

A cseppfolyósított gáz (LNG) előállításának, logisztikájának és hasznosításának technológiái

Dr. Bártfai Zoltán¹, Blahunka Zoltán¹, Domanovszky Henrik², Dr. Faust Dezső¹, Lágymányosi Attila¹, Szalkai István³

¹ Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, ² Pannon Fuel Kft., ³ Keresztespók Kft.

Bevezetés

Az LNG (Liquified Natural Gas) értéklánc minden fázisa nagyon komplex technikai és technológiai rendszerek alkalmazása révén valósul meg. Ezek részletes bemutatására és elemző értékelésére egy cikksorozat keretében nincs lehetőség. A napjainkra kialakuló környezeti és klímakriszisben az energiatermelés és annak környezetre gyakorolt hatásának a kérdése már nem csak a szakembereknél, hanem a lakosság egészénél a figyelem középpontjába került. Jelentős igény és törekvés mutatkozik a fosszilis energiahordozók felhasználásának visszaszorítására. A cseppfolyósított földgáz is fosszilis energiahordozó, de éppen az ismeretetésre kerülő előállítási technológiájából adódóan alkalmazása a többivel összevetésben kisebb környezeti terheléssel jár.

Az LNG közvetlen energiahordozóként való felhasználását számos technikai, logisztikai és gazdasági tényező korlátozza. Ennek ellenére célszerű keresni és fejleszteni azokat az alkalmazásokat, ahol a felhasználás ésszerű alternatív megoldást jelent. A gázlelőhelyek és a felhasználási helyek közötti nagy szállítási távolságok áthidalására hosszú ideig kizárólag a csővezetékek kiépítése volt a megoldás. A gáz cseppfolyósítása, az LNG tengeri szállítása és tárolása biztonságos technológiáinak kifejlesztése a globális energiahordozó-ellátásban új alternatívát eredményezett. Bár az LNG ipar kifejlődését döntően a szállítási problémák megoldása motiválta, a technológiák rövid áttekintése során látni fogjuk, hogy a környezetvédelmi hozadék is jelentős.

Az utóbbi öt, tíz évben a földgázágazatban nemzetközi szinten rendkívül jelentős átalakulások következtek be, amelyek sok tekintetben világméretű átrendeződést és geopolitikai változásokat eredményeztek. Ebben az átalakulásban a cseppfolyósított földgáz növekvő szerepet játszik. Az EU 2018-ban 24 nagy kapacitású és 4 kisebb kapacitású LNG tengeri import(fogadó)terminállal rendelkezett, és továbbiak kiépítése is folyamatban van [1].

A gázok cseppfolyósításának lehetősége régóta ismert. A földgáz cseppfolyósításnak jelentősebb, iparszerű alkalmazása a múlt század 60-as éveiben indult el. A mintegy fél évszázados időszak alatt rendkívül kiterjedt és dinamikus technikai, illetve technológiai fejlődés ment végbe. A műszaki fejlesztés és fejlődés elsődlegesen magát a cseppfolyós földgáz (LNG) előállítását érintette, de ezzel párhuzamosan zajlott a tárolás, az export és importterminálok, a tengeri szállítás, valamint a hasznosítás infrastruktúrájának nagyleptékű és látványos kiépítése is.

Az LNG előállítási, mozgatási, tárolási technológiái mindenképpen a csúcstechnológiák (high-tech) kategóriájába sorolandók. Elég itt csupán a mínusz 162 °C-os cseppfolyósított földgáz létrehozására és a szállítására, valamint a felhasználás biztonságos kezelésére utalni. A csúcstechnológiák alkalmazása mellett a szigorú előírások és szabványok is hozzájárultak ahhoz, hogy az elmúlt 50-60 évben ebben az iparági szegmensben jelentős balesetek nem fordultak elő.

Az LNG-üzemek termelőkapacitás szerinti méretskálája

A rendkívül magas technikai és technológiai követelmények kielégítése nagy költségekkel jár együtt. Ezzel is magyarázható, hogy az LNG ipari méretű előállítására szolgáló üzemi létesítmények létrehozása és működtetése viszonylag kis számú, jelentős tőkeerővel rendelkező multinacionális céghez kötődik. Az LNG ipar technológiáinak egyre kiforrottabbá válása lehetővé tette az előállítás méretskálájának kiszélesítését, amit az új igények megjelenése is indokolt.

