

MISKOLCI EGYETEM MŰSZAKI FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNYI KAR  
MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője:  
PROF. DR. SZŰCS PÉTER, egyetemi tanár



# **A MAGYAR FÖLDGÁZELLÁTÓ RENDSZER HIDROGÉN BEFOGADÓKÉPESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA**

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

Szerző:

SZOMBATI-GALYAS ANNA BELLA  
okl. olaj- és gázmérnök

Tudományos témavezetők:

PROF. DR. TIHANYI LÁSZLÓ, professor emeritus  
DR. SZUNYOG ISTVÁN, intézetigazgató egyetemi docens

Kutatóhely:

MISKOLCI EGYETEM MŰSZAKI FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNYI KAR  
BÁNYÁSZAT ÉS ENERGIA INTÉZET  
GÁZMÉRNÖKI INTÉZETI TANSZÉK

Miskolc, 2023.

# Tartalomjegyzék

|  |            |
|--|------------|
| <b>Témavezetői ajánlás .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>1 Bevezetés .....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2 Szakirodalmi áttekintés .....</b>   | <b>3</b>   |
| 2.1 A hidrogén előretörésének helyzete az EU-ban .....   | 3          |
| 2.2 Hidrogénprojektek Európában.....   | 4          |
| <b>3 A földgáz hidrogénnel történő helyettesítésének potenciálja Magyarországon.....</b>                         | <b>9</b>   |
| 3.1 A hazai földgázfelhasználás alakulása .....  | 9          |
| 3.2 A kiváltáshoz szükséges hidrogén elméleti mennyisége.....  | 10         |
| 3.3 Magyarország megújuló forrásból megtermelhető elméleti hidrogénpotenciálja ....                              | 12         |
| <b>4 A hidrogén földgázhálózati betáplálásának vizsgálata .....</b>  | <b>15</b>  |
| 4.1 A hidrogén hatása a földgázhálózati gázminőségre.....  | 15         |
| 4.1.1 A hidrogén és a metán tüzeléstechnikai jellemzőinek összehasonlítása.....                                  | 15         |
| 4.1.2 A gázminőségi követelményeknek való megfeleltethetőség vizsgálata.....                                     | 19         |
| 4.1.3 Földgáztüzelésű berendezések hidrogén tűrése .....   | 21         |
| <b>5 Metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavításának vizsgálata.....</b>               | <b>25</b>  |
| 5.1 A hidrogén, a metán és a kereskedelmi minőségű propán gázminőségi jellemzői.                                 | 25         |
| 5.2 A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavításának vizsgálata.....                  | 26         |
| 5.3 A szénhidrogén-harmatpont jelentősége a földgázok esetében .....   | 33         |
| <b>6 A hidrogéntartalom hatása a földgázok víztartalmára vonatkozóan.....</b>                                    | <b>39</b>  |
| 6.1 A vízharmatpont jelentősége a földgázok esetében.....  | 39         |
| 6.2 A víztelítettség változásának vizsgálatához alkalmazott modell bemutatása.....                               | 40         |
| 6.3 A hazai közszolgáltatásban alkalmazott gázminőségek víztelítettség-változásának vizsgálata.....              | 43         |
| <b>7 A hidrogéntartalom hatása a földgázellátó rendszeren átszállítható energiataralomra vonatkozóan .....</b>   | <b>49</b>  |
| 7.1 A csővezetéki gázáramlás viszonyainak leírása .....  | 49         |
| 7.1.1 Az átszállítható energiataralom változására vonatkozó vizsgálat során alkalmazott peremfeltételek .....    | 51         |
| 7.2 A magyar földgázelosztó hálózaton jelentkező konverziós faktor alakulása metán-hidrogén gázelegy esetén..... | 54         |

|   |           |
|---|-----------|
| 7.3 A magyar földgázszállító hálózaton jelentkező konverziós faktor alakulása metán-hidrogén gázelegy esetén.....                     | 58        |
| 7.3.1 A kompresszibilitási tényező alakulása metán-hidrogén gázelegy esetén a gázszállító hálózaton jelentkező nyomástartományon..... | 60        |
| 7.3.2 A konverziós faktor a földgázszállító hálózaton jelentkező nyomás- és hőmérséklet-tartomány esetében.....                       | 63        |
| 7.3.3 Az energiatartalom-változást kifejező konverziós faktor alakulása a földgázszállító hálózaton.....                              | 70        |
| <b>8 Új tudományos eredmények.....</b>  | <b>73</b> |
| <b>9 Gyakorlati hasznosíthatóság.....</b>   | <b>80</b> |
| <b>10 Összefoglalás.....</b>  | <b>81</b> |
| <b>Summary.....</b>   | <b>83</b> |
| <b>11 A szerző témában megjelent publikációi időrendi sorrendben.....</b>   | <b>85</b> |
| <b>12 Irodalomjegyzék.....</b>  | <b>86</b> |

# Témavezetői ajánlás

Szombati-Galyas Anna Bella

A magyar földgázellátó rendszer hidrogén befogadóképességének vizsgálata  
című doktori (PhD) értekezéséhez

Az európai energiahatékonysági és klímastratégiai célok között egyre előkelőbb helyezést ér el a hidrogén, mint a következő időszak egyik lehetséges és támogatandó energiahordozója. Szerepe Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiájában is markánsan megjelenik, kiemelten kezelve a villamosenergia és a földgáz infrastruktúra együttműködésében rejlő szezonális áramtárolási lehetőségeket. A megújuló energiaforrásból, vízbontással előállított hidrogén molekula formában tárolható, melyre a meglévő földgáz infrastruktúra kiváló lehetőséget biztosít. A jelenlegi magyar földgáz infrastruktúra európai viszonylatban is fejlett, országos szinten kiépített, mindenképpen célszerű igénybe venni a hazai hidrogén potenciál szállítására és tárolására. A hidrogén földgázhálózati betáplálása azonban nem ennyire egyszerű feladat, hiszen a földgáztól egy jelentősen eltérő fizikai tulajdonságú gázzal van szó. Energiatartalma harmada a földgázénak, illékonyabb és robbanóképesebb is. Földgázhálózati betáplálása előtt mindenképpen vizsgálandók a rendszerre gyakorolt hatások, beleértve a hálózatban megengedhető földgázminőségi előírások teljesíthetőségét, az átszállítható és tárolható energiatartalom kérdését, és a földgázrendszer anyagaira gyakorolt hatásait. A kérdés komplex, összetett és sok szakterület közös kutatási eredményei alapján vizsgálható.

A Jelölt jelen értekezés keretében a gázminőségi paraméterek teljesíthetőségére, valamint a meglévő földgázinfrastruktúrán átszállítható energiatartalmak vizsgálatára fókuszált. Kiemelten foglalkozott a hidrogén hatására a földgáz víz- és szénhidrogén harmatpontjában bekövetkező változásokkal, és azok magyar földgázminőségi előírásoknak történő megfeleltethetőségével. Kidolgozott egy olyan vizsgálati eljárást, mely a hidrogén miatti csökkenő energiatartalmak kompenzálására szolgáló kereskedelmi propán mennyiségek bekeverési határértékeire ad diagram formájában választ. Az értekezés kiemelt fejezete a hidrogén bekeverése miatt bekövetkező, csővezetéken átszállítható energiatartalom csökkenés mértékének meghatározása, mely a rendszerben lévő nyomások miatt eltérő eljárást követel meg az elosztó- és a szállító vezetékekben. Mindkét rendszerre megtörtént egy-egy eljárás kidolgozása. A téma komplexitása érdekében meghatározásra került

Magyarország teljes, jelenleg beépített megújuló villamosenergia termelésére alapozott elméleti hidrogénpotenciálja is.

A Jelölt kutatómunkájának eredményét hat tézispontban foglalta össze. A PhD értekezés felépítése logikus, követi a kutatómunka egyes fázisait. Az alkalmazott megfogalmazások, értelmezések és következtetések egyértelműek, az értekezés formátuma megfelelő. A kutatás a gyakorlatban is alkalmazható új tudományos eredményeket tartalmaz, melyek jelentősen hozzájárulhatnak a hidrogén hazai földgázrendszerben történő tényleges megjelenéséhez és az ide vonatkozó, még hiányzó hazai műszaki-szabályozási háttér kidolgozásához. A doktori képzés során tanúsított, valamint a kutatásokban elért eredmények egyértelműen bizonyítják a Jelölt magas színvonalú szakmai tudását és az önálló kutatómunkára való alkalmasságát. Kijelenthető, hogy a Jelölt mind az elméleti, mind a gyakorlati tudás kedvező összhangját képes megvalósítani.

Megállapítható, hogy a PhD értekezés hiteles adatokra alapozott új tudományos eredményeket tartalmaz, a dolgozat minden tekintetben megfelel a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola tartalmi és formai követelményeinek. Az értekezés nyilvános vitára bocsátását és Jelölt részére a doktori (PhD) cím odaítélését a témavezetők meggyőződéssel javasolják.

Miskolc, 2023. november 30.

Prof. Dr. Tihanyi László  
professor emeritus  
témavezető

Dr. Szunyog István  
egyetemi docens  
társ-témavezető

## Köszönetnyilvánítás

A legnagyobb hálával tartozom témavezetőmnek, Dr. Szunyog Istvánnak, aki elindított ezen az úton és végig hitt bennem. Végtelen türelmével, precizitásával, kreatív ötleteivel és tudományos észrevételeivel segítette munkámat, amely – úgy gondolom – elengedhetetlen volt ahhoz, hogy ez az értekezés elkészüljön.

Köszönettel tartozom Prof. Dr. Tihanyi Lászlónak, témavezetőmnek, aki megismertette velem a szimulációs modellezés világát. Köszönöm a hosszas szakmai beszélgetéseket, amelyek újabb és újabb kutatási területek irányába vezettek el.

Köszönetemet szeretném kifejezni Dr. Kis Lászlónak, hogy tudományos meglátásaival, tanácsaival segítette a kutatásaimat.

Köszönettel tartozom szüleimnek, testvéreimnek.

Köszönöm a legfontosabbaknak: Atinak, Álmosnak és Apolkának.

## Jelölések

|                   |   |
|-------------------|---|
| $d_b$             | csővezeték belső átmérője [m]   |
| $E_{kev}$         | a gázelegy energiatartalma [kWh/m <sup>3</sup> ]                                      |
| $E_{CH_4}$        | a metán energiatartalma [kWh/m <sup>3</sup> ]   |
| $g$               | nehézségi gyorsulás [ $9,81 \frac{m}{s^2}$ ]  |
| (H <sub>2</sub> ) | hidrogéntartalom [mol%]   |
| $H_{akev}$        | a gázelegy alsó hőértéke [kWh/m <sup>3</sup> ]  |
| $H_{aCH_4}$       | a metán alsó hőértéke [kWh/m <sup>3</sup> ]   |
| KF                | konverziós faktor [-]   |
| L                 | vezetékszakasz hossza [m]   |
| $M_{kev}$         | gázelegy moláris tömege [ $\frac{kg}{kmol}$ ]   |
| $M_{lev}$         | standard összetételű száraz levegő moláris tömege [ $28,9626 \frac{kg}{kmol}$ ]       |
| $p$               | gázelegy nyomása (KF kiszámítására szolgáló egyenletben) [bar(a)]                     |
| $p_n$             | fizikai normálnyomás [101 325 Pa(a)]  |
| $p_1$             | kezdőponti nyomás [Pa(a)] (nyomások esetében: (a) - abszolút nyomás; (t) - túlnyomás) |
| $p_2$             | végponti nyomás [Pa(a)]   |
| $p_{\text{átl}}$  | átlagnyomás [bar(a)]  |
| $q_n$             | fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázáram [ $\frac{nm^3}{s}$ ]                   |
| $q_{n_{kev}}$     | a gázelegy fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázárama [ $\frac{nm^3}{s}$ ]       |
| $q_{n_{CH_4}}$    | a metán fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázárama [ $\frac{nm^3}{s}$ ]          |
| $R_u$             | egyetemes gázállandó [ $8314,510 \frac{J}{kmol \cdot K}$ ]                            |

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $T$                                  | gázelegy hőmérséklete (KF kiszámítására szolgáló egyenletben) [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
| $T_n$                                | fizikai normálhőmérséklet [273,15 K]   |
| $\overline{T}_{\text{kev}}$          | a gázelegy átlagos hőmérséklete [K]  |
| $\overline{T}_{\text{CH}_4}$         | a metán átlagos hőmérséklete [K]   |
| $W_l$                                | alsó Wobbe szám $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right]$                          |
| $W_s$                                | felső Wobbe szám $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right]$                         |
| $z$                                  | gáz kompresszibilitási tényezője [-]   |
| $\overline{z}_{\text{kev}}$          | a gázelegy átlagos kompresszibilitási tényezője [-]                                  |
| $\overline{z}_{\text{CH}_4}$         | a metán átlagos kompresszibilitási tényezője [-]                                     |
| $\alpha, \beta$                      | paraméterek [-]  |
| $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ | hidrogéntartalomtól való függést leíró paraméterek [-]                               |
| $\gamma, \delta, \varepsilon$        | hidrogéntartalmat kifejező paraméterek [-]   |
| $\lambda$                            | csősúrlódási tényező [-]   |
| $\overline{\lambda}_{\text{kev}}$    | a gázelegy esetén jelentkező átlagos súrlódási tényező [-]                           |
| $\overline{\lambda}_{\text{CH}_4}$   | a metán esetén jelentkező átlagos súrlódási tényező [-]                              |
| $\rho$                               | a gáz sűrűsége $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$                           |
| $\rho_{\text{relCH}_4}$              | a metán relatív sűrűsége [-]   |
| $\rho_{\text{relkev}}$               | a gázelegy relatív sűrűsége [-]  |



# 1 Bevezetés

Napjaink egyik legsürgetőbb problémája az éghajlatváltozás megfékezése, amelynek egyik jelentős forrása az energiafelhasználáshoz köthető üvegházhatású gázok (továbbiakban ÜHG) légkörbe jutása. Európai szinten is erősödik az igény egy olyan, megújuló forrásból származó energiahordozóra, amely a hagyományos fosszilis tüzelőanyagok helyettesítésére részben, vagy teljesen alkalmas lehet. A hidrogén erre a célra alkalmasnak ígérkezik. A megújuló forrásból származó hidrogén egyik legnagyobb előnye a jelenleg alkalmazott fosszilis tüzelőanyagokkal szemben, hogy eltűzése során vízgőz keletkezik, ezzel jelentősen csökkentve a légkörbe kerülő CO<sub>2</sub>-kibocsátás mértékét.

A múltban már többször övezte kiugróan magas érdeklődés a hidrogént, mint a jövő energiahordozóját, azonban a felhasználását illetően nem következett be előretörés. Manapság viszont elmondható, hogy a megújuló energia előállítási költségeinek kedvezőbb irányú elmozdulása, a technológia rohamos fejlődése, és a ÜHG gázok kiemelkedő mértékű csökkentésének elérése új lehetőséget teremt.

Az Innovációs- és Technológiai Minisztérium 2020 januárjában megjelent „Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig” című tanulmánya szerint a meglévő földgáz-infrastruktúra „szezonális energiatárolóként” szolgálhat a jövőben. Ez előrevetíti azt a jövőképet, mely szerint a villamos energia- és hőtárolási megoldások egyik alternatívája lehet az energia „molekula formában” történő tárolása, ezáltal hosszabb ideig tárolható és a felmerülő igényekhez igazodva használható fel. A már a piacokon is elérhető power-to-gas (továbbiakban P2G) technológia alkalmazásával fotovoltaiikus úton állítható elő a hidrogén, valamint szén-dioxid segítségével metán, amely így a földgázhálózatba kerülhet közvetlen betáplálásra, kiküszöbölve a napi és akár az éves szezonális kérdéseket (*Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája, 2021*).

Az éghajlatváltozás problémájának megoldása viszont nem ilyen egyszerű. A hidrogén tulajdonságai ugyanis jelentősen eltérnek a közszolgáltatásban alkalmazott földgáz tulajdonságaitól, ezzel komoly kihívás elé állítva a földgázellátó rendszer (beleértve a szállítói, tárolói, elosztói és felhasználói infrastruktúrákat is) üzemeltetőit. Emiatt számos ipari kutatás zajlik jelenleg is arra vonatkozóan, hogy meghatározzák azt a maximális hidrogéntartalmat, amelyet biztonságos üzemeltetési viszonyok mellett képesek tolerálni a földgázhálózatok, valamint a hozzá kapcsolódó gázfelhasználói berendezések.

Jelen munkámban olyan műszaki kérdéseket vizsgáltam meg, amelyek elősegíthetik a hidrogén földgázhálózaton keresztül történő hasznosíthatóságát Magyarországon. Az értekezésben megvizsgáltam a hidrogén magyar gázminőségi előírások által meghatározott paraméterekre gyakorolt hatását. A vízharmatpont, illetve a szénhidrogénharmatpont változásának kérdése a magyar földgázrendszerbe történő betápláláshoz való előkészítés során jelentős, hiszen a hidrogén megjelenése akár a jelenleg alkalmazott technológia módosítását is szükségessé teheti. Megvizsgálom a kereskedelmi minőségű propánnal történő minőségjavítás lehetőségét, amely esetében célom egy olyan diagram létrehozása, amellyel könnyen meghatározható a metán-hidrogén gázelegyhez keverhető propán mennyiség, megfelelően a hazai gázminőségi követelményeknek.

Emellett jelentős kérdésként vetődik fel, hogy a hidrogén földgázhoz való bekeverése milyen mértékben módosítja a gázvezetéken átvihető energiatartalmat, melynek számszerűsítésére egy egyenletet dolgoztam ki az elosztó-, valamint a szállítóhálózatra vonatkozóan, állandó nyomásvesztéséget feltételezve. A vizsgált téma komplexitása érdekében célkitűzésem volt továbbá meghatározni a villamosenergiából megújuló alapon termelt hidrogénpotenciált Magyarországon, a rendelkezésre álló kapacitás források alapján. A bemutatott eredmények hozzájárulhatnak a hidrogén hazai földgázhálózati műszaki-szabályozási háttérének kidolgozásához is.

## 2 Szakirodalmi áttekintés

### 2.1 A hidrogén előretörésének helyzete az EU-ban

A hidrogént övező egyre nagyobb érdeklődést támasztja alá a 2018 novemberében megjelent "Tiszta bolygót mindenkinek" c. kiadvány, amely az EU klímasemleges stratégiai jövőképét tartalmazza, mely szerint a hidrogén jelenlegi kevesebb mint 2 %-os részaránya 2050-re 14 %-ra növekszik az európai energiamixen belül. A tiszta hidrogén előretörése hozzásegítheti az EU-t azon céljának eléréséhez, mely szerint 2030-ra legalább 40 %-kal csökkenti az ÜHG kibocsátást az 1990-es szinthez képest (*Kougias és tsai., 2021; Amanatidis, 2022*).

A hidrogén energetikai célú alkalmazását a 2020-ban megjelent Nemzeti Energia- és Klímaterv (röviden NEKT) is hangsúlyosan a földgázhálózati bekeverésben látja, ami kiterjed a gáztárolás lehetőségeinek vizsgálatára is. A NEKT előtérbe helyezi az „alternatív gázforrások” (biogáz, biometán és hidrogén) felhasználásának ösztönzését, amelyek alkalmasak a földgázfogyasztás mérséklésére. A klímaterv így fogalmaz: „A dekarbonizációs célok eléréséhez megvizsgáljuk a földgáztárolói kapacitások egy részének hidrogéntárolásra való átalakításának lehetőségét is. ... Ezért célunk a hidrogén és egyéb „földgáz minőségű gázok” rendszerbe juttatásához szükséges feltételek és ösztönzők megteremtése”.

Hosszas várakozás után 2020 júliusában jelent meg az Európai Bizottság "Hidrogénstratégia a klímasemleges Európáért" c. közleménye, amely kiemeli a hidrogén kulcsfontosságú prioritását az EU 2050-ig tervezett dekarbonizációs céljainak elérésében. A hidrogén a jövőben várhatóan jelentős szerepet kap azon hiányosságok áthidalásában, amelyet jelenleg a megújuló energia tárolása jelent. Amellett, hogy az ÜHG kibocsátás mértékét csökkenti, a felmerülő energiaigények szezonális ingadozásának kiegyenlítésére is alkalmas. A közlemény szerint az egyes ágazatok dekarbonizációjának megoldása a hidrogén lehet, amely keretében 2024-ig legalább 6 GW, 2030-ig pedig 40 GW megújuló forrásból származó hidrogén előállítására alkalmas elektrolizátort telepítenek az Unió területén.

A 2021-ben megjelent Nemzeti Hidrogénstratégia a meglévő földgázinfrastruktúra szerepét is kiemeli a hazai hidrogéngazdaság fejlődésében. A stratégia úgy fogalmaz, hogy „belátható időn belül” megjelenik a hidrogén a földgázhálózatban, emiatt részletesen meg kell vizsgálni és fokozatosan fel kell készíteni a földgázellátó rendszert a tiszta hidrogén befogadására. A 2030-ig kitűzött kiemelt célok között említi, hogy évi min. 2 V/V% hidrogén részarány

bekeverést kell elérni a földgázrendszerben, majd azt a vizsgálati eredmények alapján fokozatosan növelni szükséges.

A 2021-ben „Fit for 55” címmel megjelent európai klímarendelet jogi kötelezettséggé teszi az EU azon klímacéljának elérését, hogy 2030-ig legalább 55 %-kal csökkentse az uniós kibocsátásokat. Ennek érdekében az uniós országok új jogszabályokon dolgoznak, hogy elérjék ezt a célt, és 2050-re klímasemlegessé tegyék az EU-t (*Európai Tanács, 2021*). A rendelet kiemelten foglalkozik a meglévő földgázinfrastruktúra hidrogén közeg befogadására alkalmassá tételével, a hidrogén földgázzal való keverésével, a kereskedelmi és jogalkotási rendszerrel, valamint a fogyasztók biztonságos ellátásával (*Marcu és tsai, 2021*). Az irányelv- és rendelet-tervezetek még kidolgozás alatt állnak.

## 2.2 Hidrogénprojektek Európában

A hidrogén betáplálás során a már meglévő földgázhálózat alkalmazása számos előnnyel jár, melyek közül a legjelentősebb, hogy elkerülhető az új infrastruktúra kiépítése, amely jelentősen csökkenti a beruházási költségeket. A klímasemlegesség elérése érdekében számos nemzetközi hidrogén-projekt indult az elmúlt években, vizsgálva a hidrogén előállításának, szállításának, elosztásának a lehetőségét, valamint a jelenleg üzemelő gázfogyasztó készülékek hidrogéntűrését. A hidrogén földgázhálózati betáplálásának vizsgálata során minden kutatás egyetért abban, hogy az üzemelő földgázhálózat alkalmas a hidrogén kismértékű befogadására, viszont számos kritikus kérdés jelentkezik a témában a hidrogén anyagminőségre és energetikai kérdésekre gyakorolt hatásai következtében (*Scott és tsai, 2019; Liemberger és tsai, 2019; Quintino és tsai, 2021*).

A hidrogén földgázhálózati bekeverhetőségének megengedett részarányát a világon számos helyen vizsgálják, meghatározva azt a mennyiséget, amelyet bekeverve, a földgázellátó rendszer biztonságosan üzemeltethető. A 2.1. táblázat a legjelentősebb európai földgázhálózati hidrogén betáplálási projekteket foglalja össze.

A Nagy-Britanniában zajlott HyDeploy pilot projekt célja a maximális hidrogén bekeverési arány meghatározása volt, amely biztonságosan betáplálható a földgázhálózatba anélkül, hogy a fogyasztói berendezéseket át kellene alakítani. Teszteléseik alapján 20 V/V%-os hidrogén bekeverési arányt sikerült elérni (*Wulf és tsai, 2018; Blokland és tsai, 2021; Ozturk és tsai, 2021*).

A szintén brit H21 Leeds City Gate projekt fő célja az országos szintű hidrogén átállás megvalósíthatóságának, és gazdasági megtérülésének alátámasztása volt, valamint technikai és gazdasági szempontból egyaránt megvizsgálni a Leedsben található földgázhálózat 100 V/V%-os hidrogén átalakításának kivitelezhetőségét. Az eddigi tesztek alapján a PE csőanyagot találták a hidrogén számára legmegfelelőbbnek az elosztóhálózaton (*H21 projekt jelentés, 2017; Haugen és tsai, 2021; Gaykema és tsai, 2021*).

A francia GRHYD projekt célja volt meghatározni azt az elosztóhálózatba maximálisan bekeverhető hidrogén részarányt, amely a hozzá kapcsolódó gázfogyasztó készülékek átalakítása nélkül kivitelezhető. Az eddigi tesztelések során max. 20 V/V% hidrogén bekeverési arányt sikerült elérni (*Quarton és tsai, 2018; IRENA, 2019*).

A kb. 40 európai partnerből álló HIPS-NET projekt célja a meglévő földgázhálózat hidrogén toleranciájának meghatározása volt. A projekt 2018-ban zárult, mely alapján iparági egységes álláspont szerint 10 V/V%-ban határozta meg a földgázhálózatba keverhető maximális hidrogénarányt az elosztóhálózati elemek, fogyasztói készülékek átalakítása nélkül (*GERG, 2013; Leicher és tsai, 2017*). *Megjegyzésként említendő, hogy az értekezésben szereplő ábrák és táblázatok címében – amelyek nem a kutatási eredményeim alapján kerültek szerkesztésre - minden esetben feltüntetésre került a felhasznált szakirodalmi forrás.*

**2.1. táblázat** A legjelentősebb hidrogénprojektek Európában (*Devinder és tsai, 2022*)

| Projekt neve             | Ország             | Év   | Hidrogén részarány [V/V%] | Projekt mérettartománya                   |
|--------------------------|--------------------|------|---------------------------|---|
| HyDeploy                 | Egyesült Királyság | 2019 | 20                        | 1500 db háztartás                         |
| East Neuk Power          | Egyesült Királyság | 2020 | 20                        | 15 GWh/év                                 |
| Aberdeen Vision          | Egyesült Királyság | 2020 | 2-20                      | 300 db háztartás                          |
| HyNet Northwest          | Egyesült Királyság | 2021 | 100                       | 30 TWh/év                                 |
| HyNTS Hydrogen Flow Loop | Egyesült Királyság | 2021 | 30                        | -   |
| H21                      | Egyesült Királyság | 2018 | 100                       | 6,4 TWh/év                                |
| Hy4Heat                  | Egyesült Királyság | 2018 | 100                       | -   |
| HySpirit                 | Egyesült Királyság | 2019 | 100                       | -   |
| Zero 2050 South Wale     | Egyesült Királyság | 2020 | 100                       | -   |
| Decarbonisation Pathway  | Egyesült Királyság | 2020 | 100                       | -   |
| GRHYD                    | Franciaország      | 2014 | 20                        | 200 db háztartás                          |
| THyGA                    | EU                 | 2019 | 10-100                    | 100 db háztartás és kereskedelmi ingatlan |
| WindGas Falkenhagen      | Németország        | 2013 | 2                         | -   |
| WindGas Hamburg          | Németország        | 2015 | 2                         | -   |

*Megjegyzés: A táblázatban feltüntetett évszám a projekt kezdetének időpontját jelöli.*

A H2HoWi projekt azt vizsgálja, hogy technikailag lehetséges-e egy földgázvezeték tiszta hidrogén elosztásra való átalakítása. A kivitelezés 2020 őszén indult, a tesztelés várhatóan 2023 végéig fog tartani (*IEA, 2021*).

A holland NATURALHY projekt keretében azt vizsgálták, hogy mekkora az a maximális hidrogén aránnyal kevert földgáz, amely még alkalmas a meglévő végfelhasználói berendezések biztonságos üzemeltetésére a berendezések módosítása nélkül, illetve vizsgálják a tiszta hidrogén szállításának, elosztásának lehetőségeit. A projekt során végzett tesztelések alapján a maximálisan megengedhető hidrogén részarány 20 VV% (*Shirvill és tsai, 2018*).

Láthatóan az eddigi kutatások főként az elosztóhálózati hidrogénbetáplálás feltételeit vizsgálták. A 2020-ban indult HIGGS projekt a hidrogén nagy nyomású földgázszállító hálózatra gyakorolt hatásainak elemzését tűzte ki célul. A projekt célkitűzése magába foglalja a műszaki, jogi és szabályozási akadályok és lehetőségek feltérképezését, a műszaki-gazdasági modellezést, valamint a rendszer tesztelését és validálását. Az eredmények 2023 decemberében várhatóak (*HIGGS projekt jelentés*).

A THyGa projekt a hidrogén gázfogyasztó készülékekre gyakorolt hatásait vizsgálta. Eddigi eredményei alapján elmondható, hogy a hidrogén földgázhálózati megjelenése csökkenti a károsanyag-kibocsátást, viszont a tüzeléstechnikai jellemzők a hidrogén megjelenésével kedvezőtlenebb mértékben alakulnak, mint tiszta földgáz tüzelőanyag esetében. A 2023-ban zárult projekt során vizsgálatokat végeztek 40% H<sub>2</sub> - 60% CH<sub>4</sub> gázeleggyel kisnyomáson (35 mbar), mely szerint 200 óra után sem jelentkezett szivárgás a gázvezetéken, annak mértéke minden esetben az érvényben lévő szabvány szerinti megengedett értékek alatt maradt. Ezen felül tömítetlenséget vagy anyagminőségbeli változást sem detektáltak (*THyGA projekt jelentés, 2022*).

Számos kutatás foglalkozik a jelenlegi földgázhálózat csővezetékeinek hidrogéntűrésével. Az eddigi eredmények alapján a PE csőanyag alkalmasabbnak bizonyul a hidrogéntartalom jelenlétére, míg az acél csővezeték szilárdsági tulajdonságai romlanak (*Dmytrakh és tsai, 2017; Sun és tsai, 2021*). Jelen értekezés ezen kérdéskör további vizsgálatával nem foglalkozik.

Számos kutatás foglalkozik a hidrogén földgázhálózati betáplálásának hatásaival, szimulációs modellezésével. Jelentős kérdés, hogy a hidrogén földgázhálózati megjelenése milyen, a csővezetékben áramló tüzelőanyagra vonatkozó energetikai változásokat okoz, melyet már számos szerző vizsgálat alá vont a földgázellátó hálózatba történő betáplálás során jelentkező megoldandó kérdéseket elemezve. Kutatásaik alapján mindannyian arra a következtetésre jutottak, hogy a hidrogén földgázhálózati megjelenése rontja a

tüzeléstechnikai jellemzőket, emiatt a tervezés során ezt a kérdést kiemelten kell kezelni (Tabkhi és tsai, 2008; Di Lullo és tsai, 2021; Abd és tsai, 2021).

Mazza és tsai. egy reprezentatív városi földgázhálózatot hoztak létre annak érdekében, hogy megvizsgálják a villamosenergia-hálózathoz való csatlakozás megvalósíthatóságát egy P2G rendszeren keresztül a teljesítmény, valamint a gázminőség alapján értékelve a rendszert.

Guandalini és tsai. egy gázvezeték szakaszra vonatkozó modellt dolgoztak ki nem állandósult állapotot feltételezve, hogy elemezzék a hidrogén földgázhálózati betáplálásának dinamikai hatásait. Vizsgálataik során összehasonlítást végeztek egy földgázzal, majd hidrogénnel kevert földgázzal üzemelő vezeték szakasz esetében. Az elemzés során rámutattak a tüzeléstechnikai jellemzők változására, mint kiemelt értékelési szempont, valamint kimutatták, hogy a bekeverhető hidrogén részarány jelentősen korlátozott, melynek egyik oka a rendszer végpontján helyet foglaló gázkészülékek.

Chaczykowski és tsai. megújuló gázok (biometán és hidrogén), valamint a földgázkeverékek összetételének nyomonkövetésének lehetőségét vizsgálták, mely során különböző matematikai módszereken alapuló modellezést hajtottak végre. A módszereket egy lengyel gázvezeték és egy norvég tengeri szállítóvezeték esetében alkalmazták, az eredmények jól mért összetételt és 2 % hibán belüli szállítási időt mutattak.

Abeysekera és tsai. egy elméleti kisnyomású gázhálózatot vizsgáltak hidrogén és biometán bekeverés esetén. Az állandósult állapotot feltételező modell két megközelítést mutat be: a gázfogyasztók által igényelt gáztérfogatáramok figyelembevétele, valamint a fogyasztók energiaigényének követése, és szükség esetén a térfogatáram növelése. Az eredményeik azt mutatták, hogy a megújuló gázok jelentősen befolyásolják a gázminőséget, valamint az áramló közeg dinamikáját, különös tekintettel az áramlási sebességre és a nyomásra, viszont megfelelően szabályozva csökkentheti az importfüggőséget, valamint segítheti a villamoshálózat működését.

Cheli és tsai. egy reprezentatív városi gázhálózatot szimuláltak ipari és lakossági fogyasztókkal, valamint egy kapcsolódó P2G rendszerrel, amelyre egy állandósult állapotbeli modellt dolgoztak ki. Eredményeik alapján a bekevert hidrogén a Wobbe-szám jelentős csökkenését idézi elő. Egy algoritmust dolgoztak ki az egyes csomópontokban jelentkező nyomásvesztés és áramlási sebesség előrejelzésére.

Pellegrini és tsai. előzetes tanulmányt készítettek az olaszországi földgázhálózatba bekevert 10 V/V% hidrogéntartalom hatásairól. A szerzők szerint az olasz gázhálózat már jelenleg is

kb. 715 000 nm<sup>3</sup>/év megújuló alapon termelt hidrogén befogadására alkalmas, amihez a szükséges beépített elektrolizátor kapacitás megközelítőleg 78 MW. Emellett egy olyan nem-izotermikus, állandósult állapotra vonatkozó modellt fejlesztettek ki, amellyel szimulálható a megújuló gázok földgázhálózati betáplálása.

Hafsi és tsai. tranziens hidrogén-földgáz gázelegy áramlásának numerikus szimulációját tanulmányozta hurkolt hálózatban egy olyan matematikai modell alapján, amely figyelembe veszi a gázelegy kompresszibilitási tényezőjének változását a nyomás szerint, izoterm körülmények között.

Kutatások folynak a gázfogyasztó készülékek maximális hidrogéntűrésének meghatározásával kapcsolatban. Melaina és tsai. 5-15 V/V% max. megengedhető H<sub>2</sub>-tartalmat határoztak meg, melynek pontosításához az egyes készüléktípusok esetében eseti alapú vizsgálat szükséges. Altfeld és Pinchbeck eredményei is hasonlóak, vélhetően 5-10 V/V% H<sub>2</sub>-tartalom mellett nem szükséges az előkeveréses égőjű gázfogyasztó készülékek módosítása. Az EN 16726:2015+A1:2018 Gázinfrastruktúra. Gázminőség. H gázcsoport szabvány „E” melléklete kimondja, hogy „Jelenleg nincs lehetőség egy olyan hidrogén határérték meghatározására, amely általánosan elfogadható a gázinfrastruktúra minden egyes részén, ennek következtében eseti alapú vizsgálat ajánlott.” A melléklet arra is utal, hogy egyes kutatások akár a 10 V/V% hidrogén koncentrációt is lehetségesnek tartják a földgázellátó rendszer egyes részeiben, de például a földgázzal működő gépjárművek acél tartályai esetében 2 V/V%, a gázturbináknál 1 V/V%, a gázmotoroknál 2 V/V% a megengedhető érték a berendezések átszabályozása nélkül. A maximálisan megengedhető hidrogéntartalom szempontjából kritikus pontként jelentkezik a gázfogyasztó készülékek hidrogéntűrése. Az értekezés a későbbiekben érintőlegesen foglalkozik a hidrogén gázfogyasztó készülékekre gyakorolt hatásaival a probléma pontos körülhatárolása miatt, viszont nem képezi fő témáját a kutatásaimnak.

Láthatóan a földgázhálózatba betáplálható hidrogéntartalom maximális mértékének meghatározása jelenleg is számos kutatás témáját képezi, és a pontos eredmények már körvonalazódni látszanak. Az is egyértelműen látszik, hogy a földgázhálózatba keverhető hidrogén részarányának meghatározásakor két alapvető szempontot kell előtérbe helyezni: a meglévő földgázhálózati infrastruktúra elemeinek, valamint a rendszer végén elhelyezkedő földgázfelhasználó berendezések hidrogén tűrését.



### 3 A földgáz hidrogénnel történő helyettesítésének potenciálja Magyarországon

Annak érdekében, hogy egy átfogó képet lehessen alkotni a hidrogén-termelés lehetőségének jelenlegi helyzetéről Magyarországon, elengedhetetlen, hogy elemzésre kerüljön a jelenleg rendelkezésre álló hazai hidrogénpotenciál mértéke, amely a földgázfelhasználás bizonyos mértékű kiváltására lehet alkalmas.

#### 3.1 A hazai földgázfelhasználás alakulása

Az alábbi fejezetben a hazai földgázfelhasználás hidrogénnel való helyettesítésének potenciálja került vizsgálatra a 2022. év végi statisztikai adatok alapján. A Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (továbbiakban MEKH) által közzétett statisztikai adatok alapján a 3.1. táblázat térfogategységben kifejezve mutatja be az elmúlt 6 év vonatkozásában a földgázkereskedők és az egyetemes szolgáltatók által a végfelhasználóknak átadott éves földgáz mennyiségeket ezer m<sup>3</sup> mértékegységben a földgáz átlagos éves felső hőértékére (GCV) vonatkoztatva, 15/15 °C égési és mérési referenciaállapotban.

**3.1. táblázat** A végfelhasználóknak átadott éves földgázmennyiségek 2017-2022 közötti időszakban (MEKH, 2022)

| Földgáz kereskedők és egyetemes szolgáltatók felhasználóknak történő FÖLDGÁZ értékesítése |  |   |                                  |                         |  |  |   |  |   |  |  |
|---|--|---|----------------------------------|-------------------------|--|--|---|--|---|--|--|
| Év  | Átlagos felső hőérték <sup>1)</sup> (GCV) kWh/m <sup>3</sup> | Mértékegység: em <sup>3</sup> (15 °C)           |                                  |                         |  |  |   |  |   |  |  |
|   |  | Belföldi Értékesítés Felhasználóknak FÖLDGÁZBÓL | ebből:                           |                         |  | Nem lakossági felhasználóknak összesen | ebből:                                    |  |   |  |  |
|   |  |   | Lakossági fogyasztóknak összesen | Mérő nélküli fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti fogyasztók |  | 20 m <sup>3</sup> /óra feletti fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti felhasználók | 20-100 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 101-500 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 500 m <sup>3</sup> /óra feletti felhasználók |
| 2017  | 10,525   | <b>9 053 522</b>                                | 3 624 488                        | 64 978                  | 3 406 599                                | 152 912                                | 5 429 033                                 | 534 213                                    | 552 990   | 774 854  | 3 566 976                                    |
| 2018  | 10,559   | <b>8 517 508</b>                                | 3 355 631                        | 60 546                  | 3 157 345                                | 137 740                                | 5 161 877                                 | 578 716                                    | 530 113   | 716 059  | 3 336 990                                    |
| 2019  | 10,613   | <b>8 700 951</b>                                | 3 355 950                        | 60 119                  | 3 160 046                                | 135 785                                | 5 345 001                                 | 525 654                                    | 509 978   | 713 780  | 3 595 590                                    |
| 2020  | 10,608   | <b>8 871 286</b>                                | 3 598 162                        | 60 918                  | 3 391 710                                | 145 535                                | 5 273 124                                 | 539 657                                    | 527 755   | 718 889  | 3 486 824                                    |
| 2021  | 10,672   | <b>9 667 239</b>                                | 4 029 334                        | 57 852                  | 3 814 025                                | 157 457                                | 5 637 905                                 | 547 966                                    | 482 032   | 715 361  | 3 892 546                                    |
| 2022  | 10,694   | <b>8 123 138</b>                                | 3 455 885                        | 62 863                  | 3 251 510                                | 141 512                                | 4 667 253                                 | 430 645                                    | 388 611   | 576 128  | 3 271 870                                    |

*Megjegyzés: Az adatok a földgáz-kereskedelmi és földgáz egyetemes szolgáltatók havi jelentésein alapulnak.*

<sup>1)</sup>Az éves átlagos felső hőértékek a MEKH energiatartalomra (MWh) és térfogategységre (em<sup>3</sup>) vonatkoztatott statisztikai adatai alapján kerültek kiszámításra.

