



MISKOLCI
E G Y E T E M

Kutatási eredmények
a
Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Karának
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai
Intézetében
2024





MISKOLCI
E G Y E T E M

Kutatási eredmények
a
Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Karának
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai
Intézetében
2024

Szerkesztette:
Kovács Judit – Lukács János

Miskolc, 2024



**Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai
Karának Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetében
2024**

Szerkesztette:

Dr. Kovács Judit – Dr. Lukács János

© Sahm Alden Abd Al Al Anis Mohammad, Bencs Péter, Jemal Ebrahim Dessie,
Fodorné Cserépi Mariann, Gál Gaszton György, Gáspár Marcell,
Gyura László, Hareancz Ferenc, Kocsisné Baán Mária, Kolozsváry Zoltán,
Kovács Judit, Kovács Péter Zoltán, Kuzsella László, Lukács János, Lukács Zsolt,
Meilinger Ákos, Nagy Nóra, Sas Illés, Abdulhakim Shukurea,
Raghawendra Pratap Singh Sisodia, Tajti Ferenc, Terdik Gábor

Kiadó:

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar,
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

A kiadásért felelős:

Dr. Lukács Zsolt egyetemi docens, intézetigazgató

Miskolc, 2024

ISBN 978-963-358-346-3

HIDROGÉN BEKEVERÉS HATÁSA A FÖLDGÁZ RENDSZEREK INTEGRITÁSÁRA

Nagy Nóra

*Tanársegéd, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkeztintegritási Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: nora.nagy@uni-miskolc.hu

Bencs Péter

*Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék*

Cím: 3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: peter.bencs@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen áttekintő tanulmány a hidrogén szállításával kapcsolatos problémákat és kockázati tényezőket foglalja össze. A bemutatott kockázati tényezők alapján egy adott csővezetékszakaszra vonatkozó áramlástanai jellemzőket vizsgáltuk meg. Az áttekintő tanulmányban kitértünk még a gázkeveredési hatások vizsgálatára is, illetve a hidrogén rétegződési jelenségének bemutatására is. A cikkben ismertetett tényezők alapján lehetőség van a csővezetékszakaszok üzemeltetésével kapcsolatban felmerülő kockázati faktorokat súlyozni a hidrogénes kitétség szempontjából.

Kulcsszavak: hidrogén, kockázatértékelés, csővezeték

Abstract

This overview study summarises the problems and risks associated with the transport of hydrogen. Based on the risk factors presented, the flow characteristics for a specific pipeline section have been investigated. The overview study also includes an analysis of gas mixing effects and the hydrogen stratification phenomenon. On the basis of these explained studies (using the safety risks presented), an assessment of the problems in the pipeline section is made. Based on the described susceptibility factors in this article, it is possible to weight the risk factors arising in connection with the operation of pipeline in terms of hydrogen exposure.

Keywords: hydrogen, risk assessment, pipeline

1. Bevezetés

A jövőben a hidrogén kulcsfontosságú energiahordozó lehet a költséghatékonyság és a fenntarthatóság tekintetében. Ebben a kutatásban a hidrogénnek a földgázvezeték-hálózatokba való beléptetésével kapcsolatos fontosabb kérdéseket mutatjuk be, a szállítóvezetékek vonatkozásában.

Általánosságban elmondható, hogy a hidrogén földgázhoz történő bekeverése a megfelelő körülmények között és viszonylag kis hidrogénkoncentráció mellett csak minimális átalakításokat igényel a csővezeték-hálózat működtetésében és karbantartásában. A hidrogén-földgáz keveréket el

lehet juttatni a végfelhasználói rendszerekbe, vagy a hidrogént le lehet választani (szeparálni) és felhasználni az olyan eszközökben, mint például a hidrogénes üzemanyagcellák.

Ha az energiarendszerek szén-dioxid-mentessé válnak, a hidrogén hasznos energiahordozó lehet. Számos alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrás, például biomassza, nukleáris és megújuló villamos energia, valamint a szén vagy a földgáz szén-dioxid-leválasztással és -megkötéssel hidrogén előállítására alkalmas, amely aztán számos célra felhasználható akár lakossági, akár ipari fűtésre és áramtermelésre, valamint szezonális energiatárolásra. Az egyik legnagyobb kihívás azonban még mindig a hidrogén összes ilyen célú felhasználásához szükséges infrastruktúra kiépítése. Annak érdekében, hogy a hidrogén előnyeit az új, speciális infrastruktúra kiépítésének költségei nélkül kihasználhassuk, a kutatók, a vállalkozások, valamint a helyi és nemzeti kormányok egyaránt vizsgálják a hidrogénnek a földgázvezeték-hálózatokba való bekeverését. Ennek a stratégiának számos lehetséges előnye és hátránya van.