A nagyüzemi termelésben évtizedeken keresztül az LNG termelővonalak (trains) kapacitásnövelésének igénye és trendje érvényesült. A nagy rendszerek több termelővonalal is rendelkezhetnek. A technológia fejlesztői, szállítói ehhez igazodtak, így a kimunkált földgázcseppfolyósító eljárások, módszerek és eszközök többsége is a nagyüzemi termelésnek felel meg leginkább. Az ezredforduló után azonban a kisebb méretű LNG-előállító rendszerek iránt is megnövekedett az igény. Kialakult egy olyan méretskála, ami szélesítheti ennek a gázipari szegmensnek az alkalmazási körét. Az általánosan elfogadott termelőkapacitás szerinti besorolás kategóriáit az **1. ábra** szemlélteti.

Az LNG-előállítás és -felhasználás funkcionális technológiai elemei

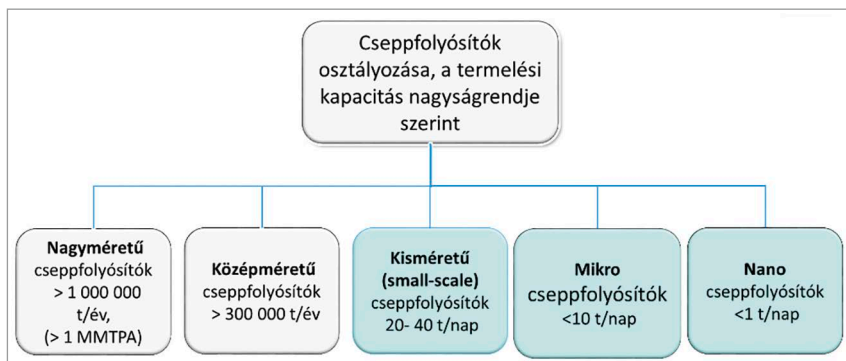
A földgázcseppfolyósító létesítmények kialakítása, az alkalmazott berendezések és technológiák nagyon sokfélék lehetnek, de a bennük megvalósuló alapfunkciók hasonlóak. Ezek az alábbiak:

- gáztisztítás/kondicionálás,
- cseppfolyósítás,
- tárolás,
- kitárolás

A **2. ábra** az általánosan megvalósuló technológiai alapfolyamatokról és azok logikai kapcsolódásáról ad áttekintést.

Az ábrán megjelölésre kerültek a meghatározó fontosságú specifikálási pontok, és az ott elvárt minőség minimumkövetelmények is. Ezekből is kitűnik, hogy a cseppfolyósítás, vagyis a kriogén folyamat megvalósíthatósága rendkívül nagy gáztisztaságot követel meg. Így az LNG végtermék is

1. ábra Az LNG-előállító üzemek termelőkapacitás szerinti besorolása (Forrás: Pannon - LNG projekt tanulmány)



nagy tisztaságú, aminek következtében a többi fosszilis energiahordozónál lényegesen környezetkímélőbb. A 3. ábra jól mutatja a különbségeket. Az LNG a gázolaj alkalmazásához viszonyítva szén-dioxidból 30, nitrogén-oxidból 87, kén-dioxidból 95, és szilárd részecskékből 99%-kal kevesebb légszennyezést okoz.

Az LNG a nem direkt formájú, hanem az import terminálokon elvégzett újragázosítást követően a meglévő gázvezetékbe pumpálás esetén is környezetkímélő hatást fejt ki, mivel csökkenti a vezetékes gáz szennyezőanyag-koncentrációját.

Fontosabb földgáztisztítási technológiák

Mint arra az előzőekben utaltunk, az LNG-előállításban a gáz tisztításnak kiemelkedő szerepe van. Mivel a nyers gáz sokféle fizikai és kémiai jellegű szennyeződést tartalmazhat, a cseppfolyósításnál elvárt tisztaságot csak többfázisú, komplex folyamatrendszer alkalmazásával lehet elérni.

A tisztítás első folyamatát már közvetlenül a kútfejnél el kell végezni. A kútfejnél megjelenő nyers földgáz mindig tartalmaz különböző szilárd szennyeződések, leginkább homokot. A nyers földgázkeverék több olyan szénhidrogén-komponenst is tartalmaz, amelyek kondenzálódnak, ha a nyomás ezen alkotók harmatponti nyomása alá csökken. A nyers földgáz úgynevezett szabad víztartalma hasonló módon kondenzálódhat.

