea lângă orașul Galați;
- participare activă pentru implementarea lucrărilor de înlocuire a echipamentelor neperformante și de instrumentare suplimentară a standului experimental MAI-ORC din cadrul departamentului TMETF-UPB;
- modelarea și analiza exergetică a unui sistem complex MAI-ORC-IFV;
- optimizarea exergoeconomică a sistemului MAI-ORC-IFV.

C.3. Direcții de cercetare viitoare

Direcțiile de cercetare viitoare pot implica:

- punerea în funcțiune a standului experimental MAI-ORC;
- îmbunătățirea schemelor constructive MAI-ORC ce au ca scop obținerea unui randament mai bun cu minimul de echipamente;
- reluarea cercetărilor experimentale pentru fluidul de lucru R134a;
- achiziția de date prin intermediul modulului PLC în vederea alcătuirii unei baze de date cu determinări experimentale pentru fluidul de lucru R134a;
- elaborarea metodologiei de prelucrare a bazei de date;
- prelucrarea bazei de date și a rezultatelor obținute;
- optimizarea funcțională a standului experimental.

Articole publicate

1. **D Taban**, A Dobrovicescu, V Apostol, H Pop, Optimized coupling analysis of Internal Combustion Engine (ICE)-ORC-MCRS, The 8th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering ACME 2018 Section 7 21.
2. H Pop, V Apostol, V Bădescu, M H K Aboaltaboq, T Prisecaru, E Pop, M Prisecaru and **D Taban**, Working fluid selection procedure for ORC-based systems coupled with internal combustion engines driving electrical generators, ACME 2018 Section 7.
3. **Taban Daniel**, Pop Alina, Dobre Cătălina, Apostol Valentin, Prisecaru Tudor, Stabilirea poziționării optime a unui sistem de trei captatori solari în plan vertical în funcție de orientarea geografică, Revista Termotehnica nr.1 3025 - 2018.
4. Apostol V, Pop H., **Taban D.**, Tanase B., Gheorghian A., Dobre C., Pop E., Prisecar T., Stanciu C., Thermodynamic assessment of a solar organic Rankine cycle (ORC) integrated in a complex system for renewable energy production from natural sources located on Romania's Danube river near Galati City 978-1-7281-1532-0 2019 IEEE pp 328-332.
5. Alexandru Racovitză, Horațiu Pop, Valentin Apostol, Tudor Prisecaru, **Daniel Taban**, Comparison between Organic Working Fluids in order to Improve Waste Heat Recovery from Internal Combustion Engines by means of Rankine Cycle Systems, Revista de chimie vol 71, Nr. 1, București 2020 p 113-121.
6. Cătălina DOBRE, Mihaela CONSTANTIN, **Daniel TABAN**, Maria DRAGOMIR, Energy, Entropy, Exergy (3E) Analysis of a Micro-Cogeneration Unit Using an Alpha Type Stirling Engine, 36th IBIMA International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering, Materials Science and Engineering 444 (2021) 082003, Granada, Spain (ISBN: 978-0-9998551-5-7).

Bibliografie selectivă

- [6] Charles Sprouse III, Christopher Depcik, Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery, Applied Thermal Engineering 51 (2013) 711-722
- [14] Robert Morgan, Guangyu Dong, Angad Panesar, Morgan Heikal, A comparative study between a Rankine cycle and a novel intra-cycle based waste heat recovery concepts applied to an internal combustion engine, Applied Energy 174 (2016) 108-117
- [15] Viorel Bădescu, Mahdi Hatf Kadhum Aboaltaboq, Horațiu Pop, Valentin Apostol, Malina Prisecaru Tudor Prisecaru, Design and operational procedures for ORC-based systems coupled with internal combustion engines driving electrical generators at full and partial load, Energy Conversion and Management 139 (2017) 206-221
- [24] João S. Pereira, José B. Ribeiro, Ricardo Mendes, Gilberto C. Vaz, Jorge C. André, ORC based micro-cogeneration systems for residential application – A state of the art review and current challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews 92 (2018) 728-743
- [25] Anandu Surendran, Satyanarayanan Seshadri, Performance investigation of two stage Organic Rankine Cycle (ORC) architectures using induction turbine layouts in dual source waste heat recovery, Energy Conversion and Management: X 6 (2020) 100029 – carte ORC
- [26] Lavinia Grosu, Andreea Marin, Alexandru Dobrovicescu, Diogo Queiros-Conde, Exergy analysis of a solar combined cycle: organic Rankine cycle and absorption cooling system, International Journal Energy Environment Energ (2016) 7:449-459

- [28] Tryfon C. Roumpedakis, George Loumpardis, Evropi Monokrousou, Konstantinos Braimakis, Antonios Charalampidis, Sotirios Karellas, Exergetic and economic analysis of a solar driven small scale ORC, *Renewable Energy* 157 (2020) 1008-1024
- [43] Evangelos Bellos, Christos Tzivanidis, Investigation of a hybrid ORC driven by waste heat and solar energy, *Energy Conversion and Management* 156 (2018) 427–439
- [42] Andreea Marin, Adrian Untea, Lavinia Grosu, Alexandru Dobrovicescu, Diogo Queiros-Conde, Performance evaluation of a combined organic rankine cycle and an absorption refrigeration system, *Termotehnica* 1/2013
- [46] Gequn Shu, Lina Liu, Hua Tian, Haiqiao Wei, Guopeng Yu, Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery (2013)
- [47] Ana Alexandru, Daniel **Taban**, Iulian Uța, Sinteză asupra schemelor constructive ale sistemelor energetice de tip ORC, Sesiunea de Comunicări Stiințifice Studentești – Secțiunea 05-1 Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice, FIMM, UPB, (2014)
- [94] S.A. Klein, Engineering Equation Solver (EES), Academic Comercial V9.471, F-Chart Software, 1992-2013
- [97] **Taban** Daniel, Pop Alina, Dobre Cătălina, Apostol Valentin, Prisecaru Tudor, Stabilirea poziționării optime a unui sistem de trei captatori solari în plan vertical în funcție de orientarea geografică, *Revista Termotehnica* nr.1 3025 - 2018
- [98] Tănase Beatrice, Gheorghian Adina, Zamfir Mădălina, Bădescu Viorel, Pop Horațiu, Studiu comparativ privind poziționarea colectoarelor solare în plan vertical sau orizontal ținând cont de condițiile restrictive impuse de dimensiunile sistemului de producere a energiei regenerabile, *Revista Termotehnica* nr.2 3040 – 2018
- [99] SR 6648-1:2014 Instalații de ventilare și climatizare – Calculul aporturilor de căldură din exterior – prescripții fundamentale
- [100] SR 6648-2:2014 Instalații de ventilare și climatizare - Parametrii climatici exteriori
- [106] Bejan A., Tsasaronis G., Moran M., Thermal design and optimisation, John Wiley and sons, 1996
- [107] Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis, Department of Mechanical Engineering Queen Mary College University of London, Butterworths 1985