A fenti táblázat adatai alapján megállapítható, hogy a vizsgált időszakban a felhasználóknak átadott földgáz mennyisége 8,1·10<sup>9</sup> és 9,7·10<sup>9</sup> nm<sup>3</sup> között változott. A nem lakossági célú felhasználók között láthatóan a legtöbb mennyiség az 500 m<sup>3</sup>/h feletti ipari, illetve erőműi fogyasztóknál került értékesítésre.

A 3.2. táblázat szintén a vizsgált időszakban a földgázkereskedők és az egyetemes szolgáltatók által a végfelhasználóknak átadott éves földgáz mennyiségeket mutatja be MWh mértékegységben kifejezve a földgáz átlagos éves felső hőértékére (GCV) vonatkoztatva,

15/15 °C égési és mérési referenciaállapotban. A táblázat adatai alapján megállapítható, hogy a vizsgált időszakban a felhasználóknak átadott földgáz energiatartalma 86,9 és 103,2 TWh között változott.

### 3.2. táblázat A végfelhasználóknak átadott éves földgázmennyiségek energiatartalma 2017-2022 közötti időszakban (MEKH, 2022)

| Földgáz kereskedők és egyetemes szolgáltatók felhasználói történő FÖLDGÁZ értékesítése |  |   |                                  |                         |  |   |  |  |   |  |  |
|--|--|---|----------------------------------|-------------------------|--|---|--|--|---|--|--|
| Év   | Átlagos felső hőérték <sup>1)</sup> (GCV) kWh/m <sup>3</sup> | Belföldi értékesítés felhasználóknak FÖLDGÁZBÓL | Mértékegység: MWh (GCV)          |                         |  |   |  |  |   |  |  |
|  |  |   | ebből:                           |                         |  |   | Nem lakossági felhasználóknak összesen | ebből:                                     |   |  |  |
|  |  |   | Lakossági fogyasztóknak összesen | Mérő nélküli fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra feletti fogyasztók |  | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti felhasználók | 20-100 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 101-500 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 500 m <sup>3</sup> /óra feletti felhasználók |
| 2017   | 10,525   | <b>95 290 321</b>                               | 38 289 632                       | 690 053                 | 35 971 047                               | 1 628 531                                 | 57 000 690                             | 5 621 728                                  | 5 748 642                                       | 8 061 401  | 37 568 918                                   |
| 2018   | 10,559   | <b>89 933 486</b>                               | 35 724 762                       | 643 723                 | 33 611 723                               | 1 469 316                                 | 54 208 724                             | 6 072 737                                  | 5 500 316                                       | 7 432 287  | 35 203 384                                   |
| 2019   | 10,613   | <b>92 344 405</b>                               | 35 826 349                       | 642 648                 | 33 730 651                               | 1 453 050                                 | 56 518 056                             | 5 549 360                                  | 5 347 389                                       | 7 441 060  | 38 180 247                                   |
| 2020   | 10,608   | <b>94 102 769</b>                               | 38 417 875                       | 650 352                 | 36 209 560                               | 1 557 963                                 | 55 684 894                             | 5 749 595                                  | 5 578 253                                       | 7 611 395  | 36 745 651                                   |
| 2021   | 10,672   | <b>103 171 634</b>                              | 43 003 040                       | 617 698                 | 40 700 196                               | 1 685 146                                 | 60 168 594                             | 5 844 375                                  | 5 110 940                                       | 7 611 579  | 41 601 700                                   |
| 2022   | 10,694   | <b>86 867 830</b>                               | 36 908 957                       | 673 854                 | 34 716 361                               | 1 518 742                                 | 49 958 873                             | 4 603 487                                  | 4 137 668                                       | 6 154 525  | 35 063 194                                   |

Megjegyzés: Az adatok a földgáz-kereskedelmi és földgáz egyetemes szolgáltatók havi jelentéseinek alapulnak.

<sup>1)</sup>Az éves átlagos felső hőértékek a MEKH energiatartalomra (MWh) és térfogategységre (em<sup>3</sup>) vonatkoztatott statisztikai adatai alapján kerültek kiszámításra.

### 3.2 A kiváltáshoz szükséges hidrogén elméleti mennyisége

A következőkben vizsgálatra kerül, hogy az előzőleg bemutatott földgázmennyiségek meghatározott mértékű kiváltásához mekkora elméleti hidrogénmennyiség lenne szükséges. A vizsgálat során nem került figyelembevételre, hogy a földgázszállító rendszer elemei nem a közel nyolcszor kisebb sűrűségű hidrogénre vannak tervezve és méretezve, illetve az sem, hogy a hidrogénnek milyen, még nem ismert hatása lehet a rendszer anyagaira. Emellett a hidrogén molekulaméretéből adódó szivárgási kockázatot és a földgázhoz (~4,4-15,5 V/V%) képest kiszélesedő gyulladási koncentráció tartományt (~4,0-77,0 V/V%) is kiemelten kell kezelni (Cerbe, 2007).

A 3.3. táblázat mutatja az előzőekben megadott évekre vonatkozóan a belföldön felhasznált teljes földgázmennyiségek kiváltásához szükséges hidrogén mennyiségét ezer m<sup>3</sup> mértékegységben a hidrogén átlagos felső hőértékére (GCV) vonatkoztatva, 15/15 °C égési és mérési referenciaállapotban.

A táblázat alapján látható, hogy az éves hazai felhasznált földgázmennyiségek energiatartalmának teljes mértékben hidrogénnel történő kiváltása 26,7·10<sup>9</sup>-30,7·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> hidrogén előállításával lett volna megoldható 2017-2022 között. Amennyiben kisebb hidrogén hányadot alkalmazunk, értelemszerűen ezeknek az értékeknek a százalékos arányát kell vennünk, ahogyan azt a 3.4. táblázat adatai is szemléltetik 20 %-os kiváltás esetén.

### 3.3. táblázat A végfelhasználóknak átadott éves földgázmennyiségek kiváltásához szükséges elméleti hidrogénmennyiség 2017-2022 közötti időszakban

| A felhasználóknak átadott földgázmennyiség 100%-os kiváltásához szükséges HIDROGÉN mennyisége |   |   |                                  |                         |  |  |   |  |   |  |  |
|---|---|---|----------------------------------|-------------------------|--|--|---|--|---|--|--|
| Év  | A hidrogén felső hőértéke (GCV) (15/15 °C) <sup>2)</sup> kWh/m <sup>3</sup> | Mértékegység: em <sup>3</sup> (15 °C)                 |                                  |                         |  |  |   |  |   |  |  |
|   |   | Belföldi Értékesítés Felhasználóknak HIDROGÉNBŐL 100% | ebből:                           |                         |  | Nem lakossági felhasználóknak összesen | ebből:                                    |  |   |  |  |
|   |   |   | Lakossági fogyasztóknak összesen | Mérő nélküli fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti fogyasztók |  | 20 m <sup>3</sup> /óra feletti fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti felhasználók | 20-100 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 101-500 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 500 m <sup>3</sup> /óra feletti felhasználók |
| 2017  | 3,362   | <b>28 343 344</b>                                     | 11 346 978                       | 203 422                 | 10 664 844                               | 478 712                                | 16 996 365                                | 1 672 430                                  | 1 731 213                                       | 2 425 793  | 11 166 929                                   |
| 2018  | 3,362   | <b>26 749 996</b>                                     | 10 538 658                       | 190 149                 | 9 915 925                                | 432 585                                | 16 211 337                                | 1 817 509                                  | 1 664 868                                       | 2 248 846  | 10 480 114                                   |
| 2019  | 3,362   | <b>27 467 104</b>                                     | 10 594 039                       | 189 783                 | 9 975 611                                | 428 645                                | 16 873 065                                | 1 659 380                                  | 1 609 894                                       | 2 253 255  | 11 350 536                                   |
| 2020  | 3,362   | <b>27 990 116</b>                                     | 11 352 691                       | 192 203                 | 10 701 306                               | 459 182                                | 16 637 424                                | 1 702 691                                  | 1 665 138                                       | 2 268 192  | 11 001 403                                   |
| 2021  | 3,362   | <b>30 687 577</b>                                     | 12 790 674                       | 183 644                 | 12 107 200                               | 499 830                                | 17 896 903                                | 1 739 457                                  | 1 530 157                                       | 2 270 833  | 12 356 456                                   |
| 2022  | 3,362   | <b>25 838 141</b>                                     | 10 992 525                       | 199 955                 | 10 342 429                               | 450 122                                | 14 845 636                                | 1 369 797                                  | 1 236 095                                       | 1 832 551  | 10 407 191                                   |

<sup>2)</sup>MSZ ISO 6976:1997 5. táblázata alapján

A következő táblázat adatai alapján láthatóvá válik, hogy a felhasznált földgázmennyiség energiatartalmának 20 %-os kiváltásához még mindig jelentős,  $5,2 \cdot 10^9$ - $6,1 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> hidrogéntermelés lenne szükséges a megfelelő mértékű helyettesíthetőség eléréséhez.

### 3.4. táblázat A végfelhasználóknak átadott éves földgázmennyiségek 20 %-os kiváltásához szükséges elméleti hidrogénmennyiség 2017-2022 közötti időszakban

| A felhasználóknak átadott földgázmennyiség 20%-os kiváltásához szükséges HIDROGÉN mennyisége |  |  |                                  |                         |  |  |   |  |   |  |  |
|--|--|--|----------------------------------|-------------------------|--|--|---|--|---|--|--|
| Év   | A hidrogén felső hőértéke (GCV) (15/15 °C) <sup>2)</sup> MJ/m <sup>3</sup> | Mértékegység: em <sup>3</sup> (15 °C)                |                                  |                         |  |  |   |  |   |  |  |
|  |  | Belföldi Értékesítés Felhasználóknak HIDROGÉNBŐL 20% | ebből:                           |                         |  | Nem lakossági felhasználóknak összesen | ebből:                                    |  |   |  |  |
|  |  |  | Lakossági fogyasztóknak összesen | Mérő nélküli fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti fogyasztók |  | 20 m <sup>3</sup> /óra feletti fogyasztók | 20 m <sup>3</sup> /óra alatti felhasználók | 20-100 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 101-500 m <sup>3</sup> /óra közötti felhasználók | 500 m <sup>3</sup> /óra feletti felhasználók |
| 2017   | 3,362  | <b>5 668 669</b>                                     | 2 269 396                        | 40 684                  | 2 132 969                                | 95 742                                 | 3 399 273                                 | 334 486                                    | 346 243   | 485 159  | 2 233 386                                    |
| 2018   | 3,362  | <b>5 349 999</b>                                     | 2 107 732                        | 38 030                  | 1 983 185                                | 86 517                                 | 3 242 267                                 | 363 502                                    | 332 974   | 449 769  | 2 096 023                                    |
| 2019   | 3,362  | <b>5 493 421</b>                                     | 2 118 808                        | 37 957                  | 1 995 122                                | 85 729                                 | 3 374 613                                 | 331 876                                    | 321 979   | 450 651  | 2 270 107                                    |
| 2020   | 3,362  | <b>5 598 023</b>                                     | 2 270 538                        | 38 441                  | 2 140 261                                | 91 836                                 | 3 327 485                                 | 340 538                                    | 333 028   | 453 638  | 2 200 281                                    |
| 2021   | 3,362  | <b>6 137 515</b>                                     | 2 558 135                        | 36 729                  | 2 421 440                                | 99 966                                 | 3 579 381                                 | 347 891                                    | 306 031   | 454 167  | 2 471 291                                    |
| 2022   | 3,362  | <b>5 167 628</b>                                     | 2 198 501                        | 39 991                  | 2 068 486                                | 90 024                                 | 2 969 127                                 | 273 959                                    | 247 219   | 366 510  | 2 081 438                                    |

<sup>2)</sup>MSZ ISO 6976:1997 5. táblázata alapján

Kérdésként vetődik fel, hogy a jelenlegi magyar földgázrendszer képes-e ekkora hidrogén mennyiségek befogadására, tárolására és továbbítására, főként, ha a teljes földgázfelhasználás kiváltásához szükséges, megközelítőleg  $27 \cdot 10^9$ - $31 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> mennyiséget vesszük alapul. A mai magyar földgázrendszer éves szinten nagyságrendileg  $14 \cdot 10^9$ - $16 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> földgáz szállítását oldja meg az országon keresztül szállított tranzit mennyiségekkel együtt (MEKH, 2022). A magyar földgázszállító hálózat max. betáplálási kapacitása, figyelembe véve a stratégiai célú földalatti gáztárolót, megközelítőleg évi  $61 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> (MEKH, 2021). Ennek következtében elmondható, hogy az elméleti hidrogén mennyiség szállítását fedezni képes kapacitással rendelkezik a magyar földgázrendszer. Természetesen a kérdés nem egyszerűsíthető le ennyire, hiszen a jelenlegi szállítóvezetési nyomások, illetve megengedett áramlási sebességek emelése további kapacitás növelést eredményezhet, de korlátként ott fognak állni a rendszer műszaki paraméterei. A kérdést meg is lehetne fordítani: mikor fog

Magyarországon rendelkezésre állni az elméleti vizsgálatok során kapott hidrogén mennyiség?

A hazai földalatti gáztároló kapacitás jelenleg  $6,3 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> (MEKH, 2022). Napjainkban is folynak kutatások abban az irányban, hogy milyen hatással lehet a hidrogén a tároló szerkezetére, a felszíni és felszín alatti technológiákra. Pontos arányok még nem állnak rendelkezésre (Heinemann, 2021). Minden esetre önmagáért beszél az a tény, hogy amennyiben a teljes tárolókapacitás hidrogénnel kerülne feltöltésre, akkor a bennük jelenleg tárolt energiamennyiségnek csupán 30 %-a lenne hasznosítható (a hidrogén kisebb hőértékéből következően), ami nemzeti energiabiztonsági oldalról nem vállalható, nem ejtve szót a további lehetséges üzemeltetési problémákról (Szunyog-Galyas, 2020). Egy dolog az előzőekből viszont egyértelműen látható, a jelenlegi földgáz infrastruktúra egésze csak a földgáz bizonyos mértékű hidrogénnel történő keverését fogja lehetővé tenni.

### **3.3 Magyarország megújuló forrásból megtermelhető elméleti hidrogénpotenciálja**

Egy másik szemszögből is érdemes megvizsgálni a kérdést, mégpedig, hogy mekkora földgáz mennyiség kiváltására lennének képesek a jelenleg működő hazai megújuló energiára épülő erőművek, amennyiben a megtermelt villamos energiából elektrolízis útján teljes egészében zöld hidrogént állítanának elő. Hangsúlyozni kell, hogy a kapott eredmények abban az esetben értendők, amennyiben az országban található összes erőmű – amely megújuló alapú energiával működik és 2022. december 31-én üzemelt – figyelembevételre kerül, és feltételezzük, hogy a megtermelt villamos energia kizárólag hidrogéntermelésre kerül felhasználásra.

Az elméleti zöld hidrogénmennyiség meghatározásához a MEKH által folyamatosan frissített villamosenergia engedélyesek listája került felhasználásra (MEKH, 2023). A mindenki számára ingyenesen elérhető MEKH adatok alapján azok a kiserőművek kerültek kiválasztásra a vizsgálat során, amelyek megújuló alapú energiával működnek, valamint 2022 év végén még engedéllyel rendelkeztek. Utóbbinak jelentősége abban áll, hogy a későbbiekben vizsgálatra kerül az is, hogy a megtermelhető elméleti zöld hidrogénpotenciál mekkora mértékben lett volna képes fedezni a 2022. évi magyar földgázfelhasználást. Szintén fontos hangsúlyozni, hogy a maximális elméleti hidrogénpotenciáltól vélhetően jelentősen elmarad a ténylegesen felhasználható hidrogénmennyiség, hiszen az erőművek által megtermelt villamosenergia jelentős része felhasználásra kerül.

A 3.5. táblázat a MEKH hivatalos adatbázisa alapján kigyűjtött adatokat tartalmazza (MEKH, 2023). Ahogy a korábbiakban említésre került, a számításhoz csak a megújuló alapú energiával üzemelő erőművek kerültek kiválasztásra, melyek a biogáz, a biomassza, a depóniagáz, a víz, a szél, a geotermikus-, valamint a napenergia kategóriákba kerültek rendszerezésre. A MEKH adatai alapján 2022 év végén 293 db fotovoltaikus erőmű üzemelt az országban, mindösszesen 2600,33 MW beépített kapacitással, melyek közül a legkisebb erőmű 0,54, a legnagyobb 2x49,28 MW teljesítményű. A vizsgált évben 57 db biogáz-, 12 db biomassza-, valamint 11 db hulladéklerakóban keletkezett depóniagáz erőmű üzemelt, összesen 289,61 MW beépített kapacitással, ahol a legkisebb erőmű szintén 0,5 MW, míg a legnagyobb 49,9 MW teljesítménnyel rendelkezik. Emellett 12 db vízerőmű 61,09 MW teljesítménnyel, 46 db szél erőmű 327,65 MW beépített kapacitással, valamint 1 db geotermikus erőmű üzemelt 2,70 MW teljesítménnyel 2022 decemberében.

Ezek alapján elmondható, hogy 2022 év végéig összesen 3281,38 MW megújuló alapú beépített kapacitással rendelkezett Magyarország. Ennek jelentős része, 81,3 %-a fotovoltaikus erőművi, 10,2 %-a szél, 9,1 %-a biogáz, biomassza, depóniagáz alapú, 1,9 %-a víz, valamint kevesebb mint 1 %-a geotermikus erőművi kapacitásként jelentkezett.

**3.5. táblázat** 2022 decemberében meglévő megújuló alapú villamosenergia-kapacitás (MEKH, 2023)

| Megújuló alapú energia     | beépített kapacitás |
|----------------------------|---------------------|
|                            | MW                  |
| <b>biogáz</b>              | 70,76               |
| <b>biomassza</b>           | 207,94              |
| <b>depóniagáz</b>          | 10,91               |
| <b>víz</b>                 | 61,09               |
| <b>szél</b>                | 327,65              |
| <b>nap</b>                 | 2600,33             |
| <b>geotermikus energia</b> | 2,70                |
| <b>Összesen</b>            | <b>3281,38</b>      |

A megújuló alapon történő elméleti hidrogénpotenciál meghatározásához az alábbi, a szakirodalomban fellelhető alapadatok kerültek felhasználásra:

- 20 MW beépített kapacitás átlagosan évi 21 GWh villamos energia termelésére képes (<http://mvm.hu>);

- 1 kg hidrogén előállításához kb. 50 kWh energia szükséges. Ennek pontos mértéke az elektrolizátor típusától függően változik. A vizsgálatokhoz a 3.6. táblázatban feltüntetett típusok kerültek figyelembevételre. Az előállítható elméleti hidrogén mennyiségek minden elektrolizátor típusra vonatkozóan külön-külön kiszámításra kerültek. Ezek alapján az alkáli elektrolízis villamosenergia szükséglete 51 kWh, az ennél jobb hatásfokkal jellemezhető PEM elektrolizátoré 50 kWh, míg a SOE elektrolizátor esetében 41 kWh villamos energia szükséglet jelentkezik 1 kg hidrogén előállítása során. A számításokhoz ezek az értékek lettek figyelembe véve (*Kakoulaki és tsai, 2021; Holst és tsai, 2021*).
- 1 kg hidrogén 11,89 nm<sup>3</sup> gáztechnikai normálállapotban (15 °C hőmérsékleten és 1,01325 bar nyomáson) (*MMK Kiadványsorozata, 2020*);
- a hidrogén sűrűsége 0,0841 kg/m<sup>3</sup> gáztechnikai normálállapotban (15 °C hőmérsékleten és 1,01325 bar nyomáson) (*MMK Kiadványsorozata, 2020*).

**3.6. táblázat** Magyarország megújuló alapú elméleti hidrogénpotenciálja, valamint a felhasznált földgázmennyiség elméleti kiváltásának aránya a különböző elektrolizátor típusok szerint 2022-ben

| Elektrolizátor típusok                     | villamosenergia szükséglet | 2022. év végén beépített villamos energia kapacitás | villamos energia termelés | megtermelhető hidrogén mennyiség |   | 2022. évben felhasznált földgázmennyiség elméleti kiváltásának aránya |
|--|----------------------------|---|---------------------------|----------------------------------|---|---|
|  | kWh/kg                     | MW  | GWh                       | tonna                            | nm <sup>3</sup><br>(15 °C; 1,01325 bar) | %   |
| alkáli elektrolízis                        | 51                         | 3281  | 3445                      | 67 549                           | 803 157 843                             | 3,1   |
| protoncserélő membrán elektrolizátor (PEM) | 50                         |   |                           | 68 900                           | 819 221 000                             | 3,2   |
| szilárd-oxid elektrolizátor (SOE)          | 41                         |   |                           | 84 024                           | 999 050 000                             | 3,9   |

A számítások során kapott eredményeket a 3.6. táblázat tartalmazza. Ezek alapján elmondható, hogy a 2022. évben rendelkezésre álló beépített megújuló alapú villamosenergia kapacitás Magyarországon megközelítőleg 67,5·10<sup>6</sup>-84,0·10<sup>6</sup> kg, azaz gáztechnikai normálállapotban véve 803,2·10<sup>6</sup>-999,1·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> hidrogén gáz előállítását és földgázrendszerbe történő betáplálását tette volna lehetővé, a felhasznált elektrolizátor típustól függően. Ha figyelembevételre kerül az egységnyi átlagos földgáz (10,67 kWh/m<sup>3</sup>) és hidrogén (3,36 kWh/m<sup>3</sup>) energiatartalom, akkor a táblázat utolsó oszlopában szereplő kiváltható földgázenergia-tartalmak kaphatóak meg. Hozzá kell tenni, hogy mindez az elméleti mennyiség a teljes 2022. évi magyar földgázfogyasztás csupán 3,1-3,9 %-át tudta volna fedezni, amennyiben az összes megtermelt megújuló alapú villamosenergia kizárólag hidrogéntermelésre kerül felhasználásra.

## 4 A hidrogén földgázhálózati betáplálásának vizsgálata

A hidrogén földgázhálózati betáplálhatóságának elemzése során elengedhetetlen annak vizsgálata, hogy milyen különbségek jelentkeznek a hidrogén felhasználása során, melynek alapvető oka a hidrogén, valamint a földgázt alkotó főbb komponensek tüzeléstechnikai- és anyagjellemzőinek jelentős mértékű eltérése, amely az alábbi fejezetben kerül részletes bemutatásra.

### 4.1 A hidrogén hatása a földgázhálózati gázminőségre

#### 4.1.1 A hidrogén és a metán tüzeléstechnikai jellemzőinek összehasonlítása

Ahhoz, hogy a hidrogén, mint a jövő energiahordozója a földgázzal összehasonlíthatóvá váljon, elemzésre kerültek a földgázt alkotó legfőbb komponensek, a metán, valamint a hidrogén, illetve két jellemző magyar földgázösszetétel anyag- és tüzeléstechnikai jellemzői, melyek értékeit a 4.1. táblázat tartalmazza.

**4.1. táblázat** A hidrogén és a metán főbb tüzeléstechnikai- és anyagjellemzőinek összehasonlítása (Cerbe, 2007; Szunyog, 2009; Szilágyi-Szunyog, 2017)

| Tulajdonság                         | Mérték-egység                  | Hidrogén (H <sub>2</sub> ) | Metán (CH <sub>4</sub> ) | 2H<br>Beregdaróc | 2S<br>Kardoskút |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
| Moláris tömeg                       | kg/kmol                        | 2,016                      | 16,043                   | 16,409           | 21,957          |
| Sűrűség (15 °C, 101325 Pa)          | kg/m <sup>3</sup>              | 0,085                      | 0,678                    | 0,695            | 0,931           |
| Relatív sűrűség                     | -                              | 0,070                      | 0,555                    | 0,567            | 0,760           |
| Alsó hőérték (15/15 °C)             | MJ/m <sup>3</sup>              | 10,223                     | 34,016                   | 34,205           | 29,681          |
|                                     | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (2,840)                    | (9,449)                  | (9,501)          | (8,245)         |
| Felső hőérték (15/15 °C)            | MJ/m <sup>3</sup>              | 12,102                     | 37,781                   | 37,973           | 32,885          |
|                                     | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (3,362)                    | (10,495)                 | (10,548)         | (9,135)         |
| Alsó Wobbe-szám (15/15 °C)          | MJ/m <sup>3</sup>              | 38,758                     | 45,668                   | 45,406           | 34,049          |
|                                     | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (10,496)                   | (12,686)                 | (12,613)         | (9,458)         |
| Felső Wobbe-szám (15/15 °C)         | MJ/m <sup>3</sup>              | 45,880                     | 50,724                   | 50,407           | 37,725          |
|                                     | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (12,744)                   | (14,090)                 | (14,002)         | (10,479)        |
| Lángterjedési sebesség              | cm/s                           | ~267                       | ~35                      | ~34              | ~28             |
| Gyulladás koncentrációhatár (20 °C) | (V/V)%                         | 4,0-77,0                   | 4,4-15,0                 | 4,3-15,6         | 4,9-14,5        |
| Fajlagos elméleti oxigénszükséglet  | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,499                      | 2,003                    | 2,014            | 1,749           |
| Fajlagos elméleti levegőszükséglet  | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 2,383                      | 9,565                    | 9,614            | 8,350           |
| Keletkező CO <sub>2</sub>           | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,001                      | 0,998                    | 1,009            | 1,050           |
| Metánszám                           | -                              | 0,0                        | 100,0                    | 92,5             | 92,4            |

A 4.2. táblázat a Magyarországon előforduló földgázforrások két csoportjának egy-egy jellemző összetételét mutatja be. Az orosz import forrásból származó 2H gázminőség nagy metántartalommal (>96 mol%) és közel állandó összetétellel rendelkezik. A hazai termelésből származó földgáz metántartalma már jelentősen kevesebb és emellett jelentős nem éghető, ún. inerttartalommal (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) jellemezhető, melynek következtében a gyengébb, 2S minőségű csoportba sorolható. Ez a gázminőség regionális hálózatokba kerül betáplálásra (Vida, 1984; Szunyog, 2009).

Fontos megemlíteni, hogy a gázok összetétele mol%-ban és V/V%-ban is kifejezhető. Ideális gázt feltételezve a két érték megegyezik egymással, mivel a z kompresszibilitási tényező értéke 1-nek tekinthető. Míg a mol%-os összetétel független a gáz nyomásától, valamint a hőmérsékletétől, addig a V/V% alkalmazása esetében ez nem igaz. A mol% és V/V% közötti átszámításra az EN ISO 14912:2006 – Gázelemzés. Gázkeverékek összetételi adatainak átszámítása szabvány ad útmutatást. Vizsgálataim során a mol%-ban történő gázösszetétel megadását alkalmaztam.

**4.2. táblázat** Magyarországon jellemző mintagáz összetételek (Szunyog, 2009)

| Komponens   | Képlet                         | Beregdaróc<br>2H<br>[mol%] | Kardoskút (reg.)<br>2S<br>[mol%] |
|-------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Metán       | CH <sub>4</sub>                | 97,913                     | 77,011                           |
| Etán        | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 0,814                      | 1,996                            |
| Propán      | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0,284                      | 0,943                            |
| i-Bután     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,050                      | 0,292                            |
| n-Bután     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,053                      | 0,326                            |
| i-Pentán    | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,010                      | 0,142                            |
| n-Pentán    | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,008                      | 0,123                            |
| Hexán +     | C <sub>6</sub> +               | 0,009                      | 0,197                            |
| Szén-dioxid | CO <sub>2</sub>                | 0,054                      | 15,775                           |
| Nitrogén    | N <sub>2</sub>                 | 0,804                      | 3,196                            |

Ahogy a 4.1. táblázatban látható, a hidrogén jelentősen kisebb sűrűséggel, ebből következően relatív sűrűséggel is rendelkezik a metánhoz viszonyítva, gáztechnikai normálállapotban egynolcada a metán sűrűségének, valamint relatív sűrűségének.

A hidrogén energiatartalma jelentős mértékben elmarad a metán energiatartalmától, hiszen alsó és felső hőértéke kevesebb mint egyharmada a metán hőértékeinek. Viszont a hidrogén nagyon kis sűrűségének következtében az alsó és felső Wobbe-számok - amelyek az alsó és

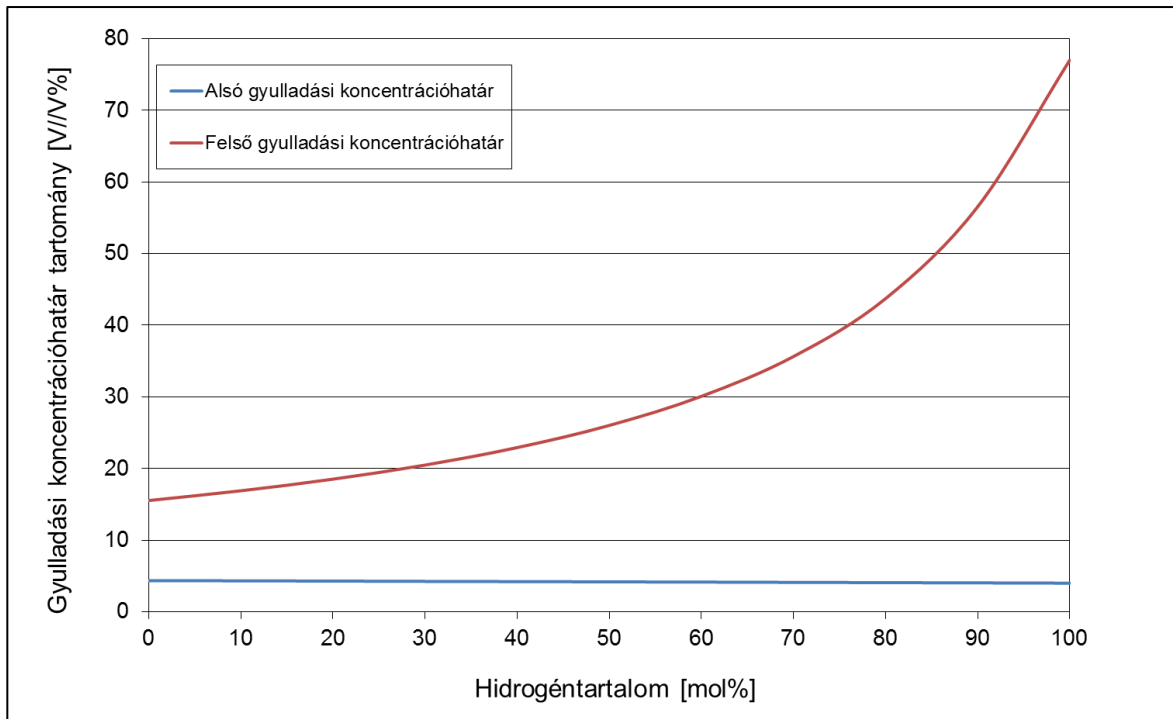


felső hőértékek, valamint a relatív sűrűség négyzetgyökének hányadosaként számíthatók - már közelebb helyezkednek el egymáshoz, 10-15 %-os eltérést mutatva.

Jelentős eltérés mutatkozik a lángterjedési sebességekben, hiszen a hidrogén lángterjedési sebessége közel 8-szorosa a földgázénak, mellyel szinte robbanásszerűen halad végig az éghető gáz-levegő keverékben. Ez jelentősen ronthatja a földgázra szabályozott gázfogyasztó berendezések tüzeléstechnikai értékeit, valamint lángvisszagyulladás okozhat.

Az alsó és felső gyulladási koncentrációhatárokat vizsgálva is szembetűnő különbség figyelhető meg. Míg a metán levegőben 4,4-15,0 V/V% között gyullad meg, addig a hidrogén esetében ez a tartomány jóval szélesebb, 4,0-77,0 V/V%. A földgázhoz jelentős mértékű hidrogén bekeverése a felső gyulladási koncentrációhatár eltolódását, így a tartomány kiszélesedését eredményezi 100 V/V% földgázhoz viszonyítva. A hidrogén levegővel alkotott gázelegyet a földgáz-levegő robbanóképes gázeleggyel összehasonlítva egy nagyságrenddel kisebb (0,02 mJ) gyújtási energia hatására meggyullad. Ez az érték földgáz-levegő gázelegy esetében 0,29 mJ (Cerbe, 2007).

A gyulladási koncentrációhatár igen jelentős eltolódása a felső határok irányába, az elégetlenül környezetbe, vagy tűztérbe áramló hidrogén gáz veszélyességét mutatja (4.1. ábra). Látható, hogy az alsó gyulladási koncentrációhatár szinte nem változik, azonban a felső határérték exponenciálisan növekedik a hidrogén dúsulásával.



**4.1. ábra** A metán-hidrogén gázelegy gyulladási koncentrációhatára (Szunyog-Galyas, 2020)

A tökéletes eltüzelés megvalósításához szükséges fajlagos elméleti oxigénszükséget, illetve az ebből számított fajlagos elméleti levegőszükséglet vizsgálata során megfigyelhető, hogy a hidrogén eltüzeléséhez jelentősen kisebb mennyiségű oxigén és levegő kell, a metán sztöchiometrikus elégetéséhez szükséges mennyiségek megközelítőleg 25 %-a.

A levegőfelesleg nélküli sztöchiometrikus eltüzelés esetén jelentkező fajlagos füstgáztérfogatban lévő  $\text{CO}_2$ -tartalom jóval kedvezőbb a hidrogén esetében ( $0,001 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), vagyis szinte elhanyagolható mértékű (gyakorlatilag megegyezik az eltüzeléshez használt levegő szén-dioxid tartalmával). Ezzel szemben a metán esetén a füstgáz  $\text{CO}_2$  tartalma  $0,998 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

A táblázatban feltüntetett értékek alapján egyértelműen látható, hogy a hazai közszolgáltatásban alkalmazott gázminőségek milyen mértékben térnek el a hidrogén tüzeléstechnikai- és anyagjellemzőitől, kiemelve a hőértékek, a lángterjedési sebességek, a gyulladási koncentrációhatárok, valamint a fajlagos elméleti oxigén- és levegőszükségletek közötti jelentős különbségeket.

Elmondható, hogy egységnyi térfogatra vetített energiatartalma csupán harmada a metánénak, azonban Wobbe-száma, mely a gázkeverékek cserélhetőségének egyik

legjellemzőbb paramétere, 9,5 %-ban marad csupán el. A leglényegesebb különbség a gázok lángterjedési sebességében és gyulladási koncentráció tartományjaiban keresendő, mivel a hidrogén 10,5-ször gyorsabban ég levegőben, mint a metán, vagy a földgáz. A gázkészülékekben történő eltüzeléskor ez lesz az egyik legmeghatározóbb változó, mely erősen lekorlátozza a megengedhető bekeverhető mennyiségeket.

#### 4.1.2 A gázminőségi követelményeknek való megfeleltethetőség vizsgálata

A földgázhálózatba keverhető hidrogén részarányának meghatározásakor két alapvető szempontot kell előtérbe helyezni. A meglévő földgázhálózati infrastruktúra elemei jelentős inhomogenitást mutatnak, mind az anyagminőségek, mind az életkor tekintetében. Ebből adódóan a földgázrendszert sem lehet egy egységként kezelni, más anyagminőségek és nyomástartományok jellemzik az elosztói, a szállítói és a tárolói rendszereket. Mivel együttműködő hálózatokról van szó, ezért a megoldás a rendszerek külön-külön történő vizsgálata, és a határérték követelmények teljes rendszerre történő megfogalmazása a „gyengébb láncszem” elve alapján. A másik szempont a rendszer végén elhelyezkedő földgázfelhasználó berendezések hidrogén tűrése.

4.3. táblázat A magyar földgázrendszerben szolgáltatható gázminőségek

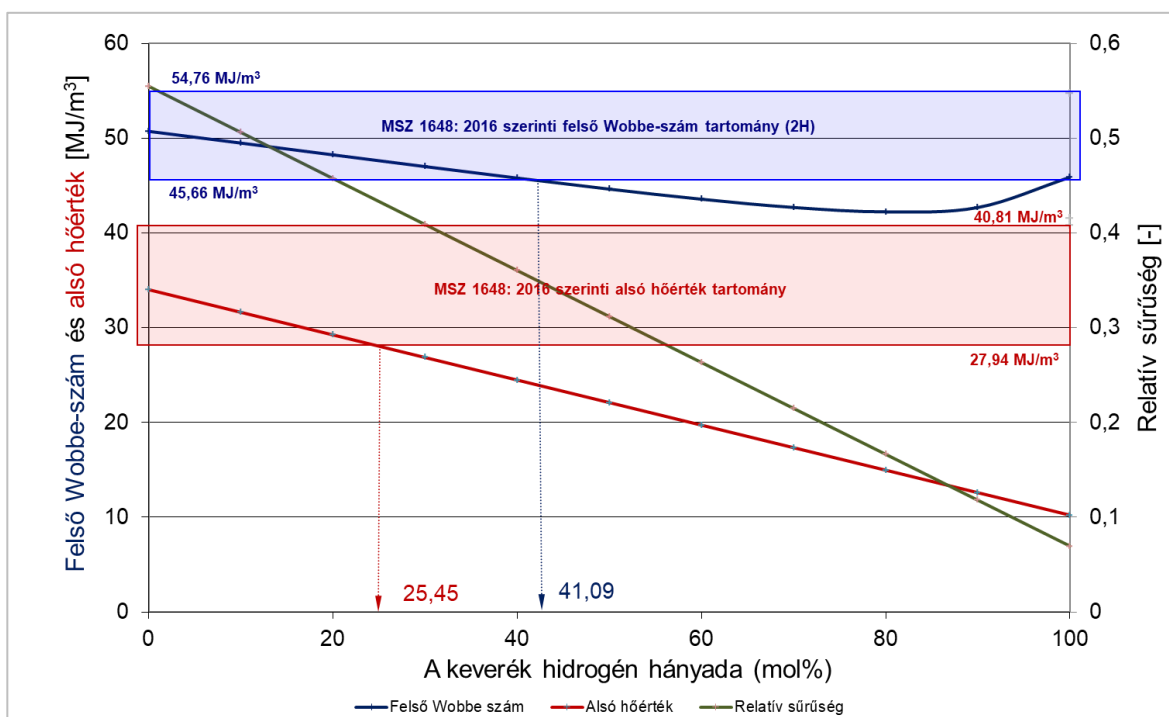
| A gázcsoport iele                  | 2H   | 2S   |
|------------------------------------|--|--|
| <b>Jellemző</b>                    | <b>Határérték</b>  |  |
| <b>Wobbe-szám felső hőértékből</b> | 45,66-54,76 MJ/m <sup>3</sup><br>(12,68-15,21 kWh/m <sup>3</sup> ) | 36,29-41,58 MJ/m <sup>3</sup><br>(10,08-11,55 kWh/m <sup>3</sup> ) |
| <b>Névleges Wobbe-szám</b>         | 50,72 MJ/m <sup>3</sup><br>(14,09 kWh/m <sup>3</sup> )             | 39,11 MJ/m <sup>3</sup><br>(10,86 kWh/m <sup>3</sup> )             |
| <b>Felső hőérték</b>               | 31,00-45,28 MJ/m <sup>3</sup><br>(8,61-12,58 kWh/m <sup>3</sup> )  |  |
| <b>Alsó hőérték</b>                | 27,94-40,81 MJ/m <sup>3</sup><br>(7,76-11,34 kWh/m <sup>3</sup> )  |  |

Megjegyzés: A földgáz felső és alsó hőérték értékhatárokon belüli konkrét értékét szerződésben kell meghatározni.

