



Education in Hydrogen Technologies Area

SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVA VODÍKU



**Co-funded by
the European Union**

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

obsah	2
Seznam zkratk.....	1
Úvod	2
1 Bezpečnost práce při skladování a přepravě vodíku	3
2 Přeprava vodíku.....	6
2.1 Přeprava stlačeného vodíku v kontejnerech po silnici nebo železnici	7
2.2 Přeprava zkapalněného vodíku v kontejnerech po silnici, železnici nebo lodí	8
2.3 Přeprava vodíku potrubím se směsí zemního plynu	10
2.4 Separace vodíku ze směsi zemního plynu pomocí membránové separace	11
2.5 Přeprava čistého vodíku prostřednictvím stávajícího plynovodu upraveného pro čistý vodík 13	
2.6 Přeprava čistého vodíku nově vybudovaným potrubím	15
2.6.1 The European Hydrogen Backbone	16
2.6.2 Příklad realizace národní vodíkové sítě	19
2.7 LOHC.....	20
2.7.1 Příklad použití LOHC v praxi	21
3 Skladování vodíku	26
3.1 Skladování stlačeného vodíku	28
3.2 Skladování kapalného vodíku	30
3.3 Skladování vodíku v podzemních zásobnících ve směsi s metanem nebo čpavkem	32
3.4 Skladování vodíku v hydridech	34
3.4.1 Hydridy kovů.....	35
3.5 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V ZÁSOBNÍCÍCH NA BÁZI UHLÍKU	37
4 Komponenty	42
4.1 Tlakové nádrže	43
4.2 KRYOGENNÍ NÁDRŽE	45
4.3 Vysokotlaké skladovací nádrže	47
5 Seznam zdrojů	49
6 Seznam obrázků a tabulek.....	51

Financováno Evropskou unií. Vyjádřené názory a stanoviska jsou však pouze názory a stanoviska autora (autorů) a nemusí nutně odrážet názory a stanoviska Evropské unie nebo Evropské výkonné agentury pro vzdělávání a kulturu (EACEA). Evropská unie ani EACEA za ně nemohou nést odpovědnost.

SEZNAM ZKRATEK

EHB - The European Hydrogen Backbone

MIE - minimální zápalná energie

LNG - zkapalněný zemní plyn

LOHC - kapalné organické nosiče vodíku

LH2 - kapalný vodík

HENG - zemní plyn obohacený vodíkem

CO2 - oxid uhličitý

CNG - stlačený zemní plyn

MOF - kovové organické rámce

EU - Evropská unie

UK - Spojené království

EIA - posouzení vlivu na životní prostředí

LHV - nižší výhřevnost

DOE - návrh experimentu

ADR - accord dangereuses route (nebezpečná cesta)

Vodík lze skladovat různými způsoby, například jako plyn, kapalinu nebo v pevné formě, například jako hydrid kovu nebo chemickou sloučeninu. Nejběžnějším způsobem skladování vodíku je skladování ve formě stlačeného plynu ve vysokotlakých nádržích. Výhodou této metody je, že je relativně jednoduchá a levná, ale hustota skladování je poměrně nízká, takže pro skladování použitelného množství vodíku jsou zapotřebí velké nádrže.

Vodík lze také skladovat jako kapalinu v kryogenních nádržích, což jsou nádrže určené ke skladování materiálů při extrémně nízkých teplotách. Kapalným vodík má mnohem vyšší skladovací hustotu než plyný vodík, takže jej lze skladovat v menších nádržích. Nádrže a zařízení potřebné pro skladování a manipulaci s kapalným vodíkem jsou však dražší a složitější než nádrže a zařízení pro skladování stlačeného plynu.

Další metodou skladování vodíku je jeho skladování v pevné formě, například v hydridu kovu nebo v chemické sloučenině. Výhodou této metody je možnost skladovat velké množství vodíku v malém prostoru, ale je obecně dražší a méně účinné než ostatní metody.

Existuje také několik způsobů přepravy vodíku, patří zde přeprava nákladními automobily, vlakem, lodí a potrubím. Nejběžnější metodou je přeprava nákladními automobily s použitím nádrží, které jsou podobné těm, které se používají pro skladování vodíku. Vodík lze také přepravovat vlakem nebo lodí v kryogenních nádržích nebo jej lze přepravovat potrubím podobně jako zemní plyn.

Celkově je vývoj účinných a efektivních metod skladování a přepravy vodíku důležitou oblastí výzkumu a vývoje, protože vodík má potenciál být cenným způsobem ukládání energie.

1 BEZPEČNOST PRÁCE PŘI SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVĚ VODÍKU

Vodík je vysoce hořlavý plyn a v zájmu bezpečnosti je třeba s ním zacházet opatrně. Při skladování nebo přepravě musí být vodík udržován při vysokém tlaku nebo extrémně nízkých teplotách, aby se snížilo riziko výbuchu. Skladování a přeprava tak mohou být náročnější a dražší než u jiných druhů paliv.

Jedním z hlavních problémů při skladování vodíku je možnost úniku. Vodík může unikat ze skladovacích nádrží a potrubí, což může vést ke vzniku hořlavých nebo výbušných směsí. Aby se riziko úniku minimalizovalo, musí být skladovací nádrže a potrubí navrženy a zkonstruovány podle přísných bezpečnostních norem. Pravidelné kontroly a údržba jsou rovněž zásadní pro zajištění dobré funkčnosti těchto systémů.

Při přepravě vodíku se obvykle používá nákladní automobil, železnice nebo loď. Kamionová a železniční přeprava se obvykle provádí ve velkých, speciálně navržených nádržích nebo kontejnerech, které vydrží vysoké tlaky nebo nízké teploty potřebné pro skladování vodíku. Přeprava vodíku se obvykle provádí v kryogenní kapalně formě, což vyžaduje izolované kontejnery, které jsou navrženy tak, aby udržovaly vodík při extrémně nízkých teplotách.

Dalším klíčovým bezpečnostním problémem je možnost požáru a výbuchu vodíku. Vodík je vysoce hořlavý plyn, a pokud unikne a dostane se do kontaktu se zdrojem vznícení, může způsobit požár nebo výbuch. Aby se minimalizovalo riziko požárů a výbuchů vodíku, musí být skladovací a přepravní zařízení umístěna mimo obydlené oblasti a musí být vybavena protipožárními systémy.

Skladování a přeprava vodíku vyžaduje přísné dodržování bezpečnostních protokolů, správnou konstrukci a údržbu zařízení. Pro minimalizaci možných rizik existují reakční plány na mimořádné události. Přestože má vodík potenciál být cenným způsobem ukládání energie, je důležité, aby byla přijata vhodná bezpečnostní opatření na ochranu osob a majetku.

Potenciální rizika spojená se skladováním stlačeného plynného vodíku:

- Uvolňování vodíku se obtížně identifikuje, protože plyn je bez zápachu, barvy a chuti.
- Vodík může způsobit křehnutí kovů. To může vést ke snížení pevnosti materiálu a následně k prasknutí zásobníku, což má za následek únik vodíku.
- Hromadění vodíku po dlouhou dobu v uzavřených prostorech, jako jsou garáže, dílny nebo prostory pro cestující ve vozidlech. V důsledku vytěsnění vzduchu vodíkem může dojít k udušení.
- Vznik hořlavých směsí vodíku a kyslíku nebo vodíku a vzduchu. Nasátí hořlavé směsi do ventilačního systému budovy může vést k detonaci.
- Výbuch zásobníku doprovázený tlakovou vlnou může vést k prasknutí zásobníku, odletujícím úlomkům, rozbití skla, vážným zraněním atd.
- Vodík se snadno vznítí, protože jeho MIE je 0,017 mJ (což je 10krát méně ve srovnání s jinými palivy). Statická jiskra může uvolněný vodík zapálit.
- Při hoření čistého vodíku jsou jeho plameny na denním světle neviditelné.
- Vodík hoří rychle a neprodukuje kouř.
- Vnější oheň, teplo nebo tepelné záření mohou způsobit mechanické roztržení nádrže v důsledku tepelného rozkladu polymerních a kompozitních materiálů (Hy Responder Lecture 3: Hydrogen storage, 2021, s. 13-14).

Obecné pokyny pro bezpečnou práci s plynným vodíkem:

- Dodržujte všechny bezpečnostní předpisy a pokyny pro manipulaci s plynným vodíkem. To může zahrnovat používání osobních ochranných pomůcek, jako jsou rukavice, ochranné brýle a nehořlavý oděv.
- Při manipulaci s lahvemi s plynným vodíkem nebo jinými nádobami dbejte zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k poškození nádoby, které by mohlo vést k úniku nebo uvolnění plynného vodíku.
- Plynný vodík udržujte mimo dosah zdrojů vznícení, jako jsou otevřený oheň, jiskry a elektrická zařízení.
- Při přepravě plynného vodíku dbejte na to, aby byl plyn uložen ve vhodné nádobě, která je určena pro plynný vodík a je v dobrém stavu.
- Plynný vodík skladujte na dobře větraném místě, mimo dosah zdrojů vznícení.

- Při přečerpávání plynného vodíku z jedné nádoby do druhé dbejte zvýšené opatrnosti. Ujistěte se, že jsou nádoby řádně zajištěny a že je přečerpávání prováděno pomalu, aby nedošlo k úniku.
- V případě úniku plynného vodíku okamžitě evakuujte prostor a vyvětrejte jej, aby se plyn rozptýlil. Nepokoušejte se únik odstranit sami, raději zavolejte odbornou pomoc.
- Pravidelně kontrolujte stav zásobníků a zařízení na plynný vodík, abyste se ujistili, že jsou v dobrém stavu a nepředstavují bezpečnostní riziko.
- Ujistěte se, že všichni pracovníci, kteří pracují s plynným vodíkem, jsou řádně vyškoleni a seznámeni s nebezpečím spojeným s tímto plynem.



Obrázek č. 1: Výstražná tabule.

Úvod

Vodík lze přepravovat několika způsoby, například nákladními auty, loděmi, po železnici a potrubím.

Jedním z běžných způsobů přepravy vodíku je přeprava nákladními automobily s využitím kryogenních cisternových návěsů. Tyto návěsy jsou určeny k přepravě zkapalněného vodíku při extrémně nízkých teplotách ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), což snižuje objem vodíku a umožňuje efektivnější přepravu.

Další možností je přeprava vodíku lodí, a to buď jako kryogenní kapaliny, nebo jako stlačeného plynu. Kryogenní kapalný vodík lze přepravovat ve specializovaných tankerech, podobných těm, které se používají pro přepravu zkapalněného zemního plynu (LNG). Stlačený plyný vodík lze rovněž přepravovat v kontejnerech, které jsou konstruovány tak, aby odolaly vysokým tlakům.

Vodík lze také přepravovat potrubím, stejně jako zemní plyn. Tento způsob je obecně praktický pouze na krátké vzdálenosti, protože vodík má tendenci z potrubí unikat snadněji než zemní plyn. Může však být účinnou možností pro přepravu vodíku z místa výroby do blízkého skladovacího nebo distribučního centra.

Klíčová slova

Zkapalněný vodík, stlačený vodík, potrubí, kontejner, doprava, cisterna, vlak, nákladní automobil, plyn, loď, membránová separace, LOHC

2.1 PŘEPRAVA STLAČENÉHO VODÍKU V KONTEJNERECH PO SILNICI NEBO ŽELEZNICI

Vodík lze přepravovat v kontejnerech po silnici buď jako stlačený plyn, nebo jako kapalinu. Pokud je vodík přepravován jako stlačený plyn, je obvykle uložen ve vysokotlakých nádržích, které jsou namontovány na přívěsu nákladního automobilu. Nádrže jsou obvykle vyrobeny z uhlíkových vláken nebo oceli a jsou navrženy tak, aby odolaly vysokým tlakům, při kterých je vodík skladován.

Při přepravě vodíku po silnici je třeba vzít v úvahu řadu faktorů, včetně velikosti a hmotnosti nádrží, možnosti úniku nebo nehody a nutnosti dodržovat bezpečnostní předpisy. Je důležité zajistit, aby byly kontejnery správně navrženy a udržovány a aby byli řidiči vyškoleni pro bezpečnou manipulaci s kontejnery. Kromě toho je důležité dodržovat všechny příslušné předpisy a směrnice.

Přeprava vodíku vlakem může být účinným a efektivním způsobem přepravy velkého množství vodíku na velké vzdálenosti.

Přeprava vodíku vlakem má řadu výhod, včetně relativně nízkých nákladů na železniční dopravu ve srovnání s jinými druhy dopravy a menšího dopadu na životní prostředí. Je však třeba vzít v úvahu i některé problémy, jako je nutnost dodržovat bezpečnostní předpisy a možnosti nehod nebo úniků. Je důležité zajistit, aby byly kontejnery správně navrženy a udržovány a aby byly železniční vozy vybaveny vhodnými bezpečnostními prvky.

Vodík lze přepravovat ve třech skupenstvích. V plynném stavu jej lze přepravovat především ve velkém počtu malých lahví nebo skladovat v několika dlouhých horizontálních nádobách.

Z údajů společnosti Platts vyplývá, že zatímco jeden nákladní automobil může přepravit 500 až 1 100 kg vodíku v plynné formě, nákladní automobil přepravující zkapalněný vodík může přepravit až 3 500 kg (S&P Global Commodity Insights, 2021).

V současné době se vodík přepravuje převážně jako stlačený plyn v tlakových nádobách vyrobených ze železa nebo kompozitních uhlíkových trubek. Vodík v tlakových nádobách lze přepravovat v tlakových lahvích pod tlakem 200 až 300 barů. Vozidla na vodíkové palivo používají pro své použití menší tlakové nádoby o tlaku 350 nebo 700 barů.



