

A HŰTŐKÖZEG VÁLTÁS HATÁSA A HŐSZIVATTYÚ ENERGETIKAI JELLEMZŐIRE

HERMANUCZ PÉTER

Összefoglalás

A hűtőközegek káros hatásainak visszaszorítására és a kockázatok mérséklésére különféle jogszabályokat léptettek életbe, melyek hierarchiájában megtalálhatók úgy a nemzetközi egyezmények, mint a szabványok vagy a nemzeti hatáskörben jóváhagyott előírások. Ezen előírások behatárolják bizonyos hűtőközegek, ezen keresztül pedig bizonyos hűtési megoldások alkalmazásának lehetőségeit pro és kontra: Bizonyos megoldásokat fokozatosan kizsorítanak, mint például a normál- és mélyhűtési tartományban használt HFC-típusú hűtőközegek, melyek fokozott környezeti kockázatot jelentenek, azonban egészségügyi kockázatuk igen alacsony. Másokat korlátozásokkal ugyan, de előtérbe helyeznek, ilyenek az úgynevezett természetes hűtőközegek, melyek közül több rendelkezik közvetlen egészségügyi kockázattal, például mérgező hatással, vagy közvetett hatással, például tűz- és robbanásveszélyesek. Az élelmiszeripari és a hozzá kapcsolódó szállítmányozással, logisztikával foglalkozó cégek közül már többen alkalmaznak környezetkímélő hűtési megoldásokat, ezek elterjedése az említett szabályozásoknak köszönhetően a jövőben várhatóan tovább folytatódik. E megoldások elterjedésének kedvez, hogy fajlagos energia felhasználásuk alacsonyabb a hagyományos megoldásokhoz képest, így a bonyolultabb és veszélyesebb rendszer kiépítés ellenére alkalmazásuk gazdaságilag és környezetvédelmileg előnyös lehet.

Kulcsszavak: természetes hűtőközeg, hőszivattyú, R290, drop-in
JEL kód: Z21

EFFECT OF REFRIGERANT CHANGE ON THE ENERGY PERFORMANCE OF THE HEAT PUMP

Abstract

To limit the harmful effects of refrigerants and reduce the risks, a hierarchy of legislation has been put in place, ranging from international conventions to standards and nationally approved regulations. These regulations limit the pros and cons of using certain refrigerants and, through them, certain refrigeration solutions: some are being phased out, such as HFC refrigerants used in the normal and deep-freezing range, which pose increased environmental risks but very low health risks. Others are being brought to the fore, albeit with restrictions, such as the so-called natural refrigerants, several of which have direct health risks, such as toxicity, or indirect effects, such as fire and explosion hazards. Many companies in the food industry and related transport and logistics are already using environmentally friendly refrigeration solutions, and their uptake is expected to continue in the future thanks to these regulations. The uptake of these solutions is favoured by their lower specific energy consumption compared to conventional solutions, which means that, despite more complex and dangerous system set-ups, they can be economically and environmentally beneficial.

Keywords: natural refrigerant, heat pump, R290, drop-in

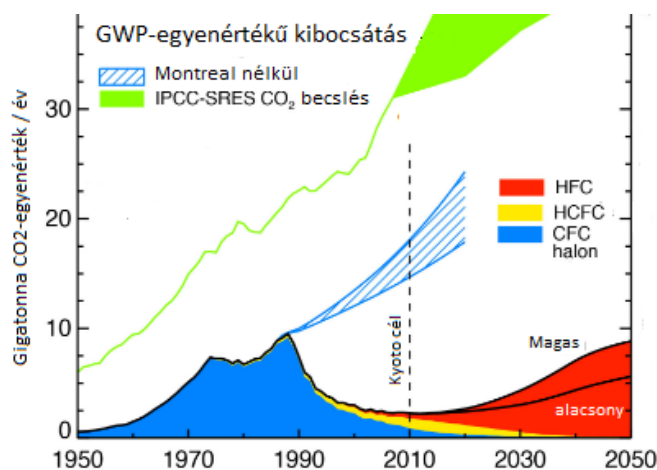
Bevezetés

A hűtési ciklus elválaszthatatlan része maga a hűtőközeg, amely bizonyos fokú globális-környezeti és helyi egészségügyi kockázatokat hordoz magában. Számos esetben a hűtőkör műszakilag kifogástalan állapotban van, azonban a benne alkalmazott hűtőközeg környezetkárosító hatása miatt annak cseréje egyet jelentene az egész rendszer átépítésével, cseréjével. Ilyen eset például a CFC vagy HFC típusú hűtőközegek (R22, R32) kiváltása, hiszen ezek vagy ózombontó potenciállal rendelkeznek, vagy globális felmelegítési potenciáljuk (GWP) túl magas (CARDOSO et al. 2017), és rendelkezésre állnak alacsonyabb GWP-vel rendelkező természetes hűtőközegek, például az R290 (HARBY, 2017). Erre a problémára nyújt megoldást a hűtőközegek drop-in helyettesítése, amikor a berendezésen nem történik módosítás, mindössze a hűtőközeget cserélik kevésbé környezetkárosító változatra.

A hűtőközeg vagy hűtőrendszer kockázatainak mérésére néhány mutatót és mérőszámot vezettek be. A környezeti terhelést gyakran a globális felmelegedési potenciállal (GWP) jellemzik. A GWP egy olyan mutató, amely egy üvegházhatású gáz kibocsátásának globális felmelegedésre gyakorolt hatását hasonlítja össze a hasonló mennyiségű CO₂ kibocsátásának hatásával. A hatást 100 éves távlatban becsülik meg (MAKHNATCHA - KHODABANDEHA, 2014).

