

Aplicații ale ciclului Rankine organic utilizând surse de energie regenerabile*

Applications of the Organic Rankine Cycle using renewable energy sources

Pavel Atănăsoae

Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava Str.
Universității 13, 720229, Suceava, Romania
E-mail: atanasoae@eed.usv.ro

Rezumat. *Lucrarea prezintă utilizarea ciclului Rankine organic pentru producerea combinată a căldurii și energiei electrice din surse de joasă temperatură cum este cazul surselor regenerabile de energie. Sunt analizate diferite tipuri de instalații de cogenerare cu ciclu Rankine organic existente pe piață, din punct de vedere al economiei de energie primară, comparativ cu producerea separată a căldurii și energiei electrice.*

Cuvinte cheie: ciclu Rankine organic, cogenerare, economia de energie primară

Abstract. *This paper presents the use of organic Rankine cycle (ORC) for power and combined heat generation from low temperature heat sources as in the case of renewable energy sources. There is an analysis of different types of CHP plants with ORC existing on the market from a primary energy saving point of view comparative with the separate production of the heat and power.*

Key words: Organic Rankine Cycle (ORC); Combined Heat and Power (CHP); Primary Energy Saving (PES)

1. Introducere

Conversia în energie electrică a căldurii provenite din surse regenerabile sau a căldurii reziduale provenite din diverse procese, reprezintă o soluție de valorificare eficientă a unor forme de energie disponibile în cantități mari și cu puține alte utilizări practice.

Dacă sursa de energie primară prezintă un potențial suficient de ridicat din punct de vedere al temperaturii dar și al puterii termice, se recomandă utilizarea ciclului Rankine clasic cu abur, ca soluție posibilă de conversie a căldurii în energie electrică.

Dacă sursa de energie primară are un potențial termic mai scăzut, cum este cazul surselor regenerabile de energie, poate fi utilizat ciclul Rankine organic pentru cogenerarea celor două forme de energie utilă: energie electrică și căldură (fig.1).

* Lucrare inclusă în programul conferinței RCEPB 2015

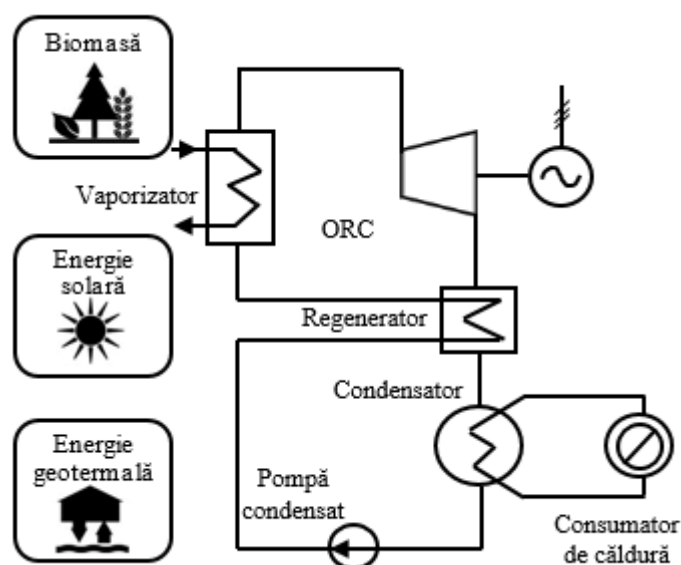


Fig.1. Ciclul Rankine Organic

Ciclul Rankine organic (ORC) este similar cu un ciclu Rankine convențional, cu deosebirea că folosește un fluid organic în loc de apă ca fluid de lucru.

2. Comparație termodinamică între apă și fluidele organice

Agenții de lucru din instalațiile care funcționează după ciclul Rankine, prezintă proprietăți termodinamice diferite, care influențează atât condițiile de lucru cât și performanțele energetice.

Apa este utilizată ca fluid de lucru pentru aplicații la temperaturi ridicate, dar are limitele sale, care devin mai semnificative în timpul funcționării la temperaturi mai coborâte la intrarea în ciclu. Diferența principală între fluidele organice și apă o reprezintă comportamentul lor atunci când se destind de la o stare saturată sau supraîncălzită, printr-o turbină la temperaturi scăzute sau moderate (200-400°C). Acest comportament se observă cel mai bine prin examinarea destinderii fluidului în turbină în acest regim de temperatură.

