



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**POSOUZENÍ SYSTÉMU AKUMULACE ENERGIE -
POWER TO GAS**

ASSESSMENT OF ENERGY STORAGE SYSTEMS - POWER TO GAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Šojat

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Filip Šojat**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Posouzení systému akumulace energie – Power to gas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologií využití vodíku je celá řada – v rámci bakalářské práce bude zpracován přehled technologií, které umožňují akumulaci elektrické energie formou vodíku nebo syntézního plynu (Power to gas). Součástí práce bude návrh konkrétní aplikace s využitím solární energie jako zdroje pro získávání vodíku.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření přehledu technologií akumulace přebytečné energie pomocí vodíku.
Návrh konkrétního akumulačního systému
Bilanční výpočet získávání vodíku z malé solární elektrárny.

Seznam doporučené literatury:

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha. Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

BOUDELLAL, Méziane. Power-to-gas: renewable hydrogen economy. Berlin: De Gruyter, 2018. ISBN 978-3-11-055881-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje problematice akumulace elektrické energie pomocí technologie Power to Gas. Práce je rozdělena na dvě části, rešeršní a praktickou. V rešeršní části jsou podrobně popsány základní principy technologie Power to Gas, výroba vodíku a jeho možné využití v různých oblastech. Praktickou částí je hypotetická studie získání elektrické energie ze solárních panelů a následné uskladnění do vodíku. Jednotlivé metody uskladnění jsou porovnány.

Klíčová slova

Power to Gas, akumulace elektrické energie, bilanční výpočet, vodík

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focuses on the issue of electrical energy storage using Power to Gas technology. The thesis is divided into two parts: a research part and a practical part. The research part provides a detailed description of the basic principles of Power to Gas technology, hydrogen production, and its potential applications in various fields. The practical part consists of a hypothetical study on obtaining electrical energy from solar panels and subsequently storing it as hydrogen. Various storage methods are compared.

Key words

Power to Gas, electricity storage, balance calculation, hydrogen

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠOJAT, Filip. *Posouzení systému akumulace energie - Power to gas* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148981>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Posouzení systému akumulace energie - Power to gas vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Markovi Balášovi PhD. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD.....	11
1 Vodík.....	12
1.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti.....	12
1.2 Výskyt vodíku v přírodě	13
1.3 Využití vodíku	14
1.4 Rozdělení vodíku podle technologie výroby	15
2 Výroba vodíku	17
2.1 Parní reforming zemního plynu	17
2.2 Rozklad methanolu a amoniaku.....	17
2.3 Štěpení vody	18
2.3.1 Alkalická elektrolýza vody.....	19
2.3.2 Vodíková elektrolýza s polymerním elektrolytem (PEM elektrolýza)	19
2.3.3 Vysokoteplotní elektrolýza (SOC elektrolýza)	20
2.4 Výroba vodíku z biomasy	21
3 Power to Gas.....	23
3.1 Metanizace	23
3.1.1 Katalytická metanizace	24
3.1.2 Biologická metanizace	25
3.2 Skladování vodíku	26
3.2.1 Skladování jako stlačený plyn v nádrži.....	26
3.2.2 Skladování vodíku ve zkapalněné formě	26
3.2.3 Skladování kryokompresovaného vodíku	26
3.2.4 Skladování v materiálech	27
3.2.5 Skladování vodíku pod zemí	28
3.2.6 Skladování zemního plynu	28
3.3 Transport vodíku.....	29
3.3.1 Vodík přepravovaný v potrubí	29
3.3.2 Vodík přepravovaný jako amoniak	29
3.3.3 Přeprava zkapalněného vodíku.....	30
3.3.4 Vodík přepravovaný v kapalných nosičích vodíku (LOHC)	30
3.4 Využití technologie Power to Gas	31
3.4.1 Průmysl.....	31
3.4.2 Power-to-Gas-to-Power (P2G2P).....	32
3.4.3 Palivový článek	32
4 Bilanční výpočet získání vodíku z malé solární elektrárny	37
4.1 Výpočet vyrobené elektrické energie.....	37
4.2 Uskladnění vodíku	40
4.2.1 Stlačený vodík	41
4.2.2 Zkapalněný vodík.....	42
Zhodnocení	44
ZÁVĚR.....	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50

ÚVOD

V době, kdy probíhá energetická krize a dochází k přechodu z fosilních zdrojů na zdroje obnovitelné, má vodík velký potenciál. Vodík je nejčastěji se vyskytující prvek ve vesmíru. Jeho nevýhoda však spočívá v tom, že je velice obtížné najít na Zemi čistý vodík, protože se nachází většinou ve sloučeninách, proto je potřeba ho průmyslově vyrábět. Výroba vodíku je aktuálně velice nákladná a neekonomická. A současně i možné skladování vodíku má veliký potenciál, ale stále z ekonomického hlediska není výhodné.

V současnosti se začínají vyrábět i auta, která jsou schopna vodík spalovat, ale tato bakalářská práce uvažuje o vodíku z energetického hlediska.

Čím dál tím více se na domy instalují fotovoltaické panely a s nimi i nutnost úschovy přebytečné energie. Akumulace energie do baterií je pouze krátkodobá a v současném době se přichází s novými inovacemi, jak energii uchovat déle. Jednou z těchto možností je systém Power to Gas, akumulace energie do vodíku, který by měl být schopen energie uchovat déle.

Cílem této bakalářské práce je vytvoření přehledu o možnostech skladování přebytečné energie pomocí vodíku. Následně provést bilanční výpočet získání vodíku z fotovoltaických panelů na rodinném domku a navrhnout konkrétní akumulační systém.

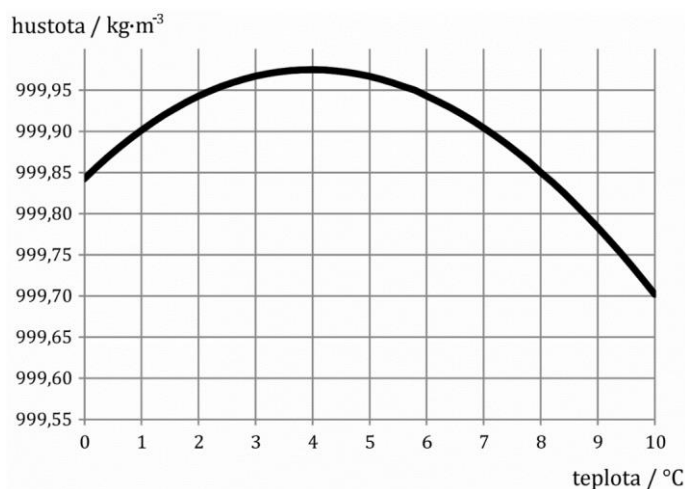
1 Vodík

Vodík je v dnešní době hojně využíván, primárně v průmyslu. Dříve se vodík v energetice používal jako chladič elektrických generátorů. A v současné době, kdy dochází k růstu cen energií, postupnému vyčerpávání fosilních paliv a využívání obnovitelných zdrojů energie, se uvažuje o vodíku jako o klíčovém prvku energetiky a dopravy. Perspektiva vodíku je v jeho akumulaci elektrické energie a spojení s jinými obnovitelnými zdroji energie. Z energetického hlediska se jedná o nejčistší palivo s možným nejvyšším energetickým obsahem. Při spalování vodíku nedochází k produkci žádných škodlivých látek. Při reakci s kyslíkem dochází pouze k produkci vody. Spalováním 1 kg vodíku se uvolní dvakrát více energie než při spalování 1 kg již dnes používaných paliv. [8]

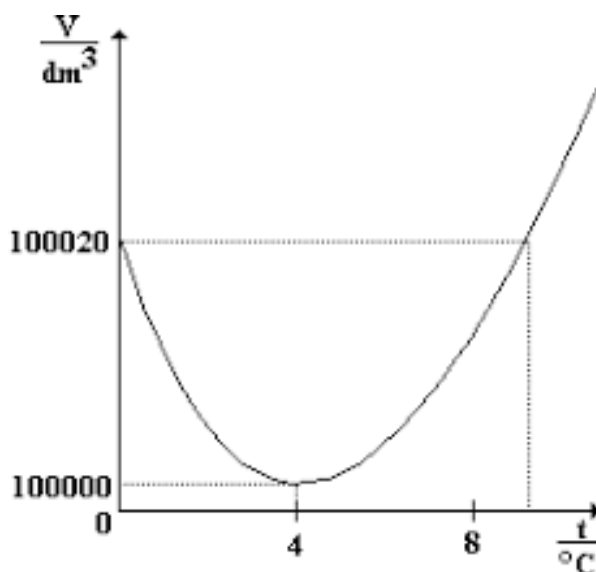
1.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti

Vodík je za normálních podmínek hořlavý plyn, který nemá barvu, chuť, ani zápach. Vodík je přibližně $14,5\times$ lehčí než vzduch a zároveň i díky jeho nízké molekulové hmotnosti i těžko stlačitelný. Při míšení se vzduchem dochází k vytvoření výbušné směsi. [9]

Ve sloučeninách je vodík schopen tvořit speciální typ chemických vazeb, která se nazývá vodíkový můstek. Kyslíkové můstky se vyskytují i ve sloučenině vody, jejímž důsledkem je anomálie vody. Anomálie vody pojednává o faktu, že voda má největší hustotu při $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdežto objem do této teploty klesá a pak s rostoucí teplotou opět roste. [9]



Obr. 1 Závislost hustoty destilované vody na teplotě; upraveno dle [10]



Obr. 2 Závislost objemu vody na teplotě [11]

1.2 Výskyt vodíku v přírodě

Vodík se v přírodě vyskytuje buď ve vázané nebo volné formě. Vodík se ve volné formě nachází jen velice zřídka. Malé množství vodíku je obsaženo ve vysokých vrstvách atmosféry.

Vodík se nachází v některých nerostech ve formě amoniového iontu: fosphammit $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ a též v malém množství i v minerálech organického původu: jantar $(\text{C}_6\text{H}_4)_2\text{CH}_2$. [12]

Vodík tvoří v zemské kůře podíl přibližně 0,88 %. I když ve vesmíru se jedná o nejrozšířenější prvek. Vodík je možné nalézt i jako izotop. Izotop je prvek, jež má stejný počet protonů, ale rozdílný počet neutronů. Mají stejné atomové číslo, ale rozdílné protonové číslo. Vodík se tedy vyskytuje ve třech formách izotopů. [12]

Nejčastější je protium, které tvoří 99,985 % všech izotopů ve vesmíru. Tento izotop ^1_1H má stejný počet protonů a neutronů a jedná se tedy o nejjednodušší atom ve vesmíru.

Podíl deuteria ve vesmíru je 0,015 % a obsahuje jeden proton a dva neutrony ^2_1H . Pokud je deuterium součástí molekuly vody H_2O , namísto protia, tak se tato voda nazývá jako těžká. Těžká voda má vynikající moderační vlastnosti a velice slabě dochází k pohlcování neutronů. Těžká voda zároveň s grafitem jsou jedinými možnými moderátory. Jsou schopni zpomalit neutrony, a zároveň je lze za určitých podmínek využít jako jaderné palivo přírodní směsi izotopů uranu. Deuterium se kromě jaderné techniky používá ve spektrometrii, lékařství a při studiu chemických reakcí. [13]

Posledním významnějším, ale nepříliš se vyskytujícím izotopem vodíku je radioaktivní tritium, které obsahuje jeden proton a tři neutrony. Jeho výskyt je 0,0001 % ve vesmíru. V jaderném reaktoru vzniká při zachytu neutronů na lehkých prvcích, které obsahuje jaderné palivo nebo chladivo. V chladivu vzniká zachytem přímo na deuteriu, ale v současné době je zanedbatelný. Zásadní je reakce s atomy bóru, který se ve formě kyseliny borité (H_3BO_3) používá k regulaci výkonu jaderného reaktoru. Následně se větší množství tritia přemění na tritiovou vodu, která se následně stává součástí normálního oběhu vody. Tritium trvale vzniká v přírodě působením kosmického záření. [14]

Vodík je zároveň součástí nejdůležitější molekuly na Zemi, a to je voda (H_2O). Voda pokrývá přes 71 % zemského povrchu. Kdy 97 % této vody je slaná voda a jen 3 % voda sladká.