A hűtőközegek másik fontos tulajdonsága az ózombontó potenciál (ODP). Ez egy olyan mutató, amely a molekulának az ózonréteg pusztulásában való részvételét jellemzi. Ennek az indexnek az értékét egy referencia molekulához, nevezetesen az R11 vagy R12 molekulához hasonlítják, amelyek ODP értéke = 1. Ez azt jelenti, hogy egy R12 molekula élettartama alatt 100 000 molekula ózont pusztít el (MOLINA - ROWLAND, 1974). Az ózont lebontó anyagok csúcskibocsátása 1988-ban 1,5 megatonna volt. A Montreali Jegyzőkönyvnek köszönhetően az ODP-tartalmú hűtőközegek gyártása tilos.

Az 1. ábra a hagyományos hűtőközegek környezeti veszélyeinek nagyságrendjét mutatja be a Meteorológiai Világszervezet szerint a különböző hűtőközegek GWP-vel súlyozott kibocsátásán keresztül, évenkénti gigatonna CO₂-egyenértékben kifejezve.



1. ábra: Hűtőközegek CO₂-egyenértéke / Figure 1. CO₂ equivalent of refrigerants

Forrás: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2011) alapján saját szerkesztés /
Source: Own construction based on WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2011)

Az ábra együtt mutatja a fejlett- és fejlődő országok kibocsátását. Látható, hogy 2030 után a HFC-k erőteljes növekedése figyelhető meg. Ez még egyszer aláhúzza a természetes hűtőközegek elterjesztésének indokoltságát.

Az egyes gázok, például a CFC-k, halonok, HCFC-k, HFC-k kibocsátását megszorozzuk a megfelelő GWP-jükkel, hogy megkapjuk az összesített, egyenértékű CO₂-kibocsátást. Referenciaként az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) CO₂-forgatókönyveihez tartozó kibocsátások szerepelnek. A szaggatott vonal 2010-et, a Kiotói Jegyzőkönyv első kötelezettségvállalási időszakának középső évét jelöli. Könnyen megállapítható, hogy a globális felmelegedésre gyakorolt hatás közel fele az F-gázokkal kapcsolatos, és ezek közül sok a hűtőközeg. Ez a fő oka annak, hogy a környezeti kockázatelemzés nagyon fontos az ipari hűtés, különösen az élelmiszeriparban és az élelmiszerláncban alkalmazott hűtés területén. Másrészt e hűtőközegek közül néhány mérgező, mások pedig rendkívül gyúlékonyak. Ezek alapján elengedhetetlen a környezeti terhelés és az egészségügyi kockázatok megvitatása, a törvények és rendeletek alkalmazása is, amelyek befolyásolják az iparban használt hűtési ciklusok kialakítását.

A közvetlen emisszió és a közvetett környezetterhelés együttes hatását a két hatás összegzésével vesszük figyelembe. Ezt az egyesített hatást az ún. TEWI értékkel jellemzik, a CO₂ GWP-jét tekintve egységnyinek. Nagyságában jelentős szerepet játszik a hőszivattyú teljesítmény tényezője, éves üzemideje és az elfogyasztott villamos energia környezetterhelése is. Ezért mindig csak egy adott hűtőberendezésre vonatkoztatható, vagyis értékét minden esetben külön-külön kell meghatározni, nem rendelhető egyértelműen az adott hűtőközeghez, bár igen jellemző rá. Általánosságban elmondható, hogy az indirekt környezetterhelés egy nagyságrenddel nagyobb, mint a direkt, hiszen a hőszivattyú élete során igen jelentős mennyiségű villamos energiát fogyaszt el. A különbség még markánsabb, ha alacsony GWP-vel rendelkező, például természetes hűtőközeget alkalmazunk. Ennek megfelelően különös figyelmet kell fordítani a hőszivattyú teljesítmény tényezőjére (AIRAH, 2012), ezért energetikai vizsgálataim elsősorban e jellemzőre szorítkoznak.

Az iparban használt hűtőközegeket vizsgálva az R404a túlsúlya minden ágazatban egyértelmű (kb. 40%-os részarány), kivéve a borágazatot. Az R404a egy nem-azeotróp keverék. Körülbelül 52%-ban trifluoretánból (R143a), 44%-ban pentafluoretánból (R125) és 4%-ban tetrafluoretánból (R134a) áll. Ennek egyik oka, hogy az R404a-t széles körben használják a közepes (élelmiszer-tartósítás) és az alacsony (fagyasztás) hőmérsékletű hűtési alkalmazásokban (CARDOSO et al., 2017).

Másik széles körben használt hűtőközeg az R717 szempontjából: Ammónium. Az élelmiszerláncban sok olyan háztartási hűtőgép van, amely hűtőközegként az R134a-t (tetrafluoretán) és az R600a-t (izobután) alkalmazza. Az R290 (propán) és az R744 (széndioxid) természetes hűtőközegek, és kaszkádrendszerekben használhatók. Ez a hűtésnek egy meglehetősen új módja, azonban a mesterséges hűtés kezdetén csak természetes hűtőközegek álltak rendelkezésre. Ezek kiváló energetikai tulajdonságokkal rendelkeznek, de veszélyesek az egészségre. Ezért szorították ki őket a CFC-k, amelyek nem jelentenek veszélyt az egészségre, inkább a környezetre. Napjainkban a természetes hűtőközegek nagy népszerűsége tettek szert, piaci részesedésük egyre nő. Az Aldi Süd üzleteinek több mint 54%-a (több mint 1000 egység) világszerte CO₂-vel működik, és 2017-ben világszerte több mint 15 000 egység működik (ALVARO, 2017).