A földgázt jelenleg olyan nehezen szén-dioxid-mentesíthető ágazatokban használják, mint az energiaszektor, a lakossági és a kereskedelmi fűtés, valamint az ipari-technológiai műveletek. Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogénnek a földgázzal való keverése potenciálisan csökkentheti ezen ágazatok szén-dioxid-intenzitását. A földgáz-infrastruktúra és a földgáztól függő valamennyi szektor szén-dioxid-kibocsátása csökkenthető lenne, ha az alacsony szén-dioxid-kibocsátású forrásokból, például a szél- és a napenergiából előállított hidrogént betáplálnák a földgáz-infrastruktúrába. Azáltal, hogy a hidrogén a hálózati villamos energiával egyenértékű energiahordozóként szolgál – ezt a funkciót a földgázhálózat már most is ellátja –, tovább növelheti az energiabiztonságot és az ellenálló képességet. Ha a hálózatnak villamosenergia-csúcsra van szüksége, a hidrogén – a földgázhoz hasonlóan – módot kínál a villamosenergia-ellátásra. A hidrogén a villamos energia helyettesítőjeként is használható, például az otthonok és a vállalkozások fűtésére. Ahogy egyre több változó megújuló energiaforrás kezd áramot szolgáltatni az elektromos hálózatba, a hidrogén rugalmas elektromos terhelésként is működhet, ami egyre előnyösebbé válik [1], [2].

Kiváltképp a víz elektrolízise kínál egy lehetséges módszert a hidrogén minimális költséggel történő előállítására, extrán megújuló villamos energiából. Mivel a hidrogénnek a földgázhálózatokba való beépítése elősegítheti az egész gazdaság szén-dioxid-mentesítését, miközben megőrzi a földgázhálózatok által a helyi, nemzeti és nemzetközi energiarendszerek számára nyújtott előnyök egy részét, számos vállalkozás, kutató és kormány érdeklődik az ötlet iránt. Az előzőekben bemutatott lehetőségek tovább növelik a jelenlegi földgázhálózatok jelentőségét a jövőben az országok energiaszolgáltatási stratégiájában. A földgázhálózatok e tulajdonságai növelik az energiarendszer rugalmasságát és biztonságát. Jelen kutatásban összefoglaljuk a földgázhálózatba kevert hidrogén lehetséges hatását a földgázhálózat biztonságára, mely fontos információt szolgáltat a hálózat fejlesztési stratégiák kialakítása során.

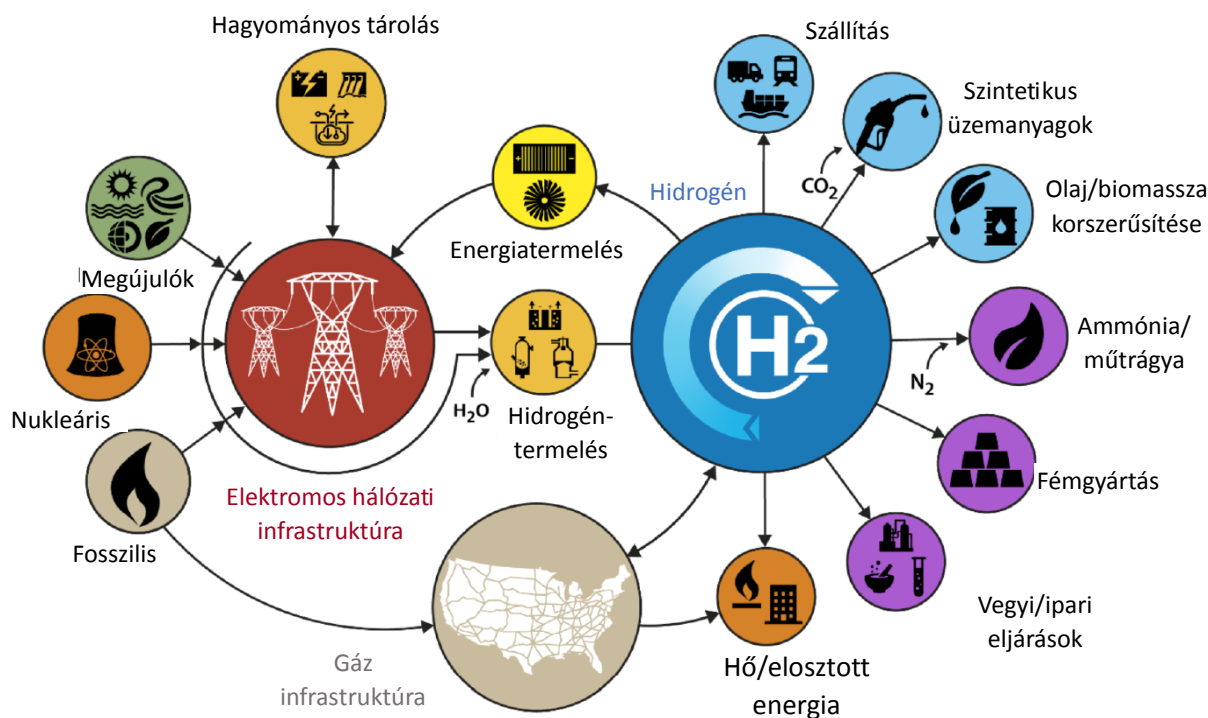
2. Hidrogénnel kevert földgáz

A földgáz főként metánból áll. A metánhoz képest a hidrogén gyorsabban ég, alacsonyabb a gyulladási energia minimuma, és szélesebb gyúlékonysági tartománnyal rendelkezik. Ezen tulajdonságok alapján a hidrogén-levegő keverékek égetésekor – előkeveréssel vagy anélkül –, az égés során kialakult lángot nehéz eloltani. Az égetés során jelentős mennyiségben keletkeznek nitrogén-oxidok (NO_x), amelyek mennyisége körülbelül 500 ppm. Bár a levegő előkeverési arányának emelése jelentősen csökkenti az NO_x -tartalmat, ez azonban növeli a visszagyulladás valószínűségét. Az NO_x -termelés csökkentése és a visszagyulladás megakadályozása közötti kompromisszum a hidrogénégetés egyik legfőbb dilemmája.