Obrázek č. 2: Přeprava vodíku v kontejnerech po silnici.

2.2 PŘEPRAVA ZKAPALNĚNÉHO VODÍKU V KONTEJNERECH PO SILNICI, ŽELEZNICI NEBO LODÍ

Vodík lze přepravovat v kapalně formě, která se nazývá kryogenní kapalný vodík (LH₂). Musí být skladován a přepravován při extrémně nízkých teplotách, obvykle kolem -253 °C. LH₂ má jako palivo řadu výhod. Má vysokou hustotu energie, což znamená, že relativně malé množství LH₂ obsahuje velké množství energie. Je to také čisté palivo, při jehož spalování vzniká pouze voda.

S přepravou LH₂ je však spojena i řada problémů. Vyžaduje specializovanou a nákladnou infrastrukturu pro skladování a přepravu, protože musí být udržován při extrémně nízkých teplotách, aby zůstal kapalný. Jedná se také o vysoce těkavé palivo, které může představovat bezpečnostní riziko, pokud se s ním nezachází správně. Navzdory těmto problémům má LH₂ potenciál stát se v budoucnu důležitým palivem pro dopravu, zejména pro přepravu zboží na dlouhé vzdálenosti.

Vodík lze po silnici přepravovat v kapalném stavu ve specializovaných kryogenních cisternách, které jsou určeny k přepravě kapalin, jež jsou extrémně chladné, jako je například kapalný vodík. Tyto cisterny jsou obvykle vyrobeny z nerezové oceli a jsou izolovány, aby

pomohly udržet extrémně nízkou teplotu kapalného vodíku. Samotné cisterny jsou navrženy tak, aby odolaly vysokému tlaku, který vzniká při expanzi kapalného vodíku při jeho zahřívání.

Při nakládání kapalného vodíku do cisterny se vodík přečerpává ze skladovací nádrže do cisterny pomocí přečerpávacího potrubí. Přečerpávací potrubí je vybaveno řadou ventilů a bezpečnostních zařízení, která zabraňují úniku. Cisternové vozidlo má také vlastní bezpečnostní systémy, jako jsou přetlakové ventily, které zabraňují nehodám během přepravy.

Jakmile je cisterna naložena kapalným vodíkem, může být přepravena na místo určení po stejných silnicích a dálnicích, které používají ostatní vozidla. Řidič cisternového vozidla musí být speciálně vyškolen, aby dokázal zacházet s jedinečnými vlastnostmi kapalného vodíku a dodržovat všechny bezpečnostní protokoly. Cisternový vůz musí také řídit opatrně, aby nedošlo k otřesům nádrže, které by mohly způsobit, že se kapalný vodík začne oteplovat a změní se na plyn, čímž se zvýší tlak uvnitř nádrže.

Je důležité si uvědomit, že přeprava vodíku v jakékoli formě, včetně kapalného vodíku, s sebou nese určitá rizika a vyžaduje přísná bezpečnostní opatření, aby se předešlo nehodám.

Možnou variantou přepravy velkého množství vodíku na velké vzdálenosti je přeprava vodíku lodí. Existuje však několik problémů, které je třeba vyřešit, aby se tato možnost stala životaschopnou. Jedním z problémů je konstrukce kryogenních kontejnerů, které vydrží drsné podmínky přepravy po moři. Kromě toho je třeba při manipulaci s kryogenními kapalinami a jejich skladování zohlednit bezpečnostní aspekty, jako je riziko rozlití a úniku.

Navzdory těmto problémům probíhá úsilí o vývoj bezpečných a nákladově efektivních metod přepravy vodíku na lodích. Například projekt Evropské unie HYFLEET:CUTE prokázal proveditelnost použití malého plavidla k přepravě vodíku z výrobních zařízení na moři do přístavů za účelem distribuce. V budoucnu by bylo možné přepravovat vodík ve větším množství pomocí speciálních plavidel, která jsou určena speciálně pro přepravu kryogenních kapalin.



Obrázek č. 3: Přeprava zkapalněného vodíku na kontejnerové lodi.

2.3 PŘEPRAVA VODÍKU POTRUBÍM SE SMĚSÍ ZEMNÍHO PLYNU

Vodík lze přepravovat potrubím ve směsi se zemním plynem, vyžaduje však specifickou infrastrukturu a opatrné zacházení. Pokud je vodík smíchán se zemním plynem, nazývá se tato směs "zemní plyn obohacený vodíkem" nebo "HENG". Koncentrace vodíku ve směsi se obvykle pohybuje mezi 10 a 20 %.

Jednou z výhod přepravy vodíku tímto způsobem je, že umožňuje využití stávajících plynovodů, což může být nákladově efektivnější než budování nových plynovodů speciálně pro vodík. Při použití HENG pro přepravu je však třeba mít na paměti také několik problémů.

Jedním z problémů je, že vodík je vysoce reaktivní a může způsobit korozi některých materiálů, například některých druhů oceli. To znamená, že potrubí používané pro HENG musí být vyrobeno z materiálů, které jsou s vodíkem kompatibilní, nebo musí být potaženo ochrannou vrstvou. Kromě toho má vodík nižší energetický obsah než zemní plyn, takže

výhřevnost HENG je nižší. To znamená, že vyžaduje větší objem, aby poskytl stejné množství energie jako čistý zemní plyn.

Dalším faktorem je, že s HENG se musí pečlivě manipulovat a skladovat, aby nedošlo k úniku nebo nehodě. HENG musí být například uchováván pod vysokým tlakem, aby se snížil jeho objem a usnadnila se jeho přeprava. To znamená, že skladovací a manipulační zařízení používaná pro HENG musí být navržena tak, aby odolala vysokým tlakům.

Celkově lze říci, že i když může být zemní plyn obohacený vodíkem účinným způsobem přepravy vodíku, vyžaduje specializovanou infrastrukturu a pečlivé zacházení, aby byla zajištěna bezpečnost a účinnost procesu.

Vodík má při stejném tlaku a objemu nižší výhřevnost než zemní plyn. Jeho výhřevnost je přibližně 30 % výhřevnosti zemního plynu. To nezpůsobí žádné problémy při prodeji plynu zákazníkům, protože současná cena za distribuci plynu je účtována v jednotkách energie (distribuované KWh) podle výhřevnosti a používané fakturační systémy musí výhřevnost plynu měnit na základě skutečných měření.

K zajištění stejného množství tepla je nutné dodávat více vodíku než zemního plynu. Výhoda vodíku spočívá v nižším odporu při průtoku potrubím, což znamená, že směs zemního plynu s vodíkem může proudit rychleji. Současná průtočná kapacita plynovodů nepředstavuje pro směs zemního plynu a vodíku omezení, pokud jde o přepravované množství tepla (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 77-78).

2.4 SEPARACE VODÍKU ZE SMĚSI ZEMNÍHO PLYNU POMOCÍ MEMBRÁNOVÉ SEPARACE

Membránová separace plynů je proces, při kterém se směs plynů rozděluje na jednotlivé složky pomocí membrány. Membrána umožňuje průchod některých plynů a brání průchodu jiných. V případě separace vodíku ze směsi zemního plynu lze použít membránu, která je selektivní pro vodík.

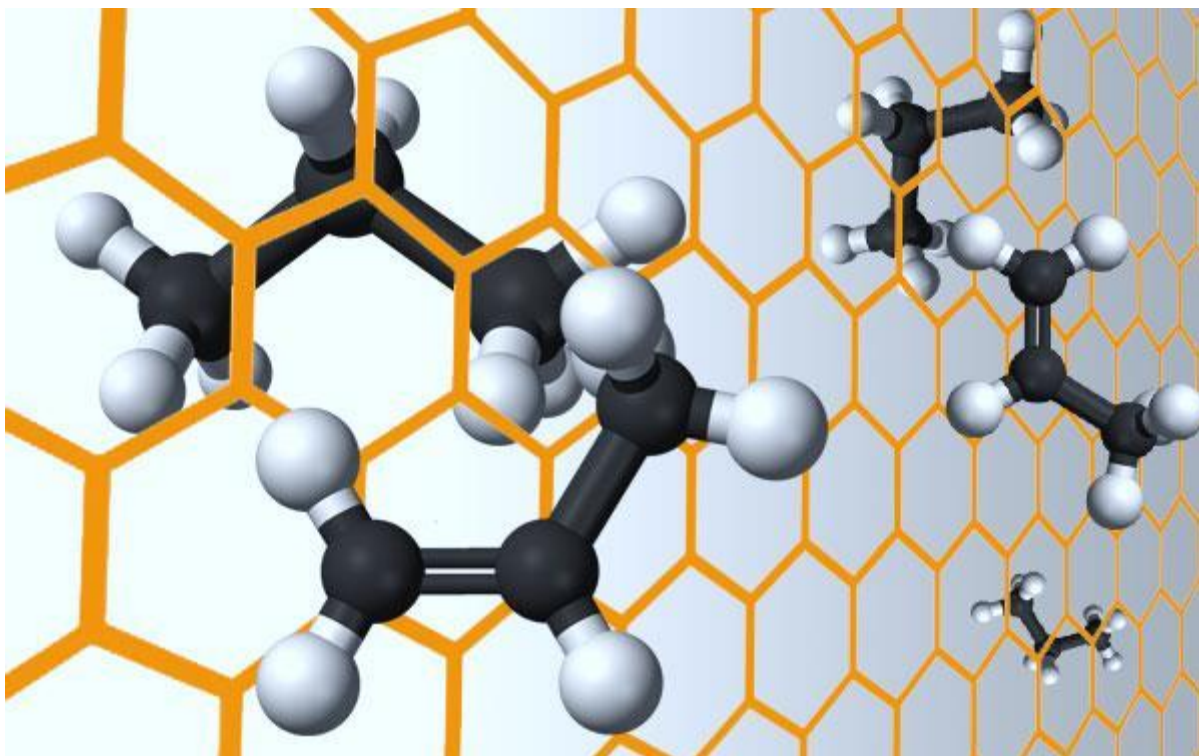
Existuje několik různých typů membrán, které lze použít k separaci vodíku, včetně polymerních membrán, anorganických membrán a kovových organických rámců (MOF).

Polymerní membrány jsou vyrobeny z polymerů, jako jsou polysulfon a polyamidy, a často se používají pro separaci vodíku ze směsi zemního plynu díky své vysoké selektivitě pro vodík. Anorganické membrány, jako jsou keramické a skleněné membrány, se rovněž používají pro separaci vodíku, ale jsou obecně méně selektivní než polymerní membrány. MOF jsou relativně novým typem membrán, které mají nastavitelnou velikost pórů, díky čemuž jsou vysoce účinné při separaci plynů.

Proces separace vodíku ze směsi zemního plynu pomocí membrány obvykle zahrnuje stlačení směsi plynů na jedné straně membrány při současném udržování nižšího tlaku na druhé straně. Molekuly vodíku pak mohou procházet membránou na stranu s nižším tlakem, zatímco ostatní plyny projít nemohou. Oddělený vodík lze pak shromažďovat a používat jako palivo nebo surovinu pro chemické procesy.

Je důležité si uvědomit, že účinnost separačního procesu může být ovlivněna řadou faktorů, včetně typu použité membrány, rozdílu tlaku napříč membránou a teploty směsi plynů. Kromě toho bude čistota separovaného vodíku záviset na selektivitě membrány a složení výchozí směsi plynů.

Jedná se stále o poměrně nový a nedostatečně otestovaný proces. Nicméně využití současné plynové infrastruktury je velkou příležitostí a umožňuje výrazně snížit náklady na přepravu vodíku a snížit jeho konečnou cenu pro zákazníka. Samotný membránový separátor je relativně levné zařízení, které má vysoký potenciál. Bohužel i zde se setkáváme s určitou nedokonalostí, například s neúplnou separací plynu. Je zde také problém, který souvisí s nerovnoměrným rozdělením vodíku. To by mohlo způsobit, že někteří zákazníci obdrží nedostatečné množství vodíku. Riziko nedostatku dodávané energie je obecně zřejmé i z celé myšlenky takového systému. Pokud by například bylo pouze 20 % potrubí "vyhrazeno" pro vodík, tedy pro jediné médium přenášející energii pro koncového zákazníka, došlo by k výraznému snížení akumulačních a přenosových schopností takového potrubí (Galík, 2021, s. 63).



Obrázek č. 4: Membránová separace plynu.

2.5 PŘEPRAVA ČISTÉHO VODÍKU PROSTŘEDNICTVÍM STÁVAJÍCÍHO PLYNOVODU UPRAVENÉHO PRO ČISTÝ VODÍK

Vodík je možné přepravovat stávajícím plynovodem tak, že se plynovod upraví pro přepravu vodíku. Toho lze dosáhnout snížením tlaku v potrubí, zvýšením tloušťky stěn potrubí, aby odolalo vyšším tlakům vodíku, a přidáním materiálů specifických pro vodík do potrubí, aby se zabránilo korozi. Proces úpravy stávajícího plynovodu pro přepravu vodíku se nazývá "repurposing".

Tento proces zahrnuje řadu kroků, včetně:

- Vyčištění a pročištění potrubí: Potrubí musí být před přepravou vodíku vyčištěno a zbaveno zbytků zemního plynu nebo jiných nečistot.
- Kontrola potrubí: Potrubí musí být zkontrolováno, zda na něm nejsou závady nebo poškození, které by mohly ohrozit jeho integritu při přepravě vodíku.

