

# LNG üzemű kamion füstgázának hasznosítása ORC rendszerrel

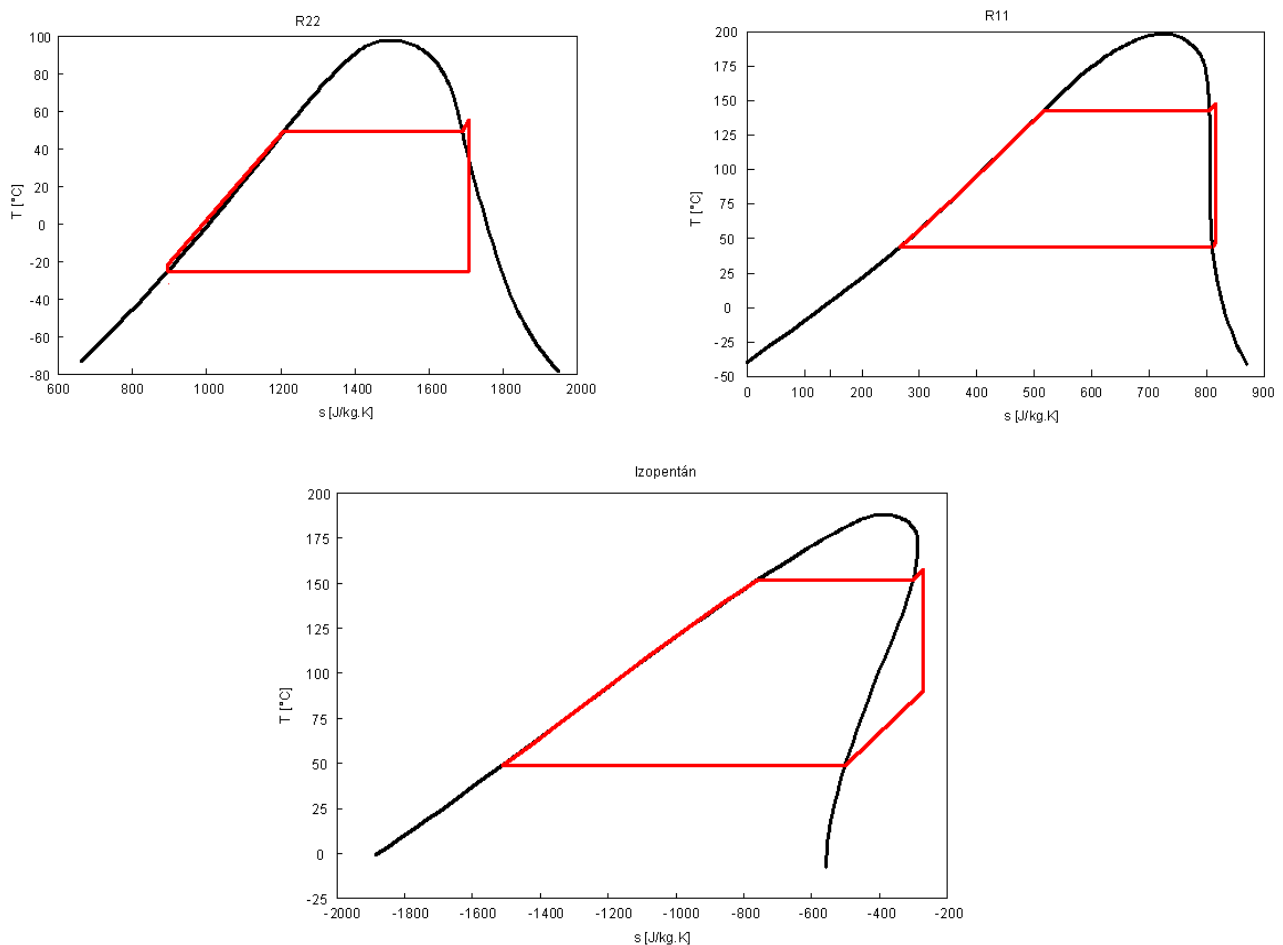
Tóth Délia, LDZICK

Wrabel Balázs, RSBFZB

## 1. SZERVES RANKINE CIKLUS

Az szerves Rankine-ciklus (ORC, Organic Rankine Cycle) működését tekintve a hagyományos Rankine-ciklushoz hasonló termodinamikai körfolyamat. A különbség, hogy az ORC rendszer munkaközege valamilyen szerves, organikus közeg. A szerves közegek jellemzően alacsonyabb forrásponttal, kisebb látenshővel rendelkeznek, ezáltal lehetővé teszik az alacsonyabb hőmérsékletű vagy alacsonyabb hőmennyiségű szolgáltató hőforrásokat hasznosítását.