Ezzel szemben a hidrogén kedvező és kedvezőtlen égési tulajdonságaiból a következő előnyök adódnak, amikor földgázzal keverve égetjük: a gyúlékonyság növekedése miatt az égés folyamatossá válik és a gyújtási, illetve a visszagyújtási energia csökken; az egy térfogatra jutó égési energia növekedése lehetővé teszi, hogy kis égővel nagy mennyiségű hőenergiát termeljenek; a nagyobb levegő előkeverési arány lehetővé teszi az NO_x -termelés elfojtását visszagyújtás nélkül [2].

Ahelyett, hogy a gazdaság szén-dioxid-mentesítésében kizárólag a villamosításra támaszkodnánk, költséghatékonyabb és rugalmasabb lehet a meglévő gázhálózatok használata hidrogéntermeléshez. Emellett, a földgázhálózatok hidrogénüzemre való átállítása bővítheti az általuk kiszolgálható piacokat. A földgáz hagyományos felhasználási területein kívül – mint például a villamosenergia- és a hőtermelés, a vegyipar és az ipari folyamatok, valamint a fém- és a műtrágyagyártás –, a hidrogén felhasználható szintetikus üzemanyagok előállítására, vagy közvetlenül hidrogénüzemű autók üzemanyagaként is.

A hidrogén-skála koncepciót az 1. ábra mutatja be a hidrogén előállítási módszereivel és felhasználási módjaival együtt [5].



1. ábra. A hidrogén-skála koncepció [5].

Bár a hidrogénnek a meglévő földgáz-infrastruktúrába való beépítése számos előnnyel járhat, ezt több olyan megfontolás és ismeretlen tényező nehezíti, amelyek azzal kapcsolatosak, hogy a meglévő földgázvezeték-infrastruktúra mennyire működne optimálisan a hidrogén használata esetén. A földgázszállító és -elosztó hálózatok különböző részeinek hidrogénnel való kompatibilitása az egyik ilyen és az ehhez köthető bizonytalanság. Ezek a hálózatok jelenleg a földgáz kitermeléséből, feldolgozásából, szállításából, elosztásából és a végfelhasználókhoz történő eljuttatásából állnak,

amelyekre hatással lesz a hidrogén bevezetése. A földgáz és a hidrogén termodinamikai, szállítási és égési jellemzői nagyon eltérőek [3], [5].

A hidrogén bekeverésnek a szerkezetintegritással és a biztonságos üzemeltetéssel kapcsolatos aggályai közé tartoznak a gázszivárgások és a csővezetékrendszerek anyagtulajdonságainak a romlása. Még mindig vannak megválaszolatlan kérdések azzal kapcsolatban, hogy hogyan lehet ezt figyelembe venni annak meghatározásakor, hogy a hálózati rendszerek és rendszerelemek milyen mértékben kompatibilisek a hidrogénnel. Ismert tény, hogy a gáznemű hidrogén jelentős hatással van a csővezetékek acéljainak tulajdonságaira, de további vizsgálatok szükségesek a polietilén csővezetékanyagok hidrogénnel szembeni tűrőképességének megállapításához, mivel a hidrogén hatásai ezen anyagcsoportnál nem ismertek teljeskörűen.

3. Biztonsági értékelés

Nehéz megmondani, hogy a hidrogénnek a földgázvezeték-rendszerbe történő bevezetése milyen hatással lesz a végfelhasználói berendezésekre és a meglévő hálózati infrastruktúrára, mivel a különböző gázkeverékek termodinamikája és szállítási tulajdonságai drasztikusan megváltozhatnak. Ezeket a jelenségeket vázoljuk fel, valamint a földgázvezeték-rendszer azon jellemző helyeit, ahol ezek potenciálisan előfordulhatnak. E problémák megoldása nélkül a hidrogén gázvezetékekbe történő betáplálása negatív hatással lehet a földgáz rendszerek biztonságára és megbízhatóságára. A biztonság, a megbízhatóság és a pénzügyi fenntarthatóság biztosítása érdekében a hidrogén bekeverési lehetőségek mérlegelésénél figyelembe kell venni a szükséges berendezés-korszerűsítéseket és a hálózat üzemeltetési és karbantartási gyakorlatának szükségszerű megváltoztatását. Ezeket a kérdéseket a következő alfejezetekben, mind a szállító-, mind az elosztóhálózatokra vonatkozóan tárgyaljuk, a hálózati szakaszoktól az egyes berendezésekig terjedően [5].

3.1. Gázfelhalmozódás

Két kísérlet során, ahol az egyik egy nagyobb, tipikusan kereskedelmi vagy ipari épületek helyiségében, a másik pedig egy kisebb, tipikusan lakossági jellegű helyiségben folyt, a gázfelhalmozódást vizsgálták. Megállapították, hogy a keverékek gázfelhalmozódási viselkedése nagyon hasonlít a tiszta földgázéhoz. A hidrogén nem vált ki a keverékből, ahogyan azt várták. Nagyobb gázkoncentrációt eredményezett a megnövelt áramlási sebesség, bár a vártnál kisebb mértékben. 50%-os hidrogénkeverék koncentrációig terjedő keverékek esetében a szivárgás után állandósult koncentráció alig volt nagyobb, mint a földgáz esetében, míg a 70%-nál nagyobb hidrogénkeverékek esetében a koncentráció észrevehetőbben emelkedett (50% és 70% között mérsékelt növekedés figyelhető meg a koncentráció változásban) [5].

