

Organikus Rankine körfolyamat érzékenységvizsgálata

Sensitivity analysis of organic Rankine cycle

DOMOKOS Ambrus¹, Dr. GRONIEWSKY Axel²

¹doktorandusz, ²egyetemi docens
BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,
1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4-6. (D.épület) 208., tel.: 463-2613, <http://www.energia.bme.hu>

Abstract

Nowadays, sustainability is becoming more and more prominent in energy. It is possible to increase efficiency in energy and industry through the use of low-temperature heat sources. In our research, we dealt with the sensitivity analysis of ORC systems, specifically in the low-temperature range (70–140°C). The sensitivity analysis results shed light on the neuralgic points of these systems and provide an appropriate background for the technical and economic decisions to be made in connection with the implemented projects at the investment, operation (maintenance) and development stages.

Keywords: Low-temperature heat source, Organic Rankine Cycle, ORC, sensitivity analysis, optimal working fluid, regenerative heat exchanger

Kivonat

Napjainkban egyre kiemelkedőbb szerepet kap az energetikában a fenntarthatóság. Az alacsony hőmérsékletű hőforrások hasznosításán keresztül lehetőség van az energetikában és az iparban a hatékonyság növelésére. Kutatásunk során az ORC érzékenységvizsgálatával foglalkoztunk kifejezetten az alacsony hőmérséklettartományban (70-140°C). Az érzékenységvizsgálat eredményei rávilágítanak ezen rendszerek neuralgikus pontjaira és megfelelő háttérrel biztosítanak a megvalósuló projektek kapcsán meghozandó műszaki és gazdasági döntésekhez mind a beruházási, üzemeltetési (karbantartási) és fejlesztési stádiumban.

Kulcsszavak: Alacsony hőmérsékletű hőforrás, szerves Rankine-ciklus, ORC, érzékenységvizsgálat, optimális munkaközeg, regeneratív hőcserélő

1. BEVEZETÉS

A globális klímaváltozás mellett egyre növekvő energiaigények kielégítése érdekében az átalakuló energiaszektorban egyre hangsúlyosabb szerepet kap az energiahatékonyság. Emellett az utóbbi időben egyre fontosabb az alacsony hőmérsékletű hőforrások hasznosításának lehetősége is. Ezen a területen ahhoz, hogy a rendszerek rentábilisan tudjanak üzemelni elengedhetetlen a minél jobb hatékonyság elérése és annak fenntartása a teljes élettartam alatt.

A szerves Rankine körfolyamat (ORC) az egyik legdinamikusabban fejlődő technológia, amely alkalmas alacsony hőmérsékleten rendelkezésre álló hőt hasznosítani villamosenergiatermelésre. Annak, hogy egy ORC viszonylag magas hatásfok mellett tudjon üzemelni előfeltétele az optimális munkaközeg megtalálása az aktuális peremfeltételek mellett.

Az ORC rendszerek különböző munkaközegek alkalmazása esetén való érzékenységvizsgálatának segítségével feltárhatjuk a rendszer hatékonysága és a munkaközeg tulajdonságai közötti mélyebb összefüggéseket. A rendszer neuralgikus pontjainak feltérképezésén keresztül tervezési és üzemeltetési fázisban is kellő információ birtokában hozhatjuk meg a felmerülő műszaki-gazdasági döntéseket.