69 % sladké vody je součástí ledovců, 30 % je voda podzemní a jen 1 % je povrchová a atmosférická voda. [56]

Zároveň je vodík, společně s uhlíkem, jedním ze základních prvků v uhlovodících. Uhlovodíky se podle tvaru řetězce dělí na:

- alifatické (alkeny) [57]
- cyklické (benzen) [57]

Podle typu vazby:

- nasycené (pouze jednoduché vazby mezi atomy uhlíku) [57]
- nenasyčené (dvojně či trojně vazby) [57]
- aromatické (sem patří cyklické) [57]

1.3 Využití vodíku

V současnosti má vodík velikou škálu využití v sekundárním sektoru, tedy primárně v průmyslu. Jedním z odvětví průmyslu, kde může být vodík hojně užívaný je automobilový průmysl. Již nyní některé světové automobilky nabízejí auta, která jsou schopna být poháněna elektřinou z vodíkových článků. Osobní auta, která mají energii uloženou v bateriích, zdají se být více ekologická, ale hlavním problémem vodíku je jeho skladování. Vláda České republiky dne 10.3.2023 otevřela první vodíkovou čerpací stanici na pražském Barrandově, jeví se, že vodík bude alternativou k elektromobilům. Problém je, že automobil na 1 kg vodíku ujede přibližně 280 km a je stále dražší jako auto na fosilní paliva, kdy kilogram vodíku je nastaven na cenu 278 Kč za 1 kg vodíku. [15]

Vodík může být skladován v nádržích, ale ty musí mít mnohonásobně větší objem i když je vodík stlačen na 35 až 70 MPa. Nádrž na vodík musí být objemnější, než nádrž v automobilu na fosilní paliva a tím se ubírá objem zavazadlového prostoru. Automobil musí mít zákonitě i větší hmotnost, což se dá považovat za nevýhodu v provozu. [15], [19]

Vodík, jako zdroj energie, se používá nejen u osobních automobilů, ale i u nákladních automobilů. U nákladních automobilů není takový problém s hmotností nádrží na vodík, ani snížením prostoru pro uložení vodíku. Již nyní se dá projet v České republice autobusem, který je poháněn energií z vodíkových článků. [15]

V dalším odvětví dopravy, kde by bylo možné využít vodík jako palivo je doprava železniční. Vlaky na vodík se již testují v zemích jako je Velká Británie, Německo, a brzy by tento typ vlaků měla začít testovat i Francie. [15]

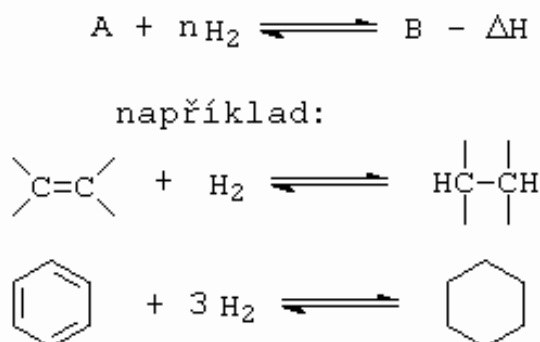
Z dalšího odvětví průmyslu, kde je možné vodík hojně požívat je hutnictví a obecně zpracování kovů. Kdy u železa a oceli se používá vodík k ošetření za tepla. Tímto procesem je možné docílit zvýšení tvrdosti, zvýšení meze pevnosti, změny struktury zrn, změny chemického složení, změny magnetických vlastností a změny elektrických vlastností. [16]

Další možné využití vodíku je možné využít k výrobě energie a tepla pro domácnosti i komerční objekty. Výhodou je, že po úpravách stávající infrastruktury pro vytápění zemním plynem, lze využít vodík. Možné problémy této změny jsou znatelné a problematické. Hořáky, které nyní slouží ke spalování zemního plynu a změně na teplo, je nutné upravit tak, aby byly schopné reagovat a fungovat s vodíkem. Vodík, tím že nemá žádný zápach, ani barvu je nutné řešit otázky možného úniku a s tím spjaté i ochrany před výbuchem. V Japonsku a Jižní Koreji se již nyní vodík používá k vytápění budov pomocí palivových článků. Aby bylo v Evropě možné vodíkem topit, musí dojít k vyřešení již zmíněných problémů a ke změně legislativy. [17]

Vodík za pomoci hydrogenace tuků a olejů je schopen organické jedlé oleje ze sójových bobů, obilí, arašídů ztuhnout a tím se pozastaví iniciace olejů oxidovat a žloutnout. Díky hydrogenaci se vylepšuje konzistence a dochází ke snížení reaktivity olejů. [16]

Hydrogenace je proces, kdy dochází k přidání molekul vodíku na násobnou vazbu za přítomnosti katalyzátoru. Hydrogenace je proces, který probíhá exotermickou reakcí, tedy reakcí, která probíhá uvolňováním tepla. Zatímco dehydrogenace probíhá endotermickou reakcí, kde potřeba teplo dodávat. Za nízkých teplot je jednodušší provést hydrogenaci. Při teplotě nad 400 °C začne docházet spíše k dehydrogenaci. Hydrogenace se využívá k přeměně tekutých potravinových olejů na pevné jedlé tuky. Hydrogenací uhlovodíků za pomoci katalyzátorů se vytvářejí alkany. Dalším využitím hydrogenace může být farmacie. [18], [63]

Vodík je součástí molekuly amoniaku (NH₃), který patří mezi nejpoužívanější hnojiva. Amoniak neboli čpavek má ze všech hnojiv největší obsah dusíku, a proto je tak hojně používán i přes jeho potenciální nebezpečí. Amoniak o nízké koncentraci může podráždit horní cesty dýchací a při vyšších koncentracích způsobuje záněty kůže, očí nebo plic. Je vysoce toxický pro vodní organismy. Vysoký obsah dusíku je důležitý z důvodu podpory růstu zelené hmoty. [54], [55]



Obr. 3 Chemické procesy hydrogenace a dehydrogenace [18]

1.4 Rozdělení vodíku podle technologie výroby

Rozdělení podle barev bylo zavedeno, aby se rozlišilo, jakým způsobem byl vodík vyroben, zda se jedná o ekologickou nebo neekologickou výrobu a s tím spjaté dopady na životní prostředí.

Nejpoužívanějším způsobem výroby v současnosti je výroba vodíku parním reformingem. Tímto způsobem se vyrobí tzv. šedý vodík, který je nejlevnější, ale zároveň je to metoda, která je velice neekologická, kdy dochází ke vzniku velkého množství CO₂, na 1 kg vyrobeného vodíku připadá 9-12 kg CO₂. [21]

Stejnou metodou se vyrábí i modrý vodík, z fosilních paliv nebo primárně ze zemního plynu. Jedná se o čistší verzi výroby vodíku, protože vyprodukovaný oxid uhličitý je zachycen technologií CCS (carbon capture and storage). Dochází k zachycení a uskladnění oxidu uhličitého. Vodík, který je touto metodou vyrobený je prakticky bezemisní, dojde ke snížení emisí o 95 %. [4]

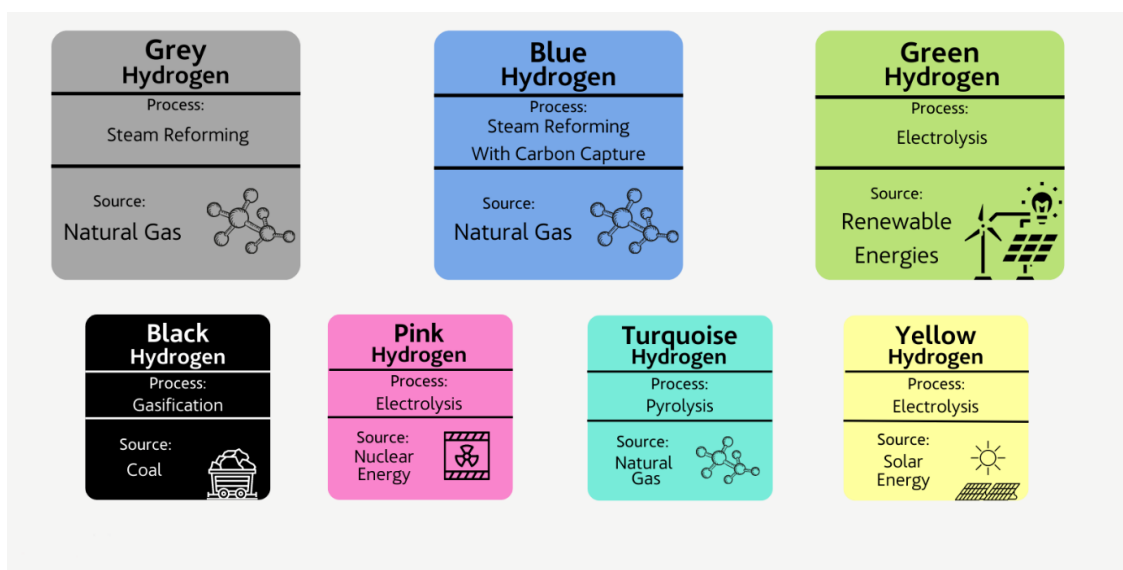
Technologie CCS se používá primárně v průmyslu, kde dochází k velkému vzniku CO₂, jako je proces výroby oceli nebo cementu. Vzniklý oxid uhličitý je z místa vzniku transportován lodí nebo sítí potrubí a následně uložen pod povrchem. Koncept technologie CCUS

(carbon capture, utilisation and storage) ještě navíc uvažuje nad tím, že místo uložení CO₂ by šlo po určité úpravě dále využívat, například jako biopalivo, beton. [20]

Ekologicky nejpříjemnější vodík je tzv. zelený vodík, který není vyrobený z fosilních paliv, ale elektrolýzou vody, kdy dochází k rozkladu na vodík a kyslík. V průběhu elektrolýzy je potřeba, aby elektřina byla vyrobena z obnovitelných zdrojů. [21]

Zatímco cena 1 kg šedého vodíku se pohybuje okolo 0,9 – 1,7 USD, modrý vodík je přibližně dvakrát dražší a zelený vodík je až šestkrát dražší. [21]

Dalšími jsou černý vodík, jedná se o vodík vyrobený z černého uhlí, hnědý vodík, vodík vyrobený z hnědého uhlí, růžový nebo fialový vodík se vyrábí za pomoci jaderné energie. [22]



Obr. 4 Rozdělení vodíku podle technologie výroby, upraveno [46]

2 Výroba vodíku

I když je vodík nejčtenějším prvkem ve vesmíru, na Zemi není možné najít vodík v čisté podobě a je nutná jeho výroba. Nejlevnější výroba vodíku je zároveň i ta nejméně ekologická, kdy až 96 % výroby vodíku nastává výrobou z fosilních paliv, tzv. parním reformingem zemního plynu, čímž dochází i k vytváření skleníkových plynů. Přičemž výroba vodíku elektrolýzou vody tvoří pouze 4 %.[1], [2]

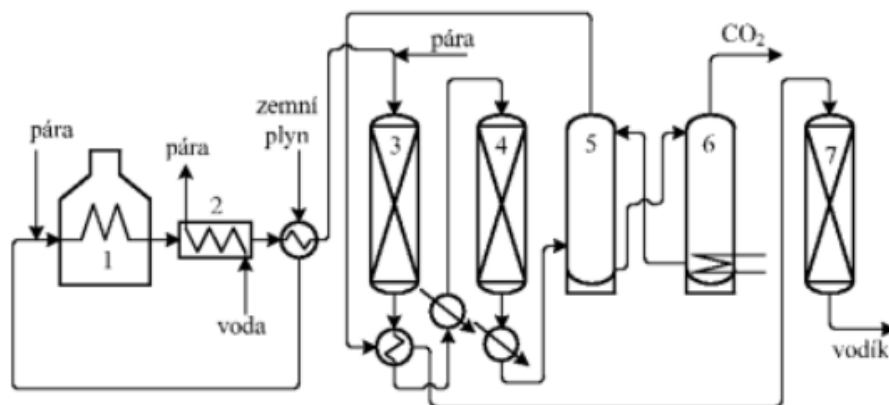
2.1 Parní reforming zemního plynu

Jedná se o chemický proces, při kterém se přehřátá vodní pára o teplotě 750–950 °C a tlakem 3–5 MPa smíchá s methanem. Po smíchání dojde ke vzniku oxidu uhelnatého, vodíku a malého množství oxidu uhličitého. Oxid uhelnatý se smíchá s vodní párou a dochází ke vzniku vodíku a oxidu uhličitého. [3]



V průběhu celé této chemické reakce je potřeba, aby byl přítomen katalyzátor naplněný v trubkách. Nejčastěji se používá katalyzátor na nikelnaté bázi. Reforming se musí provádět v přebytku vodní páry, poněvadž by jinak docházelo k usazování uhlíku na katalyzátoru. Jedná se o exotermickou reakci. [3]

Celková účinnost procesu je okolo 75 % [2]. Dochází ale k velkému množství uvolněného množství CO_2 , které se při výrobě 1 kg vodíku pohybuje okolo 9 až 12 kg. [2]

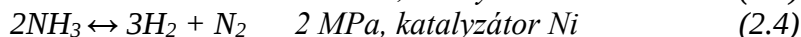
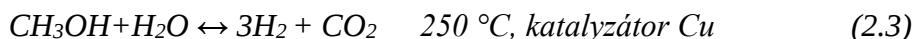


Obr. 5 Schéma parního reformingu zemního plynu [3]

(1 – pec, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – vysokoteplotní konvertor CO, 4 – nízkoteplotní konvektor CO, 5 – absorbér CO_2 , 6 – desorbér CO_2 , 7 – metanizér)

2.2 Rozklad methanolu a amoniaku

Tento proces se provádí pro výrobu malého množství vodíku. Methanol i amoniak, které jsou velmi často vyráběny reakcí s vodíkem. Výhoda amoniaku i methanolu je možnost jejich jednoduchého skladování a s tím spojena i možnost přepravy. Přidáním vhodného katalyzátoru a vhodnými podmínkami je možné obrátit směr vratné chemické reakce a je možné opět získat vodík. [5]



Jedná se o relativně jednoduché chemické reakce, kdy následně oxid uhličitý nebo dusík nemusí v některých výroбах vadit, tím pádem není řešit potřeba další čištění vodíku. Jedná se, ale o dražší vodík než vodík, který byl vyroben ze zemního plynu. [5]

2.3 Štěpení vody

Používané vodíkové technologie se dají rozdělit na základě toho, při jakých teplotách jsou používány. Jedná se o technologie:

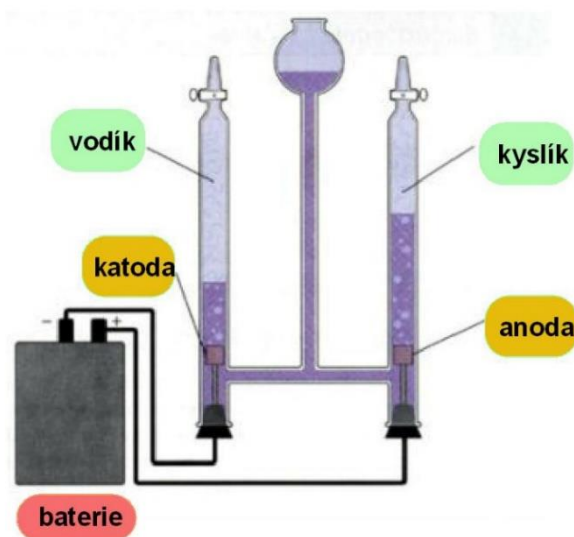
- nízkoteplotní, jejichž provozní teplota je v rozmezí 60–100 °C [23]
- vysokoteplotní, kdy provozní teploty jsou od 600 °C do 1100 °C. [23]

Další možnost rozdělení je podle toho, o toho, jaký elektrolyt se jedná.

