

A hidrogén tárolásának és szállításának lehetőségei

The possibilities of hydrogen storage and transportation

Varbai Balázs^a, Katula Levente^b, Dobránszky János^c

^aBME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, adjunktus, varbai.balazs@gpk.bme.hu

^bBME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, egyetemi docens, katula.levente@gpk.bme.hu

^cEötvös Loránd Kutatói Hálózat, MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport; BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék tudományos tanácsadó, Dobranszky.Janos@eik.bme.hu

Kulcsszavak

hidrogén,
nyomástartó-edény,
elrűdegedés,
alternatív energia,
karbonsemlegesség

Absztrakt

A hidrogén tárolása iránti igény egyre növekszik. Ennek elsődleges oka, hogy a hidrogén mint alternatív energiahordozó, jelentős szerepet játszik a szén-dioxid-kibocsátás-csökkentési törekvésekben. A hagyományos akkumulátorok ugyan képesek hatékonyan tárolni a villamos energiát, nagy mennyiségű energia hosszú távú tárolására mégsem gazdaságosak. A hidrogén, mivel az egyik legolcsóbb villamosenergia-tárolási lehetőség hosszú időtartamra is, a megújuló energiák tárolásának egyik legkedvezőbb alternatívája. Cikkünkben először áttekinjük a hidrogén tárolásának módszereit, majd részletesen bemutatjuk a különböző hidrogéntartályok típusait, ezek költségvonzatait, és a közúti szállításuk módszereit.

Keywords

hydrogen,
pressure vessel,
embrittlement,
alternative energy,
carbon neutrality

Abstract

The demand for hydrogen storage is growing. The primary reason for this is that hydrogen, as an alternative energy source, plays a significant role in efforts to reduce CO2 emissions. Although conventional batteries can store electricity efficiently, they are not economical for long-term storage of large amounts of energy. Hydrogen, as one of the cheapest long-term electricity storage options, is one of the best alternatives for storing renewable energy. In our paper, we first review the methods of storing hydrogen, then we present in detail the different types of hydrogen tanks, their cost implications, and the methods of transporting them by road.

1. Bevezetés

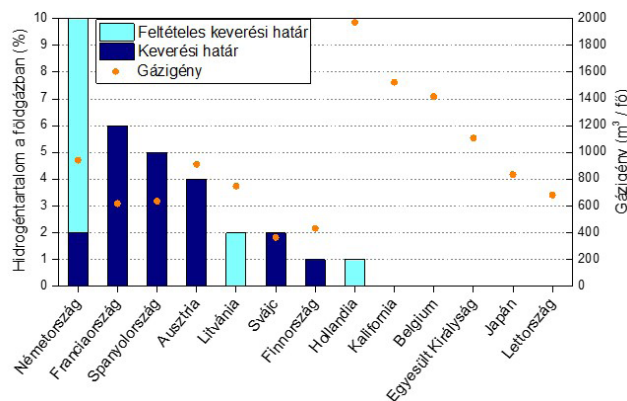
A hidrogén tárolása iránti igény egyre növekszik. Ennek elsődleges oka, hogy a hidrogén mint alternatív energiahordozó, jelentős szerepet játszik a szén-dioxid-kibocsátás-csökkentési törekvésekben a közúti és a tengeri közlekedésben felhasználható üzemanyagként. Ezen kívül a hidrogén hosszú távon rugalmas energiatárolási lehetőségként tekinthető. A hidrogént jelenleg az ipari, a közlekedési és az energiatermelési ágazatokban használják; a felhasználása azonban főleg az ipari szektorra koncentrálódik (pl. olajfinomítás). Várható, hogy a hidrogén iránti kereslet 5,48%-os összetett éves növekedési ütemben növekszik a 2019 és 2025 közötti időszakban [1], míg, mint energiahordozó anyag globális piaca 5,8%-kal bővül ugyanebben az időszakban.

A hidrogén potenciális energiahordozó, mivel az egyik legolcsóbb villamosenergia-tárolási lehetőség hosszú időtartamra is, ami a megújuló energiák között az egyik legkedvezőbb alternatívává teszi [2]. Ezenkívül a megújuló energiákból származó energia hidrogénnel és hidrogénalapú tüzelőanyagokkal nagy távolságokon keresztül továbbítható. Az elektrolízis során keletkező hidrogén szintén kulcsfontosságú szerepet játszhat a megújuló villamos energia feleslegének nagy mennyiségben történő felhasználásában [3].

A hidrogén mint energiahordozó a lakossági és ipari felhasználásban várhatóan jelentős szerepet fog kapni a jövőben. Ennek a fejlődésnek egy első lépcsője a hidrogénnek kis mennyiségben földgázhoz való keverése. A hidrogén minél nagyobb százalékos arányú felhasználása nem csak kisebb CO₂-kibocsátást eredményez, de egyben elősegítené a különböző hidrogéntermelési módszerek fejlesztését, és ezáltal az előállítási költség mérséklését. A kis CO₂-kibocsátású hidrogén előállítási költsége jelenleg 11,4-14,2 \$/MJ (12-15 \$/MBtu), ami jóval nagyobb, mint a földgázból 1 MJ előállításához szükséges 2,8-9,5 \$ [4].