2. METODIKA

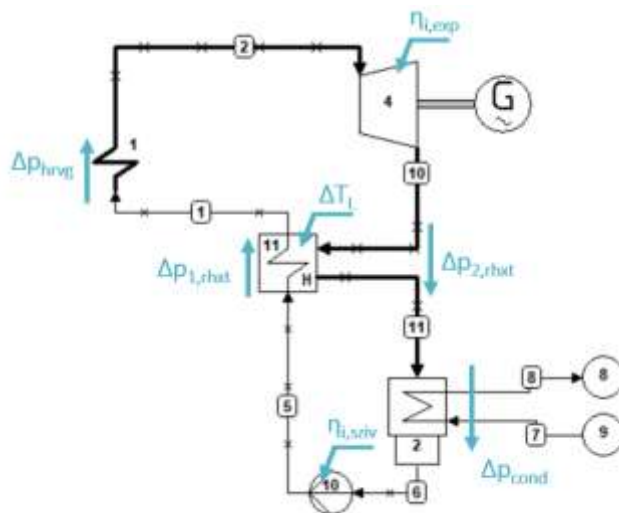
Munkaközegek

Az ORC rendszerekben a jó hatásfok eléréséhez kulcsfontosságú az adott körülményekhez megfelelő munkaközeg kiválasztása. [1] A döntés nehézségét az igen sok számításba veendő lehetőség jelenti. Ahhoz, hogy az optimális munkaközeg kiválasztásra kerülhessen elengedhetetlen tisztában lennünk a munkaközeg körfolyamatban nyújtott teljesítményét befolyásoló tulajdonságaival. Figyelembe kell venni a termofizikai és termokémiai jellemzőiket, mint például a közegek hőkapacitása, viszkozitása és párolgáshője. Ezen kívül környezetvédelmi (pl.: globális felmelegedési potenciál, újrahasznosíthatóság) és biztonságtechnikai (korrózióveszély, toxicitás) szempontok is hatással vannak a döntésre. [2]

A kiválasztás során segítséget nyújt a munkaközegek csoportosítása is, ami alapján gyorsabban eligazodhatunk az alkalmazható munkaközegek között. A munkaközegek hőmérséklet-entrópia diagramban vett telítési görbéjét karakterisztikus pontok definiálásával jellemző új osztályozási rendszer a hagyományos, három csoportot (nedvesítő, szárító, izentróp) felállító osztályozáshoz képest további fontos információkat hordoz a munkaközegekről. [3] Munkánk során vizsgáltuk az egyes munkaközegek telítési görbéit jellemző karakterisztikus pontjainak helyzete milyen hatással van a berendezések működésére és ezen keresztül az egyes paraméterek érzékenységeire.

Modell

A vizsgálatok során egy regeneratív hőcserélővel kiegészített egyszerű szerves Rankine körfolyamatot modelleztünk, amit az 1. ábra mutat be. [4] A modellben a regeneratív hőcserélő vezérlése az expanderből kilépő közeg hőmérséklete alapján történik. A berendezés csak akkor vesz részt a körfolyamatban, ha ez a hőmérséklet megfelelően magas ahhoz, hogy hatékony hőcsere jöjjön létre az expanderből kilépő és az elpárologtatóba belépő munkaközeg között.



1. ábra A Cycle-Tempo programban megalkotott regeneratív hőcserélővel kiegészített ORC modell: Elpárologtató (1), Kondenzátor (2), Expander (4), Szivattyú (10), Regeneratív hőcserélő (11)

Érzékenységvizsgálat

A vizsgálatok során a Fluidprop adatbázis 31 munkaközegére futtattuk le a számításokat. A körfolyamat hét paraméterének a teljes körfolyamat hatékonyságára gyakorolt hatását hasonlítottuk össze. Az érzékenységvizsgálat során vizsgált paraméterek: az expander és a szivattyú izentropikus hatásfokai ($\eta_{i,exp}$, $\eta_{i,sziv}$), nyomásesés az elpárologtatóban, a regeneratív hőcserélő hideg és meleg oldalán, valamint a kondenzátorban (Δp_{hrvg} , $\Delta p_{1,rhxt}$, $\Delta p_{2,rhxt}$, Δp_{cond}), továbbá a regeneratív hőcserélő alsó hőfokrése (ΔT_L). A vizsgálatokat különböző elgőzölgesi hőmérsékletszinteken is végrehajtottuk ($T_{evap}=70-140^\circ\text{C}$), a kondenzációs hőmérsékletet ($T_{cond}=25^\circ\text{C}$) a vizsgálatok során állandónak tekintettük.

