

A felszín alatti hidrogéntárolás rezervoármérnöki megközelítése

Reservoir engineering approach of underground hydrogen storage

VADÁSZI Marianna PhD

Miskolci Egyetem–Kőolaj- és Földgáz Intézet,
H-3515 Miskolc-Egyetemváros, Magyarország;
vadaszi.marianna@uni-miskolc.hu; <http://www.kfgi.uni-miskolc.hu>;

Abstract

The burning of fossil fuels is a major contributor to global warming. Therefore, the energy sector is looking for alternative renewable energy sources for electricity generation, such as wind, solar and hydropower. Electricity generated from this type of source is highly weather dependent, highly unbalanced, and therefore requires a complex energy storage system. This system stores the excess energy as a buffer, following the needs of the differences between supply and demand between the seasons. Subsurface storage of hydrogen produced by the electrolysis of water using renewable energy can be one of the possible forms of energy storage. To facilitate hydrogen supply in a future with zero carbon emissions, it is necessary to examine the technical aspects and feasibility of underground storage of hydrogen. The correct choice of hydrogen storage cycle processes and processes requires the study of a number of mechanisms, such as hydrodynamic, geochemical, biochemical, or microbial reactions.

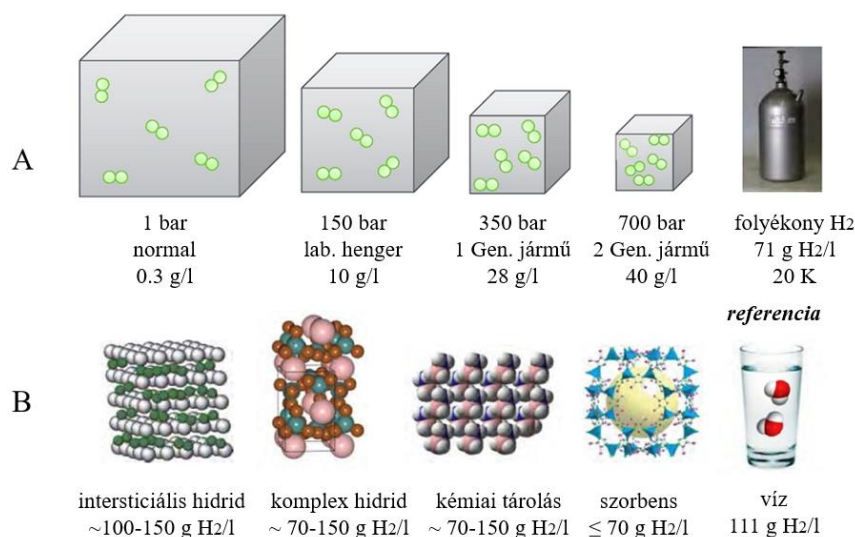
Kulcsszavak

felszín alatti hidrogén tárolás, zöld-hidrogén, dekarbonizáció, párnagáz, ki- és betárolás,