A földgázhoz való hidrogén-hozzákeverés felső határát a földgázellátás nemzeti specifikációja, az esetleges anyagminőségi korlátozások és a hálózat legérzékenyebb berendezéseinek tűréshatára szabja meg. Emiatt a legnagyobb megengedhető hidrogéntartalom a földgázban általában legfeljebb 2,5%. Az 1. ábra [5] a hidrogén földgázhoz történő legnagyobb, megengedett keverési határértékét mutatja néhány országban, az éves, egy főre eső gázigény (m³/fő) feltűntetésével.

Az 1. ábrából látható, hogy feltételek nélkül, a teljes gázellátói hálózatot tekintve, jelenleg Franciaországban a legnagyobb a földgázban megengedett hidrogéntartalom, ami 6%. Németországban a lokális gázelosztó hálózat által megszabott feltételekkel a hozzákevert hidrogén a 10%-ot is elérheti. Azokban az országokban, ahol az egy főre jutó éves gázigény messze a legnagyobb (pl. Kalifornia állam, USA) a földgázhoz történő hidrogénkeverés jelenleg nem engedélyezett. A nagyobb gázfelhasználók várhatóan engedélyezni fogják a hidrogén földgázhoz történő, kisebb százaléku keverését a jövőben, ami szintén elősegíti a hidrogén előállításának, tárolásának, szállításának további fejlesztését és a költségek mérséklését.



1. ábra: A hidrogén földgázhoz történő keverésének megengedett határértéke néhány országban az éves, egy főre eső gázigény feltűntetésével [5]

2. A hidrogén tárolásának módszerei

A hidrogén tiszta, molekuláris formában történő tárolása gáz- vagy folyadékfázisban lehetséges. Jelenleg az ipar nagy méretekben ezt a két tárolási módszert alkalmazza.

2.1 A sűrített hidrogéngáz tárolása

Mivel a tárolási nyomás korlátozott, az elérhető hidrogéntárolási sűrűségek is korlátozottak: 100 bar és 20 °C hőmérsékleten a hidrogéngáz sűrűsége körülbelül 7,8 kg/m³. Ezen a nyomáson és hőmérsékleten a hidrogén kompresszibilitási tényezője 1,0613 [6]. A relatíve kis tárolási sűrítés nagy tárolási térfogatokhoz és ezáltal nagy beruházási költségekhez vezet. A kisebb tárolási nyomás azonban egyszerűbb tömitőrendszereket és így kisebb üzemeltetési költségeket igényel [7], [8].

A nagyobb nyomásokon (700 bar) alkalmazott tartályok korszerű, kompozit anyagok felhasználásával készülnek, beruházási költségük nagy, ezért föld feletti, telepített (stacionárius) tárolási megoldásokra kevésbé alkalmazot- tak [9]. A kompozittartályok hátránya még, hogy minden esetben legalább 10 bar nyomást fenn kell tartani bennük, azaz például atmoszférikus nyomáson nem szállíthatók. A hidrogén sűrített gázként történő palackos tárolásával kapcsolatban széles ipari tapasztalat van, azonban a 200 bar nyomás feletti tárolás a beruházási költségek és a biz- tonsági kérdések miatt számos akadályt jelent.

2.2 A cseppfolyós hidrogén tárolása

A nyomásfokozás mellett a tiszta hidrogén sűrűsége cseppfolyósítással (kondenzációval) is növelhető. A cseppfolyósításnak az az előnye, hogy nagyon nagy hidrogéntárolási sűrűség érhető el már légköri nyomáson: a telített cseppfolyós hidrogén sűrűsége 1 bar nyomáson 70 kg/m³ [10].

A cseppfolyós hidrogén tárolásának elsődleges problé- mája az energiaigényes cseppfolyósítási folyamat. Két fő oka van annak, hogy a hidrogén cseppfolyósítása miért igényel jelentős energiabevitelt: a hidrogén rendkívül kis forráspontja (-253 °C 1 bar nyomáson) és az a tény, hogy a hidrogéngáz nem hűl le a fojtási folyamatok során (adiaba- tikus, izentalpikus folyamat) -73 °C körüli hőmérsékletnél kisebb hőmérsékletre [11]. Ez utóbbi probléma előhűtést tesz szükségessé a cseppfolyósítási folyamatban, leggyakrabban a cseppfolyós nitrogén bepárlásával [12]. Ennek ellenére a hidrogén-cseppfolyósító üzemekre több ipari példa is létezik: a globális kiépített hidrogén-csepp- folyósítási kapacitás körülbelül 355 tonna/nap, a jelenleg működő legnagyobb üzem kapacitása 34 tonna/nap [13].

