

Conversia căldurii în energie electrică prin ciclul Rankine organic (ORC)

Principiul de funcționare

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 energia regenerabilă sau reziduală prezintă un potențial suficient de ridicat din punct de vedere al temperaturii, dar și al puterii termice, respectiv dacă energia termică este disponibilă la temperaturi suficient de ridicate și la puteri mari, o soluție posibilă de conversie a căldurii în energie electrică este utilizarea unui ciclu Rankine clasic cu abur, pentru producerea de energie electrică.

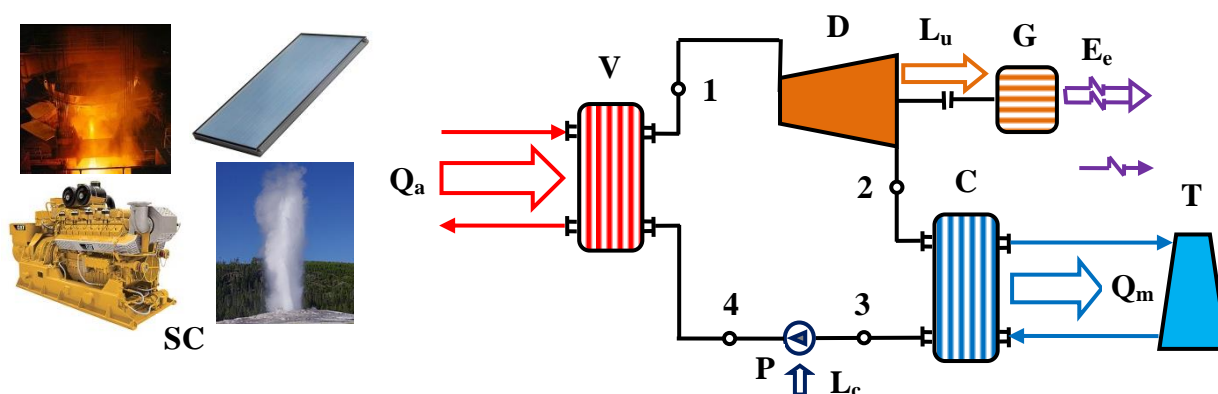
Dacă temperatura sursei regenerabile sau reziduale de energie este redusă, se poate utiliza eficient un ciclu Rankine cu fluide organice ca agenți de lucru, acest ciclu fiind denumit și ciclul Rankine organic. Acest ciclu poate fi utilizat pentru un domeniu foarte larg de puteri: mici, medii și mari.

În instalațiile care funcționează după ciclul Rankine, se pot utiliza ca fluide organice siloxani, (substanțe cu legături chimice Si–O–Si), hidrocarburi, sau agenți frigorifici.

Ciclul Rankine a fost propus de inginerul, fizicianul și matematicianul scoțian William John Macquorn Rankine (1820-1872), unul dintre fondatorii termodinamicii. Agentul termodinamic al acestui ciclu a fost apa. Ulterior au fost utilizați și alți agenți termodinamici, astfel Frank Ofeldt a realizat în anul 1883 o instalație de propulsie pentru bărci, cu naftalină, compus petrolier care are punctul de fierbere mai coborât decât al apei între (30...90)°C, pentru naftalina ușoară și între (90...200)°C pentru naftalina grea (<http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-history.php>).

Ciclurile Rankine pot să funcționeze cu apă / abur (*Steam Rankine Cycle*) (SRC) sau cu fluide organice (*Organic Rankine Cycle*) (ORC).