- Provedení nezbytných oprav: Jakékoli závady nebo poškození zjištěné při kontrole musí být před použitím potrubí pro přenos vodíku opraveny.
- Úprava provozu potrubí: Provozní tlak a průtok v potrubí může být nutné upravit tak, aby umožňoval přenos vodíku.
- Přidání infrastruktury specifické pro vodík: Potrubí může být nutné vybavit další infrastrukturou, například čerpadly a kompresory specifickými pro vodík, aby se usnadnil přenos vodíku.
- Zajištění bezpečnosti: Pro zajištění bezpečného přenosu vodíku potrubím je důležité zavést bezpečnostní opatření, jako je instalace detektorů vodíku a systémů nouzového vypnutí.
- Výměna přístrojového vybavení elektrického zařízení třídy ATEX IIC ve vodíkovém závodě/potrubí.

Jednou z možných výhod využití stávajícího potrubí pro přepravu vodíku je úspora času a peněz ve srovnání s výstavbou nového potrubí speciálně pro vodík. S novým využitím potrubí pro přepravu vodíku jsou však také spojeny určité problémy a rizika. Je například důležité pečlivě posoudit stav potrubí a zajistit, aby bylo vhodné pro přepravu vodíku. Je také důležité vzít v úvahu dopad na místní komunitu a životní prostředí během procesu opětovného využití.

The European Hydrogen Backbone (EHB) počítá s tím, že 75 % vodíkové distribuční sítě by mělo vycházet ze stávající infrastruktury, zbývajících 25 % bude nutné vybudovat. EU počítá s nedostatkem čistého vodíku minimálně do roku 2030, což bude znamenat nutnost importu vodíku. (Galík, 2021, s. 62).

Jakýkoliv stát by neměl být závislý na dodávkách energie z jednoho státu. Vodík může pocházet z mnohem více zemí než zemní plyn. Díky tomu je dovoz méně geopoliticky závislý.

Vodík lze přepravovat potrubím v plynné formě, stejně jako zemní plyn. Konstrukce vodíkového potrubí je podobná konstrukci potrubí pro zemní plyn, s některými důležitými rozdíly, které zohledňují jedinečné vlastnosti vodíku.

Zde jsou uvedeny některé klíčové aspekty konstrukce vodíkového potrubí:

- **Materiály:** Materiály použité pro stavbu potrubí musí být schopny odolat korozivní povaze vodíku. Například uhlíková ocel není pro použití ve vodíkovém potrubí vhodná, protože může časem korodovat. Místo toho lze použít materiály, jako je nerezová ocel, hliník nebo speciální slitiny, například inconel nebo hastelloy.
- **Průměr potrubí:** Průměr potrubí by měl být zvolen na základě požadovaného průtoku a tlaku vodíku. Protože vodík má nižší hustotu než zemní plyn, může být požadovaný průměr potrubí pro daný průtok větší.
- **Svařování:** Svařování je kritickým krokem při stavbě jakéhokoli potrubí a při svařování vodíkových potrubí je třeba dbát zvláštních opatření. Vodík může se vzduchem tvořit hořlavé směsi, proto je důležité čistit vzduch v okolí svařovacího prostoru a používat ochranné plyny, aby se zabránilo vzniku výbušných směsí.
- **Bezpečnostní systémy:** Vodíkové potrubí musí mít řadu bezpečnostních systémů, aby se zabránilo nehodám a únikům. Ty mohou zahrnovat ochranu proti přetlaku, systémy detekce úniku a systémy nouzového vypnutí.
- **Povolení:** Stejně jako u každého velkého stavebního projektu je i při výstavbě vodíkového potrubí nutné získat potřebná povolení a souhlasy příslušných státních orgánů.

Celkově výstavba vodíkového potrubí vyžaduje pečlivé plánování a pozornost věnovanou detailům, aby byla zajištěna bezpečná a efektivní přeprava vodíku.

Přeprava prostřednictvím plynovodů se realizuje v případě kumulace mnoha výrobců a odběratelů na jednom místě. Ve světě existuje mnoho poměrně rozsáhlých sítí, z nichž nejvýznamnější je pravděpodobně v Německu, kde celková délka sítě přesahuje 200 km. Provozní tlak v této síti je 2,5 MPa, přepravní kapacita sítě je 50 mil. m³ za hodinu. Potrubí

má průměr 20 cm a je uloženo jeden metr pod zemí. Provozní ztráty činí přibližně 1 %. V USA (Texas) existuje síť dlouhá 96 km s podobnými parametry. Další dvě menší jsou například ve Francii, Velké Británii a dalších zemích. Ve světě je více než 1000 km vodíkových plynovodů (Šváb, 2006, s. 25-26).



Obrázek č. 5: Přeprava vodíku prostřednictvím plynovodu.

2.6.1 THE EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE

The European Hydrogen Backbone (EHB) je navrhovaný infrastrukturní projekt, jehož cílem je podpořit využívání vodíku jako čistého zdroje energie v Evropě. Má se jednat o komplexní síť zařízení na výrobu, skladování a distribuci vodíku, která bude vybudována v celé Evropské unii (EU). Cílem evropské vodíkové páteře je umožnit široké zavedení vodíkových technologií v EU, zejména v odvětvích, kde je obtížné dekarbonizovat pomocí jiných technologií.

Očekává se, že EHB bude klíčovým prvkem úsilí EU o dekarbonizaci jejího energetického systému a splnění jejích cílů v oblasti klimatu a energetiky. Má podpořit rozvoj řady odvětví, včetně dopravy, průmyslu a výroby energie.

Konkrétní podrobnosti EHB, včetně přesného umístění výrobních, skladovacích a distribučních zařízení, nebyly dosud dokončeny. Evropská komise však identifikovala řadu klíčových problémů, které je třeba vyřešit, aby se EHB stala skutečností. Mezi tyto výzvy patří:

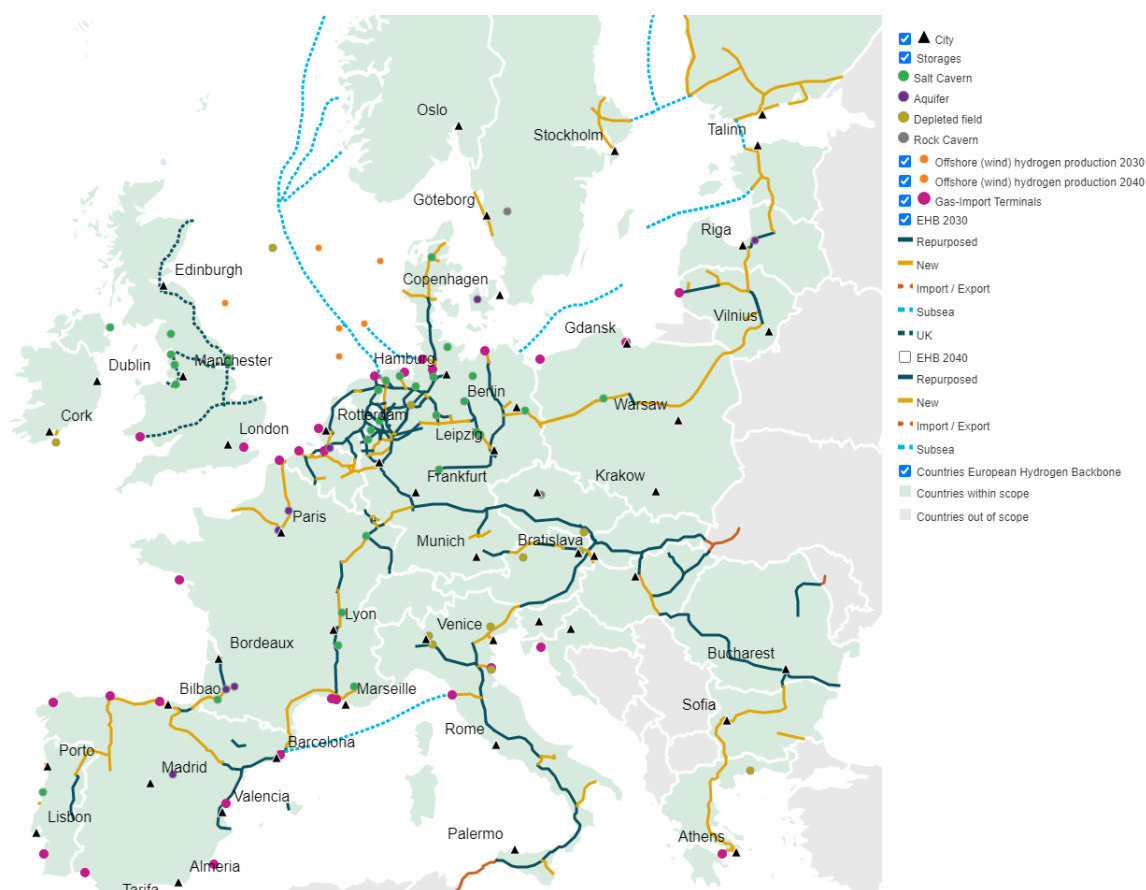
- Vývoj nákladově efektivních a účinných výrobních technologií: Vodík lze vyrábět pomocí různých technologií, včetně elektrolýzy, parního reformingu metanu a zplyňování biomasy. Tyto technologie jsou však v současné době poměrně drahé a neefektivní a bude nutné je zdokonalit, aby výroba vodíku byla konkurenceschopná s jinými zdroji energie.
- Vybudování nezbytné infrastruktury: Pro podporu širokého využívání vodíku bude zapotřebí komplexní síť výrobních, skladovacích a distribučních zařízení. To bude vyžadovat značné investice do infrastruktury, včetně potrubí, skladovacích nádrží a čerpacích stanic.
- Zajištění bezpečnosti a spolehlivosti vodíkových systémů: Vodík je vysoce hořlavý plyn a je třeba dbát na to, aby vodíkové systémy byly bezpečné a spolehlivé. To bude vyžadovat vypracování vhodných bezpečnostních norem a zavedení spolehlivých bezpečnostních postupů.
- Překonání regulačních překážek: Vývoj EHB bude vyžadovat koordinaci úsilí v řadě různých zemí a odvětví. To bude vyžadovat vytvoření regulačního rámce, který bude příznivý pro rozvoj vodíkových technologií.

Celkově je EHB ambiciózní a komplexní projekt, který bude vyžadovat značné investice a koordinaci, aby byl úspěšný. Pokud však bude úspěšný, má potenciál sehrát významnou roli v dekarbonizaci energetického systému EU a dosažení jejích cílů v oblasti klimatu a energetiky.

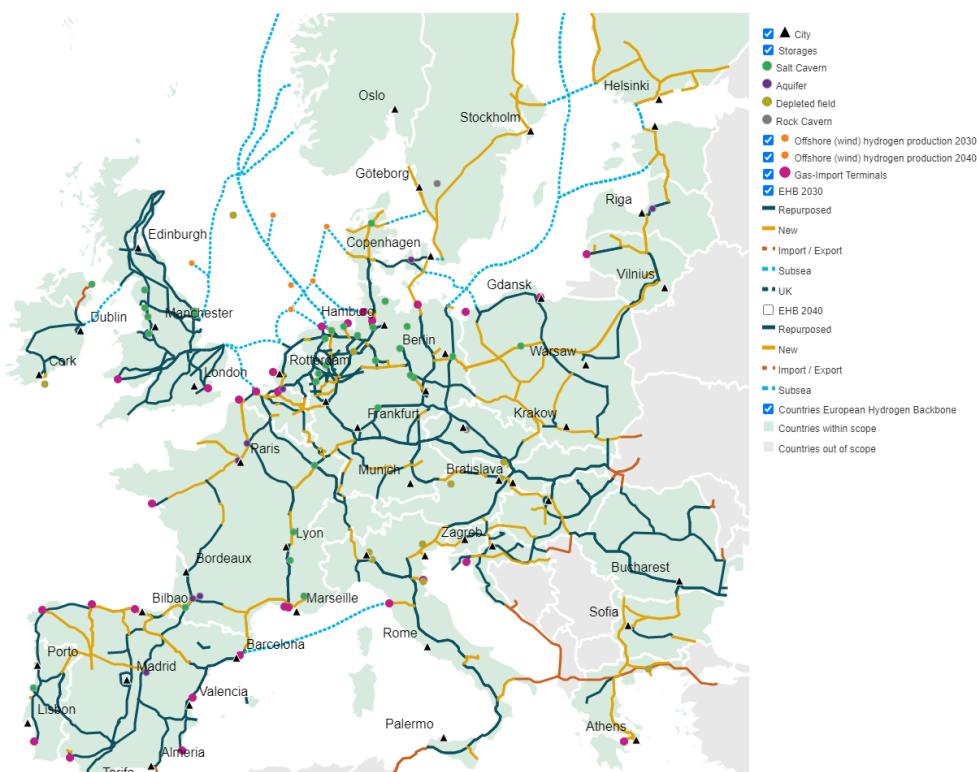
Očekává se, že celkové investiční náklady EHB do roku 2040 se budou pohybovat v rozmezí od 27 do 64 miliard EUR, což pokryje veškeré kapitálové náklady na vybudování a modernizaci pátevní sítě. To je srovnatelné se stovkami miliard investic do výroby ekologického vodíku, které předpokládá vodíková strategie EU již pro období do roku 2030. Pátevní síť o délce 22 900 km bude tvořena ze 75 % modernizovanými potrubími o průměru 60-120 cm a poskytne přepravní kapacitu 3-13 GW (LHV) na jedno potrubí. Ve střednědobém

horizontu bude 60 % celkových investičních nákladů věnováno na práce na potrubí a zbývajících 40 % bude vynaloženo na kompresní zařízení.

