

HŰTŐKÖZEGEK SZIVÁRGÁSÁNAK DETEKTÁLÁSÁRA ALKALMAS FOTOAKUSZTIKUS MŰSZER FEJLESZTÉSE

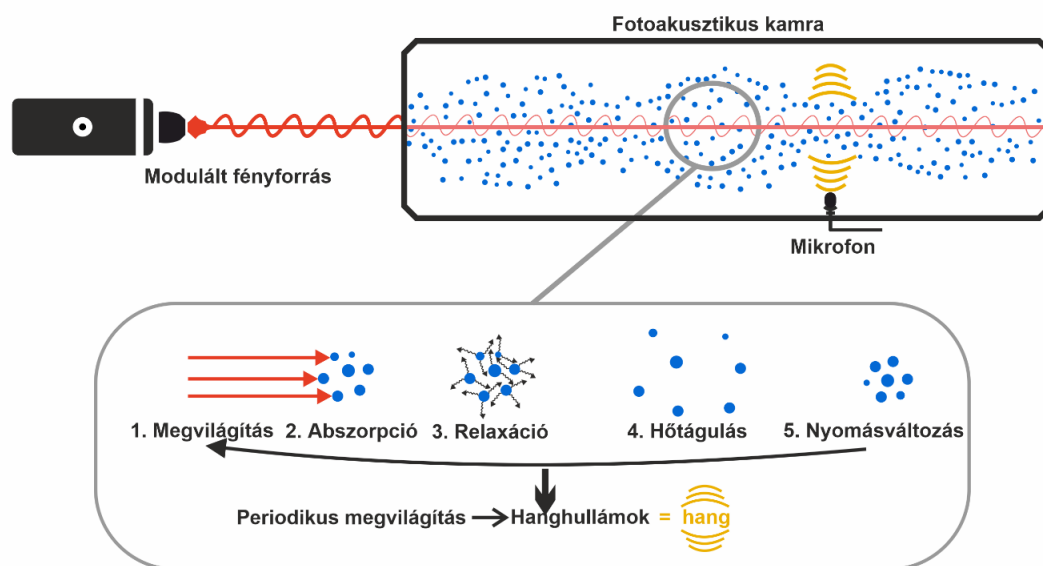
Végh Panna¹, Molnár Bence¹, Ailer Piroska^{1,3}, Bozóki Zoltán^{1,2}, Huszár Helga^{1,2}

¹ Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

² HUN-REN–SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport, Szeged

³ Szegedi Tudományegyetem Interdiszciplináris Kutatásfejlesztési és Innovációs Kiválósági Központja

A hűtőközegek szivárgásának detektálása napjainkban számos iparágban (többek között az autópárhán és a hűtőiparban) alapvető feladat, különösen a nagy hűtőközeg-töltettel (≥ 3 kg) rendelkező rendszerek esetében, ahol a szivárgásmentesség rendszeres ellenőrzése jogszabályi kötelezettség. Az ilyen rendszerek vizsgálatához olyan mérőeszközök szükségesek, amelyek képesek az előírások szerinti, legfeljebb 5 g/év szivárgási ráta megbízható kimutatására. Az elmúlt évtizedekben a klórmentes halogénezett szénhidrogének (HFC-k) alkalmazása jelentősen megnövekedett, elsősorban az 1987-es Montreali Jegyzőkönyv nyomán, amely korlátozta az ózonkárosító halogénezett szénhidrogének (CFC) és részlegesen halogénezett szénhidrogének (HCFC) használatát [1]. Bár a HFC-k ózonlebontó potenciálja (ODP) nulla, azaz nem károsítják az ózonréteget, globális felmelegedési potenciáljuk (GWP) közepes vagy magas, így alkalmazásuk csak ideiglenes, kompromisszumos megoldásként értékelhető [2]. A szabályozási környezet szigorodása még inkább indokoltá teszi a hűtőközeg-szivárgások hatékony és szelektív detektálására alkalmas korszerű műszerek fejlesztését. A cél egy kompakt, fotoakusztikus elven működő hordozható szivárgásdetektor kifejlesztése, amely alkalmas a hűtőközegek koncentrációjának nagy pontosságú meghatározására. Az új eszköz lehetővé teszi, hogy a hűtéstechnikai szakemberek gyorsabban, egyszerűbben és megbízhatóbban azonosíthassák a szivárgási pontokat, előrelépést kínálva a jelenleg kereskedelmi forgalomban elérhető technológiákhoz képest. A kifejlesztett fotoakusztikus műszer nagy érzékenységgel rendelkezik, képes akár 1,2 g/év szivárgási ráta kimutatására is [3].