1. Bevezetés

A megújuló forrásokból történő energiatermelés világszerte egyre nagyobb szerepet kap a klímavédelmi nemzetközi megállapodások teljesítése érdekében. Ennek az az oka, hogy csak csekély mértékű üvegházhatást okozó gáz kibocsátást termel, és így segít leküzdeni a fosszilis tüzelőanyag-használat okozta éghajlatváltozást. Az ilyen megújuló energiaforrások hozzájárulása az energiamixhez az elmúlt évtizedben jelentősen megnőtt, és elsődleges villamosenergia-forrássá vált, különösen néhány európai országban, például Németországban, Dániában és Spanyolországban. A megújuló energiaforrások felhasználásával előállított hidrogént vonzó megújuló energiaforrásnak tekintik, amely nagy potenciállal rendelkezik az importált energiaforrásoktól való függés csökkentése érdekében. Számos felhasználása mellett, mint például tüzelőanyag, üzemanyagcella, élelmiszeripar, finomító stb., a hidrogénről bebizonyosodott, hogy másodlagos energiaforrás, fontos energiahordozó [1]. Az energiafelhasználás az igények függvényében változik (napi és szezonális változások vagy csúcsigények), míg az energiatermelés általában állandó. Ezen ingadozások szabályozására a hidrogén formájában megtermelt többlet villamos energiát átmenetileg tárolni kell, és később, amikor a fogyasztás meghaladja a termelést, felhasználni. Ezért a többletenergia hidrogénné átalakítása és annak föld alatti tárolása az egyik lehetőség ennek az energiahíánynak a kiegyenlítésére. Az előállított hidrogént különféle formában lehet tárolni, mint például nagynyomású gázpalackokban, kriogén tartályokban, nagy fajlagos felületű anyagokon adszorbeálva, gazdafém intersticiális helyein abszorbeálva kovalens és ionos kémiai kötéssel. [2, 3] A hidrogén fizikai formában és anyagokban való tárolásának lehetőségeit vázolja fel az 1. ábra.

Napjainkban a nagy mennyiségű hidrogén, mint többletenergia-forrás közép- és hosszú távú tárolása továbbra is kulcsfontosságú a hatalmas kereslet alacsonyabb költséggel történő kielégítéséhez. A porózus geológiai képződményekben történő hidrogéntárolás jelentős potenciállal rendelkezik mind a kapacitást, mind a helyi elhelyezkedést tekintve. A hidrogéntárolás a megújuló energia forradalmában, világszerte nagy figyelmet kapott az elmúlt évtizedben.



1. ábra A komprimált hidrogén (A) és a hidrogén anyagokban való tárolásának (B) összehasonlítása [9]

Számos projekt, például HyStorIES (2021), H2Haul (2019), CHANNEL (2019), H2ME (2014), HyUsPre (2020) és HyINTEGER (2016) a hidrogén előállításának, szállításának, tárolásának és hasznosításának megvalósíthatósági vizsgálatát elemezte az elmúlt évtizedben. Különböző laboratóriumi és terepi tanulmányok bizonyították a földalatti hidrogén megvalósíthatóságát kapacitás, biztonság, fizikokémiai, geokémiai és biokémiai vagy mikrobiális szempontok, valamint gazdasági életképesség szempontjából [4, 5, 6]. A tárolórendszerek területétől és típusától függően azonban bizonyos aggályok merülnek fel, mint például a hely alkalmassága és kapacitása, az in situ reakciók, a kedvezőtlen elmozdulás vagy hidrodinamika, a hidrogéntermelés során bekövetkező víztermelés, a szivárgás, a szennyeződések vagy a hidrogén tisztasága, valamint környezeti problémák és költségek korlátozhatják a tárolási folyamat hatékonyságát. [6] Ezért a tárolási folyamatot optimalizálni kell modellezési tanulmányok beépítésével, és rendszeresen ellenőrizni kell a biztonságos tárolás érdekében. Ez a tanulmány áttekinti a hidrogéntárolási technikák kilátásait a geológiai képződményekben. Kiemeli továbbá a folyamatokkal kapcsolatos kihívásokat, és azt is megvitatja, hogyan lehetne ezeket a kihívásokat technikailag kezelni.

2. A hidrogén, mint energiahordozó

1 m³ hidrogén elégetésekor 12,7 MJ energia keletkezik, ami nagy energiapotenciál, bár alacsonyabb, mint a metáné (40 MJ). Mivel az egységnyi hidrogén előállításához szükséges energia nagyobb, mint a hidrogén által termelt energia, a hidrogént nem tekintjük energiahordozónak. Könnyen elektromos árammá vagy hővé alakítva azonban, a hidrogént energiahordozó vagy -tároló képessége hatékony energiahordozóvá teszi. Ezen túlmenően az energiaszállítás során keletkező veszteség sokkal kisebb gáznemű hordozó használata esetén (<0,1%), mint az elektromos hálózat használatánál (8%). Emellett nem ipari tevékenységek esetében a hidrogén, mint energiahordozó a földgáz hatékony helyettesítőjének tekinthető. [7]. A föld alatti szerkezetekben a hidrogén tárolása a tárolókapacitáson túl biztonságosabb a föld feletti tároláshoz képest. Taylor (1986) szerint a föld alatti tárolás a legolcsóbb módszer nagy mennyiségű gáz halmazállapotú hidrogén tárolására [8].