Ačkoli 75 % celkové sítě, tj. téměř 18 000 km, bude tvořit dodatečně vybavená infrastruktura, představuje to pouze přibližně 50 % celkových investic, což ukazuje hodnotu využití stávajících potrubí (European Hydrogen Backbone Report, 2020, s. 11).



Obrázek č. 6: The European Hydrogen Backbone 2030.

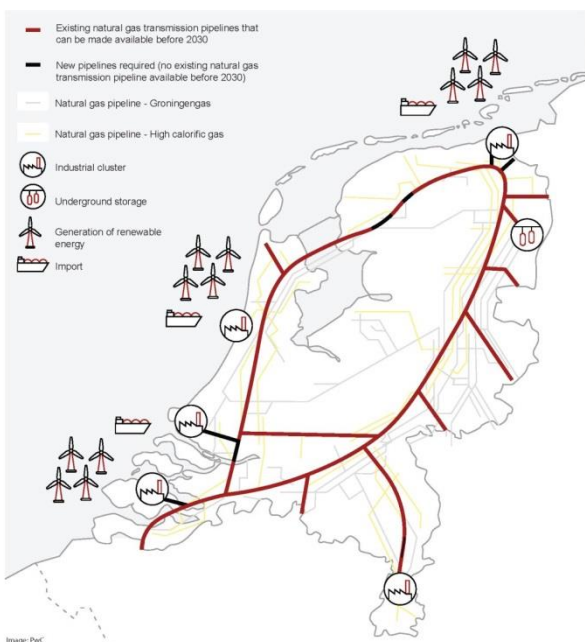


Obrázek č. 7: The European Hydrogen Backbone 2040.

2.6.2 PŘÍKLAD REALIZACE NÁRODNÍ VODÍKOVÉ SÍTĚ

HyWay 27: Realisation of a national hydrogen network

The Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, together with Gasunie and TenneT carried out the HyWay 27 study. The study concluded that the current natural gas transmission network provides a cost-efficient basis for safe hydrogen transmission. The national hydrogen infrastructure, including connections to storage facilities, is needed to realise the Netherlands' hydrogen ambitions by 2030. This report makes the following recommendations.



- 1. Take a decision in principle**
Zero-carbon hydrogen requires new transmission supply chains, both in 2030 and in the intervening years as well. In order to achieve this in good time, a decision in principle must be taken in the short term to repurpose a part of the existing natural gas transmission networks for the transmission of hydrogen. Existing pipelines will be ready sooner for the transmission of hydrogen and repurposing them is cheaper than building new pipelines.
- 2. Draw up a rollout plan**
Where will the transmission network be located and what actions have to be taken? Draw up a rollout plan containing the envisioned contours of the transmission network in 2030. Describe the actions that will be needed in the coming years. Striking the right balance is key. On the one hand, the rollout plan must provide potential hydrogen consumers with clarity on when the infrastructure will be available and, on the other hand, a step-by-step rollout must ensure that there is room to adapt to developments as these emerge.
- 3. Determine how the market will be regulated**
The further the hydrogen market grows, the more the infrastructure developed will need to be regulated. Who is to be allowed to operate in the market and under what conditions? Only with clarity on how to regulate the hydrogen market can it be decided in the short term who is to be responsible for repurposing the natural gas networks and ultimately for the operation of the newly created hydrogen transmission network.
- 4. Draw up a plan to kick-start the supply chain**
Investing in a hydrogen transmission network is not a sound decision if there is too little supply and demand. That is why government intervention and clarity on financial resources is necessary if we are to develop the supply chain and, this way, achieve the ambitions for 2030. Furthermore, it must be determined how the public money can best be distributed among the different parts of the chain.

Picture no. 8: HyWay 27 infografika.

Kapalné organické nosiče vodíku (LOHC) jsou organické sloučeniny, které mohou absorbovat a uvolňovat vodík chemickou reakcí. LOHC lze proto použít jako médium pro přepravu vodíku. V podstatě každá nenasycená sloučenina (organické molekuly s dvojnými nebo trojnými vazbami) může při hydrogenaci vázat vodík.

LOHC jsou materiály, které mohou uchovávat vodík v kapalné formě, což potenciálně usnadňuje jeho přepravu a použití jako paliva. Když se vodík rozpustí v LOHC, stane se stabilním a relativně bezpečným materiálem pro skladování. Vodík lze z LOHC uvolnit zahřátím nebo malým tlakem.

Bylo vyvinuto několik různých typů LOHC, včetně LOHC na bázi pyridinu, LOHC na bázi aminů a LOHC na bázi alkoholu. Tyto materiály mají různé vlastnosti a mohou být více či méně vhodné pro různé aplikace.

Jednou z výhod LOHC je, že mohou uchovávat vodík s relativně vysokou hustotou, což umožňuje přepravovat velké množství vodíku v malém objemu. To by je mohlo učinit užitečnými pro aplikace, jako jsou vozidla s palivovými články, kde je potřeba vodík skladovat na palubě vozidla.

LOHC jsou stále aktivní v oblastí výzkumu a před jejich širokým využitím je třeba vyřešit mnoho problémů. Například je potřeba dále pracovat na zlepšení účinnosti procesu skladování a uvolňování a na nalezení materiálů, které jsou dlouhodobě stabilní a bezpečné.

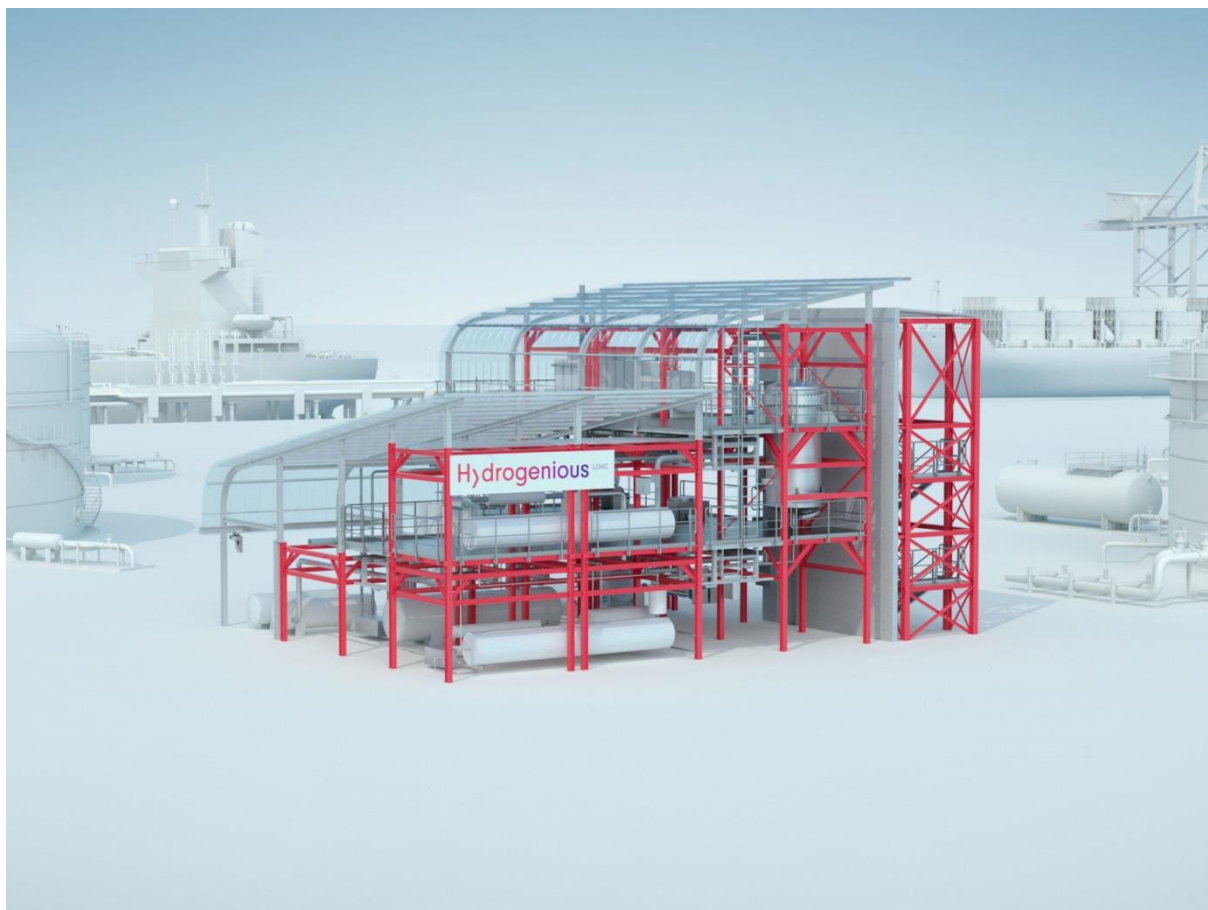
V roce 2020 Japonsko vybudovalo první mezinárodní řetězec dodavatelů vodíku na světě mezi Brunejí a městem Kawasaki. Využívá technologie LOHC na bázi toluenu. Hyundai Motor investuje do vývoje stacionárních a palubních systémů LOHC.

Hydrogenious LOHC Technologie

Hydrogenious LOHC Technologies je německá společnost, která se specializuje na vývoj technologie kapalných organických nosičů vodíku (LOHC) pro skladování a přepravu vodíku. LOHC technologie společnosti využívá speciální třídu organických sloučenin zvaných cykloalkany k uchovávání vodíku v kapalně formě při okolních teplotách a tlacích. Takto uložený vodík lze snadno přepravovat a používat jako zdroj paliva pro vozidla nebo v průmyslových procesech. Tato technologie má potenciál výrazně zvýšit účinnost a proveditelnost využití vodíkových paliv.



Obrázek č. 9: Stacionární infrastruktura LOHC – StoragePLANTS od Hydrogenious.



Obrázek č. 10: Stacionární infrastruktura LOHC – ReleasePLANTS od Hydrogenious.

Shrnutí

Vodík lze přepravovat v plynné nebo kapalné formě.

Plynný vodík: Plynný vodík lze přepravovat v tlakových nádržích. Tyto nádrže jsou navrženy pro skladování vodíku při vysokých tlacích a nízkých teplotách, aby se minimalizoval objem plynu.

Kapalný vodík: Kapalný vodík lze přepravovat v kryogenních nádržích. Tyto nádrže jsou určeny ke skladování vodíku při teplotách nižších než -253 °C a při vysokém tlaku, který udržuje vodík v kapalném stavu.

Dodávkou vodíku se rozumí přeprava a distribuce vodíku z místa výroby nebo skladování do místa použití nebo prodeje. Existuje několik způsobů dodávek vodíku, včetně dodávek potrubím, cisternami, po železnici a výroby na místě.

Plynovody: Vodík lze přepravovat plynovody stejně jako zemní plyn, ale infrastruktura pro vodíkové plynovody je v současné době omezená.

Cisterny: Vodík lze přepravovat cisternami, a to buď v plynné, nebo kapalné formě. Pokud je vodík přepravován v kapalné formě, musí být udržován při teplotě -253 °C a vysokém tlaku, aby zůstal kapalný. To vyžaduje specializované cisternové vozy a manipulační zařízení.

Železnice: Vodík lze přepravovat také po železnici, a to buď v plynné, nebo kapalné formě. Železniční doprava se však pro vodík běžně nepoužívá kvůli vysokým nákladům na specializované železniční vozy a manipulační zařízení.

Výroba v místě použití: V některých případech lze vodík vyrábět přímo na místě použití pomocí zemního plynu, elektrolýzy vody nebo jiných metod. Tato možnost může být výhodná pro uživatele, kteří potřebují pravidelně malé množství vodíku a nacházejí se v blízkosti dodávek zemního plynu.

Bez ohledu na způsob dodávky je třeba s vodíkem zacházet opatrně, protože je vysoce hořlavý a při nesprávném zacházení může být nebezpečný.