Figura 2 prezintă diagramă T-s pentru apă-abur cu două încălziri izobare către 300°C urmată de destinderea isentropică. În absența supraîncălzirii, în punctul final al destinderii isentropice rezultă un amestec cu două faze (vapori și lichid) de slabă calitate pentru funcționarea turbinei (titlul aburului < 80%). Un conținut mare de umiditate la ieșirea din turbină este inacceptabil, deoarece poate duce la deteriorarea paletelor finale și la înrăutățirea randamentului intern al turbinei.

Practica de proiectare pentru ciclurile Rankine cu abur impune supraîncălzirea aburului pentru a evita situarea punctului final al destinderii într-o zonă cu umiditate mare.

Există și alte mijloace de evitare a umidității în punctul final al destinderii, cum ar fi separarea mecanică a lichidului și vaporilor la faze de destindere intermediare, dar ele sunt complexe și costisitoare.

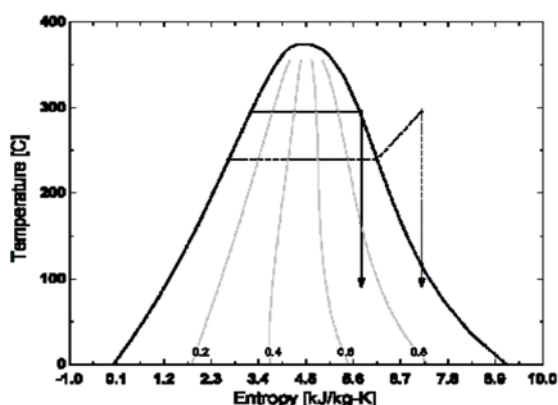


Fig.2. Diagrama T-s pentru apă-abur

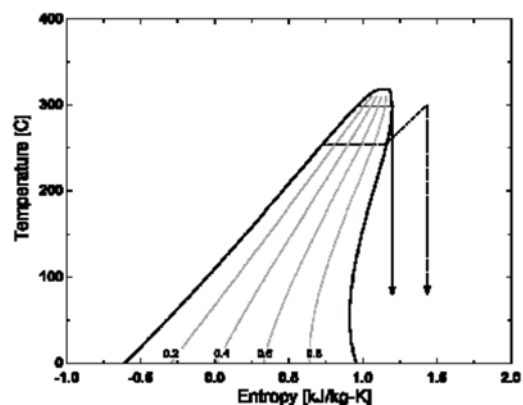


Fig.3. Diagrama T-s pentru un fluid organic (toluen)

Fluidele organice mai sunt numite fluide "uscate" fiind caracterizate printr-o pantă pozitivă a curbei de vaporizări în diagramă T-s în timp ce apa este considerată un fluid "umed", cu o pantă negativă. Fluidele uscate nu trebuie să fie supraîncălzite în timp ce în cazul fluidelor umede trebuie utilizată supraîncălzirea ca mijloc de corecție a umidității aburului în treptele finale.

Revenind la figura 2, ciclul preferat ar fi linia punctată, cu vaporizarea la o presiune mai mică și supraîncălzind la temperatura dorită rezultă punctul final al destinderii într-o zonă cu umiditate admisibilă.

Fluidele organice prezintă un comportament mult diferit față de cel observat la apă în diagrama T-s. Toluenu, așa cum se poate observa în figura 3, are o curbă de saturație a vaporilor cu o pantă pozitivă în diagrama T-s. După destindere fluidul de lucru rămâne în regiunea supraîncălzită a vaporilor cu efecte favorabile asupra funcționării turbinei.

Tabelul 1 prezintă câteva proprietăți termofizice pentru fluide organice și apă.