A felszín alatti hidrogéntárolás nagyon hasonlít a föld alatti földgáztároláshoz, és a legtöbb korábbi és folyamatban lévő földalatti hidrogén-projekt a felszín alatti gáztárolás tapasztalatait minden szempontból felhasználja. A fő különbség a hidrogén és a földgáz fizikokémiai tulajdonságaiban rejlik, amelyek fokozott figyelmet igényelnek, különösen a szivárgás és a kémiai affinitás tekintetében. Ezek a mechanizmusok a hidrogént aktívabbá teszik a kémiai, biológiai vagy mikrobiális reakciókban való részvételhez, amelyek további hidrogén-, így energiavesztéshez vezetnek.

3. A hidrogén fizikai tulajdonságai

A hidrogén fizikai tulajdonságainak ismerete segíti a biztonságos és sikeres tárolást. Mivel a hidrogén kevésbé sűrű, mint a földgáz, az azonos tömegű hidrogén tárolása nagyobb nyomást igényel. A hidrogénnek a metánhoz viszonyított kisebb viszkozitása nagyobb hidrogén mobilitást

eredményez, ami a hidrogént és metánt tartalmazó porózus közegben alacsonyabb maradék hidrogénhez vezethet, és ennek eredményeként hatékonyabb hidrogéntermelés várható. A hidrogén oldhatósága fontos, ha sós víztestben vagy kimerült olaj- és gáztelepekben tárolják. A metánhoz képest a hidrogénnek kisebb az oldhatósága, ami előnyként kezelendő, mert a hidrogén-metán-sóoldat rendszerben feltételezhetően kisebb az oldódás miatti hidrogénveszteség. A hidrogén felszín felé történő szivárgása nagy valószínűséggel megtörténik, mivel alacsony a molekulatömege, így a levegőhöz, szén-dioxidhoz vagy metánhoz képest nagyobb mértékben diffundálhat át a fedőrétegeken. Normál hőmérsékleten és nyomáson a hidrogén diffúziós együtthatója háromszor nagyobb, mint a tiszta vízben lévő metáné. Mindazonáltal porózus közegben a porozitás diffúzióra gyakorolt hatását a tortuozitással kell figyelembe venni, ami hatékony diffúziós együtthatót eredményez. [10]

4. A besajtolási termelési stratégiák megválasztása

A földgázhoz képest a hidrogén áramlási sebességének nagyobbak kell lennie, a porózus közegben való diffúzió elkerülése érdekében, mivel kisebb a viszkozitása és nagy a mobilitása. Az ilyen problémák, valamint a hidrogén ridegedés hatásának elkerülése érdekében a fúróluk anyagainak kompatibilisnek kell lennie a hidrogénnel, és biztonságosan ki kell bírniuk a 70-140 bár nyomástartományt is. Emiatt a korábban földgáz esetében használt kutak nem javasoltak a hidrogén betárolására. Az áramlási sebesség jelentős szerepet játszik az injektálás és termelés lépései során. Az alacsony besajtolási sebesség a gáz széttöredezéséhez vezethet, ami több időt biztosít a hidrogén diffundálásához és feloldódásához. Másrészt a nagy áramlási sebességű betárolás a gáz felemelkedését és oldalirányú szétterülését okozza. Ezért az áramlási sebesség optimalizálása javasolt, ennek azonban meg kell felelnie a talpnyomás, a kapilláris belépési nyomás és a repesztési nyomás által támasztott kritériumoknak [11]. A mérnökök „szelektív technológiát” javasolnak a felhajtóerő által vezérelt jelenség lassítására, valamint a hidrogén oldalirányú terjedésének mérséklésére. Két különálló kút létesítésével, - egy a besajtolásra a telep aljára és egy a fedőkőzet alá, a telep tetejéről történő kitermelésre - optimalizálható a folyamat. [12].