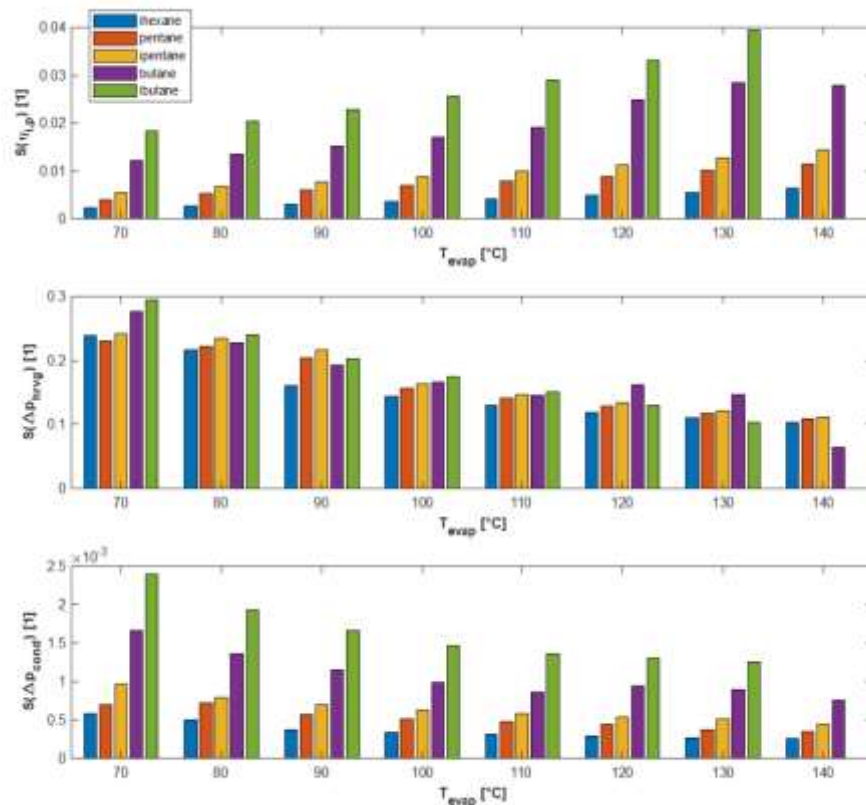
A nagy mennyiségű elvégzendő számítás miatt az egyes futtatások paramétereinek beállítására, az ORC-t tartalmazó numerikus szimulációt elvégző program vezérlésére és az eredmények összegyűjtésére MATLAB keretrendszert hoztunk létre.

3. EREDMÉNYEK

A rendszer egy adott paraméterre (par) vett érzékenységet ($S(par)$) a paraméter romlása által okozott körfolyamati hatásfokcsökkenés ($\eta_{id} - \eta_{par,min}$) és az adott közeg alkalmazása mellett számított optimális körfolyamati hatásfok (η_{id}) arányaként jellemeztük az (1) összefüggésnek megfelelően.

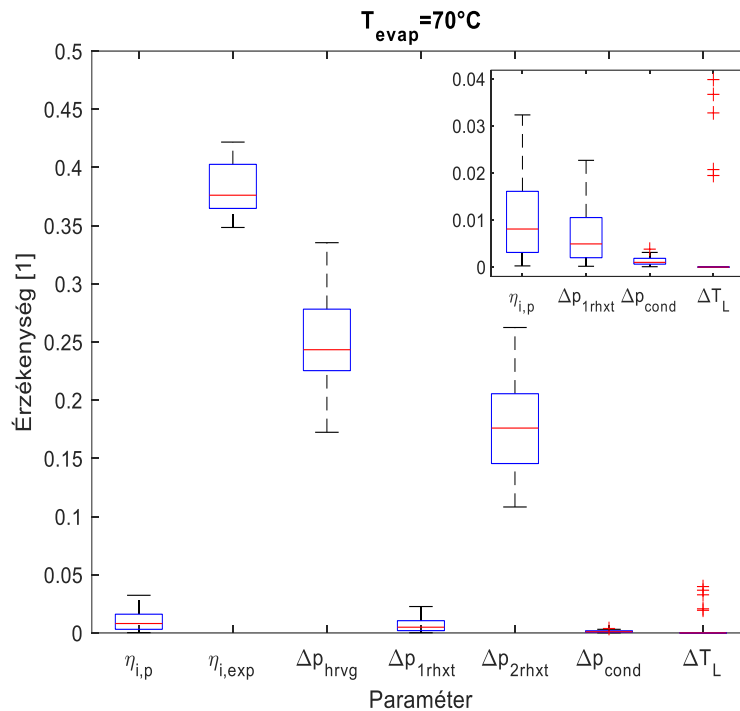
$$S(par) = \frac{\eta_{id} - \eta_{par,min}}{\eta_{id}} \cdot 100 \quad (1)$$