3.2. Robbanások a védett térben

A 20%-nál kevesebb hidrogént tartalmazó keverékek esetében a zárt légterű robbanások intenzitásának arányos növekedése alacsonyabb volt a tisztán földgáz zárt térben történő robbanásokhoz képest. Az 50%-nál több hidrogént tartalmazó keverékek esetében a túlnyomás és az ehhez kapcsolódó károsodás jelentősebb növekedése volt tapasztalható (20% és 50% között mérsékelt növekedés figyelhető meg a robbanási intenzitás változásban). Ha szellőztetést alkalmaznak, vagy csökkentik a bezártságot létrehozó szerkezeti szűkületeket, a nagyobb hidrogénkoncentrációjú robbanásokból származó túlnyomás jelentősen csökkenthető [5].

3.3. A szállítóvezetékbeli eredő kockázat

A szállítóvezetékbeli eredő kockázatot a csővezetékek meghibásodási gyakoriságának, a gyulladás bekövetkezési valószínűségének és a következmények súlyának szorzataként határozzák meg [5].

A NATURALHY projektben egy könnyen használható szűrési módszert (LURAP) fejlesztett ki, amely lehetővé teszi, hogy az üzemeltetők felmérhessék a földgáz/hidrogén keverékek szállítása által jelentett kockázatot, és összehasonlítsák a jelenlegi kockázati szintekkel [4], [6], [7]. A kockázat egyéni és társadalmi becslése egyaránt lehetséges. A csővezetékek hidrogén okozta meghibásodásának legfőbb oka a hidrogénes elridegedés, amely – mint említettük –, a csővezetékek anyagtulajdonságainak leromlásában mutatkozik meg. A hidrogénatomok, kis méretük miatt, könnyen nagy nyomáson képesek a szerkezeti elem anyagába diffundálni és könnyen nagy koncentrációban anyagszerkezeti hibákat okozni. De kockázati tényezőt jelent a szállítóvezetékek tekintetében a metán és a hidrogén bekeveréséből eredő teljesítmény (nyomás, hőmérséklet) növekedés vagy csökkenés is.

4. A hidrogén és a földgáz eltérő tulajdonságai

Az EU 2030-ra 32%-os megújuló energia részarányt tűzött ki célként [8]. Ugyanakkor, napjainkban még nem áll rendelkezésre olyan hatékony energiatárolási módszer, amely a megújuló energiaforrásokból kinyert nagy mennyiségű energia tárolását képes hosszabb távon megoldani. A megújuló energiaforrásokkal megtermelt villamos energiából elektrolízis útján hidrogént lehet előállítani. A tárolás történhet, akár a szezonális igényekhez igazodó tárolással is.

A hidrogén tárolásának egyik lehetséges módja a földgázhálózati betáplálás. A power-to-gas technológia során az egyik lehetséges módszer, hogy tiszta hidrogén kerül a földgázhálózatba, bekeveréssel [9], [10].

A hidrogén földgázhálózati betáplálása során fontos megvizsgálni a következő, fontosabb tüzeléstechnikai tulajdonságokat, és ezen tulajdonságokat össze kell hasonlítani a földgázéval.

A fűtőérték az a hőmennyiség, amely normál állapotú gáz egységnyi mennyiségének levegő (vagy oxigén) jelenlétében történő tökéletes elégetésekor felszabadul, ha az égéstermékek a kiindulási hőmérsékletre hűlnek vissza, és a keletkezett H_2O gőz állapotban van jelen.

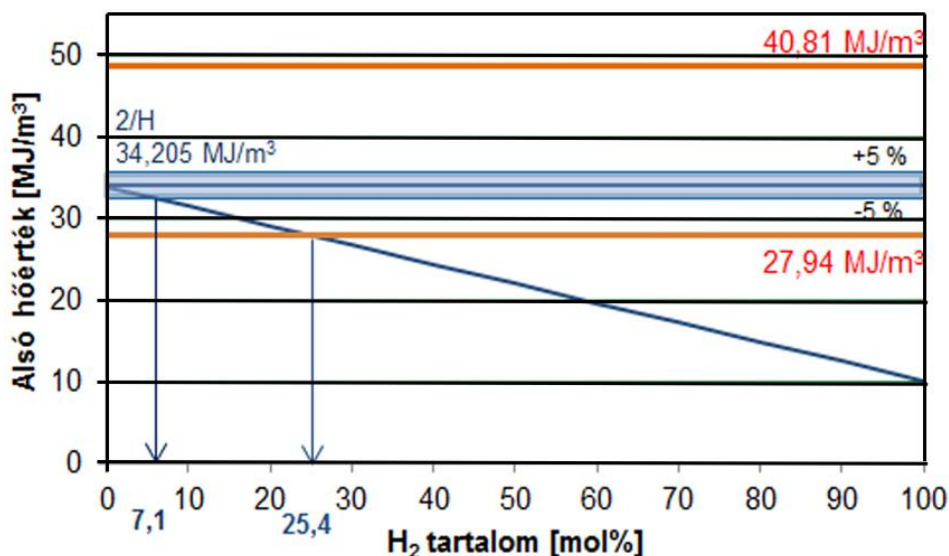
A Wobbe-szám az éghető gázok, például a földgáz, a cseppfolyósított propángáz (LPG) és a városi gáz cserélhetőségének mutatója, amelyet gyakran határoznak meg a gázszállítók előírásaiban.