A magyar földgázrendszerben szolgáltatható gázminőségek vonatkozásában a földgázellátásról szóló 2008. évi LX. törvény végrehajtási rendeletének (19/2009. (I. 30.)

Korm. rendelet) 11. számú melléklete, valamint az MSZ 1648:2016 szabvány ad útmutatást (4.3. táblázat) (Szunyog-Galyas, 2020).

A 4.2. ábrán egy kizárólag metánból és hidrogénből álló kétkomponensű gázelegy legfőbb tüzeléstechnikai jellemzőinek alakulása figyelhető meg. Látható, hogy egy tiszta metán-hidrogén gázkeveréket alapul véve, a keverékben legfeljebb 25,45 mol% hidrogén lehet, hogy a keverék még éppen megfeleljen a H gázcsoportra vonatkozó hőérték, és 41,09 mol% hidrogén lehet, hogy még éppen megfeleljen a Wobbe-szám követelményeinek, azaz a gázcsoportra megengedett tartományokon belül maradjon. Mindebből következik, hogy egy átlagos összetételű földgáz esetében megközelítőleg 25 mol% körül van az a maximálisan betáplálható hidrogén részarány, mely még a H gázcsoporton belüli gázkeveréket eredményez, azaz nem történik csoportváltás. Fontos megjegyezni, hogy ez az elméleti szám csupán a gázminőség oldaláról közelített, a készülék működési oldaláról, annak viselkedéséről (kiemelten a megváltozó lángterjedési sebességről) nem ad információt.



4.2. ábra Metán-hidrogén keverék tüzeléstechnikai jellemzői (Szunyog-Galyas, 2020)

Mindenképpen ki kell emelni, hogy a Magyarországra vonatkozó előírások jelenleg nem tartalmaznak a földgáz megengedhető hidrogéntartalmára utalást. Az európai földgázrendszerek forrásai jelentős minőségi eltéréseket mutatnak, amely problémát generál

az egyes országok közötti kereskedelemben és a tényleges fizikai ellátásban. Ennek leküzdésére – ahogyan korábban említésre került – az Európai Szabványügyi Bizottság (CEN) elkészítette a H gázminőségre vonatkozó követelményeket, amelyeknek meg kell felelnie egy adott forrásból származó gáznak ahhoz, hogy betáplálhatóvá váljon a földgázhálózatba és részt vehessen a CEN-tagországok közötti gázkereskedelemben.

### 4.1.3 Földgáztüzelésű berendezések hidrogén tűrése

Az Európában használatos éghető gázok három gázcsaládba sorolhatók. A második gázcsaládba tartozó gázok a Wobbe-számuk alapján négy fő jellemző csoportba sorolhatók a 4.4. táblázat szerint. A H és E csoportba sorolt gázok magas térfogatszázalékban metánt tartalmaznak, az L minőség nitrogént, és a magyarországi nemzeti sajátosságú S minőség pedig szén-dioxidot is tartalmaz.

A szabvány azt az elvet követi, hogy egy földgázcsoporton belül a földgáz égési jellemzőinek csak olyan mértékű változása engedhető meg, amely a gázkészülékek működését nem befolyásolja, a készülék vagy az égő átalakítását nem teszi szükségessé. Az eredeti szolgáltatási csoportba tartozó földgáztól eltérő gázt csak a készülék megfelelő átállítása (alkatrészcsere, átszerelés, be szabályozás) után szabad szolgáltatni.

**4.4. táblázat** a földgázok csoportosítása az MSZ EN 437: 2019 szabvány szerint

| Gázcsaládok és gázcsoportok | Felső hőértékből számított Wobbe-szám<br>15 °C hőmérsékleten és 1013,25 mbar nyomáson<br>MJ/m <sup>3</sup> (kWh/m <sup>3</sup> ) |              |
|-----------------------------|--|--------------|
|                             | Legalább   | Legfeljebb   |
| <b>Első család</b>          |  |              |
| - a csoport                 | 22,4 (6,22)  | 24,8 (6,89)  |
| <b>Második család</b>       | 39,1 (10,86)   | 54,7 (15,19) |
| - H csoport                 | 45,7 (12,69)   | 54,7 (15,19) |
| - L csoport                 | 39,1 (10,86)   | 44,8 (12,44) |
| - E csoport                 | 40,9 (11,36)   | 54,7 (15,19) |
| - S csoport                 | 36,3 (10,08)   | 41,5 (11,52) |
| <b>Harmadik család</b>      | 72,9 (20,25)   | 87,3 (24,25) |
| - B/P csoport               | 72,9 (20,25)   | 87,3 (24,25) |
| - P csoport                 | 72,9 (20,25)   | 76,8 (21,33) |
| - B csoport                 | 81,8 (22,72)   | 87,3 (24,25) |

A hálózatokon keresztül szolgáltatott gázokkal szembeni minőségi követelményeket nemzeti szabályozás tartalmazza, mely legtöbbször az általános európai elveket alapul véve, az ország egyedi földgázminőségeihez igazított. Magyarországon ezt jelenleg a 2008. évi XL. törvény a földgázellátásról (GET) végrehajtási, 19/2009. (I. 30.) Korm. rendeletének (VHR) 11. számú melléklete tartalmazza. Az Európában legelterjedtebb EN 437 szabvány sem kifejezetten a hálózati gázminőséget határozza meg, hanem azokat a gáz típusokat a megengedhető szélső értékekkel együtt, amelyeket az Európában forgalomba hozott gázkészülékekben biztonságosan el lehet tüzelni. A szabvány meghatároz tehát bizonyos gázösszetételtől függő csoportokat, de nem használatos a gázhálózatokban szolgáltatott gázok minőségének definiálására. A szabványt számos európai országban alkalmazzák, és gyakran alapkövetelménynek tekintik a nemzeti előírások kidolgozásakor. Az egyes nemzeti előírások minden esetben a Wobbe-számot és/vagy a hőértéket tekintik a gázminőségi alapparaméternek. Gyakorlatban ez a legelterjedtebben alkalmazott gázcserélhetőségi módszer, a Wobbe-szám módszer, mely annak fokmérője, hogy egy gáz égési jellemzői mennyire egyeznek meg egy másik gázéval. Az egy csoporton belül változó értékeket úgy határozták meg, hogy a csoporton belül nem lehet tökéletlen égés, koromképződés, lángleszakadás-, vagy visszagyulladás. Bár a cserélhetőség kérdése ezzel nem oldódik meg, de a gázcsoportokhoz tartozó minőséghatárokon belül a cserélhetőség fizikai és tüzeléstechnikai kérdései a gyakorlat számára kezelhetővé válnak.

A magyar H és S gázminőségekre vonatkozó vizsgálógáz összetétel előírásokat (MSZ EN 437:2019) mutatja a 4.5. táblázat. A vonatkoztatási gáz az a gáz, amivel a gázkészülék normál (névleges teljesítményű) üzemét vizsgálják. A határgázok azokat az üzemi szélőséges helyzeteket szimulálják, mely esetben a készüléknek még éppen elfogadható módon kell működniük. A táblázat alapján látható, hogy a hidrogént, mint a visszagyulladás határgáz összetevőjét alkalmazzák a gázkészülék vizsgálatokkor, legfeljebb 23 mol% mennyiségben. A készülék túlterhelésének vizsgálatánál is alkalmazzák a hidrogént 20 mol% összetételben. Mindez azt jelenti, hogy azok a készülékek, melyek 2019-től kezdődően kerültek tanúsításra, elviekben a 20-23 mol% hidrogén összetevővel is éppen működőképeseek. Mindezt visszaigazolja a metán-hidrogén elegy tüzeléstechnikai jellemzőinek vizsgálata során tett megállapítás, miszerint 25 mol% hidrogéntartalom mellett még a gázelegy nem lép ki a H gázcsoportból.

Mivel a visszagyulladás határgázában található 23 mol% hidrogén már a szabvány 1999-ben megjelent változatában is szerepelt, ezért elviekben a 1999 óta Magyarországon forgalomba

hozott gázkészülékeknek el kellene viselnie egy ekkora hidrogén hányadot. A probléma viszont nem ilyen egyszerű, mivel

- nincs hiteles információk a gázkészülékek karbantartásáról, azok tényleges állapotáról;
- jelentős számban vannak olyan működő készülékek, melyek 1999 előtt kerültek forgalomba hozatalra;
- a 23 mol% hidrogénes határgázzal történő vizsgálat másik összetevője a tiszta metán, de a valóságban ettől eltérő összetevők is vannak a szolgáltatott földgázban;
- a határgáz vizsgálat a készülék tényleges üzemidejéhez mérten elhanyagolható hosszúságú, így a magasabb hidrogén koncentrációnak nem ismert a hosszú távú hatása a készülék szerkezeti elemeire;
- az ipari gáztüzelő berendezések, különösen a gázmotorok, gázturbinák és tüzelőanyag cellák másként viselkedhetnek a megnövekvő hidrogén részarány miatt;
- a magasabb hidrogén részarány kisebb fűtőgáz hőértéket is jelent, melyet a készülék a bevezetett gázmennyiség növelésével próbál majd kompenzálni (tüzelés szabályozó automatikával ellátott készülékek esetén); ez által a készülék hatásfoka is torzulni fog; így az hatással lesz a szezonális hatásfokra is (813/2013/EU rendelet);
- a hálózati földgáz gépjármű üzemanyagként is alkalmazható, mely minőségre más szabvány előírások vonatkoznak (MSZ EN 16723-2: 2017), továbbá a megnövekvő hidrogén az acélban ridegedést okozhat.

**4.5. táblázat** Gázkészülék vizsgálógáz összetételek az MSZ EN 437:2019 szerint

| Gázcsalád és gázcsalád           | Vizsgálógázok                                  | Megnevezés | Összetétel térfogat szerint mol%   | Wi MJ/m <sup>3</sup> | Hi MJ/m <sup>3</sup> | Ws MJ/m <sup>3</sup> | Hs MJ/m <sup>3</sup> | relatív sűrűség - |
|----------------------------------|--|------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| <b>A második gázcsalád gázai</b> |  |            |  |                      |                      |                      |                      |                   |
| <b>H csoport</b>                 | Vonatkoztatási gáz                             | G20        | CH <sub>4</sub> =100   | 45,67                | 34,02                | 50,72                | 37,78                | 0,555             |
|                                  | A tökéletlen égés és a koromképződés határgáza | G21        | CH <sub>4</sub> =87<br>C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =13                       | 49,6                 | 41,01                | 54,69                | 45,28                | 0,684             |
|                                  | A visszagyulladás határgáza                    | G222       | CH <sub>4</sub> =77<br>H <sub>2</sub> =23                                      | 42,87                | 28,53                | 47,87                | 31,86                | 0,443             |
|                                  | A lángleszakadás határgáza                     | G23        | CH <sub>4</sub> =92,5<br>N <sub>2</sub> =7,5                                   | 41,11                | 31,46                | 45,66                | 34,95                | 0,586             |
|                                  | A túlfűtés határgáza                           | G24        | CH <sub>4</sub> =68<br>C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =12<br>H <sub>2</sub> =20 | 47,01                | 35,7                 | 52,09                | 39,55                | 0,577             |
| <b>S csoport</b>                 | Vonatkoztatási gáz                             | G25.1      | CH <sub>4</sub> =86<br>CO <sub>2</sub> =14                                     | 35,25                | 29,3                 | 39,11                | 32,51                | 0,691             |
|                                  | A tökéletlen égés és a koromképződés határgáza | G26.1      | CH <sub>4</sub> =80<br>C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =6<br>CO <sub>2</sub> =14 | 37,61                | 32,6                 | 41,58                | 36,04                | 0,751             |
|                                  | A visszagyulladás határgáza                    | G27.1      | CH <sub>4</sub> =82<br>CO <sub>2</sub> =18                                     | 32,7                 | 27,94                | 36,29                | 31                   | 0,73              |



## 5 Metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavításának vizsgálata

Ahogy az már korábban bemutatásra került, az egyik legjelentősebb tüzeléstechnikai különbség a metán és a hidrogén energiatartalmában jelentkezik, mivel a hidrogén egységnyi térfogatra vetített energiatartalma közel egyharmada a földgázt alkotó legfőbb komponensnek, a metánnak. Az is láthatóvá vált az előző fejezetben, hogy amilyen arányban növeljük a földgáz hidrogéntartalmát, olyan mértékben csökken az egységnyi térfogatra vetített energiatartalom. A hálózaton szolgáltatott földgáz alsó hőértéke viszont szerződésben rögzített, attól csupán +/-5 %-ban való eltérés engedélyezett. Emiatt a célom az volt, hogy megvizsgáljam, hogy a földgázrendszerbe táplált hidrogéntartalom miatt jelentkező energiatartalom csökkenés hogyan ellensúlyozható kereskedelmi propánnal történő minőségjavítással, és annak milyen peremfeltételei vannak a magyar földgázellátó rendszeren érvényes gázminőségi előírásokra vonatkoztatva.

### 5.1 A hidrogén, a metán és a kereskedelmi minőségű propán gázminőségi jellemzői

Mivel a földgáz és a hidrogén tüzeléstechnikai- és anyagjellemzőinek összehasonlító vizsgálata már részletesen bemutatásra került, emiatt ennek ismertetésétől eltekintek.

Ahogy az 5.1. táblázatban látható, a hidrogén és a metán tüzeléstechnikai jellemzői mellett a minőségbeállításhoz alkalmazott kereskedelmi propán is feltüntetésre került, melynek összetétele 97 mol% propán, 0,5 mol% etán, 2 mol% i-bután és 0,5 mol% n-bután (*Ely Energy, 2003*).

Bár korábban említésre került, de mindenképpen hangsúlyozni kell, hogy a hidrogén energiatartalma jelentős mértékben elmarad a metánétól, hiszen hőértéke – egységnyi energiatartalma – kevesebb mint egyharmada a metánénak. Viszont a hidrogén nagyon kis sűrűségének következtében az alsó és felső Wobbe-számok már közelebb helyezkednek el egymáshoz, csupán 10-15 %-os eltérést mutatva.

Az is megfigyelhető az alábbi táblázat adatai alapján, hogy a minőségjavításhoz alkalmazott kereskedelmi minőségű propán a metánt jóval meghaladó sűrűséggel, relatív sűrűséggel jellemezhető. A metántól közel 3-szor, míg a hidrogéntől 9-szer nagyobb hőértékkel rendelkezik annak összetétele következtében.

**5.1. táblázat** A hidrogén, a metán és a kereskedelmi propán tüzeléstechnikai- és anyagjellemzőinek összehasonlítása (Szunyog, 2009; Galyas, 2018)

| Tulajdonság                          | Mérték-egység                  | Hidrogén (H <sub>2</sub> ) | Metán (CH <sub>4</sub> ) | Ely Energy kereskedelmi propán |
|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Moláris tömeg                        | kg/kmol                        | 2,016                      | 16,043                   | 44,378                         |
| Sűrűség (15 °C, p <sub>n</sub> )     | kg/m <sup>3</sup>              | 0,090                      | 0,718                    | 1,912                          |
| Relatív sűrűség                      | -                              | 0,070                      | 0,555                    | 1,560                          |
| Alsó hőérték (15/15 °C)              | MJ/m <sup>3</sup>              | 10,223                     | 34,016                   | 88,540                         |
|                                      | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (2,840)                    | (9,449)                  | (24,594)                       |
| Felső hőérték (15/15 °C)             | MJ/m <sup>3</sup>              | 12,102                     | 37,781                   | 96,237                         |
|                                      | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (3,362)                    | (10,495)                 | (26,733)                       |
| Alsó Wobbe-szám                      | MJ/m <sup>3</sup>              | 38,758                     | 45,668                   | 70,890                         |
|                                      | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (10,496)                   | (12,686)                 | (19,692)                       |
| Felső Wobbe-szám                     | MJ/m <sup>3</sup>              | 45,880                     | 50,724                   | 77,053                         |
|                                      | (kWh/m <sup>3</sup> )          | (12,744)                   | (14,090)                 | (24,404)                       |
| Lángterjedési sebesség               | cm/s                           | ~267                       | ~35                      | ~40                            |
| Gyulladási koncentrációhatár (20 °C) | V/V%                           | 4,0-77,0                   | 4,4-15,0                 | 2,0-11,4                       |
| Fajl. elméleti oxigénszükséglet      | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,499                      | 2,003                    | 5,138                          |
| Fajl. elméleti levegőszükséglet      | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 2,383                      | 9,565                    | 24,531                         |
| Keletkező CO <sub>2</sub>            | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 0,001                      | 0,998                    | 3,074                          |

## 5.2 A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavításának vizsgálata

Annak érdekében, hogy a hidrogén földgázhálózati betáplálása során az eredetileg szolgáltatott földgáz szerződésben rögzített alsó hőértéke ne csökkenjen jelentős mértékben, célszerű megvizsgálni a kereskedelmi propánnal történő minőségjavítás kérdését. Magyarországon ezt az eljárást semmilyen jogszabály vagy műszaki előírás nem tiltja. Az alábbiakban bemutatott ábrák számítási eljárásának alapját a (Szunyog, PhD értekezés, 2009) forrás szolgáltatta. Az egyes fizikai paraméterek számítását az MSZ ISO 6976:2017 Földgáz. A hőérték, a sűrűség, a relatív sűrűség és a Wobbe-szám számítása a

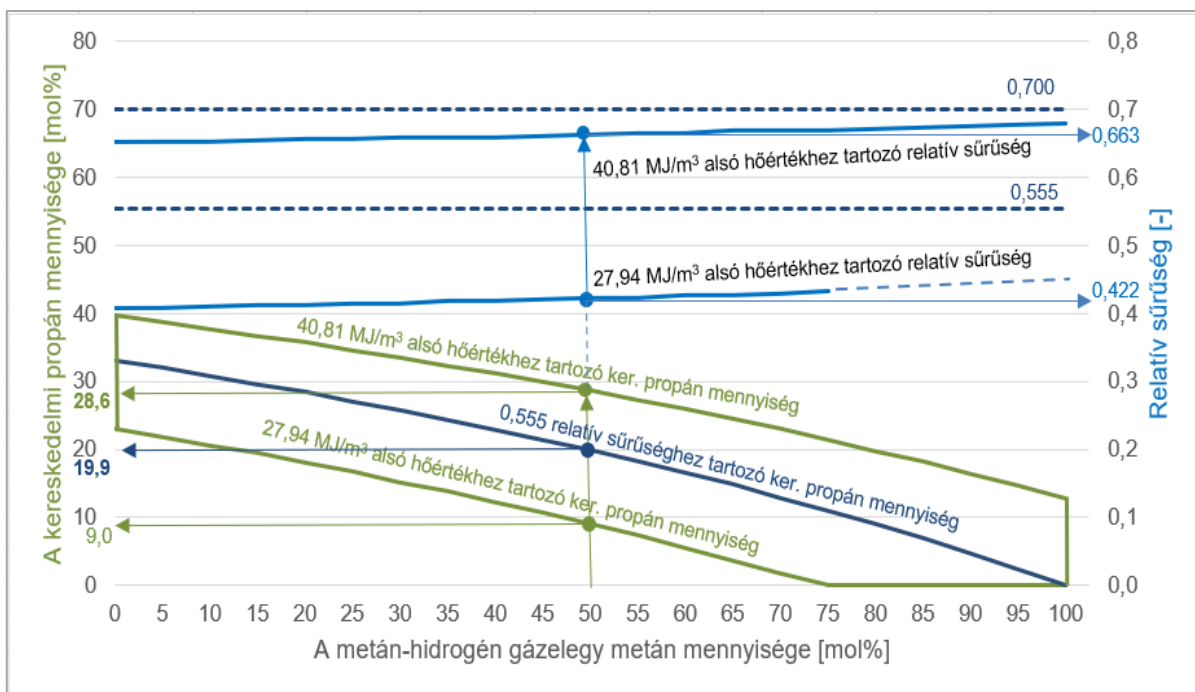
gázösszetételből c. harmonizált szabvány tartalmazza. Fontos megemlíteni, hogy Magyarországon a földgázhálózati betápláláshoz kötelezően alkalmazandó gázminőségi követelményeket a 19/2009. (I.30.) Kormányrendelet (VHR) 11. sz. melléklete tartalmazza, amely értékek megfelelnek az MSZ 1648:2016 sz. szabványban megfogalmazottaknak.

Az 5.1. ábra a metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi minőségű propánnal történő keverésének lehetséges tartományát mutatja be az országos távvezeték és regionális rendszerről szolgáltatott gázokkal szemben támasztott követelményeket megfogalmazó MSZ 1648:2016 sz. nemzeti szabvány alsó hőérték tartományának ( $27,94-40,81 \text{ MJ/m}^3$ ) megfeleltetve. Az ábrán a vízszintes tengelyen olvasható le a kizárólag metánból és hidrogénből álló gázelegy metántartalma (mol%), míg a függőleges tengelyen az ehhez az ismert összetételű metán-hidrogén gázelegyhez keverhető kereskedelmi propán mennyisége (mol%) kereshető vissza, amellyel az így keletkezett metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott gázelegy már eléri a  $27,94 \text{ MJ/m}^3$  hőértéket (zöld ötszög alsó határoló vonala). Ez az érték a magyar szabvány által megfogalmazott alsó hőérték tartományának alsó határértéke, vagyis ebben az esetben a háromkomponensű gázelegy már megfeleltethető az említett szabvány alsó hőértékre vonatkozó előírásának, így a gázkeverék a földgázellátó rendszerbe juttatható. A zöld ötszög felső határoló vonala a magyar szabványban megfogalmazott alsó hőérték tartomány felső határértékét jeleníti meg ( $40,81 \text{ MJ/m}^3$ ) a metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott gázelegy esetén. A görbe segítségével – az előbbieken ismertetett eljárás alapján – a függőleges tengelyen leolvasható az a maximális kereskedelmi propán mennyiség (mol%), amelyet az ismert összetételű metán-hidrogén gázelegyhez keverve az így alkotott gázkeverék még éppen a  $40,81 \text{ MJ/m}^3$  alsó hőérték tartomány felső határértékén belül marad, megfelelő a nemzeti szabvány által előírt alsó hőérték tartománynak. A zöld ötszög tartományán belül minden pont esetén megkereshető a metán-hidrogén elegyhez hozzákeverhető kereskedelmi propán mennyisége, amely keverék alsó hőértéke megfelel a magyar szabvány alsó hőértékre vonatkozó előírásának.

Egy példán keresztül bemutatva a diagram alkalmazását, tételezzünk fel egy 50-50 mol% metán-hidrogén gázelegyet. Az 50 mol% metántartalommal rendelkező metán-hidrogén elegyből kiindulva egy függőleges húzható, amely – ahogyan az alábbiakban is látható – elmetszi a zöld vonallal jelölt tartomány alsó és felső határoló vonalait. Az alsó határoló vonal azt a gázkeverék mennyiséget jelöli, ahol a metán-hidrogén-kereskedelmi propán gázelegy belép a magyar szabvány alsó hőérték tartományába, azaz már eléri a  $27,94 \text{ MJ/m}^3$  hőértéket.

A metszéspontot a függőleges tengelyre vetítve leolvasható, hogy 50-50 mol% metán-hidrogén gázelegyhez 9,0 mol% kereskedelmi minőségű propán bekeverése szükséges az alsó hőérték tartomány alsó határértékének eléréséhez. Az ábrán jelölt másik zöld színnel jelölt metszéspont a 40,81 MJ/m<sup>3</sup> alsó hőértéket jeleníti meg a metán-hidrogén-kereskedelmi propán gázelegyre vonatkoztatva, amely az alsó hőérték tartomány felső határértéke. Láthatóan 50-50 mol% metán-hidrogén gázelegyhez 28,6 mol% kereskedelmi minőségű propán keverhető, hogy még ne lépjen ki az MSZ 1648:2016 sz. szabvány alsó hőértékre vonatkozó tartományából. Vagyis 50-50 mol% metán-hidrogén gázelegy esetében legalább 9,0 mol% és legfeljebb 28,6 mol% kereskedelmi propán bekeverése szükséges, hogy az így alkotott keverék alsó hőértéke megfeleljen a magyar szabvány alsó hőértékre vonatkozó előírásának.

Az ábrán látható, hogy 74,6 mol% metántartalom mellett már nem szükséges a kereskedelmi propán gázelegyhez való hozzákeverése, mert a metán-hidrogén keverék önmagában eléri az alsó hőértéktartomány alsó határértékét, további propán hozzáadása növeli az alsó hőértéket.



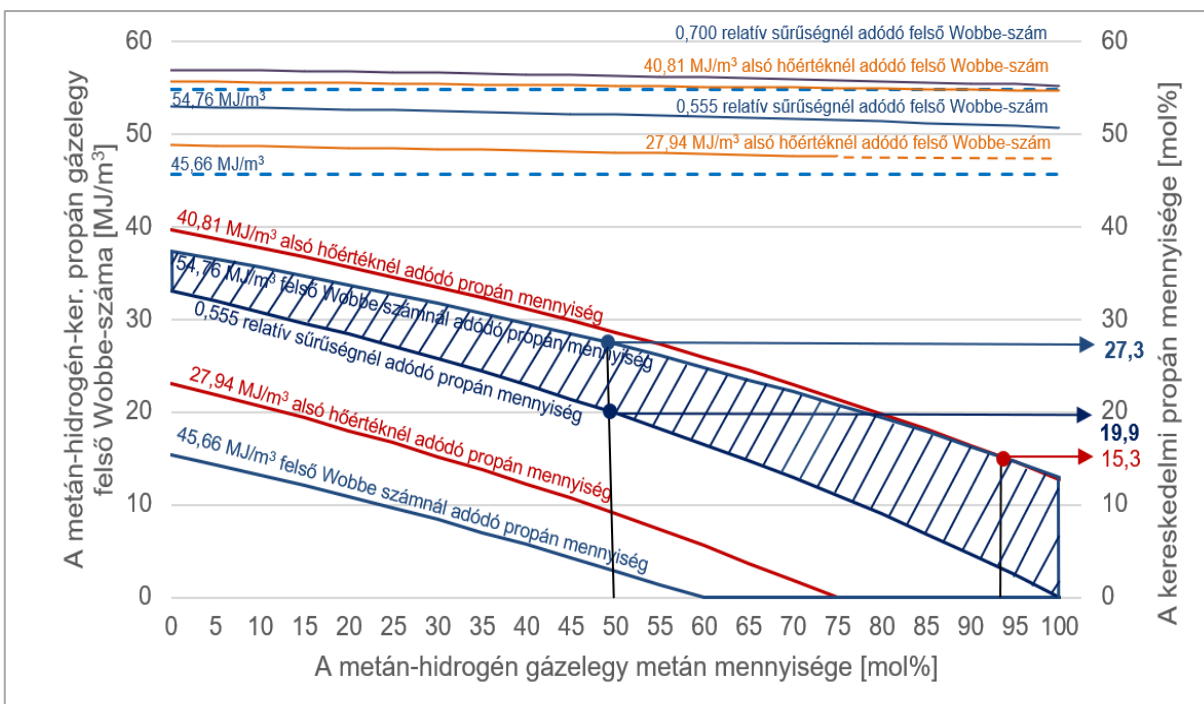
**5.1. ábra** A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő keverése az MSZ 1648:2016 sz. szabvány által megengedett alsó hőérték és relatív sűrűség tartományban

A kereskedelmi propánnal való minőségjavítás elemzése során vizsgálatra került a biztonságtechnikai szempontból jelentős relatív sűrűség elemzése is, az ábrán kék színnel jelölve. Erre vonatkozóan a magyar szabvány 0,555-0,700 relatív sűrűség tartományt irányoz elő (sötétkék szaggatott vonalak). Megfigyelhető az ábra felső részében, hogy a metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott elegy alsó hőértéktartomány alsó határértékénél ( $27,94 \text{ MJ/m}^3$ ) számított relatív sűrűségek jelentősen elmaradnak a 0,555 relatív sűrűség értéktől. 50-50 mol% metán-hidrogén gázelegy esetén a  $27,94 \text{ MJ/m}^3$  alsó hőértékhez tartozó relatív sűrűség értéke 0,422. Emellett az is látható, hogy a relatív sűrűség megengedhető tartományának felső határát nem éri el a propánnal bekevert gázelegy, annak értéke minden esetben 0,700 alatt marad, így ennek további vizsgálatától eltekintek.

Az 5.1. ábra alsó részében az alsó hőértéktartomány határértékeihez számított, a metán-hidrogén elegyhez bekeverhető kereskedelmi propán mennyiségeket jelölő vonalaihoz (zöld) feltüntetésre került a 0,555-ös relatív sűrűség értékhez tartozó kereskedelmi propán mennyiséget jelölő vonal (sötétkék). Láthatóan a metán-hidrogén elegy szabvány által megfogalmazott alsó hőértéktartomány alsó határértékének eléréséhez szükséges kereskedelmi propán mennyiség bekeverésével még nem elégíti ki a szabvány relatív sűrűség tartományának alsó határát. Az előbbiekben vizsgált 50-50 mol% összetételű metán-hidrogén elegyet megvizsgálva, 9,0 mol% propán bekeverésével az alsó hőérték tartományba belép a gázkeverék, viszont az 0,555 relatív sűrűség értéket legalább 19,9 mol% kereskedelmi minőségű propán hozzákeverése esetén éri el. Legfeljebb 28,6 mol% propán keverhető be a vizsgált összetételű gázelegyhez, hogy a keverék alsó hőértéke a szabvány alsó hőértéktartományában helyezkedjen el. Ezáltal a metán-hidrogén elegy szabvány által előírt alsó hőértékre és relatív sűrűsége vonatkozó előírásainak történő megfeleltetéshez legalább akkora mennyiségű propán bekeverése szükséges, hogy az így alkotott gázelegy elérje az 0,555 relatív sűrűség értéket és legfeljebb akkora mennyiségű propán keverhető a metán-hidrogén elegyhez, amellyel a háromkomponensű gázkeverék eléri a  $40,81 \text{ MJ/m}^3$  alsó hőértéket.

Az MSZ 1648:2016 sz. nemzeti szabvány az alsó hőérték mellett az éghető gázelegy felső Wobbe-szám tartományára is irányoz elő határértéket a földgázhálózatba való betáplálhatóság megítélésére. Az 5.3. ábra a szabványban meghatározott 2H gázminőségre vonatkozó felső Wobbe-szám tartományt mutatja be a metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavítása esetén, amely esetben figyelembevételre került az előzőekben vizsgált alsó hőérték, valamint relatív sűrűség tartományának való

megfeleltetés is. Az ábra felső részében található kék színű szaggatott vonalak jelölik a 2H minőséghez tartozó felső Wobbe-szám tartomány alsó és felső határértékét (45,66-54,76 MJ/m<sup>3</sup>). Ezen tartomány mellett – ahogyan az ábra felső részén is látható – ábrázolásra kerültek a metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi minőségű propánnal történő bekeverése során elért, a magyar szabvány által megfogalmazott alsó hőérték tartomány alsó (27,94 MJ/m<sup>3</sup>) és felső (40,81 MJ/m<sup>3</sup>) határértékeihez tartozó felső Wobbe-számok, amelyet a narancsszínű vonalak jelölnek, valamint a megengedett relatív sűrűség tartomány határértékeihez számított felső Wobbe-számok, amelyek kék színnel kerültek jelölésre. Megfigyelhető, hogy a metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott gázelegy 45,66 MJ/m<sup>3</sup> felső Wobbe-szám elérésével még nem elégíti ki a gázminőségi szabvány alsó hőértékre vonatkozó előírásait, hiszen nem éri el az alsó hőérték tartomány alsó határértékét (27,94 MJ/m<sup>3</sup>). Az alsó hőértékre vonatkozó határértékét elérve viszont a keverék nem tesz eleget a relatív sűrűsége vonatkozó előírásoknak, hiszen relatív sűrűsége nem éri el az 0,555 értéket. Emellett az ábra alapján az is megállapítható, hogy ha a metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségbeállítás az alsó hőérték tartományának felső határértékéhez történik (40,81 MJ/m<sup>3</sup>), abban az esetben az így kapott gázkeverék felső Wobbe-száma kilép a 2H gázminőséghez tartozó felső Wobbe-szám tartományból, hiszen meghaladja az 54,76 MJ/m<sup>3</sup> értéket. A felső Wobbe-szám tartományának vizsgálata során csak a 2H gázminőség került figyelembevételre. Ennek oka, hogy a metán-hidrogén gázkeverék már kereskedelmi propán hozzákeverése nélkül is meghaladja a 41,58 MJ/m<sup>3</sup> felső Wobbe-szám értéket, amely a 2S gázminőség felső Wobbe-szám tartományának felső határértéke, így ennek további vizsgálatától eltekintek.



**5.2. ábra** A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő keverése során alkalmazható keverési határértékek az MSZ 1648:2016 szabvány által megengedett felső Wobbe-szám tartományának és relatív sűrűségének (2H) függvényében

Az ábra alsó részében a metán-hidrogén gázelegyhez keverhető kereskedelmi propán mennyiségek kerültek feltüntetésre a szabvány 2H gázcsoport esetén előírányzott alsó hőérték tartomány ( $27,94\text{--}40,81\text{ MJ/m}^3$ ), felső Wobbe-szám tartomány ( $45,66\text{--}54,76\text{ MJ/m}^3$ ), illetve a relatív sűrűség alsó határértékének ( $0,555$ ) megfelelően. Az ábra alapján elmondható, hogy az ismert összetételű metán-hidrogén elegyhez legalább akkora mennyiségű propán bekeverése szükséges, amellyel a keverék eléri az  $0,555$  relatív sűrűség értéket, ugyanis ebben az esetben elégíti ki az alsó hőértékre, felső Wobbe-számra, valamint a relatív sűrűsége vonatkozó előírásokat. Legfeljebb pedig akkora mennyiségben szükséges a minőségjavító kereskedelmi propán bekeverése, amellyel a keverék eléri a felső Wobbe-szám tartomány felső határértékét ( $54,76\text{ MJ/m}^3$ ).

Az ábra alsó részén jobban láthatóvá válik az az érdekesség is, mely szerint  $93,0\text{ mol}\%$  metántartalmú metán-hidrogén gázelegy esetében a kereskedelmi propánnal történő minőségbeállítás szabványának megfeleltethető felső határa már nem a Wobbe-szám felső határértékére történik ( $54,76\text{ MJ/m}^3$ ). Ettől a metántartalmú metán-hidrogén elegytől kezdve a kereskedelmi propánnal történő minőségjavítás esetében a gázkeverék hamarabb eléri az alsó hőérték tartomány felső határát ( $40,81\text{ MJ/m}^3$ ), így a minőségbeállítás erre a hőértékre

történik a felső Wobbe-szám felső határa helyett, a maximálisan bekeverhető propánmennyiség meghatározása céljából.

A diagram alkalmazhatóságának ismertetéséhez vegyük alapul az előzőekben használt 50-50 mol% összetételű, kizárólag metánt és hidrogént tartalmazó gázelegyet. Ahhoz, hogy ez az elegy elérje a magyar szabvány által a 2H gázminőségre vonatkozó előírásokat, legalább 19,9 mol% (0,555 relatív sűrűség alapján) és legfeljebb 27,3 mol% (felső Wobbe-szám alapján) kereskedelmi propán bekeverése szükséges. A metán-hidrogén gázelegyet a kereskedelmi propánnal történő minőségjavítás esetén vizsgálva megállapítható, hogy 93,0 mol% metántartalomig a maximálisan bekeverhető propánmennyiség meghatározása a felső Wobbe-szám tartomány felső határértéke alapján történik, e feletti metántartalmú metán-hidrogén gázelegy esetén pedig az alsó hőérték tartományának felső határértékére valósul meg a minőségbeállítás, a maximális propánmennyiség meghatározásához. Az ábra alapján 93,0 mol% metántartalmú hidrogén-metán elegy esetében a maximálisan bekeverhető propán mennyiség 15,3 mol%, ezzel elérve az alsó hőérték tartomány felső határát.

Az 5.2. táblázatban összefoglalásra kerültek azok a peremfeltételek, amelyek a vizsgált háromkomponensű rendszer esetében biztosítják a magyar szabványnak való megfelelést 2H gázminőség esetén. Az előzőekben ismertetett vizsgálat eredményei alapján a metán-hidrogén gázelegy ker. propánnal való minőségjavítással akkor felel meg az MSZ 1648:2016 sz. szabvány kritériumainak, amint a háromkomponensű gázelegy relatív sűrűsége eléri az erre a paraméterre vonatkozó 0,555-es alsó határértéket, ami az 5.2. ábrán lévő sraffozott terület alsó határolóvonalát képezi. A propánnal javított gázelegy 93,0 mol% metántartalomig addig tesz eleget a szabvány minden egyes feltételének, amíg el nem éri a felső Wobbe-szám tartomány 54,76 MJ/m<sup>3</sup> felső határértékét. 93,0 mol% CH<sub>4</sub>-tartalomtól viszont a megengedhető tartomány felső határa a felső Wobbe-szám helyett az alsó hőérték tartomány 40,81 MJ/m<sup>3</sup> felső határa. A két határolóvonal között minden egyes pontban megfelel a háromkomponensű elegy a magyar szabvány követelményeinek, így a magyar földgázellátó rendszerbe táplálható.