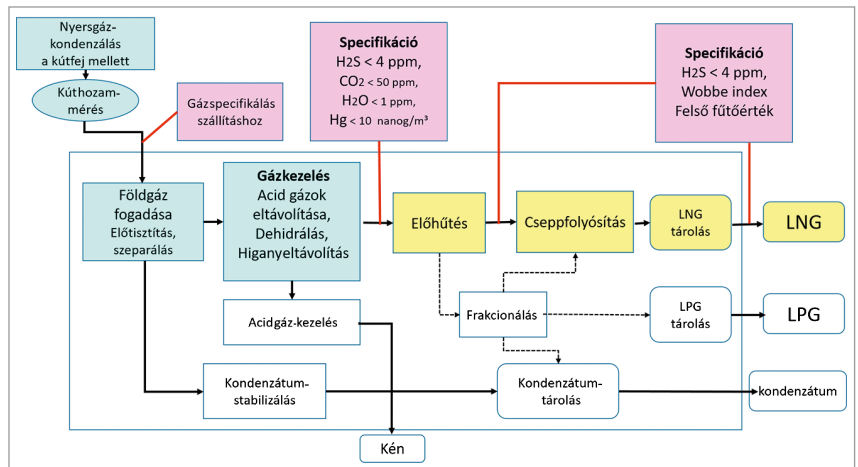
A homokot és az egyéb szilárd szennyeződések, valamint a vizet és a szénhidrogén kondenzátumokat már a kútfej közelében el kell távolítani. Ugyanis ezek csővezetékbe kerülése komoly problémákat okozhat. A szilárd részecskék a csővezetékot erőteljesen koptatják. A víz egyrészt korróziót, másrészt megfagyva dugulást idézhet elő. A kondenzálódott nehéz szénhidrogének a csőben lerakódhatnak, ami az áramlás romlásához, végső fokon eltömődésekhez vezetethet.

A nyers földgázok előtisztítására vertikális, illetve horizontális kialakítású szeparátorokat fejlesztettek ki. Általában mindkét kivitelnél a momentumelven alapuló szűrést és a szűrőszeparálást kombinálva alkalmazzák.

A víz és a hidrátok eltávolítása, dehidrálsi módok

A földgáz iparban az alábbi technológiai megoldások alakultak ki:

- kémiai vízelvonás kontaktortoronyban, folyékony dehidrálsó abszorpciós anyag (pl.: glikol, tri-etilén-glikol) alkalmazásával,
- fizikai vízelvonás kontaktortoronyban, szilárd dehidrálsó adszorpciós anyag (pl.: alumínium oxid, szilika gél) alkalmazásával,



2. ábra A gázkezelés és cseppfolyósítás áttekintő rendszervázlata az alapvető minőségi specifikációk megjelölésével (Forrás: Pannon - LNG projekt tanulmány)

- membrános vízleválasztás,
- kondenzáció.

A földgáz édesítése

A nyers földgázok mindig tartalmaznak több-kevesebb kén-hidrogént (H₂S) és széndioxidot (CO₂). Ezek savassá, savanyúvá teszik a gázt. Ezeknek az összetevőknek az eltávolítása mindenképpen szükséges. A savas hatás erőteljes korróziót okoz, a kén-hidrogén erősen mérgező hatású is. A H₂S és a CO₂ (acidok) eltávolítása egy menetben is végrehajtható. A folyamatot gázédesítésnek nevezzük.

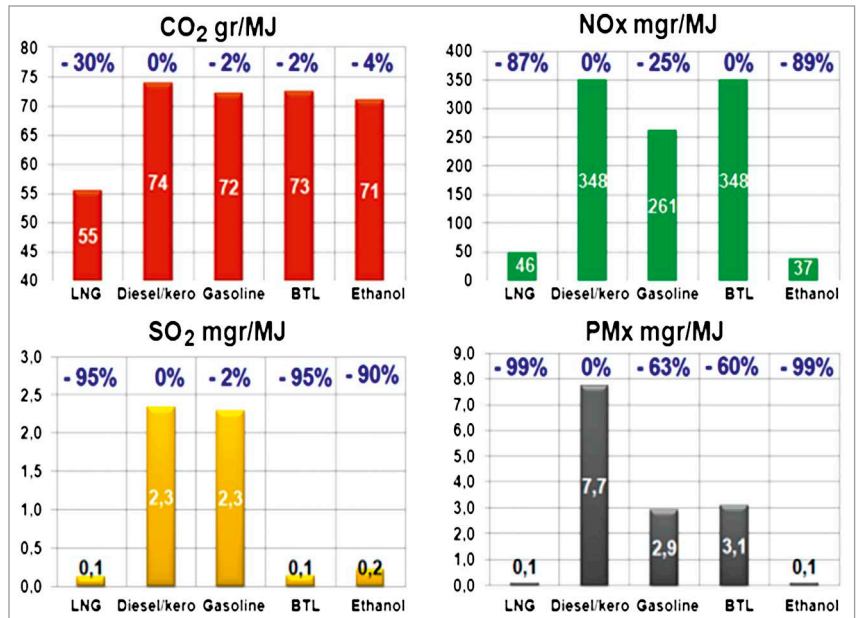
A földgázédesítés technológiai rendszerében három meghatározó résztechnológia különül el. A földgázédesítő kontaktoronyban az adott technológia által használt abszorbens (például amin) vagy adszorbens