A környezettől a tárolt cseppfolyós hidrogénig terjedő hőátadás, és ezáltal a párolgási sebesség csökkenthető azáltal, hogy minimalizálják a tartályok felület-térfogat arányát (gömbtartályok alkalmazásával), és fejlett szige- teléstechnikával minimalizálják a tartály falain keresztüli hőátadást [11]. A cseppfolyós hidrogént tároló kriogén edények (ADR-szerinti mélyhűtő tartály) általában kettős falúak, a falak között nagyvákuumot alkalmaznak.

3. A hidrogéntartányok típusai

Ötféle, különböző típusú nyomástartó edény létezik gáz- nemű hidrogén tárolására. A nyomástartomány jellemzően 200 bar és 700 bar között van [14]. A mobil tárolóeszközö- ket a 39/2021. (VII. 30.) ITM rendelet a Veszélyes Áruk Nemzetközi Közúti Szállításáról szóló Megállapodás (ADR) [15] alapján tartánynak nevezzük. A különböző tartálytípusokat a műszaki tartalomnak való megfelelés szerint alkalmazzák. A legolcsóbb az 1. típus kivitel, míg a legdrágább, a legújabb fejlesztésű 4. típusú nyomástartó edény.

1. típusú kivitel (MSZ EN ISO 11439:2013 [16] szerint)

A nagy nyomások és az ebből adódóan fellépő feszült- ségeloszlás és gyártási folyamat miatt az összes, sorozat- ban gyártott hidrogéntároló nyomástartó edény hengeres alakú. A nyomástartó edény egy fém (általában acél) falból áll. Az ilyen típusú tartályok névleges nyomása jellemzően a 200 bar-os tartományban van, és széles körben hasz- nálják őket a gáziparban mind szállítótartályként, mind helyhez kötött nyomástartó edényként.

2. típusú kivitel

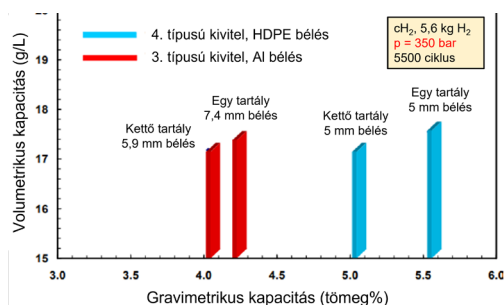
A 2. típusú nyomástartó edények a fémköpenyre felvitt, műgyantába ágyazott üvegszál vagy szénszál erősítésű köpenyből állnak. A 2. típusú nyomástartó edény esetében a kompozitköpeny csak az edény hengeres részét veszi körül. Ez egyrészt kismértékű súlyelőnyt eredményez a választható kisebb falvastagságok miatt, másrészt akár 1000 bar nyomástartományig teherbíró. A 2. típusú nyo- mástartó edényeket főleg helyhez kötött alkalmazások- ban, például hidrogén-töltőállomások tárolótartályaiban használják.

3. típusú kivitel

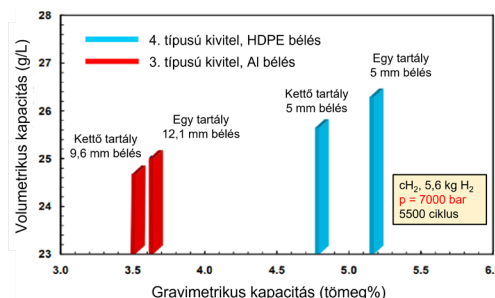
A 3. típusú palackoknak van egy bélése, amely fémből, főleg alumíniumból készül, és jellemzően szénszál eró- sítésű kompozitköpennyel körülvett a palack hengeres része. A szénszál kompozitburkolat viseli a terhelés nagy részét. Ezt a típust nagy gravimetrikus energiatartal- ma különbözteti meg az 1. és 2. típustól. Főleg mobil alkalmazásokhoz használják, például üzemanyagcellás jármű- vekben. A mobil alkalmazások tipikus nyomása 350 bar vagy 700 bar. Lehet helyhez kötött alkalmazásokhoz is használni, de figyelembe kell venni az 1. és 2. típushoz képest nagyobb anyagköltségeket.

4. típusú kivitel

A 4. típusú nyomástartó edény a legújabb fejlesztésű tárolótartály, amely jelenleg sorozatgyártásban van. A bélés műanyagból, jellemzően poliamidból vagy polietilén- ből készül kompozitburkolattal, melynek erősítőszálai álta- lában szénszálak. Ez a kialakítás további nyomáselőnyt biztosít a nyomástartó edénynek a három előző típusokkal szemben. A 4. típusú nyomástartó edényeket szállítási és mobil alkalmazásokban is használják.



2. ábra: 350 bar-os, 3. és 4. típusú tartályok gravimetrikus- és a volumetrikus kapacitásainak összehasonlítása [18]



3. ábra: 700 bar-os, 3. és 4. típusú tartályok gravimetrikus- és a volumetrikus kapacitásainak összehasonlítása [18]

5. típusú kivitel

Ez a típus még nem került sorozatgyártásba. Ennek a nyomástartó edénynek nincs bélése, a teljes szerkezet kompozitból készül (MSZ EN ISO 24431:2017 [17] szerint).