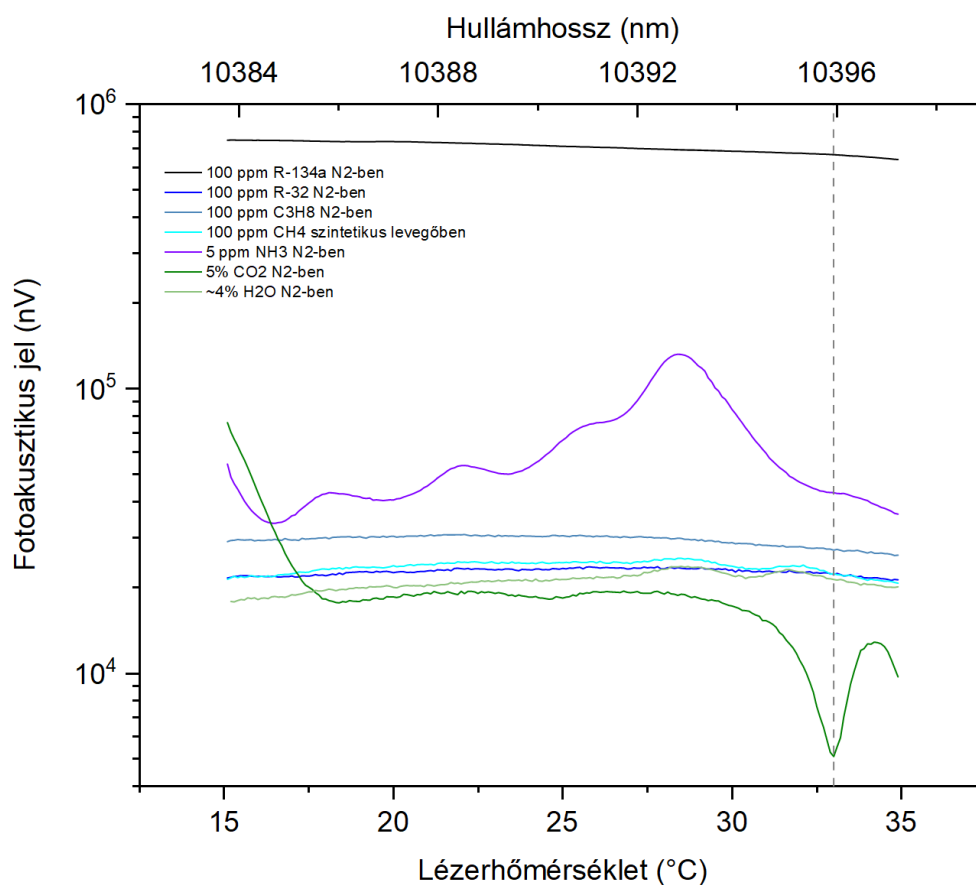


1. ábra: A fotoakusztikus jelkeltés folyamata

Komplex gázösszetételű minták elemzése során kiemelten fontos a szelektivitás biztosítása, amelyhez elengedhetetlen a keresztérzékonységi hatások figyelembevétele. A különböző komponensek (mint például a vízgőz, szén-dioxid, ammónia, metán, illetve más jelen lévő hűtőközegek) elnyelési vonalai