Rozdělit se to dá na metodu:

- alkalické, [23]
- s polymerní membránou, [23]
- s pevnými oxidy. [23]

Jedná o děj, při kterém prochází elektrický proud na elektrodách a dochází ke štěpení molekuly vody na vodík a kyslík. Proud, který prochází elektrolytem, způsobí, že se vodík začíná pomalu usazovat na katodě, záporně nabitě elektrodě, a kyslík na anodě, kladně nabitě elektrodě. [2]



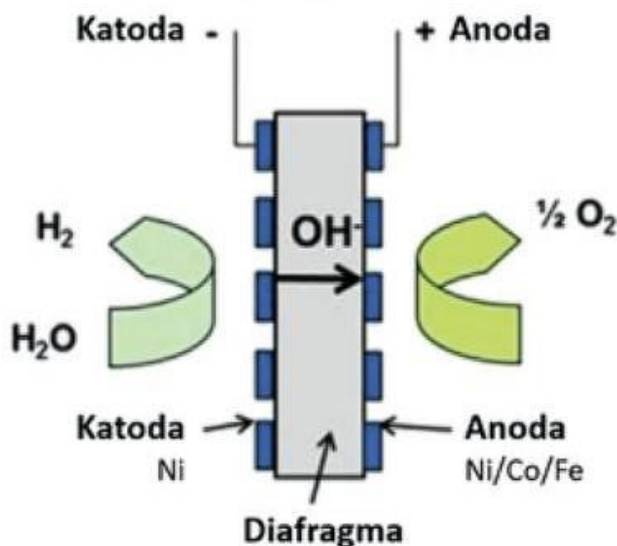
Obr. 6 Elektrolýza vody [7]

V současné době se celková účinnost elektrolýzy vody pohybuje okolo 50-60 % v závislosti na technologii elektrolýzérů, což je zařízení, ve kterém elektrolýza probíhá. Pro výrobu 1 kg vodíku je potřeba asi 9 l demineralizované vody a přibližně 50 kWh elektrické energie. [2]

2.3.1 Alkalická elektrolýza vody

Tato metoda je nejstarší a nejrozšířenějším typem elektrolýzy vody, tedy i nejlevnější. Jedná se o nízkoteplotní technologii, kdy probíhá 40–90 °C. Elektrolytem je roztok hydroxidu draselného (KOH) o koncentraci 20–40 hm. %, který napomáhá transportu OH^- iontů mezi elektrodami. Katoda je vyrobena z oceli, anoda je z hliníku a tyto dvě elektrody jsou odděleny anorganickou diafragmou, neboli membránou. Použití oddělení membrány je z důvodu, aby nedocházelo k míšení plynů, které elektrolýzou vznikají (kyslík a vodík). Diafragma se dříve dělala z asbestu, nyní se používá keramika nebo kompozitní materiály, které nemají negativní dopad na životní prostředí. Účinnost této technologie se uvádí mezi 62–82 %. Tato technologie je velice náročná, a zároveň vodík, který se touto metodou vytvoří je nejméně čistý. [23], [24], [25]

Průmyslová alkalická elektrolýza probíhá při 80 °C a při napětí 1,8 až 2,4 V. Na katodě dochází k redukování vody na vodík. A následně vzniklé hydroxidové ionty prochází přes membránu až k anodě, kde dochází k oxidaci za vzniku kyslíku a vody. [24]



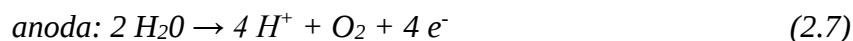
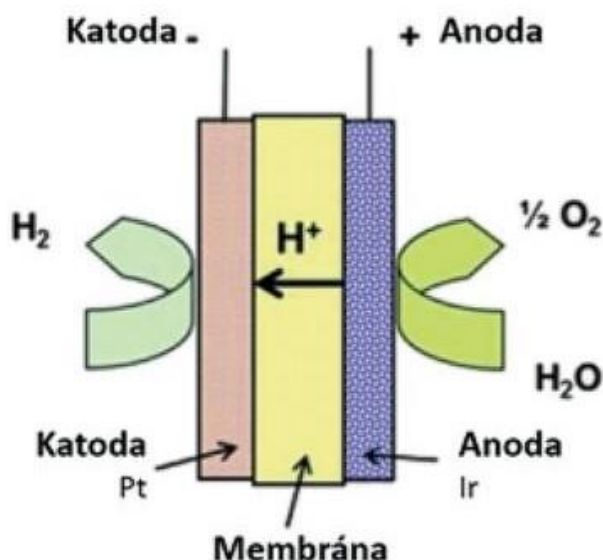
Obr. 7 Alkalická elektrolýza, upraveno [26]

2.3.2 Vodíková elektrolýza s polymerním elektrolytem (PEM elektrolýza)

Jedná se o další nízkoteplotní technologii, kdy provozní teplota se pohybuje v rozmezí 20–100 °C, tlaku 3 MPa a elektrickém napětí 1,8–2,2 V. Základem této technologie je pevný elektrolyt, protonově vodivá membrána, která slouží k oddělení elektrodových prostorů, elektrické cely, ale především slouží k přenosu iontů H^+ mezi elektrodami. Na katodě se redukuje vodík, na anodě oxiduje kyslík. V katalytické vrstvě plynově propustných elektrod dochází k elektrochemickým reakcím a tyto elektrody jsou tvořeny porézními uhlíkovými materiály. Z důvodu korozního prostředí PEM elektrolýzéro se používají platinové kovy v této technologii jako katalyzátor. Na anodě je katalyzátor na bázi titanu potažený IrO_2 . Na katodě je tímto katalyzátorem uhlíkový, popřípadě železný nosič pokrytý malými částicemi platiny.

Nevýhodou této technologie je její vysoká cena z důvodu přítomných kovů a velká citlivost na kvalitu vodíku. Výhodou však je, že má vysokou čistotu vyprodukovaných plynů a kompaktní design. Účinnost tohoto druhu elektrolýzy je přibližně 67-82 %. [23], [24], [25]

Obr. 8 PEM elektrolýza, upraveno [26]



2.3.3 Vysokoteplotní elektrolýza (SOC elektrolýza)

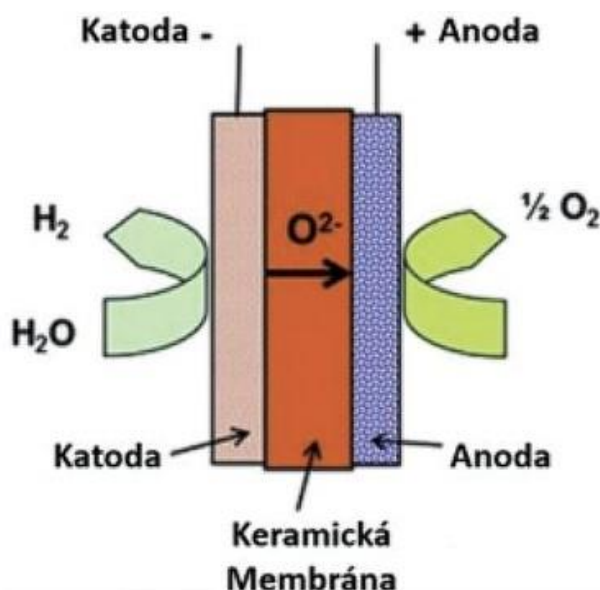
Jedná se vysokoteplotní technologii, kdy provozní teplota se pohybuje mezi 700 °C a 1000 °C. Využívá se pevný elektrolyt, který slouží k transportu iontů O^{2-} mezi elektrodami. [23]

Mechanismus vysokoteplotní elektrolýzy je takový, že vodní pára je přiváděna na porézní katodu, kde dochází k redukci vodíku a následně vzniklé kyslíkové ionty prochází pevným elektrolytem až ke katodě, kde dochází k oxidaci na kyslík [24].

Nejčastěji se jako elektrolyt používá oxid zirkoničitý (ZrO_2) s oxidem yttritým (Y_2O_3). Materiál katody bývá nejčastěji stejný jako pevný elektrolyt společně s niklem. Anoda bývá tvořena směsí oxidů. Tím, že tento typ elektrolýzy probíhá při vysoké provozní teplotě, není potřeba dodávat takové množství elektrické energie, protože část energie potřebné k tomu, aby elektrochemické reakce proběhly pomůže dodané teplo. SOC elektrolýza je považována za velmi výhodnou, protože dochází ke vzniku velkého množství odpadního tepla. Právě kvůli tomuto efektu SOC technologie dosahuje vysoké účinnosti, kdy napěťová účinnost je uváděna pod 110 % [27].

Nevýhodou této metody je, že trvá velice dlouho, než dojde k náběhu na provozní teplotu, obvykle je to 12 hodin. Z důvodu vysokých teplot je potřeba mít vysoce odolné materiály, které

jsou nákladné, primárně se používá keramika, která bude schopna vydržet v těchto podmínkách. [23], [24]



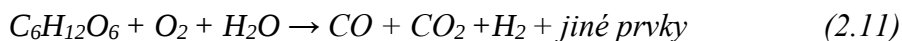
Obr. 9 SOC elektrolýza, upraveno [26]



2.4 Výroba vodíku z biomasy

I když tato technologie nemá takový potenciál, aby se vodík vyráběl primárně z biomasy, tak stále se jedná o velice zajímavou teorii a technologii. Pokud by technologie výroby vodíku byla v budoucnu možná, dala by se produkce vodíku rozdělit na výrobu „suché“ biomasy a biomasy s vysokým obsahem vody. „Suchá“ biomasa je směs uhlovodíků, která by následně šla zpracovat způsoby, které jsou již aktuálně hojně využívány, například parním reformingem biomasy. Na zpracování vlhké biomasy by se využívaly biotechnologické procesy, kdy jsou mikroorganismy katalyzátory reakce. [6]

Tento proces se nazývá zplyňování. Je to proces, při kterém se organické nebo fosilní uhlíkové materiály přeměňují při vysokých teplotách, které jsou okolo 700 °C, bez spalování s kontrolovaným množstvím kyslíku nebo páry na oxid uhlíčitý a oxid uhelnatý. Oxid uhelnatý pak reaguje s vodou za vzniku oxidu uhelnatého a dalšího vodíku. Adsorbéry nebo speciální membrány mohou z tohoto proudu plynu oddělit vodík. [53]



Jako výchozí prvek je použita glukóza místo celulózy. Celulóza je nejpoužívanější sloučenina pro výrobu vodíku z biomasy. [53]

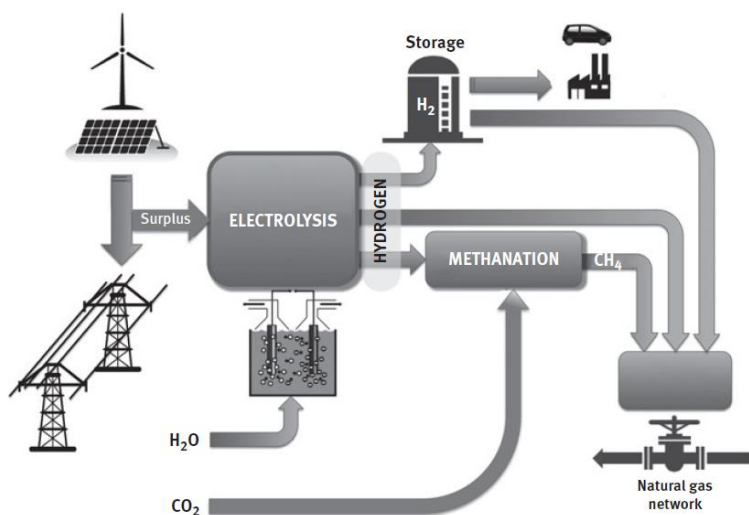
Dalším způsobem výroby vodíku z biomasy je pyrolýza. Jedná se o zplyňování bez přístupu kyslíku. Biomasa není tak dobře zplyňována jako uhlí a dochází k dalšímu vzniku uhlovodíkových sloučenin. Je nutné provést další krok k reformování těchto uhlovodíků

pomocí katalyzátorů, aby vznikla syntézní směs vodíku, oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého. Následně stejně jako při zplyňování dochází k přeměně oxidu uhelnatého na oxid uhličitý. [53]

3 Power to Gas

Technologie Power to Gas je jednou z možností akumulace přebytku elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tato metoda spočívá v přeměně elektrické energie na plyn, primárně na methan, méně na vodík. Tato přeměna elektrické energie v plyn je možná pomocí elektrolýzy, která umožňuje disociaci vody na kyslík a vodík. Vodík a kyslík vyrobené v elektrolyzátoru se můžou následně využívat přímo v průmyslu, např. petrochemickém, chemickém, nebo mohou být přidávány do sítě zemního plynu, případně na tvorbu methanu metanizací, a nakonec přidány do sítě zemního plynu. [28]