A 2. és 3. ábrák a 3. és 4. típusú tartályok gravimetrikus és a volumetrikus kapacitásait hasonlítják össze. A 2. ábrán a 350 bar nyomású hidrogéntároló nyomástartó edények, a 3. ábrán pedig a 700 bar nyomásúakat látjuk. Látható, hogy a két, 350 bar nyomású kialakítás között a 4. típusnak jobb a gravimetrikus kapacitása. Ugyanakkor a 3. típus ára kedvezőbb. A 700 bar-os nyomástartományban már mind a gravimetrikus, mind a volumetrikus kapacitása kedvezőbb a 4. típusú tartálynak.

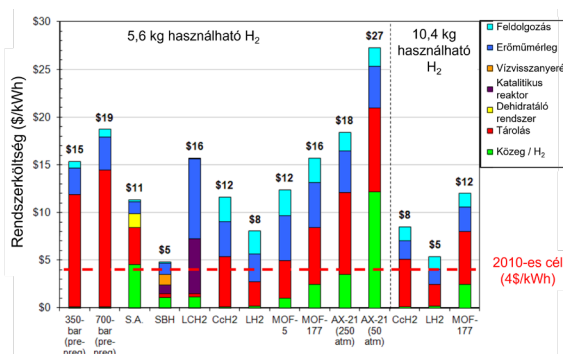
4. A különböző tartálytípusok költségei

4.1 Az Egyesült Államok Energiügyi Minisztériumának (United States Department of Energy) költségbecslési projektje

Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának megbízásából készített projekt célja a hidrogéntároló rendszer költségeinek becslése volt nagy volumenű termelést feltételezve. A minisztérium tárolási rendszer költségcélja 2010-ben 4\$/kWh volt [19].

A jelentés a fedélzeti (járművön történő) hidrogéntárolás négy kategóriájára vonatkozóan adja meg a költségek és a teljesítmény rendszerszintű értékelését: (1) reverzibilis fém-hidridek (például magnézium-hidrid, nátrium-alanát); (2) regenerálható kémiai hidrogén-tároló anyagok (például nátrium-bór-hidrid, ammónia-borán hidrolízise); (3) nagy felületű adszorbensek (például szénalapú anyagok); és 4) fejlett fizikai tárolás (pl. 700 bar sűrített, kriosűrített és cseppfolyós hidrogén). Ezenkívül értékeli a jelentés a helyhez kötött hidrogéntároló rendszerek hatékonyságát és költségeit: (1) cseppfolyós tárolótartályt, (2) nátrium-bór-hidridet, (3) ammónia-boránt és (4) magnézium-hidridet.

A jelentés „alulról felfelé építkező” költségcsökkentési módszertan szerint került összeállításra, amely a hidrogéntároló rendszerek gyártása során alkalmazott folyamatok elemzésére és számszerűsítésére szolgál. Ez a módszertan, amelyet a DFMA® (Boothroyd-Dewhurst Design for Manufacturing & Assembly) szoftverrel és más eszközökkel együtt használnak, figyelembe vette a tartály összes fő alkatrészének költségeit, a kiegyenlítő tartályt, a tartály összeállításának és a rendszer összeszerelésének



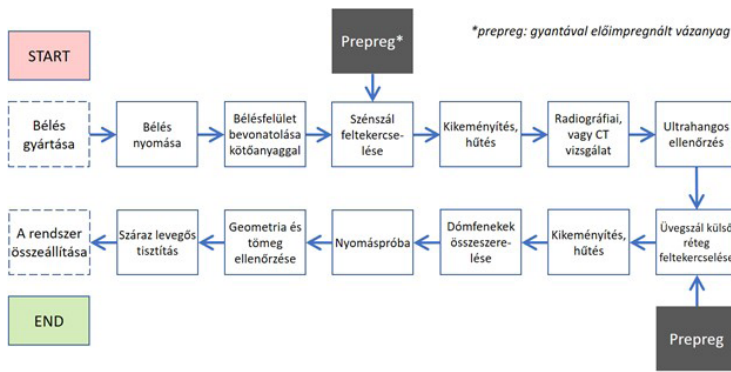
4. ábra: A fedélzeti hidrogéntároló rendszer költségeinek összefoglalása [19]. A jelölések és mozaikszók jelentése: prepeg = gyantával előimpregnált vázanyag, S.A. = sodium alanate (nátrium-alanát), SBH = sodium borohydride (nátrium-borohidrid), LCH2 = liquid hydrogen carrier (cseppfolyós hidrogén), CcH2 = cryo-compressed hydrogen (mélyhűtött, sűrített hidrogén), LH2 = liquid hydrogen (cseppfolyós hidrogén), MOF = metal-organic framework (fémes-szerves vázrendszer), AX-21 = activated carbon hydrogen storage (aktív szén hidrogéntárolás)

költségeit. E módszertan alapján a 4. ábra az elemzett, különböző fedélzeti hidrogéntároló rendszerek nagy volumenű gyártásának költségeit mutatja be.