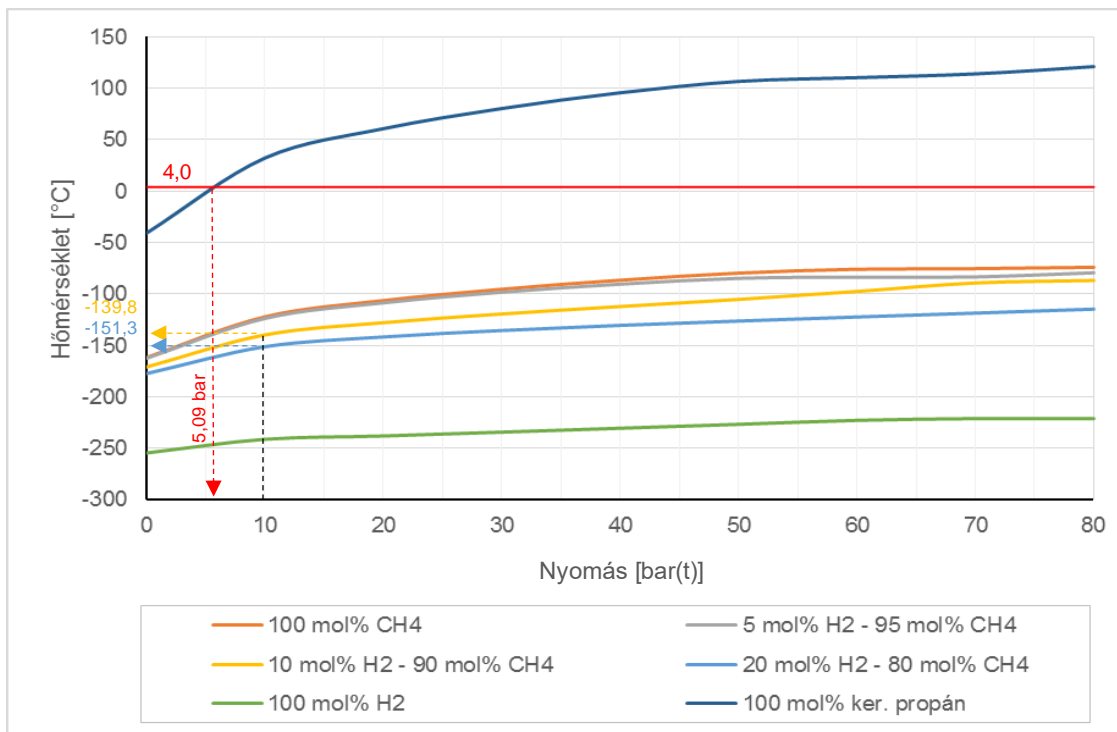
**5.2. táblázat** A metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott gázelegy magyar szabványnak való megfeleltethetőségi peremfeltételei 2H gázminőség esetében

| Peremfeltételek                                     | <93,0 mol% CH <sub>4</sub>  | ≥93,0 mol% CH <sub>4</sub>   |
|---|---|--|
| <b>megfeleltethetőség szerinti alsó határérték</b>  | a metán-hidrogén-ker. propán gázelegy eléri a relatív sűrűségre vonatkozó szabvány szerinti alsó határértéket<br>(0,555)                      |  |
| <b>megfeleltethetőség szerinti felső határérték</b> | a metán-hidrogén-ker. propán gázelegy eléri a felső Wobbe-számra vonatkozó szabvány szerinti felső határértéket<br>(54,76 MJ/m <sup>3</sup> ) | a metán-hidrogén-ker. propán gázelegy eléri az alsó hőértékre vonatkozó szabvány szerinti felső határértéket<br>(40,81 MJ/m <sup>3</sup> ) |

### 5.3 A szénhidrogén-harmatpont jelentősége a földgázok esetében

A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavítása esetén kiemelt figyelmet kell fordítani a szénhidrogén kondenzáció kérdésére. A szénhidrogén-harmatpont az a hőmérséklet, amely alatt állandó nyomáson megindul a szénhidrogén-kondenzáció jelensége vagy a gondolatmenetet megfordítva az a minimális hőmérséklet, amely felett adott nyomáson nem következik be szénhidrogén-kondenzáció (Vida, 1984; Szunyog, 2009). A problémát a földgázban lévő magasabb szénatomszámú szénhidrogének jelentik. A gázvezetékben lévő cseppfolyós szénhidrogén üzemeltetési problémákat okozhat, mind a vezetékkapacitás csökkenése vagy a berendezések károsodása, pl. a kompresszorok, nyomásszabályozó szelepek esetében. A magyar földgázrendszeren szolgáltatott földgázok esetében általában nem jelent problémát a szénhidrogén-kondenzáció jelensége, mivel a földgázelőkészítés során megtörténik a szénhidrogén-harmatpont beállítása. Abban az esetben viszont, ha kereskedelmi minőségű propán kerül bekeverésre a földgázáramba, a megnövekedő propántartalom következtében mindenképpen meg kell vizsgálni a kérdést.

Az 5.3. ábra eltérő arányú metán-hidrogén gázelegyek, valamint a vizsgálatok során alkalmazott kereskedelmi minőségű propán harmatponti görbéit szemlélteti 0-80 bar(t) nyomás és (-300)-150 °C hőmérsékleti tartományban, amely görbék az Aspen HYSYS nevű szimulációs szoftver segítségével kerültek kiszámításra, a gáziparban leggyakrabban alkalmazott Peng-Robinson állapotegyenletek felhasználásával.



**5.3. ábra** A metán-hidrogén gázelegy, valamint a kereskedelmi minőségű propán harmatponti görbéi

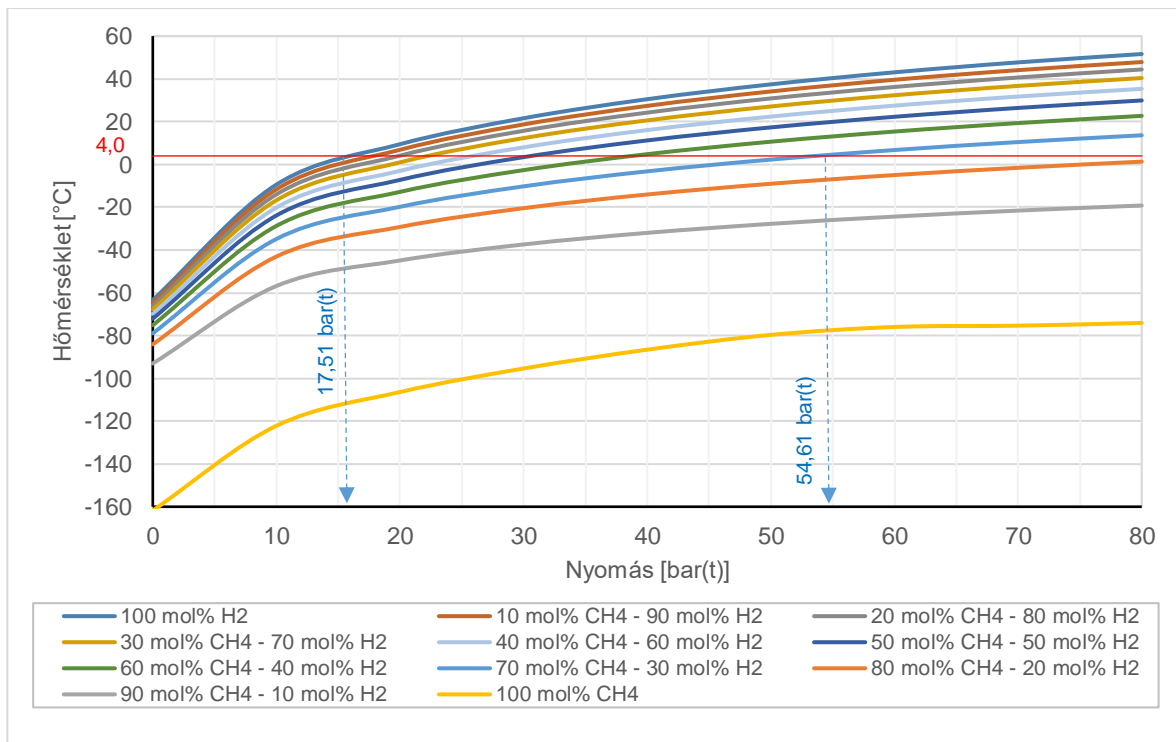
Egy adott gázösszetétel esetén az összetételhez tartozó harmatponti görbe adja meg a kondenzáció nyomás és hőmérséklet közötti összefüggését. A görbék alatt a folyadékfázis, míg a görbék felett a gázfázis tartománya helyezkedik el. Az MSZ 1648:2016 sz. nemzeti szabvány a 2H gázminőség esetében 4 °C-ot határoz meg szénhidrogén-harmatponti hőmérsékletnek, 4 MPa nyomáson. Az 5.3. ábra alapján a vizsgált nyomástartományban a kereskedelmi propán a földgázoknál használatos 4 °C harmatponti-hőmérsékleten már 5,09 bar(t) nyomás felett kondenzálódni kezd.

Az ábrán az is látható, hogy a hidrogén szénhidrogén-harmatpontja jelentősen eltér a metánétól. Míg előbbi értéke (-254,6)-(-221,2) °C között alakul, addig az utóbbié (-161,5)-(-74,1) °C tartományban helyezkedik el 0-80 bar(t) nyomáson, amely alátámasztja a hidrogén cseppfolyósíthatóságának nehézségét. Ez alapján elmondható, hogy a tiszta, 100 mol% hidrogén földgázhálózati megjelenése esetén nem kell szénhidrogén-kondenzációval számolni, amennyiben az nem kerül kereskedelmi propánnal minőségjavításra (szem előtt tartva a jelentős energiatartalombeli különbséget!). A fenti ábrán megfigyelhető, hogy a kizárólag metánt és hidrogént tartalmazó gázelegek szénhidrogén-harmatpontja minden egyes esetben a metán és a hidrogén harmatpontja között helyezkedik el, aminek

földgázellátó rendszeren történő kialakulása kizárható. Ahogy nő a hidrogén részaránya a kétkomponensű rendszerben, úgy tolódik lefelé a harmatponti görbe. Míg 10 mol% H<sub>2</sub>-t tartalmazó gázelegy 10 bar(t) nyomáson -139,8 °C alatt kondenzálódik, addig 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalom esetén ez az érték -151,3 °C-ra csökken. Ezek alapján kijelenthető, hogy a hidrogén földgázhálózati megjelenése, földgázhoz való hozzákeverése kereskedelmi minőségű propán hozzákeverése nélkül nem fokozza a szénhidrogén-kondenzáció jelenségét, az eredetileg szolgáltatott földgáz adott nyomáson jelentkező szénhidrogén-harmatpontját csökkenti, hiszen – összetételéből adódóan – nem növeli meg a földgázösszetétel magasabb szénatomszámú szénhidrogén-tartalmát.

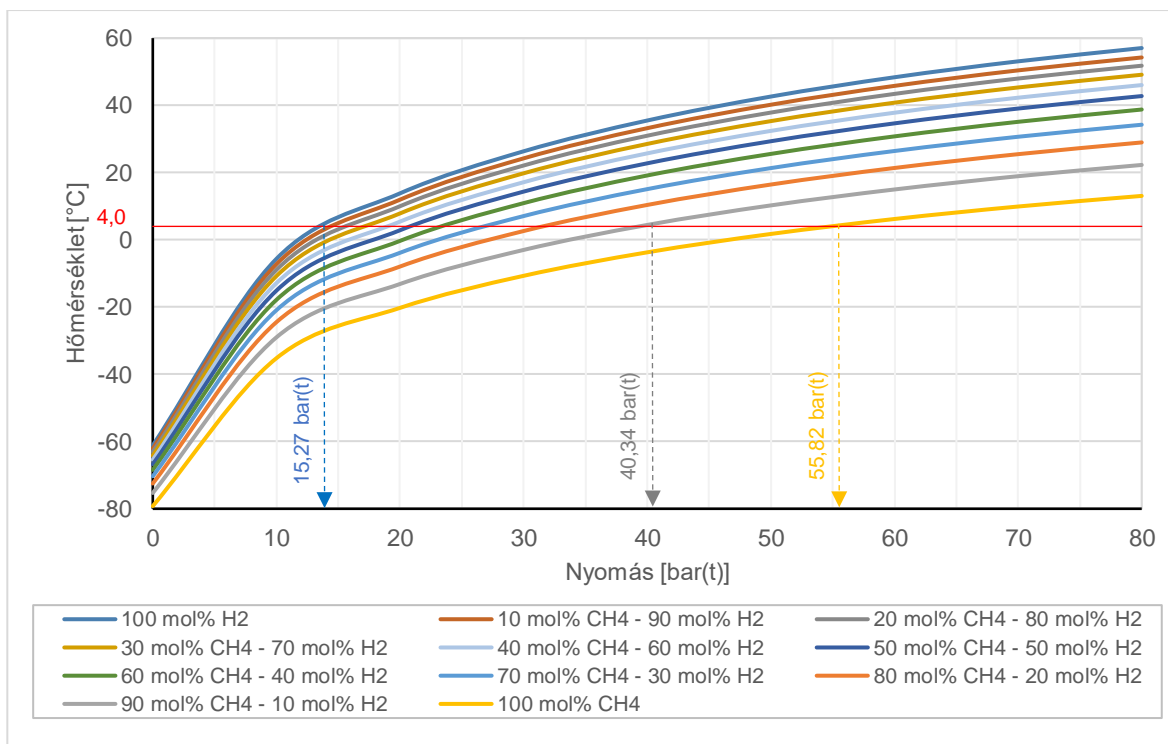
A vizsgálat során nem hagyható figyelmen kívül, hogy a hidrogén földgázhoz való hozzákeverése csökkenti a hőértéket, ezáltal a gázminőséget. A metán-hidrogén-ker. propán gázelegy esetében az előzőleg meghatározott, 5.2. ábrán látható sraffozott terület jeleníti meg a magyar szabványnak megfelelő 2H gázminőséget. Ennek megfelelően megvizsgáltam, hogy a szabványnak megfeleltethető, kereskedelmi propánnal javított 2H gázminőség határoló felületeinél hogyan alakulnak a szénhidrogén-harmatponti görbék a nyomás függvényében, melyek eredményeit az 5.4-5.5. ábrák szemléltetik.

Az 5.4. ábra azoknak a metán-hidrogén-kereskedelmi propán alkotta gázelegynek a szénhidrogén-harmatponti görbéit ábrázolja a nyomás függvényében, amelyek esetében a minőségjavítás az MSZ 1648:2016 sz. szabvány relatív sűrűségének alsó határához (0,555) valósult meg. Az előzőleg tett vizsgálatok alapján ez az az alsó határérték, amelyhez a minőségjavítást elvégezve, az említett szabvány 2H minőségre vonatkozó minden egyes kritériumának megfelel a keletkezett háromkomponensű elegy (lásd 5.2. ábra). Szénhidrogén-kondenzáció a legnagyobb valószínűséggel ott jelentkezik a vizsgált tartományokban, ahol a legnagyobb a kereskedelmi propán mennyisége. A relatív sűrűség alsó határértékéből adódó peremfeltétel esetében tiszta H<sub>2</sub>-tartalomhoz hozzákevert 33,1 mol% ker. propán alkotta gázelegy 4 °C harmatponti hőmérsékleten már 17,51 bar(t) felett kondenzálódni kezd. Ahogy csökken a hidrogéntartalom, ezáltal a minőségjavító propán mennyisége, úgy növekszik a 4 °C szénhidrogén-harmatponti hőmérséklethez tartozó nyomásérték. 30 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú metán-hidrogén gázelegyhez hozzákevert 12,9 mol% ker. propán esetében az előzőleg vizsgált harmatponti hőmérsékleten 54,61 bar(t) felett kezd kondenzálódni. A vizsgálat alapján 21 mol% H<sub>2</sub>-tartalmat nem meghaladó kétkomponensű gázelegy propánnal megvalósuló minőségjavítása esetében nem kell szénhidrogén kondenzációval számolni, egyik esetben sem éri el a 4 °C harmatponti hőmérsékletet a vizsgált nyomástartományban.



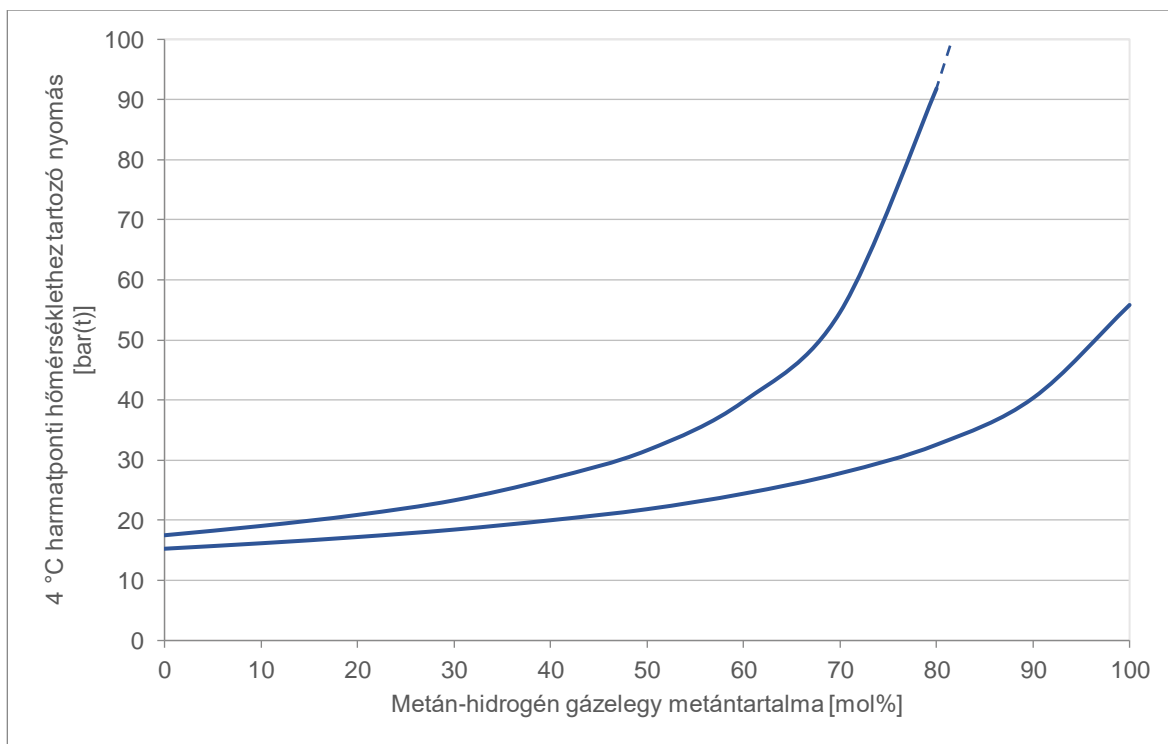
**5.4. ábra** Metán-hidrogén-ker. propán alkotta gázelegy szénhidrogén-harmatponti görbéi az MSZ 1648:2016 sz. szabvány szerinti relatív sűrűségének alsó határértékéhez beállítva 2H gázminőség esetén

Ugyanezen általános megállapítások tehetőek a 2H gázminőség magyar szabvány szerinti felső határának megfeleltetve (lásd [5.2. ábra](#)), amely harmatponti görbéket az [5.5. ábra](#) szemlélteti. Ebben az esetben viszont olyan nagymértékű ker. propán hozzákeverés szükséges a metán-hidrogén gázelegyhez, hogy a keletkezett gázkeverék a földgázoknál alkalmazott 4 °C harmatponti hőmérsékletet a vizsgált nyomástartományban minden esetben elérje. A tiszta hidrogéntartalomhoz hozzákevert 37,4 mol% ker. propán már 15,27 bar(t) nyomás felett, 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú kétkomponensű gázelegyhez kevert 16,3 mol% propán 40,34 bar(t) felett kondenzálódik.



**5.5. ábra** Metán-hidrogén-ker. propán alkotta gázelegy szénhidrogén-harmatponti görbéi az MSZ 1648:2016 sz. szabvány szerinti megfeleléség felső határához beállítva 2H gázminőség esetén

Az 5.6. ábra a hazai gyakorlatban alkalmazott 4 °C harmatponti hőmérséklethez tartozó szénhidrogén-harmatponti görbéket jeleníti meg a magyar szabvány szerinti 2H gázminőségnek megfelelően a határesetként vizsgált metán-hidrogén-ker. propán gázelegyek esetében. Láthatóan ahogy nő a metán-hidrogén gázelegy CH<sub>4</sub>-tartalma, vagyis a kétkomponensű gázelegy térfogategységre vonatkoztatott energiatartalma, úgy csökken a hozzákevert ker. propán mennyisége. Ennek következtében az a nyomásérték is nő, amely felett 4 °C-on a ker. propán kondenzálódik. A vizsgálati eredményekből az is kiderül, hogy a kereskedelmi propánnal történő minőségjavítás esetében kiemelt figyelmet kell fordítani a szénhidrogén-kondenzáció kérdésére, mivel már 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú metán-hidrogén gázelegy propánnal megvalósuló minőségjavítása során 40,3 bar(t) nyomás felett szénhidrogén-kondenzáció jelentkezik, amennyiben a minőségjavítás a szabvány szerinti megfeleléség alsó határához történik (lásd 5.3. ábra). A felső görbe esetében szaggatott vonal látható, amely azt jelenti, hogy az említett szabvány felső határértékéhez elvégezve a minőségjavítást, 80 mol% CH<sub>4</sub>-tartalmú metán-hidrogén elegy ker. propánnal keverve nem éri el a 4 °C harmatponti hőmérsékletet. A nagy részarányú metántartalom, valamint az 5 mol% alatt maradó kereskedelmi propán mennyiséggel jelentősen ezen hőmérséklet alatt marad.



**5.6. ábra** Metán-hidrogén-ker. propán alkotta gázelegység 4 °C hőmérsékleten jelentkező szénhidrogén-harmatponti görbéi az MSZ 1648:2016 sz. szabvány szerinti megfelelőség alsó és felső határértékéhez beállítva 2H gázminőség esetén

Az 5.3. táblázat a fenti ábráról leolvasható, 4 °C harmatponti hőmérsékletéhez tartozó nyomásértékeket jeleníti meg a metántartalom függvényében.

**5.3. táblázat** A metán-hidrogén-ker. propán gázelegység MSZ 1648:2016 szabványnak való megfeleltethetőségi határoknál jelentkező összetétel melletti nyomásértékek 4 °C harmatponti hőmérsékleten

| 4 °C harmatponti hőmérsékletéhez tartozó nyomások | Metán-hidrogén gázelegység CH <sub>4</sub> -tartalma [mol%] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Mértékegység |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
|   | 0   | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |              |
| alsó határérték                                   | 15,27   | 16,18 | 17,22 | 18,45 | 20,01 | 21,85 | 24,43 | 27,82 | 32,58 | 40,34 | 55,82 | bar(t)       |
| felső határérték                                  | 17,51   | 19,06 | 20,90 | 23,32 | 26,92 | 31,64 | 39,77 | 54,61 | 91,83 | -     | -     | bar(t)       |

## 6 A hidrogéntartalom hatása a földgázok víztartalmára vonatkozóan

A gázhálózatba betáplált földgáz egyik fontos paramétere a vízgőztartalom, amelynek értéke Magyarországon jogszabályban rögzített. Jelen fejezetben annak vizsgálata kerül bemutatásra, hogy a metán tulajdonságaitól jelentősen eltérő hidrogén okoz-e változást a víztelítettségben és amennyiben igen, mekkora mértékű változást jelent a közszolgáltatásban alkalmazott földgázhoz keverve.

### 6.1 A vízharmpont jelentősége a földgázok esetében

A megtermelt földgázok víztartalmát a rezervoár tulajdonságai határozzák meg. Ez a nem kívánatos víztartalom jelentős része a földgáz előkészítésekor leválasztásra kerül a vízharmpont beállítása során a földgázhálózati betáplálás előtt.

A földgázban oldott víztartalom veszélye abban áll, hogy szállítás során a nyomás- és/vagy hőmérsékletcsökkenés hatására a vízgőz kondenzálódhat és a vezeték mélypontjaiban összegyűlve vagy folyékony, vagy szilárd (pl. metán-hidrát) állapotban csökkenti az áramlási keresztmetszetet (*Speight, 2019*). Emellett a víz korrozív hatású a fém elemekre, amely hatás  $\text{CO}_2$ - és  $\text{H}_2\text{S}$ -tartalom jelenlétében felerősödik. A földgázban jelenlévő víztartalom a vezeték szerkezeti elemeire, valamint a hozzájuk kapcsolódó fogyasztó-berendezésekre is negatív hatást gyakorol. Emiatt történik meg minden esetben a földgáz vízharmpontjának beállítása (*Tihanyi-Zsuga, 2012*).

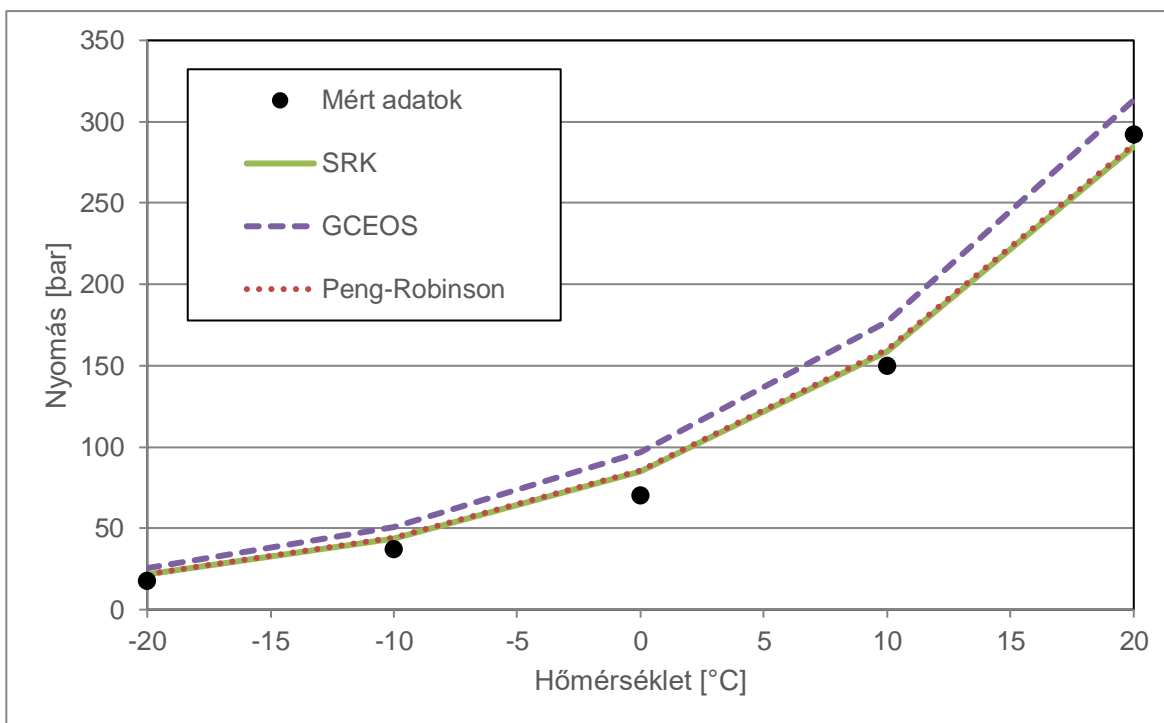
A gázok akkor érik el a telített víztartalmat, amikor a bennük oldott vízgőz parciális nyomása megegyezik a víz adott hőmérsékleten érvényes egyensúlyi gőznyomásával. Amint a telített gáz hőmérséklete csökken, a benne oldott víz kicsapódása megkezdődik. A földgázok harmpontja tehát az a hőmérséklet, amelyen a gáz vízgőztartalmának megfelelő parciális nyomás egyenlő a víz gőznyomásával. A harmponti hőmérséklet jelentős mértékben függ a nyomástól, azonos nedvességtartalom esetén a nyomás növekedésével nő. Egy adott harmponti hőmérséklet értékhez nagyobb nyomáson kisebb abszolút nedvességtartalom tartozik (*Campbell, 2014*).

A vízharmpont-beállítás után a hazai földgázellátó rendszerben található gázminőségek gyakorlatilag száraz gáznak tekinthetők, ezáltal a Magyarországon jelentkező szállítási és elosztási nyomásokon a vízkondenzáció nem jellemző. A magyar szabvány a maximális vízgőztartalomra ad útmutatást, amelyet a 2H minőségű földgáz esetében  $170 \text{ mg/nm}^3$

mennyiségben szabályoz. Ez a határérték nagyon magasnak bizonyul az európai tagországokhoz viszonyítva, pl. Hollandiában  $60 \text{ mg/nm}^3$  a megengedett maximum. A CEN által létrehozott MSZ 16726:2016 sz. szabvány erre vonatkozóan  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$  harmatponti hőmérsékletet határoz meg  $70 \text{ bar(a)}$  nyomáson, amely szigorúbb az európai átlagnál, és az előzőekből következően az MSZ 1648:2016 sz. szabvány ide vonatkozó rendelkezésénél is, mivel  $65 \text{ mg/nm}^3$  maximális vízgőztartalmat jelent (Szunyog, 2009).

## 6.2 A víztelítettség változásának vizsgálatához alkalmazott modell bemutatása

A fölgázhoz kevert hidrogén víztelítettségre gyakorolt hatásának vizsgálata az Aspen HYSYS nevű szimulációs szoftver segítségével lett elvégezve. A modellvizsgálatokhoz alkalmazott állapotegyenlet kiválasztásánál a nemzetközi szakirodalomban publikált, laboratóriumban mért adatokra kerültek illesztésre különböző állapotegyenletek segítségével számított, földgázra vonatkozó víztelítettség értékek a nyomás és hőmérséklet függvényében (Christensen és tsai, 2011).



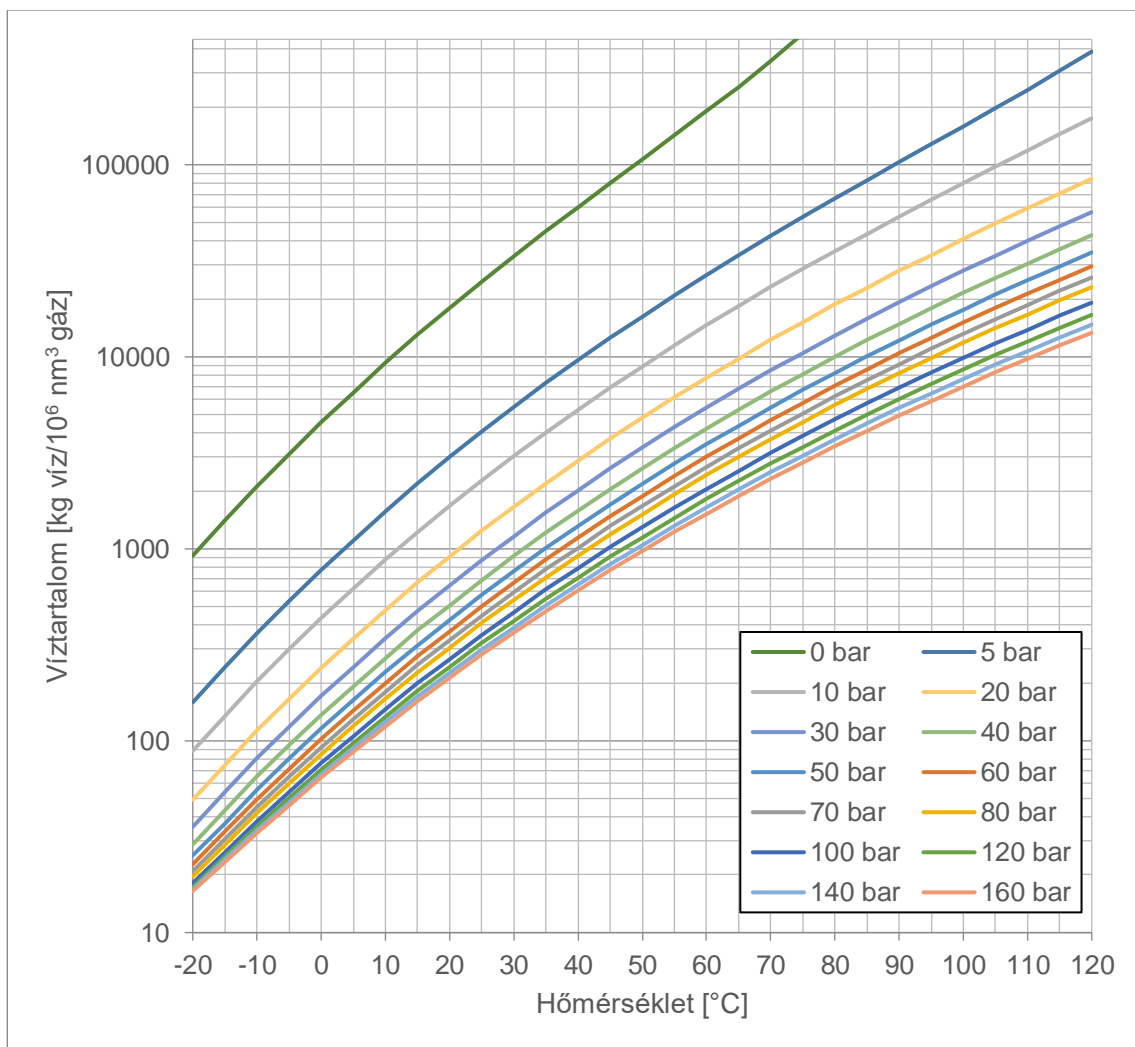
Megjegyzés: SRK – Soave-Redlich-Kwong, GCEOS – köbös állapotegyenletek (General Cubic Equation Of State)

**6.1. ábra** A mért adatokra történő görbeillesztés az alkalmazandó állapotegyenlet kiválasztásához



A 6.1. ábrán a mérés során keletkezett pontokhoz az eltérő állapotegyenletek alkalmazásával számított legközelebb eső görbék kerültek feltüntetésre. A mért és a szoftverrel számított adatok összehasonlítása alapján a reális gázokra a legszélesebb körben alkalmazott Peng-Robinson állapotegyenlet lett alkalmazva a víztelítettségre vonatkozó modellvizsgálatok során.

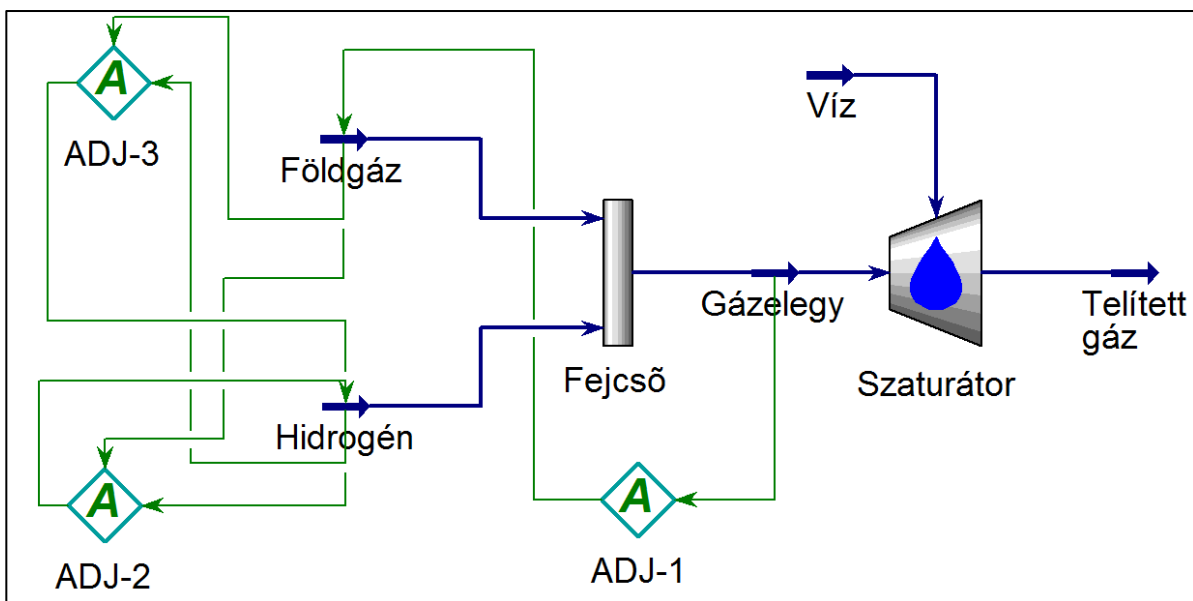
A földgázban jelen lévő hidrogéntartalom víztelítettségre gyakorolt hatásának elemzéséhez meghatározásra került a 100 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú gáz különböző nyomásokon és hőmérsékleteken érvényes víztelítettsége. A szimuláció a (-20)-120 °C hőmérséklet- és 0-160 bar(t) nyomástartományon került elvégzésre, amelynek grafikus megjelenítése a 6.2. ábrán látható.



**6.2. ábra** A tiszta hidrogén víztelítettségeének változása a nyomás és a hőmérséklet függvényében

A hidrogén telítettségi görbéinek alakulása alapján megállapítható, hogy a legnagyobb víztartalom légtörési nyomáson és közvetlen 100 °C alatti hőmérsékleten jelentkezik. 100 °C feletti hőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson a víz forrni kezd, amely hatására korlátlan mennyiségű vízgőz képes az adott gázhoz elegyedni anélkül, hogy kondenzáció jelentkezne, amely esetben a víztelítettség kérdésköre már nem értelmezhető. A hidrogénben oldott víztartalom a hőmérséklet emelkedésével nő, amíg a nyomás emelkedésével egyre csökken, ebből következően a legkisebb mértékű víztelítettség a vizsgálati tartományban 160 bar nyomáson és -20 °C-on jelentkezett.

A földgázhoz kevert hidrogén hatására bekövetkező víztelítettség-változás vizsgálatához felépített Aspen HYSYS modell a 6.3. ábrán látható.



**6.3. ábra** A szimulációs vizsgálatokhoz alkalmazott modell felépítése

A szimulációs modellben a magyar közszolgáltatásban alkalmazott tipikus 2H és 2S minőségű földgázösszetételhez kerül hidrogén bekeverésre egy közös fejcsövön keresztül. A földgáz-hidrogén gázelegy ezután egy szaturátorba kerül, ahol az adott nyomáson és hőmérsékleten vízgőzzel telítődik, azaz eléri a maximális víztelítettség értéket úgy, hogy folyadék fázis nem jelentkezik.

A szimuláció során a fejcsőhöz vezetett földgáz és a hidrogén azonos nyomással és hőmérséklettel rendelkezik. A vizsgálatokat 5-10-15 és 20 mol% hidrogéntartalmú gázelegy esetén végeztem el – hiszen a közeljövőben maximálisan ekkora bekevert mennyiség

vélelmezhető a korábban bemutatott kutatások eredményei alapján –, ahol a vizsgálati nyomástartomány 0-160 bar(t) volt, 5 bar lépésközönként, melyekhez rendre megvizsgáltam a víztelítettség értékeket a (-20)-120 °C hőmérséklettartományban 5 °C hőmérséklet lépcsőnként.

A modellben elhelyezett ADJ-1 jelű elem feladata, hogy a keletkezett gázelegyet állandó térfogatáramon tartsa. Ahogyan növekszik a hidrogéntartalom a gázelegyben, úgy csökken a földgáz térfogatárama a konstans térfogatáram eléréséhez. Az ADJ-2 jelű elem a metán és a hidrogén nyomásának, míg az ADJ-3 jelű elem a hőmérsékletének állandó értéken tartásáért felel.