Metoda	Výhody	Nevýhody
Přeprava stlačeného vodíku v kontejnerech po silnici nebo železnici	Není potřeba budovat zvláštní infrastrukturu (potrubí)	Nádrže s vysokou hmotností a objemem
	Přepavní kapacitu lze dobře škálovat podle požadavků	Potrubí funguje také jako akumulační nádrž na vodík
		Malá hmotnostní přepravní kapacita
Přeprava zkapalněného vodíku v kontejnerech po silnici, železnici nebo lodí	Není třeba budovat infrastrukturu (potrubí)	Velké ztráty při zkapalňování
	Možnost přepravy větších objemů	Malá hmotnostní přepravní kapacita
Přeprava vodíku potrubím se směsí zemního plynu	Stávající infrastruktura zemního plynu	Omezený poměr příměsí na určité procento
	Nepřetržitost dodávek	Maximální koncentrace vodíku je dána kompatibilitou připojených koncových zařízení (např. CNG, kotle atd.)
	Nižší náklady ve srovnání s přepravou po silnici/železnici Kapacita skladování zeminy	
Separace vodíku ze směsi zemního plynu pomocí membránové separace	Využití stávající sítě plynovodů	Zpětná separace vodíku není 100%
	Relativně levná technologie	Lze použít pouze na úsecích bez větvení
	Škálovatelná technologie	Nová technologie
Přeprava čistého vodíku stávajícím plynovodem upraveným na čistý vodík	Prostředky pro dovoz velkých objemů vodíku	Nízká úroveň zkušeností s přepravou čistého vodíku potrubím v regionu střední Evropy
	Pružné vyvažování podle okamžitých potřeb země	
	Aktivní provozovatel přepravní soustavy v rámci nejnovějších přístupů k dekarbonizaci odvětví zemního plynu v EU	
	Zkušenosti s provozem vodíkových zařízení v Evropě, např. v regionu Beneluxu	
Přeprava čistého vodíku nově vybudovaným plynovodem	Prostředky pro dovoz velkých objemů vodíku	Vysoké investiční náklady na výstavbu ve srovnání s využitím stávající infrastruktury
	Pružné vyvažování podle okamžité potřeby země	Problémy se zajištěním práv k pozemkům, EIA, ochranou přírody a krajiny
	Zkušenosti s provozem vodíkových potrubí v Evropě, např. v regionu Beneluxu	
	Dovoz "levného" vodíku z regionů s výrazně nižšími výrobními náklady	
Kapalné organické nosiče vodíku (LOHC)	Přeprava při běžné teplotě a tlaku	Skladování a využití vodíku je nákladné
	Snadná manipulace s kapalinou	
	Vysoký obsah vodíku jak z hlediska hmotnosti, tak objemu	Nová technologie
	Velká flexibilita, pokud jde o přepravované množství a přepravovanou vzdálenost	

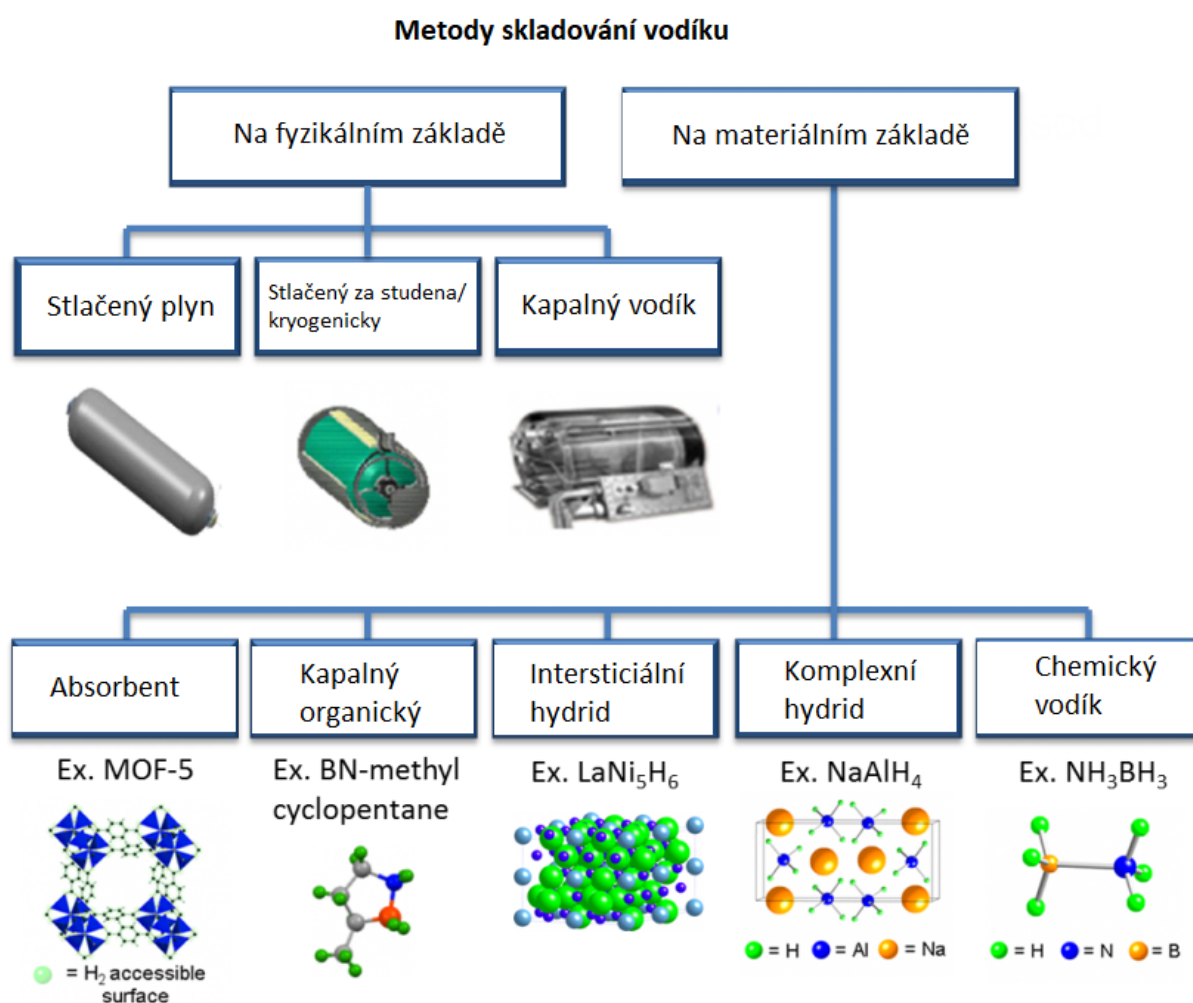
Tabulka č. 1: Srovnání metod přepravy vodíku.

Kontrolní otázky

1. Jaké známe základní metody přepravy vodíku?
2. Jaký je obvyklý tlak v zásobnících při přepravě stlačeného vodíku?
3. Jaká je teplota kapalného vodíku?
4. Jaká je obvyklá koncentrace vodíku při přepravě v plynovodech?
5. Co je to membránová separace?
6. Co víte o projektu The European Hydrogen Backbone?
7. Vysvětlete, co znamená zkratka LOHC.

Úvod

Vodík lze skladovat různými způsoby, například jako plyn, kapalinu nebo v pevné formě. Každý způsob má své výhody a nevýhody a nejvhodnější metoda pro konkrétní aplikaci závisí na konkrétních požadavcích a omezeních dané aplikace.



Obrázek č. 11: Metody skladování vodíku.

Jedním ze způsobů skladování vodíku je skladování v plynné formě, které lze provést stlačením vodíku v nádrži nebo lahvi. Jedná se o jednoduchou a relativně levnou metodu, ale

hustota skladování je poměrně nízká, takže pro uskladnění významného množství vodíku je zapotřebí velký objem. Kromě toho mohou být vysokotlaké nádrže těžké a mohou vyžadovat zvláštní manipulaci a bezpečnostní opatření.

Dalším způsobem skladování vodíku je skladování v kapalném stavu, kterého lze dosáhnout jeho ochlazením na teplotu nižší, než je bod varu. Kapalný vodík má velmi vysokou skladovací hustotu, takže je možné skladovat velké množství v relativně malém objemu. Kryogenní teplota kapalného vodíku (-253 °C) však vyžaduje použití specializované izolace a systémů tepelného řízení, které mohou být nákladné.

Vodík lze skladovat také v pevné formě, a to jeho adsorpcí na povrch porézního materiálu. Výhodou této metody je, že je relativně jednoduchá a bezpečná a lze při ní dosáhnout vysoké hustoty skladování. Rychlost adsorpce a desorpce vodíku ze skladovacího materiálu však může být pomalá, což může omezit praktickou využitelnost této metody v některých aplikacích.

Existují i další metody skladování vodíku, jako je chemické skladování a skladování v hydridech kovů. Tyto metody zahrnují použití chemických sloučenin nebo kovů, které mohou reverzibilně reagovat s vodíkem za vzniku stabilních sloučenin, které pak mohou být skladovány, dokud nejsou potřeba. Tyto metody mohou dosáhnout vysoké hustoty skladování a jsou relativně bezpečné, ale mohou být omezeny rychlostí, jakou lze vodík absorbovat a uvolňovat, a také cenou a dostupností skladovacích materiálů.

Klíčová slova

Stlačený vodík, tlaková nádrž, kapalný vodík, kryogenní skladovací nádrže, podzemní zásobníky, plynové konstrukce, hydridy vodíku, hydridy kovů

3.1 SKLADOVÁNÍ STLAČENÉHO VODÍKU

Vzhledem k nízké hustotě vodíku je nutné jej skladovat stlačený v tlakových nádržích. Ty musí být odolné proti tlaku, vnějším vlivům a správně utěsněné, aby nedocházelo k úniku. Vodík je plyn s nejmenší molekulou, a proto je pro jeho skladování nutné použít speciální materiály. Když se vodík dostane do kontaktu s ocelí nebo hliníkem, dochází k tzv. vodíkové křehkosti, která může zhoršit životnost tlakových lahví, což opět vyžaduje použití některých speciálních materiálů. Samotné stlačování vodíku je energeticky náročné. Vodík je velmi špatně stlačitelný plyn. Má obrácený Jouleův-Thomsonův koeficient, proto je na jeho stlačení potřeba mnohem více energie než u jiných plynů. Pro stacionární skladování vodíku se používají velkoobjemové ocelové nebo kompozitní tlakové nádrže (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 81).

Jouleův-Thomsonův jev, známý také jako Jouleův-Kelvinův jev, je změna teploty plynu nebo kapaliny při jejich rozpínání nebo protlačování malým otvorem či porézním materiálem. Tento jev je pojmenován podle Jamese Joulea a Williama Thomsona (lorda Kelvina).

Jak se plyn rozpíná, jeho teplota klesá. Je to proto, že expanze plynu působí na okolí práci, která vyžaduje energii. Energie potřebná pro tuto práci je odebírána z vnitřní energie plynu, což způsobuje pokles jeho teploty.

Jouleův-Thomsonův koeficient je mírou změny teploty plynu nebo kapaliny při jejich rozpínání. U většiny plynů je tento koeficient kladný, což znamená, že teplota plynu při jeho rozpínání klesá. U kapalin může být Jouleův-Thomsonův koeficient kladný nebo záporný v závislosti na konkrétních vlastnostech kapaliny.

Jouleův-Thomsonův jev má praktické využití v chladicí a klimatizační technice a také v ropném a plynárenském průmyslu, kde se používá k měření teploty a tlaku zemního plynu v různých fázích výrobního procesu.

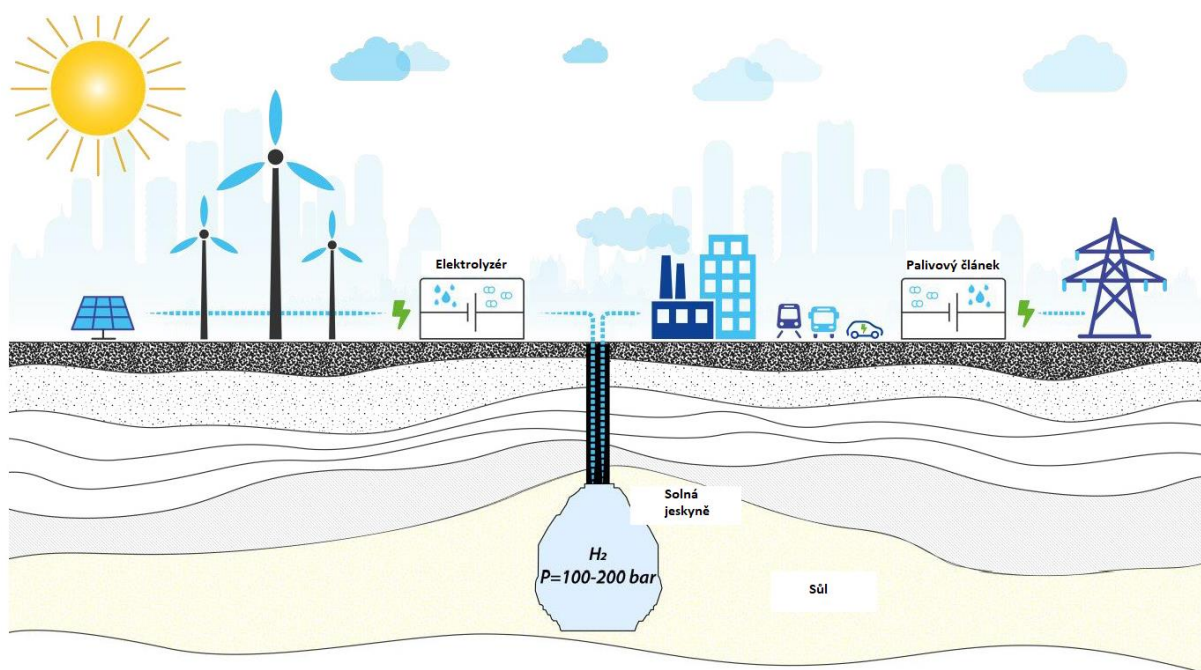
Pro stacionární použití se obvykle používají ocelové nesvařované lahve z nízkouhlíkové nebo legované oceli. Vyrábějí se v objemech od několika litrů do přibližně 50 l pro běžné použití. Pro mobilní aplikace se obvykle používají některé kompozitní tlakové nádoby. Vyrábějí se v

objemech od několika desítek litrů do přibližně 300 l. Běžný provozní tlak je 350 barů, v nejnovějších aplikacích 450 až 700 barů. V mnoha aplikacích je válcový tvar mírně deformován v závislosti na potřebách instalace do úložného prostoru vozidla. Pokud chce někdo skladovat vodík ve vysokotlakých nádržích, musí jej nejprve stlačit na požadovaný tlak. Ke stlačování vodíku se používají především pístové kompresory. Energie potřebná ke stlačení vodíku při tlaku 350 barů dosahuje přibližně 30 % energie paliva (Krátký, 2012, s. 37).



Obrázek č. 12: Tlakové nádrže na vodík.

Další možností skladování vodíku v plynné formě je jeho uložení v podzemních úložištích. Obvykle se jedná o některé vytěžené solné doly nebo jeskyně zemního plynu a prázdná plynová pole. Ve světě se tato metoda používá na několika místech, například v Amarillu v Texasu (850 mil. m³), ve francouzském Beynes (330 mil. m³), v anglickém Billingtonu (2,2 mil. m³). Další úložiště lze nalézt například v Německu a Holandsku (Krček, 2010, s. 20).