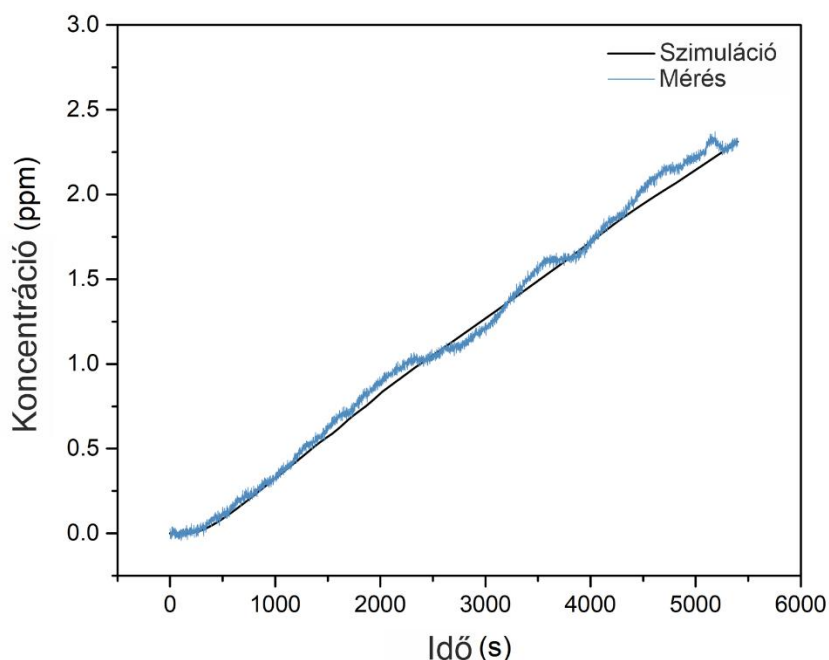
spektrálisan átfedhetnek a mérni kívánt hűtőközeg abszorpciós vonalaival, téves detektálást eredményezve. A spektrális interferenciák elkerülése érdekében a mérési hullámhossz gondos kiválasztása szükséges, olyan abszorpciós vonal választásával, amely minimalizálja az átfedéseket más komponensekkel.

A leggyakrabban előforduló zavaró komponensek koncentrációja a környezet függvényében széles tartományban változhat: a vízgőz (H_2O) néhány térfogatszázalékos arányban van jelen, a kültéri széndioxid (CO_2) koncentráció ~ 400 ppm, míg beltérben ez az érték akár 5% is lehet kilélegzett levegőben. Az ammónia (NH_3) és metán (CH_4) tipikusan néhány ppm szinten vannak jelen, de ipari vagy mezőgazdasági környezetben magasabb értékek is előfordulhatnak. A potenciálisan interferáló komponensek közé soroltuk továbbá a propánt (C_3H_8) és az R-32 hűtőközeget is. Az eredmények alapján a további mérésekhez a 33°C -os lézerhőmérséklethez tartozó hullámhossz került kiválasztásra.



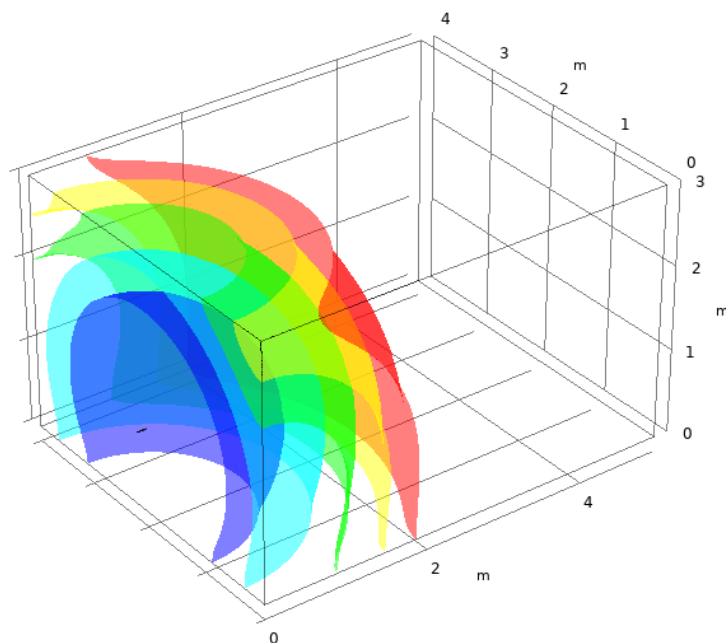
2. ábra: A fotoakusztikus jel a lézer hőmérsékletének függvényében különböző gázösszetételek esetén, logaritmikus skálán.

Zárt kamrában végzett kísérletek során a hűtőközeg koncentrációjának időbeli változását követtük nyomon, amelyeket a COMSOL Multiphysics szoftverrel végzett végeselemes szimulációkkal egészítettünk ki. A szimulációk eredményei jó egyezést mutattak a mért adatokkal, igazolva azok pontosságát, és lehetővé téve az eredmények nagyobb léptékű környezetre való kiterjesztését.