Tabelul 1

Proprietăți termofizice pentru fluide organice și apă

	Greutate molară [kg/mol]	t_{crit} [°C]	p_{crit} [bar]	Temperatură fierbere [°C]	Entalpie vaporizare E_{evap} [kJ/kg]
Apă	0.018	373.95	220.64	100.0	2257.5
Toluene	0.092	318.65	41.06	110.7	365.0
R245	0.134	154.05	36.40	14.8	195.6
Ulei siliconic	0.162	245.51	19.51	100.4	195.8

Din tabelul 1 se poate observa că presiunea critică și implicit presiunea de operare la intrarea turbinei într-un sistem ORC, este mult mai scăzută decât în cazul unui ciclu cu abur clasic. Deși există turbine cu abur, care lucrează cu abur de joasă presiune, eficiența termică a unui astfel de ciclu cu abur scade cu reducerea presiunii.

Fluidele organice au o greutate specifică mai mare și prin urmare necesită diametre mai mici iar căldura de vaporizare are valori mult mai mici decât în cazul apei.

3. Descrierea unei instalații de cogenerare cu biomasă pe bază de ORC

Modulul ORC este conectat la cazanul pe biomasă printr-un circuit de ulei termic. Utilizarea circuitului intermediar cu ulei termic permite construirea compactă a modulelor ORC și cuplarea acestora la diverse surse de energie primară. Instalația ORC funcționează ca un proces complet închis folosind uleiul silionic ca mediu de lucru organic (fig.4).

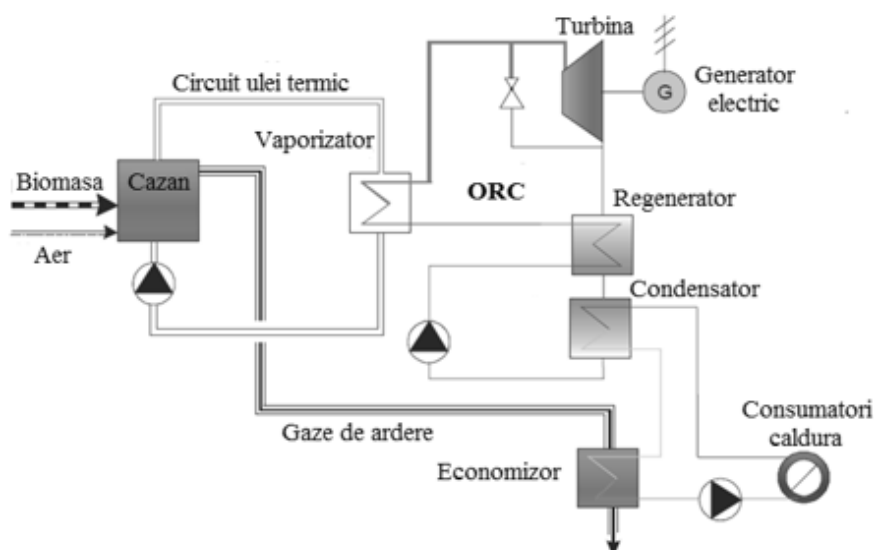


Fig.4. Instalație de cogenerare cu biomasă pe bază de ORC

La ieșirea din turbină uleiul silionic trece printr-un regenerator unde are loc preîncălzirea regenerativă a condensatului înainte de a ajunge la vaporizator.

Condensarea agentului de lucru are loc la un nivel de temperatură care permite căldurii recuperate pentru a fi utilizată la un consumator de căldură (temperatura apei calde de aproximativ 80-100°C).

3. Exemplu de analiză a unor instalații de cogenerare cu ORC existente pe piață

Instalațiile de cogenerare cu tehnologie ORC se întâlnesc într-o gamă largă de puteri după cum se poate vedea în tabelul 2.