A hidrogén energiatartalma jelentős mértékben elmarad a metánétól, hiszen hőértéke (a belőle felszabaduló energia mennyisége) kevesebb mint egyharmada a metán hőértékének. Viszont, a hidrogén nagyon kis sűrűségének (1. táblázat) következtében az alsó és a felső Wobbe-számok (az éghető gázok cserélhetőségének legfontosabb paraméterei) már közelebb helyezkednek el egymáshoz, 10-15%-os eltérést mutatva [9], [10].

A 2. ábra szemlélteti a hidrogén bekeverés hatását a hazai gázhálózatban található földgázhoz. A hazai gázszolgáltatásban található földgáz minősége 2H (hivatalos szabályok szerinti érték). A keverék (földgáz és hidrogén) alsó hőértékének (alsó fűtőértékének) változását mutatja növekvő H_2 -tartalom mellett. Az ábrában feltüntetésre kerültek a GET VHR [11] (földgázellátási törvény végrehajtási rendelete) alsó hőértékre előírt határértékei (narancssárga), valamint egy 2H minőségű szolgáltatott gáz, amelynek alsó hőértékétől legfeljebb $\pm 5\%$ eltérés engedhető meg (kék). Látható, hogy a gázkeverék alsó hőértéke már 7,1 mol% hidrogéntartalomnál eléri a szerződött értékre vonatkozó 5%-os eltérés alsó határát. A nemzeti gázszolgáltatási szabvány alsó határát a gázkeverék 25,4 mol% hidrogéntartalom mellett éri el.

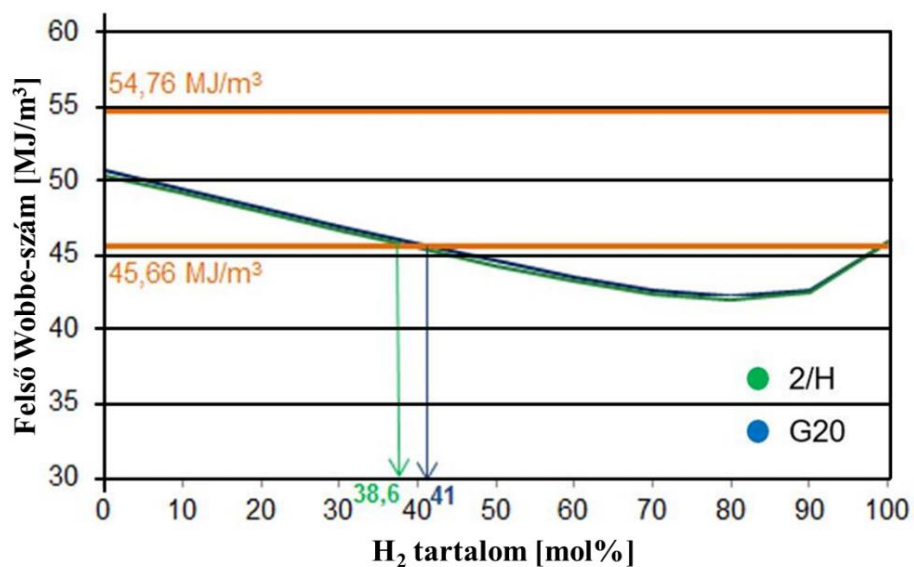
1. táblázat. A hidrogén és a földgáz (2H) tüzeléstechnikai jellemzőinek összehasonlítása [9], [10]

Tulajdonság / paraméter	Hidrogén (H ₂)	Földgáz (2H)
Sűrűség (15 °C, p_n) [kg/m ³]	0,090	0,695
Alsó hőérték (15/15 °C) [MJ/m ³]	10,223	34,205
Felső hőérték (15/15 °C) [MJ/m ³]	12,102	37,973
Alsó Wobbe-szám [MJ/m ³]	38,758	45,406
Felső Wobbe-szám [MJ/m ³]	45,880	50,407
Lángterjedési sebesség [cm/s]	~267	~34
Gyulladási határkoncentráció (20 °C) [tf%]	4,0 – 77,0	4,3 – 15,6
Fajlagos elméleti oxigénszükséglet [m ³ /m ³]	0,499	2,014
Fajlagos elméleti levegőszükséglet [m ³ /m ³]	2,383	9,614
Keletkező CO ₂ [m ³ /m ³]	0,001	1,009

**2. ábra.** Az alsó hőérték változása növekvő mennyiségű hidrogéntartalom esetén [9].

A 3. ábra a felső Wobbe-szám változását mutatja be a 2H minőségű földgázhoz, valamint a G20 vizsgálógázhoz (tisztá metán) kevert, egyre növekvő mennyiségű hidrogéntartalom mellett. Továbbá feltüntetésre kerültek a GET VHR, a 2H gázminőségre vonatkozó felső Wobbe-szám tartomány határértékek (narancssárga).