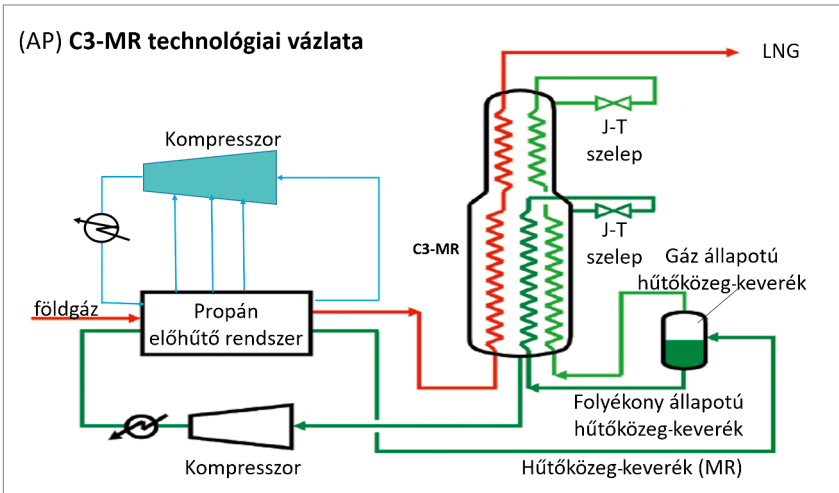
segítségével megtörténik a H₂S, a CO₂ kivonása a gázból. A másik fontos technológia folyamat a kémiai vagy fizikai ágensek regenerálása. A harmadik résztechnológia a tisztá kén kinyerését segíti elő.

Földgázcseppfolyósítási technológiák Hűtőkeverék alkalmazása (MR technológiák)

A nagyüzemi földgázcseppfolyósítási folyamat egyik sajátossága, hogy a kívánt hűtési hőmérséklet elérését hűtőkeverékek alkalmazásával valósítják meg. A szakma ezt a technológiát az MR (Mixed Refrigerant) rövidítéssel illeti. Az LNG előállításában a hűtőkeverékek alkalmazása meghatározó jelentőségű. Jelenleg a cseppfolyósított földgáz mennyiségének mintegy 90%-át az MR technológia alkalmazásával állítják elő.

3. ábra Különböző hajtóanyagok károsanyag-kibocsátási jellemzői (Forrás: AirLNG Emissions, 2016)





4. ábra Az MR földgáz cseppfolyósító alaptechnológia funkcionális és működési vázlatja (Forrás: M. Pillarella, et al, 2012)

A kevert hűtőközeges földgázcseppfolyósítás adott recept szerinti hűtőkeveréket alkalmazó, zárt ciklusú hűtési technológia, amelyben a cseppfolyósítás az expanzió, a szeparálás és a hőcserélés folyamatainak logikus összekapcsolása révén, több lépésben valósul meg. A hűtőközeg keverék olvadáspontja a hűtött anyag hőmérsékletétől függően változó. Az expanzió, a fázisszeparáció és a hőcserélés folyamatait általában J-T (Jolue-Thompson) szelepek vezéreltik. Egy tipikus és elterjedt cseppfolyósító technológia működési vázlatát a 4. ábra szemlélteti [4].

A technológiai rendszer két alrendszerre tagolódik. Az egyik a propán hűtőközeges előhűtés, a másik pedig maga a cseppfolyósítás. A propános hűtőkör saját kompresszorral rendelkezik. A földgáz hűtése érdekében a propán nyomását olyan mértékben megnövelik, hogy az hűtővíz vagy levegő felhasználásával kondenzálódjon. A cseppfolyósá vált propán, a nyomásvesztés során olyan hőmérsékletre hűl, hogy megfele-

lő hűtőhatást tud kifejteni. Az ábrán nyomon követhető, hogy a fő hőcserélőből kikerülő hűtőkeverék az előhűtés érdekében keresztüláramlik a propános előhűtőn. Ez a technológiai megoldás számottevően javítja a cseppfolyósítás energiahatékonyosságát.