Tabelul 2

Producători de instalații de cogenerare cu tehnologie ORC

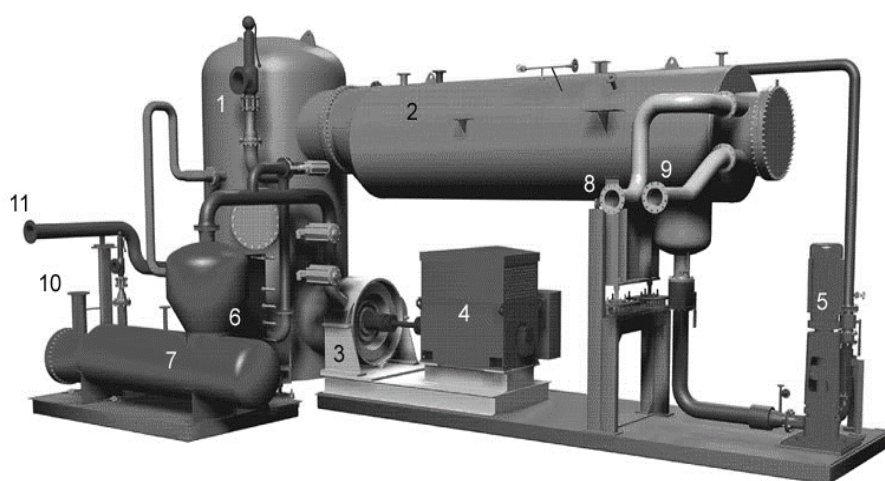
Producator	Gama de puteri [kWe]	Temperatura sursei de căldură [°C]	Site Internet
Eneftech (Elveția)	5 – 30	120 - 200	www.eneftech.com
Tri-o-gen (Olanda)	60 – 165	> 350	www.triogen.nl
Turboden (Italia)	200 – 3000	100 - 300	www.turboden.eu
Ormat (SUA)	200 – 20.000	150 - 300	www.ormat.com
Maxxtec (Germania)	315 – 1600	300 - 330	www.maxxtec.com
Enertime (Franța)	500 – 1000	180 – 250	www.enertime.com

Caracteristicile tehnice ale instalațiilor de cogenerare analizate se prezintă în tabelul 3.

Tabelul 3

Caracteristicile tehnice ale instalațiilor de cogenerare cu tehnologie ORC analizate				
Producător		Eneftech	Turboden	Enertime
Tip instalație		ENEF COGEN ^{GREEN}	TD6 CHP	ORCHID [®] Cogen
Putere termică intrare modul ORC	kWt	300	3340	5500
Temperatură intrare/ieșire modul ORC	°C	200/150	302/242	220/120
Putere termică ieșire modul ORC	kWt	255	2664	4950
Temperatură intrare/ieșire circuit apă caldă	°C	50/65	60/80	60/90
Puterea electrică brută	kWe	-	643	550
Puterea electrică netă	kWe	30	611	485
Cuplare rețea electrică		50Hz, 400V	50Hz, 400V	50Hz, 400V
Consum biomasă	kg/h	N/A	1606	2600

Datele prezentate în tabelul 3 se referă la instalația ORC fără cazanul pe biomasă. În figura 5 se prezintă vederea de ansamblu al unui modul ORC produs de firma Turboden.



- | | | |
|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1.Regenerator | 5.Pompă circulație | 9.Ieșire apă caldă |
| 2.Condensator | 6.Preîncălzitor | 10.Intrare ulei termic |
| 3.Turbină | 7.Vaporizator | 11.Ieșire ulei termic |
| 4.Generator electric | 8.Intrare apă caldă | |

Fig.5. Modul de cogenerare cu ORC - Turboden

Modulele ORC sunt în construcție compactă, într-o gamă largă de puteri, pentru a putea fi conectate cu ușurință la diferite surse de energie primară de joasă temperatură. Performanțele modulelor ORC analizate se prezintă în tabelul 4.

Performanțele modulelor ORC

Producător		Eneftech	Turboden	Enertime
Tip instalație		ENEFCOGEN ^{GREEN}	TD6 CHP	ORCHID [®] Cogen
Randament termic	%	85	80	90
Randament electric	%	10	18	8,8
Randament total	%	95	98	98,8
Pierderi modul ORC	%	5	2	1,2

Pentru compararea cu producerea separată a energiei electrice și a căldurii și calculul economiei de energie primară este necesar luarea în considerare a procesului de ardere a biomasei în cazan.

Economia de energie primară PES (Primary Energy Saving) se calculează cu ajutorul relației:

$$PES = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{e,CHP}}{\eta_{e,ref}} + \frac{\eta_{h,CHP}}{\eta_{h,ref}}} \quad (1)$$

unde:

$\eta_{e,CHP}$ – randamentul electric al producției prin cogenerare, definit ca raport între producția anuală de energie electrică produsă prin cogenerare și consumul de combustibil utilizat pentru producerea sumei dintre producția de energie termică utilă și energia electrică din cogenerare;

$\eta_{h,CHP}$ – randamentul termic al producției prin cogenerare, definit ca raport între producția anuală de energie termică utilă și consumul de combustibil utilizat pentru producerea de energie termică utilă și energie electrică din cogenerare;

$\eta_{e,ref}$ – valoarea de referință a randamentului pentru producerea separată de energie electrică;

$\eta_{h,ref}$ – valoarea de referință a randamentului pentru producerea separată de energie termică.