Obrázek č. 13: Skladování vodíku v solné jeskyni.

3.2 SKLADOVÁNÍ KAPALNÉHO VODÍKU

Při návrhu systému pro skladování kapalného vodíku je třeba zvážit několik klíčových faktorů.

Jedním z důležitých faktorů je materiál skladovací nádrže. Nádrž musí být schopna odolat extrémně nízkým teplotám kapalného vodíku ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tlaku, který vzniká uvnitř nádrže při rozpínání a smršťování plynného vodíku. Běžně používané materiály jsou nerezová ocel a hliník, ale musí být speciálně upraveny, aby byly odolné proti korozi a praskání při nízkých teplotách. Nádrž musí být také konstruována tak, aby se do ní nedostalo teplo, které může způsobit odpařování vodíku a zvýšení tlaku uvnitř nádrže. Toho se obvykle dosahuje použitím izolace, například pěnových nebo vakuově izolovaných panelů.

Dalším důležitým faktorem je velikost skladovací nádrže. Nádrž musí být dostatečně velká, aby pojmul dostatečné množství vodíku pro potřeby dané aplikace, ale zároveň musí být dostatečně malá, aby byla praktická pro zamýšlené použití. Například příliš velká nádrž může být příliš těžká nebo zabírat příliš mnoho místa, zatímco příliš malá nádrž nemusí být schopna pojmout dostatečné množství vodíku, aby byla praktická.

V neposlední řadě je důležité zvážit bezpečnost skladovacího systému. Kapalný vodík je hořlavý plyn, proto je důležité zajistit, aby byl skladovací systém navržen tak, aby nedocházelo k únikům a aby byl vybaven bezpečnostními prvky, jako jsou přetlakové ventily a systémy nouzového vypnutí.

Pro skladování se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů. Tyto nádoby musí být vybaveny přetlakovým mechanismem, který reguluje maximální bezpečný přetlak. Během skladování vodíku v kryogenních nádržích dochází k postupnému odpařování způsobenému přenosem tepla z okolí a tlak uvnitř nádoby roste. Aby nedošlo ke zničení nádrže, musí být nadměrný tlak regulován uvolněním odpařeného vodíku. U běžně používaných nádrží mohou ztráty dosáhnout až 3 % obsahu za den (v závislosti na kvalitě nádrže). V některých aplikacích se odpadní vodík uchovává a tlakuje v dalších tlakových lahvích. Zkapalňování je technologicky a energeticky náročný proces (Krátký, 2012, s. 38).

Minimální teoretická energie pro zkapalnění vodíku z okolních podmínek (300 K, 1,01 bar) je 3,3 kWh/kg LH₂ nebo 3,9 kWh/kg LH₂ s konverzí na para-LH₂ (což je standardní postup). Skutečné energetické požadavky na zkapalňování jsou podstatně vyšší, obvykle 10-13 kWh/kg LH₂, v závislosti na velikosti zkapalňovací operace. Nové metody zkapalňování, jako je aktivní magnetický regenerativní zkapalňovač, mohou vyžadovat pouze 7 kWh/kg LH₂. Pro srovnání, nižší výhřevnost (LHV) vodíku je 33,3 kWh/kg H₂. Energetické požadavky na kompresi při výrobě na místě se pohybují přibližně v rozmezí 5-20 % LHV. Zkapalňování (včetně přeměny na para-LH₂) při dnešních procesech vyžaduje 30-40 % LHV, zatímco teoretické energetické požadavky na 700 barů a skladování LH₂ se pohybují v rozmezí pouze 4-10 % LHV (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009, s. 1).



Obrázek č. 14: Nádrž na kapalný vodík.

3.3 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V PODZEMNÍCH ZÁSOBNÍCÍCH VE SMĚSI S METANEM NEBO ČPAVKEM

Vodík lze skladovat v podzemních zásobnících ve směsi s metanem nebo čpavkem, což je proces známý jako "vstřikování plynného vodíku". Tato metoda se používá ke skladování přebytečného vodíku vyrobeného v době nízké poptávky, aby mohl být v případě potřeby obnoven a použit jako palivo nebo surovina. Tento přístup má několik výhod:

- **Bezpečnost:** Vstřikování vodíku umožňuje skladovat vodík pod zemí v kontrolovaném prostředí, což snižuje riziko úniku a nehod.
- **Efektivita:** Vodík lze skladovat s vysokou hustotou ve směsi s metanem nebo čpavkem, což umožňuje skladovat více vodíku v menším objemu.
- **Udržitelnost:** Vstřikování plynného vodíku může přispět ke snížení emisí skleníkových plynů tím, že přebytečný vodík může být skladován a použit jako palivo, místo aby byl vypouštěn do atmosféry.

- Zavedení vstřikování plynného vodíku představuje několik problémů, včetně potřeby vyvinout vhodné skladovací zásobníky a nákladů na výstavbu a provoz skladovacích zařízení. Tento přístup má však potenciál hrát významnou roli v budoucím skladování a distribuci vodíku.

Vstřikování plynného vodíku zahrnuje skladování přebytečného vodíku v podzemních zásobnících ve směsi s metanem nebo čpavkem, což je proces, který může pomoci snížit emise skleníkových plynů a zvýšit účinnost skladování vodíku. Zde je podrobnější vysvětlení, jak tento proces funguje:

- Vodík se vyrábí různými metodami, včetně elektrolýzy, parního reformingu metanu a zplyňování biomasy. V době nízké poptávky se vyrábí přebytečný vodík, který se musí skladovat, dokud není potřeba.
- Vodík se vstřikuje do podzemních zásobníků, kde se mísí s metanem nebo čpavkem. Metan nebo čpavek pomáhá zvyšovat hustotu směsi, což umožňuje skladovat více vodíku v menším objemu.
- Směs vodíku a metanu se skladuje pod zemí, obvykle v hloubce několika set metrů. Skladovací kontejnery jsou navrženy tak, aby vydržely tlakové a teplotní podmínky v této hloubce.
- Když je vodík potřeba, je ze zásobníků odebrán a oddělen od metanu nebo čpavku. Toho lze dosáhnout různými metodami, včetně adsorpce při kolísání tlaku a kryogenní destilace.
- Vyčištěný vodík lze poté použít jako palivo nebo surovinu v různých aplikacích, včetně dopravy, výroby energie a průmyslových procesů.

3.4 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V HYDRIDECH

Vodík lze skladovat v hydridech, což jsou materiály, které mohou absorbovat a uvolňovat plynný vodík. Existuje několik typů hydridů, včetně hydridů kovových, kovalentních a iontových.

Kovové hydridy vznikají reakcí plynného vodíku s kovem za vzniku pevné sloučeniny. Tyto sloučeniny mají vysokou kapacitu pro skladování vodíku, ale bývají těžké a objemné a k uvolnění vodíku vyžadují vysoký tlak.

Kovalentní hydridy vznikají, když se atomy vodíku kovalentně vážou s jinými atomy za vzniku sloučeniny. Tyto sloučeniny mají střední kapacitu pro skladování vodíku a lze je uvolňovat při nižších tlacích než kovové hydridy.

Iontové hydridy vznikají, když se ionty vodíku vážou s jinými ionty za vzniku sloučeniny. Tyto sloučeniny mají vysokou kapacitu pro skladování vodíku, ale obecně nejsou tak stabilní jako kovové nebo kovalentní hydridy a mají tendenci se rozkládat při vysokých teplotách.

Využití hydridů pro skladování vodíku naráží na několik problémů, včetně nákladů a obtížnosti výroby a manipulace s hydridy, jakož i nízké účinnosti procesu uvolňování vodíku. Výzkumníci pracují na vývoji nových materiálů a metod, které by tyto problémy překonaly a učinily skladování vodíku v hydridech praktičtější a nákladově efektivnější.

Při běžné teplotě jsou hydridy stabilní, nerozpouštějí se a jsou relativně bezpečnými zásobníky vodíku. K jejich rozpadu dochází při vysokých teplotách, při tomto procesu se uvolňuje vodík, který je přiváděn do palivového článku.

Sledovanými parametry u těchto systémů jsou především teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní kapacita absorbéru (v případě celého systému), objemová kapacita absorbéru a v neposlední řadě cena a složitost systému.

Jedním z požadavků je, aby rozklad probíhal při teplotách o něco vyšších (150–200 °C) a nespotřeboval nadměrné množství energie ohřevem hydridu.

Byly navrženy účinné systémy schopné absorbovat velké množství vodíku. U různých typů hydridů existují různá množství vodíku, která mohou materiály absorbovat. Některé hydridy jsou při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku snadno zpracovatelné kapaliny, jiné jsou ve formě pevných látek.

Tyto materiály mají dobrou objemovou energetickou hustotu, ale vzhledem k jejich hmotnosti není jejich energetická hustota ideální. Nicméně například u některých sloučenin s lehkými kovy, jako je hořčík, je celková hmotnost systému ve srovnání se systémy pro skladování zkapalněného vodíku vyšší pouze o 30 %. Tyto nepříznivé parametry jsou kompenzovány větší potřebou vysoké teploty termické desorpce, nízkým tlakem vyráběného vodíku a v neposlední řadě vysokou cenou hydridů.

Další důležitou vlastností je reverzibilita neboli schopnost materiálu znovu absorbovat nový vodík po spotřebování uskladněného vodíku. To souvisí s "dobíjením" hydridů a jejich opakovaným používáním podobně jako u baterií (Krátký, 2012, s. 41).

3.4.1 HYDRIDY KOVŮ

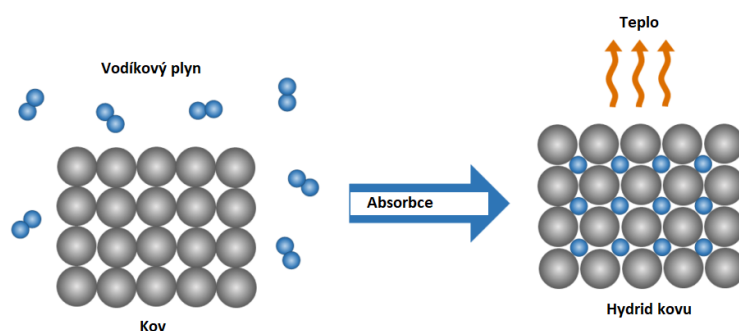
Vodík lze uchovávat v hydridech kovů, což jsou sloučeniny tvořené vodíkem a kovem. Vodík je uložen v mřížce kovu a může být uvolněn procesem zvaným desorpce, který zahrnuje zahřátí hydridu kovu na vysokou teplotu. Existuje několik typů hydridů kovů, které lze použít pro skladování vodíku, včetně intermetalických sloučenin, komplexních hydridů kovů a jednoduchých hydridů kovů.

Intermetalické sloučeniny vznikají mezi dvěma nebo více kovy a mohou ve své mřížce uchovávat velké množství vodíku. Jsou obecně stabilní a lze je použít k dlouhodobému skladování vodíku. K uvolnění vodíku však často vyžadují vysoké tlaky nebo vysoké teploty, což může být v praktických aplikacích náročné.

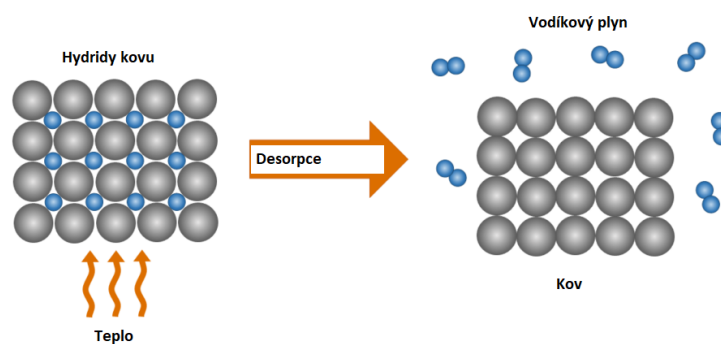
Komplexní hydridy kovů vznikají mezi kovem a nekovem a mohou ve své mřížce uchovávat střední množství vodíku. Mají tendenci uvolňovat vodík při nižších teplotách než intermetalické sloučeniny, ale nejsou tak stabilní a mohou se časem rozkládat.

Jednoduché hydridy kovů, jako je hydrid hořečnatý, mohou ve své mřížce uchovávat malé množství vodíku a uvolňovat ho při nízkých teplotách. Nejsou však tak stabilní jako intermetalické sloučeniny a mají tendenci se časem rozkládat.

Celkově jsou hydridy kovů slibnou možností pro skladování vodíku díky své vysoké kapacitě skladování vodíku a schopnosti uvolňovat vodík při relativně nízkých teplotách. Je však zapotřebí dalšího výzkumu, který by zlepšil jejich stabilitu a snížil náklady na jejich výrobu.



Obrázek č. 15: Exotermická reakce absorpce vodíku.



Obrázek č. 16: Desorpční reakce vodíku z hydridu kovu.

3.5 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V ZÁSOBNÍCÍCH NA BÁZI UHLÍKU

Uhlíkové materiály, jako je grafen a uhlíkové nanotrubičky, byly zkoumány jako prostředek pro skladování vodíku. Tyto materiály mají velký povrch a mohou fyzikálně absorbovat plynný vodík, což jim umožňuje uchovávat velké množství vodíku v malém objemu. Kapacita těchto materiálů pro skladování vodíku je však omezena jejich povrchem a velikostí pórů, a proto mohou skladovat pouze malé množství vodíku najednou. Kromě toho může být proces absorpce a uvolňování vodíku z těchto materiálů pomalý, což je činí méně praktickými pro použití v aplikacích skladování vodíku.