CARDOSO et al. (2017) megállapította, az élelmiszeriparban nagy mennyiségű elavult hűtőközeget használnak. Az R22 (klór-difluormetán) a második leggyakrabban használt hűtőközeg - mintegy 30%-os részesedéssel -, kivéve a bor- és a halágazatban. Minden elemzett ágazatban használják, ami alapvetően a sokoldalúságának és a berendezések korának köszönhető. Amellett, hogy régebbi egyedi hűtőrendszerekben is megtalálható, a hűtési alkalmazások óriási választékában, a hőmérsékleti tartományok széles skáláján alkalmazható. Vitatott, hogy az R22 ODP-értéke 0,05, tehát rombolja az ózonréteget. 2010 óta tilos ezeket a hűtőrendszereket újratölteni vagy szervizelni. Ezek még mindig üzemben vannak, amíg

valamilyen nagyobb meghibásodás nem következik be, ekkor a hűtőközeget természetes hűtőközegekre lehet cserélni (HARBY, 2017).

A mennyiségi és minőségi hatások korlátozása a jogalkotó hatáskörébe tartozik. Elsősorban a minőségi hatások enyhítésére történnek lépések, így az ENSZ Éghajlat-változási Keretegyezményének való megfelelés érdekében az EU és benne hazánk is kötelezettséget vállalt a fluortartalmú gázok forgalomba hozatalának csökkentésére, azok fokozatos kivezetésére a piacról. A forgalomba hozható F-gázok mennyisége 2018-ban már csak a 2009 és 2012 közötti referencia időszak 63%-a, 2020 január 1-jével pedig megtiltják a 2500-nál magasabb GWP-vel rendelkező hűtőközeget tartalmazó helyhez kötött hűtőberendezések forgalmazását, valamint a 150-nél magasabb GWP értékkel rendelkező hűtőközeggel üzemelő hermetikusan zárt mobilklímák forgalmazását is (517/2014/EU).

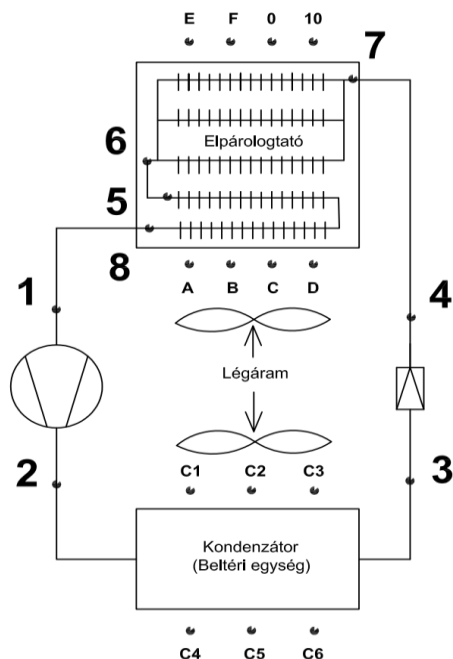
A változás tehát közel van, egyre több gyártó tér át alternatív hűtőközegek alkalmazására. Erre remek lehetőséget kínál az R290 és R600a, hiszen ezek GWP-je elhanyagolható, relatív töltet igényük HFC hűtőközegekhez képest 45...50%, így kiterjedt tudományos vizsgálatuk a közelmúltban megindult. Ez két szempontból is hasznos: kisebb és ezáltal olcsóbb eszközöket eredményez, és kinyitja a lehetőségeket a szénhidrogén hűtőközeggel üzemelő berendezések telepítése előtt (HARBY, 2017). Éppen ezért tervezem kutatásomat ezekkel a hűtőközeggel.

Ebben a publikációban megvizsgálom egy általánosan elterjedt levegő-levegő hőszivattyúval elérhető teljesítmény tényezőt különféle külső hőmérsékletek mellett többféle hűtőközeg alkalmazása esetén. Az eredmények kiértékelése után javaslatot teszek az előnyösen alkalmazható hűtőközeg típusára.

Anyag és módszer

A feladat elvégzéséhez mindenképp szükséges a hűtőkör jellemző pontjain elért hőmérsékletek időbeli lefutásának megismerése, ahogy a beszívott- és kifúvott levegő hőmérsékletek is fontos szerepet játszanak. Korrekt, összehasonlítható méréseket csak laboratóriumi körülmények között lehet végezni, ahol a számtalan zavaró hatás kiküszöbölhető, és reprodukálható az a kritikus időjárási körülmény, mely esetén a leginkább érzékeny a berendezés a jegesedésre.