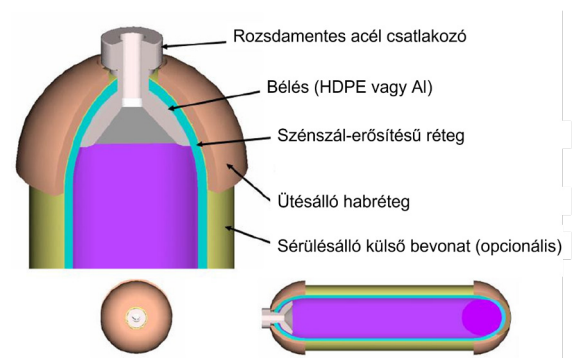
Általában a tartályköltségek jelentik a rendszerköltség legnagyobb elemét, amelyek a teljes rendszerköltség legalább 30%-át teszik ki, két rendszer kivételével. Az ún. BOP-költségek – a BOP az angol „balance of plant” mozaikszava, magyarul: üzemgyensúlyi komponensek – a rendszerköltségeket is megemelik, ami a különböző tárolási rendszerek összes rendszerköltségének 10-50%-át teszik ki. Ezen komponensek a biztonsági berendezések, szabályozók, elektronikus vezérlők, érzékelők, az összes fedélzeti kezelőberendezés, amely a H2 tárolásához szükséges (pl. szűrők), valamint a szerelési hardverek és gázvezetékek a tárolórendszer alkatrészeinek csatlakoztatásához. A szénzáll erősítésű tartály gyártási folyamatábrája az 5. ábrán látható.

4.2 A szénzáll ára

A szénzáll költségei jelentősen befolyásolják a nagy nyomású hidrogéntároló rendszerek gyártási költségeit és kereskedelmi árait. A korábbi költségelemzésekkel való összehasonlíthatóság fenntartása érdekében a jelentésben a szénzáll alapára 29USD/kg. A szénzállat a repülőgépiparban és más iparágakban már nagy mennyiségben alkalmazzák, így várhatóan a közeljövőben nem lesz



5. ábra: A szénszál kompozitburkolattal erősített tartály gyártási folyamatábrája [19]



6. ábra: Egy sűrített hidrogén-tárolótartály vázlatos felépítése [19]

jelentősen olcsóbb [20]. A magyarországi szénszálgyártás a Zoltek Zrt-nél folyik.

A számítások azt feltételezik, hogy a hidrogéntároló rendszer gyártója előre impregnált szénszál kompozitot (prepreg-et) vásárol olyan áron, amely 1,27-szerese a nyers szénszál anyagnak (prepreg/szénszál ár aránya = 1,27) [21].

4.3 Az üzemgyensúlyi komponensek költségeinek előrejelzése

A BOP-költségeket Delphi-módszerrel becsülték meg. A Delphi-módszer alapján az előrejelzéseket az ipari szakértőket – beleértve a beszállítókat, a tartályfejlesztőket és a végfelhasználókat – megkérdezve alakították ki. A végfelhasználói vagy fejlesztői becslések optimisták vagy egyes esetekben észszerű célokra alapulnak, más esetekben pedig pesszimisták, mivel nem veszik figyelembe az autóiipari gyártáshoz szükséges folyamatokat vagy technológiai változásokat. Az egyes komponensek észszerű alapeseti költségét az előrejelzések és a felülről lefelé és az alulról felfelé irányuló becslések eredményeinek megítélése alapján választjuk ki.

A hidrogéntároló rendszer „gyárköltége” vagy „gyártási költsége” felvételekor vertikálisan integrált gyártási folyamatot feltételeztek; vagyis az autóiipari OEM (OEM = original equipment manufacturer, eredeti berendezés gyártója) a tartály összes alkatrészét házon belül gyártja, így az egyes tartályalkatrészek esetében köztes ellátási lánc nem szerepel. A fő tartályköltségeket (bélés, kompozitborítás és tartályszerelés) alulról felfelé becsülték külső beszállító nélkül. A valóságban a gyártási folyamat horizontálisan és vertikálisan integrált kombináció lenne.

A számítási modell feltételezi, hogy az autóiipari OEM megvásárolja az összes BOP-alkatrészt vagy -rendszert a beszállítóktól, és a teljes rendszert házon belül szereli össze, valamint hogy az összes fő BOP-alkatrész esetében a beszállító egységesen 15 %-os felárat kapnak.

A költségek becsüléséhez 500.000 darab/év fedélzeti, sűrített hidrogén-tárolótartály gyártását vették alapul.