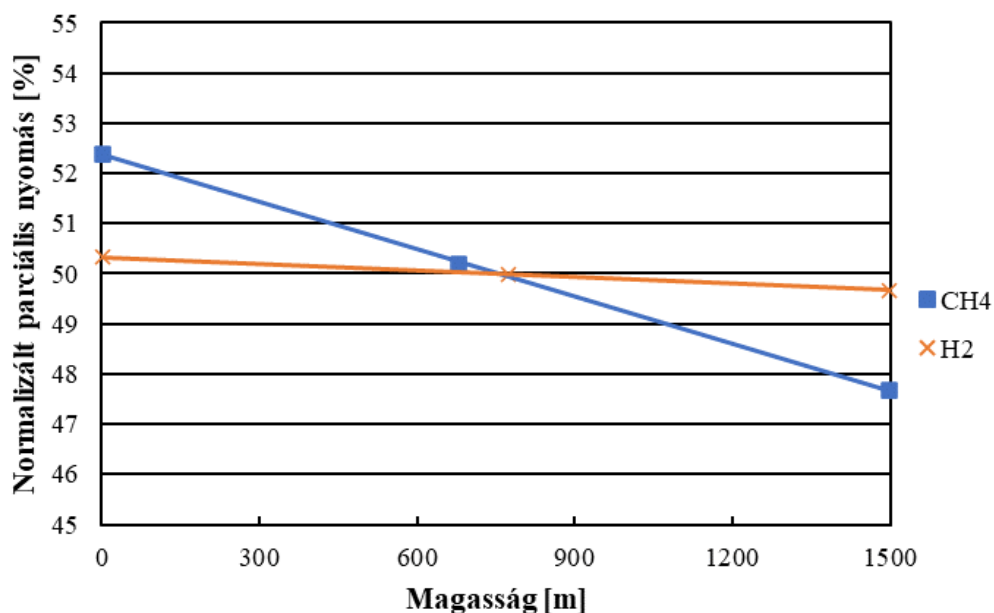
A 2H gázminőség 38,6 mol%, míg a G20 vizsgálógáz 41,0 mol% hidrogéntartalom mellett éri a felső Wobbe-szám tartományának alsó határértékét (az éghető gázok cserélhetőségének alsó határértékét). Összefoglalva a hidrogén bekeverés hatása a földgázra elsődlegesen a fűtőérték változásában mutatkozik meg (a keverék fűtőértéke nagymértékben lecsökken a bekeverés mértékének növelésével). A bekeverés hatására a keverék gáz lángterjedési sebessége is megváltozik, így az égés során használt eszközök is módosítást igényelhetnek nagyobb mértékű bekeverés esetén.



3. ábra. A felső Wobbe-szám változása növekvő hidrogéntartalom mellett [9].

5. Rétegződés a földgáz-hidrogén keverékekben

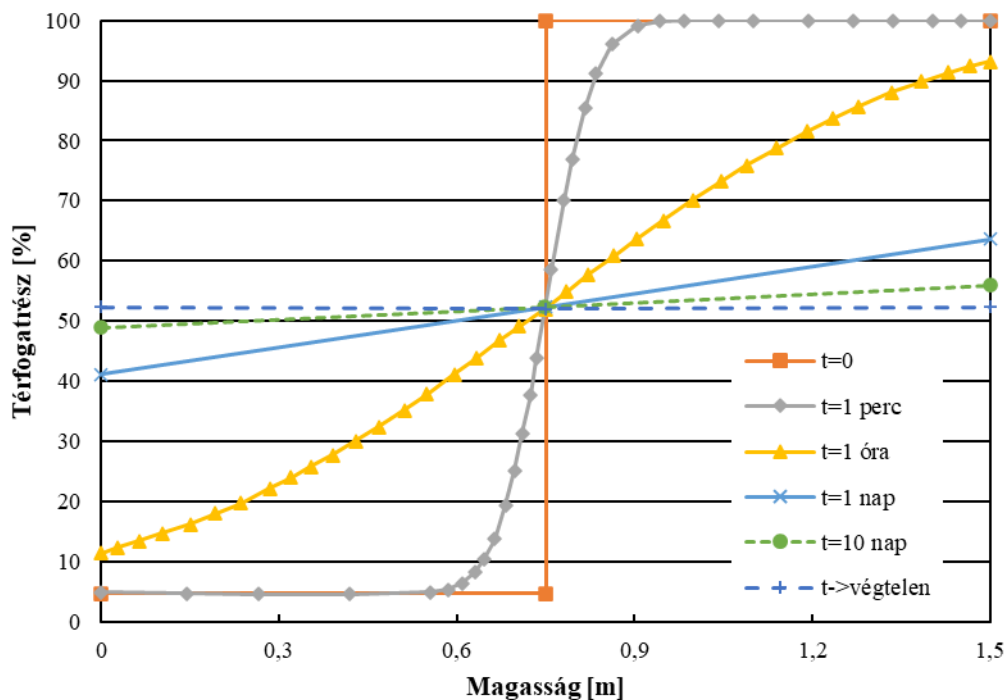
A meglévő földgázvezetékbe történő hidrogén bekeverésekor a hidrogén és a földgáz közötti sűrűségkülönbség egyenetlen koncentráció-eloszlást eredményezhet, ami lokálisan megnövelheti a hidrogén parciális nyomását.



4. ábra. H₂-CH₄ gázok 1:1 arányú keverékének egyensúlyi eloszlási profilja egy 1500 m magas csőben, 1 G és 300 K hőmérsékleten [13].