Přeměna vodíku na methan se aktuálně používá více než samotný vodík. Zásadní důvody jsou: již existující infrastruktura pro zemní plyn, kam lze vyrobený methan přidávat, skladovací kapacita methanu je $3,5\times$ větší než vodíku, methan má nižší mez výbušnosti na vzduchu než vodík (mez výbušnosti methanu: 4-15 %, mez výbušnosti vodíku: 4-75 %) [29]



Obr.10 Power to Gas koncepční diagram [28]

3.1 Metanizace

Po elektrolýze vody a získání CO_2 je následujícím krokem metanizace. Dochází k přeměně vodíku na syntetický methan. Nejrozšířenějšími typy metanizace jsou katalytická a biologická metanizace. Katalytická metanizace probíhá při vysokých tlacích a teplotách v reaktoru. V biologické metanizaci přeměňují vodík na methan mikroorganismy. [29]

3.1.1 Katalytická metanizace

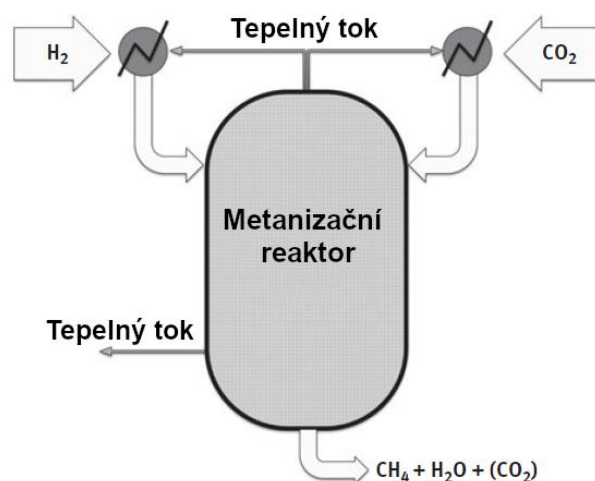
Tento způsob metanizace, přeměny vodíku na syntetický methan, se realizuje pomocí CO_2 , v některých případech i CO . V současnosti se jedná o nejčastěji používaný způsob metanizace pomocí CO_2 . K této přeměně dochází pomocí následujících chemických reakcí:



Jedná se o exotermickou katalytickou reakci, které se rovněž říká Sabatierova reakce (rovnice 3.3). Sabatierova reakce je doprovázena dalšími reakcemi a probíhá při vysokých teplotách, obvykle mezi 200-700 °C z důvodu optimální přeměny a v závislosti na zvoleném typu katalyzátoru. Při nižších teplotách (200-250 °C) je největší molární podíl methanu, který s rostoucí teplotou klesá. Tato reakce je známá od roku 1905, kdy Paul Sabatier provedl experiment s využitím niklového katalyzátoru. Tento typ metanizace probíhá přímým způsobem, kdy vzniká přímo methan. [28], [29], [30]

Nepřímá metanizace probíhá pomocí CO . Probíhá ve dvou fázích. První fáze je přeměna vodíku a oxidu uhličitého na oxid uhelnatý a vodu (rovnice 3.1), neboli lineární kombinace metanizace oxidu uhelnatého. Druhá fáze probíhá pomocí RWGS (Reverse Water-Gas Shift, obrácená změna vody na plyn) a vodíku (rovnice 3.2). Metanizaci oxidu uhelnatého lze považovat za obrácený parní reforming. Při teplotě okolo 500 °C začíná probíhat nepřímá výroba a s ní související zvyšování molárního podílu oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého, který nebyl součástí žádné reakce a vodík ve výstupní směsi. [29], [30]

Procesy katalytické metanizace musí probíhat v metanizačních reaktorech. Metanizační reaktory se podle typu dělí na různé druhy. V případě pevného lůžka metanizace je reaktor vyplněn katalyzátorem, jehož velikost částic se pohybuje v rozmezí několika milimetrů. Při fluidní metanizaci jsou jemné katalytické částice fluidizovány pomocí plynných reaktantů. Fluidizace je způsob úpravy, při němž nabývají práškové a sypké hmoty vlastnosti kapalin [31]. Ve třífázové metanizaci je pevný katalyzátor (prášek menší než 100 μm) ponechán za konstantní teploty v inertní kapalině, jedná se např. dibenzyltoluen. [28]

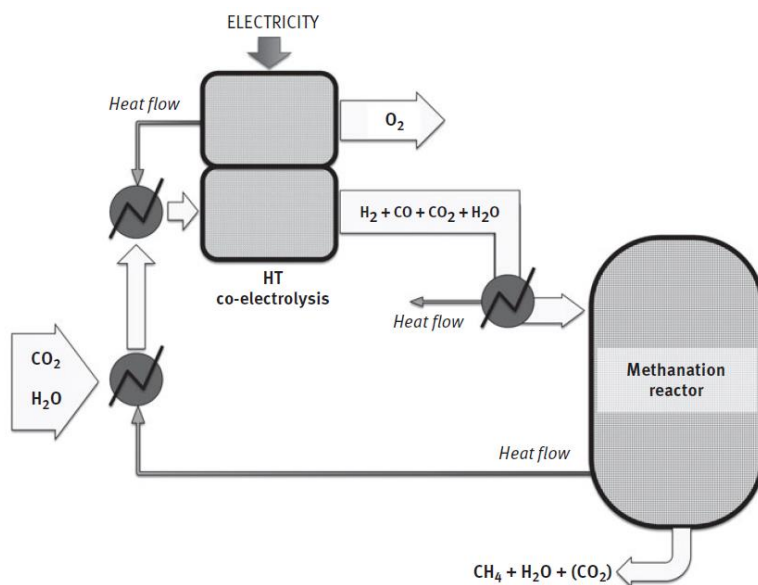


Obr. 11 Metanizační reaktor, upraveno [28]

Výtěžnost tohoto procesu se pohybuje řádově kolem 80 %, s obsahem methanu se dá výtěžnost zvýšit až na 90 %, záleží na teplotě a tlacích, při kterých reakce probíhá. Jak již bylo

dříve řečeno katalytická metanizace probíhá za vysokých teplot lze ji provést bez přímé kontroly teploty za pomoci série reaktorů, které obsahují chladicí plyny mezi reaktory. [28]

V kombinaci s vysokoteplotní elektrolýzou (SOC) a dodáváním CO_2 lze docílit tzv. ko-elektrolýzy. Která je následně doprovázena metanizací užitím směsi CO/H_2 . Dvě reakce probíhají při vysokoteplotní elektrolýze, rozklad vody a reakce, kdy z vodíku a oxidu uhličitého vzniká oxid uhelnatý a voda. Poté v reaktoru za pomoci nikelnatého katalyzátoru RWGS reakce nebo reakce oxidu uhličitého a vody za vzniku methanu a kyslíku. Spojení vysokoteplotní elektrolýzy s katalytickou metanizací nabízí vyšší účinnost, ale s ní i řadu omezení, které musí být odstraněny, jako je cena, degradace materiálu, vývoj nových materiálů, atd. [28]



Obr. 12 Princip ko-elektrolýzy [28]

3.1.2 Biologická metanizace

Metanizace tohoto typu využívá schopnosti methanogenních mikroorganismů, které přeměňují za anaerobních podmínek vodík a oxid uhličitý na methan a vodu. Špatným přestupem reaktantů k bakteriím probíhá proces v intenzivně míchaném reaktoru za atmosférického tlaku, díky čemuž dochází k lepší rozpustnosti plynů a zlepší se šíření reaktantů k bakteriím. V porovnání s katalytickou reakcí probíhá biologická reakce při nízkých tlacích, bez přístupu vzduchu a za nízkých teplot ($40\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nízké teploty pomáhají bakteriím k růstu a lepším výkonům. Použité mikroorganismy jsou bez genetické modifikace. [28], [29]

Okolo 5 % přivedeného oxidu uhličitého je spotřebováno na růst bakterií a zbylých 95 % je přeměněno na methan [29]. Existují již společnosti, které mají vyšší výtěžnost. Například dceřiná firma MicrobEnergy společnosti Viessmann dokáže z přivedeného oxidu uhličitého vyrobit až 98 % methanu, podobná čísla má i americká firma Electrochae [28].

Pokud mají vstupující plyny vysokou rychlost snižuje se obj. % methanu ve výstupním plynu, kolem 60 obj. %. Naopak při nižších rychlostech je obsah methanu ve výstupním plynu okolo 85 obj. %. Při experimentech bylo zjištěno, že ani při krajních rychlostech průtoku nebylo dosaženo fyzických limitů bakterií. [29]

Výhoda biologické metanizace oproti katalytické spočívá v tom, že není potřeba dosahovat tak vysokých teplot ani tlaků. Může docházet k integraci do bioplynových zařízení k využití CO₂, kterých je několik set tisíc. Další výhodou je lepší kontrola nad katalyzátory (schopny se samy biologicky reprodukovat) a též vynikající výtěžnost (75-80 %). [28]

3.2 Skladování vodíku

Již pročištěný vodík může být užít napřímo nebo může být vstřikován do sítě zemního plynu. Může být před použitím uložen samostatně ve velkém množství nebo přímo vstřikován. Jsou možné různé druhy skladování vodíku. [28]

3.2.1 Skladování jako stlačený plyn v nádrži

Jedná se o nejjednodušší, ale zároveň nejméně používanou metodu ke skladování vodíku. Je nutné mít velké objemy uložistě, v případě vysokých tlaků. Tlaky k tomuto uložení jsou v rozmezí 35 až 70 MPa. Stlačený vodík takového tlaku má hustotu 42 kg/m³, kdežto vodík za normální podmínky (atmosférický tlak a teplota 0 °C) má hustotu 0,09 kg/m³. Hustota energie stlačeného vodíku na 20 MPa je 0,71 kWh/litr oproti vodíku za normálního tlaku, která je 0,004 kWh/litr. Pokud by se tlak zvýšil až na 80 MPa, tak by hustota energie vystoupala až na 2,8 kWh/litr, což se blíží hustotě energie zkapalněného vodíku. Odhaduje se, že v případě vícestupňové komprese je vodíku odebíráno 8-12 % celkové energie. Mechanické a elektrické ztráty můžou tuto hodnotu ještě navýšit. [28], [32], [52]

3.2.2 Skladování vodíku ve zkapalněné formě

Skladovaný vodík v kapalně formě má teplotu blízkou absolutní nule, přesněji -252,8 °C, aby nedocházelo ke změně skupenství na plynné. Energie potřebná ke změně skupenství je velká v porovnání s energetickým obsahem, a s tím spjatá i cena. Dá se tedy říci, že celková účinnost je velice nízká. Pro přepravu zkapalněného vodíku je potřeba speciálních nádrží, které musí být izolovány (jsou tedy velmi drahé). Izolovány musí být z důvodu, aby nedocházelo k únikům vodíku, ke kterým může dojít, pokud by do nádrže vniklo teplo. Použití kapalného vodíku je tedy omezené, ale používá se v oblastech, kde je vyžadována vysoká úroveň čistoty anebo v kosmonautice. Jedná se o velmi drahou formu skladování. [28], [32]

3.2.3 Skladování kryokompresovaného vodíku

Tento typ skladování není běžný. Jedná se o kombinaci komprese a kryogenního chlazení. Lze kombinovat pro vytvoření dalšího možného vývoje skladování vodíku. Funguje na principu ochlazení plynu před kompresí. Vzniklý vodík má vyšší schopnost skladovat energii než vodík, který prošel jenom kompresí, protože má až třikrát vyšší hustotu energie a není potřebné takové množství vodíku na uskladnění elektrické energie. Zároveň však je energeticky velice náročné dostat a udržet vodík na teplotách blízké absolutní nule. [32]

3.2.4 Skladování v materiálech

Existují tři druhy materiálu, které dokážou skladovat vodík různými způsoby:

- schopny adsorbovat a ukládat vodík na povrchu, [32]
- schopny absorbovat a skladovat vodík v krystalické mřížce [32]
- schopny vytvářet hydridy, které jsou kombinací pevných materiálů a kapalin. [32]

Při adsorpci se atomy nebo molekuly vodíku zachycují na povrch materiálu. V tomto případě se vodík přitahuje k povrchům, které mají velkou plochu, včetně mikroporézních organokovových sloučenin (MOF), mikroporézních krystalických aluminosilikátů (zeolitů). Adsorpce vodíku na povrchu materiálu v práškové formě může dosáhnout vysokých hustot objemového skladování díky zvýšenému povrchu sorbentu. [32]

Druhý typ, který se takto příliš nepoužívá je absorbování vodíku do krystalické mřížky. Při adsorpci vodíku dochází k disociaci na atomy vodíku, které jsou následně adsorpcí včleněny do krystalické mřížky materiálu [32].