Az előhűtést követően a kondenzálódott hűtőkeverék a fázisszeparátorban gárra és folyadékra különül el. Ezek külön ágon áramlanak keresztül a hőcserélő alegységeken, amelyek a fő hőcserélőben helyezkednek el. A hűtőkörökbe iktatott J-T expanziós szelepek hozzájárulnak a hűtőkeverék hőmérséklet csökkenéséhez. A jól megválasztott hűtőkeveréknek köszönhetően a hűtőszakaszok logikus kombinálásával és a komponensek olvadáspontjának kihasználásával, a cseppfolyósítás a fő hőcserélő egységben megvalósulhat.

A nitrogénexpanziós ciklust alkalmazó LNG-előállító technológia

A nano, a mikro és a kisméretű (small-scale) LNG-előállító egységeknél a hűtőke-

verékes technológia helyett a nitrogénexpanzió alapján működő cseppfolyósítási technológia ajánlható. Ez a megoldás energetikai szempontból kedvezőtlenebb, mint az MR technológiák. Előnye viszont az egyszerűbb és olcsóbb kivitel. A nitrogénexpanziós technológiák alapvetően az úgynevezett Brayton ciklusú hűtési elven alapulnak [2].

A technikai megvalósítás technikai alapelemeit és az általuk megvalósított hűtési ciklust az 5. ábra szemlélteti. Ez esetben a hűtőközegként a nitrogén szolgál. Ennek előnye, hogy a környezetből elérhető és tisztítás után újra felhasználható.

A nitrogénexpanziós technológiáknak nagy előnye, hogy a rendszerek indítása és leállítása könnyen megvalósítható. A nitrogénexpanziós ciklus technikai alapeleminek a felhasználásával különböző technológiai változatokat lehet kialakítani. Ez lehetőséget ad arra, hogy a konkrét igényekhez és feltételekhez rugalmasan illeszkedő megoldások szülessenek. A rendszerek fő technikai egységei: villanymotor, turbókompresszor, lemezes hőcserélő, J-T szelep, nitrogéntorony, LNG-tároló.

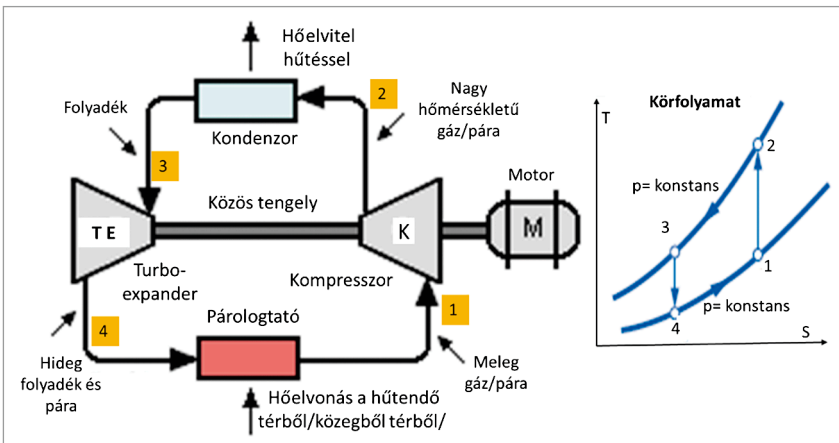
A biogázalapú forrásokhoz kapcsolódó tisztítási és cseppfolyósítási technológiák