Az eredmények első tanulsága, hogy azonos csoportba (nedvesítő, szárító vagy izentropikus) és kémiai családba (pl.: CFC, HC stb.) tartozó munkaközegek között az alacsonyabb kritikus hőmérséklettel rendelkező munkaközegek rendre nagyobb érzékenységet mutatnak minden paraméter esetében, ahogy azt a 2. ábra mutatja.



2. ábra 5 db izentropikus szénhidrogén (HC) munkaközeg három paraméterre (Δp_{cond} , Δp_{hrvg} , $\eta_{i, sziv}$) kapott érzékenységei. A munkaközegek balról jobbra (az izohexántól az izobutánig) csökkenő kritikus hőmérséklet szerint vannak sorba rendezve.

Ez után megvizsgáltuk, hogy melyek azok a paraméterek, amelyeknek a változása legnagyobb mértékben rontja a körfolyamati hatásfokot. Ehhez a 31 vizsgált munkaközegre kapott eredményeket összegezve $T_{evap}=70^\circ\text{C}$ elgőzölgési hőmérsékleten az egyes paraméterekre vett érzékenységek nagyságrendjeit a 3. ábra szerint hasonlítottuk össze. Az ábra alapján egyértelműen látszik, hogy három paraméternél tapasztalható nagyobb érzékenység ($\eta_{i,exp}$, Δp_{hrvg} , $\Delta p_{2,rhxt}$), melyekben közös, hogy – közvetve vagy közvetlenül – az expanzióra vannak hatással.



3. ábra A 31 vizsgált munkaközeg egyes paraméterekre vett érzékenységei

A továbbiakban vizsgáltuk az egyes munkaközegek tulajdonságai, és a körfolyamatban tapasztalt viselkedésük közötti összefüggéseket. Ez alapján az expanzió lefutására és a regeneratív hőcserélő üzemére is döntő hatással van a munkaközegek hőmérséklet-entrópia diagramban ábrázolt telítési görbéjének alakja. A 2. fejezetben említett új osztályozási rendszer szerinti karakterisztikus pontokat figyelembe véve a munkaközegválasztás során a nagyhatású paraméterekre minimális érzékenységet mutató munkaközegeket választhatunk ki. Azaz például az expander izentropikus hatásfokának azonos mértékű változása milyen mértékben csökkenti a körfolyamat hatásfokát. Ez új szempont lehet a jövőben egy optimális rendszer kialakításakor.

4. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

Az elvégzett vizsgálatok alapján elmondható, hogy a rendszer hatékonysága szempontjából kiemelt fontosságúak az expanziót befolyásoló paraméterek. További eredménye a vizsgálatoknak, hogy megfelelő munkaközeg kiválasztásával adott peremfeltételek között minimalizálható az egyes paraméterek degradációja által előidézett hatásfokcsökkenés.

A kialakított keretrendszer a továbbiakban alkalmas lehet egyéb alacsony hőmérsékletű hőforráson alapuló villamosenergia termelő technológiák vizsgálatára.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző részvételét az OGÉT 2021 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-20 pályázata támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] J. Vivian, G. Manente, A. Lazzaretto, A general framework to select working fluid and configuration of ORCs for low-to-medium temperature heat sources, *Applied Energy*, 2015, 15, 727-746
- [2] J. Bao, L. Zhao, *A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24, 325-342
- [3] G. Györke, U.K Dieters, A. Groniewsky, I. Lassu, A.R. Imre, *Novel classification of pure working fluids for Organic Rankine Cycle*, *Energy*, 2018, 145, 288-300
- [4] S.I. Garcia, R.F. Garcia, J.C. Carril, D.I. Garcia, A review of thermodynamic cycles used in low temperature recovery systems over the last two years, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81, 760-767