Számos tanulmány [12] foglalkozik az áramlási sebesség, a hőmérséklet és a keverési arány hatásával a gázkeverék eloszlásra. Az eredmények azt mutatják, hogy jelentős gázrétegződés csak rendkívül nagy magasság-eséseknél következik be, még 1500 m-es esésnél is a rétegződés elhanyagolható. Ezen kívül megállapítható, hogy a gázdiffúzió általában lassú, és akár 300 évbe is beletelhet, amíg egy 1500 m-es csővezetékben 1 bar nyomáson egyensúlyi eloszlás alakul ki (4. ábra).

A H_2 - CH_4 gázkeverék egyensúlyi rétegződését számítással pontosan meg lehet határozni. 1 G reális gravitációs mezőt és 1500 m-es csőmagasságot (megközelítőleg a Shan-Jing csővezeték maximális esése) vizsgáltak [13], amely 1:1 arányban kevert H_2 - CH_4 gázokkal volt töltve. Az 5. ábra a számítások alapján az egyensúlyi eloszlást mutatja. Általánosságban elmondható, hogy a nagy magasságcsökkenések elősegítik a gázok gravitációs rétegződését. De még 1500 m-es nagy esés esetén is csak kis mértékben változik a p_{H_2} (49,7 %-ról 50,3 %-ra), ami nyilvánvalóan túl kicsi ahhoz, hogy a hidrogén okozta elridegedés hatása számottevő legyen. Barthelemy AISI 321 acélon végzett törésmechanikai vizsgálatai alapján a hidrogén parciális nyomása, amelynél a maximális elridegség mérték, 20 és 100 bar nyomás közötti volt. A vizsgálatai kimutatták, hogy a ridegség nagyon gyorsan növekszik alacsony nyomáson, mielőtt 25 bar közelében elérné az állandósult szintet [14].



5. ábra. A H_2 térfogattartalom profiljának alakulása egy 1,5 m magas csőben 1 G és 300 K mellett, ahol a H_2 és a CH_4 $t = 0$ -nál teljesen rétegzett, a felső felét tiszta H_2 , az alsó felét pedig tiszta CH_4 tölti ki [13].

A hőmérséklet hatásának vizsgálata során, tekintettel arra, hogy a parciális nyomás kilométeres tartományokban a magassággal közel lineárisan változik, csak a cső felső részében és az alján kialakult parciális nyomást vizsgálták. A felső és alsó parciális nyomás közötti különbség csökkent a hőmérséklet növekedésével, ami arra utal, hogy a gáz rétegződése elenyésző magasabb hőmérsékleten, a molekulák intenzívebb Brown-mozgása miatt. Ugyanakkor, még nagyon alacsony, 150 K

hőmérsékleten is, ahol a gravitációs rétegződés kedvezőbb, a felső és az alsó p_{H_2} közötti különbség még mindig jelentéktelen ($\sim 1,2\%$).

A keverési arányok (a teljes H_2 -térfogatfrakció alapján) hatását vizsgálva azt állapították meg, hogy a két gáz normalizált parciális nyomása lineárisan korrelál az adott gázok átlagos koncentrációjával. Vagyis, a felső és az alsó p_{H_2} közötti különbség tiszta H_2 körülmények között maximalizálódik. Az 1500 m magas cső esetében 300 K hőmérsékleten a H_2 frakció maximális különbsége $\sim 2,7\%$.

A magasság növelése kitolja az egyensúly kialakulásához szükséges időt. Vegyük észre, hogy ez az idő a magasság négyzetével arányos, azaz az 1500 m-es csőben az egyensúly eléréséhez szükséges idő százszor nagyobb, mint a 150 m-es csőben. Ez azt jelenti, hogy a rétegződés termodinamikai és kinetikai megvalósíthatósága általában nem teljesíthető egyszerre, mivel a nyilvánvaló rétegződés nagy csőmagasságot igényel, ami viszont megakadályozza az egyensúly korlátozott idő alatt történő kialakulását. Vegyük figyelembe, hogy a fenti számítások a kezdetben teljesen elegyített gázkeverékeken alapulnak, és a gázok diffúziója gravitációs rétegződéshez vezet.

Egy másik helyzetben, amelyben a gázkeverékek kezdetben teljesen rétegzettek, tiszta H_2 tölti ki egy 1,5 m magas rövid cső felső felét, és tiszta CH_4 tölti ki az alsó felét, az egyensúlyi rétegződés elhanyagolható az 1,5 m-es csőben, ami azt jelenti, hogy a kezdeti rétegződés $t \rightarrow \infty$ -nél csökken.

Ha a hidrogén-földgáz keverék nagyon kis áramlási sebességgel áramlik, a hidrogén fokozatosan a csővezeték tetejére tolódik és a rétegződési jelenség a csővezeték gravitációs irányában is megjelenhet, de a hidrogén-koncentráció gradiens nem jelentős. Ezenkívül, a gázkeverék rétegződése hajlamos, arra, hogy kisebb sebességgel, nagyobb nyomással, alacsonyabb hőmérséklettel és nagyobb hidrogénkeverési térfogathányaddal növekedjen. Az íveket tartalmazó csőszakaszok esetében a hidrogénrétegződés az emelkedő szakaszon jelentősebb, mint az eső szakaszon, és amikor az áramlási sebesség eléri a 10 m/s értéket, akkor a rétegződés jelensége csak az emelkedő szakaszon következik be, a többi szakasz alapvetően egyenletes eloszlású marad. A kevert hidrogén-földgáz vezetékét kis nyomású és nagy sebességű helyzetbe kell állítani, és a kockázat csökkenthető [13], [15].