### **6.3 A hazai közszolgáltatásban alkalmazott gázminőségek víztelítettség-változásának vizsgálata**

A víztelítettség változás meghatározására irányuló vizsgálatok a magyar közszolgáltatásban alkalmazott 2H és 2S gázminőségekre kerültek elvégzésre, megvizsgálva azt, hogy jelentős hidrogéntartalom földgázhálózati megjelenése milyen mértékben befolyásolja a földgázban jelenlévő telített vízgőztartalom alakulását. A 2H gázminőség esetén az MSZ EN 437:1999 Vizsgálógázok. Vizsgálónyomások. Készülékkategóriák c. európai harmonizált szabvány a hidrogént, mint a visszagyulladás határgáz (G222) összetevőjét már alkalmazta a 2H gázminőségre végzett gázkészülék vizsgálatok során 23 mol% mennyiségben. Ebből következőleg elméletileg az 1999 óta Magyarországon forgalomba hozott gázkészülékeknek is el kellene viselnie ezt a hidrogén hányadot. Emellett fontos megemlíteni, hogy ilyen határértékkel történő üzemeltetés nem tekinthető normál üzemállapotnak. A jelen fejezetben bemutatott vizsgálat során a földgázhálózatba betáplálható hidrogéntartalom éppen ezért 20 mol% értéken került maximalizálásra a víztelítettség változásra vonatkozóan.

Az elvégzett szimulációk során mind az eredeti gázelegyek, mind a hidrogén hozzáadása után keletkező összetételek megfelelnek az MSZ 1648:2016 sz. nemzeti gázminőségi szabványban megfogalmazott minőségi követelményeknek, amelyek – beemelve a 2008. évi XL. törvény a földgázellátásról (GET) végrehajtási rendeletének (19/2009. [I. 30.] Korm. rendelet a földgázellátásról szóló 2008. évi XL. törvény rendelkezéseinek végrehajtásáról) (VHR) 11. számú mellékletébe - a földgázhálózati betáplálás alapját teremti meg Magyarországon.

A 6.1. táblázatban szereplő 2H gázminőséget bemutató mintagáz egy jellemző, orosz importforrásból származó gázösszetétel, amely nagy metántartalommal, kevés magasabb rendű szénhidrogén-tartalommal és kevesebb, mint 1 mol% nem éghető, inerttartalommal (szén-dioxid és nitrogén) rendelkezik. A 2H minőségi csoportba sorolható mintagáz a vizsgált 20 mol% hidrogéntartalomig megfelel a szabványban előírányzott követelményeknek, amely részarány jelentősen meghaladja az európai nemzetek földgázhálózati gázminőségi előírásaiban megfogalmazott, a hidrogéntartalomra vonatkozó határértéket. Ez az érték Franciaország esetében 6 mol%, Spanyolország esetében 5 mol%, Belgium esetében 2 mol%, míg Hollandia és Olaszország 0,5 mol% értéken maximálja a földgázhálózatba betáplálható hidrogéntartalmat (*Marcogaz, 2020*).

**6.1. táblázat** A vizsgálatokhoz felhasznált gázösszetételek

| Komponens                         | Képlet                           | 2H <sup>1</sup> | 2H +<br>20% H <sub>2</sub> | 2S elméleti | 2S elméleti<br>+ 10% H <sub>2</sub> |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------|-------------|-------------------------------------|
| Metán                             | CH <sub>4</sub>                  | 97,94           | 78,34                      | 88,11       | 79,30                               |
| Etán                              | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 0,81            | 0,65                       | 0,00        | 0,00                                |
| Propán                            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 0,28            | 0,23                       | 0,00        | 0,00                                |
| i-Bután                           | i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,05            | 0,04                       | 0,00        | 0,00                                |
| n-Bután                           | n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,05            | 0,04                       | 0,00        | 0,00                                |
| i-Pentán                          | i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,01            | 0,01                       | 0,00        | 0,00                                |
| n-Pentán                          | n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,01            | 0,01                       | 0,00        | 0,00                                |
| Hidrogén                          | H <sub>2</sub>                   | 0,00            | 20,00                      | 0,00        | 10,00                               |
| Szén-dioxid                       | CO <sub>2</sub>                  | 0,05            | 0,04                       | 11,89       | 10,70                               |
| Nitrogén                          | N <sub>2</sub>                   | 0,80            | 0,64                       | 0,00        | 0,00                                |
| <b>Tüzeléstechnikai jellemzők</b> | <b>Mértékegység</b>              |                 |                            |             |                                     |
| relatív sűrűség                   | -                                | 0,60            | 0,49                       | 0,71        | 0,64                                |
| Wobbe-szám*                       | MJ/m <sup>3</sup>                | 48,90           | 46,60                      | 39,50       | 38,78                               |
| alsó hőérték                      | MJ/m <sup>3</sup>                | 34,12           | 29,35                      | 29,91       | 27,94                               |
| felső hőérték                     | MJ/m <sup>3</sup>                | 37,88           | 32,73                      | 33,22       | 31,11                               |

<sup>1</sup>Az összetétel a *Szunyog, 2009* hivatkozás alapján került meghatározásra.

\*felső hőértékből számítva

Mivel a 6.2. ábrához hasonló szemléltetés nem célravezető az eltérések bemutatására, ezért a 2H gázminőséghez kevert 20 mol% hidrogéntartalom okozta, a telített vízgőzmenyiségekben jelentkező eltéréseket a 6.2. táblázat szemlélteti. A táblázatban

szereplő mennyiségek megmutatják a hidrogéntartalom vízhamatpont módosító hatását adott nyomás- és hőmérsékletviszonyok mellett. A pozitív értékek (zöldbe hajló színezés) azt mutatják meg, hogy a hidrogén hozzáadása hány százalékkal növelte meg a gázelegy vízgőztartalmát, a negatív értékek (pirosba hajló színezés) az adott fizikai állapotban oldható vízgőz mennyiségének százalékos csökkenését írják le. Az eredmények tanulsága alapján légköri nyomáson a hidrogén csökkenti a földgázhoz maximálisan elegyíthető vízgőz mennyiségét, viszont magasabb nyomásokon ez a hatás megfordul, és a gázkeverék több vizet képes gőzfázisban tartani adott nyomáson és hőmérsékleten, mint a hidrogénmentes minta gázösszetétel. Általánosságban elmondható, hogy a nyomás növelésével ez az eltérés nő, a vizsgált intervallumban 4,04% a maximális értéke a vizsgált 2H mintagáz esetében. Ha figyelembe vesszük azt, hogy Magyarországon a földgázvezetési minőségű gázok harmatpontjának beállítása a gázelőkészítés során max. 70 bar nyomáson történik, akkor 20 mol% hidrogéntartalom jelenlétében a víztelítettség változásának értéke legfeljebb 3,09% az eredeti gázösszetételhez viszonyítva.

**6.2. táblázat** A 2H minőségű mintagáz 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalom esetén jelentkező vízgőztartalom százalékos eltérése az eredeti mintagázhoz viszonyítva

|                  |        | Nyomás [bar(t)] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|--------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |        | 0               | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   | 110   | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   |
| Hőmérséklet [°C] | -20    | -0,023          | 0,690 | 1,339 | 1,910 | 2,384 | 2,742 | 2,969 | 3,057 | 3,014 | 2,868 | 2,662 | 2,452 | 2,288 | 2,208 | 2,230 | 2,357 | 2,579 |
|                  | -15    | -0,026          | 0,653 | 1,279 | 1,835 | 2,308 | 2,682 | 2,947 | 3,096 | 3,136 | 3,086 | 2,977 | 2,850 | 2,743 | 2,689 | 2,707 | 2,805 | 2,980 |
|                  | -10    | -0,030          | 0,619 | 1,219 | 1,759 | 2,225 | 2,608 | 2,897 | 3,090 | 3,191 | 3,214 | 3,182 | 3,124 | 3,071 | 3,048 | 3,075 | 3,161 | 3,308 |
|                  | -5     | -0,033          | 0,586 | 1,161 | 1,682 | 2,140 | 2,525 | 2,830 | 3,054 | 3,199 | 3,277 | 3,305 | 3,304 | 3,298 | 3,308 | 3,349 | 3,433 | 3,564 |
|                  | 0      | -0,036          | 0,554 | 1,105 | 1,608 | 2,054 | 2,437 | 2,752 | 2,997 | 3,174 | 3,294 | 3,367 | 3,412 | 3,445 | 3,484 | 3,543 | 3,631 | 3,755 |
|                  | 5      | -0,039          | 0,524 | 1,052 | 1,536 | 1,970 | 2,348 | 2,667 | 2,926 | 3,127 | 3,276 | 3,385 | 3,465 | 3,531 | 3,596 | 3,672 | 3,768 | 3,890 |
|                  | 10     | -0,042          | 0,496 | 1,001 | 1,467 | 1,888 | 2,260 | 2,579 | 2,847 | 3,064 | 3,235 | 3,370 | 3,478 | 3,570 | 3,657 | 3,749 | 3,854 | 3,977 |
|                  | 15     | -0,045          | 0,469 | 0,953 | 1,401 | 1,808 | 2,172 | 2,490 | 2,762 | 2,989 | 3,177 | 3,332 | 3,461 | 3,574 | 3,679 | 3,785 | 3,898 | 4,024 |
|                  | 20     | -0,047          | 0,444 | 0,907 | 1,338 | 1,732 | 2,086 | 2,401 | 2,674 | 2,908 | 3,108 | 3,277 | 3,422 | 3,551 | 3,671 | 3,788 | 3,909 | 4,038 |
|                  | 25     | -0,050          | 0,420 | 0,864 | 1,277 | 1,658 | 2,003 | 2,312 | 2,585 | 2,823 | 3,030 | 3,209 | 3,366 | 3,508 | 3,639 | 3,766 | 3,894 | 4,026 |
|                  | 30     | -0,053          | 0,397 | 0,822 | 1,220 | 1,587 | 1,923 | 2,225 | 2,496 | 2,735 | 2,946 | 3,133 | 3,299 | 3,450 | 3,590 | 3,724 | 3,857 | 3,993 |
|                  | 35     | -0,055          | 0,376 | 0,783 | 1,165 | 1,519 | 1,845 | 2,141 | 2,407 | 2,647 | 2,860 | 3,051 | 3,223 | 3,380 | 3,527 | 3,668 | 3,805 | 3,943 |
|                  | 40     | -0,058          | 0,355 | 0,746 | 1,113 | 1,454 | 1,770 | 2,059 | 2,321 | 2,558 | 2,771 | 2,965 | 3,141 | 3,303 | 3,455 | 3,600 | 3,741 | 3,880 |
|                  | 45     | -0,060          | 0,335 | 0,710 | 1,063 | 1,392 | 1,698 | 1,979 | 2,236 | 2,470 | 2,683 | 2,877 | 3,055 | 3,220 | 3,375 | 3,523 | 3,666 | 3,807 |
|                  | 50     | -0,063          | 0,316 | 0,676 | 1,015 | 1,333 | 1,628 | 1,901 | 2,153 | 2,384 | 2,596 | 2,788 | 2,967 | 3,134 | 3,291 | 3,440 | 3,585 | 3,727 |
|                  | 55     | -0,065          | 0,298 | 0,643 | 0,969 | 1,275 | 1,561 | 1,826 | 2,072 | 2,298 | 2,507 | 2,701 | 2,880 | 3,045 | 3,203 | 3,354 | 3,499 | 3,641 |
|                  | 60     | -0,068          | 0,280 | 0,612 | 0,925 | 1,221 | 1,497 | 1,754 | 1,993 | 2,215 | 2,421 | 2,612 | 2,790 | 2,957 | 3,116 | 3,267 | 3,413 | 3,556 |
|                  | 65     | -0,071          | 0,263 | 0,582 | 0,883 | 1,168 | 1,435 | 1,684 | 1,917 | 2,134 | 2,336 | 2,524 | 2,700 | 2,866 | 3,024 | 3,175 | 3,320 | 3,462 |
|                  | 70     | -0,074          | 0,247 | 0,553 | 0,843 | 1,117 | 1,375 | 1,617 | 1,843 | 2,055 | 2,252 | 2,438 | 2,612 | 2,776 | 2,932 | 3,082 | 3,226 | 3,366 |
|                  | 75     | -0,077          | 0,231 | 0,525 | 0,804 | 1,068 | 1,318 | 1,552 | 1,772 | 1,978 | 2,171 | 2,353 | 2,524 | 2,686 | 2,841 | 2,989 | 3,132 | 3,271 |
| 80               | -0,081 | 0,215           | 0,498 | 0,767 | 1,022 | 1,262 | 1,489 | 1,702 | 1,903 | 2,092 | 2,270 | 2,438 | 2,598 | 2,750 | 2,897 | 3,038 | 3,175 |       |
| 85               | -0,085 | 0,200           | 0,472 | 0,731 | 0,976 | 1,209 | 1,428 | 1,635 | 1,830 | 2,015 | 2,189 | 2,354 | 2,511 | 2,661 | 2,805 | 2,944 | 3,079 |       |
| 90               | -0,089 | 0,185           | 0,447 | 0,696 | 0,933 | 1,157 | 1,369 | 1,570 | 1,760 | 1,939 | 2,110 | 2,271 | 2,425 | 2,573 | 2,714 | 2,851 | 2,984 |       |
| 95               | -0,093 | 0,170           | 0,422 | 0,662 | 0,890 | 1,107 | 1,313 | 1,507 | 1,692 | 1,866 | 2,032 | 2,191 | 2,342 | 2,486 | 2,625 | 2,760 | 2,891 |       |
| 100              | -0,093 | 0,156           | 0,398 | 0,629 | 0,849 | 1,059 | 1,257 | 1,446 | 1,625 | 1,795 | 1,957 | 2,112 | 2,260 | 2,401 | 2,538 | 2,670 | 2,799 |       |
| 105              | -0,093 | 0,141           | 0,374 | 0,597 | 0,810 | 1,012 | 1,204 | 1,387 | 1,561 | 1,726 | 1,884 | 2,035 | 2,179 | 2,318 | 2,452 | 2,582 | 2,708 |       |
| 110              | -0,093 | 0,127           | 0,351 | 0,566 | 0,771 | 0,966 | 1,152 | 1,329 | 1,498 | 1,659 | 1,813 | 1,960 | 2,101 | 2,237 | 2,368 | 2,495 | 2,619 |       |
| 115              | -0,093 | 0,112           | 0,329 | 0,536 | 0,733 | 0,922 | 1,102 | 1,273 | 1,437 | 1,594 | 1,743 | 1,887 | 2,025 | 2,158 | 2,286 | 2,411 | 2,532 |       |
| 120              | -0,093 | 0,098           | 0,306 | 0,506 | 0,697 | 0,879 | 1,053 | 1,219 | 1,378 | 1,530 | 1,676 | 1,815 | 1,950 | 2,080 | 2,206 | 2,328 | 2,446 |       |

A 2S gázminőség alacsonyabb hőértékkel jellemezhető a nagyobb inerttartalom és alacsonyabb szénhidrogéntartalom következtében. Ebbe a gázcsoportba főként hazai gáztermelő mezőkből származó gázok tartoznak (pl. Kardoskút) (Szilágyi-Szunyog, 2017).

A 2S gázminőségi csoportba tartozó gázok maximális víztartalmára legnagyobb hatást a gázelegy szén-dioxid tartalma gyakorol, mivel több mint másfélszer annyi vízgőz elegyíthető hozzá, mint bármely, a metánnál nehezebb szénhidrogénhez. Emiatt a 2S gázcsoportba tartozó gázminőség vizsgálata során egy kizárólag metánból és szén-dioxidból álló gázelegy került feltételezésre. A földgázt alkotó fő komponensek, valamint a hidrogén víztelítettségére vonatkozó Aspen HYSYS szimulációs szoftverrel elvégzett vizsgálat eredményeit a 6.3. táblázat tartalmazza.

**6.3. táblázat** A földgáz komponenseinek telített vízgőztartalma gáztechnikai normálállapotban az Aspen HYSYS szimulációs szoftverrel számítva

| Komponens   | Képlet                           | Telített vízgőztartalom<br>(15 °C; 101 325 Pa)<br>[kg víz/10 <sup>6</sup> nm <sup>3</sup> gáz] |
|-------------|----------------------------------|--|
| Metán       | CH <sub>4</sub>                  | 12 990   |
| Etán        | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 3 657 423  |
| Propán      | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 3 508 988  |
| i-Bután     | i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 2 933 244  |
| n-Bután     | n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 3 041 748  |
| Hidrogén    | H <sub>2</sub>                   | 12 964   |
| Szén-dioxid | CO <sub>2</sub>                  | 5 829 425  |
| Nitrogén    | N <sub>2</sub>                   | 13 115   |

A vizsgált 2S minőségű gázelegy összetétele – amely az előbbieken említettekből kifolyólag csak metánból és szén-dioxidból épül fel – olyan módon került meghatározásra, hogy a lehető legnagyobb mértékű legyen a szén-dioxid tartalom az MSZ 1648:2016 sz. szabványnak megfelelően, mind a hidrogén hozzákeverése előtti és utáni állapotban. A vizsgálatokat szintén elvégeztem 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalom jelenlétében, viszont ebben az esetben nem lehetséges egy olyan metán-szén-dioxid-hidrogén elegyet létrehozni, amely megfeleltethető a földgázhálózati betáplálás minőségi feltételeinek. A szimuláció során a csupán metánt és szén-dioxidot tartalmazó gázelegyhez legfeljebb 10 mol% H<sub>2</sub> keverhető úgy, hogy teljesüljön a gázminőségi előírásoknak való megfelelés feltétele.

**6.4. táblázat** A 2S minőségű elméleti gázelegy 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalom esetén jelentkező vízgőztartalom százalékos eltérése az eredeti mintagázhoz viszonyítva

|                  |        | Nyomás [bar(t)] |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------|--------|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  |        | 0               | 10    | 20    | 30    | 40    | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     | 100    | 110    | 120    | 130    | 140    | 150    | 160    |
| Hőmérséklet [°C] | -20    | -0,034          | 0,128 | 0,211 | 0,193 | 0,043 | -0,271 | -0,783 | -1,498 | -2,417 | -3,470 | -4,545 | -5,511 | -6,266 | -6,769 | -7,032 | -7,102 | -7,016 |
|                  | -15    | -0,035          | 0,119 | 0,205 | 0,203 | 0,092 | -0,154 | -0,556 | -1,114 | -1,839 | -2,672 | -3,545 | -4,368 | -5,063 | -5,577 | -5,915 | -6,079 | -6,104 |
|                  | -10    | -0,036          | 0,112 | 0,199 | 0,211 | 0,130 | -0,062 | -0,379 | -0,828 | -1,388 | -2,058 | -2,766 | -3,458 | -4,072 | -4,565 | -4,926 | -5,146 | -5,247 |
|                  | -5     | -0,037          | 0,105 | 0,193 | 0,216 | 0,160 | 0,011  | -0,239 | -0,596 | -1,054 | -1,581 | -2,157 | -2,733 | -3,265 | -3,718 | -4,069 | -4,317 | -4,463 |
|                  | 0      | -0,038          | 0,098 | 0,187 | 0,219 | 0,183 | 0,069  | -0,129 | -0,414 | -0,780 | -1,213 | -1,677 | -2,156 | -2,611 | -3,014 | -3,345 | -3,595 | -3,764 |
|                  | 5      | -0,039          | 0,093 | 0,182 | 0,220 | 0,200 | 0,114  | -0,042 | -0,269 | -0,564 | -0,914 | -1,302 | -1,694 | -2,080 | -2,433 | -2,734 | -2,975 | -3,152 |
|                  | 10     | -0,039          | 0,087 | 0,176 | 0,220 | 0,213 | 0,150  | 0,028  | -0,154 | -0,392 | -0,676 | -0,994 | -1,328 | -1,649 | -1,954 | -2,223 | -2,448 | -2,622 |
|                  | 15     | -0,040          | 0,082 | 0,170 | 0,218 | 0,222 | 0,178  | 0,083  | -0,062 | -0,254 | -0,486 | -0,747 | -1,024 | -1,302 | -1,568 | -1,797 | -2,001 | -2,166 |
|                  | 20     | -0,040          | 0,077 | 0,164 | 0,216 | 0,229 | 0,199  | 0,127  | 0,011  | -0,144 | -0,333 | -0,548 | -0,778 | -1,011 | -1,238 | -1,448 | -1,633 | -1,777 |
|                  | 25     | -0,041          | 0,072 | 0,158 | 0,213 | 0,233 | 0,216  | 0,162  | 0,071  | -0,055 | -0,209 | -0,386 | -0,577 | -0,774 | -0,967 | -1,148 | -1,311 | -1,452 |
|                  | 30     | -0,042          | 0,068 | 0,152 | 0,209 | 0,234 | 0,228  | 0,189  | 0,118  | 0,018  | -0,108 | -0,254 | -0,413 | -0,578 | -0,742 | -0,898 | -1,041 | -1,167 |
|                  | 35     | -0,043          | 0,064 | 0,147 | 0,204 | 0,235 | 0,237  | 0,210  | 0,156  | 0,076  | -0,026 | -0,146 | -0,278 | -0,417 | -0,556 | -0,690 | -0,815 | -0,926 |
|                  | 40     | -0,052          | 0,059 | 0,141 | 0,200 | 0,234 | 0,243  | 0,226  | 0,186  | 0,123  | 0,040  | -0,058 | -0,168 | -0,284 | -0,402 | -0,516 | -0,624 | -0,722 |
|                  | 45     | -0,044          | 0,055 | 0,135 | 0,194 | 0,232 | 0,246  | 0,239  | 0,210  | 0,161  | 0,094  | 0,014  | -0,077 | -0,174 | -0,273 | -0,371 | -0,464 | -0,549 |
|                  | 50     | -0,045          | 0,051 | 0,130 | 0,189 | 0,229 | 0,248  | 0,247  | 0,228  | 0,191  | 0,138  | 0,073  | -0,001 | -0,082 | -0,166 | -0,249 | -0,329 | -0,403 |
|                  | 55     | -0,045          | 0,048 | 0,124 | 0,183 | 0,225 | 0,248  | 0,253  | 0,242  | 0,215  | 0,174  | 0,121  | 0,060  | -0,006 | -0,077 | -0,147 | -0,215 | -0,279 |
|                  | 60     | -0,046          | 0,044 | 0,119 | 0,178 | 0,220 | 0,247  | 0,257  | 0,252  | 0,233  | 0,202  | 0,161  | 0,111  | 0,056  | -0,002 | -0,061 | -0,119 | -0,174 |
| 65               | -0,047 | 0,040           | 0,113 | 0,172 | 0,215 | 0,244 | 0,258  | 0,259  | 0,247  | 0,224  | 0,192  | 0,152  | 0,108  | 0,059  | 0,010  | -0,039 | -0,085 |        |
| 70               | -0,048 | 0,037           | 0,108 | 0,165 | 0,210 | 0,241 | 0,258  | 0,264  | 0,258  | 0,242  | 0,218  | 0,186  | 0,150  | 0,110  | 0,070  | 0,029  | -0,010 |        |
| 75               | -0,048 | 0,033           | 0,102 | 0,159 | 0,204 | 0,236 | 0,257  | 0,266  | 0,265  | 0,255  | 0,237  | 0,213  | 0,184  | 0,153  | 0,119  | 0,085  | 0,053  |        |
| 80               | -0,049 | 0,029           | 0,097 | 0,153 | 0,198 | 0,231 | 0,254  | 0,267  | 0,270  | 0,265  | 0,253  | 0,235  | 0,212  | 0,187  | 0,160  | 0,132  | 0,105  |        |
| 85               | -0,050 | 0,026           | 0,091 | 0,147 | 0,191 | 0,226 | 0,250  | 0,266  | 0,272  | 0,272  | 0,264  | 0,252  | 0,235  | 0,215  | 0,194  | 0,171  | 0,149  |        |
| 90               | -0,051 | 0,022           | 0,086 | 0,140 | 0,185 | 0,220 | 0,246  | 0,263  | 0,273  | 0,276  | 0,273  | 0,264  | 0,252  | 0,237  | 0,221  | 0,203  | 0,186  |        |
| 95               | -0,053 | 0,019           | 0,081 | 0,134 | 0,178 | 0,213 | 0,240  | 0,260  | 0,272  | 0,278  | 0,278  | 0,274  | 0,266  | 0,255  | 0,243  | 0,229  | 0,216  |        |
| 100              | -0,053 | 0,015           | 0,075 | 0,127 | 0,171 | 0,206 | 0,234  | 0,255  | 0,269  | 0,278  | 0,281  | 0,280  | 0,276  | 0,269  | 0,260  | 0,250  | 0,240  |        |
| 105              | -0,053 | 0,011           | 0,070 | 0,121 | 0,164 | 0,199 | 0,228  | 0,250  | 0,266  | 0,276  | 0,282  | 0,284  | 0,282  | 0,279  | 0,273  | 0,267  | 0,260  |        |
| 110              | -0,053 | 0,008           | 0,064 | 0,114 | 0,156 | 0,192 | 0,221  | 0,244  | 0,261  | 0,273  | 0,281  | 0,285  | 0,287  | 0,286  | 0,283  | 0,279  | 0,275  |        |
| 115              | -0,053 | 0,004           | 0,059 | 0,107 | 0,149 | 0,184 | 0,213  | 0,237  | 0,255  | 0,269  | 0,279  | 0,285  | 0,289  | 0,290  | 0,290  | 0,288  | 0,286  |        |
| 120              | -0,053 | 0,000           | 0,054 | 0,101 | 0,141 | 0,176 | 0,206  | 0,230  | 0,249  | 0,264  | 0,275  | 0,283  | 0,289  | 0,292  | 0,294  | 0,294  | 0,295  |        |

A szimuláció eredményeit a 6.4. táblázat tartalmazza, amely alapján elmondható, hogy atmoszférikus nyomáson hasonló eltérést okoz a hidrogén, mint a 2H gázelegy esetén, viszont ettől jelentősen eltér a nyomástól és hőmérséklettől függő hatás. Ahogyan a táblázatban látható, a zöld tartományban 0,2-0,3 %-os víztelítettség növekedés figyelhető meg az eredeti mintagázhoz viszonyítva. Ezután viszont – eltérően a 2H gázminőségtől – a maximális vízgőztartalom csökkenése veszi kezdetét, ahol láthatóan 100-160 bar(t) nyomás- és (-20)-10 °C hőmérséklettartományon belül alakul ki jelentős eltérés. A legnagyobb differencia 150 bar(a) nyomáson és -20 °C hőmérsékleten tapasztalható 10 mol% hidrogéntartalom jelenlétében, amely 7,10 % víztelítettség-csökkenést mutat a tisztán metánból és szén-dioxidból álló keverékhez viszonyítva. A Magyarországon történő gázélektézési folyamat során jelentkező vízharmatpont beállítás során alkalmazott 70 bar nyomáson 10 mol% H<sub>2</sub> jelenlétében a telített vízgőztartalom növekedés szinte elhanyagolható. Jelentősebb eltérés a víztelítettség csökkenésének irányába mutat, melynek értéke legfeljebb 1,49 % a fentebb említett előkészítési nyomáson.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a hidrogén víztelítettségre gyakorolt hatása eltérő módon jelentkezik a magasabb minőségű 2H és a nagyobb CO<sub>2</sub>-tartalommal jellemezhető 2S gázok esetében. A 2H gázcsoportba tartozó mintagáz-összetétel esetében 70 bar(t)

nyomáson – amely értéken a magyar gázrendszerbe történő betápláláshoz történő vízharmatpont-beállítás történik – maximálisan 3,09 % eltérés jelentkezett 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalom jelenlétében. A 2S gázminőségnek megfelelő metán-szén-dioxid elegyhez kevert 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalom jelenlétében legfeljebb 1,49 % telített vízgőztartalom csökkenés tapasztalható 70 bar nyomáson.

A szimulációs vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy legfeljebb 20 mol% hidrogén részarány földgázhálózati betáplálása esetében nem szükséges technológiaváltás, illetve módosítás a hazai földgázrendszerben megtalálható gázminőségek vízharmatpontjának beállítása során. Ez a megállapítás érvényes mind a jelenlegi, mind pedig a jövőben várható, szigorodó követelmények esetére, hiszen a víztelítettség vonatkozásában ez a mennyiségű hidrogéntartalom nem okoz jelentős mértékű eltérést.



## 7 A hidrogéntartalom hatása a földgázellátó rendszeren átszállítható energiatartalomra vonatkozóan

A hidrogén földgázhálózati megjelenése számos kutatás témájaként jelenik meg nemcsak Európában, hanem Magyarországon is, ahogyan az a korábbiakban már bemutatásra is került. A hazai egybefüggő földgázellátó hálózatot üzemeltető engedélyesek esetében a hidrogén betáplálása komoly előkészületeket követel meg, amely a megfelelő műszaki háttér mellett a hidrogén okozta hatásokra való felkészülést is magában foglalja. Jelen fejezetben vizsgálatra került, hogy a hidrogén földgázellátó rendszerben való megjelenésével hogyan változik a vezetékben lévő gázmolekulák által képviselt energiatartalom abban az esetben, ha a rendszeren jelentkező üzemeltetési nyomások nem változnak.

### 7.1 A csővezetéki gázáramlás viszonyainak leírása

Az átszállítható energiatartalom-változás előrejelzésének vizsgálatához a csővezetéki gázáramlás alapvető leíró egyenlete, a karakterisztikus egyenlet került felhasználásra. Az összefüggés alapjául az elemi hosszúságú csőszakasz esetén érvényes, egységnyi mennyiségű gázra felírható súrlódásos Bernoulli energiaegyenlet szolgál (Bobok, 1997).

$$\frac{dp}{\rho} + wdw + g \cdot \sin\alpha dl + \lambda \frac{w^2}{2d} dl = 0 \quad 7.1. \text{ egyenlet}$$

Ahol

$\frac{dp}{\rho}$  - nyomásenergia tag;

$w dw$  - mozgási energia tag;

$g \cdot \sin\alpha dl$  - helyzeti energia tag;

$\lambda \frac{w^2}{2d} dl$  - súrlódási veszteség tag.

Az egyenletben szereplő tagok rendre a nyomásenergia tag, a mozgási energia tag, a helyzeti energia tag, valamint a súrlódási veszteség tag. Mivel a csővezetéki gázáramlás alapegyenlete vízszintes vezetékek esetében érvényes, valamint a hazai terepviszonyok mellett elmondható, hogy a gázok esetében a magasságkülönbség okozta gázosztatikus nyomástöbblet elhanyagolható mértékű (a kisnyomású esetektől eltekintve), emiatt a helyzeti tag elhagyható az egyenletből (Vida, 1984). A mozgási energia tag szintén figyelmen kívül

hagyható, mivel nagyságrendileg jelentősen kisebb a többi taghoz viszonyítva, a nyomási energia tag kevesebb, mint 1 %-a a gázok kis sűrűsége miatt.

Ennek következtében a 7.1. egyenlet már csak a nyomási energia tagból, valamint a súrlódási veszteségtagból épül fel az alábbi formában:

$$\frac{dp}{\rho} + \lambda \frac{w^2}{2d} dl = 0 \quad 7.2. \text{ egyenlet}$$

A gázok szempontjából nem elhanyagolható azok sűrűségének, valamint áramlási sebességének nyomásfüggése. Emiatt a 7.2. egyenletbe behelyettesítésre kerülnek az ezeket leíró összefüggések, amelyek alapjául az általános gáztörvény, illetve a kontinuitás törvénye szolgálnak. A különböző behelyettesítések és matematikai műveletek elvégzése után kapjuk meg a karakterisztikus egyenletet, ami a gázok csővezetékben megvalósuló stacioner áramlásának leírására alkalmazható (*Vida, 1984; Bobok, 1997*).

$$p_1^2 - p_2^2 = \left(\frac{p_n}{T_n}\right)^2 \cdot \frac{M_{lev}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot R_u} \cdot \lambda \cdot \frac{M_{kev}}{M_{lev}} \cdot T \cdot z \cdot \frac{L}{d_b^5} \cdot q_n^2 \quad 7.3. \text{ egyenlet}$$

Ahol

$p_n$  – fizikai normálnyomás [101 325 Pa(a)];

$T_n$  – fizikai normálhőmérséklet [273,15 K];

$M_{lev}$  – standard összetételű száraz levegő moláris tömege (*MSZ ISO 6976 szerint*)  
 $\left[28,9626 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right]$ ;

$R_u$  – egyetemes gázállandó  $\left[8314,510 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}\right]$ ;

$p_1$  – kezdőponti nyomás [Pa(a)];

$p_2$  – végponti nyomás [Pa(a)];

$\lambda$  – csősúrlódási tényező [-];

$M_{kev}$  – gázelegy moláris tömege  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right]$ ;

$T$  – gázelegy hőmérséklete [K];

$z$  – gáz kompresszibilitási tényezője [-];

$L$  – vezetékszakasz hossza [m];

$d_b$  – csővezeték belső átmérője [m];

$q_n$  – fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázáram  $\left[\frac{\text{nm}^3}{\text{s}}\right]$ .

Az egyenlet számos egyszerűsítő feltételezést alkalmaz, mivel nem létezik sztochasztikus megoldása az áramlástan problémának. A vizsgálat során izotermikus áramlást feltételezünk, vagyis nem kerül figyelembevételre az, hogy a csővezetékben való áramlás során a gáz hőmérséklete változik a vezeték hossza mentén. A vezetékszakasz vízszintes, vagyis az összefüggés eltekint a kezdő- és végpont közötti magasságkülönbség okozta hatásoktól. A vizsgált modell állandó keresztmetszetű vezetékszakaszból áll, amelyen a kezdő- és a végpont között nincs közbenső elvétel, azaz az időegység alatt átáramló gáz tömege állandó (Vida, 1984).

### **7.1.1 Az átszállítható energiatartalom változására vonatkozó vizsgálat során alkalmazott peremfeltételek**

Az értekezésben bemutatott vizsgálat a hazai földgázellátó hálózatba történő hidrogén betáplálást feltételez, megvizsgálva azt, hogy hogyan alakul az egyre növekvő mértékű hidrogéntartalom hatására a hálózatba betáplált energiatartalom. A vizsgálat pontos lehatárolása érdekében számos peremfeltétel került figyelembevételre.

A vizsgálat során az egyik legfőbb peremfeltétel, hogy a kezdő- és végponti nyomás értéke állandó, vagyis a vezetéken jelentkező nyomáskülönbség állandónak tekinthető bármely gázösszetétel csővezetéki áramlása során. Az elemzés során eltekintek a magasabb rendű szénhidrogén-, valamint az inerttartalomtól, a minta gázelegy kizárólag metánt és hidrogént tartalmaz annak érdekében, hogy egy általánosan alkalmazható formula legyen megalkotható.

Ahhoz, hogy a tiszta metán, valamint a metán-hidrogén gázelegy csővezetéki áramlására vonatkozó átszállítható energiatartalom-változás leírhatóvá váljon állandó nyomásvesztéssel feltételezve, felírásra került a már hidrogént is tartalmazó kétkomponensű gázelegy esetén érvényes, valamint a kizárólag  $\text{CH}_4$ -tartalmú gázra felírt, az áramlási viszonyokat kifejező összefüggés. Az átszállítható energiatartalom-változás meghatározásának alapját tehát a metán-hidrogén gázelegyre felírható (7.4. egyenlet), illetve

a tiszta metántartalom mellett érvényes (7.5. egyenlet) karakterisztikus egyenletek hányadosa szolgáltatja.

$$p_1^2 - p_2^2 = \left(\frac{p_n}{T_n}\right)^2 \cdot \frac{M_{lev}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot R_u} \cdot \overline{\lambda_{kev}} \cdot \frac{M_{kev}}{M_{lev}} \cdot \overline{T_{kev}} \cdot \overline{z_{kev}} \cdot \frac{L}{d_b^5} \cdot q_{n_{kev}}^2 \quad 7.4. \text{ egyenlet}$$

$$p_1^2 - p_2^2 = \left(\frac{p_n}{T_n}\right)^2 \cdot \frac{M_{lev}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot R_u} \cdot \overline{\lambda_{CH_4}} \cdot \frac{M_{CH_4}}{M_{lev}} \cdot \overline{T_{CH_4}} \cdot \overline{z_{CH_4}} \cdot \frac{L}{d_b^5} \cdot q_{n_{CH_4}}^2 \quad 7.5. \text{ egyenlet}$$

Ahol

$\overline{\lambda_{kev}}$  – a gázelegy esetén jelentkező átlagos súrlódási tényező [-];

$\overline{\lambda_{CH_4}}$  – a metán esetén jelentkező átlagos súrlódási tényező [-];

$\overline{T_{kev}}$  – a gázelegy átlagos hőmérséklete [K];

$\overline{T_{CH_4}}$  – a metán átlagos hőmérséklete [K];

$\overline{z_{kev}}$  – a gázelegy átlagos kompresszibilitási tényezője [-];

$\overline{z_{CH_4}}$  – a metán átlagos kompresszibilitási tényezője [-];

$q_{n_{kev}}$  – a gázelegy fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázárama  $\left[\frac{nm^3}{s}\right]$ ;

$q_{n_{CH_4}}$  – a metán fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázárama  $\left[\frac{nm^3}{s}\right]$ .

Mivel a vizsgálatok során peremfeltételként vettem figyelembe a kezdő- és végponti nyomáskülönbségek állandóságát, így a baloldali egyenlősége miatt – a matematika törvényszerűségei következtében – az összefüggések jobb oldalai is egyenlők egymással. Az így keletkezett hányados esetében egy sor egyszerűsítő feltételezés került alkalmazásra. A csősúrlódási tényező értékét a földgázellátó rendszeren a belső csőfal relatív érdessége határozza meg az áramlást jellemző Reynolds-számok nagyságrendje miatt. A gázelegy összetétele elhanyagolható mértékben befolyásolja a súrlódási tényezőt, melynek következtében az átlag  $\lambda$  értékek azonosak, ezáltal az összefüggés tovább egyszerűsíthető. A gázösszetétel hatása a hőmérséklet-eloszlásra gyakorlatilag jelentéktelen, értéke 1,5 % alatt jelentkezik (Andre és tsai, 2013; Kuczynski és tsai, 2019). Az eltérő gázelegyek vizsgálata során természetesen a csővezeték geometriája, valamint a gáz hőmérséklete is

azonos. Ezen peremfeltételek mellett egy olyan összefüggés került meghatározásra, amely megmutatja a tiszta metántartalomhoz viszonyított térfogatáram-változást a hidrogéntartalom gázelegyben történő megjelenése esetén, amelynek értéke láthatóan a relatív sűrűség – ami a standard összetételű száraz levegő és a gáz moláris tömegeinek hányadosaként adódik – és a kompresszibilitási tényező által befolyásolt.

$$\frac{q_{n_{kev}}}{q_{n_{CH_4}}} = \sqrt{\frac{\rho_{rel_{CH_4}} \cdot \overline{z_{CH_4}}}{\rho_{rel_{kev}} \cdot \overline{z_{kev}}}} \quad 7.6. \text{ egyenlet}$$

Ahol

$\rho_{rel_{CH_4}}$  – a metán relatív sűrűsége [-];

$\rho_{rel_{kev}}$  – a gázelegy relatív sűrűsége [-].