A nyomásszint csökkentése és ezáltal a besajtolhatóság javítása érdekében Panfilov azt javasolta, hogy a kezdeti töltés során be kell iktatni egy lezárási időszakot, amely a tárolási teljesítmény fokozásához vezet. A nagy áramlási sebességű termelés gázkeveredést eredményezhet, elindulhat egy nagy mennyiségű víz- és párnagáz termelés. Katarzyna és Radosław (2019) vizsgálatai feltárták, hogy a hidrogéntermelés mennyisége és a kapcsolódó víztermelés az áramlási sebességgel (1-5 kg/s) nő. Az egymást követő be- és kitérő ciklusokban azonban a visszanyert hidrogén mennyisége nő, míg a termelt víz mennyisége csökken. Optimalizálták az áramlási sebességet a tárolási művelet javítása érdekében, és 0,51 kg/s-ot választottak besajtolási, és 3 kg/s-ot kitérő sebességeknek.

5. Párnagáz

A felszín alatti gáztárolás nem új keletű fogalom, megjelenése 1916-ra nyúlik vissza, amikor a földgázt geológiai képződményekben tárolták a részben letermelt Zoar gázmezőben. A földalatti gáztároló egy mesterségesen létrehozott gázfelhalmozódás a természetes környezetben, jelentős mélységben a felszín alatt. Mobil gázból és párnagázból áll. A mobil gáz az a teljes gázmennyiség, amely besajtolásra majd kitermelésre kerül a fogyasztók kielégítése céljából. A párnagáz szerepe a rétegnomás biztosítása, az a kitermelésre nem kerülő mennyiség, amely a kitermelési ciklus végén a tárolóban marad. Megfelelő szinten tartása fontos, hogy a tároló üzeme alatt a felszíni létesítmények gazdaságosan legyenek kihasználva. Ezért kiemelt fontosságú a mennyiségének szinten tartása annak érdekében, hogy a tároló kiadási kapacitását, a berendezések hatékonyságát ne veszélyeztesse, növelve ezáltal a fajlagos termelési költségeket. [13] Egyes tanulmányok a párnagáz kiválasztását a nedvesíthetőség alapján javasolják, mivel bizonyos gázok, például az N₂ és a CO₂ nagyobb nedvesíthetőséget mutatnak, így elősegíti a könnyebb elválasztást a be- és kitérő ciklusok során. Mások a kiválasztást a költségek alapján végzik el, mivel a N₂ használata csökkenti a beruházási kapacitást, és megkönnyíti a víz kiszorítását az optimális tárolóhely elérése érdekében. Feldmann és társai sűrűségkülönbség alapján javasolják a párnagáz kiválasztását. (Feldmann et al., 2016).

A párnagáz nem növelheti egy tárolótér teljes tárolókapacitását, hanem jelentős szerepet játszik annak minél hatékonyabb kiaknázásában. A kimerült gáztárolókban metánt és nitrogént javasolnak párnagázként. A nitrogén hatékonyabb, mert sűrűbb, mint a metán, de az első években 50-80%-ra korlátozza a hidrogéntermelést (Pfeiffer et al., 2015). A szén-dioxid is lehet potenciális párnagáz (Oldenburg et al., 2003), mert tárolókörülmények között a hidrogénhez képest sűrűbb, ezért a sűrűségi szegregáció viszonylag erős lenne. Ez