Schema de principiu a unui instalații cu funcționare după ciclul ORC pentru producerea energiei electrice, este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a unui echipament ORC pentru producerea energiei electrice

SC – Sursa de căldură; V – Vaporizator; D – Detentor; G – Generator electric;

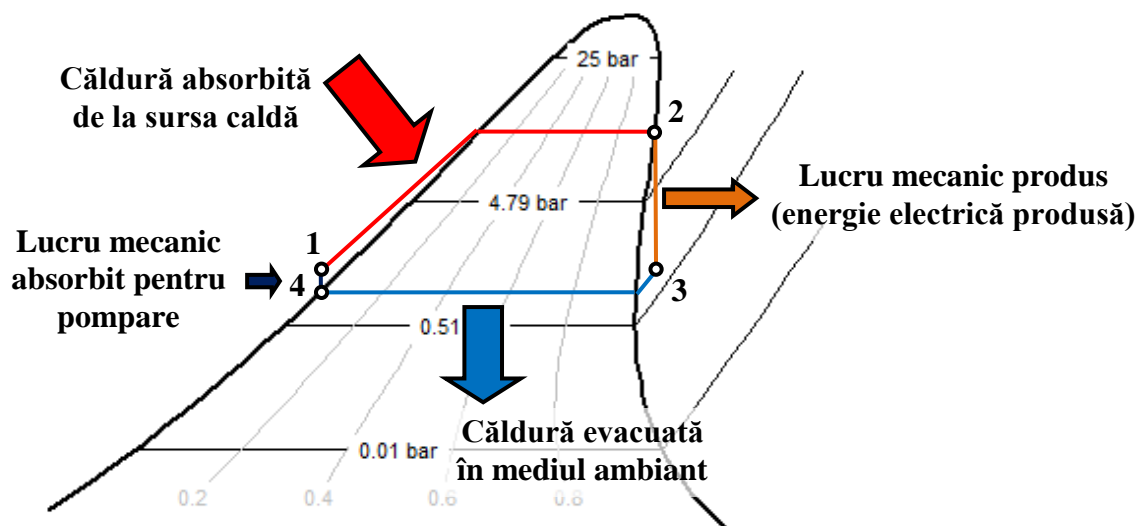
C – Condensator; P – Pompă; T – Turn de răcire

1 – Vaporii saturați de presiune ridicată; 2 – Vaporii supraîncălziți de presiune scăzută;

3 – Lichid de presiune scăzută; 4 – Lichid de presiune ridicată

În vaporizatorul V, căldura provenită de la o sursă regenerabilă sau recuperată dintr-un proces oarecare (Q_a), este absorbită de agentul de lucru care vaporizează la temperatură și presiune relativ scăzute. Vaporii saturați sau ușor supraîncălziți, cu starea 1 se destind în detentorul D, unde se produce lucrul mecanic util (L_u), care este transformat în energie electrică (E_e) în generatorul electric G. Din detentor rezultă vapori supraîncălziți la presiune scăzută cu starea 2. În condensatorul C, vaporii condensează și cedează căldură mediului ambiant (Q_m) prin agentul de răcire al condensatorului, care poate să fie apă sau aer. În cazul răcirii cu apă a condensatorului, aceasta este răcită în turnul de răcire T, unde căldura preluată de apă în condensator, este transferată aerului ambiant, iar apa este răcită până la temperatura termometrului umed. Condensul aflat la presiune scăzută, cu starea 3 este aspirat de pompa P în care presiunea lichidului, respectiv energia potențială de presiune a acestuia, crește până la presiunea ridicată din vaporizator V. Pentru acest proces se consumă lucrul mecanic (L_c). Lichidul cu starea 4, aflat la presiune ridicată, este introdus în vaporizator, denumit uneori și generator de vapori, după care ciclul de funcționare se reia.

Ciclul teoretic de lucru a instalației care funcționează după ciclul ORC este prezentat în figura alăturată, în diagrama T-s.