Amint a térfogatáram-változást leíró egyenletbe bevezetésre kerül az egységnyi energiatartalmat kifejező hőérték, a kapott összefüggés segítségével meghatározhatóvá válik a hidrogéntartalom hatására bekövetkező, csővezetéken átszállítható energiatartalom-változás, állandó nyomásvesztéséget feltételezve:

$$KF = \frac{E_{kev}}{E_{CH_4}} = \frac{H_{a_{kev}}}{H_{a_{CH_4}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{rel_{CH_4}} \cdot \overline{z_{CH_4}}}{\rho_{rel_{kev}} \cdot \overline{z_{kev}}}} \quad 7.7. \text{ egyenlet}$$

Ahol

KF – konverziós faktor [-];

$H_{a_{kev}}$  – a gázelegy alsó hőértéke [kWh/m<sup>3</sup>];

$H_{a_{CH_4}}$  – a metán alsó hőértéke [kWh/m<sup>3</sup>];

$E_{kev}$  – a gázelegy energiatartalma [kWh/m<sup>3</sup>];

$E_{CH_4}$  – a metán energiatartalma [kWh/m<sup>3</sup>].

A számítások során a metán, a hidrogén, valamint az ezekből alkotott gázelegy relatív sűrűsége, valamint alsó hőértéke az MSZ ISO 6976:1997 Földgáz. A hőérték, a sűrűség, a

relatív sűrűség és a Wobbe-szám számítása a gázösszetételből c. szabvány alkalmazásával került kiszámításra.

Amint az előzőleg bemutatott egyenletbe bevezetésre kerül a KF konverziós faktor, egy olyan mutatószám kerül kifejezésre, amely megmutatja, hogy a tiszta metántartalomhoz viszonyítva a hidrogéntartalom megjelenésével hogyan változik a gázvezetéken átszállítható gázmennyiség energiatartalma, amennyiben a vezetéken jelentkező nyomásveszteség állandó. Az egyenletből egyértelműen látható, hogy a földgázszállító hálózati gázmennyiségek energiatartalom-változását kifejező konverziós faktor a nyomás, a hőmérséklet, valamint a hidrogéntartalom függvényében határozható meg.

Az eredményként kapott 7.6. egyenlet alapján elmondható, hogy a csővezetékben áramló gáztérfogat csak a relatív sűrűség, valamint a kompresszibilitási tényező függvénye. A továbbiakban az így kapott összefüggés alapján számított, a csővezetéken átszállítható energiatartalom-változás kerül bemutatásra a magyar földgázelosztó-, illetve szállítóhálózaton érvényes jellegzetességeket figyelembe véve.

## **7.2 A magyar földgázelosztó hálózaton jelentkező konverziós faktor alakulása metán-hidrogén gázelegy esetén**

A kompresszibilitási tényező esetében további egyszerűsítést alkalmaztam, mely szerint a gázok 10 bar üzemi nyomás alatt ideálisként viselkednek. A magyar földgázelosztó hálózaton jellemző üzemeltetési nyomástartomány 0,1-5,0 bar. Amennyiben az 5 bar nyomásértéket vesszük figyelembe, abban az esetben is elmondható, hogy az eltérési tényező mind a hidrogén, mind a metán esetében elhanyagolható mértékben tér el 1,0-től (metán esetén 0,990, hidrogén esetén 1,002), ezáltal a fenti egyenletből kiesik az ideális gázállapottól való eltérés fokát kifejező tag. Ennek eredményeként kijelenthető, hogy - a fent említett egyszerűsítő feltételezésekkel élve - a vizsgált konverziós faktort a gáz hőértékén kívül a relatív sűrűség négyzetgyöke határozza meg. A karakterisztikus egyenletek hánycsoportjából levezetett összefüggés megegyezik a Wobbe-szám számítására szolgáló egyenlettel, melynek oka a csővezetéken átszállítható, a hidrogéntartalom hatására bekövetkező energiatartalom-változás leírására szolgáló összefüggés meghatározása során alkalmazott számos egyszerűsítő feltételezés (*Farkas O.-né, 1984; Meszléry, 1978*).

$$KF = \frac{E_{kev}}{E_{CH_4}} = \frac{H_{a_{kev}}}{H_{a_{CH_4}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{rel_{CH_4}}}{\rho_{rel_{kev}}}} = \frac{\frac{H_{a_{kev}}}{\sqrt{\rho_{rel_{kev}}}}}{\frac{H_{a_{CH_4}}}{\sqrt{\rho_{rel_{CH_4}}}}} \quad 7.8. \text{ egyenlet}$$

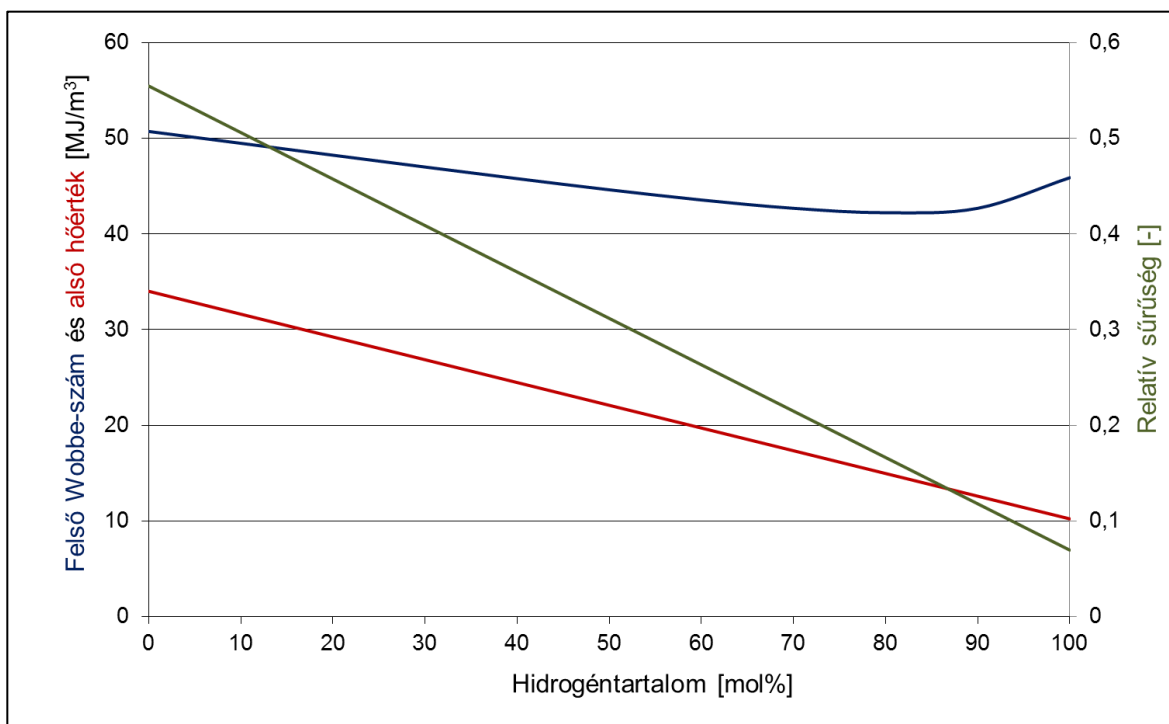
A konverziós faktor alakulásának megértéséhez elsőként az azt befolyásoló tüzeléstechnikai jellemzők hidrogéntartalom szerinti változását szükséges elemezni. A 7.1. ábra az éghető metán-hidrogén gázelegy alsó hőértékének és relatív sűrűségének, vagyis az ezekből számított alsó Wobbe-számának változását mutatja be. Utóbbi vizsgálata azért fontos, mivel a karakterisztikus egyenletek hányadosából képzett KF konverziós faktort leíró összefüggés alapján a gáz relatív energiatartalmát (a kompresszibilitási tényező mellett) a hőérték, valamint a relatív sűrűség négyzetgyöke határozza meg. Ez a hányados pedig nem más tehát, mint az előbb említett fontos tüzeléstechnikai jellemző, a Wobbe-szám.

A 7.1. ábrán megfigyelhető, hogy már 1 mol% hidrogéntartalom esetében 0,7 %-kal csökken gázelegy tiszta metánhoz viszonyított alsó hőértéke. 5 mol% hidrogéntartalom mellett már 3,5 %-os a csökkenés mértéke, ami 10 mol% H<sub>2</sub> részarány mellett közel 7 %. Ennek oka a metán és a hidrogén jelentősen eltérő alsó hőértéke, hiszen a hidrogén hőértéke a metán hőértékének közel 30 %-a.

A gázelegy Wobbe-számának változása a hidrogéntartalom hatására nem ilyen számottevő. 5 mol% hidrogéntartalmú metán-hidrogén gázelegy esetében az alsó Wobbe-szám megközelítőleg 1,3 %-kal csökken a tiszta metánéhoz viszonyítva, míg 10 mol% H<sub>2</sub> részarány mellett ez az érték már 2,6 %.

Az is megfigyelhető, a metán-hidrogén gázelegy felső Wobbe-szám görbéje 81,8 mol% hidrogén részarány mellett egy lokális minimum pontot ér el, amely után ismét növekvő tendencia veszi kezdetét. A lokális minimum pont eléréséig történő Wobbe-szám csökkenés, majd az azt követő növekedés megértéséhez a gázelegy Wobbe-számának kiszámítására szolgáló összefüggést matematikai szempontból szükséges megvizsgálni. A Wobbe-szám a gázelegy hőértékének, valamint a relatív sűrűség négyzetgyökének a hányadosaként számítható. Az egyre növekvő hidrogén részarány következtében mind a gázelegy hőértéke, mind pedig relatív sűrűsége csökkenni kezd. Az ábrán megfigyelhető, hogy a relatív sűrűség változását szemléltető görbe jóval nagyobb meredekséggel kezd csökkenni a növekvő hidrogéntartalom hatására, mint a hőérték változását ábrázoló görbe.

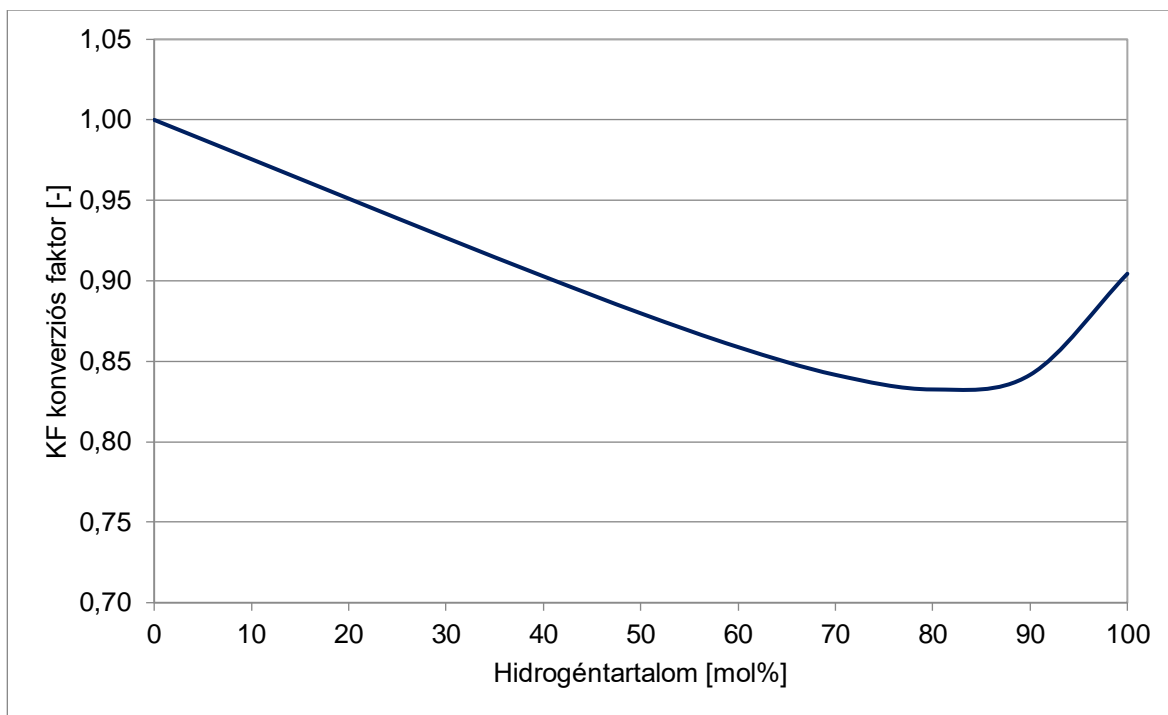
Mivel a Wobbe-szám kiszámítására szolgáló képlet nevezőjében a relatív sűrűség négyzetgyöke szerepel, emiatt a gázelegy egyre nagyobb mértékű hidrogén részarányának következtében egyre nagyobb mértékű csökkenés veszi kezdetét a relatív sűrűség négyzetgyökének értékében. 81,8 mol% H<sub>2</sub>-tartalom mellett a gázelegy hőérték csökkenésének mértéke meghaladja a relatív sűrűség négyzetgyökének csökkenését, amely változás hatására a metán-hidrogén gázelegy Wobbe-száma növekedni kezd.



**7.1. ábra** A metán-hidrogén gázelegy esetén jelentkező, a konverziós faktort meghatározó tüzeléstechnikai jellemzők ideális gázt feltételezve

A 7.2. ábra a hidrogéntartalom hatására bekövetkező, csővezetéken átszállítható energiatartalom-változást szemlélteti 100 mol% metántartalomhoz viszonyítva, állandó nyomásvesztéssel feltételezve. A 7.1. táblázatban az eredmények táblázatosan kerültek feltüntetésre. Az eredmények alapján az következik, hogy – a kijelölt peremfeltételek mellett – 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalom bekeverése esetén a tiszta metántartalomhoz viszonyított átszállítható energiatartalom 2 %-kal csökken (KF=0,98), míg 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalom mellett ez az érték 5 % (KF=0,95) a magyar földgázelosztó hálózaton jellemző 0,1-5,0 bar üzemi nyomástartományban.





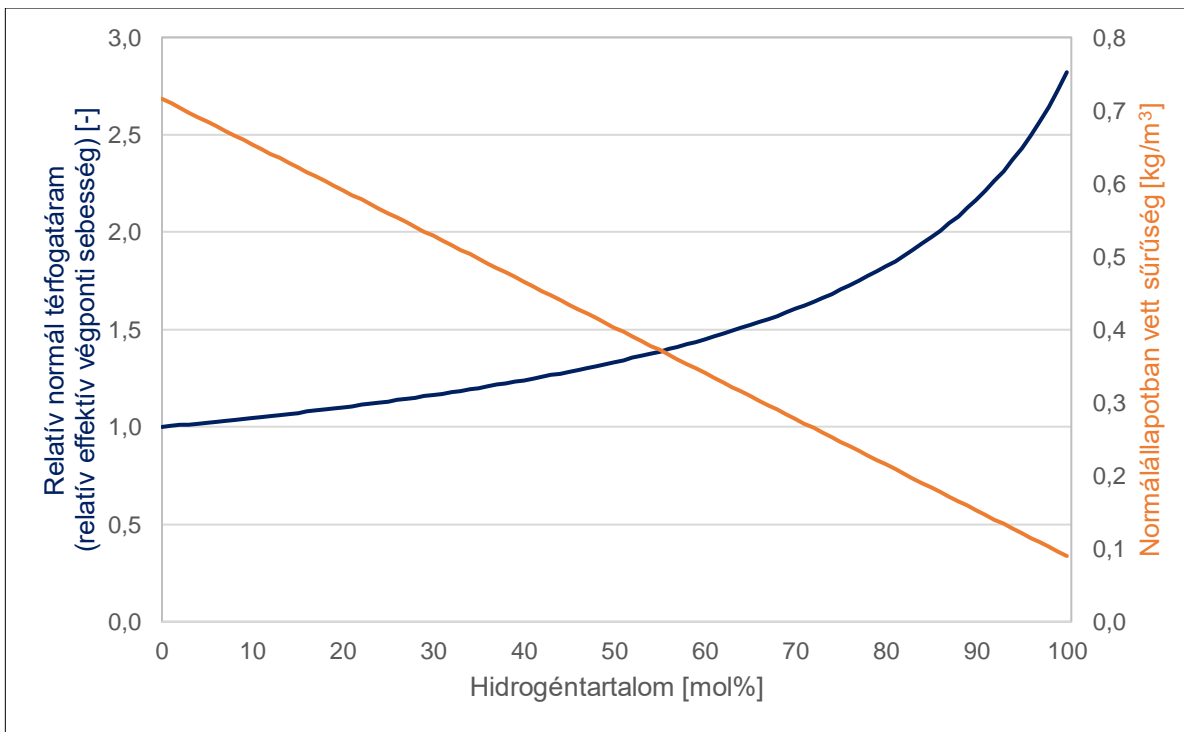
**7.2. ábra** A KF konverziós faktor alakulása a magyar földgázelosztó hálózaton jellemző 0,1-5,0 bar üzemi nyomástartományban

**7.1. táblázat** A KF konverziós faktor alakulása eltérő metán-hidrogén gázelegy esetén

| H <sub>2</sub> [mol%] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| KF [-]                | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,88 | 0,86 | 0,84 | 0,83 | 0,84 | 0,90 |

Az energiatartalom alakulása mellett érdemes megvizsgálni a normál térfogatáram változását, melyet a 7.3. ábra szemléltet. Minél nagyobb mértékben kerül hidrogén bekeverésre, annál kisebb lesz a gázelegy sűrűsége, melynek egyértelmű oka, hogy a hidrogén közel 8-szor kisebb moláris tömeggel, illetve sűrűséggel rendelkezik, mint a metán.

A karakterisztikus egyenletet felhasználva, meghatároztam az állandó keresztmetszetű gázvezetékben áramló gázelegy térfogatáram-változását egyre növekvő mértékű hidrogéntartalom esetén a tiszta metántartalomhoz viszonyítva, állandó kezdő. és végponti nyomást feltételezve, amelyet szintén a 7.3. ábra szemléltet. 5 mol% hidrogéntartalom mellett 2,3 %-kal nő a gázáram a 100 mol% metán mennyiségéhez képest, míg 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalom esetén már 4,7 %-os növekedés jelentkezik a hidrogén kisebb sűrűsége következtében.



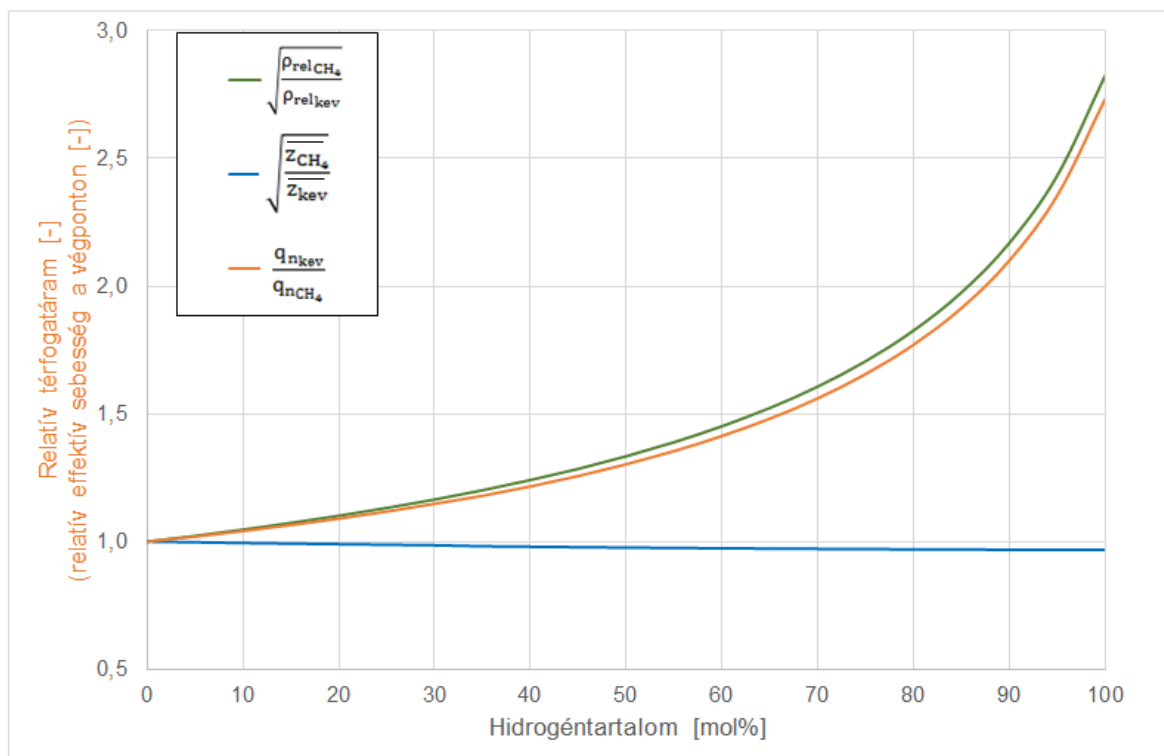
**7.3. ábra** A normál térfogatáram (effektív végponti sebesség) változása növekvő hidrogéntartalom hatására

A nyomás csökkenésével a gázok áramlási sebessége fordítottan arányosan viselkedik, emiatt egy adott vezetékszakas végpontjában jelentkezik a legnagyobb áramlási sebesség. A kontinuitás törvényéből adódóan a gázáram egyenes arányosságban áll az áramlási sebesség alakulásával, emiatt a fenti ábrán a térfogatáram-változást jelképező görbe megegyezik a vezeték végpontján kialakuló effektív áramlási sebesség-változás görbéjével. A hazai gyakorlatban az elosztói engedélyesek 20 m/s értéken maximalizálják a hálózaton jelentkező áramlási sebességet. 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalom mellett ez a sebességnövekedés kisebb, mint 5 % mértékű, tehát egy nem teljes kapacitáson üzemelő hálózatrészen nem valószínűsíthető probléma, viszont a névleges kapacitás határán, valamint az ennél nagyobb arányú elosztóhálózati bekeverés mellett már kiemelten kell kezelni a sebességnövekedés kérdését.

### 7.3 A magyar földgázszállító hálózaton jelentkező konverziós faktor alakulása metán-hidrogén gázelegy esetén

A karakterisztikus egyenletek hányadosából képzett 7.6. egyenlet alapján ábrázolásra került a normál térfogatáram-változás a hidrogéntartalom szállítói hálózati megjelenése során,

amelyet a 7.4. ábra szemléltet. A növekvő hidrogéntartalom mellett jelentkező relatív normál térfogatáram-változás vizsgálata során az egyenlet tagjai külön-külön kerültek ábrázolásra.



**7.4. ábra** A relatív normál térfogatáram és relatív áramlási sebesség alakulása a végponton

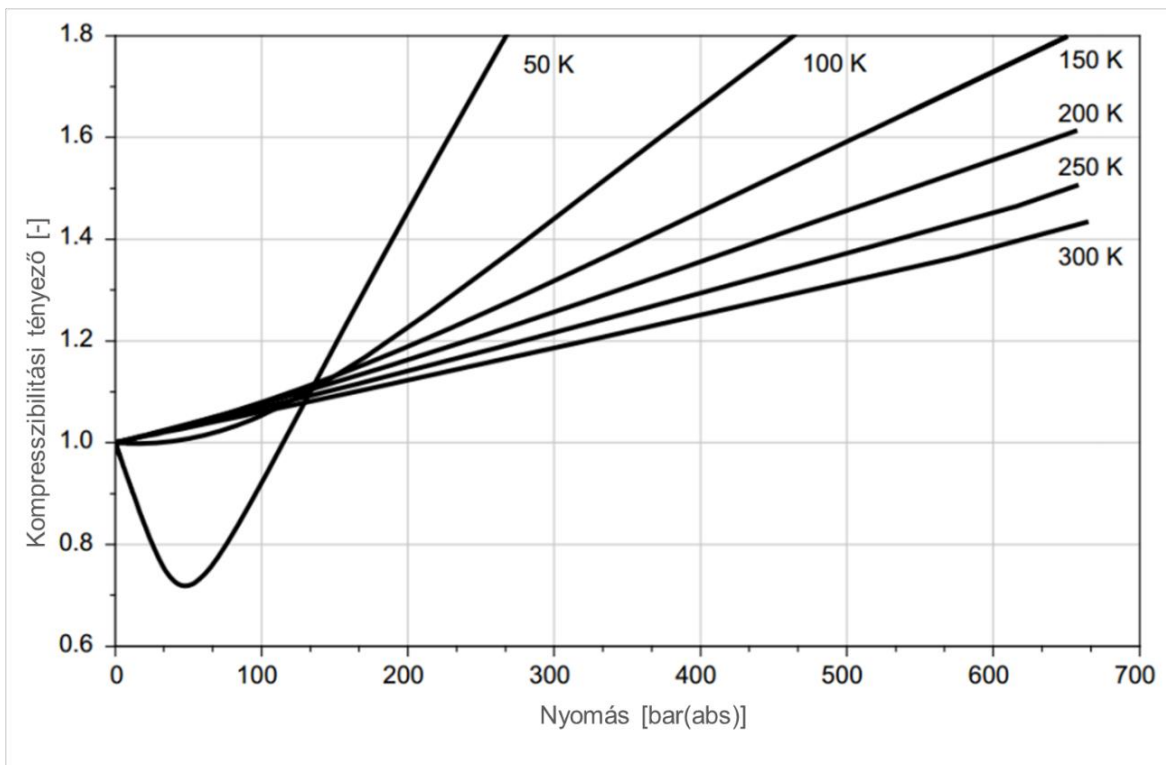
Az ábrán jól látható, hogy a metán és a hidrogéntartalmú gázelegy adott nyomáson és hőmérsékleten érvényes kompresszibilitási tényezőiből képzett hányados négyzetgyöke az 1,0-es értéktől még 100 mol% hidrogéntartalom esetében is kis mértékben tér el (0,968). A térfogatáram-változást jelentősebb mértékben határozza meg a relatív sűrűségek hányadosának négyzetgyöke, melynek oka a metán és a hidrogén sűrűségkülönbségében keresendő, mivel a hidrogén közel 8-szor kisebb sűrűséggel rendelkezik a földgázokat alkotó legfőbb komponensnél. A két görbe eredője szolgáltatja a relatív térfogatáram görbét, amely azt mutatja meg, hogy növekvő hidrogéntartalom mellett milyen mértékben növekszik a térfogatáram a csővezetékben. Ahogyan a fenti ábrán is megfigyelhető, 10 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú gázelegy esetében 4,1 %-kal, 20 mol% mellett megközelítőleg 9,0 %-kal növekszik a metánhoz viszonyított normál térfogatáram. Tiszta hidrogéngáz csővezetékben történő szállítása esetében (a narancssárga görbén láthatóan) 2,7-szer nagyobb normál térfogatáram jelentkezik, mintha az kizárólag metán molekulákból épülne fel.

A hazai és nemzetközi gyakorlatban a szállítói engedélyesek 10 m/s értéken maximalizálják a hálózaton jelentkező áramlási sebességeket. A kontinuitási törvényből eredően a gázáram egyenes arányban változik a végponton jelentkező effektív áramlási sebességgel. Ennek következtében elmondható, hogy a térfogatáram-változást leíró görbe megegyezik a vezeték végpontján kialakuló effektív áramlási sebesség görbéjével. Mivel 10 mol% hidrogéntartalom mellett a végponti sebességnövekedés 4,1 % értéken alakul, emiatt egy nem teljes kapacitáson üzemelő hálózatrészen nem valószínűsíthető probléma.

### **7.3.1 A kompresszibilitási tényező alakulása metán-hidrogén gázelegy esetén a gázszállító hálózaton jelentkező nyomástartományon**

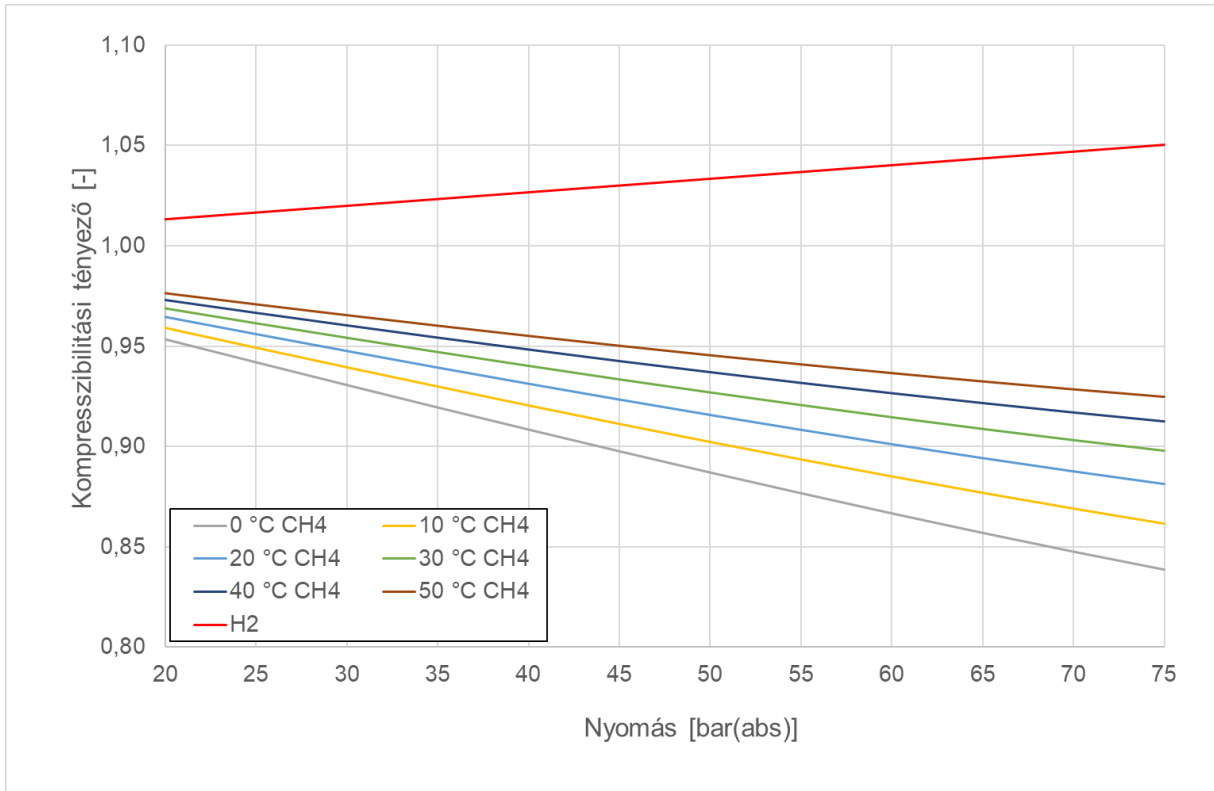
A hazai földgázszállító rendszer jellemző névleges nyomása 64 bar, a belső engedélyezési túlnyomások nagyságrendileg 40-75 bar között helyezkednek el. Vizsgálataimat ettől szélesebb, 20-75 bar(a) nyomástartományban végeztem el 5 bar nyomáslépcsőt alkalmazva. A hőmérséklettartományt 0-50 °C között határoztam meg 10 °C hőmérsékletlépcsővel, a hidrogéntartalom pedig 0-100 mol% között került vizsgálatra.

A földgázszállítás során jelentkező, a hidrogéntartalom bekeverés hatására végbemenő, állandó nyomásvesztéssel feltételező csővezetéken átszállítható energiatartalom-változást kifejező konverziós faktor meghatározásában jelentős szerepet játszik a kompresszibilitási tényező, emiatt ennek részletes vizsgálatától nem lehet eltekinteni. A kompresszibilitási tényező görbék alakulása az olaj- és gáziparban széles körben alkalmazott Aspen HYSYS szimulációs szoftver segítségével kerültek meghatározásra. A szimuláció során alkalmazott állapotegyenlet kiválasztásához a szakirodalomban fellelhető, a hidrogén kompresszibilitási tényező-görbéire történő illeszkedésvizsgálat került elvégzésre (7.5. ábra). Számos futtatás eredményeként megállapításra került, hogy a legjobb illeszkedés a Soave-Redlich-Kwong (SRK) állapotegyenlet alkalmazásával érhető el, főként a vizsgálatok szempontjából jelentős 300 K hőmérsékletre tartozó görbe tekintetében.



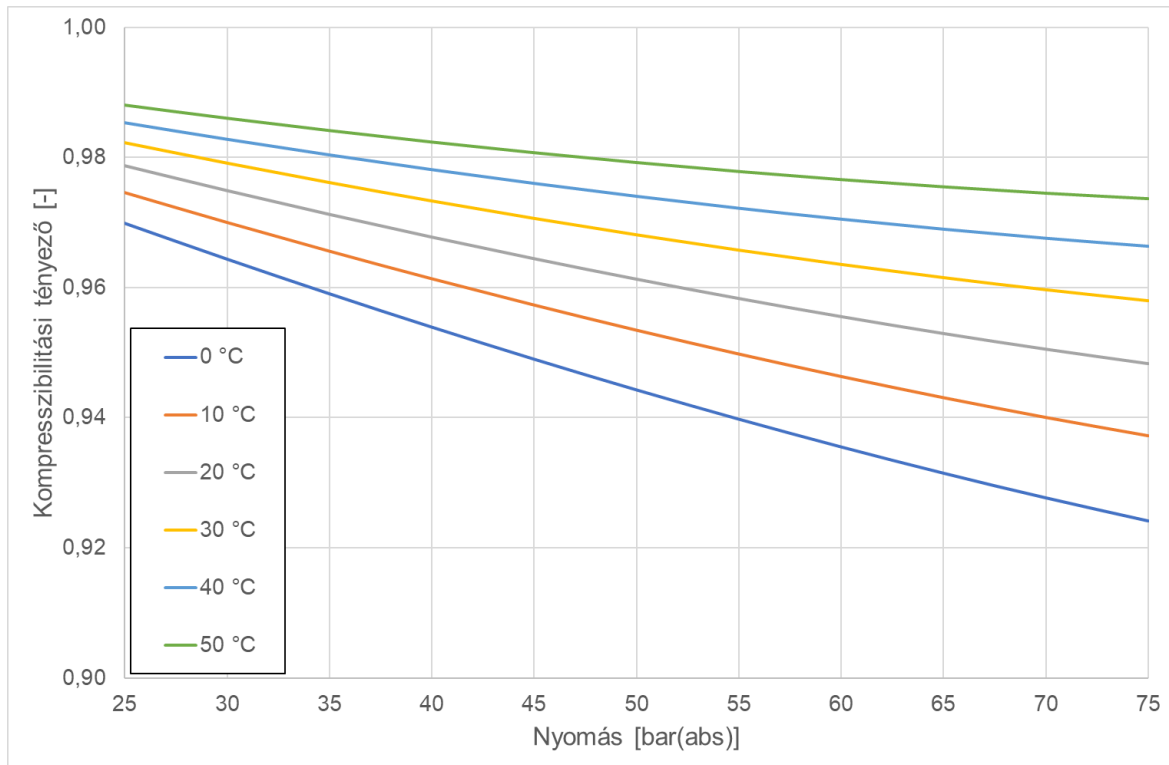
**7.5. ábra** A hidrogén kompresszibilitási tényező görbéi a nyomás és hőmérséklet függvényében (Klell, 2010)

Elsőként a metán és a hidrogén kompresszibilitási tényező görbéinek vizsgálatát végeztem el. A számítás eredményeit a [7.6. ábra](#) szemlélteti. A metán esetében a nyomás növekedésével az eltérő hőmérsékletekhez tartozó kompresszibilitási tényező görbék egyre inkább elkülönülnek egymástól. A metán eltérési tényezője a legkisebb értéket a vizsgált legalacsonyabb hőmérsékleten és legnagyobb nyomáson veszi fel. Szembetűnő különbség, hogy míg a metán kompresszibilitási tényezője a nyomás növekedésével csökken, addig a hidrogén esetében növekedés tapasztalható, vagyis a metán-hidrogén gázelegy kompresszibilitási tényezőjének alakulására a két komponens viselkedése ellentétesen hat. A másik jelentős eltérés, hogy a hidrogén kompresszibilitási tényezője a hőmérséklettől szinte független, a különböző hőmérsékletekhez tartozó görbék egybeesnek, emiatt az alábbi ábrán csak egyetlen, piros színnel jelölt görbe került ábrázolásra.



**7.6. ábra** A metán és a hidrogén közpresszibilitási tényező görbéinek alakulása eltérő nyomás- és hőmérsékletértékeken

A 7.7. ábra a 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú metán-hidrogén gázelegy közpresszibilitási tényező görbéit mutatja be 20-75 bar abszolút nyomás- és 0-50 °C hőmérséklet-tartományt vizsgálva. Az ábrán megfigyelhető, hogy a gázelegy közpresszibilitási tényezője a nyomás növekedésével csökken, amely csökkenés kisebb hőmérsékleten szignifikánsabb. A hőmérséklet emelkedésével láthatóan a közpresszibilitási tényező értéke növekszik, illetve az is megfigyelhető, hogy a hőmérséklet növekedésével a görbék meredeksége csökken.

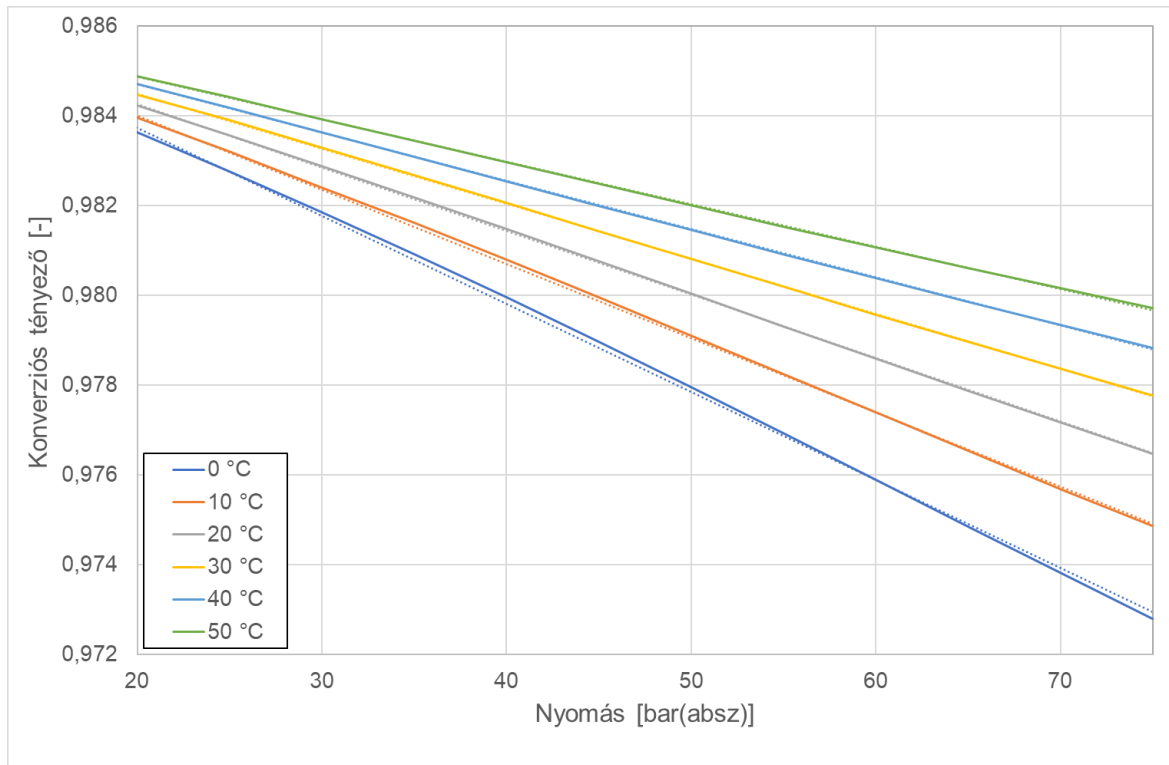


**7.7. ábra** A 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú metán-hidrogén gázelegy kompresszibilitási tényező görbéi a nyomás és hőmérséklet függvényében

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a hidrogén a földgázt legnagyobb arányban alkotó metánnal ellentétesen hat a gázelegy kompresszibilitási tényezőjének alakulására. Ahogyan nő a hidrogéntartalom a gázelegyben, úgy közelít az eltérési tényező a hidrogén adott nyomáson érvényes eltérési tényezőjéhez.