Prin urmare, compararea între cogenerare cu producerea separată de energie electrică și termică trebuie să aibă la bază principiul comparării acelorași tipuri de combustibil. Astfel, economia de energie primară (tabelul 5) poate fi calculată utilizând valorile de referință $\eta_{e,ref}$ și $\eta_{h,ref}$, precizate în Ordinul nr.38 din 09.11.2012 al ANRE (Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei), combustibil biomasă în cazul analizat [5]: $\eta_{e,ref}=25-33\%$ și $\eta_{h,ref}=80-86\%$.

Ca regulă generală, fiecare unitate de cogenerare se compară cu tehnologia cea mai bună și justificabilă din punct de vedere economic pentru producerea separată de energie electrică și termică disponibilă pe piață în anul construirii unității de cogenerare, care utilizează același tip de combustibil.

Producția de la unitățile la scară redusă și de la unitățile de microcogenerare care asigură economii de energie primară poate fi considerată drept cogenerare cu randament ridicat.

Tabelul 5

Economia de energie primară				
		Enefttech	Turboden	Enertime
Randament cazan biomasă	%	80	80	80
$\eta_{e,CHP}$	%	14,63	15,26	13,41
$\eta_{h,CHP}$	%	63,80	63,30	66,01
η_{CHP}	%	78,43	78,57	79,42
$\eta_{e,ref}$	%	33,00	33,00	33,00
$\eta_{h,ref}$	%	86,00	86,00	86,00
Economia de energie primară (PES)	%	15,63	16,57	14,82

Variația economiei de energie primară în funcție de sarcina termică livrată (în procente din sarcina nominală) și randamentele de referință se prezintă în fig. 6 și 7.

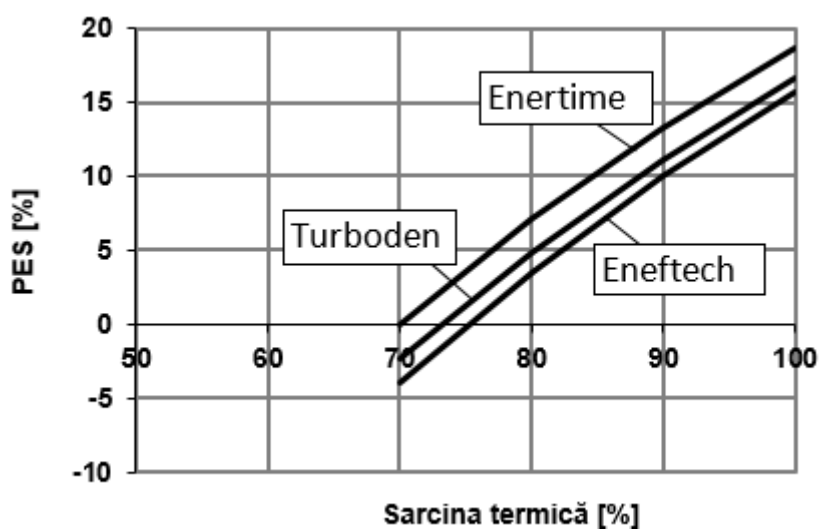


Fig. 6. Variația PES în funcție de sarcina termică ($\eta_{e,ref}=0.33$; $\eta_{h,ref}=0.86$)