A rétegződéssel kapcsolatban érdemes lehet vizsgálni az Uphill-diffúzió tranziens jelenségét, amikor az elridegedés szobahőmérsékleten sokkal hamarabb következik be, mint az várható lenne a diffúziós együtthatók szobahőmérsékletre történő extrapolációjából. A koncentráció gradiens pozitív iránya mentén történő diffúzió során a rétegződött hidrogén bejuthat a szerkezeti anyag azon helyeire, ahol már eleve nagyobb a hidrogén koncentráció, mint például a csővezetékek hegesztett kötéseiben. A hidrogénrétegződés kockázati küszöbének meghatározása – a hidrogénkoncentráció és a csővezeték acél anyagának kapcsolata alapján – további kutatásokat igényel a jövőben.

6. Összefoglalás

A tiszta energia elkerülhetetlen választás az alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaság számára. A hidrogénenergiának annyi előnye van, hogy a 21. század legígéretesebb „végső energiájának” tekintik [16]. A hidrogén nagy mennyiségben történő, távolsági szállítása és alacsony költségű tárolása azonban ma is probléma. Ezért javasolták a hidrogéngáz bekeverését a már meglévő földgázvezetékbe. Azonban, számos szempontot kell figyelembe venni a földgáz rendszerbe történő bekeverés során. A hidrogén hozzáadása a földgázhoz a földgáz tüzeléstechnikai tulajdonságainak megváltozását eredményezi, ami a rendszerelemek teljesítményének a romlását okozhatja. A szállítóvezetékek vonatkozásában a hidrogén könnyebben diffundál, ami a csővezeték anyagának elridegedését, vagy gázszivárgást okoz. A hidrogén parciális nyomása fontos szempont a kevert hidrogén és földgázt tartalmazó vezeték anyagválasztásánál; a parciális nyomás szabályozása a

csővezetékek biztonságos üzemeltetésének alapja, amelyet a kevert gáz koncentráció-eloszlása befolyásol. Hidrogén hozzáadásával a földgáz-hidrogén gázkeverék koncentráció-eloszlása inhomogén lesz, amit a gravitáció, a molekuláris diffúzió és a turbulens áramlások okoznak.

Irodalom

- [1] K. Topolski *et al.*, "Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology," 2022. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/publications>
- [2] IEA. International Energy Agency, "The Future of Hydrogen," Paris, 2019.
- [3] T. C. Allison and S. Simons Eugene, "Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines," 2022.
- [4] D. Vries, O. Florisson, and G. C. Tiekstra, "Safe operation of natural gas appliance fueled with hydrogen/natural gas mixtures - Progress obtained in the naturalhy-project," 2007.
- [5] M. Ruth *et al.*, "The Technical and Economic Potential of the H2@Scale Hydrogen Concept within the United States," *Golden, CO (United States)*, Oct. 2020. doi: 10.2172/1677471.
- [6] Loughborough University, "Completing Risk Assessments," 2019.
- [7] M. W. Melaina, O. Antonia, and M. Penev, "Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues," 2013. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [8] P. Márquez-Sobrino, P. Díaz-Cuevas, B. Pérez-Pérez, and D. Gálvez-Ruiz, "Twenty years of energy policy in Europe: achievement of targets and lessons for the future," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 25, no. 8, pp. 2511–2527, Oct. 2023, doi: 10.1007/s10098-023-02543-x.
- [9] B. A. Galyas and I. Szúnyog, "A hidrogén hatása a földgázhálózati gázminőségre" *Műszaki Földtudományi Közlemények*, vol. 89, no.1, pp. 221–226, 2020.
- [10] V. R. Támba and N. Nagy, "Zöld hidrogén," *Jelenkori Társadalmi És Gazdasági Folyamatok*, vol. 18, no. Különszám, pp. 495–502, Jun. 2023, doi: 10.14232/jtgf.2023.kulonszam.495-502.
- [11] W. K. H. Kft, "19/2009. (I. 30.) Korm. rendelet a földgázellátásról szóló 2008. évi XL. törvény rendelkezéseinek végrehajtásáról – Hatályos Jogszabályok Gyűjteménye." <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0900019.kor>
- [12] L. A. Fernandes, L. R. C. Marcon, and A. Rouboa, "Simulation of flow conditions for natural gas and hydrogen blends in the distribution natural gas network," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 59, pp. 199–213, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.014.
- [13] S. Peng *et al.*, "Equilibrium distribution and diffusion of mixed hydrogen-methane gas in gravity field," *Fuel*, vol. 358, 2023, Art. no. 130193, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130193.
- [14] H. Barthélémy, "Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels," *Int. J. Hydr. Ener.*, vol. 36, no. 3, pp. 2750–2758, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.029.
- [15] C. Liu *et al.*, "Study on the stratification of the blended gas in the pipeline with hydrogen into natural gas," *Int. J. Hydr. Ener.*, vol. 48, no. 13, pp. 5186–5196, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.074.
- [16] Zou, C. "Develop a carbon neutral implementation path with "Chinese characteristics," *Chin. J. Sci.*, vol. 6, pp. 6–9, 2021.