### 7.3.2 A konverziós faktor a földgázz szállító hálózaton jelentkező nyomás- és hőmérséklet-tartomány esetében

A nyomás és hőmérséklet, mint paraméterek függvényében meghatározásra került a különböző hidrogéntartalmú gázelegyek esetében jelentkező konverziós faktor alakulása, amelyek közül az 5 mol% H<sub>2</sub>-tartalommal rendelkező gázelegy KF konverziós faktor görbéit a 7.8. ábra mutatja be.



**7.8. ábra** A konverziós faktor alakulása 5 mol% H<sub>2</sub>-tartalom esetén a nyomás és hőmérséklet függvényében

A konverziós faktorok lefutását szemléltető ábra alapján látható, hogy a görbék egyenessel jól közelíthetők, amelyek szaggatott vonallal feltüntetésre kerültek. Ez alapján megállapítható, hogy a vizsgált nyomás- és hőmérséklettartományokban az eltérő összetételű metán-hidrogén gázelegyek konverziós faktora az alábbi összefüggéssel határozható meg, amely lineáris regresszió segítségével került leírásra:

$$KF = \alpha \cdot p + \beta$$

7.9. egyenlet

Ahol

$p$  – átlagnyomás [bar(a)];

$\alpha, \beta$  – paraméterek [-].

Az egyenlet alkalmazása során célszerű a vezetéken jelentkező átlagnyomás behelyettesítése annak érdekében, hogy a vezeték hossza mentén érvényes átlagértékek



kerüljenek figyelembevételre, amely az alábbi összefüggés alapján határozható meg (Szilas, 1975):

$$p_{\text{átl}} = \frac{2}{3} \cdot \left( p_1 + \frac{p_2^2}{p_1 + p_2} \right) \quad 7.10. \text{ egyenlet}$$

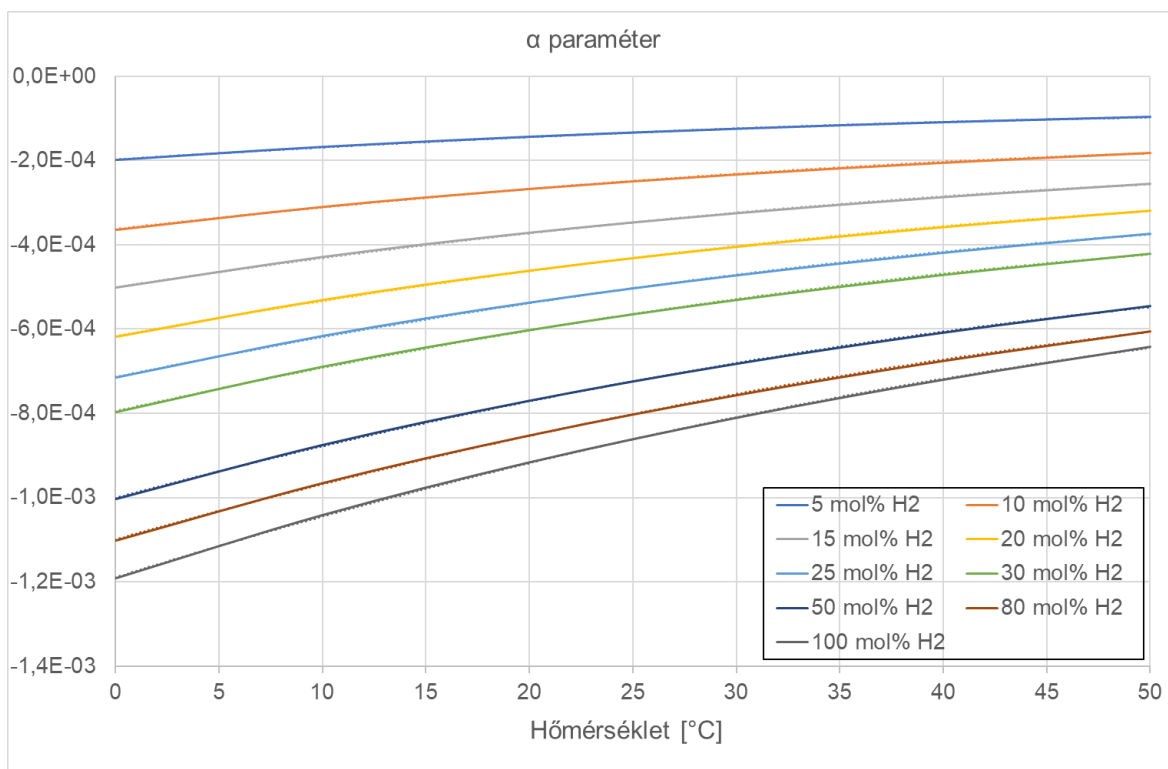
ahol

$p_{\text{átl}}$  – átlagnyomás [bar(a)];

$p_1$  – kezdőponti nyomás [bar(a)];

$p_2$  – végponti nyomás [bar(a)].

Az  $\alpha$  jelű paraméter változását a hőmérséklet függvényében a 7.9. ábra szemlélteti, amely alapján kijelenthető, hogy az együttható értéke mind a hőmérséklettől, mind pedig a gázelegy hidrogéntartalmától jelentősen függ.



**7.9. ábra** Az  $\alpha$  paraméter változása

A fenti ábra alapján a görbék másodfokú polinommal jól leírhatók, így az  $\alpha$  paraméter változásának hőmérsékletfüggése az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

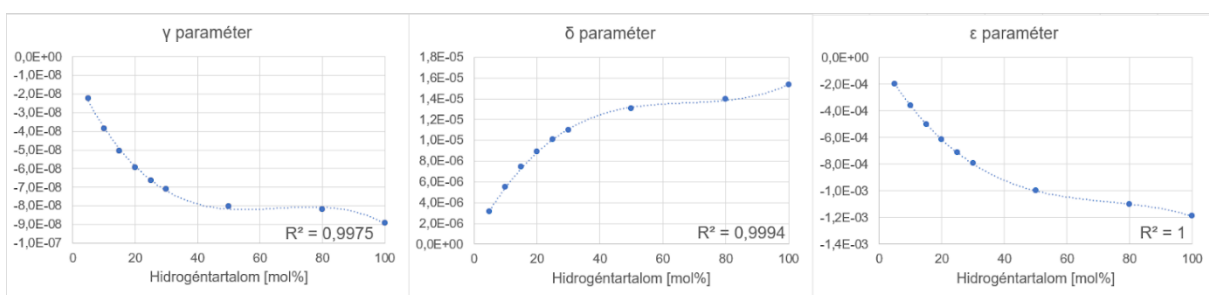
$$\alpha = \gamma \cdot T^2 + \delta \cdot T + \varepsilon \quad 7.11. \text{ egyenlet}$$

Ahol

$\gamma, \delta, \varepsilon$  – hőmérsékletfüggést kifejező paraméterek [-];

$T$  – hőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ].

A hőmérsékletfüggést leíró  $\gamma, \delta$  és  $\varepsilon$  paraméterek hidrogéntartalomtól függő további vizsgálata is szükséges, a paraméterek hidrogéntartalomtól függő viselkedését a 7.10. ábra mutatja be.



**7.10. ábra** A  $\gamma, \delta$  és  $\varepsilon$  hőmérsékletfüggő paraméterek változása a hidrogéntartalommal

A kapott viselkedés harmadfokú polinommal kellő pontossággal leírható, amely alapján a  $\gamma, \delta$  és  $\varepsilon$  paraméterek a következő összefüggésekkel definiálhatók:

$$\gamma = \gamma_1 \cdot (H_2)^3 + \gamma_2 \cdot (H_2)^2 + \gamma_3 \cdot (H_2) + \gamma_4 \quad 7.12. \text{ egyenlet}$$

$$\delta = \delta_1 \cdot (H_2)^3 + \delta_2 \cdot (H_2)^2 + \delta_3 \cdot (H_2) + \delta_4 \quad 7.13. \text{ egyenlet}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot (H_2)^3 + \varepsilon_2 \cdot (H_2)^2 + \varepsilon_3 \cdot (H_2) + \varepsilon_4 \quad 7.14. \text{ egyenlet}$$

ahol

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  – hidrogéntartalmat kifejező paraméterek [-];

$H_2$  – hidrogéntartalom [mol%].

A görbékre jól illeszkedő harmadfokú polinomok alapján a 7.2. táblázatban feltüntetett értékeket veszik fel az együtthatók:

**7.2. táblázat** A függvényillesztés alapján kapott egyenletek paramétereinek értékei

| $\gamma_1$      | $\gamma_2$      | $\gamma_3$      | $\gamma_4$      |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| -2,847E-13      | 5,601E-11       | -3,576E-09      | -7,357E-09      |
| $\delta_1$      | $\delta_2$      | $\delta_3$      | $\delta_4$      |
| 3,932E-11       | -7,951E-09      | 5,485E-07       | 7,216E-07       |
| $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ | $\varepsilon_4$ |
| -2,280E-09      | 5,003E-07       | -3,894E-05      | -1,865E-05      |

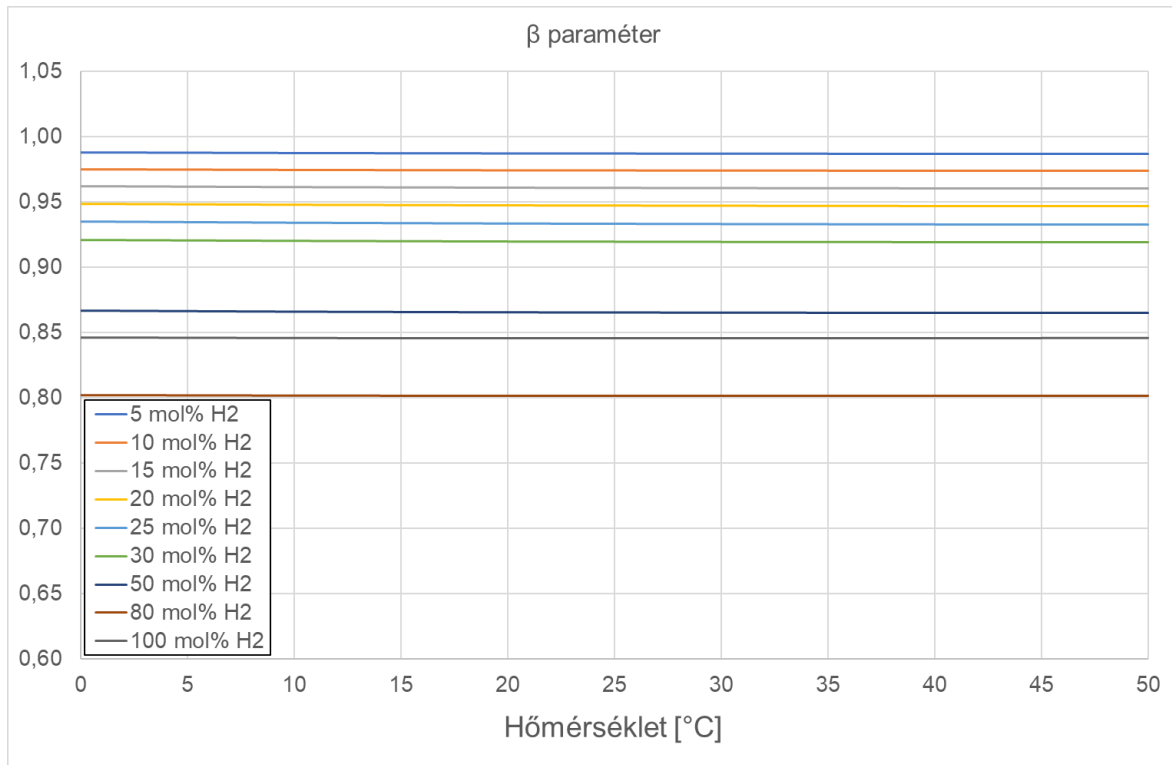
A 7.12-7.14. egyenletekbe behelyettesítve a paraméterek pontos értékeit, megkaphatóak az alábbi összefüggések:

$$\gamma = -2,847 \cdot 10^{-13} \cdot (H_2)^3 + 5,601 \cdot 10^{-11} \cdot (H_2)^2 - 3,576 \cdot 10^{-9} \cdot (H_2) - 7,357 \cdot 10^{-9}$$

$$\delta = 3,932 \cdot 10^{-11} \cdot (H_2)^3 - 7,951 \cdot 10^{-9} \cdot (H_2)^2 + 5,485 \cdot 10^{-7} \cdot (H_2) + 7,216 \cdot 10^{-7}$$

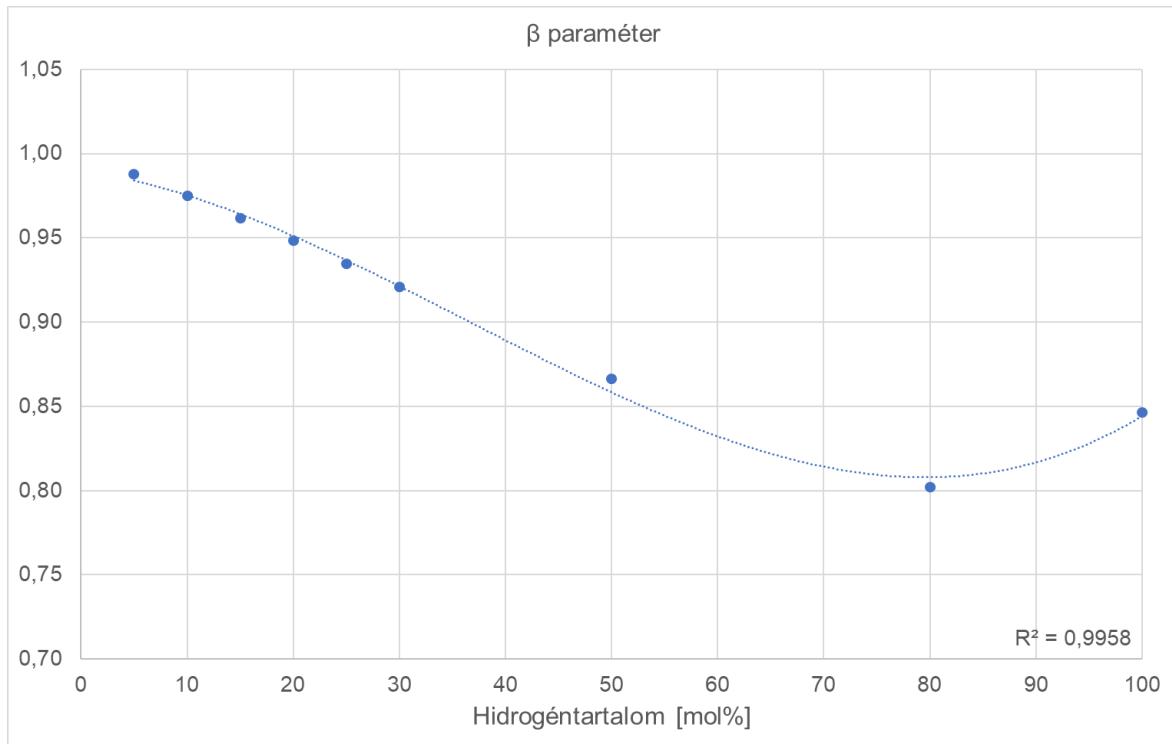
$$\varepsilon = -2,280 \cdot 10^{-9} \cdot (H_2)^3 + 5,003 \cdot 10^{-7} \cdot (H_2)^2 - 3,894 \cdot 10^{-5} \cdot (H_2) - 1,865 \cdot 10^{-5}$$

A konverziós faktort leíró összefüggés meghatározásához elengedhetetlenül szükséges a paraméter (tengelymetszet) vizsgálata is. A kezdeti egyenletben szereplő paraméter hőmérséklet szerinti ábrázolását a 7.11. ábra szemlélteti, amely alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a vizsgált paraméter a gázelegy hőmérsékletétől indifferens, csak a hidrogéntartalmától függ.



**7.11. ábra** A  $\beta$  paraméter változása

Mivel a vizsgált paramétert a hőmérséklet nem befolyásolja, emiatt elegendő a hidrogéntartalomtól való függését vizsgálni, melyet a [7.12. ábra](#) szemlélteti.



**7.12. ábra** A  $\beta$  paraméter hidrogéntartalomtól való függése

A  $\beta$  paraméter viselkedése egy harmadfokú polinommal kellő pontossággal leírható, ennek következtében a paraméter hidrogéntartalomtól való függését a következő összefüggés adja meg:

$$\beta = \beta_1 \cdot (H_2)^3 + \beta_2 \cdot (H_2)^2 + \beta_3 \cdot (H_2) + \beta_4 \quad 7.15. \text{ egyenlet}$$

Ahol

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  – hidrogéntartalomtól való függést leíró paraméterek [-];

$H_2$  – hidrogéntartalom [mol%].

A görbére jól illeszkedő harmadfokú polinom alapján a [7.3. táblázatban](#) található értékeket veszik fel az együtthatók:

### 7.3. táblázat A függvényillesztés alapján kapott egyenletek paramétereinek értékei

| $\beta_1$ | $\beta_2$  | $\beta_3$  | $\beta_4$ |
|-----------|------------|------------|-----------|
| 5,807E-07 | -6,361E-05 | -9,050E-04 | 9,900E-01 |

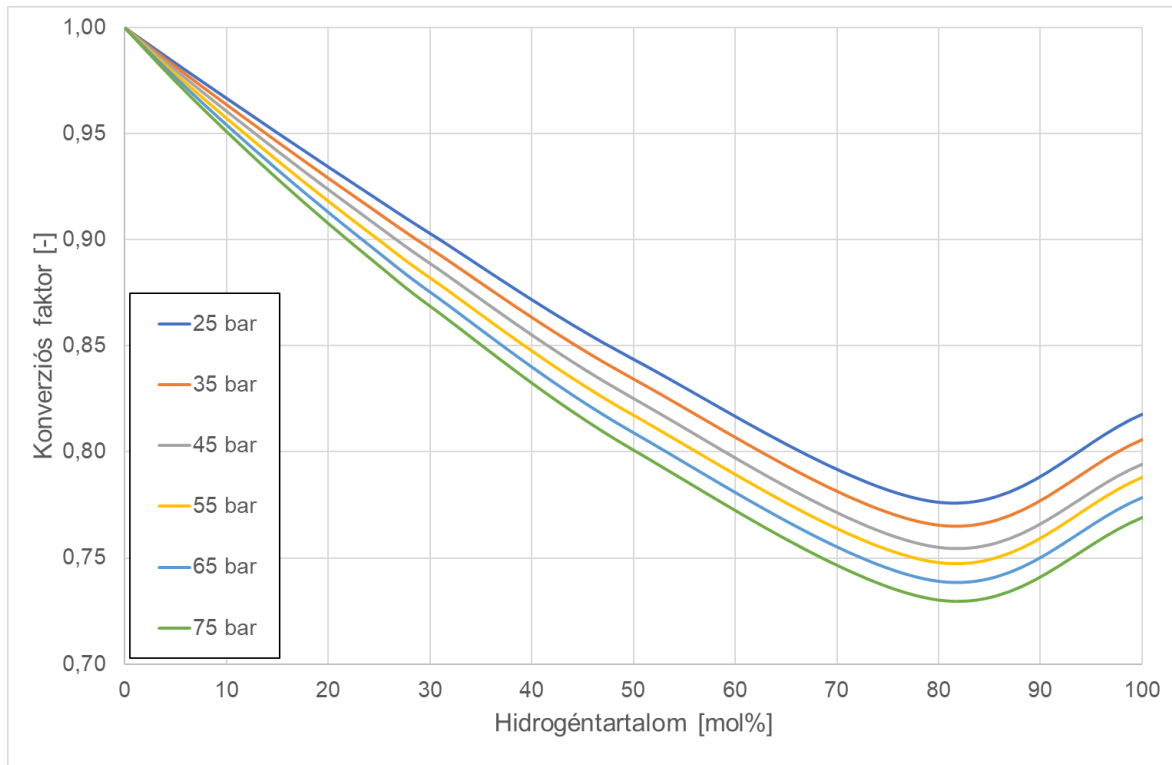
A 7.15. egyenletbe behelyettesítve a paraméterek pontos értékeit, megkapható a  $\beta$  paraméter kiszámítására szolgáló összefüggés:

$$\beta = 5,807 \cdot 10^{-7} \cdot (H_2)^3 - 6,361 \cdot 10^{-5} \cdot (H_2)^2 - 9,050 \cdot 10^{-4} \cdot (H_2) + 9,900 \cdot 10^{-1}$$

Az egyenlet abszolút hibájának tartománya 20 mol% hidrogéntartalom esetében 0,3-0,5 % közötti, legnagyobb eltérés 50 mol% H<sub>2</sub>-tartalom mellett tapasztalható, de nem haladja meg a 0,8 % értéket.

#### 7.3.3 Az energiatartalom-változást kifejező konverziós faktor alakulása a földgázszállító hálózaton

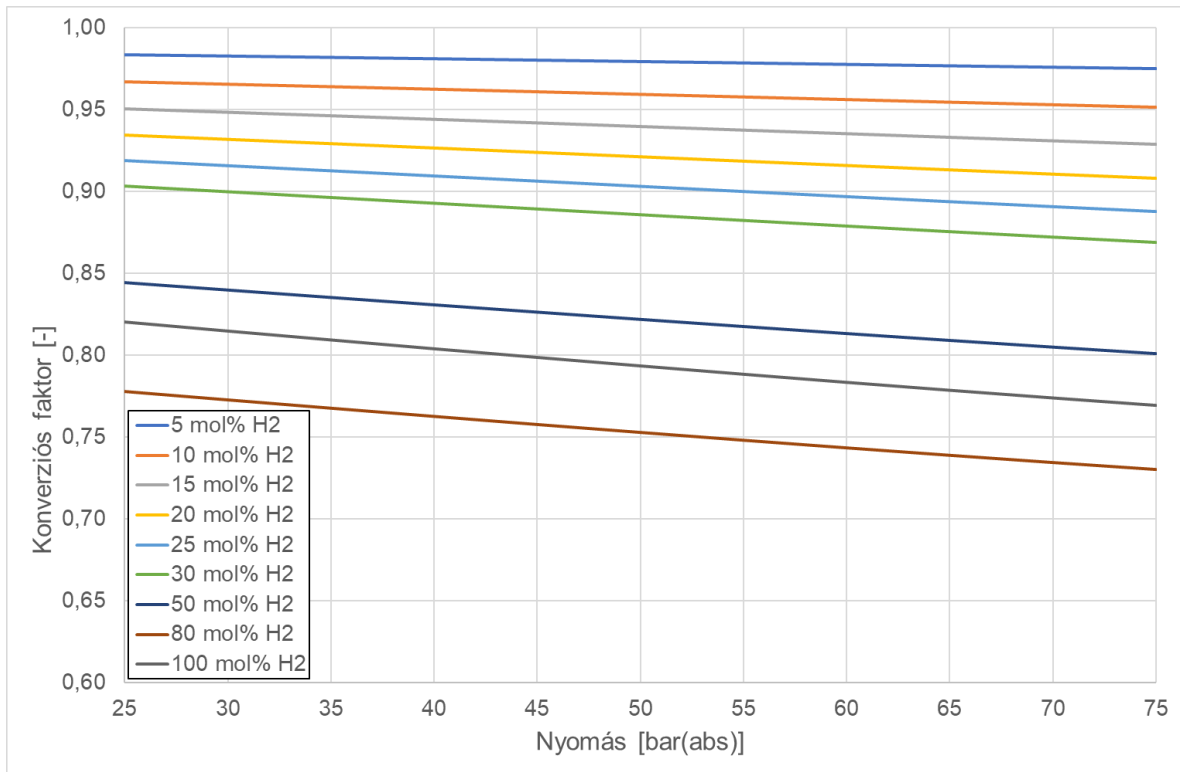
A földgázelosztó hálózat esetében jelentkezett konverziós faktor-változást bemutató görbe esetében részletes elemzésre került a görbe lefutását okozó tüzeléstechnikai jellemzők hidrogéntartalom hatására bekövetkező változása, emiatt ennek újbóli bemutatásától eltekintek. Ezt a változást követik a kompresszibilitási tényezők hányadosának négyzetgyökével korrigálva a 7.13. ábrán látható konverziós faktor görbék, amelyek a hidrogéntartalom, valamint a nyomás függvényében kerültek feltüntetésre, állandó gázhőmérsékletet (10 °C) feltételezve. Az ábrán megfigyelhető, hogy a növekvő hidrogéntartalom hatására egyre nagyobb mértékben csökken a tiszta metántartalomhoz viszonyított energiatartalom, amit a nyomás növelése tovább fokoz, hiszen hatása jelentős mind a sűrűségre, mind a kompresszibilitási tényezőre. 20 mol% H<sub>2</sub>-tartalmú gázelegy konverziós faktora 25 bar nyomáson 0,93 (vagyis 100 mol% metán energiatartalmának 93 %-a), míg 75 bar nyomáson 0,91, vagyis 9,0 %-kal csökken a metánhoz viszonyítva.



**7.13. ábra** A konverziós faktor alakulása a nyomás és a hidrogéntartalom függvényében

A görbék kb. 81,9 mol% hidrogéntartalom mellett érik el a lokális minimumpontot, amely után egy növekvő tendencia veszi kezdetét a metánhoz viszonyított relatív energiatartalom vonatkozásában. Kizárólag hidrogént tartalmazó gáz esetében a konverziós faktor a vizsgált 25 bar nyomáson 0,82, míg 75 bar nyomáson 0,76 értéket vesz fel.

A [7.14. ábra](#) növekvő hidrogén részarány mellett mutatja be a konverziós faktor alakulását a nyomás növekedés hatására, állandó hőmérsékleten (10 °C). Az ábra alapján egyértelműen megfigyelhető, hogy a hidrogéntartalom növekedése a tiszta metánhoz viszonyított energiatartalom csökkenéséhez vezet. Minél nagyobb arányban található hidrogéntartalom a metán-hidrogén gázelegyen, annál meredekebben alakulnak a konverziós faktort leíró görbék a nyomás függvényében. Természetesen ez esetben is megfigyelhető, hogy a vizsgált kétkomponensű összetételek esetében a 80 mol% hidrogéntartalmú gázelegy rendelkezik a legkisebb konverziós faktorttal, a tiszta hidrogéntartalom esetében ettől az értéktől kedvezőbb irányba mozdul el a vezetéken átszállítható energiatartalom, állandó nyomásvesztéséget feltételezve.



**7.14. ábra** A konverziós faktor alakulása eltérő hidrogéntartalmú gázelegy esetén 10 °C hőmérsékleten

Az előzőekben bemutatott, a KF konverziós faktor számszerűsítésére alkalmas összefüggés tehát azt a relatív mutatószámot adja meg, hogy milyen mértékű átszállítható energiatartalombeli csökkenés jelentkezik egy adott vezetékszakaszon tiszta metántartalomhoz viszonyítva állandó nyomásvesztés mellett, amennyiben a földgázt alkotó fő komponenshez már hidrogén is bekeverésre kerül. A földgázszállító rendszerüzemeltetők számára az egyenlet segítséget nyújthat abban, hogy a jelenlegi üzemeltetési feltételek mellett a hidrogéntartalom földgázhálózati megjelenése pontosan mekkora energiatartalombeli csökkenést jelent, amelyből a következtetéseket levonva, a földgázellátó rendszer üzemeltetésére, a fogyasztók biztonságos ellátására vonatkozóan hozhatnak döntéseket.



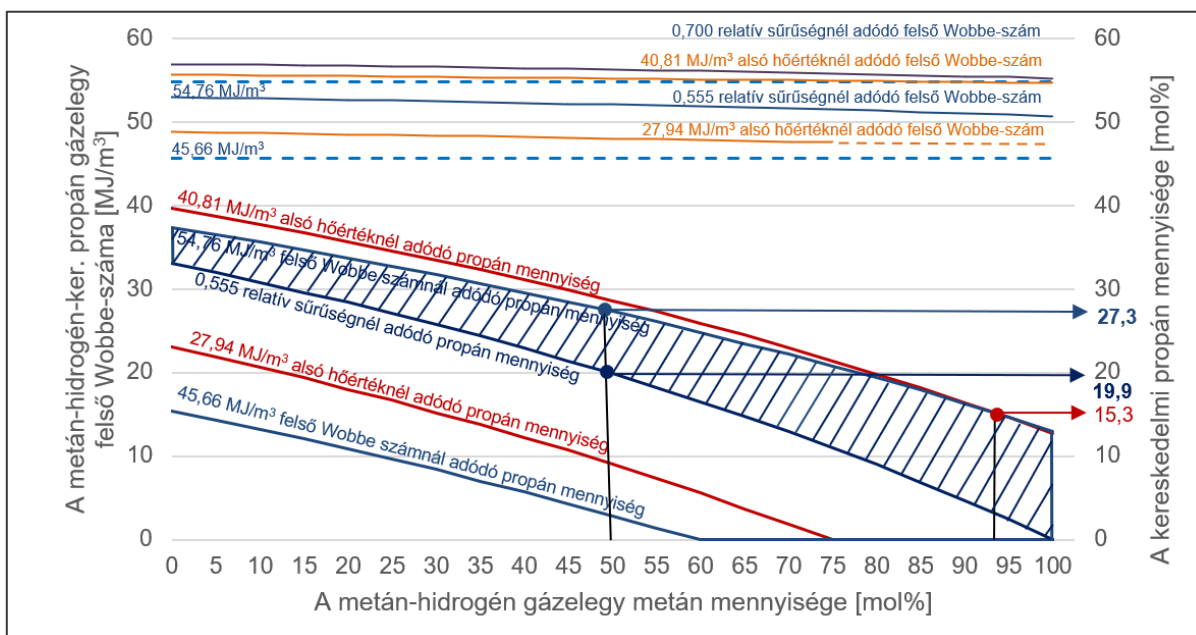
## 8 Új tudományos eredmények

### 1. tézis

- a) Kidolgoztam egy grafikus eljárást a kétkomponensű metán-hidrogén gázelegyhez hozzákeverhető, a földgázhálózati betáplálás esetén szükséges kereskedelmi propán mennyiségek meghatározásához 2H jelű gázminőség esetében.

A tézis kifejtése:

A határoló vonalakkal körbezárt sraffozott területen belül a metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott gázelegy kielégíti a földgázhálózati betáplálás követelményeit meghatározó MSZ 1648:2016 sz. szabvány paramétereit 2H gázminőség esetén.



A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő keverése során alkalmazható keverési határértékek az MSZ 1648:2016 szabvány által megengedett felső Wobbe-szám tartományának és relatív sűrűségének (2H) függvényében

Az ábráról bármely ismert összetételű metán-hidrogén gázelegy esetében leolvasható az a minimális és maximális kereskedelmi propán mennyiség, amelyet a kétkomponensű gázelegyhez keverve megfeleltethető a 2H gázminőségre vonatkozó, a földgázhálózati betápláláshoz szükséges gázminőségi követelményeknek.

- b) Meghatároztam azokat a peremfeltételeket, amelyekkel a kétkomponensű metán-hidrogén gázelegyhez hozzákeverhető, a földgázhálózati betáplálás esetén szükséges kereskedelmi propán mennyiséggel alkotott gázelegy megfeleltethető a magyar szabvány szerinti 2H jelű gázminőségnek.

*A tézis kifejtése:*

Az általam elvégzett vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy az ismert összetételű metán-hidrogén elegyhez legalább akkora mennyiségű kereskedelmi propán bekeverése szükséges, amellyel a keverék eléri az 0,555 relatív sűrűség értéket, ugyanis ebben az esetben elégti ki az alsó hőértékre, felső Wobbe-számra, valamint a relatív sűrűsége vonatkozó előírásokat. Legfeljebb pedig akkora mennyiségben szükséges a minőségjavító kereskedelmi propán bekeverése, amellyel a keverék eléri a felső Wobbe-szám tartomány felső határértékét (54,76 MJ/m<sup>3</sup>). 93,0 mol% CH<sub>4</sub>-tartalmú metán-hidrogén gázelegy esetében a maximálisan bekeverhető kereskedelmi propán mennyiségének meghatározása már a felső Wobbe-szám helyett a szabvány szerinti alsó hőérték felső határa (40,81 MJ/m<sup>3</sup>) alapján történik, hiszen a gázelegy ezt a felső határértéket éri el hamarabb.

A metán-hidrogén-kereskedelmi propán által alkotott gázelegy magyar szabványnak való megfeleltethetőségi peremfeltételei 2H gázminőség esetében

| Peremfeltételek                                     | <93,0 mol% CH <sub>4</sub>   | ≥93,0 mol% CH <sub>4</sub>  |
|---|--|---|
| <b>megfeleltethetőség szerinti alsó határérték</b>  | a metán-hidrogén-ker. propán gázelegy eléri a relatív sűrűsége vonatkozó szabvány szerinti alsó határértéket (0,555)                       |   |
| <b>megfeleltethetőség szerinti felső határérték</b> | a metán-hidrogén-ker. propán gázelegy eléri a felső Wobbe-számra vonatkozó szabvány szerinti felső határértéket (54,76 MJ/m <sup>3</sup> ) | a metán-hidrogén-ker. propán gázelegy eléri az alsó hőértékre vonatkozó szabvány szerinti felső határértéket (40,81 MJ/m <sup>3</sup> ) |

## 2. tézis

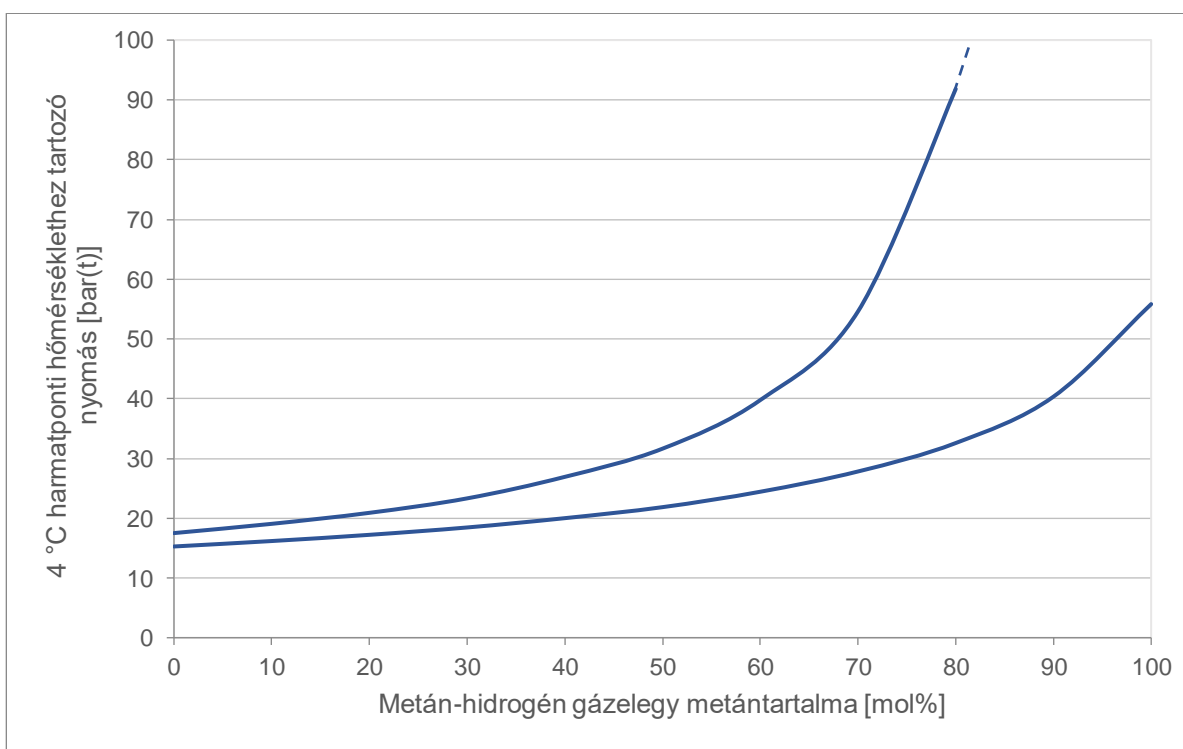
Meghatároztam, hogy az MSZ 1648:2016 sz. szabvány értelmében, a földgázoknál használatos 4 °C-os szénhidrogén harmatponti hőmérsékleten, ismert összetételű metán-hidrogén gázelegy a szabványnak való megfeleltethetőség határértékeihez elérendő kereskedelmi propánnal történő minőségjavítása esetében mikor jelezhető előre a szénhidrogén-kondenzáció jelensége, 2H gázminőség esetében.

*A tézis kifejtése:*

A földgázrendszerben a szénhidrogén-kondenzáció jelensége nem megengedhető. A szénhidrogén kondenzáció nyomás és hőmérséklet közötti összefüggését az adott gázösszetételhez tartozó szénhidrogén-harmatponti görbe adja meg. Probléma jellemzően a

magasabb szénatomszámú komponensek előfordulásakor adódik, amely kérdést kiemelten kell kezelni. A vizsgálatokat az Aspen HYSYS nevű szimulációs szoftverrel végeztem el. Az alsó görbe a relatív sűrűség alsó határához, míg a felső görbe a felső Wobbe-szám tartomány felső határához történő, propánnal megvalósuló minőségjavítás során keletkezett metán-hidrogén-ker. propán gázelegy esetén mutatja meg (lásd az előző ábrán jelölt, sraffozott terület határolóvonalai), hogy 4 °C harmatponti hőmérsékleten mekkora nyomáson jelezhető előre a két határesetként jelentkező gázelegy esetében a szénhidrogén-kondenzáció.

Megállapításra került továbbá, hogy a hidrogén földgázhálózati megjelenése, földgázhoz való hozzákeverése kereskedelmi minőségű propán hozzákeverése nélkül nem fokozza a szénhidrogén-kondenzáció jelenségét, az eredetileg szolgáltatott földgáz adott nyomáson jelentkező szénhidrogén-harmatpontját csökkenti, hiszen – összetételéből adódóan – nem növeli meg a földgázösszetétel magasabb szénatomszámú szénhidrogén-tartalmát.