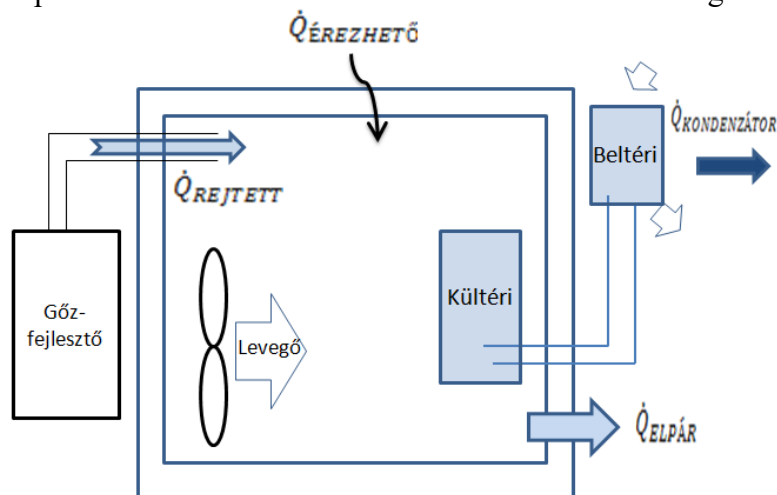
Hogy a tervezett vizsgálatokat elvégezhessem, ki kellett alakítanom egy arra alkalmas berendezést, melynek áttekintő vázlatát a 3. ábra mutatja. A vizsgált hőszivattyú egy 2,5kW névleges teljesítményű split klíma berendezés volt, melynek kültéri egysége egy jól szigetelt kamrában került elhelyezésre. A kamrából elvont hőt a határoló szerkezeteken bejutó hőáram fedezte kisebb mértékben, igen nagy hányadát viszont rejtett hó formájában vezettem be a kamrához kapcsolt gőzfejlesztőben előállított vízgőzzel. Ezzel az eljárással a lehető legmagasabb páratartalom érhető el a térben. A belső tér hőmérséklete a gőzfejlesztő kapcsolási ciklusidejének változtatásával, valamint légkeverő ventilátorok alkalmazásával tartható közel állandó értéken. Összesen 24 ponton végeztem hőmérséklet méréseket, valamint a villamos energia fogyasztást is mértem. A rendszer egyszerűsített kapcsolási rajzát a 2. ábra mutatja, melyen nem szerepelnek a kamrához kapcsolódó érzékelők (Relatív páratartalom, hőmérséklet eloszlás C8-C9), valamint a kompresszor villamos teljesítményét mérő műszer sem.



2. ábra: A mérőrendszer és a mérési helyek / Figure 2. The measuring system and measurement sites

Az ábrán látható számozás a műszerezés fejezetben bemutatott táblázat jelöléseit követi, így könnyen azonosíthatók az egyes mérési pontok. A C7 és C8 mérők a kamra belsejében alul és felül kerültek elhelyezésre. Segítségükkel ellenőriztem a vertikális hőmérséklet kitégződést.

A kültéri egységet egy hűtőkamrában szereltem fel, mely kamrában ventilátorok is üzemelnek, így a levegő elosztása a szűk térben igen egyenletesnek bizonyult, a vertikális hőmérséklet eltérés 1°C-nál nem volt nagyobb. A kamra légzárása megfelelő, hiszen a 2db 30mm átmérőjű furat -amelyeken a villamos- és hűtőközeg vezetékek közlekednek- tömítése megoldott. Így páratechnikai szempontból a rendszer közel tökéletesen izolált a külvilág felé.



3. ábra: A kísérleti berendezés elrendezése / Figure 3. Layout of the experimental apparatus

A különböző hűtőközegek alkalmazásához a vizsgálat alá vont berendezéseken új hűtőközeg csatlakozási pontokat építettem ki, melyeken keresztül a hűtőközeg lefejtése, a rendszer vákuumolása és az új hűtőközeg betöltése megvalósítható volt, továbbá ellenőrzési céllal nyomásmérést is meg tudtam valósítani.

A hűtőközeg cseréjének eljárása minden esetben azonos volt. A töltés mennyiségét úgy állították be, hogy a rendszerben keringő anyag mennyisége állandó legyen. Ez a hűtőközegek eltérő moláris tömege miatt eltérő tömegű mennyiségeket jelentett. A referencia R32-hez képest nagyobb mennyiségű R410a, míg az R290a esetében kisebb mennyiségre volt szükség. Ez kifejezetten előnyös, tekintve az R290 kedvezőtlenebb tűzvédelmi tulajdonságait.

Mérőeszközök

A leolvasztási ciklusok vizsgálatához a tranziensek elemzésére és a köztük eltelt idő meghatározására volt szükség. Az időt mindig valamely hőmérséklet értékek megváltozásához kötve határoztam meg (ennek módszerét később részletezem), ezért 10s-os felbontású gépi adatrögzítést alkalmaztam. Méréseimhez az úgynevezett IMRe - Intelligens MérőRendszer-t használtam (BENÉCS et al., 2018), melynek óriási előnye, hogy a mért értékeket rögtön egy szerverre továbbítja. Az interneten keresztül on-line módon meg is lehet jeleníteni az adatokat. Ugyanakkor lehetőség nyílik visszamenőlegesen „.csv” formátumban exportálni az adatokat további feldolgozás céljából. A mérés idejére on-line megjelenítést alkalmaztam, így valós időben is meg tudtam figyelni egy-egy leolvasztási ciklus kibontakozását. Az egyes szakaszok időbeni hosszát, valamint a teljesítmény tényező számításához szükséges átlagos hőmérséklet és villamos teljesítmény adatokat később excel táblázatkezelő segítségével határoztam meg.

A 2. ábrán bemutatott mérési helyek mindegyikén a Dallas DS18B20 digitális hőmérővel végeztem a méréseket, melynek pontossága $0,5^{\circ}\text{C}$ a $-55\dots+125^{\circ}\text{C}$ tartományban. A villamos teljesítmény mérését a TV0F111-es pontossági osztályú mérőeszközzel végeztem, míg a relatív páratartalom mérésére a DHT11 típusú digitális mérőeszközt használtam. A hőmérséklet érzékelőket a készüléken belül a rézcsövekhez rögzítettem, a megfelelő hővezetés érdekében öntapadó alumíniumszalaggal, majd zártcellás csőszigeteléssel árnyékoltam a külső behatásoktól.