A munkaközegeket három csoportba sorolhatjuk. A nedves munkaközegekre jellemző, hogy a körfolyamat expanzióvonalára a kétfázisú tartományban ér véget, a közeg az expanzió végén nedves gőz halmazállapotban van, cseppek jelennek meg. Ilyen munkaközeg például a víz, a metán, az ammónia vagy az R22. Izentrópikus munkaközeg, például R11 esetén a leszálló adiabata a telítési görbe mentén halad végig, többnyire függőlegesen. A száraz munkaközegek esetén az adiabata a gőzfázisú részen marad. Száraz munkaközeg a benzol, a bután, a hexán és a toluol.



1. ábra: Nedves, izentropikus és száraz munkaközegek hőmérséklet-entrópia diagramjai [2]

## 2. AZ LNG ÜZEMŰ KAMION ORC RENDSZERE

### 2.1. LNG

A cseppfolyósított földgáz (LNG, liquefied natural gas) üzemanyag alkalmazásának számos előnye van a dízel üzemanyaggal szemben. A legfontosabb szempont, hogy hozzájárul a tehergépjárművekhez kapcsolódó kibocsátások, például a szén-dioxid és nitrogén-oxidok kibocsátásának csökkentéséhez. Emellett az LNG-vel üzemelő járművek jellemzően csendesebbek és gazdaságosabbak is, mint a dízel üzemanyagot alkalmazók.

Az LNG hőmérséklete  $-162\text{ °C}$ , nyomása  $25\text{ kPa}$ . A folyadék halmazállapotú üzemanyagot a motorba való bejuttatás előtt el kell párologtatni és legalább szobahőmérsékletig fel kell melegíteni a jobb hatásfok elérése érdekében. A hőbevitel történhet egy másik közegtől való hőelvonás formájában, így az LNG üzemanyag alkalmas arra, hogy a kamionra illesztett ORC-kör hidegoldal legyen.

$20\text{ kg}/100\text{ km}$  fogyasztással számolva az üzemanyag-áram  $90\text{ km/h}$ -s sebesség mellett  $0,005\text{ kg/s}$ . Ez az alacsony tömegáram a nagy hőmérséklet-különbség ellenére sem biztosít megfelelő mértékű hőelvonást, korlátozza a rendszert.

### 2.2. Füstgáz

A kamion füstgáza jelentős mennyiségű hőveszteséget jelent, hiszen a kilépő hőmérséklet  $350\text{--}800\text{ °C}$  is lehet. A hulladékhő hasznosítható egy ORC-kör által. A füstgáz, mint melegoldal által bevezethető hőmennyiség meghaladja az elvonható hő mennyiségét, így a számítások során a hidegoldal vizsgálata szükséges.

### 2.3. Számítások

Az üzemanyag LNG, de számításaink során  $100\%$  metánnal számoltunk, mert a FluidPropban a metán fajlagos entalpiáit, így a fajlagosan elvonható hőmennyiséget is egyszerűen meg tudtuk határozni. Az üzemanyagot az átlagosnak mondható  $-162\text{ °C}$ -os LNG hőmérsékletről  $20\text{ °C}$ -ig kell az ORC körfolyamattal előmelegíteni a motor számára. A fajlagosan elvonható hőmennyiség ezáltal  $385\text{ kJ}$ . Ez az üzemanyag tömegáram ismeretében  $1,925\text{ kW}$  elvonható hőtéljesítményt jelent.