A 3. és 4. típusú, sűrített hidrogén-tárolótartály egy belső bélésből áll, amelyre szénszál kompozitréteg van tekercselve, ezt egy védő üvegszál réteg és védőhab végzárók zárják. A tartály vázlatos felépítését a 6. ábra szemlélteti.

Az 1. táblázat a sűrített hidrogén-tárolórendszerek 3. és 4. típusának a jelentésben vizsgált kialakítási és tervezési paramétereit foglalja össze.

1. táblázat: Sűrített hidrogén-tárolórendszer kialakítása és egyéb feltételezések [19]

Tervezési paraméter	Értéke alapesetben
Névleges nyomás	350 bar és 700 bar
Üzemanyagtartályok száma	1, 2
Tartály belső bélése	3. típus (alumínium)
4. típus (HDPE)	
Maximális/töltési nyomás	350 bar-os: 438 bar; 700 bar-os: 875 bar
Nyomás az „üres” tartályban	20 bar
Hasznos H ₂ tárolókapacitás	5,6 kg
Szénszál tömege	3. típusú, 1 tartály, 350 bar: 48,6 kg 3. típusú, 1 tartály, 700 bar: 65,0 kg 3. típusú, 2 tartály, 350 bar: 24,4 kg 3. típusú, 2 tartály, 700 bar: 28,3 kg 4. típusú, 1 tartály, 350 bar: 55,4 kg 4. típusú, 1 tartály, 700 bar: 68,7 kg 4. típusú, 2 tartály, 350 bar: 28,0 kg 4. típusú, 2 tartály, 700 bar: 34,8 kg
Tartály mérete (víztartalom)	350 bar: 258 L; 700 bar: 149 L
Biztonsági tényező	2,25
Hossz/átmérő arány	3
Szénszál típusa	Toray T700S
A kompozit szakitószilárdsága	2550 MPa
Tartálybélés vastagsága	7,4 mm alumínium (3. típus)
5 mm HDPE (4. típus)	
Külső réteg	1 mm-es üvegszál
Tartály végzárás	10 mm hab

A 2. táblázat a vizsgált tárolórendszerek főbb BOP-összetevőinek költségeit, míg a 3. táblázat a feltételezett alapanyagköltségeket mutatja be.

2. táblázat: A sűrített hidrogén-tárolórendszer költségbebecslése a főbb BOP-összetevőkre [19]

Vásárolt alkatrész becsült költsége (egy egység)	350 bar	700 bar
Nyomásszabályozó	160 \$	200 \$
Mágnesszelep vezérlő	186 \$	233 \$
Töltőcsonk/nyílás	50 \$	63 \$
Nyomásadó	30 \$	38 \$
Nyomásmérő	17 \$	17 \$
Fém fejcsonk és dugó (a tartályban)	15 \$	19 \$
Egyéb BOP-összetevők	58 \$	68 \$

5. A hidrogén közúti szállítása

5.1 A sűrített hidrogén szállítása félpótkocsival

Nyomás alatti tárolásról akkor beszélünk, amikor a gázt az atmoszférikus nyomásnál nagyobb nyomáson tároljuk. A nyomástartó edények szerkezete az alkalmazási terület és az ott szükséges nyomásszint függvényében különböző lehet. Helyhez kötött tartályok esetében a tartály geometriai kialakítása általában nem játszik meghatározó szerepet, ahogy a tartály tömege sem. Mobil felhasználásban, például gépjárművekben, a hely szűkössége és a tartály önsúlya már fontos szempont. Jelenleg a legtöbb olyan gyártó, amely hidrogénnel hajtott járművet fejleszt és gyárt, a 700bar-os (70MPa) nyomásszintet részesíti előnyben. Ennél a nyomásszintnél az üzemanyagcellás járművek hatótávolsága már elérheti a benzines járművek tartományát.

A modern nyomástartó edények összetett kivitelben, kompozitok felhasználásával készülnek: alumíniumból vagy polietilénből gyártott, vékony falú belső tartályok, amelyeket kívülről szén- vagy üvegszállal erősített kompozitburkolattal erősítenek meg. Ezek a szerkezetek sokkal könnyebbek, mint az acél alapanyagú, hagyományos nyomástartó edények. A hidrogén 1 köbméterének tömege kis sűrűségéből adódóan atmoszférikus nyomáson (1,013bar) és 0 °C-on mindössze 0,0899kg. Ha a hidrogént 200 bar-ra sűrítjük 0 °C-on, akkor a tömege köbméterenként 15,6kg; míg 500 bar nyomáson 33kg [22].

A félpótkocsis szállítás előnye, hogy a szállítmányt a rendeltetési helyén a félpótkocsi lekapcsolásával ott lehet hagyni, így a nyerges vontató más szállítási feladatba vonható. Félpótkocsi: olyan pótkocsi, amely a vontató nyergszerkezetére támaszkodik úgy, hogy súlyának jelentős részét a vontató veszi át.

Nyerges vontató: olyan vontató, amely a rajta levő nyergszerkezet útján a vontatott félpótkocsi súlyának jelentős részét átveszi [23].