A felhasznált hűtőközegek

Méréseim során több hűtőközeggel is dolgoztam a leolvasztási ciklusok vizsgálatára szolgáló berendezése esetén. Ezek az R32, R290 és az R410a voltak, ezért röviden ismertetem az általam használt hűtőközegek tulajdonságait.

Az R410a hűtőközeg az R32 és az R125 (50/50 tömeg%-os) keveréke, amely közel azeotróp blend, ezért rendkívül alacsony a hőmérséklet csúszása, szinte nem frakcionálható az elpárolgás során. Így kevésbé okoz problémát a szivárgás, nem kell tartani a közegpár szétesésétől. ODP-je 0, GWP-je magasnak mondható, 2088. Ennek megfelelően kivezetése a piacról már megkezdődött, ami érdekessé teszi helyettesíthetőségének vizsgálatát. Ez a keverék mintegy 60%-kal nagyobb nyomást fejt ki az R290-hez tervezett hűtőkörökben, és csak új, megnövelt nyomásra tervezett berendezésekben használható. Az R410a használatához szükség van a POE (poli-olefin észter) kenőanyagok használatára.

Az R290 hűtőközeg a napjainkban reneszánszukat élő a szénhidrogén alapú hűtőközegek közé tartozik. Ezek mert ODP-je 0, GWP-jük pedig elhanyagolhatóan kicsi. A freon típusú hűtőközegek felfedezése és elterjesztése előtt ezeket is használták már a hűtőtechnikában, tehát forradalmi újításról nem beszélhetünk, azonban alkalmazásuk számos eddig szokatlan követelmény elé állítja a szakembereket és a gyártókat egyaránt. Mint szénhidrogének, számolni kell a jelentős gyúlékonysággal, ami az eddig használt úgynevezett biztonsági hűtőközegek esetén egyáltalán nem volt jellemző. Ez a tulajdonság nem csak a telepítés, de a gyártás, szervizelés, leszerelés esetében is problémás, mivel ezek a „gázok” bár tüzelési célú gázként is forgalomba kerülnek (R290 – tiszta propán), a klímatechnikai célra szánt változatot nem szagositják, így nem könnyű a szivárgó gáz érzékszervi érzékelése.

Az R32 a legújabban használt hűtőközeg annak ellenére, hogy az R410a komponenseként már évtizedek óta ismert. Gyúlékonysága és magas nyomása miatt sokáig mellőzték önálló alkalmazását, azonban a klímavédelmi célok előtérbe kerülésével elterjedése felgyorsult. Égési tulajdonságai azonban jóval kedvezőbbek, mint a szénhidrogén hűtőközegek esetén, gyakorlatilag nem mérgező, ODP-je természetesen 0, GWP-je pedig 675, ami széleskörű felhasználását teszi lehetővé. Az általam felhasznált hűtőközegek fontosabb fizikai tulajdonságait az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat: A felhasznált hűtőközegek fizikai tulajdonságai / Table 1. Physical properties of the refrigerants used

Jellemző	R290	R410A	R32
Összetétel	Propán 99.5%	Pentafluor-etán (R-125) 50% + Difluormetán (R32) 50%	100% Difluormetán (R32)
Kémiai formula	C ₃ H ₈	CH ₂ F ₂ , CHF ₂ CF ₃	CH ₂ F ₂
Móltömeg [g/mól]	44	72,6	52,02
Szag	Enyhe szag	Enyhe éteres szag	Szagtalan
Viszkozitás [cP@20°C]	-	147	0,121
Gőz viszkozitás [cP@20°C]	-	12,9	0,01238
Fagyáspont [°C]	-185,8	-	-136
Forráspont [°C]	-42,1	-51,5	-51,7
Kritikus hőmérséklet [°C]	96,6	72,1	78,3
Kritikus nyomás [bar]	42,5	49,2	58,1
ARH [V%]	20°C alatt 1.013 - 2.2%	Nem éghető	13,3
FRH [V%]	20°C alatt 1.013 - 9.5%		29,3
Öngyulladás hőm. [°C]	480	>750	530
ODP	0	0	0
GWP	3	2088	675
Mérgező koncentráció	Nem mérgező	1000 ppm	Nem mérgező

Az alkalmazott beállítások, számítási módszerek

A mérés során több paraméter beállítására nyílt lehetőségem. Célom a leginkább reprodukálható és összehasonlítható eredmények elérése volt, ezért a kamrába bejuttatott hőáramot közel 100%-ban látens hővel, esetünkben vízgőzzel oldottam meg. Ennek eredményeként a kamra relatív páratartalma a 65...100% közötti tartományba esett, függően a hőszivattyú üzemétől. A kondenzátor oldali levegő térfogatáram és hőmérséklet értéke a beállítható tartomány maximális oldalára esett, hiszen a maximumot a készüléken mindig stabilan lehetett tartani, szemben a részterheléssel, ahol beállítási érz szabályozási nehézségeim

adódta. Ennek megfelelően elmondható, hogy a mérések során a hőszivattyú mindig teljes terhelésen üzemelt.