A füstgáz tömegáram meghatározásánál is metánnal közelítettük az LNG-t. Kalorikus gépek gyakorlaton meghatározott  $17,17\text{ kg/kg}$  tüzelőanyag elméleti levegőmennyiség és  $1,1$ -es légfelesleg mellett a kipufogógáz tömegárama  $0,103\text{ kg/s}$ .  $1,25$ -ös füstgáz fajhővel és  $350; 500; 650; 800\text{ °C}$ -os kiindulási füstgáz hőmérséklet mellett a füstgáz  $150\text{ °C}$ -ig történő hűtéséből  $25,7; 45; 64,3; 83,6\text{ kW}$  hőtéljesítmény nyerhető ki, ami nagyságrenddel magasabb, mint amennyit az LNG oldalán el tudunk vonni. (A füstgáz hőmérsékletét a körfolyamat minimálisan csökkentette számításaink szerint.) A körfolyamatot ezért a hidegoldal korlátozza. Az üzemanyagot  $20\text{ °C}$ -ig elő kell melegíteni, ezért mi ehhez a  $20\text{ °C}$ -hoz képest egy  $5\text{ °C}$ -kal magasabb,  $25\text{ °C}$ -os hőmérsékletet választottunk a hőelvonás kezdeti hőmérsékletének. Ez a tény nagy mértékben befolyásolta a munkaközegválasztásunkat.

A vizsgált körfolyamatok telített gőzös ORC körfolyamatok, izentrópus expanzióval. Nedvesítő munkaközeg esetén a hőelvonás a kétfázisú mezőben kezdődik, azeotróp keverékek, és egy komponensű munkaközeg esetén az izobár hőelvonás a kétfázisú tartományban izoterm is. Ebből kifolyólag a hőelvonás átlag hőmérséklete megegyezik a hőelvonás kezdeti hőmérsékletével. Szárító munkaközeg esetén az expanzió a túlhevített gőz tartományban ér véget. A hőelvonás is túlhevített gőz állapotban kezdődik. Túlhevített gőz esetén az izobár görbék nem izotermák, így szárító munkaközeg alkalmazásával a hőelvonás átlaghőmérséklete kisebb, mint a  $25\text{ °C}$ -os kezdeti kikötés,

ami körfolyamati hatásfok növekedést okoz. Ezért szárító munkaközegeket választottunk a körfolyamatunkhoz, melyeknél 25 °C-os izotermához tartozik olyan pontja a telített gőz görbének, hogy azt az izotermára vetítve túlhevített gőz állapotban legyen a munkaközeg.

FluidProp segítségével rengeteg munkaközeg T-s diagrammját vizsgáltuk meg. A vizsgált munkaközegek a CycleTempo-ban definiálható munkaközegek voltak. A számításainkat a FluidPropban folytattuk, ahol az izotermára vetített pont entrópiáját, nyomását és később a körfolyamat további paramétereit, illetve a hatásfokot és fajlagos hasznos munkát is meghatároztuk. A munkaközeg tömegáramát az elvonható hőteljesítmény felhasználásával számoltuk, a körfolyamat hasznos teljesítményét pedig a tömegáram felhasználásával.

Számításainkat belső hőcserélő alkalmazásával is elvégeztük. Ez a berendezés növeli a körfolyamat hatásfokát, így a hasznos teljesítményt is, mert kiiktat egy alacsony hőmérsékletű hőbevezetés és egy magas hőmérsékletű hőelvonás szakaszt.

Nagyobb teljesítményt nyerhetünk ki a körfolyamatból, ha az LNG-vel való hűtés mellett léghűtést is alkalmazunk. Számításaink során ezt azonban nem vizsgáltuk.

## 2.4. Lehetséges munkaközegek

A számításaink eredményeképp 11 munkaközeg bizonyult alkalmasnak, ezeket az alábbi táblázat tartalmazza.

munkaközeg
toloul
1-butanol
benzol
ciklohexán
hexafluorobenzol
r245fa
r114
n-pentán
n-hexán
n-heptán
izopentán

1. táblázat: Lehetséges munkaközegek

A megfelelő munkaközeg választása során több szempontot is figyelembe kell venni. Szükséges megvizsgálni, hogy mennyire tűz- és robbanásveszélyes az adott közeg, illetve vannak-e egészségkárosító hatásai rövid idejű, hosszan tartó vagy ismételt expozíció esetén, mérgező-e. A globális felmelegedésre és az ózon-koncentrációra gyakorolt hatások ismerete is fontos, ezek meghatározására szolgál a GWP (Global Warming Potential) és az ODP (Ozone Depletion Potential). A munkaközeg ára, előfordulása is befolyásoló tényező lehet.