Metán-hidrogén-ker. propán alkotta gázelegy 4 °C hőmérsékleten jelentkező szénhidrogén-harmatponti görbéi az MSZ 1648:2016 sz. szabvány szerinti megfelelés alsó és felső határértékéhez beállítva 2H gázminőség esetén

### **3. tézis**

**Szimulációs vizsgálataim eredményei alapján kijelenthető, hogy 20 mol% hidrogén részarány földgázhálózati betáplálása esetében – a víztelítettség-változást figyelembe véve – nem szükséges technológiaváltás a hazai földgázrendszerben megtalálható gázminőségek vízhatárpontjának beállítása során.**

*A tézis kifejtése:*

Szimulációs vizsgálatokkal alátámasztásra került, hogy a hidrogén vízhatárpont módosító hatása a közszolgáltatásban alkalmazott 2H jelű földgázhoz keverve elhanyagolható mértékű. Az eredmények alapján légköri nyomáson a hidrogén csökkenti a földgázhoz maximálisan elegyíthető vízgőz mennyiségét, viszont magasabb nyomásokon ez a hatás megfordul, és a gázkeverék több vizet képes gőzfázisban tartani adott nyomáson és hőmérsékleten, mint a hidrogénmentes minta gázösszetétel esetében. Általánosságban elmondható, hogy a nyomás növelésével ez az eltérés nő. Magyarországon a földgázhálózati minőségű gázok vízhatárpontjának beállítása a gázelőkészítés során max. 70 bar nyomáson történik, ahol 20 mol% hidrogéntartalom jelenlétében a víztelítettség változásának értéke legfeljebb 3,09 % a legkisebb vizsgált hőmérsékleten, az eltérés értéke a hőmérséklet növelésével csökken az eredeti gázösszetételhez viszonyítva. Fontos megjegyezni, hogy jelen vizsgálat nem terjedt ki a gázelőkészítő technológiában alkalmazott anyagminőségek hidrogénállóságának meghatározására.

### **4. tézis**

**A magyar földgázelosztó hálózaton jelentkező nyomásviszonyok mellett érvényes, a hidrogéntartalom hatására bekövetkező, a csővezetéken átszállítható energiatartalom-változást leíró összefüggést határoztam meg állandó nyomásvesztéséget feltételezve.**

*A tézis kifejtése:*

A súrlódásos Bernoulli egyenletből levezethető, a csővezetési gázáramlás leírására szolgáló karakterisztikus egyenlet felhasználásával határoztam meg azt az összefüggést, amely megadja, hogy a tiszta metántartalomhoz viszonyítva mekkora mértékű átszállítható energiatartalombeli csökkenés jelentkezik egy szál csővezetéken a földgázelosztó-hálózaton jelentkező nyomásviszonyok mellett, állandó nyomásvesztéséget feltételezve. Ennek a változásnak a kifejezésére került bevezetésre a KF konverziós faktor. Elmondható, hogy 10 bar üzemi nyomás alatt az áramló gáz közel ideálisnak tekinthető, a kompresszibilitási tényező értéke ezáltal 1-nek vehető figyelembe, vagyis nem befolyásolja a KF konverziós faktor értékének alakulását. Az általam meghatározott konverziós faktor az áramló közeg hőértéke ( $H_a$ ), valamint relatív sűrűsége ( $\rho_{rel}$ ) által meghatározott. Az egyenlet levezetése során állandó üzemi viszonyokat feltételeztem, a legfontosabb paraméter így a csővezetési áramlás során jelentkező változatlan nyomásvesztés. Emellett számos egyszerűsítő tényező került figyelembevételre (lásd 7.1. fejezet). Az eredmények alapján 10 mol%  $H_2$ -tartalom bekeverése esetén a tiszta metántartalomhoz viszonyított energiatartalom 2 %-kal csökken ( $KF=0,98$ ), míg 20 mol%  $H_2$ -tartalom mellett ez az érték 5 % ( $KF=0,95$ ).

$$KF = \frac{E_{kev}}{E_{CH_4}} = \frac{H_{a_{kev}}}{H_{a_{CH_4}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{rel_{CH_4}}}{\rho_{rel_{kev}}}} = \frac{\frac{H_{a_{kev}}}{\sqrt{\rho_{rel_{kev}}}}}{\frac{H_{a_{CH_4}}}{\sqrt{\rho_{rel_{CH_4}}}}}$$

Ahol

KF – konverziós faktor [-];

$E_{kev}$  – a gázelegy energiatartalma [kWh/m<sup>3</sup>];

$E_{CH_4}$  – a metán energiatartalma [kWh/m<sup>3</sup>];

$H_{a_{kev}}$  – a gázelegy alsó hőértéke [kWh/m<sup>3</sup>];

$H_{a_{CH_4}}$  – a metán alsó hőértéke [kWh/m<sup>3</sup>];

$\rho_{rel_{CH_4}}$  – a metán relatív sűrűsége [-];

$\rho_{rel_{kev}}$  – a gázelegy relatív sűrűsége [-].

## **5. tézis**

**Kidolgoztam egy olyan, a magyar földgázz szállító hálózaton jelentkező nyomásviszonyok mellett érvényes összefüggést, amellyel kiszámítható a hidrogéntartalom hatására bekövetkező átszállítható energiatartalom-változás egy állandó nyomásvesztéséget feltételező csővezeték szakaszra vonatkozóan.**

*A tézis kifejtése:*

Az elosztóhálózattal ellentétben, a nagynyomású szállítóhálózat esetében nem hanyagolható el a kompresszibilitási tényező (z) értéke a KF konverziós faktor meghatározásánál. Ennek megfelelően a KF konverziós faktor az alábbi képlet szerint számítható.

$$KF = \frac{E_{kev}}{E_{CH_4}} = \frac{H_{a_{kev}}}{H_{a_{CH_4}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{rel_{CH_4}} \cdot \overline{z_{CH_4}}}{\rho_{rel_{kev}} \cdot \overline{z_{kev}}}}$$

Ahol

KF – konverziós faktor [-];

$E_{kev}$  – a gázelegy energiatartalma [kWh/m<sup>3</sup>];

$E_{CH_4}$  – a metán energiatartalma [kWh/m<sup>3</sup>];

$H_{a_{kev}}$  – a gázelegy alsó hőértéke [kWh/m<sup>3</sup>];

$H_{a_{CH_4}}$  – a metán alsó hőértéke [kWh/m<sup>3</sup>];

$\rho_{rel_{kev}}$  – a gázelegy relatív sűrűsége [-];

$\rho_{\text{relCH}_4}$  – a metán relatív sűrűsége [-];

$\overline{z_{\text{kev}}}$  – a gázelegy átlagos kompresszibilitási tényezője [-];

$\overline{z_{\text{CH}_4}}$  – a metán átlagos kompresszibilitási tényezője [-].

Szimulációs vizsgálatokkal igazolásra került továbbá, hogy amíg a metán kompresszibilitási tényezője a nyomás növekedésével csökken, addig a hidrogén esetében növekedés tapasztalható, vagyis a metán-hidrogén gázelegy kompresszibilitási tényezőjének alakulására a két komponens viselkedése ellentétesen hat. A másik jelentős eltérés, hogy a hidrogén kompresszibilitási tényezője a hőmérséklettől szinte független, a különböző hőmérsékletre tartozó görbék egybeesnek.

## **6. tézis**

**Lineáris regresszió segítségével meghatároztam a KF konverziós faktor kiszámítására szolgáló összefüggést 20-75 bar(a) nyomás- és 0-50 °C hőmérséklettartományban, 0-100 mol% hidrogéntartalom CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> gázelegy esetén.**

*A tézis kifejtése:*

A KF konverziós faktor meghatározása széles vizsgálati tartományban megtörtént, amely esetében a görbék lefutása egyenessel jól közelíthetőnek bizonyult. Ez alapján a vizsgált nyomás- és hőmérséklettartományokban az eltérő összetételű metán-hidrogén gázelegyek konverziós faktora az alábbi összefüggéssel határozható meg, amely lineáris regresszió segítségével került leírásra:

$$\text{KF} = \alpha \cdot p + \beta$$

Ahol

$p$  – átlagnyomás [bar(a)];

$\alpha, \beta$  – paraméterek [-].

Az egyenlet alkalmazása során célszerű a vezetéken jelentkező átlagnyomás behelyettesítése annak érdekében, hogy a vezeték hossza mentén érvényes átlagértékek kerüljenek figyelembevételre. Az egyenlet abszolút hibájának tartománya 20 mol% hidrogéntartalom esetén 0,3-0,5 % közötti, legnagyobb eltérés 50 mol% H<sub>2</sub>-tartalom mellett tapasztalható, de nem haladja meg a 0,8 % értéket.

**a) Meghatároztam a KF konverziós faktor kiszámítására szolgáló összefüggésben szereplő  $\alpha$  jelű paramétert.**

*A tézis kifejtése:*

A vizsgálatok alapján láthatóvá vált, hogy az  $\alpha$  paraméter mind a hőmérséklettől, mind pedig a hidrogéntartalomtól függ. A hőmérsékletfüggést leíró görbék egy másodfokú polinommal jól közelíthetőek, így az összefüggés az alábbiak szerint alakul:

$$\alpha = \gamma \cdot T^2 + \delta \cdot T + \varepsilon$$

Ahol

$\gamma, \delta, \varepsilon$  – hőmérsékletfüggést kifejező paraméterek [-];

T – hőmérséklet [°C].

A hőmérsékletfüggést leíró  $\gamma, \delta$  és  $\varepsilon$  paraméterek hidrogéntartalomtól függő viselkedés harmadfokú polinommal kellő pontossággal leírható:

$$\gamma = -2,847 \cdot 10^{-13} \cdot (H_2)^3 + 5,601 \cdot 10^{-11} \cdot (H_2)^2 - 3,576 \cdot 10^{-9} \cdot (H_2) - 7,357 \cdot 10^{-9}$$

$$\delta = 3,932 \cdot 10^{-11} \cdot (H_2)^3 - 7,951 \cdot 10^{-9} \cdot (H_2)^2 + 5,485 \cdot 10^{-7} \cdot (H_2) + 7,216 \cdot 10^{-7}$$

$$\varepsilon = -2,280 \cdot 10^{-9} \cdot (H_2)^3 + 5,003 \cdot 10^{-7} \cdot (H_2)^2 - 3,894 \cdot 10^{-5} \cdot (H_2) - 1,865 \cdot 10^{-5}$$

Ahol

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  – hidrogéntartalmat kifejező paraméterek [-];

$H_2$  – hidrogéntartalom [mol%].

**b) Meghatároztam a KF konverziós faktor kiszámítására szolgáló összefüggésben szereplő  $\beta$  jelű paramétert.**

*A tézis kifejtése:*

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a  $\beta$  paraméter a hőmérséklettől indifferens, kizárólag a  $H_2$ -tartalom által befolyásolt. A paraméter lefutása harmadfokú polinommal kellő pontossággal leírható az alábbiak szerint:

$$\beta = 5,807 \cdot 10^{-7} \cdot (H_2)^3 - 6,361 \cdot 10^{-5} \cdot (H_2)^2 - 9,050 \cdot 10^{-4} \cdot (H_2) + 9,900 \cdot 10^{-1}$$

## 9 Gyakorlati hasznosíthatóság

A tudományos kutatómunkára alapozott értekezésem elkészítése során, számos olyan kérdésben sikerült eredményeket felmutatnom, melyek nagymértékben hozzájárulhatnak a hazai hidrogén- és földgázipar együttműködéséhez, valamint elősegíthetik a Magyarországon termelt hidrogén földgázhálózati betáplálásához szükséges műszaki-szabályozási kérdések minél előbbi kidolgozását. Az értekezés által közvetítendő eredmények alkalmasak az ipari szakemberek számára a hidrogén földgázhálózati betáplálásra történő előkészítés során felmerülő műszaki kérdések megoldására, így megteremtve a földgázhálózat biztonságos és folyamatos üzemeltetését. Az értekezésben bemutatott kutatási eredmények alkalmasak lehetnek továbbá a magyar földgázipar hidrogénnel szemben támasztandó, jelenleg még kidolgozásra váró műszaki-szabályozási előírásainak előkészítésére.

Az értekezésem eredményei jól hasznosíthatók a gázipari szakemberek graduális és posztgraduális oktatásában, mivel a hidrogén földgázhálózati betáplálása és szállítása körül jelenleg igen hiányosak az ismeretek, jelenleg is számos kutatás alapját képezve Európában. Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája a hidrogénnel és a hidrogéntekológiával kapcsolatos ismeretek bővítése tekintetében kiemelt intézkedésként említi az oktatási programok kidolgozását, tananyagok fejlesztését és / vagy EU-s tananyagok adaptálását. Úgy gondolom, az értekezésem segítséget nyújthat ezen tananyagok kidolgozásában.

Az értekezés által bemutatott tudományos eredmények továbbfejlesztésének egyik lehetséges irányvonalaként kínálkozik egy olyan számítógépes szoftver kidolgozása, amely az adott területen szolgáltatott földgázhoz kevert hidrogén esetében megadja a maximálisan bekeverhető mennyiséget, hogy az még megfeleljen a magyar gázminőségi követelményeknek.

További célom volt, hogy a megjelenített eredmények, és a hozzájuk tartozó elméleti, szakirodalmi példák segítségével a témakört minden érdeklődő szakember számára érthetővé tegyem. Remélem, hogy a bemutatott eredményekkel sikerült felkeltenem mind a földgáz- és mind a hidrogén ipar egyes szereplőinek érdeklődését.



## 10 Összefoglalás

A világban egyre nagyobb érdeklődés övezi a hidrogénnek, mint a jövő energiahordozójának megjelenését. Jelenleg is számos kutatás, pilot projekt tűzte ki célul, hogy meghatározza azt a maximálisan megengedhető hidrogéntartalmat, amelyet a rendelkezésre álló földgázinfrastruktúra - a legkisebb mértékű átalakítások mellett - képes elviselni. A kutatások, száma a jövőben várhatóan emelkedő tendenciát fog mutatni, alkalmazkodva az EU 2050-re célul kitűzött klímasemlegesség eléréséhez. Az EU klímasemlegessége jelentős kihívással néz szembe, hiszen az energiatermelés- és felhasználás az ÜHG-kibocsátás jelentős részéért felelős, valamint továbbra sem elhanyagolható az olaj- és földgázimport mértéke. A Bizottság által 2020-ban kiadott Hidrogénstratégia az energiaátmenet felgyorsítását, a tiszta hidrogén előretörését támogatja a 2050-re kitűzött célok elérése érdekében. A megújuló forrásból származó hidrogénnek nemcsak az ÜHG gázok csökkentésében lenne jelentős szerepe, de a felmerülő energiaigények szezonális ingadozásában is segítséget nyújtana. A 2021-ben megjelent Nemzeti Hidrogénstratégia a meglévő földgázinfrastruktúra szerepét emeli ki, mint a hidrogéntárolás eszköze, és 2030-ra évi min. 2 V/V% hidrogén részarány bekeverését tűzi ki célul.

Értekezésemben a hazai hidrogéngazdaság előretörését segítő kérdéseket vizsgáltam meg, kiemelten kezelve a jelenlegi földgázinfrastruktúra kérdését. A kutatásom első részében áttekintettem a témában íródott nemzetközi szakirodalmat, illetve az EU-ban futó és lezajlott projekteket, amelyek egyértelműen rámutatnak a téma aktualitására, további vizsgálatra váró kérdéseire. Nyilvánosan hozzáférhető statisztikai adatok alapján meghatároztam a hazai földgázfogyasztás kiváltásához szükséges megújuló alapon termelt elméleti hidrogénpotenciál mennyiségét. Az eredmények alapján láthatóvá vált, hogy jelenleg a zöld hidrogénnel történő földgázfelhasználás kiváltása csupán néhány százalékos részarányt képvisel. Az értekezés második részében a hidrogén földgázhálózati betáplálását elősegítő műszaki kérdéseket vontam vizsgálat alá. Meghatároztam a metán-hidrogén gázelegyhez hozzákeverhető kereskedelmi minőségű propán mennyiségét a magyar gázminőségi szabványnak megfelelően, amely alapján egy grafikus módon ábrázolt eljárás is kidolgozásra került. Emellett meghatározásra kerültek a szénhidrogén-kondenzáció előrejelezhetőségének, valamint a kereskedelmi propánnal megvalósuló minőségjavítás peremfeltételei 2H gázminőség esetén. Vizsgálataimat kiterjesztettem a földgázhálózati gázminőségre történő előkészítés szempontjából jelentős kérdésre, a hidrogén vízharmatpont-módosító hatásának elemzésére. Értekezésem fő fejezetében egy

összefüggés kidolgozása kerül bemutatásra, amely megmutatja, hogy mind a földgázelosztó-, mind pedig a földgázszállító hálózaton hogyan változik a csővezetéken átszállítható energiatartalom a hidrogéntartalom megjelenésének hatására, változatlan nyomás- és geometriai viszonyok mellett.

Bízom benne, hogy az elvégzett kutatómunka, valamint a hazai viszonyokra kapott eredményeim számos, eddig nem vizsgált kérdéskörre adnak magyarázatot, ezzel elősegítve a hidrogén magyar földgázrendszerbe történő betáplálását.

## Summary

The world is increasingly interested in hydrogen as the energy carrier of the future. A number of research and pilot projects are currently underway to determine the maximum allowable hydrogen content that the available natural gas infrastructure can support with the minimum of modifications. The number of studies is expected to increase in the future, in line with the EU's 2050 climate neutrality target. The EU's climate neutrality faces a significant challenge, as energy production and consumption are responsible for a significant share of GHG emissions and oil and gas imports remain significant. The Commission's 2020 Hydrogen Strategy supports the acceleration of the energy transition and the advance of clean hydrogen to meet the 2050 targets. Hydrogen from renewable sources would not only play a significant role in reducing GHG emissions, but would also help to address seasonal variations in emerging energy demand. The National Hydrogen Strategy 2021 highlights the role of existing natural gas infrastructure as a means to store hydrogen and targets a minimum of 2 % hydrogen by 2030.

In my thesis, I examined the issues that will help the advancement of the domestic hydrogen economy, with a special focus on the current natural gas infrastructure. In the first part of my research, I reviewed the international literature on the subject, as well as the projects running and completed in the EU, which clearly point to the topicality of the subject and the issues that need further investigation. Based on publicly available statistical data, I have estimated the theoretical hydrogen potential produced on a renewable basis to replace domestic natural gas consumption. The results show that currently the share of green hydrogen substitution for natural gas consumption is only a few percent. In the second part of the thesis, I examined the technical issues that facilitate the injection of hydrogen into the natural gas grid. I determined the amount of commercial grade propane that can be added to the methane-hydrogen gas mixture in accordance with the Hungarian gas quality standard, on the basis of which a graphical procedure was developed. In addition, the boundary conditions for the predictability of hydrocarbon condensation and quality improvement with commercial propane for 2H gas quality were determined. I have extended my investigations to the analysis of the water dewpoint modifying effect of hydrogen, an issue of importance for the preparation of gas for natural gas network quality. In the main chapter of my thesis, I develop a relationship that shows how the transportable energy capacity in both the natural gas distribution and transmission networks changes as a result of the introduction of hydrogen under unchanged pressure and geometric conditions.

I am confident that the research work carried out and the results obtained for the domestic conditions will provide explanations for a number of issues that have not been investigated so far, thus facilitating the introduction of hydrogen into the Hungarian natural gas system.

## 11 A szerző témában megjelent publikációi időrendi sorrendben

**Galyas A. B.**, Szunyog I., Tihanyi L. (2017): Az egységes európai gázminőségi előírások hatása a hazai földgázellátó rendszerbe betáplált gázminőségekre, Műszaki Földtudományi Közlemények, (2063-5508): 86. 1 pp. 129-137.

**Galyas A. B.**, Szunyog I. (2020): A hidrogén hatása a földgázhálózati gázminőségre, Műszaki Földtudományi Közlemények, (2063-5508): 89 1 pp. 221-226.

**Galyas A. B.**, Szunyog I. (2020): A hidrogénnek, mint a jövő energiahordozójának tartályban való tárolási alternatívái, Műszaki Földtudományi Közlemények, (2063-5508): 89 1 pp. 216-220

**Galyas A. B.**, Kis L., Tihanyi L., Szunyog I. (2020): A víztelítettség vizsgálata a földgáz hidrogéntartalmának függvényében, Magyar Épületgépészet (1215-9913): 69 2020/9. szám pp. 10-15.

Szunyog I., **Galyas A. B.** (2020): A földgáz hidrogénnel történő helyettesítésének potenciálja Magyarországon, Műszaki Földtudományi Közlemények 89: 1 pp. 227–233., 7 p.

Szunyog, I., **Galyas, A. B.** (2020): Reduction of Pollutants in the Residential Sector by Mixing Hydrogen into the Natural Gas Network in Hungary, Acta Technologia: International Scientific Journal about Technologies 6 : 4 pp. 111-117.

**Galyas A. B.**, Szunyog I. (2021): A metán-hidrogén gázelegy kereskedelmi propánnal történő minőségjavításának peremfeltételei a hazai földgázellátó rendszeren, Magyar Épületgépészet (1215-9913): 70 3 pp. 9-16.

Kis, L., **Galyas, A. B.**, Szunyog, I., Tihanyi, L. (2021): Investigation of the water content of CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> system, Acta Technologia: International Scientific Journal about Technologies (2453-675X): 7 1 pp. 1-8.

**Galyas A. B.**, Szunyog I., Kis L., Tihanyi L., Vadászi M. (2021): A hidrogén energiatartalomra gyakorolt hatásának vizsgálata a hazai földgázelosztó hálózatba történő betáplálás esetén, Energiagazdálkodás (0021-0757): 62. évf. 2-3. szám pp. 42-44.

Molnár Z., Lékó Cs., **Galyas A. B.**, Szunyog I. (2021): A hidrogéntartalmú földgáz hatása az expanziós gázelőkészítő technológiára, Magyar Energetika (1216-8599): 28 3. pp. 25-29.

**Galyas A. B.**, Szunyog I., Vadászi M. (2022): A földgázfelhasználás hidrogénnel történő helyettesítésének elméleti potenciálja Magyarországon, Épületgépész: A Magyar Épületgépészek Szövetségének Szaklapja (2063-5400): 11 pp. 38-41.

Lakatos I., Vadászi M., Szunyog I., **Galyas A. B.** (2022): A hidrogén porózus közegben történő tárolása, Bányászati és Kohászati Lapok-Bányászat (0522-3512): 155 1-2 pp. 62-69.

**Galyas, A. B.**, Kis, L., Tihanyi, L., Szunyog, I., Vadaszi, M., Koncz, A. (2023): Effect of hydrogen blending on the energy capacity of natural gas transmission networks, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 48, Issue 39, Pages 14795-14807, ISSN 0360-3199, (<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.198>)

Vadászi, M., Szunyog, I., **Galyas, A. B.** (2023): The Role of Hydrogen Connected to the Existing Natural Gas Infrastructure in the Hungarian Energy Transition, In: IEEE - IEEE (szerk.) 2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM), Piscataway (NJ), Amerikai Egyesült Államok, pp. 1-5., 5 p.

## 12 Irodalomjegyzék

19/2009. (I.30.) Korm. rendelet a földgázellátásról szóló 2008. évi XL. törvény rendelkezéseinek végrehajtásáról

2008. évi XL. törvény a földgázellátásról

A Bizottság 813/2013/EU rendelete (2013. augusztus 2.) a 2009/125/EK európai parlamenti és tanácsi irányelvnek a helyiségfűtő berendezések és a kombinált fűtőberendezések környezettudatos tervezésére vonatkozó követelmények tekintetében történő végrehajtásáról

Abd, A. A., Najj, S. Z., Thian, T. C., Othman, M. R. (2021): Evaluation of hydrogen concentration effect on the natural gas properties and flow performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (1), pp. 974-983, 10.1016/j.ijhydene.2020.09.141

Abeysekera, M., Wu, J., Jenkins, N., Rees, M. (2016): Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas, *Applied Energy*, 164, pp. 991-1002, 10.1016/j.apenergy.2015.05.099

Abeysekera, M., Rees, M., Wu, J. (2014): Simulation and analysis of low pressure gas networks with decentralized fuel injection, *Energy Procedia*, 61, pp. 402-406, 10.1016/j.egypro.2014.11.1135

Altfeld, K., Pinchbeck, D. (2013): Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems

Amanatidis, G. (2022): Combating Climate Change, Európai Parlament, ([https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/en/FTU\\_2.5.2.pdf](https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/en/FTU_2.5.2.pdf))

Andre, J., Auray, S., Brac, J., De Wolf, D., Maisonnier, G., Ould- Sidi, M.-M., Simonnet, A. (2013): Design and dimensioning of hydrogen transmission pipeline networks, *European Journal of Operational Research*, 229 (1), pp. 239-251, 10.1016/j.ejor.2013.02.03

Aspen HYSYS V9; 2016

Blokland, H., Sweelssen, J., Isaac, T., Boersma, A. (2021): Detecting hydrogen concentrations during admixing hydrogen in natural gas grids, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (63), pp. 32318-32330, 10.1016/j.ijhydene.2021.06.221

Bobok, E. (1997): Áramlástan; Miskolci Egyetemi Kiadó, pp.128-202. ISBN 963 661 317 6

Campbell, J. M. (2014): Gas Conditioning and Processing, Vol. 1.: The Basic Principles, 9th Edition, Second Printing, J. M. Campbell and Company, Norman, Oklahoma, ISBN 978-0-9703349-2-2

Cerbe, G. (2007): A gáztechnika alapjai; Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, pp.1-72. ISBN 963 9542 54 7

Chaczykowski, M., Sund, F., Zarodkiewicz, P., Hope, S. M. (2018): Gas composition tracking in transient pipeline flow, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 55, pp. 321-330, 10.1016/j.jngse.2018.03.014

Cheli, L., Guzzo, G., Adolfo, D., Carcasci, C. (2021): Steady-state analysis of a natural gas distribution network with hydrogen injection to absorb excess renewable electricity, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, Iss. 50, pp. 25562-25577, ISSN 0360-3199

Christensen, K. O., Løkken, T. V., Solbraa, E., Nygaard, C. F., Bersås, A. (2011): Water content of high pressure natural gas - Data, prediction and experience from field, Statoil,

Gassco, ([https://www.sintef.no/globalassets/project/trondheim\\_gts/presentasjoner/water-content-of-high-pressure-natural-gas.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/trondheim_gts/presentasjoner/water-content-of-high-pressure-natural-gas.pdf))

Devinder, M., Kun, T., Venkatesh, T., Pradheep, K., Clive, R. C. (2022): Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks - A Review, *Energies*, MDPI, vol. 15(10), pp. 1-32.

Di Lullo, G., Oni, A. O., Kumar, A. (2021): Blending blue hydrogen with natural gas for direct consumption: examining the effect of hydrogen concentration on transportation and well-to-combustion greenhouse gas emissions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (36), pp. 19202-19216, 10.1016/j.ijhydene.2021.03.062

Dmytrakh, I., Leshchak, R., Syrotyuk, A., Barna, R. (2017): Effect of hydrogen concentration on fatigue crack growth behaviour in pipeline steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (9), pp. 6401-6408, 10.1016/j.ijhydene.2016.11.193

Elberry, A. M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio, A., Larmi, M. (2021): Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (29), Article 1567115690, 10.1016/j.ijhydene.2021.02.080

Ely Energy: Natural Gas Distribution and SNG Back-up Systems, (2003) (<http://www.elyenergy.com>)

EN 16726:2015+A1:2018 Gázinfrastruktúra. Gázminőség. H gázcsoport.

Farkas, O.-né, Nagy, G. (1984): *Tüzelés*; Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 191-234. ISBN 963 17 8491 6

Fotovoltaikus erőmű létesítése Felsőzsolcán (<http://mvm.hu/bemutakozas/mvmcsoport/mvm-zold-generacio/naperomuletesite-felsozsolcan/>) (Letöltve: 2023.01.11.)

Galyas A. B.: Hidrogén a földgázhálózatban – Fikció vagy már a valóság? 26. Dunagáz Konferencia és Kiállítás, Visegrád, 2018

Gaykema, E., Skryabin, I., Prest, J., Hansen, B. (2021): Assessing the viability of the act natural gas distribution network for reuse as a hydrogen distribution network, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (23), pp. 12280-12289, 10.1016/j.ijhydene.2020.11.051

Gielen, D., Taibi, E., Miranda, R. (2019): Hydrogen: a renewable energy perspective, IRENA, ([https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf))

Guandalini, G., Colbertaldo, P., Campanari, S. (2017): Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections, *Applied Energy*, 185, pp. 1712-1723, 10.1016/j.apenergy.2016.03.006

H21 project - executive summary, Leeds City Gate Team (2017) (<https://www.northerngasnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2017/04/H21-Executive-Summary-Interactive-PDF-July-2016 -V2.pdf>)

Hafsi, Z., Elaoud, S., Mishra, M. (2019): A computational modelling of natural gas flow in looped network: effect of upstream hydrogen injection on the structural integrity of gas pipelines, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 64, pp. 107-117.

Haugen, M. J., Flynn, D., Greening, P., Tichler, J., Blythe, P., Boies, A. M. (2022): Electrification versus hydrogen for UK road freight: conclusions from a systems analysis of transport energy transitions, *Energy for Sustainable Development*, 68, pp. 203-210, 10.1016/j.esd.2022.03.011

Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J. M., Hangx, S. J. T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E. M., Strobel, G. J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Bentham, M., Stuart Haszeldine, R., Carbonell, R., Rudloff, A. (2021): Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges, *Energy and Environmental Science*, 14, pp. 853-864, 10.1039/D0EE03536J

Hidrogénstratégia a klímasemleges Európáért, Európai Bizottság közleménye, COM(2020) 301 final, Brüsszel, (2020.7.8.)

(<https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>)

Hydrogen In Gas GridS (HIGGS): a systematic validation approach at various admixture levels into high-pressure grids, (<https://cordis.europa.eu/project/id/875091>)

International Energy Agency (2021): Global hydrogen review 2021, (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/e57fd1ee-aac7-494d-a351-f2a4024909b4ZGlobalHydrogenReview2021.pdf>)

Judd, R. (2013): Hydrogen blending and network adaptation, GERG-The European Gas Research Group, IEA Hydrogen Roadmap workshop, June 10th 2013, Paris

Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., Jäger Waldau, A. (2021): Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables, *Energy Conversion and Management*, Vol. 228, 113649, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.encon-man.2020.113649>.

Klell, M. (2010): Storage of Hydrogen in the Pure Form, *Handbook of Hydrogen Storage* (pp. 1 - 37) 10.1002/9783527629800.ch1.

Kougias, I., Taylor, N., Kakoulaki, G., Jager-Waldau, A. (2021): The role of photovoltaics for the european green deal and the recovery plan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, Article 111017, 10.1016/j.rser.2021.111017

Kuczynski, S., Laciak, M., Olijnyk, A., Szurlej, A., Wlodek, T. (2019): Thermodynamic and technical issues of hydrogen and methane-hydrogen mixtures pipeline transmission, *Energies*, 12 (3), 10.3390/en12030569

Leicher, T., Nowakowski, A., Giese, K. (2017): Power-to-gas and the consequences: impact of higher hydrogen concentrations in natural gas on industrial combustion processes, *INFUB - 11th European conference on industrial furnaces and boilers*, INFUB-11, *Energy Processes*, vol. 120, pp. 96-103, 10.1016/j.egypro.2017.07.157

Liemberger, W., Halmschlager, D., Miltner, M., Harasek, M. (2019): Efficient extraction of hydrogen transported as co-stream in the natural gas grid - the importance of process design, *Applied Energy*, 233–234, Article 747763, 10.1016/j.apenergy.2018.10.047

Pellegrini, M., Guzzini, A., Sacconi, C. (2020): A preliminary assessment of the potential of low percentage green hydrogen blending in the Italian natural gas network, *Energies*, 13 (21), p. 5570, 10.3390/en13215570

Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: Földgázipari társaságok 2022. évi adatai (<http://www.mekh.hu/foldgazipari-tarsasagok-2022-evi-adatai>)

Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: A magyar földgázrendszer 2021. évi adatai



[https://www.mekh.hu/download/9/1f/21000/v%C3%A9gleges\\_MEKH\\_statistikai\\_kiadvany\\_foldgaz\\_A4\\_07.pdf](https://www.mekh.hu/download/9/1f/21000/v%C3%A9gleges_MEKH_statistikai_kiadvany_foldgaz_A4_07.pdf)

Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: Villamosenergia-ipari engedélyesek listája 2023 február (<http://www.mekh.hu/engedelyesek-listaja>) (Letöltve: 2023.03.30.)

Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata 55. (2020): A hidrogén a környezetbarát energiahordozó, Hidrogén az energetikában, Gáz- és Olajipari Tagozat, FAP-2020/101-GOT  
Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája - Stratégia a tiszta hidrogén és hidrogéntekológiák hazai bevezetésére és a hidrogénipar háttérbázisának megteremtésére, Innovációs és Technológiai Minisztérium, (2021. május)

Marcogaz – Hydrogen regulation/standards survey (2020) ([https://www.marcogaz.org/wp-content/uploads/2021/02/WG\\_GQ-405-H2RegulationSurvey.pdf](https://www.marcogaz.org/wp-content/uploads/2021/02/WG_GQ-405-H2RegulationSurvey.pdf))

Marcu, A., Imbault, O., Fernandez, A. (2021): ERCST hydrogen paper: the Fit for 55 package and its implications for the EU hydrogen economy, (<https://ercst.org/wp-content/uploads/2021/12/Fit-for-55-paper-v14.pdf>)

Mazza, M., Cavana, E. L., Mercado, M., Chicco, G., Leone, P. (2019): Creation of representative gas distribution networks for multi-vector energy system studies, IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2019 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), genova, Italy, pp. 1-6, 10.1109/EEEIC.2019.8783701

Melaina, M. W., Antonia, O., Penev M. (2013): Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues, (<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>)

Meszléry, C. (1978): Gáztechnikai példatár; Műszaki Könyvkiadó, Budapest, pp.34-92. ISBN 963 10 2184 X

MSZ 1648:2016 Közszolgáltatású, vezetékes földgáz.

MSZ EN 16726:2016 – Gázinfrastruktúra. Gázminőség. H-gázcsoport.

MSZ EN 437:1999 Vizsgálógázok. Vizsgálónyomások. Készülékkategóriák.

MSZ EN 437:2019 Vizsgálógázok. Vizsgálónyomások. Készülékkategóriák.

MSZ ISO 6976:1997 Földgáz. A hőértékek, a sűrűség, a relatív sűrűség és a Wobbe-szám számítása a gázösszetételből

MSZ EN ISO 6976:2017 Földgáz. A hőértékek, a sűrűség, a relatív sűrűség és a Wobbe-szám számítása a gázösszetételből

Nemzeti Energia- és Klímaterv, Innovációs és Technológiai Minisztérium, (2020)

Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig, Innovációs és Technológiai Minisztérium (2020)

Non-combustion related impact of hydrogen admixture – Tightness testing of gas distribution components in 40% $H_2$ +60% $CH_4$ , Work Package 3 – Task 3.2.3 - Leakage tests on indoor installation (long term), Testing Hydrogen admixture for Gas Applications (ThyGA Project), (2022)

Ozturk, M., Dincer, I. (2021): A comprehensive review on power-togas with hydrogen options for cleaner applications, International Journal of Hydrogen Energy, 46 (62), pp. 31511-31522, 10.1016/j.ijhydene.2021.07.066

- Quarton, C. J., Samsatli, S. (2018): Power-to-gas for injection into the gas grid: what can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, pp. 302-316, 10.1016/j.rser.2018.09.007
- Quintino, F. M., Nascimento, N., Fernandes, E. C. (2021): Aspects of hydrogen and biomethane introduction in natural gas infrastructure and equipment, *Hydro*, 2 (3), pp. 301-318, 10.3390/hydrogen2030016
- Pellegrini, S., Lanzini, A., Leone, P. (2017): Greening the gas network – the need for modelling the distributed injection of alternative fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, pp. 266-286, 10.1016/j.rser.2016.11.243
- Scott, M., Powells, G. (2019): Blended hydrogen: the UK public's perspective, (<https://www.ncl.ac.uk/media/wwwnclacuk/geographypoliticsandsociology/files/news/blended-hydrogen-the-uk-publics-perspective.pdf>)
- Shirvill, L., Roberts, T., Royle, M., Willoughby, D., Sathiah, P. (2018): Experimental study of hydrogen explosion in repeated pipe congestion - part 2: effects of increase in hydrogen concentration in hydrogen-methane- air mixture, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (12), 10.1016/j.ijhydene.2018.12.021
- Shirvill, L., Roberts, T., Royle, M., Willoughby, D., Sathiah, P. (2019): Experimental study of hydrogen explosion in repeated pipe congestion - part 1: effects of increase in congestion, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (18), pp. 9466-9483, 10.1016/j.ijhydene.2018.04.193
- Speight, J. G. (2019): 4 - Composition and properties, Editor(s): James G. Speight, *Natural Gas (Second Edition)*, Gulf Professional Publishing, Pages 99-148, ISBN 9780128095706, (<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809570-6.00004-7>)
- Sun, Y., Cheng, Y.F. (2021): Hydrogen permeation and distribution at a high-strength X80 steel weld under stressing conditions and the implication on pipeline failure, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (44), pp. 23100-23112, 10.1016/j.ijhydene.2021.04.115
- Szilágyi Zs., Szunyog I. (2017): Mérések a gáziparban; Készült a Magyar Mérnöki Kamara Gáz- és Olajipari Tagozatában, 11/2017-GOT FAP (102 o.), Kamarai segédlet
- Szilas, A. P. (1975): Production and transport of oil and gas, Akadémiai Kiado
- Szunyog I. (2009): A biogázok földgáz közszolgáltatásban történő alkalmazásának minőségi feltételrendszere Magyarországon; PhD értekezés
- Tabkhi, F., Azzaro-Pantel, C., Pibouleau, L., Domenech S. (2008): A mathematical framework for modelling and evaluating natural gas pipeline networks under hydrogen injection, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (21), pp. 6222-6231, 10.1016/j.ijhydene.2008.07.103
- Tihanyi L., Zsuga J. (2012): Földgázszállító rendszerek tervezése és létesítése, Gazdász-Elasztik Kft. Miskolc, ISBN 978-963-661-999-2
- Tiszta bolygót mindenkinek – Európai hosszú távú stratégiai jövőkép egy virágzó, modern, versenyképes klímaselemleges gazdaságról, Európai Bizottság közleménye, COM/2018/773 final, Brüsszel, (2018.11.28.)
- Vida M. (főszerk.) (1984): Gáztechnikai kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest

Wulf, C., Linhen, J., Zapp, P. (2018): Review of power-to-gas projects in europe, 12th international renewable energy storage conference, IRES 2018, 13-15 march 2018, Dusseldorf, Germany, Energy Proc, vol. 155, pp. 367-378, 10.1016/j.egypro.2018.11.041

Holst, M., Aschbrenner, S., Smolinka, T., Voglstatter, C., Grimm, G. (2021): Cost forecast for low-temperature electrolysis – Technology driven bottom-up prognosis fpr PEM and alkaline water elektrolysis systems, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>)