Existuje několik různých způsobů skladování vodíku v uhlíkových materiálech, včetně fyzikální adsorpce, chemické adsorpce a chemické reakce.

Fyzikální adsorpce nastává, když jsou molekuly vodíku přitahovány k povrchu uhlíkového materiálu v důsledku van der Waalsových sil. Tento typ skladování vodíku je vratný, což znamená, že vodík lze z materiálu snadno uvolnit snížením tlaku nebo zvýšením teploty. Fyzikální adsorpce může být použita ke skladování vodíku při vysokých tlacích (až do přibližně 35 MPa) a při pokojové teplotě, ale skladovací kapacita je omezena plochou povrchu materiálu.

Van der Waalsovy síly jsou slabé přitažlivé síly, které vznikají mezi neutrálními atomy a molekulami. Jsou typem nekovalentní interakce a jsou způsobeny dočasnými fluktuacemi elektronové hustoty. Tři typy van der Waalsových sil jsou londýnské disperzní síly, dipólově-dipólové interakce a kvadrupólově-kvadrupólové interakce. Tyto síly jsou zodpovědné za chování plynů a kapalin a hrají také roli při stabilitě biomolekul a tvorbě krystalů.

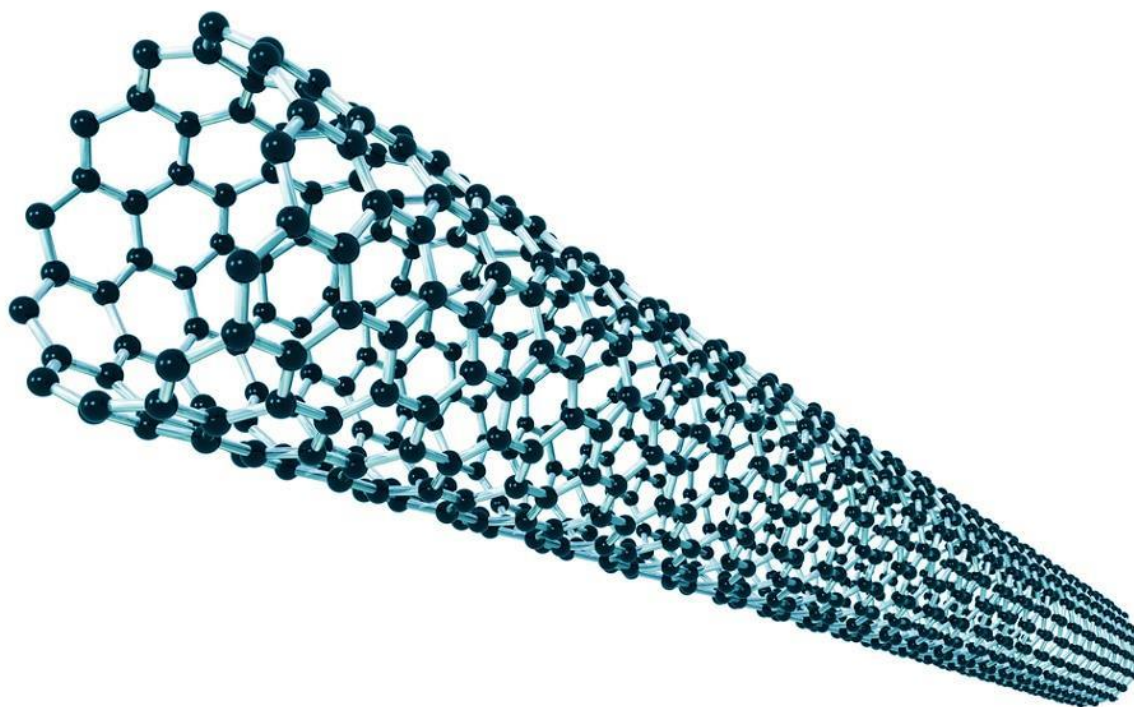
Chemická adsorpce zahrnuje vytvoření chemické vazby mezi vodíkem a uhlíkatým materiálem. Tento typ skladování vodíku je rovněž vratný, ale vazba je silnější, než van der Waalsovy síly při fyzikální adsorpci, takže k uvolnění vodíku je zapotřebí více energie. Chemickou adsorpci lze použít ke skladování vodíku při nižších tlacích (pod 10 MPa) a při nižších teplotách.

Chemická reakce zahrnuje vznik nové sloučeniny reakcí vodíku s uhlíkatým materiálem. Tento typ skladování vodíku není vratný a vodík nelze z materiálu snadno uvolnit. Chemickou reakci však lze využít k uskladnění velkého množství vodíku v malém objemu.

Celkově mají uhlíkové materiály pro skladování vodíku několik atraktivních vlastností, včetně velkého povrchu, vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Skladovací kapacita těchto materiálů je však omezená a proces absorpce a uvolňování vodíku může být pomalý, což je činí méně praktickými pro použití v mnoha aplikacích skladování vodíku.

Mezi uhlíkové nanostruktury patří vysoce porézní grafit a uhlíkové nanotrubičky. V poslední době se pozornost zaměřuje na studium jednostěnných nanotubic, které mají velký potenciál pro skladování vodíku. Na této problematice pracuje mnoho výzkumných týmů po celém světě.

Základním stavebním prvkem nanotrubiček je grafit. Nanotrubičky jsou tvořeny jednou nebo několika vrstvami svinutými do trubičky konečné délky. Průměr trubiček je 0,7 až 3 nm. (Krčec, 2010, s. 22).



Obrázek č. 17: Uhlíkové nanotrubičky.

Shrnutí

Skladováním stlačeného vodíku se rozumí skladování plynného vodíku pod vysokým tlakem, aby se zmenšil jeho objem. Toho lze dosáhnout různými způsoby, včetně použití vysokotlakých nádrží nebo lahví.

Skladování stlačeného vodíku spočívá v tom, že umožňuje skladovat relativně velké množství vodíku v relativně malém prostoru. To z něj činí atraktivní možnost pro použití ve vozidlech a dalších aplikacích, kde je potřeba málo místa. Je však důležité si uvědomit, že vysoké tlaky potřebné pro skladování stlačeného vodíku mohou představovat bezpečnostní rizika a nádrže a lahve používané ke skladování plynu musí být pečlivě navrženy a udržovány, aby se tato rizika minimalizovala.

Skladováním kapalného vodíku se rozumí skladování vodíku v kapalně formě, nikoliv v plynné nebo pevné. Pro skladování vodíku v kapalně formě je nutné jej ochladit na teplotu přibližně $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je výrazně pod bodem varu.

Skladování kapalného vodíku umožňuje skladovat velmi velké množství vodíku v relativně malém objemu. To z něj činí atraktivní možnost pro použití v různých aplikacích, včetně cestování do vesmíru, kde jsou hmotnost a objem rozhodujícími faktory.

Nízká teplota potřebná pro skladování kapalného vodíku ztěžuje manipulaci s ním a jeho přepravu a vyžaduje specializované vybavení a izolaci, aby se zabránilo přenosu tepla a odpařování. Nízká teplota kapalného vodíku navíc může způsobit, že je náchylný ke křehnutí některých materiálů, což může způsobit problémy s nádržemi a jinými skladovacími nádobami.

Vodík je možné skladovat v podzemních zásobnících ve směsi s metanem nebo čpavkem, což je proces známý jako "směšování vodíku". Tento přístup lze potenciálně využít ke skladování přebytečného vodíku, který se vyrábí z obnovitelných zdrojů energie, jako je větrná nebo solární energie, a následně jej smíchat se zemním plynem a použít jako palivo.

Směšování vodíku spočívá v tom, že umožňuje skladování a přepravu vodíku s využitím stávající infrastruktury, například plynovodů. To může být nákladově efektivnější a logisticky jednodušší než budování nové infrastruktury speciálně pro skladování a přepravu vodíku.

Jedním z hlavních problémů je, že vodík a metan nebo čpavek mají odlišné fyzikální a chemické vlastnosti, což může ztěžovat jejich bezpečné a účinné smíchání. Kromě toho je výroba vodíku dražší než výroba metanu, takže ekonomická výhodnost míchání vodíku nemusí být vždy příznivá.

Skladování vodíku v hydridech označuje použití materiálů, které mohou absorbovat a uvolňovat velké množství vodíku, známých jako "hydridy", jako způsob skladování vodíku. Existuje několik typů hydridů, které lze použít pro skladování vodíku, včetně hydridů kovů, chemických hydridů a komplexních hydridů.

Hlavní výhodou skladování vodíku v hydridech je, že umožňují skladovat vodík v relativně kompaktní a lehké formě. To z něj činí atraktivní možnost pro použití v různých aplikacích, jako jsou přenosná elektronická zařízení a vozidla s palivovými články.

Hydridy mají relativně nízkou kapacitu pro skladování vodíku, což znamená, že k uskladnění praktického množství vodíku je zapotřebí velký objem materiálu. Kromě toho je proces absorpce a uvolňování vodíku z hydridů často pomalý a vyžaduje použití tepla, což může být energeticky náročné a neefektivní.

Skladování vodíku v zásobnících na bázi uhlíku znamená použití materiálů vyrobených z uhlíku, jako jsou uhlíkové nanotrubičky nebo grafen, jako způsob skladování vodíku. Tyto materiály jsou známy svým velkým povrchem a silnými chemickými vazbami, díky nimž jsou schopny adsorbovat a uchovávat velké množství vodíku.

Jednou z hlavních výhod skladování vodíku v zásobnících na bázi uhlíku je, že mají vysokou kapacitu pro skladování vodíku, což znamená, že k uskladnění praktického množství vodíku je zapotřebí relativně malý objem materiálu. Kromě toho jsou materiály na bázi uhlíku relativně lehké a pevné, což je předurčuje k použití v různých aplikacích.

Metody	Výhody	Nevýhody
Skladování stlačeného vodíku	V porovnání s bateriemi stále výhodnější forma skladování energie po delší dobu	Ztráty (úniky)
	Dlouhodobé zkušenosti	Komprese vodíku je energeticky náročná Technologicky již není prakticky možné další zlepšení Omezení tras podle podmínek ADR
Skladování kapalného vodíku	Vyšší koncentrace energie než u stlačeného vodíku	Ztráty (úniky)
	Možnost manipulace při nízkém tlaku	Zkapalňování vodíku je energeticky náročné
Skladování vodíku v podzemních zásobnících ve směsi s metanem nebo čpavkem	Dobrý poměr obsahu energie k hmotnosti zásobníku	Kryogenní skladovací nádoby a přeprava jsou velmi nákladné
	Velkokapacitní skladování	Skladování většího podílu vodíku je třeba technicky ověřit a může se lišit nádrž od nádrže
	Existující skladovací infrastruktura	Ztráty (úniky) při skladování vyšších koncentrací vodíku ve směsi s metanem nebo čpavkem
	Připojení k plynové soustavě	
Skladování vodíku ve formě hydridů	Zkušenosti se skladováním vodíku jako složky svítiplynu	Nová technologie
	Přeprava při běžné teplotě a tlaku	
	Snadná manipulace s pevnými látkami	
	Vysoký obsah vodíku jak z hlediska hmotnosti, tak objemu	
Skladování vodíku v zásobnících na bázi uhlíku	Velká flexibilita z hlediska přepravovaného množství a přepravované vzdálenosti	Uhlíkové materiály nejsou pro vodík zcela nepropustné Časem degradují Dražší a technicky obtížnější výroba
	Velmi lehký materiál	
	Vysoký poměr pevnosti k hmotnosti	
	Chemicky a tepelně stabilní	

Tabulka č. 2: Srovnání metod skladování vodíku.

Kontrolní otázky

1. Vysvětlete Jouleův-Thomsonův jev.
2. Jaký je typický tlak ve vysokotlakých zásobnících vodíku?
3. Jakým mechanismem musí být vybaveny nádrže pro skladování kapalného vodíku?
4. Popište výhody skladování vodíku v podzemních zásobnících ve směsi s metanem nebo čpavkem.
5. Jaké typy hydridů jsou vhodné pro skladování vodíku.
6. Které uhlíkové materiály jsou vhodné pro skladování vodíku?

Úvod

Existuje několik způsobů skladování vodíku v závislosti na typu a požadovaných tlakových a teplotních podmínkách. Mezi běžné komponenty pro skladování vodíku patří:

- Stlačené vodíkové lahve: Jedná se o vysokotlaké nádoby vyrobené z oceli, hliníku nebo kompozitních materiálů. Používají se ke skladování vodíku, který je ve stlačeném kapalném nebo plynném stavu.
- Kryogenní nádrže: Tyto nádrže se používají ke skladování plynů v kryogenním (velmi nízkoteplotním) stavu, jako je kapalný vodík nebo kapalný kyslík.
- Vysokotlaké skladovací nádrže: Jedná se o velké nádrže, které se používají ke skladování plynů pod vysokým tlakem. Mohou být vyrobeny z oceli, hliníku nebo jiných materiálů a obvykle se používají ke skladování vodíku v plynném stavu.
- Skladování v potrubí: Vodík lze také skladovat v potrubí, které se používá k přepravě plynu z jednoho místa na druhé. Tato potrubí jsou obvykle uložena pod zemí a lze je použít k dlouhodobému skladování plynů.

Při skladování vodíku je důležité dodržovat správné bezpečnostní postupy a předpisy, aby se minimalizovalo riziko nehod nebo úniků.