A teljesítménytényező meghatározására szolgáló méréseket a -10 és +10 °C hőmérséklet-tartományban végeztem, hűtőközegenként legalább 5 beállítással és 4 óra időtartamban. A vizsgálatok célja a hűtőközegek közötti különbség kimutatása volt. A beállítások tartományait a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat: A beállítási értékek tartományai / Table 2. Ranges of setting values

Paraméter	Vizsgált tartomány
Kamra belső hőmérséklete	-10...+10°C
Kamra belső páratartalma	65...100% RH
Kívánt kondenzátor oldali hőmérséklet	23...30°C
Kondenzátor levegő térfogatárama	369...862 m ³ /h

A hűtőkör legfontosabb vizsgálati paramétere a körfolyamatot jellemző pontokon mért nyomás- és hőmérséklet mellett végeredményben a teljesítménytényező. Vizsgálataim során az egyszerűen meghatározható effektív teljesítmény tényezőt számítottam:

$$COP = \frac{\dot{Q}_K}{P_{vill}}, \quad (1)$$

ahol

\dot{Q}_K a kondenzátoron leadott hőteljesítmény [kW] és

P_{vill} a kompresszor által fölvetett villamos teljesítmény [kW].

\dot{Q}_K értékét a kondenzátoron áthaladó levegő hőmérséklet különbségéből és térfogatáramából, valamint sűrűségéből határoztam meg az alábbi összefüggés alkalmazásával:

$$\dot{Q}_k = c_{pl} \cdot \dot{V}_l \cdot \rho_l \cdot (T_{ki} - T_{be}), \quad (2)$$

ahol

c_{pl} a levegő állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása [kJ/kgK],

\dot{V}_l a kondenzátoron áthaladó levegő térfogatárama [m³/s],

ρ_l a levegő sűrűsége [kg/m³],

T_{ki} a kondenzátorból kilépő levegő hőmérséklete [°C] és

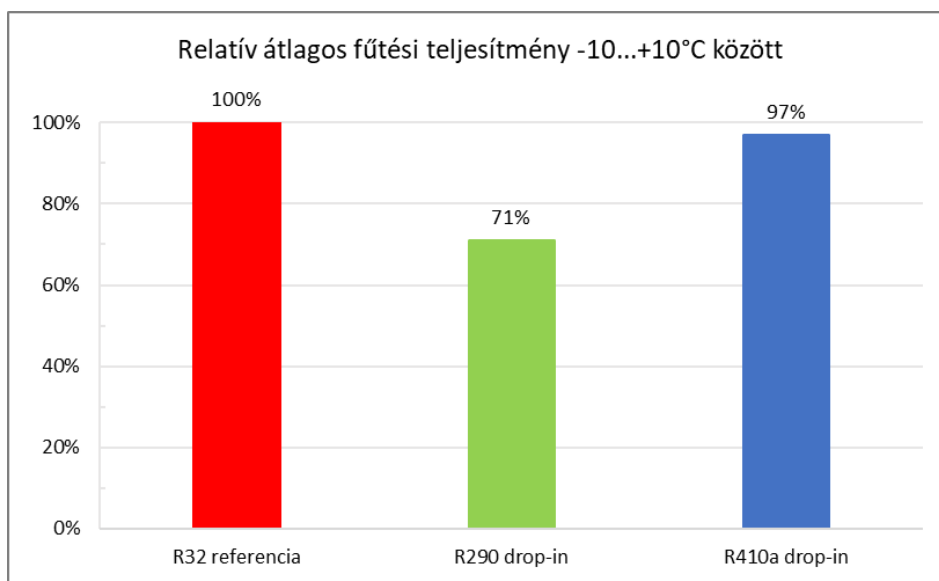
T_{be} a kondenzátorba belépő levegő hőmérséklete [°C].

A kondenzátoron áthaladó levegő térfogatáramát a beszívó oldal 12 egyforma felületű részre bontásával, majd az e felületeken kialakuló légsebességek mérésével és átlagolásával határoztam meg. A hőmérsékleteket a korábban jelzett módon 3-3 pontban mértem a beszívó- és kifúvó oldalon. A számítások során a jobb összehasonlíthatóság érdekében a teljesítmény tényező meghatározásánál kizárólag a leolvasztási ciklusokon kívüli, stacioner üzemelés adatai vettem figyelembe.

Eredmények

A méréssorozatok végrehajtása előtt a mérőrendszer próbaüzemét végeztem el. A próbaméréseket a $-26...+15^{\circ}\text{C}$ kamra hőmérséklet tartományban végeztem. Ezek alapján megállapítottam, hogy a teljesítmény tényező meghatározása céljából legjobb a $-10...+10^{\circ}\text{C}$ tartományt vizsgálni. Az adatgyűjtő rendszer megfelelő működéséről is meggyőződtem, valamint a regisztrált adatok alapján megállapítottam, hogy amint az elpárologtató hőmérséklete jelentősen eltér a beszívott levegő hőmérsékletétől, a berendezés elindítja a leolvasztási ciklust. A tesztkamra hőmérsékletét a bevezetett gőz mennyiségével szabályoztam. Célom az volt, hogy a kamra relatív páratartalmát maximális értéken tartsam, ami a legjobb reprodukálhatóságot biztosítja. Ahogy a kamra hőmérséklete nő, úgy nő az elvont hő mennyisége, és így az adott idő alatt bevezetett gőz mennyisége is. Ez azonban nem jelent problémát a teljesítmény tényező vizsgálatakor, mivel a leolvasztási ciklusokat e kiértékelés során nem vettem figyelembe.