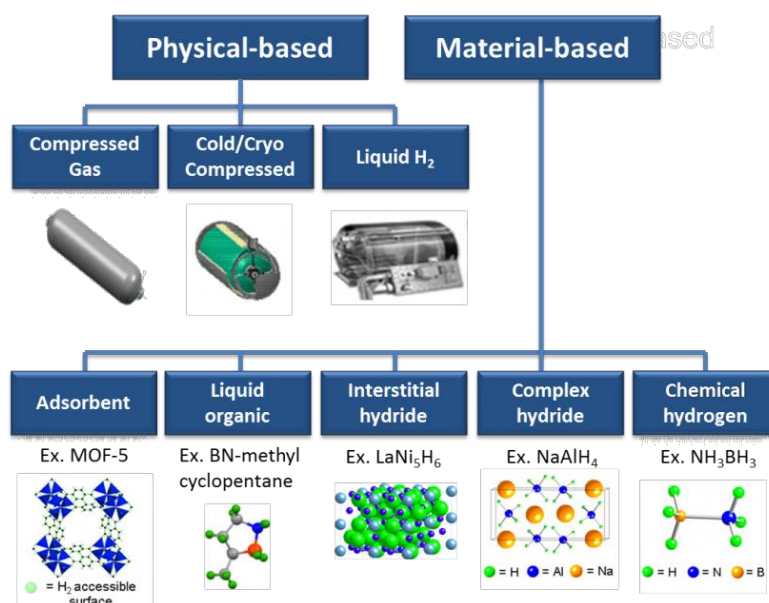
Další metodou je hydridové skladování. Využívá se reakce vodíku s vodou nebo jinými kapalnými sloučeninami s vysokým obsahem vodíku, jako jsou například alkoholy. Při uvolňování vodíku většinou nastává exotermická reakce. Tomuto typu skladování se jinak říká „chemické skladování“. [32], [33]

Systém skladování vodíku v kovových hydridech funguje tak, že vodík tvoří intersticiální sloučeniny s kovy, jako jsou například hořčík (MgH_2), palladium, lanthan nebo intermetalické sloučeniny s lehkými kovy, jako je hliník (NaAlH_4), nikl (LaNi_5H_4) nebo dalšími prvky. Kovové hydridy jsou schopny absorbovat molekulární vodík na svůj povrch a následně ho přeměňují na kovovou mřížku a uvolňuje se teplo. Vodík může být z krystalické mřížky uvolněn, jehož výsledkem je uvolnění tepla a hydridy budou mít možnost absorbovat velký objem plynu. Palladium je schopné absorbovat až 900× větší objem vodíku, než je jeho vlastní objem. Ke skladování vodíku v hydridech není potřeba mít vysoké tlaky a vodík lze dodávat při konstantním nastavitelném tlaku. Naopak vodík, který je v těchto hydridech obsažený, tak představuje několik procent celkové hmotnosti hydridu. Jedná se o časově velice náročnou a drahou práci. Desorpční teplota se výrazně zvyšuje, pokud se obsah vodíku v hydridu vyšší jak 5 hm. %. [28], [32]

Hydrid	skladový vodík hm. %	desorpční teplota při 0,1 MPa [°C]
LaNi_5H_6	1,4	25
TiV_2H_4	2,6	40
NaAlH_4	1,8	167
MgH_2	5	220

Tabulka 1 Vlastnosti některých druhů hydridů, [28]

Vodík může být chemicky vázán a sloužit jako organický nosič v kapalně formě. Kdy mají tyto chemické sloučeniny vysokou kapacitu pro absorbování vodíku a zahrnují karbazol deriváty, jako je například toluen. [32]



Obr. 13 Rozdělení skladování vodíku, upraveno [33]

3.2.5 Skladování vodíku pod zemí

Jedná se o možnost skladování velkého množství vodíku. Nejen, že by šlo skladovat ve stávajících zařízeních, ale studie ukázala, že je možné skladovat v solných dolech s objemy až 500 000 m³. Aby byla taková jeskyně vytvořena, je prvně nutné dolovat skrz sůl do 500-1000 metrů pod zemí. Dalším krokem by bylo vstřikování vody do soli, aby došlo k rozpuštění soli. Vzniklá sůl, přesněji voda se solí, by se extrahovala a následně uvolňovala místo pro velkou, ale těsnou jeskyni, kde bude vodík skladován za tlaku až 20 MPa.

Podle německé společnosti *KBB Underground Technologies GmbH* by bylo možné tímto způsobem v hloubce 1 km, skladovat až 4 000 tun vodíku za tlaku 1 MPa. Což by znamenalo, že by tímto způsobem bylo uloženo až 133 GWh. Účinnost skladování by dosahovala až 98 %. Nevýhodou však je, že se jedná o velice drahou metodu, která by vyšla v přepočtu na 2,16 miliardy korun (90 milionů €), jedná se o data z roku 2016 [28], podle dat z roku 2013 by byla cena mezi 20-50 milionů € [35]. [28], [36]

V Anglii jsou aktuálně tři jeskyně v provozu v hloubce 370 metrů pod zemí, schopné uskladnit až 70 000 Nm³ vodíku, při tlaku 4,5 MPa. [28]

3.2.6 Skladování zemního plynu

Každá země, aby nedocházelo k výpadkům zemního z důvodu přerušení dodávek nebo vysoké poptávky, má velké objemy skladovacích míst pro zemní plyn, které jsou většinou pod zemí. V České republice je k roku 2020 devět podzemních skladovacích zařízení zemního plynu s celkovou kapacitou přibližně 3 500 000 m³ (36,9 TWh) [37]. Pokud by došlo ke vstřikování vodíku do zemního plynu, umožnilo by to možnost jeho skladování bez dalších větších investic. [28]

3.3 Transport vodíku

Aby bylo možné užívat vodík nebo methan koncovými uživateli, je nutné jej transportovat. Pro vytvoření čistější přepravy vodíku do odlehlých oblastí je nutné najít řešení, které bude schopné přepravit vodík na velké vzdálenosti. Největší potenciál mají následující metody: vodík přepravovaný v potrubí, vodík přepravovaný jako amoniak, kapalný vodík a vodík přepravovaný v kapalných nosičích vodíku (LOHC). Kromě potrubí jsou všechny známy jako nosiče vodíku. [39]

3.3.1 Vodík přepravovaný v potrubí

Plynný vodík může být přepravován v potrubí stejně jako zemní plyn. Předtím než bude vodík vstříknut je mechanický stlačen na tlak, v kterém je provozní tlak potrubí. Tento tlak je vyšší než tlak v průběhu elektrolýzy. V závislosti na charakteristikách potrubí a podmínkách musí být vodík v určitých vzdálenostech znovu stlačen, aby mohl dosáhnout až ke koncovým zákazníkům. Samozřejmě jako u potrubí pro zemní plyn, tak i potrubí pro vodík musí obsahovat řídicí ventily, měřicí stanice, klapky pro řízení průtoků a zajištění další distribuce pro koncové zákazníky. [28], [39]

Není potřeba nových potrubí pro vodík, je možné využít již existující potrubí pro zemní plyn. V současnosti se projednává vstřikování až 20 % vodíku do sítě zemního plynu. V pilotních projektech se již tyto možnosti projednávají. V Evropě potrubí na čistý vodík již existuje, v roce 2018 takového potrubí bylo asi 1 600 km, a v USA 2 600 km. [28], [39]

Výhodou potrubí jsou jeho nízké provozní náklady, dlouhá životnost a ověřený provoz v Evropě a USA. Nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady na výstavbu nového potrubí, je problematická další expanze, kdy je potřeba další kapitál, aby se vodík dostal do distribuční sítě. A nejistota nastává, zda bude potrubí na zemní plyn akceptovat vodík. [39]

3.3.2 Vodík přepravovaný jako amoniak

Amoniak (NH_3) je syntetizován ze zemního plynu a užívaný primárně jako hnojivo, může složit i jako čistá látka pro skladování vodíku. Médium vzniká reakcí vodíku a dusíku, pomocí separátoru vzduchu, tímto způsobem vzniká syntézní amoniak, jehož výroba je velice podobná konvenční výrobě. Kapalný amoniak je následně přepravován v chladících nádržích. V okamžiku, kdy amoniak dorazí na místo, rozkládá se na dusík a vodík, prostřednictvím endotermické reakce krakování. Finální plyn je očištěn, dusík je odstraněn a vrácen do atmosféry. Malé množství amoniaku se již přepravuje, ale většina se vyrábí až na místě. [39]

Výhodou je, že syntéza amoniaku je známý proces, který může sloužit k upravení čistého vodíku tam, kde se nyní používá šedý. Díky hojnému využívání amoniaku je skladování, přeprava a manipulace s ním dobře známá. Kapalný amoniak obsahuje více vodíku než jiné transporty. [39]

Hlavní nevýhodou, proč se amoniak jako transportér vodíku asi nebude používat, jedná se o toxickou kapalinu, která v atmosféře tvoří částicové aerosoly. Což může mít následky na lidské zdraví, kvalitu půdy, vody. Proces je energeticky náročný, je potřeba dosáhnout vysokých teplot a tlaků. [39]

3.3.3 Přeprava zkapalněného vodíku

Princip je stejný jako u skladování, tedy vodík je ochlazen na $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po zkapalnění je LH_2 (liquid hydrogen) uskladněn v izolovaných a dvoustěnných nádržích. Díky této izolaci se omezují ztráty způsobené vypařováním. V těchto podmínkách se přepravuje zkapalněný plyn pomocí speciálních nákladních vozů. [28], [39]

Výhodou je, že ke koncovému uživateli se dostane velice čistý vodík. Tento vodík se používá v některých speciálních aplikacích, jako jsou například letecký nebo kosmický průmysl. [39]

Nevýhodou je nutné enormní množství energie, aby bylo možné dosáhnout předchlazení, pak i samotného procesu zkapalnění. Zároveň přeprava, manipulace a skladování jsou obtížnější než u jiných technologií, což je způsobeno specifickými podmínkami, které se musí při této teplotě udržovat. Ztráty vypařováním jsou velké, pokud je vodík přepravován na dlouhé vzdálenosti. [39]



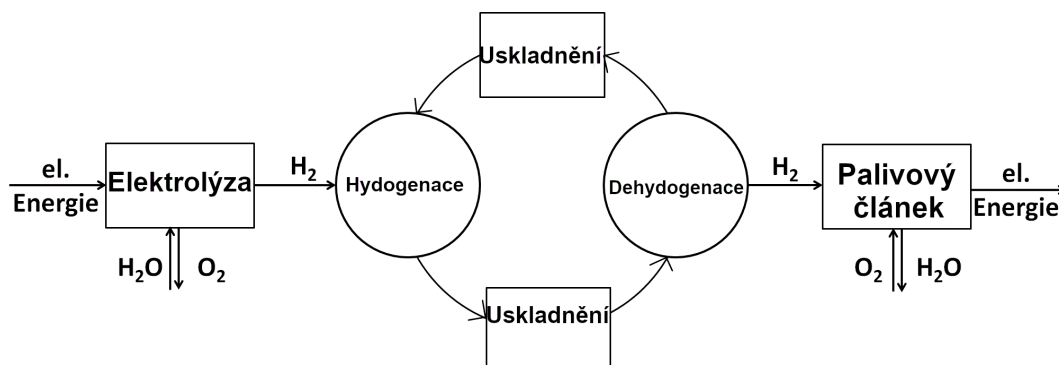
Obr.14 Nákladní vůz přepravující zkapalněný vodík [40]

3.3.4 Vodík přepravovaný v kapalných nosičích vodíku (LOHC)

Kapalné organické nosiče vodíku jsou snadno přepravitelné chemické sloučeniny, které jde zpětně hydratovat a dehydratovat. Hydrogenační proces spočívá ve vázání vodíku na kapalnou organickou sloučeninou. Lze jej přepravovat při atmosférickém tlaku, podobným způsobem jako jiné olejnaté látky. Po transportu je vodík uvolněn endotermickou reakcí, přesněji dehydrogenací. Dehydrogenovaný LOHC (liquid organic hydrogen carriers) lze znovu navázat na další vodík, tedy je znovupoužitelný. Využít lze řadu organických nosičů, jako jsou například toluen, dibenzyltoluen, benzyltoluen. [39]

Výhodou je, že jsou snadno skladovatelné, přepravitelné a lze s nimi jednoduše manipulovat. Má dobré viskózní vlastnosti při atmosférickém tlaku i za nižších teplot. Nedochází ke ztrátám vodíku, což umožňuje dlouhodobé skladování velkých objemů. [39]

Nevýhodou však je, že je potřeba dosáhnout vysokých teplot, aby došlo k dehydrogenaci LOHC. Pro velké objemy vodíku je potřeba mít i velké objemy LOHC. [39]



Obr.15 Schéma LOHC, upraveno [41]

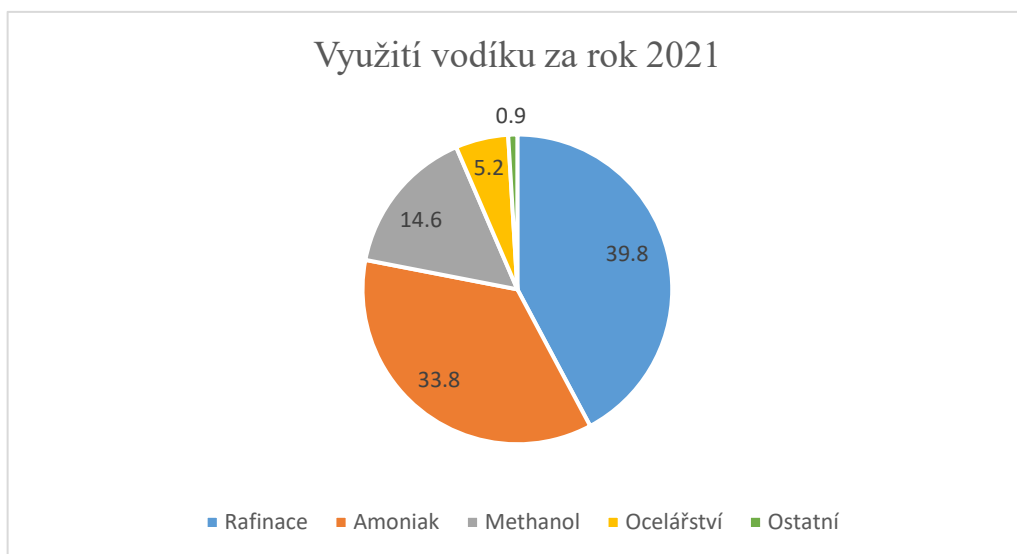
3.4 Využití technologie Power to Gas

Vodík a methan jsou již hojně v mnoha odvětvích využívány. S dodatečnou výrobou z důvodu technologie Power to Gas (P2G) se mohou otevřít další možnosti využití.