Klíčová slova

Stlačené lahve, kryogenní nádrže, vysokotlaké skladovací nádrže, tlakové nádoby

4.1 TLAKOVÉ NÁDRŽE

Tlakové nádrže na vodík jsou zásobníky určené ke skladování plynného vodíku pod vysokým tlakem. Často jsou vyrobeny z kompozitních materiálů, jako jsou uhlíková vlákna nebo sklolaminát, které jsou lehké a dostatečně pevné, aby odolaly tlaku plynu uvnitř nádrže.

Plynný vodík se v tlakových nádržích skladuje proto, aby se zvýšilo množství plynu, které lze v daném objemu uskladnit. Při skladování vodíku pod vysokým tlakem se zvyšuje jeho energetická hustota, což umožňuje, aby zabíral mnohem méně místa. Díky tomu je možné skladovat velké množství vodíku v relativně malé nádrži, což z něj činí atraktivní možnost pro použití ve vozidlech s palivovými články a v dalších aplikacích, kde je omezený prostor.

Existuje několik typů tlakových nádrží na vodík, včetně těch, které jsou určeny k opětovnému plnění, a těch, které jsou určeny k likvidaci po vyprázdnění. Některé nádrže jsou také určeny k použití v kombinaci s jinými typy skladovacích systémů, jako jsou kryogenní nádrže, které se používají ke skladování vodíku v kapalném stavu při velmi nízkých teplotách.

Aby byla zajištěna bezpečnost plynu uvnitř nádrže, jsou tlakové nádrže na vodík vybaveny různými bezpečnostními prvky, jako jsou přetlakové ventily. Tyto prvky pomáhají zabránit roztržení nebo prasknutí nádrže v případě přetlaku.

Celkově jsou tlakové nádrže na vodík důležitou součástí infrastruktury potřebné pro skladování a přepravu plynného vodíku a hrají zásadní roli při vývoji a zavádění technologií vodíkových palivových článků.

Tlakové nádoby lze použít jak pro stacionární skladování, tak pro mobilní skladování vodíku. Pro stacionární aplikace se obvykle používají bezešvé ocelové lahve vyrobené z nízkouhlíkové nebo legované oceli. Vyrábějí se v širokém rozsahu objemů podle plánovaného použití.

U mobilních aplikací se obvykle používají kompozitní tlakové nádoby. Vyrábějí se v objemech od desítek litrů do zhruba 300 l. Typický provozní tlak je 350 barů, u nejnovějších aplikací 450 až 700 barů.

Zásobníky o délce 12 m a vnějším průměru přibližně 80 cm lze použít jako nádrže pro plnicí stanice vozidel na vodíkové palivo nebo jako nádrže pro přebytky energie z obnovitelných zdrojů (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111).

Za výhodu se považuje skutečnost, že se jedná o ověřenou technologii, která splňuje všechny zvyšující se požadavky na skladování vodíku. Je vhodná pro skladování malého množství při nepravidelných dodávkách. S rozvojem vodíkových technologií se podmínky pro skladování vodíku budou dramaticky zvyšovat. Otázkou zůstává, zda současný vývoj technologií nezpůsobí pokles potřeby skladování a přepravy vysokotlakého vodíku. Nevýhodou tlakových nádrží mohou být jejich bezpečnostní aspekty a technologické limity jako například tlak, materiál nebo objem tlakových lahví (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 111-112).



Obrázek č. 18: Kompozitní tlaková nádrž.

4.2 KRYOGENNÍ NÁDRŽE

Kryogenní nádrže jsou speciálně navržené skladovací nádoby, které se používají ke skladování materiálů při extrémně nízkých teplotách. Používají se ke skladování různých materiálů, včetně plynů, jako je vodík, kyslík a dusík a také biologických materiálů, jakou lidské buňky a tkáně.

Kryogenní nádrže jsou vyrobeny z materiálů, které jsou schopny odolávat těmto extrémně nízkým teplotám, jako je nerezová ocel nebo hliník. Jsou také silně izolované, aby udržely chlad uvnitř a teplo venku.

Existují dva hlavní typy kryogenních nádrží: stacionární nádrže a přenosné nádrže. Stacionární nádrže se používají ke skladování velkého množství materiálů a jsou obvykle instalovány na pevném místě, zatímco přenosné nádrže se používají ke skladování menšího množství a lze je přemísťovat z jednoho místa na druhé.

Kryogenní nádrže se používají v různých průmyslových odvětvích, včetně zdravotnictví, chemického průmyslu a energetiky. Jsou důležitým nástrojem pro skladování a přepravu materiálů při extrémně nízkých teplotách a hrají důležitou roli v mnoha vědeckých a technologických aplikacích.

Kryogenní nádrže lze použít ke skladování vodíku v kapalně formě při teplotě $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jedná se o jeden z nejefektivnějších způsobů skladování vodíku, protože umožňuje mnohem hustší skladování plynu.

Skladování vodíku v kryogenní nádrži však vyžaduje speciální vybavení a opatrné zacházení, protože extrémně nízká teplota může být nebezpečná. Nádrž musí být silně izolovaná, aby se vodík udržel v chladu a nedošlo k jeho zahřátí a vypaření. Nádrž musí být navíc vybavena bezpečnostními prvky, jako jsou přetlakové ventily, které zabrání roztržení nádrže v důsledku přetlaku.

Kryogenní nádrže se obvykle používají ke skladování velkého množství vodíku a obvykle se instalují na pevném místě. Běžně se používají v chemickém a energetickém průmyslu a také ve výzkumu a vývoji.

Celkově jsou kryogenní nádrže důležitým nástrojem pro skladování a přepravu vodíku, ale vzhledem k extrémní teplotě a tlaku vyžadují speciální zacházení a vybavení.



Obrázek č. 19: Kryogenní nádrže.

4.3 VYSOKOTLAKÉ SKLADOVACÍ NÁDRŽE

Vysokotlaké zásobníky jsou velké tlakové nádoby, které se používají ke skladování plynů pod vysokým tlakem. Mohou být vyrobeny z různých materiálů, včetně oceli, hliníku a plastů vyztužených vlákny, a jsou navrženy tak, aby byly pevné a zároveň lehké. Tyto nádrže se obvykle používají ke skladování plynů v plynném stavu, například vodíku.

Vysokotlaké skladovací nádrže se používají v různých aplikacích, včetně skladování paliva pro vodíková vozidla. Obvykle jsou navrženy a konstruovány tak, aby splňovaly bezpečnostní předpisy a normy a minimalizovaly riziko nehod nebo úniku skladovaného plynu.

Při manipulaci s vysokotlakými skladovacími nádržemi a jejich skladování je důležité dodržovat správné bezpečnostní postupy. To zahrnuje zajištění toho, aby byly nádrže skladovány na bezpečném místě mimo dosah zdrojů vznícení a aby se s nimi manipulovalo a přepravovalo se opatrně, aby nedošlo k jejich poškození. Kromě toho jsou důležité pravidelné kontroly a údržba, aby bylo zajištěno, že jsou v dobrém provozním stavu, a aby se zabránilo únikům nebo jiným problémům.

Ve vysokotlakých zásobnících lze skladovat velké množství vodíku v relativně malém prostoru. Velkou příležitostí pro vysokotlaké skladování je strategická oblast naprosto nezbytná pro další rozvoj vodíku a úspory vyplývající z rozsahu možného skladování vodíku. Při výstavbě vysokotlakých zásobníků je nutné počítat s vysokými počátečními investičními nároky. Výstavba se vyplatí pouze v místě výroby nebo spotřeby a je podmíněna stlačováním vodíku a energetickými ztrátami. Nelze opomenout ani bezpečnostní aspekty (Vodíková strategie České republiky, 2021, s. 115).

Shrnutí

Stlačené vodíkové lahve jsou vysokotlaké zásobníky používané k uskladnění plynného vodíku pod tlakem 350 až 700 barů. Tyto lahve jsou vyrobeny z vysoce pevných materiálů, jako je ocel nebo kompozitní materiály, a jsou navrženy tak, aby byly pevné a zároveň lehké. Běžně se používají jako palivové nádrže pro vodíková vozidla, jako chemická surovina a pro další průmyslové a komerční aplikace.

Kryogenní vodíkové nádrže jsou skladovací nádoby, které se používají ke skladování plynného vodíku při extrémně nízkých teplotách, obvykle v rozmezí -253 °C nebo nižších. Tyto nádrže jsou vyrobeny z materiálů, které odolávají extrémnímu chladu a tlaku skladovaného vodíku, jako je nerezová ocel nebo vysokopevnostní kompozity.

Vysokotlaké zásobníky vodíku jsou tlakové nádoby, které se používají ke skladování plynného vodíku při vysokých tlacích. Tyto nádrže jsou vyrobeny z vysoce pevných materiálů, jako je ocel nebo kompozitní materiály, a jsou navrženy tak, aby byly pevné a zároveň lehké.

Vysokotlaké nádrže na vodík mají oproti jiným typům skladování paliva několik výhod. Jsou relativně lehké, takže se dobře hodí pro použití ve vozidlech. Snadno se také plní a lze je používat v širokém rozsahu teplot. Vodík je však vysoce hořlavý plyn, proto je důležité při manipulaci s vysokotlakými zásobníky vodíku a jejich skladování dodržovat správné bezpečnostní postupy. To zahrnuje zajištění toho, aby byly nádrže skladovány na bezpečném místě mimo dosah zdrojů vznícení.

Kontrolní otázky

1. Jaké komponenty znáte pro skladování vodíku?
2. Jaký je rozdíl mezi tlakovou nádobou a kryogenní nádrží?
3. Kde se nejčastěji používá vysokotlaké úložiště pro skladování vodíku?

5 SEZNAM ZDROJŮ

- GUPTA B. Ram. *Hydrogen fuel, Production, Transport and Storage*. CRC Press, New York 2009. 611 str. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- *Vodíková strategie České republiky*. Česká republika: Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, 2021.
- ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice*. Česká republika: Česká energetická agentura, 2006.
- KRČEK, Martin a Lukáš RADIL. *Analýza využití vodíku v energetice: Analysis of usage hydrogen in power supply*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- BŘOUŠEK, L. *Vodík a automobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 51 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- KRÁTKÝ, Š. *Výroba a uskladnění vodíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.
- JUREČKA, R. *Možnosti využití vodíku v letectví*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 98 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
- GALÍK, Tomáš. *Posouzení dopadů využívání zemního plynu obohaceného vodíkem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132166>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.
- *European Hydrogen Backbone Report* [online]. 2020 [cit. 2022-9-8]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjOxautrtHvAhXGu6QKHWpnDMgQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.gasunie.nl%2Fen%2Fnews%2Fgas-infrastructure-companies-present-a-european-hydrogen->

backboneplan%2F%245741%2F%245742&usg=AOvVaw2HDAAt_6gG1ZBmw_EUMdh9S

- The Future of Gas Separation Through Membrane Technologies [foto]. *Monteco* [online]. 9.5.2017 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://monteco.com/the-future-of-gas-separation-through-membrane-technologies/>
- Stationary LOHC infrastructure [foto]. *Hydrogenious LOHC* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://hydrogenious.net/what/>
- SATYAPAL, Sunita. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record [foto]. *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs* [online]. 26.10.2009 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- Research institute on metal hydrides [foto]. *Hystorsys* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hystorsys.no/our-story/>
- Carbon Nanotubes for Energy Storage Applications [foto]. *AZONANO* [online]. 21.10.2016 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4298>
- Hydrogen Storage: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office [foto]. *ENERGY.GOV* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- Realisation of a national hydrogen network [foto]. *HyWay 27* [online]. 30.7.2021 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hyway27.nl/en/latest-news/hyway-27-realisation-of-a-national-hydrogen-network>
- *Lecture 3 Hydrogen storage: European Train the Trainer Programme for Responders* [online]. HyResponder, 2021 [cit. 2023-01-16].
- Liquid hydrogen seen as 'holy grail' for hydrogen uptake in mobility sector: Linde COO. *S&P Global Commodity Insights* [online]. 16.11.2021 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/111621-liquid-hydrogen-seen-as-holy-grail-for-hydrogen-uptake-in-mobility-sector-linde-coo>

6 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Tabulka č. 1: Srovnání metod přepravy vodíku

Tabulka č. 2: Srovnání metod skladování vodíku

Obrázek č. 1: Výstražná tabule

Obrázek č. 2: Přeprava vodíku v kontejnerech po silnici

Obrázek č. 3: Přeprava zkapalněného vodíku na kontejnerové lodi.

Obrázek č. 4: Membránová separace plynu

Obrázek č. 5: Přeprava vodíku prostřednictvím plynovodu.

Obrázek č. 6: The European Hydrogen Backbone 2030

Obrázek č. 7: The European Hydrogen Backbone 2040

Obrázek č. 8: Infografika HyWay 27

Obrázek č. 9: Stacionární infrastruktura LOHC - StoragePLANTS od Hydrogenious

Obrázek č. 10: Stacionární infrastruktura LOHC - ReleasePLANTS od Hydrogenious

Obrázek č. 11: Metody skladování vodíku

Obrázek č. 12: Tlakové nádrže na vodík

Obrázek č. 13: Skladování vodíku v solné jeskyni

Obrázek č. 14: Nádrž na kapalný vodík

Obrázek č. 15: Exotermická reakce absorpce vodíku

Obrázek č. 16: Desorpční reakce vodíku z hydridu kovu

Obrázek č. 17: Uhlíkové nanotrubičky

Obrázek č. 18: Kompozitní tlaková nádrž

Obrázek č. 19: Kryogenní nádrže