Reprezentarea ciclului ORC teoretic în diagrama T-s

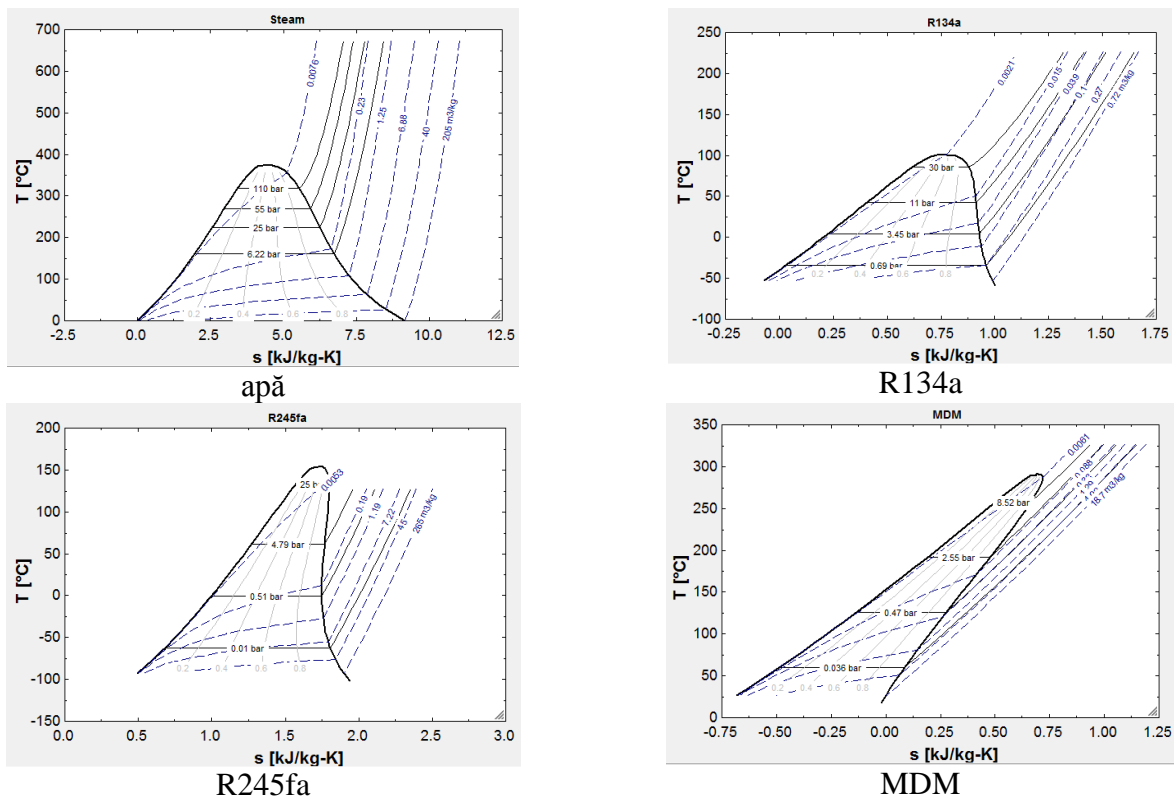
Considerații privind agenții de lucru

Agenții de lucru din instalațiile care funcționează după ciclul Rankine, prezintă proprietăți termodinamice diferite, care influențează atât condițiile de lucru, în principal presiuni și temperaturi, cât și performanțele energetice, în special *randamentul termodinamic* (sau termic, sau mecanic) (η_m) definit prin raportul dintre energia mecanică produsă sau lucrul mecanic util produs (L_u) și căldura consumată (Q_a), respectiv *randamentul electric* (sau global) (η_e) definit prin raportul dintre energia electrică produsă (E_e) și căldura consumată (Q_a) (Angelino et. all, 1984).

Relațiile matematice de definiție a celor două randamente sunt:

$$\eta_m = \frac{L_u}{Q_a}; \quad \eta_e = \frac{E_e}{Q_a}$$

În figurile alăturate sunt prezentate diagramele termodinamice temperatură (T) – entropie (s), pentru apă, pentru freonii R134a și R245fa, respectiv pentru siloxanul MDM. Diagramele au fost realizate cu ajutorul mediului de programare Engineering Equation Solver (EES), pentru care Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca deține licență academică (Klein, 2011).