Výroba vodíku z přebytku obnovitelných zdrojů elektrické energie musí nahradit vodík vyráběný neekologickými způsoby (např. parní reforming). Z 1 TWh přebytku elektřiny je možné vyrobit až 200 milionů m_N^3 vodíku. [28]

3.4.1 Průmysl

Vodík je často používán v petrochemickém průmyslu k odsíření. Dalším důležitým využitím je výroba čpavku do hnojiv. Kromě petrochemického průmyslu a výroby amoniaku se používá v mnoha dalších odvětvích, jako jsou ocelářství, elektronika, výroba lehkých chemikálií atd. [28]



Graf 1: Využití vodíku v průmyslu za rok 2021 v MT [50]

3.4.2 Power-to-Gas-to-Power (P2G2P)

Dochází ke generování elektřiny pomocí vodíku nebo methanu vyrobeného elektrolýzou nebo metanizací. Tuto přeměnu již využívá celá řada technologií: kogenerační jednotky, palivové články a paroplynové elektrárny. [28]

Kogenerace (CHP) je technologie, která produkuje elektřinu a tepelnou energii s vysokou účinností. Díky výrobě energie na místě jsou tepelné ztráty minimální. Pokud k uvolnění tepla dojde, slouží k vytápění a výrobě páry. [42]

3.4.3 Palivový článek

Tato technologie pracuje na stejném principu jako elektrolýza s polymerním elektrolytem (PEM elektrolýza) (kapitola 2.3.3), jenže kyslík s vodíkem jsou vstřikovány za vzniku elektřiny. V současnosti nejpoužívanějším palivem je vodík, ale ten se nehodí do všech aplikací. Občas je potřeba užít tzv. nepřímé palivo, ze kterého se vodík uvolňuje nejčastěji reformingovým procesem. Jako nejčastější nepřímá paliva se využívají zemní plyn, methanol, nebo methan. Celková účinnost závisí na typu palivového článku, ale obecně se dá říci, že elektrická účinnost je 50-60 % a účinnost termická až 90 % pokud je teplo rekuperováno a v palivovém článku probíhá exotermická reakce. [28], [43]

Tím, že většina palivových článků obsahuje katalyzátory na bázi slitin platiny, je nutné reformingem odstranit oxid uhelnatý, protože má špatný vliv na katalyzátor. [43]

Palivové články se můžou dělit podle typu elektrolytu nebo provozní teploty.
Palivové články podle provozní teploty se dělí na:

- nízkoteplotní (60-130 °C), [28], [43]
- středněteplotní (160-220 °C), [28], [43]
- vysokoteplotní (600-1050 °C). [28], [43]

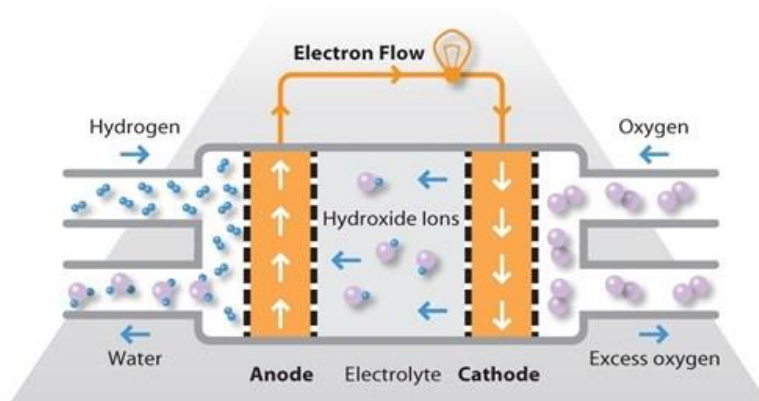
Podle typu elektrolytu:

- s alkalickým elektrolytem (AFC – alkaline fuel cell), [28], [43]
- s polymerní iontoměničovou membránou (PEMFC – proton exchange membrane fuel cell), [28], [43]
- s kyselinou fosforečnou (PAFC – phosphoric acid fuel cell), [28], [43]
- pro přímou reakci methanolu (DMFC – direct methanol fuel cell), [28], [43]
- s taveninou alkalických uhličitů (MCFC – molten carbonate fuel cell), [28], [43]
- s pevným oxidickým elektrolytem (SOFC – solid fuel cell). [28], [43]

Typ palivového článku	Průměrná provozní teplota [°C]	Palivo anody	Katalyzátor	Elektrolyt
PEMFC	80-120	H ₂	platina	hydratovaná membrána
DMFC	110	CH ₃ OH (methanol)	platina	kyselina methansulfanová (CH ₄ O ₃ S)
AFC	170-200	H ₂	platina	85% KOH
MCFC	70-220	H ₂	není nutný	uhličitanový elektrolyt
SOFC	800-900	CH ₄	anoda: nikl katoda: perkovskit (CaTiO ₃)	zirkonium
PAFC	650	H ₂	platina	100% H ₃ PO ₄

Tabulka 2 Specifikace palivových článků [28], [43]

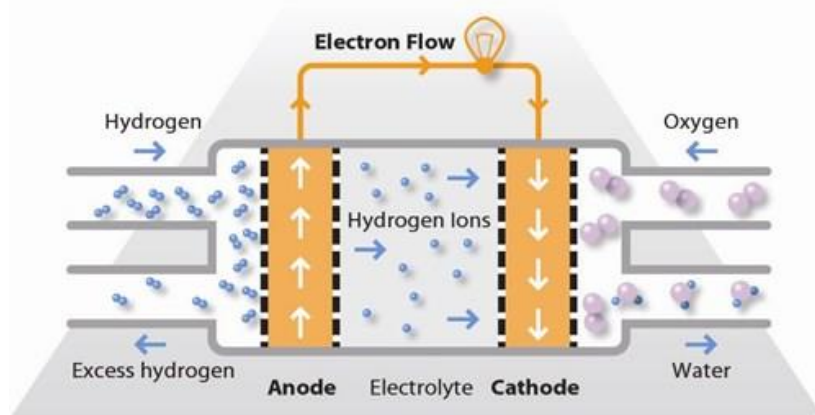
Palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC) se řadí k prvním z moderních palivových článků. Má vynikající výkon při využití vodíku a kyslíku ve srovnání s ostatními palivovými články. Lze použít i methan, ale ten je nutné přeměnit na vodík. Účinnost palivového článku při použití čistého vodíku se pohybuje okolo 60 %. Jako elektrolyt se používá 85% roztok KOH, pro články, které mají pracovní teplotu okolo 260 °C a 35-50% roztok KOH při nižších provozních teplotách. KOH používá nejvíce, z důvodu jeho vodivosti, která je ze všech roztoků alkalických kovů nejvyšší. Elektrolyt je fixován v matici a je možné použít celou řadu katalyzátorů, např. nikl, stříbro. Používá se pro vesmírný a vojenský průmysl. Nevýhoda je velikost palivového článku a citlivost znečištění vodíku a kyslíku. Výhodou jsou nízké náklady na díly, provoz a vysokou reakční rychlost katody. Nevýhodou tohoto palivového článku je jeho rozměr. AFC je větší než třeba PEMFC a jako palivo je nutný čistý kyslík a vodík. CO₂, které je v ovzduší obsažené může poškodit palivový článek, tedy je nutné AFC palivový článek používat pouze pro speciální účely. Primárně se používá v kosmonautice a letectví. [28], [43], [44]



Obr. 16 Schéma AFC palivového článku [49]

Palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC) je typický svou vysokou proudovou hustotou. Tyto palivové články umožňují mít konstrukci s nižší hmotností a menšími rozměry. Díky pevné elektrolytické membráně nedochází k takovému opotřebení koroze a tím se zvyšuje životnost palivového článku. PEMFC pracuje při nižších teplotách, což dovoluje okamžitou odezvu výkonu, který je potřeba a zároveň neprodukuje teplo, které by bylo potřebné pro endotermickou reakci reformingu paliva. Je to ideální palivový článek pro pohon vozidel. Současné PEMFC využívají jako elektrolyt pouze samotnou hydratovanou membránu, protože palivový článek pracuje při nízkých teplotách. Platina je ideální katalyzátor. Je dostatečně reaktivní, aby se vážalo k vázání H^+ a O^{2-} na elektrody. Využívá se pro přenosné i stacionární použití, nebo automobilový průmysl. Jedná se o kompaktní provedení, má dlouhou životnost a rychlý náběh. Nevýhodou jsou vysoké náklady na výrobu, hlavně drahý katalyzátor. Potřebuje palivo o vysoké chemické čistotě a je složité regulovat teplotu a množství vody. Pokud je systém suchý, je nutné přidat vodu, aby bylo vůbec možné palivový článek nastartovat. Zároveň v případě velkého množství vody dojde k zatopení palivového článku. Aby nedošlo k ucpání membrán je nutné, aby dodaný vodík byl vysoké chemické čistoty. [28], [43] [44]

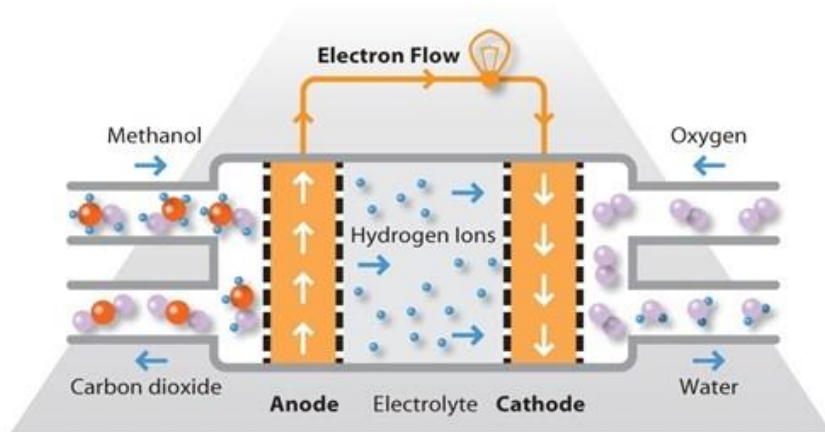
Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC) je středněteplotní palivový článek, jehož provozní teplota je $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na anoda se využívá přibližně $0,1\text{ mg Pt/cm}^3$ a na katodě $0,5\text{ mg Pt/cm}^3$. Elektrolytem je 100% roztok kyseliny fosforečné (H_3PO_4). Lze tímto termočlánkem dosáhnout středního až velkého výkonu. Dobře snáší nečistoty v palivu. Má však nízkou účinnost, okolo 40 %, omezenou životnost a z důvodu platiny velice drahý katalyzátor. [28], [43], [44]



Obr. 17 Schéma PEMFC palivového článku [47]

Palivový článek s uhličitánovou taveninou (MCFC) je vysokoteplotní palivový článek, který pracuje při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vysoká pracovní teplota je nutná, aby uhličitánový elektrolyt byl dostatečně vodivý a bylo možné použít levné kovové součásti článku. V této teplotě není potřeba drahých kovů jako katalyzátory. Jako elektrolyt se typicky používá roztok 62 mol% Li_2CO_3 a 38 mol% K_2CO_3 , které jsou fixovány v $LiAlO_2$ matici. Anoda bývá vyrobena ze slitin niklu a katoda jeho oxidy. Tímto palivovým článkem se dosahuje vysokých výkonů. Má vysokou účinnost, není nutně vázán na jedno palivo. Je nutné však mít vysokou teplotu, která způsobuje korozi a s ní spjatou i krátkou životnost. Účinnost tohoto palivového článku je mezi 45-50 %. [43], [44]

Palivový článek pro přímou reakci methanolu (DMFC) využívá methanolu, tedy klasických kapalinových paliv, místo vodíku. Pracovní teplota se pohybuje okolo 110 °C. Využívá se pro mobilní, stacionární i přenosné použití. Výhodou je, že se jedná o kompaktní palivový článek, který nepotřebuje žádný kompresor. Nevýhodou je obtížné uspořádat palivový článků do souboru, pomalá odezva a nízká účinnost (20 %). [43], [44]

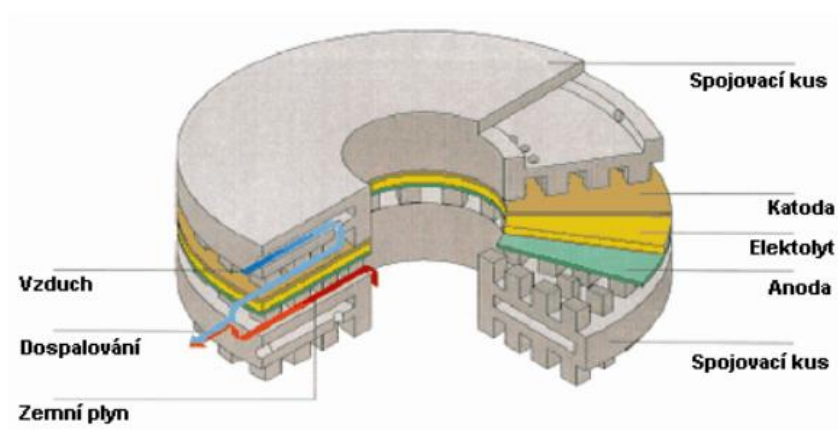


Obr. 18 Schéma DMFC [48]