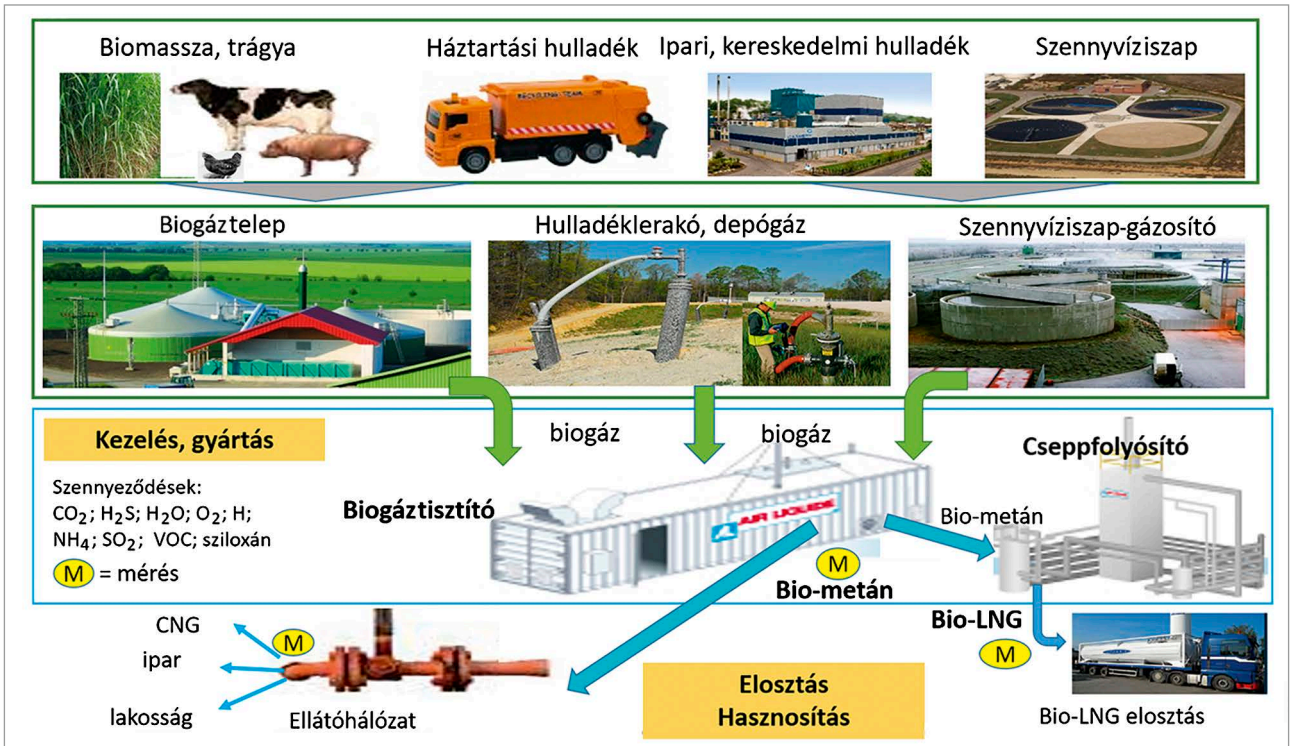
A biogázcseppfolyósítás igényének megjelenése és az ennek nyomán kimunkált megoldások, viszonylag új keletűek. A földgáz és a biogáz fizikai és kémia tulajdonságainak nagymértékű egybeesése lehetővé teszi a földgáziparban már kiforrott technológiák elveinek, illetve tényleges megoldásainak az adaptálását. Ennek természetesen jelentős korlátai is vannak. Az egyik jelentős különbség a két terület között a források hozamának nagyságából adódik. A biogáz források hozama általában lényegesen kisebb, mint a földgáz forrásoké.

A különbségek közé sorolható a biogázforrások nagyfokú decentralizáltsága, valamint a hozamok időjárási hatásoktól is függő időbeni egyenetlensége. A biogázban sajátos szennyeződések is előfordulhatnak, amelyek a tisztítási folyamatban is sajátos eljárásokat igényelhetnek. Példaként említhető a biológiai szennyeződés vagy a depógázban előforduló sziloxán.

A biogáztisztító és -cseppfolyósító létesítmények a termelőkapacitás szempontjából a mini és a nano méretkategóriába tartoznak. A változatos igényeket a fejlesztők és a gyártó cégek rugalmas megoldásokkal igyekeznek kielégíteni. Ide sorolható a moduláris kiépítés, a termelői kapacitás méretének skálázhatósága, illetve esetenként az áttelepítés megvalósíthatósága. A biogázalapú forrásokhoz kapcsolódó tisztítás és

5. ábra A nitrogénexpanziós hűtési ciklus technikai elemei és működési folyamata (Forrás: Pannon - LNG projekt tanulmány)





6. ábra A biogáztermelés, -cseppfolyósítás és -hasznosítás általános rendező modellje (Forrás: Pannon - LNG projekt tanulmány)

cseppfolyósítás rendszeréről a **6. ábra** nyújt áttekintést.

Azok az anyagok, amelyekből a biogáz keletkezik, közvetlenül vagy közvetve az emberi létezés kötődnek. Így az élelmezést szolgáló állattartáshoz, a hulladék- és szennyvíz „termeléshez”. Ebből az is következik, hogy szemben a földgázzal, a biogáz megújuló energiaforrásnak tekinthető. Ezt hangsúlyozandó, az amerikai szakirodalomban a sűrített, illetve cseppfolyósított biogázra, az Európában általánosan elterjedt CBG, LBG rövidítések helyett, az R-CNG és a R-LNG (R – Renewable) jelöléseket is használják.

A mezőgazdasági fermentálók, a hulladéklerakók és a szennyvíziszap-kigázósítók képezik a biogáz alapforrásait. A forrástípusok gázminősége és hozama jelentősen eltérhet egymástól, amit a tisztítási és cseppfolyósítási technológiák kiválasztásánál mindenképpen figyelembe kell venni. Az idők folyamán a biogáz tisztítására többféle technológia alakult ki. Ezek egy része a földgáztisztításban kiforrott technológiai megoldások adaptációi. Vannak a sajátos terület igényeihez kifejlesztett speciális változatok is, mint például a biológiai szűrők vagy a szilán szűrők.