Diagrame T-s pentru apă și câteva fluide organice

Procesul termodinamic prin care se produce lucru mecanic respectiv energie electrică, este destinderea teoretic adiabatică a vaporilor. Acest proces se reprezintă în diagramele T-s prin drepte verticale. Procesul de destindere trebuie să se desfășoare în domeniul vaporilor supraîncălziți și nu este admisă apariția lichidului în timpul procesului, deoarece acesta interacționează cu organele de mașini aflate în mișcare ale detentoarelor și determină distrugerea acestora.

Datorită proprietăților termodinamice și chimice diferite, fluidele organice și apa prezintă diverse avantaje și dezavantaje. În tabelul alăturat sunt prezentate avantajele ciclurilor Rankine cu fluide organice (ORC), respectiv ale ciclurilor Rankine cu apă / abur (ORS).

Avantajele ORC și SRC

Avantajele ORC	Avantajele SRC
Temperatură scăzută a sursei calde	Randament ridicat
Temperatură de vaporizare scăzută	Cost redus al agentului de lucru
Presiune de vaporizare redusă	Agentul de lucru este ecologic
Nu necesită supraîncălzire	Agentul de lucru nu este toxic și nici inflamabil
Construcție simplă a vaporizatorului	Stabilitate chimică ridicată a agentului de lucru
Temperatură redusă a vaporilor în turbină	Consum redus de energie în pompă
Presiune de condensare ridicată	
Compactitate ridicată (densitate mare a agentului)	
Nu necesită tratarea apei și nici degazarea	
Design relativ simplu al detentoarelor	

În instalațiile care funcționează cu ciclu ORC, pot fi utilizate surse de căldură foarte variate de la energia geotermală de potențial redus și energie solară, până la gaze de ardere cu temperaturi peste (250...300)°C (Siva Reddy et al., 2013), (Badr et. all, 1984), (Badr et. all, 1990).

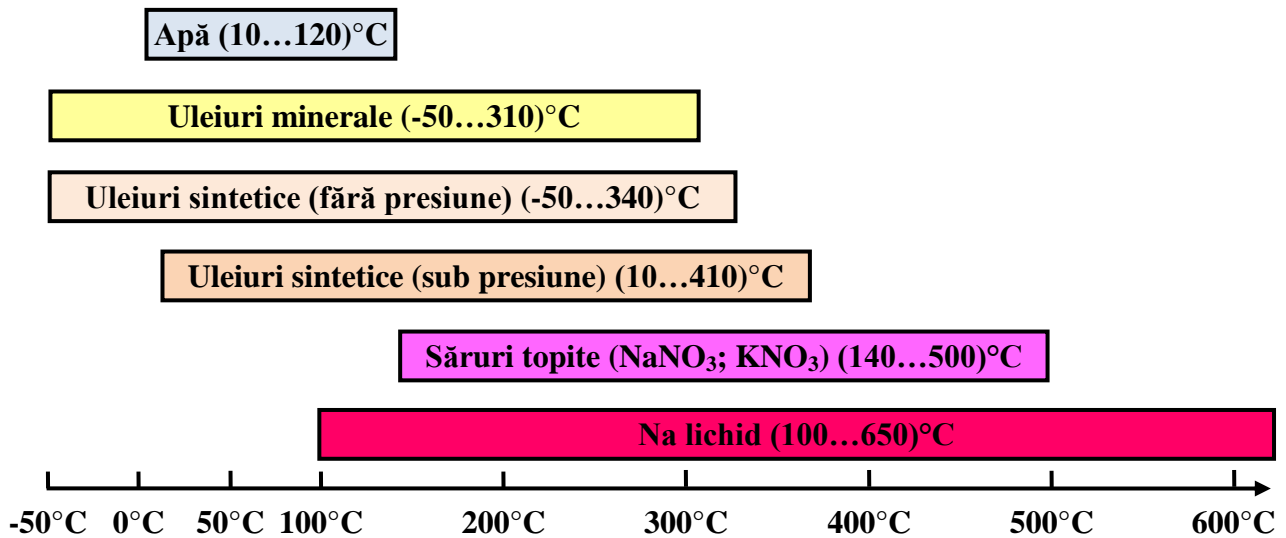
Una dintre instalațiile cu ciclu ORC, ce utilizează energie termică de potențial foarte scăzut, este amplasată în Chena Hot Springs, Alaska, SUA și funcționează cu apă geotermală cu 73°C la intrare și 54°C la ieșirea din echipament.