esetben azonban kiemelt figyelmet kell fordítani a hidrogén reakcióképességére a szén-dioxiddal. Azonban magának a H₂-nek párnagázként való alkalmazása Lysy és munkatársai szerint (2021) továbbra is nagy bizonytalansággal bír, ezért további szimulációs tanulmányokra van szükség. A hidrogén párnagázként való alkalmazásának javaslata annak az eredménye lehet, hogy elkerüljük a keveredés és hígítás hatását, amely gyakran megfigyelhető más gázoknál. Mivel ez a ki nem termelhető gázmennyiség óriási (körülbelül a teljes kapacitás egyharmada), egy másik olcsó, könnyen hozzáférhető gázt, például alacsony értékű városi gázt, CO₂-t, CH₄-et és N₂-t használnak párnagázként a nyomás biztosítására. A hidrogén párnagázokkal való keveredése az egyik hidrogénvesztés okozó probléma, értéke 1-3%. [14].

6. A hidrogén áramlása és hidrodinamikai kölcsönhatások

A földgáztárolást figyelembe véve a porózus közegekben történő hidrogéntároláshoz megfelelő geológiai felépítésre van szükség, például jól körül határolt porózus és átteresztő képződményre, amelyet át nem eresztő fedőközet határol a hidrogén biztonságos befogadására minimális veszteség mellett. Az átmeneti zóna elhelyezkedése a kapilláris nyomás és a relatív permeabilitási görbék segítségével megbecsülhető, és ez a jelenség nagymértékben függ a folyadékfázisok mobilitási arányától [15]. Azonban a folyadékok telítettsége is változik minden be- és kitárolási ciklus során, ezért az áramlási viselkedés vizsgálata minden ciklushoz javasolt. A rezervoárban lévő aktív erők közötti egyensúlyozatlanság, valamint a nagy besajtolási sebesség ujjasodáshoz vezethet, és tovább befolyásolhatja a különféle hidrogénvesztéseket (pl. a maradék gáz telítéséből és a vízbe való oldódásból adódó veszteségeket, diffúziós és oldódási veszteségeket). A meredeken süllyedő struktúrák és a vastag képződmények segítenek megakadályozni az ujjasodás jelenségét.

A földgáztárolástól eltérően a tárolt hidrogén kitermelésének olyan gyakorinak kell lennie, hogy kielégítse a piaci igényeket. A hidrogén rögzített nagy sebességű termelését nehéz elérni a tárolón belüli gázok időfüggő expanziója, valamint az áramlási nyomás és a tároló nyomásának vesztesége miatt. Ezért minden egyes kitárolási ciklus után bizonyos mennyiségű gáz marad a tárolóban. Hasonló probléma merülhet fel egy kimerült olajtelep esetén, ahol a hidrogén egy része beoldódik az olajfázisba. Ez az oldhatóság azonban kisebb, 1,5 mol. % 100 °C-on 150 bar nyomáson nehézolaj esetén [16]. Ez a veszteség befolyásolhatja a tárolás tökeköltségét, ezért a megfelelő vizsgálat javasolt ennek elkerülése érdekében. Ezek a gázvesztések a tárolón belüli csapdázódásnak, a rétegvízben való oldódásnak köszönhetőek, a fedőközet szilárdságától, a tároló heterogenitásától, a kapilláris erőktől, a kezdeti víztelítettségtől és diffúziós együtthatóktól függően [17].

Bár a földgáztárolásból származó megfigyelések, ahol kis értékű városi gázt használnak párnagázként, azt mutatják, hogy a párnagáznak csak 1%-a termelődik ki több besajtolási-kivételi ciklus után, ami alig befolyásolja a tárolás biztonságát és gazdaságosságát. Az ujjasodás mértékétől, a gáz oldódásától és diffúziójától, a keveredéstől, a felületi feszültségtől, az oldhatóságtól, a víztelítettségtől, a kapilláris hatástól és a kivonási sebességtől függően előfordulhat, hogy bizonyos mennyiségű nem kívánt fázis, például vízgőz, szabad víz és néhány egyéb szennyezett gáz keletkezik a fő hidrogénáram mentén. Mint ilyen, energiavesztést okoz, miközben extra erőfeszítést, berendezéseket, folyamatokat és energiát igényel ezek eltávolítása a hidrogénből.