A **7. ábra** összefoglalóan mutatja be azt a biogáztisztító technológiai választékot, amit a hazai fejlesztéseknél is figyelembe vehetünk. A biológiai szűrés, a kriogén folyamatban megvalósuló tisztítás és a szilológién szűrés technológiáit speciálisan a bio-

gázoknál alkalmazzák, a földgáziparban ezek nem használatosak.

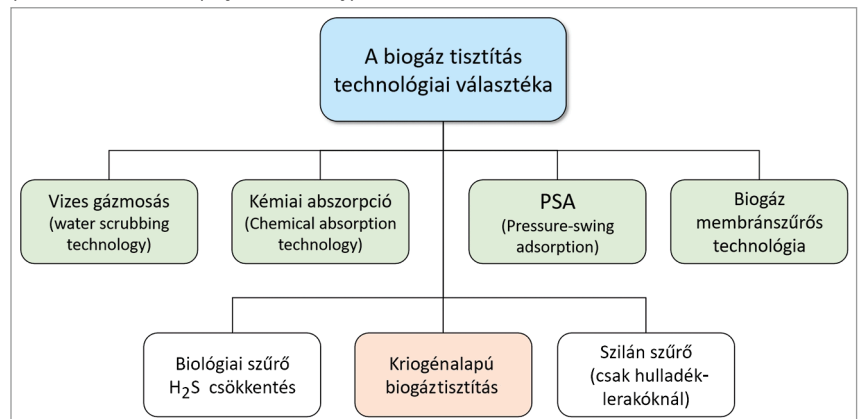
Jelenleg a biogáztisztításban a PSA technológia a legelterjedtebb, ami a viszonylag kedvező munkaminőségi és rendszerüzemeltetési jellemzőinek köszönhető [5]. A PSA biogáztisztító technológia strukturális felépítésének és működésének vázlatát a **8. ábra** szemlélteti.

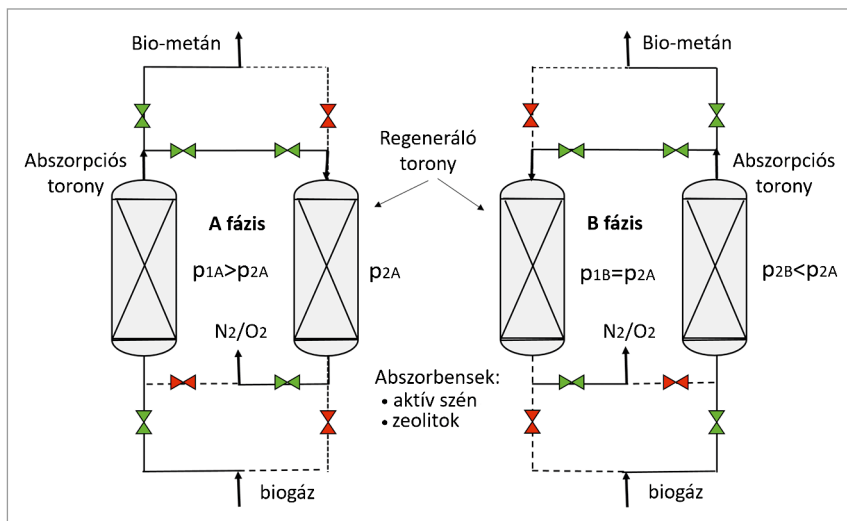
A biogáz szennyeződései a cseppfolyósító (kriogén) folyamat során is eltávolíthatók. Erre dolgozott ki szabadalmaztatott eljárást a Scandinavian GtS [6].

A szennyeződés eltávolítása és a cseppfolyósítás négy hűtési fázisban valósul meg. Ennek vázlatát mutatja a **9. ábra**. A technológia sok vonatkozásban egyedülálló. A meg-

oldás még elég költségesnek mutatkozik, ami a korlátozott számú alkalmazásból is adódik. A költségektől eltekintve a munkaminőségre vonatkozó adatok kedvezőek. A gazdaságosságot javítja a szén-dioxid 100%-os kinyerési lehetősége, élelmiszeripari tisztasággal. Az ipari méretű LNG-előállításban felhalmozott ismeret és a kiforrott technológiák nagyban elősegítették, hogy a különböző forrásból (fermentor, depó, szennyvíziszap) származó biogázok cseppfolyósítása viszonylag rövid idő alatt túljusson a kísérleti szakaszon. Ma már több cég kínál kis sorozatban gyártott berendezéseket, illetve rendszereket, amelyekkel a helyi igények rugalmasan kielégíthetők. A szegmens fejlődése csak megfelelő támogatás esetén várható.