A hűtőkör energetikájára vonatkozóan két jellemzőt értékeltem ki: egyrészt vizsgáltam az elérhető fűtési teljesítményt, másrészt ugyanennél a teljesítménynél mértem a felvett villamos teljesítményt és a leadott hőteljesítményt, majd számítottam a teljesítmény tényezőt. A mérések során minden esetben az R32 hűtőközeg eredményeit tekintettem referenciának, és ehhez viszonyítva ábrázoltam az elért eredményeket. A fűtési teljesítmény vizsgálatánál a $-10...+10^{\circ}\text{C}$ tartományban végzett 5 mérés átlagos fűtési teljesítményét hasonlítottam össze, az eredményeket a 4. ábra mutatja.



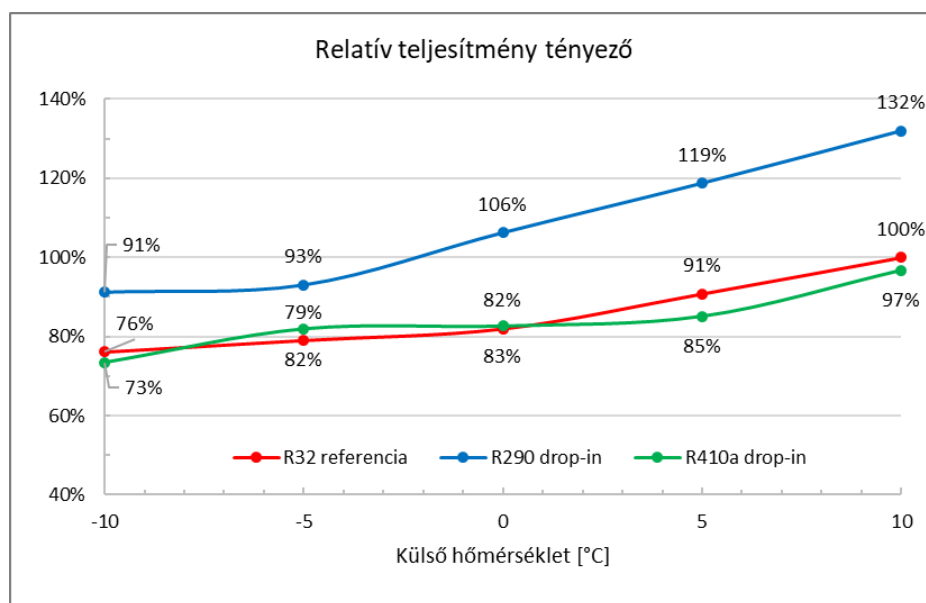
4. ábra: A különféle hűtőközeggel elért átlagos fűtési teljesítmény (Referencia: R32) / Figure 4. Average heating capacity achieved with different refrigerants (Reference: R32)

Megfigyelhető, hogy minden esetben csökkent a fűtési teljesítmény az R32 referencia értékéhez képest. Azonban a csökkenés mértéke szinte elhanyagolható az R410a alkalmazása esetén, viszont jelentős mértékű az R290 alkalmazásával. Ennek oka a hűtőközgek fizikai tulajdonságaiban keresendő: az úgynevezett fajlagos hűtőteljesítmény az a jellemző, ami megmutatja, hogy azonos kompresszor mérettel mekkora teljesítmény érhető el az adott hűtőközeg alkalmazása esetén. Ez a jellemző hasonlóan alakul, mint az eredményül kapott teljesítmény arányok, de fontos kiemelni, hogy pusztán a fizikai adatokból nem lehet

következtetni a valódi hűtőkörrel elérhető fűtési teljesítményre, így az eredmények a gyakorlat számára mindenképp hasznosak és fontosak.

A tapasztalt visszaesés a fűtési teljesítményben ugyan jelentős mértékű az R290 esetében, azonban figyelembe kell venni, hogy a hőszivattyúk csak igen ritkán, túlméretezésük esetén pedig a tranziens üzemállapotokat leszámítva sosem üzemelnek teljes terhelésen, így a teljesítmény csökkenés sem okoz problémát a gyakorlatban. Technológiai hűtés vagy fűtés esetén természetesen más lehet a helyzet, itt egyedileg kell kivizsgálni, megengedhető-e ilyen mértékű teljesítmény degradáció.

Mási igen fontos energetikai jellemző a teljesítmény tényező, melynek alakulása igen érdekes képet mutat a fűtési teljesítmény ismeretében. Az eredményeket -ugyancsak az R32 hűtőközeget referenciául választva- az 5. ábra mutatja. Az eredményeket itt a külső hőmérséklet függvényében mutatom be.



5. ábra: A relatív teljesítmény tényező a külső hőmérséklet függvényében (Referencia: R32 +10°C) / Figure 5. Relative power factor as a function of external temperature (Reference: R32 +10°C)

A leginkább markáns eredmény az R290-nel elért teljesítmény tényezőknél látható, ennek értékei ugyanis minden esetben meghaladják a referenciának választott R32 és az R410a-val elérhető teljesítmény tényező értékeit. A növekmény 0°C-nál magasabb külső hőmérséklet esetén 30% körül alakul, ez alatt az előny mérséklődik, de jól láthatóan fennmarad. Ez azt jelenti, hogy ugyanaz a berendezés kisebb teljesítménnyel, de lényegesen jobb energiahatékonysággal üzemeltethető R290-nel, mint R32-vel vagy R410a-val. Utóbbi kettő esetén nem tapasztaltam lényegi változást a teljesítmény tényezőben.