7. Összefoglalás

A jelenlegi tanulmány a felszín alatti hidrogéntárolás egyes rezervoármérnöki szempontjaival foglalkozik. Bemutatja, hogy a hidrogén fizikai tulajdonságai hogyan befolyásolják az áramlási viszonyokat a felszín alatt, milyen veszteségek merülhetnek fel a nem helyesen megválasztott be- és kitárolási módszerek során, számba veszi a párnagázként alkalmazható egyéb gázokat. Annak ellenére, hogy a felszín alatti hidrogéntárolás megvalósíthatónak bizonyul, további kutatásokra és továbbfejlesztett kísérleti projektekre, modellezésre van szükség a gazdaságos és biztonságos energiatárolás rendszerének fejlesztése érdekében.

Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetemen, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján végrehajtott projekt részeként valósult meg.

Irodalom

- 1 Seo S-K, Yun D-Y, Lee C-J. Design and optimization of a hydrogen supply chain using a centralized storage model. *Appl Energy* 2020
- 2 Zuttel A. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften* Apr 2004
- 3 Reuß M, Grube T, Robinius M, Preuster P, Wasserscheid P, Stolten D. Seasonal storage and alternative carriers: a flexible hydrogen supply chain model. *Appl Energy* 2017
- 4 Lemieux A, Sharp K, Shkarupin A. Preliminary assessment of underground hydrogen storage sites in Ontario, Canada. *Int J Hydrogen Energy* Jun 7 2019
- 5 Tarkowski R, Czapowski G. Salt domes in Poland e potential sites for hydrogen storage in caverns. 2018/11/15/ *Int J Hydrogen Energy* 2018.
- 6 Stone HBJ, Veldhuis I, Richardson RN. Underground hydrogen storage in the UK. Geological Society, London, Special Publications 2009
- 7 Davison J, Arienti S, Cotone P, Mancuso L. Co-production of hydrogen and electricity with CO₂ capture. in *English International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010
- 8 Taylor J, Alderson J, Kalyanam K, Lyle A, Phillips L. Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 1986.
- 9 Jianwei Ren, Nicholas M., Musyoka, Henrietta W., Langmi, Mkhulu Mathe, ShijunLiao: Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, Issue 1, 5 January 2017, 289-311
- 10 Shen L, Chen ZX. Critical review of the impact of tortuosity on diffusion. in *English Chem Eng Sci* Jul 2007;62(14):3748e55.
- 11 Katarzyna L, Radosław T. Numerical simulation of hydrogen injection and withdrawal to and from a deep aquifer in NW Poland. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:2068e83.
- 12 Panfilov M. Underground and pipeline hydrogen storage. In: Gupta RB, Basile A, Veziroglu TN, editors. *Compendium of hydrogen energy*. Woodhead Publishing; 2016. p. 91e115
- 13 Bódi T, Tóth J.: *Földgázok és szén-dioxid földalatti tárolása*, ISBN 978-963-358-008-0, 2012
- 14 Srinivasan BS. The impact of reservoir properties on mixing of inert cushion and natural gas in storage reservoirs. In: *Master, petroleum and natural gas engineering*. West Virginia University; 2006
- 15 Carden P, Paterson L. Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage. 1979/01/01/ *Int J Hydrogen Energy* 1979;4(6):559e69.
- 16 Torres R, de Hemptinne JC, Machin I. Improving the modeling of hydrogen solubility in heavy oil cuts using an augmented grayson streed (AGS) approach. 2. *Oil & gas science and technology-revue D ifp energies nouvelles*, 68; 2013. p. 217e33. Mar-Apr.
- 17 Coats KH, Richardson JG. Calculation of water displacement by gas in development of aquifer storage. 1967/6/1/ *Soc Petrol Eng J* 1967;7(2):105e12.