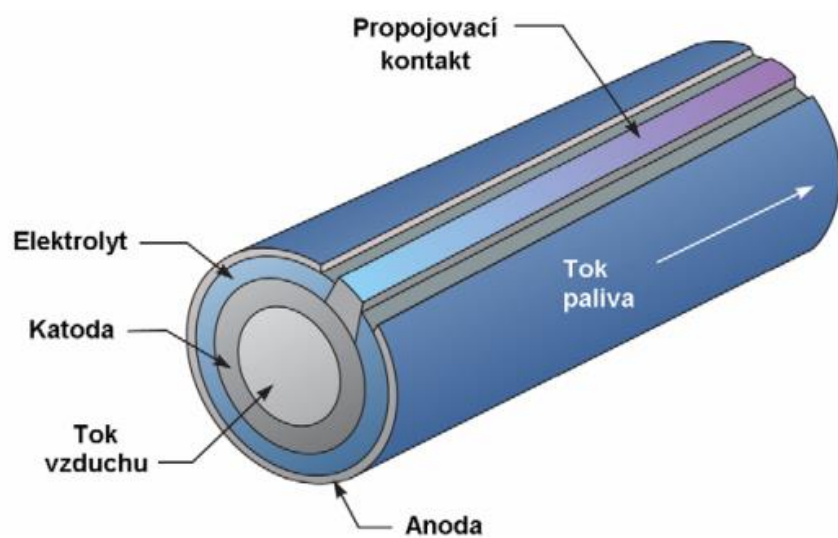
Palivový článek s pevným elektrolytem (SOFC) se řadí mezi vysokoteplotní palivové články s pracovní teplotou okolo 800-900 °C. SOFC neobsahuje žádný kapalný elektrolyt, tedy není žádný problém s korozí doprovodného materiálu. Díky vysoké teplotě v palivovém článku je možné užití spalin ke kogeneraci (společná výroba tepla a elektřiny). SOFC palivové články se vyrábí dva typy: deskové a turbulentní. Vysoká provozní teplota umožňuje vnitřní reforming paliva, která podstatně zvyšuje rychlost elektrochemické reakce oproti jiným typům palivových článků. I přes tepelné ztráty je možné dosáhnout vysokých účinností. Anoda je většinou tvořena slitinou Ni a Y_2O_3 se stabilizovanou mřížkou ZrO_2 . Jako elektrolyt se používají materiály na bázi zirkonia, protože mají vysokou anodovou vodivost. Nejčastěji používaný elektrolyt je ZrO_2 s 8 mol% Y_2O_3 . Používá se k dosažení středního až velkého výkonu. Palivový článek má vysokou účinnost (60 %), nemá velké nároky na palivo, je možné využít zemní plyn místo vodíku. Nevýhodou je dlouhý náběh a krátká životnost. Zároveň i teplota článků je velice vysoká a musí být vyrobeny ze speciálních materiálů. [43], [44]

Platina je sice vynikající katalyzátor, ale má i řadu nevýhod.

- Cena: která byla 33,11 USD/g k 26.5.2023 [64],
- Omezená dostupnost: tím, že se platina musí vytěžit, je jen omezené množství platiny [51]
- Obtížné opracování: není tak poddajná jako zlato nebo stříbro [51]
- Může způsobovat alergické reakce: může nastat podráždění kůže [51]



Obr. 19 Deskový typ SOFC [43]



Obr. 20 Turbulentní typ SOFC [43]

4 Bilanční výpočet získání vodíku z malé solární elektrárny

Cílem této části bakalářské práce je navrhnout akumulační systém elektrické energie z fotovoltaických panelů instalovaných na střechu domu. Výpočet bude provedený se solárními panely instalovanými pod úhlem 45° a 60° a s azimutem na jih. Většinou se solární panely instalují pod úhlem 30-45°, v zimě potřeba, aby byly pod úhlem 60-75°, protože je Slunce níže nad obzorem. Byl zvolený alkalický elektrolyzátor, viz kapitola 2.3.1, v něm probíhá elektrolýza při 80 °C a byl by vhodný pro instalaci do rodinného domu.

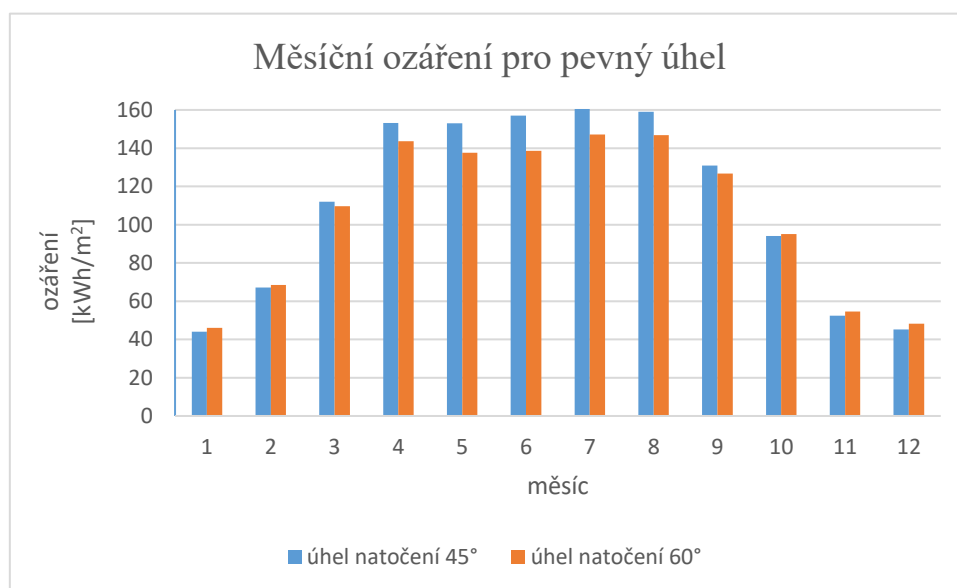
4.1 Výpočet vyrobené elektrické energie

Na bilanční výpočet byla zvolena adresa Zákostelní 659, 391 11, Planá nad Lužnicí.

Nejdříve je nutné zjistit kolik sluneční energie průměrně za každý měsíc na solární panely dopadne. Na toto zjištění byla využita webová stránka PGIS [58].

měsíc	úhel natočení 45° [kWh/m ²]	úhel natočení 60° [kWh/m ²]
leden	44,09	46,05
únor	67,22	68,55
březen	111,96	109,74
duben	153,11	143,66
květen	153,08	137,66
červen	156,97	138,66
červenec	165,02	147,13
srpen	159,03	146,79
září	130,97	126,78
říjen	94,13	95,15
listopad	52,41	54,59
prosinec	45,24	48,24

Tabulka 3 Energie slunečního svitu v jednotlivých měsících



Graf 2: Zachycená sluneční energie pod různými úhly natočení

Z grafů je viditelné, že úhel natočení 60° je v zimě výhodnější, ale od března do září, kdy svítí Slunce už delší dobu je výhodnější úhel natočení 45°. Za celý rok zachytí více sluneční energie úhel natočení 45°, přesněji o 5,1 %.

Když je zjištěno, kolik dopadá pod různými úhly natočení sluneční energie, je možné si spočítat kolik této sluneční energie se přemění na energii elektrickou. Deset solárních panelů je od firmy Jinko Solar, model Tiger Neo 78HC-BDV. Výkon jednoho panelu je 0,625 kWp, účinnost tohoto solárního panelu je 22,36 % a činná plocha jednoho panelu je 2,79531 m².

Na zjištění, kolik sluneční energie se přemění na elektrickou lze užít dva způsoby. První je již ze zmíněné webové stránky, kde se zadá výkon [kWp] a účinnost [%]. Druhý je pomocí daného výpočtu.

$$E_{FV} = 0,9 \cdot \frac{\eta_{FV}}{100} \cdot H_T \cdot A_{FV} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) \cdot 10 [kWh]$$

η_{FV} ...účinnost solárního panelu

H_T ...měsíční dávka slunečního ozáření

A_{FV} ...činná plocha instalovaných fotovoltaických panelů

p ...srážka vlivem elektrických ztrát

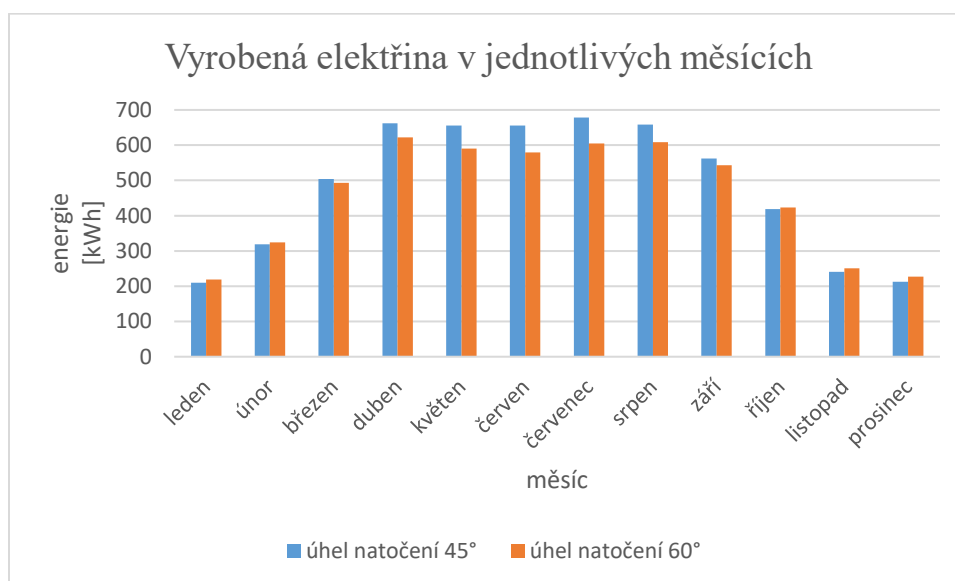
0,9 jsou optické ztráty vlivem nekolmého úhlu dopadu slunečního záření během roku. Elektrické ztráty se dají jednoduše uvažovat jako: ztráty na DC vedení 2 %, ztráty na měniči a sledovači výkonu maxima 5 % a ztráty na AC vedení 1 %, takže srážka vlivem elektrických ztrát je 8 %.

měsíc	úhel natočení 45° [kWh]	úhel natočení 60° [kWh]
leden	228,18	238,32
únor	347,88	354,76
březen	579,42	567,93
duben	792,38	743,48
květen	792,23	712,43
červen	812,36	717,60
červenec	854,02	761,44
srpen	823,02	759,68
září	677,80	656,12
říjen	487,15	492,43
listopad	271,24	282,52
prosinec	234,13	249,65

Tabulka 4 Vyrobená elektrická energie podle výpočtu

měsíc	úhel natočení 45° [kWh]	úhel natočení 60° [kWh]
leden	209,81	218,97
únor	318,84	324,61
březen	504,31	493,54
duben	662,35	621,9
květen	655,94	590,09
červen	656,08	579,31
červenec	678,59	605,12
srpen	658,5	608,36
září	561,74	543,52
říjen	419,07	422,97
listopad	241,16	250,9
prosinec	213,07	227,16

Tabulka 5 Vyrobená elektrická energie podle webu PGIS



Graf 3: Vyrobená elektřina v jednotlivých měsících podle webu PGIS [58]

Je zde viditelné, že se hodnoty od sebe liší. Vypočítané hodnoty neberou v potaz, že s vyšší teplotou klesá účinnost solárních panelů. Pokud teplota vzroste o 1 °C klesá účinnost o 0,1 %. Ideální teplota pro solární panely je 25 °C [65].

Je ještě možné mít instalaci solárních panelů, které by měnily v průběhu dne úhel natočení a azimutu, ale hodnoty jsou velice podobné hodnotám, které byly zjištěny pod úhlem natočení 45°. Instalace solárních panelů s měnícím se úhlem a azimutem na střechu by byla velice komplikovaná.

4.2 Uskladnění vodíku

Nyní když je vyrobena elektřina ze solárních panelů je možné tuto energii uskladnit. Budeme uvažovat nad tím, že vodík bude uskladněn ve formě stlačené anebo ve formě zkapalněné.

Je důležité poznamenat, že účinnost všech zařízení uvedených již zahrnuje spotřebovanou elektrickou energii. Tedy, výsledné účinnosti daných zařízení již zahrnuje množství energie, které spotřebuje.

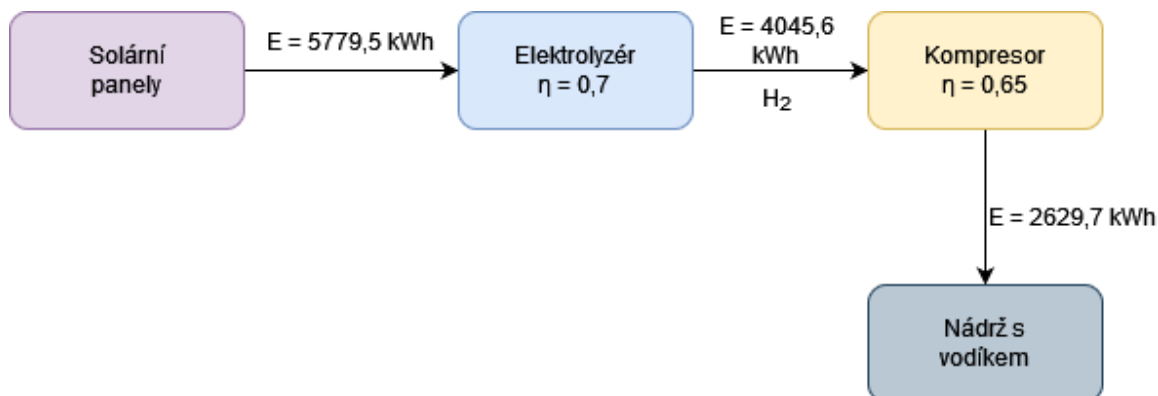
Vyrobená elektrická energie bude brána podle webu PGIS [58].