5.2 Csőtartályos szállítás

Kis és közepes mennyiségű, gáz halmazállapotú hidrogén szállítható teherautóval, nyomástartó tartályokban. Nagyobb mennyiségek szállítása esetén több gázpalackot kötegelnek az angolul úgynevezett CGH2 (CGH2: compressed gaseous hydrogen) csőtartályos félpótkocsikon. A szállításhoz a nagyméretű hengeres palackokat (csőtartályokat) védőkeretben kötegekké egyesítik.

A csőtartályok hagyományosan acélból készülnek, és

3. táblázat: A sűrített hidrogéntároló rendszer feltételezett alapanyagköltségei [19]

Becsült alapanyagköltségek (2005), \$/kg	Alapeset
Hidrogén	3,0
HDPE belső burkolat	1,6
Alumínium (6061-T6)	9,6
Szénszál (T700S), prepreg	36,6
Üvegszál prepreg	4,7
Tartályvégzáró hab	6,4
Rozsdamentes acél (304, 316)	4,7
Szerkezeti acél	1,0



7. ábra: Csőtartályos félpótkocsi (tube trailer) sematikus kialakítása [24]

a tárolt gáz nyomásának növekedésével egyre nagyobb az önsúlyuk. Ebből adódhatnak szállítási korlátozások a nagy tengelyterhelés miatt. A legújabb hidrogéntároló nyomástartó edények könnyebb, kompoziterősítésű vagy kompozit anyagú tartályok (3. és 4. típus).

A 7. ábra egy csőtartályos tartálykocsi sematikus kialakítását ábrázolja.

A csőtartályos szállításban a csőtartályokat vízszintes helyzetben szállítják. A csőtartályok azonos geometriájúak (átmérő, hossz) és kialakításúak (anyag és nyomástartomány). A csőtartályok elhelyezésnek módja általában követi a két geometriai alapformát; a háromszög, illetve a négyszög elrendezést. Az első esetben a csőtartályokat úgy helyezik el, hogy azok befoglaló keresztmetszete egy egyenlő oldalú háromszög, a másik esetben négyszög legyen. A négyszög befoglaló keresztmetszetű elrendezés biztosítja az úrszelvény jobb kihasználtságát.

5.3 Palackköteges szállítás

A palackköteges szállításnál a kisméretű, jellemzően 60 literes, palackokat tizenkettes egységekben, állítva szállítják – ld. 8. ábra.



8. ábra: Palackköteges félpótkocsi sematikus kialakítása [24]

A palackkötegek befoglaló mérete ~1900×1000×770 mm (magasság × hosszúság × szélesség). Az acélpalackok töltőnyomása 200–300 bar, így 107–151 m³ sűrített gázt képesek tárolni. Egy palackköteg töltött tömege ~1320 kg, ha 200 bar a töltőnyomás és ~1460 kg, ha 300 bar a töltőnyomás [25], [26]. A sűrített hidrogén palackköteges szállítása a csőtartályossal szemben nagyobb rugalmasságot biztosít a gázt forgalmazónak az által, hogy a palackköteget göngyölegként a megrendelőnél lehet hagyni, ez által jelentősen csökkentve a „rakodási időt”.

5.4 A cseppfolyós hidrogén szállítása

Cseppfolyósított gázt tároló tartály(ny)okat nagy gázmennyiségeknél használnak. Mivel a hidrogénnél a kritikus pont felett (–240 °C és 1,3MPa=13,0bar) nyomással történő cseppfolyósítás nem lehetséges, a cseppfolyósításhoz a hidrogént erősen le kell hűteni és összenyomni;



9. ábra: Cseppfolyós gázt szállító félpótkocsi sematikus kialakítása [24]

ekkor jön létre a cseppfolyós hidrogén, jelölése: LH₂.

Cseppfolyósított hidrogénnél a nyomás nem okoz problémát a tartály (a mobil tartályok ADR-es megnevezése szerint: tartány) kialakításakor, azonban meg kell oldani a tartály és a vezetékek hőszigetelését. Előnyös ugyanakkor, hogy a hidrogénnek kis hőmérsékleten erősen lecsökken a reakcióképessége, valamint a folyékony hidrogén 800-szor nagyobb sűrűségű a normál nyomáson lévő, gázemű hidrogénhez képest. Ennek ellenére a folyékony hidrogén sok helyet igényel, hiszen sűrűsége még így is csak 71 kg/m³, alig nagyobb, mint a kis pórusú polisztirolhabé.

A cseppfolyós hidrogén-szállítás hátránya, hogy a tartány belsejében lévő, nagyon kis hőmérséklet miatt még jó hőszigetelés mellett sem lehet elkerülni a környezetből származó hőáramlást, ami a hidrogén részleges elpárolgásához vezet. A belső térből, a nyomás növekedésének elkerülése érdekében, az elpárolgott hidrogént ki kell engedni.