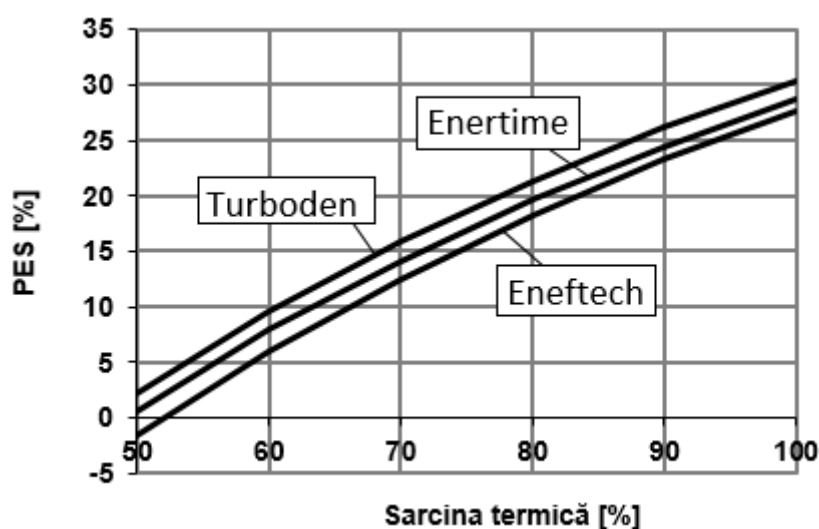


Fig. 7. Variația PES în funcție de sarcina termică ($\eta_{e,ref}=0.25$; $\eta_{h,ref}=0.80$)

Randamentul termic al instalațiilor analizate variază între 63,30 și 66,01% iar randamentul electric între 13,41 și 15,26%.

Pentru a avea economie de energie primară în comparație cu producerea separată a energiei electrice și a căldurii este necesar ca sarcina termică livrată să fie mai mare de 50 % când valorile de referință sunt: $\eta_{e,ref} = 25\%$ și $\eta_{h,ref} = 80\%$.

În cazul valorilor de referință mai mari ($\eta_{e,ref} = 33\%$ și $\eta_{h,ref} = 86\%$) sarcina termică trebuie să fie mai mare de 70%.

4. Concluzii

Datorită construcției sale modulare, tehnologia ORC poate fi cuplată la diferite resurse de energie primară: solară, geotermală, biomasă, recuperare de caldură deșeu. În plus, spre deosebire de ciclul Rankine convențional, este posibilă producerea locală la medie și mică putere a energiei electrice și termice.

În cazul soluțiilor de cogenerare, căldura reprezintă aspectul hotărâtor în justificarea eficienței soluției respective, ea fiind elementul de bază pentru dimensionarea sursei de cogenerare. Utilizarea surselor de energie regenerabile și a deșeurilor energetice impune amplasarea centralelor de cogenerare cât mai aproape de locația acestora, minimizând distanțele de transport ale acestora de la locul de producere (preparare) la locul de consum.

Costurile comparativ mai mari ale instalațiilor de cogenerare utilizând surse regenerabile de energie, dar cu costuri mai mici de operare față de tehnologiile convenționale fac aceste tehnologii atractive pe piața energiei. Efortul investițional încă mare pentru asemenea tehnologii poate fi suplinit dacă se iau în considerare și beneficiile sociale și de mediu care decurg din implementarea acestora.

Referințe

- [1] J. Freeman, K. Hellgardt, C. N. Markides, „An assessment of solar-powered organic Rankine cycle systems for combined heating and power in UK domestic applications”, in *Applied Energy*, vol. 138, 2015, pp. 605–620.
- [2] A. Algieri, P. Morrone, 2014, “Techno-economic analysis of biomass-fired ORC systems for single-family combined heat and power (CHP) applications”, in *Energy Procedia*, vol. 45, 2014, pp. 1285–1294.
- [3] F. Vélez, J. J. Segovia, M. C. Martín, G. Antolín, F. Chejne, A. Quijano, “A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of lowgrade heat for power generation”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, 2012, pp. 4175–4189.
- [4] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and the Council on the promotion of cogeneration. Official Journal of the European Union 11 February 2004.
- [5] Ordinul ANRE nr.38/2012 pentru aprobarea “Valorilor de referință armonizate aplicabile la nivel național ale eficienței pentru producerea separată de energie electrică, respectiv de energie termică și pentru aprobarea factorilor de corecție aplicabili la nivel național”. M.O. al României nr.756/09.11.2012.
- [6] <http://www.turboden.eu/en/products/products-chp.php>
- [7] http://www.eneftech.com/fr/enefcogen_green.php