http://www.akenergyauthority.org/Reports%20and%20Presentations/FinalProjectReport_ChenaPowerGeothermalPlant.pdf

<http://chsr.squarespace.com/storage/documents/Experience%20Gained.pdf>

Randamentul detentoarelor cu fluide organice este de cca. (65...95)%, iar randamentul global al instalației se situează în intervalul (18...24)% sau mai mult, fiind cu atât mai ridicat cu cât temperatura sursei de căldură este mai ridicată. Pe de altă parte, dacă temperaturile sursei de căldură scad sub 100°C, randamentul global scade la cca. (7...8)%, sau chiar mai puțin (Badr et. all, 1984), (Badr et. all, 1990), (Nusiaputra et al., 2014).

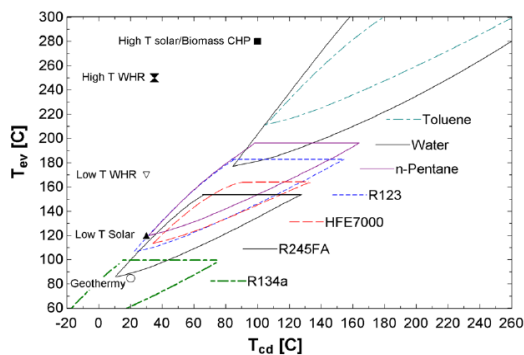
În figura alăturată este prezentat domeniul de utilizare a agenților termici pentru transportul căldurii de la sursa de căldură la instalația ORC, în funcție de temperaturile de lucru.



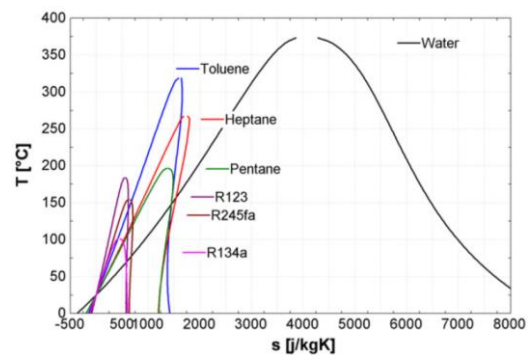
Domeniul de utilizare a agenților termici în funcție de temperaturile de lucru

(Adaptată și completată după: Northern Innovation Ltd, Technical Investigation into Thermal Oil Technology, Project no. 1555, 2010) (<http://secure.investni.com/static/library/invest-ni/documents/thermal-oil-technology-technical-investigation-report-sd-march-2010.pdf>)

Agentul de lucru se alege în funcție de nivelul de temperatură al sursei calde, în funcție de recomandările din literatura de specialitate. Pentru exemplificare, se prezintă recomandările din (Lermort et al, 2013) și (Quoilin et al, 2013).



Domeniul de lucru pentru compresoarele Scroll (Lermort et al, 2013)



Diagramele T-s pentru apă și agenți organici (Quoilin et al, 2013)

Pentru temperatura sursei calde de (80...110)°C, se recomandă utilizarea ageților R134a și R245fa. R134 este recomandat pentru funcționarea cu energie geotermală, pentru temperatura sursei calde de maxim 100°C dar determină randamente scăzute ale instalațiilor, iar R245fa este recomandat pentru funcționarea cu energie solară, pentru temperatura sursei calde de minim 80°C și permite atingerea unor valori mai ridicate ale randamentelor.

Influența agentului de lucru asupra performanțelor instalațiilor care funcționează după acest ciclu, se poate studia prin modelare matematică, realizată cu ajutorul programului EES.