A 9. ábra cseppfolyósított hidrogén szállítására alkalmas tartály és nyerges vontató sematikus kialakítását mutatja.

6. Összefoglalás

A hidrogénfelhasználási igény a közeljövőben várhatóan jelentősen növekedni fog az energiaiparban és a közlekedésben egyaránt. Cikkünkben röviden kívántuk bemutatni a hidrogéntárolás és szállítás lehetőségeit, különös tekintettel a sűrített hidrogéngáz nyomástartó-edényekben történő tárolására, szállítására, valamint az ezzel kapcsolatos költségekre vonatkozóan.

Irodalomjegyzék

- [1] INDUSTRYARC (2019) Hydrogen market share, size and industry growth analysis 2019 - 2025. In: *Capacit. Manag Rev* 201956405. <https://www.industryarc.com/Research/Hydrogen-Market-Research-501664> (letöltés dátuma: 2022.05.29.)
- [2] IEA (2019) The Future of Hydrogen. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (letöltés dátuma: 2021.08.20.)
- [3] Robinius M, Linßen J, Grube T, et al (2018) Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles
- [4] IEA (2019) Special Focus on Gas Infrastructure. <https://www.iea.org/articles/special-focus-on-gas-infrastructure> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)
- [5] IEA (2020) Current limits on hydrogen blending in natural gas networks and gas demand per capita in selected locations. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/current-limits-on-hydrogen-blending-in-natural-gas-networks-and-gas-demand-per-capita-in-selected-locations> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)
- [6] Messer A gázokról általában <https://www.messer.hu/1.-a-gazokrol-altalaban> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)
- [7] Witkowski A, Rusin A, Majkut M, Stolecka K (2017) Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. *Energy* 141:2508–2518. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.141>
- [8] Hua TQ, Ahluwalia RK (2011) Alane hydrogen storage for automotive fuel cells – Off-board regeneration processes and efficiencies. *Int J Hydrogen Energy* 36:15259–15265. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.081>
- [9] O'Malley K, Ordaz G, Adams J, et al (2015) Applied hydrogen storage research and development: A perspective from the U.S. Department of Energy. *J Alloys Compd* 645:S419–S422. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.090>
- [10] Godula-Jopek A, Jehle W, Wellnitz J (2012) Storage of Pure Hydrogen in Different States. In: *Hydrogen Storage Technologies*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, pp 97–170.
- [11] Andersson J, Grönkvist S (2019) Large-scale storage of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 44:11901–11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- [12] Valenti G (2016) Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In: *Compendium of Hydrogen Energy*. Elsevier, pp 27–51
- [13] Krasae-in S, Stang JH, Neksa P (2010) Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009. *Int J Hydrogen Energy* 35:4524–4533. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.109>
- [14] Rosen A (2020) Wasserstoffdruckbehälter: Welche Druckbehälter-Typen gibt es? In: EMCEL. <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/> (letöltés dátuma: 2021.08.20.)
- [15] 39/2021. (VII. 30.) ITM rendelet a Veszélyes Áruk Nemzetközi Közúti Szállításáról szóló Megállapodás (ADR)
- [16] MSZ EN ISO 11439:2002 Gázpalackok. Földgázhajtású gépjárművek nagynyomású palackjai
- [17] MSZ EN ISO 24431:2017 Gázpalackok. Varrat nélküli, hegesztett és kompozit palackok sűrített és cseppfolyósított gázokhoz (kivéve az acetilént). Ellenőrzés töltéskor
- [18] Research Institutes of Sweden Hydrogen Storage in Vehicles <https://energiforsk.se/media/26373/6-hydrogen-storage-in-vehicles-hans-pohl-bengt-ridell.pdf> (letöltés dátuma: 2022.05.29.)
- [19] Law K, Rosenfeld J, Han V, et al (2013) U.S. Department of Energy Hydrogen Storage Cost Analysis. Cupertino
- [20] Warren CD, Shaffer JT, Paulauskas FL, Abdullah MG (2002) Low Cost Carbon Fiber for the Next Generation of Vehicles: Novel Technologies. *SAE Trans* 111:719–726.
- [21] DuVall FW (2001) Cost comparisons of wet filament winding versus prepreg filament winding for Type II and Type IV CNG cylinders. *SAMPE J* 37:38–42.
- [22] TÜV Süd (2021) Speicherung von Wasserstoff. <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff-speicherung-von-wasserstoff> (letöltés dátuma: 2022.05.29.)
- [23] KRESZ fogalmak III. A közúti forgalommal kapcsolatos fogalmak, 2. § Fogalmak
- [24] Shell Hydrogen Study (2017) Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂
- [25] Linde Wasserstoff 3.0. https://produkte.linde-gase.de/db_neu/wasserstoff_3.0.pdf (letöltés dátuma: 2021.08.20.)
- [26] Gasido Wasserstoff Bündel kaufen: Eigenschaften und Kosten. <https://www.gasido.de/wasserstoff-buendel-kaufen-eigenschaften-und-kosten> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)