7. ábra Biogáztisztító technológiai megoldások választékának összefoglalása (Forrás: Pannon - LNG projekt tanulmány)





8. ábra A PSA biogáztisztító technológia működési vázlatja (Forrás: Pannon - LNG projekt tanulmány)

A cseppfolyósított gáz tárolása, szállítása

Az előállított LNG értéklánban komoly technológiai kihívást jelent, hogy a végfelhasználásig minden egyes fázisban biztosítani kell a cseppfolyós állapot fennmaradását -162 °C -on. A tárolása mind az export-, mind az importterminálokon, valamint a speciális tengerjáró hajókon már hosszú idő óta biztonságosan megoldott. Minden esetben minőségi anyagokból készült, többrétegű szigetelt tárolót alkalmaznak.

Az LNG újragázosítása és a földgázvezetékbe pumpálása mellett felmerültek új, közvetlen felhasználási igények. A decentralizált és többcélú felhasználás érdekében meg kellett oldani a vasúti és közúti tengelyen történő szállítást, a helyi tárolást, a mérés és a szétosztás problémáit. Ma már a felsorolt funkcionális területeken biztonságos és zömében szabványos megoldások

állnak rendelkezésre. Reálisan látni kell azonban, hogy a szükséges infrastruktúra kiépítése jelentős gazdasági és koordinációs erőfeszítést, valamint számottevő időt igényel. Az LNG, az LBG, a CNG és CBG energiahordozók használatának bővítését az EU több programja is koordinálja és támogatja. Ezekhez kapcsolódva Magyarországon is folyik az LNG, CNG töltőállomások kiépítése. [7].

Összefoglalás

A cseppfolyósított gáz hajtóanyagként történő alkalmazása környezetünk védelmének érdekében kedvező alternatívát kínál a hagyományos fosszilis hajtóanyagok „versenytársaként”. Ennek oka egyebek mellett az előállításához alkalmazott tisztítási technológiákban, valamint megújulóenergiaforrás-jellegében rejlik. Alkalmazása a belső égésű motorok hajtásához egyre inkább figyelmet nyer. Az előállítására alkalmazott technoló-

giák a nagyüzemi méretek mellett a kisüzemi volumenben is egyre inkább biztonságosak, gazdaságosak, és ez a felhasználásra is ösztönzően hat. Alkalmazását az EU tiszta hajtóanyagok használatára vonatkozó ösztönző rendelkezései is szorgalmazzák. Cikkünkben rendszerező áttekintő jelleggel a cseppfolyósított gáz, mint hajtóanyag előállítási technológiáival foglalkoztunk. Megítélésünk szerint e technológiák fejlettsége az elterjedtséget alapvetően meghatározza.

Summary

The liquefied natural gas (LNG) is considered a more environment friendly alternative to traditional fossil fuels. This is due to its high purity. This article provides an overview of the core gas treating and liquefaction technologies utilized in the large scale LNG production processes. Recently, small-scale LNG plants have also appeared. In this scale several biogas purification and liquefaction technologies have been developed. The most important ones were introduced. Liquefied biogas (LBG) is a renewable energy source. Usage of liquefied natural gas (LNG) and liquefied biogas (LBG) as transport fuels constitutes one of the important elements of the EU clean fuel strategy.

Lektorálta: Dr. Tóth László prof. emeritus

Források

- [1] Howell N. (2019): LNG in Europe: Current Trends, the European LNG Landscape and Country Focus. European Union, Global
- [2] Bártfai Z. et al. (2015): LNG lehetőség hazai előállításához rendelkezésre álló technológiák, Pannon - LNG projekt tanulmány 1.9 fejezet, Budapest
- [3] AirLNG Emissions (2016).
- [4] Mark Pillarella, et al. (2012): The C3MR liquefaction cycle: Versatility for a fast growing, ever changing LNG industry Proceedings of the 3rd International gas processing symposium, Catar
- [5] Allegue L. B.-Hinge J. (2012): Overview of biogas technologies for production of liquid transport fuels. Danish Technological Institute.
- [6] Johansson N. (2008): Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology. Lunds University.
- [7] Shell LNG Study (2019), www.shell.de > toptasks.stream > lng-study-uk-18092019-einzelseiten

9. ábra A Scandinavian GtS technológia a biogáz kriogénalapú tisztításának és cseppfolyósításának egy menetben történő megvalósítására [2, 6]