Referințe

Angelino M., Gaia M., Macchi E., - *A review of Italian activity in the field of Organic Rankine Cycles*, Proceedings of the international VDI-Seminar, Zürich, 10-12 September, (1984).
http://www.turboden.eu/en/public/downloads/ORC_fluid_selection.pdf

Badr O., O'Callaghan P W., Probert S.D. - *Performances of Rankine-Cycle Engines as Functions of their Expanders' Efficiencies*, Applied Energy 18, 15-27, (1984).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261984900424>

Badr O., O'Callaghan P W., Probert S.D. - *Rankine-Cycle Systems for Harnessing Power from Low-Grade Energy Sources*, Applied Energy 36, 263-292, (1990).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030626199090002U>

Georges E., Declaye S., Dumont O., Quoilin S., Lemort V. - *Design of a small-scale organic Rankine cycle engine used in a solar power plant*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 8, i34-i41, (2013).
<http://ijlct.oxfordjournals.org/content/early/2013/05/11/ijlct.ctt030.abstract>

Harada K.J. - *Development of a Small Scale Scroll Expander*, PhD. Thesis, (2010).
<http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/18837>

Jradi M, Jinxing Li, Liu H., Riffat S. - *Micro-scale ORC-based combined heat and power system using a novel scroll expander*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 9, 9-99, (2014).
<http://ijlct.oxfordjournals.org/content/early/2014/02/19/ijlct.ctu012.full>

Klein S.A. - *Engineering equation solver*, F-Chart software, (2011).
http://www.fchart.com/assets/downloads/ees_manual.pdf

Lemort V., Declaye S., Quoilin S. - *Experimental characterization of a hermetic scroll expander for use in a micro-scale Rankine cycle*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer: Part A: Journal of Power and Energy, 126-136, (2011).
<http://pia.sagepub.com/content/early/2011/11/09/0957650911413840.full.pdf>

Lemort V., Guillaume L., Legros A., Declaye S., Quoilin S. - *A comparison of piston, screw and scroll expanders for small scale Rankine cycle systems*, Proceedings of the 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies, (2013).
<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/147369>

Meyer D., Wong C., Engel F., Krumdieck S. - *Design And Build Of A 1 Kilowatt Organic Rankine Cycle Power Generator*, Proceedings of 35th New Zealand Geothermal Workshop, Rotura, New Zealand, 17-20 November, (2013).

http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2013/Meyer_Final.pdf

Nusiaputra Y.N., Wiemer H.J., Kuhn D. - *Thermal-Economic Modularization of Small, Organic Rankine Cycle Power Plants for Mid-Enthalpy Geothermal Fields*, *Energies* 7, 4221-4240, (2014).

<http://www.mdpi.com/1996-1073/7/7/4221>

Orosz M., Mueller A., Quoilin S., Hemond, H.F. - *Small Scale Solar ORC system for distributed power*, Proc. of the Solar Paces Conference, (2009).

<http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/24847/1/12156-Orosz.pdf>

Orosz M., Mueller A., Dechesne B.J., Hemond, H.F. - *Geometric Design of Scroll Expanders Optimized for Small Organic Rankine Cycles*, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135, (2013).

http://web.mit.edu/hemond/www/docs/geometric_design.pdf

Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. - *Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander*, *Applied Energy* 87, 1260–1268, (2010).

<http://libra.msra.cn/Publication/26457555/experimental-study-and-modeling-of-an-organic-rankine-cycle-using-scroll-expander>

Quoilin S., VanDenBroek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. - *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, 168–186, (2013).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>

Siva Reddy V., Kaushik S.C., Ranjan K.R., Tyagi S.K. - *State-of-the-art of solar thermal power plants-A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 258–273, (2013).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004140>

Zanelli R., Favrat D. - *Experimental Investigation of a Hermetic Scroll Expander-Generator*, International Compressor Engineering Conference, Paper 1021, (1994).

<http://docs.lib.purdue.edu/icec/1021>