A teljesítmény tényező ilyen mértékű javulása a hűtőközeg fizikai tulajdonságai mellett annak az energetikai eredménynek is betudható, melyet korábban ismerttettem: Az R290-nel alacsonyabb teljesítmény érhető el, mint a másik két hűtőközeggel. Ez egyben azt is eredményezi, hogy a berendezés adott méretű hőcserélői relatíve túlméretezetté válnak a hűtőközeg váltás eredményeként. Ennek következménye az alacsonyabb hőmérséklet különbség a környezet és a hűtőkör között, ami a hatékonyságot kedvezően befolyásolja. Ezzel együtt a kompresszor terhelése is csökken, ami csökkenti a villamos energia felhasználást és növelheti a kompresszor élettartamát. Így nem feltétlenül probléma, hogy a csökkent teljesítmény okán azonos eredmény eléréséhez magasabb üzemidő szükséges, mert a

kompresszor csökkentett terheléssel üzemel, a berendezés hatékonysága pedig lényegesen kedvezőbbé vált az R290 alkalmazása esetén.

Az eredményekből az is látható, hogy a külső hőmérséklet csökkenésével a teljesítmény tényező minden esetben csökkenő tendenciát mutat, ami a hűtőköri nyomásviszonyok ismeretében természetesnek tekinthető. A csökkenés mértéke azonban meghatározó: 25...30%-kal romlik a hatékonyság, ha a külső hőmérséklet +10°C-ról -10°C-ra csökken.

Következtetések

A létrehozott kísérleti berendezés alkalmasnak bizonyult a hűtőkör legfontosabb energetikai jelzőszámának, a teljesítmény tényezőnek a meghatározására. A mérési eredményeket összefoglalva megállapítható, hogy a vizsgált hűtőkörben a hűtőközegek drop-in helyettesítése megvalósítható. Az eredetileg alkalmazott R32 hűtőközeg helyett azonos anyagmennyiségben felhasznált R410a és R290 hűtőközegekkel a hűtőkör módosítások nélkül is üzemeltethető maradt. A berendezésen a kísérletek során nem tapasztaltam endellenességet. Az energetikai jellemzők eltérése az eredeti hűtőközeggel tapasztalhatókhoz képest kettős: az elérhető fűtési teljesítmény csökkent, míg az energia hatékonyságot jellemző teljesítmény tényező R290 alkalmazásával jelentősen emelkedett. A javulás mértéke meghaladja a teljesítmény csökkenésből származó hátrányokat.

Vizsgálataim eredményei hasznosíthatóak egyebek mellett élelmiszeripari, energetikai és környezetvédelmi szempontokból. A kísérletek alapján meghatározott új eredmény, mely szerint az R290-nel lényegesen magasabb teljesítmény tényező érhető el azonos berendezéssel, rávilágít a természetes hűtőközegek drop-in alkalmazásának lehetséges előnyeire. Az eredmények jó egyezést mutatnak más kutatók korábbi eredményeivel (HARBY, 2017), azonban hozzájuk képest új hűtőközegekkel és lényegesen korszerűbb berendezésen végeztem a vizsgálatokat.

A hűtőközegek drop-in cseréje ugyanakkor jelentős környezeti előnyökkel is járhat. A régi, magas GWP-vel rendelkező hűtőközegek ezzel a módszerrel a berendezésen végzett műszaki beavatkozás nélkül helyettesíthetők korszerű, kevésbé vagy elhanyagolható mértékben környezetkárosító alternatívával. Ilyen helyettesítési lehetőség például az általam vizsgált R410a vagy R32 (GWP=2088...675) cseréje R290-re (GWP=3).

Köszönetnyilvánítás

„AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-21-4-I-MATE/8 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT”



Hivatkozott források

AIRAH, (2012): Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI). *The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating*, Melbourne, 20p. Available:

https://www.airah.org.au/Content_Files/BestPracticeGuides/Best_Practice_Tewi_June2012.pdf

ALVARO, O. (2017): Global Market Trends for Natural Refrigerants in commercial refrigeration. *Danish Technological Institute*, 43p.

BENÉCS, J. – HERMANUCZ, P. – DODOG, Z. (2018): Introduction of Intelligent Measuring System (IMRe) in the Food Industry. *XIX. Risk Factors and Food Chain Conference*, Hungary, Mátrafüred, 26–28 of September, 2018.

CARDOSO, B.J. – LAMAS, F.B. – GASPAR, A.R. – RIBEIRO, J.B. (2017): Refrigerants used in the Portuguese food industry: Current status. *International journal of refrigeration*, 83, 60–74. DOI: <https://doi.org/10.32604/EE.2021.012860>

HARBY, K. (2017): Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1247–1264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.039>

MAKHNATCHA, P. – KHODABANDEHA, R. (2014): The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant. *Energy Procedia* 61, 2460–2463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.023>

MOLINA, M.J. – ROWLAND, F.S. (1974): Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249, 810–812. DOI: <https://doi.org/10.1038/249810a0>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2011): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. *Global Ozone Research and Monitoring Project–Report*, 52, 516p.,

517/2014/EU az európai parlament és a tanács rendelete. *Az Európai Unió Hivatalos Lapja* L150, 195–230.

Szerző

Dr. HERMANUCZ Péter PhD

egyetemi tanársegéd

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet,

2100 Gödöllő, Páter Károly u. 1.

hermanucz.peter@uni-mate.hu

A műre a Creative Commons 4.0 standard licenc alábbi típusa vonatkozik: [CC-BY-NC-ND-4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