Az általunk vizsgált munkaközegek esetén az r114 közeg ózonbontó képessége, azaz magas ODP értéke miatt tiltottnak minősül, így ezt nem alkalmazhatjuk. A fennmaradó 10 munkaközeg a hexafluorobenzol és az r245fa kivételével fokozottan tűzveszélyes és jelentős egészségkárosító hatásokkal rendelkezik. [1]

Megvizsgáltuk a különböző munkaközegekkel kinyerhető tengelyteljesítményt és körfolyamati hatásfokot, belső hőcserélő alkalmazása mellett, illetve anélkül.

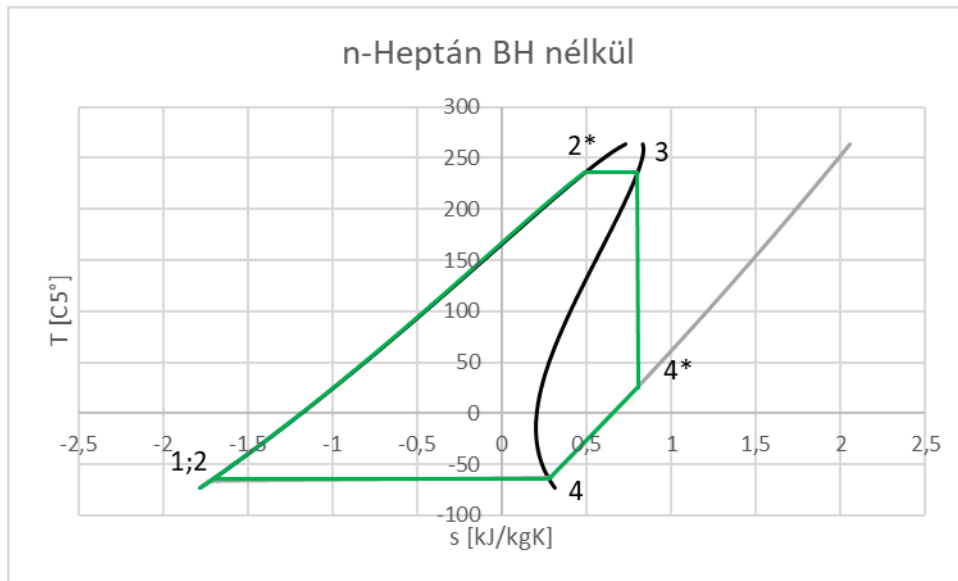
munkaközeg	belső hőcserélővel		belső hőcserélő nélkül	
	hatás-fok	tengelyteljesítmény	hatás-fok	tengelyteljesítmény
toloul	41%	1,2337	25%	0,629
1-butanol	32%	0,9015	30%	0,8059
benzol	37%	1,1053	33%	0,9445
ciklohexán	23%	0,5593	41%	1,1677
hexafluorobenzol	18%	0,4108	39%	1,04
r245fa	17%	0,3825	25%	0,6196
r114	18%	0,4288	27%	0,637
n-pentán	30%	0,8275	37%	0,9075
n-hexán	35%	1,0466	45%	1,1606
n-heptán	42%	1,3746	52%	1,4295
izopentán	29%	0,8036	36%	0,883

2. táblázat: Az egyes munkaközeggel kinyerhető teljesítmény és körfolyamati hatásfok, belső hőcserélő alkalmazásával és anélkül

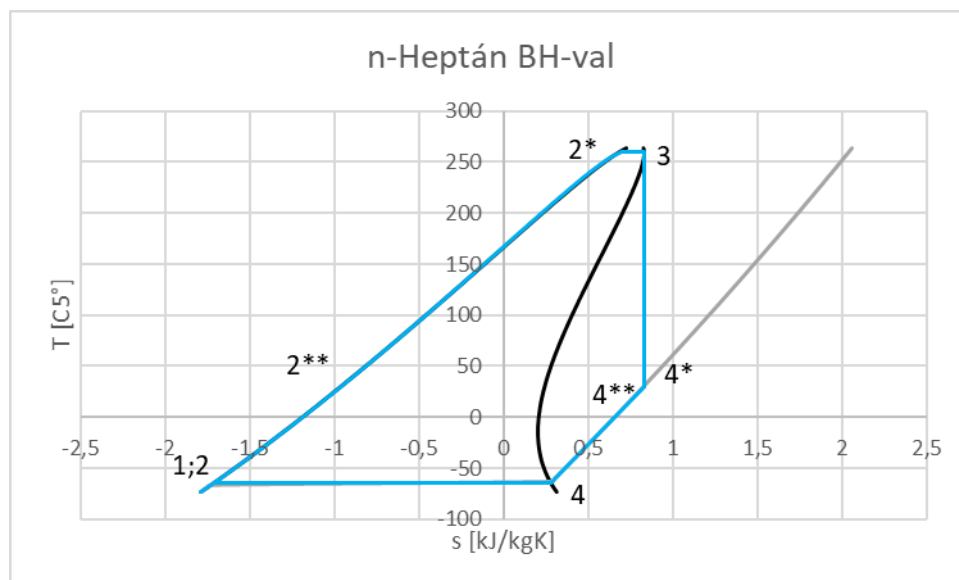
A tűzveszélyesség és egészségkárosító hatások szempontjából előnyös hexafluorobenzol és r245fa körfolyamati hatásfoka meglehetősen alacsony, az r245fa esetén pedig a kinyerhető teljesítmény is alacsony. A hexafluorobenzol jó választás lehet a teljesítmény szempontjából, alkalmazásával ugyanis 1,04 kW teljesítményt tudunk kinyerni a körfolyamatból.