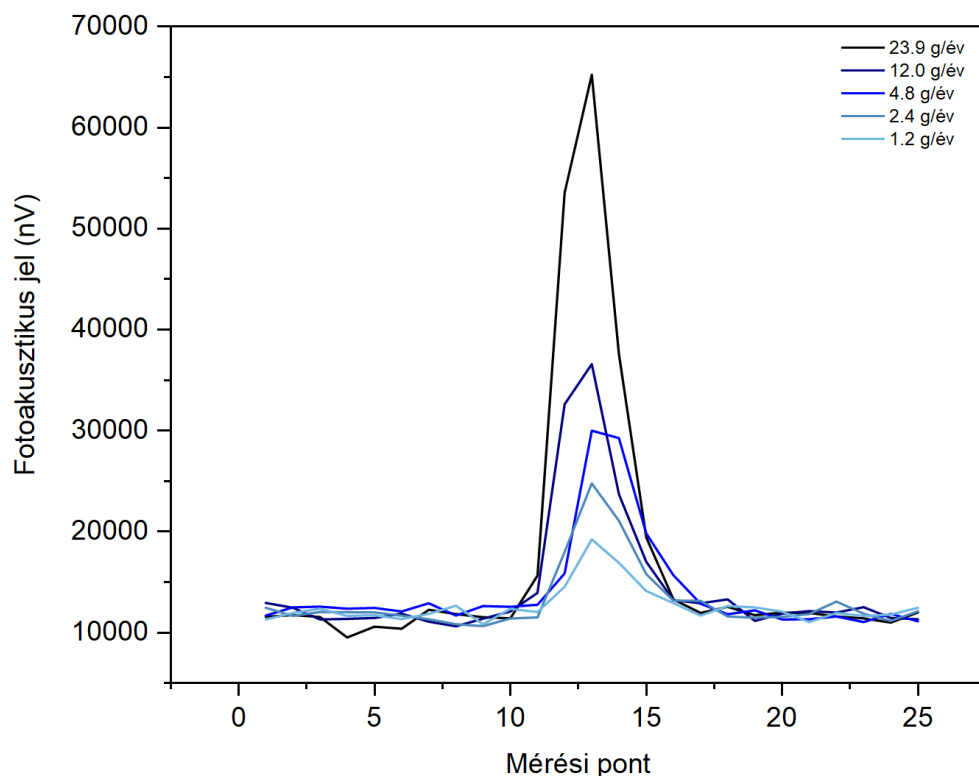
3. ábra: Az R-134a koncentrációjának mért és szimulált értékei a zárt dobozban.

Egy kiterjesztett szimuláció során egy $5 \times 4 \times 3$ méteres helyiségben modelleztük a hűtőközeg-koncentráció alakulását, ahol izofelületek ábrázolással szemléltettük a detektálási határkoncentráció frontjának időbeli változását. Az eredmények rámutattak, hogy a gáz gyorsan érzékelhetővé válik, és a műszer hatékony lehet valós, nagy léptékű környezetben is.



4. ábra: A műszer által legkisebb detektálható koncentráció izofelületének időbeli alakulása kétórás lépésekben.

A nyitott térben való szivárgásmérést úgy valósítottuk meg, mint egy valós helyzetben történő szivárgáskeresést. A mérési eredmények azt mutatják, hogy amikor a mintavevő cső közeledik a szivárgás helyéhez, a fotoakusztikus jel nagysága növekszik, majd távolodva a szivárgástól csökken. Ez azt jelenti, hogy a szivárgás helye pontosan azonosítható a jel változásának nyomon követésével.



5. ábra: A fotoakusztikus jel változása a szivárgási pont közelében különböző szivárgási ráták esetén.

Felhasznált irodalom

- [1] S.A. Montzka, M. McFarland, S.O. Andersen, B.R. Miller, D.W. Fahey, B.D. Hall, L. Hu, C. Siso, J.W. Elkins, Recent Trends in Global Emissions of Hydrochlorofluorocarbons and Hydrofluorocarbons: Reflecting on the 2007 Adjustments to the Montreal Protocol, *J. Phys. Chem. A* 119 (2015) 4439–4449. <https://doi.org/10.1021/jp5097376>.
- [2] Heredia-Aricapa, Y., Belman-Flores, J.M., Mota-Babiloni, A., Serrano-Arellano, J., García-Pabón, J.J., 2020. Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A. *International Journal of Refrigeration* 111, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.012>
- [3] P. Végh, B. Molnár, M. Molnár, P. Ailer, Z. Bozóki, H. Huszár, Innovative photoacoustic instrument for fast and accurate detection and localization of R-134a leaks in refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration* 175 (2025) 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.04.003>.

A kutatás a „CFC gázok fotoakusztikus detektálására alkalmas műszer fejlesztése” című projekt részeként valósult meg, projektazonosító: ÉZFF/136/2022_TIM_SZERZ.