A vizsgált munkaközégek közül az n-heptán bizonyult a legjobbnak termodinamikai megfontolások alapján, hatásfokot és kinyerhető teljesítményt tekintve is így érhetjük el a legmagasabb értékeket. Alkalmazásának hátránya, hogy tűzveszélyes, illetve az egészségre is káros, irritálja a bőrt és belégzés esetén a légutakat is, aspirációs tüdőgyulladást okozhat és a központi idegrendszerre is hatással lehet.

Érdemes azt is megjegyezni, hogy az alacsony hőelvonási hőmérséklethez alacsony nyomás is tartozik, ami ezen munkaközégek többségénél vákuumot jelent, ami légbetörést eredményez és gáz-talanítást igényelne. Ennek műszaki megvalósíthatósága kétségeket keltett bennünk. A hűtéstechnikában alkalmazott hűtőközegeknél nincs ilyen probléma, vákuum fölötti nyomás a hőelvonási nyomás. Ezért az n-heptánnak alternatívája lehetne az R245fa.



2. ábra: Az n-heptánnal megvalósított körfolyamat T-s diagramja



3. ábra: Az n-heptánnal megvalósított körfolyamat T-s diagramja belső hőcserélő alkalmazása mellett  
Az n-heptán T-s diagramjait Excel-ben, FluidProppal készítettük.

### 3. A MEGTERMELT ENERGIA FELHASZNÁLÁSA

A megtermelt közel 1,5 kW energiát a kamion különböző berendezéseinek energiaellátására hasznosíthatjuk.

Ez a teljesítmény elég lehet egy klíma vagy egy mikrohullámú sütő folyamatos működtetésére. Amennyiben a megfelelő készüléket választjuk ki, azaz 1,5 kW alatti teljesítményigényű berendezést választunk, a körfolyamat teljes egészében biztosítja a szükséges energiát.

Az illesztett ORC-rendszer által termelt energiát nagyobb teljesítményű berendezések energiaellátására is fordíthatjuk. Ezesetben a rendszer energiája nem fedezi teljes egészében a berendezés teljesítményigényét, a motorról azonban leveszi ezt a terhet, ezáltal csökkenhet a fogyasztás. Ilyen berendezés lehet például a kamion olajszivattyúja vagy légkompresszora. Hűtőkocsi esetén a hűtőberendezések energiaigényét is támogathatja a körfolyamat.

Ha egy berendezést kizárólag a körfolyamat által szeretnénk működtetni, fontos figyelembe venni, hogy az ORC rendszer által termelt energia függ a pillanatnyi sebességtől, hiszen a hidegoldalként funkcionáló LNG tömegáramát a fogyasztás és a sebesség által tudjuk meghatározni. Alacsonyabb sebességek esetén a kinyerhető teljesítmény alacsonyabb lesz.

#### **4. IRODALOMJEGYZÉK**

[1] ICSCs adatbázis, [Online]. Available:

[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.listcards3?p\\_lang=hu](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.listcards3?p_lang=hu).

[2] [Online]. Available: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Szerves\\_Rankine-ciklus](https://hu.wikipedia.org/wiki/Szerves_Rankine-ciklus).

**A feladat elvégzéséhez a Munkaközlegek tárgy előadási anyagait is felhasználtuk.**