úhel natočení 45° [kWh]	úhel natočení 60° [kWh]
5779,46	5486,45

Tabulka 6 Vyrobená elektrická energie za rok

4.2.1 Stlačený vodík

Součástí této přeměny elektrické energie bude elektrolyzátor, ve kterém bude probíhat elektrolyza vody a kompresor, který vodík stlačí na 35 MPa. Přeměna bude probíhat za teploty 25 °C.



Obr. 21 Schéma procesu přeměny elektrické energie na stlačený vodík

$$E_{celk} = 5779,46 \text{ kWh}$$

$$\eta_{elektrolyzér} = 0,7 \text{ (účinnost elektrolyzátoru)}$$

$$\eta_{kompresor} = 0,65 \text{ (účinnost kompresoru) [61]}$$

$$H_{H_2} = 96 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 26,67 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ (výhřevnost vodíku, udává, kolik paliva se uvolní dokonalým spálením 1 kg, přičemž vodní pára nebude kondenzovat) [59]}$$

$$1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 0,2778 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$M_{H_2} = 2,016 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ (molární hmotnost vodíku)}$$

$$E = E_{celk} \cdot \eta_{elektrolyzér} \cdot \eta_{kompresor} = 5779,46 \cdot 0,7 \cdot 0,65 = 2\,629,85 \text{ kWh}$$

Poté co se část elektřiny spotřebuje v elektrolyzátoru a kompresoru je možné spočítat kolik kilogramů vodíku bude získáno.

$$m_{H_2} = \frac{E}{H_{H_2}} = \frac{2629,85}{26,67} = 98,6 \text{ kg}$$

Celoroční zisk vodíku ze solárních panelů je necelých 100 kg.

$$n_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{98,6}{0,002016} = 48\,908,587 \text{ mol}$$

Za pomoci stavové rovnice bude proveden výpočet potřebného objemu takového množství vodíku.

$$t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_m = 8,314\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ (univerzální plynová konstanta)}$$

$$p_{H_2} = 35\text{ MPa}$$

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T$$

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot R_m \cdot T}{p_{H_2}} = \frac{48908,587 \cdot 8,314 \cdot (273,15 + 25)}{35 \cdot 10^6} = 3,46\text{ m}^3$$

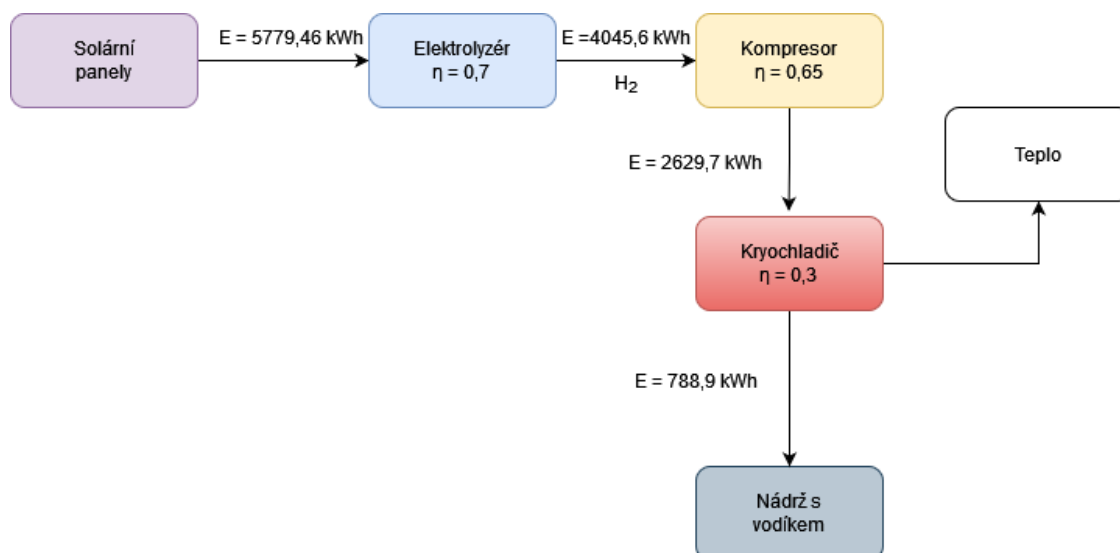
Provedením stejného výpočtu i pro úhel natočení 60° bude hmotnost 93,6 kg a objem 3,29 m^3 vodíku.

	úhel natočení 45°	úhel natočení 60°
hmotnost	98,6 kg	93,6 kg
objem	3,46 m^3	3,29 m^3

Tabulka 7 Objem a hmotnost stlačeného vodíku

4.2.2 Zkapalněný vodík

Součástí této přeměny bude stejně jako u stlačeného vodíku elektrolyzátor a kompresor, ale zároveň je nutné, aby došlo i k ochlazení vodíku na $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. To se provádí za pomoci kryochladiče.



Obr.22 Schéma procesu přeměny elektrické energie na zkapalněný vodík

$$\eta_{\text{elektrolyzér}} = 0,7 \text{ (účinnost elektrolyzéro)}$$

$$\eta_{\text{kompresor}} = 0,65 \text{ (účinnost kompresoru)}$$

$$\eta_{\text{kryo}} = 0,3 \text{ (účinnost kryochladiče) [62]}$$

$$H_{H_2} = 26,67 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ (výhřevnost vodíku)}$$

$$M_{H_2} = 2,016 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ (molární hmotnost vodíku)}$$

$$E = E_{\text{celk}} \cdot \eta_{\text{elektrolyzér}} \cdot \eta_{\text{kompresor}} \cdot \eta_{\text{kryo}} = 5779,46 \cdot 0,7 \cdot 0,65 \cdot 0,3 = 788,896 \text{ kWh}$$

Z důvodu přítomnosti kryochladiče je množství elektrické energie výrazně nižší.

$$m_{H_2} = \frac{E}{H_{H_2}} = \frac{788,896}{26,67} = 29,58 \text{ kg}$$

$$n_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{29,58}{0,002016} = 14\,672,58 \text{ mol}$$

$$t = -253 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_m = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \text{ (univerzální plynová konstanta)}$$

$$p_{H_2} = 35 \text{ MPa}$$

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T$$

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot R_m \cdot T}{p_{H_2}} = \frac{14672,58 \cdot 8,314 \cdot (273,15 + (-253,15))}{35 \cdot 10^6} = 0,07 \text{ m}^3$$

Když bude provedený stejný výpočet i pro úhel natočení 60°, vyjde objem 66,2 litrů.

	úhel natočení 45°	úhel natočení 60°
hmotnost	29,58 kg	28,1 kg
objem	0,07 m ³	0,0662 m ³

Tabulka 8 Objem a hmotnost zkapalněného vodíku

Zhodnocení

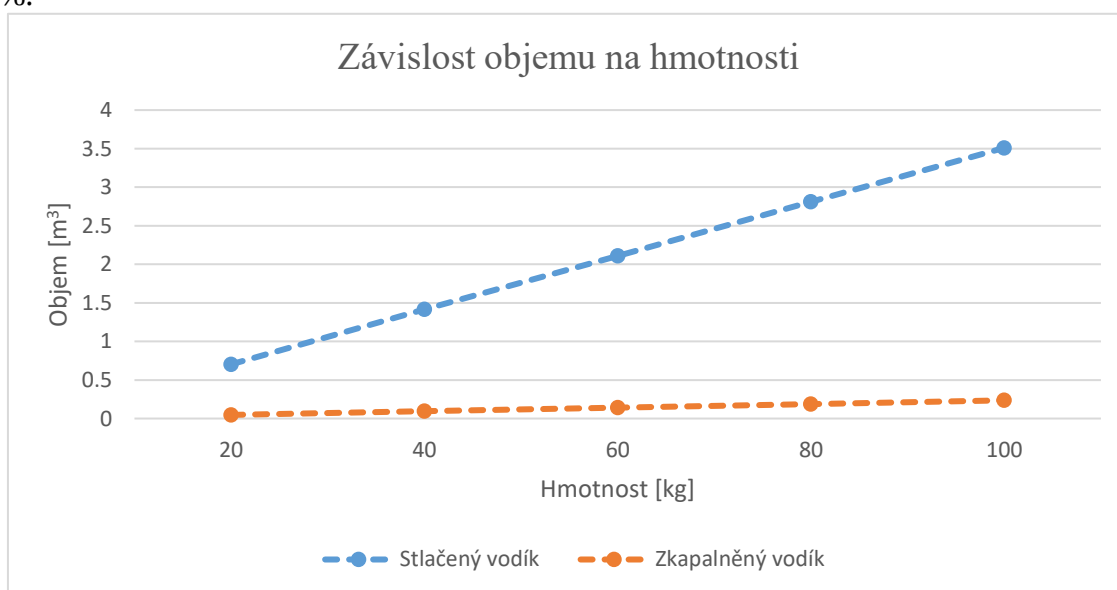
Stlačený vodík zabírá velký objem, ale procento vodíku, které bylo získáno z vyrobené elektrické energie je větší než u zkapalněného vodíku. Zkapalněný vodík zabírá menší objem díky teplotě, při které je uchováván, ale aby bylo možné na tuto teplotu dostat, je nutné použít kryochladič. Účinnost kryochladiče je 30 %. Tím pádem bude množství vodíku ve zkapalněné formě mnohonásobně menší.

	stlačený vodík		zkapalněný vodík	
úhel natočení	45°	60°	45°	60°
hmotnost	98,6 kg	93,6 kg	29,58 kg	28,1 kg
objem	3,46 m ³	3,29 m ³	0,07 m ³	0,0662 m ³
celková elektrická energie	2629,7 kWh	2496,3 kWh	788,896 kWh	748,9 kWh

Tabulka 10 Souhrn vypočítaných hmotností a objemů

Stlačený vodík by šel použit jako palivo do automobilu. Dle [19] je možné ujet na 1 kg stlačeného vodíku až 280 km. Pokud by stlačený vodík byl použitý čistě jako palivo do auta, bylo by tedy možné ujet necelých 28 000 km. A pokud se podle statistik ujede automobilem průměrně 10 000 – 20 000 km, tak by získaný vodík stačil na celoroční provoz automobilu [60].

Dalším využitím získaného vodíku by byla technologie Power to Gas to Power. Získaný vodík by se mohl využít jako palivo do palivového článku. Bylo by možné využít palivový článek AFC, který je schopný pracovat při relativně nízkých teplotách. Účinnost tohoto palivového článku je okolo 60 %. Celková účinnost se stlačeným vodíkem by byla necelých 30 %.



ZÁVĚR

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. V první části, která je rešeršní, jsou rozepsána témata o vodíku, jeho výrobě a možném použití.

První kapitola je podrobněji věnována samotnému vodíku. Jsou zde rozebrány jeho fyzikálně-chemické vlastnosti, dále kde v přírodě můžeme vodík nalézt, jaké je využití vodíku a molekul z něho spojených a poslední podkapitolou je jeho rozdělení podle technologie výroby.

Druhá kapitola je věnována samotné výrobě vodíku z fosilních paliv, štěpení vody nebo výrobě z biomasy. Metody výroby vodíku jsou mezi sebou porovnány.

Třetí kapitola je již věnována technologii Power to Gas a možnému uložení elektrické energie do vodíku. První část této kapitoly je věnována metanizaci, tedy přeměně vodíku na syntetický methan a jejímu rozdělení. Druhá část je věnována uskladnění vodíku v různých formách, např. zkapalnění, stlačení, atd.. Popsány jsou výhody i nevýhody jednotlivých metod uskladnění. Dále je v kapitole rozepsána možnost transportu vodíku a jeho možného využití. A v poslední části třetí kapitoly je využití technologie Power to Gas. Využitím technologie Power to Gas jsou palivové články. Popsány jsou jednotlivé palivové články společně s jejich výhodami a nevýhodami. Poslední popsání využití je technologie Power to Gas to Power.

Druhá část je praktická. Cílem bylo provést bilanční výpočet získání vodíku ze solárních panelů instalovaných na střechu rodinného domu. Byly provedeny výpočty přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Byly zvoleny dvě metody uskladnění. První metoda byla uskladnění stlačeného vodíku v nádrži a druhá metoda bylo uskladnění pomocí zkapalněného vodíku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Výroba vodíku. Devinn [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku/>
- [2] Základní informace k vodíku. HYTEP [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [3] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. 2., přepr. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 254 s. : il. ISBN 80-7080-619-2.
- [4] VRBOVÁ, Zuzana. *Zelený, modrý, šedý vodík. Co je stále třeba vyjasnit v legislativě?* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2021 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/zeleny-modry-sedy-vodik-stale-treba-vyjasnit-legislative>
- [5] Výroba a použití vodíku. Chemistry [online]. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 2020 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/VODIK_vyroba_a_pouziti.pdf
- [6] PELÁN, O. *Výroba vodíku elektrolýzou a možnosti zvyšování účinnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ján Poláček
- [7] Elektrolýza vody. In: ZŠ Letohrad [online]. ZŠ Letohrad [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.zsletohrad.cz/eu/chemie/foto/pokus10/foto5.jpg>
- [8] Vodíková energetika. ČEZ [online]. Praha: ČEZ, [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/vodikova-energetika/vyklad>
- [9] Vodík. *Vysoká škola chemicko-technologická* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>
- [10] Závislost hustoty destilované vody na teplotě. In: *Fyzikální pokusy* [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: https://fyzikalnipokusy.cz/media/01656/anomalie_velky.full.tagged.png
- [11] Závislost objemu vody na teplotě. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/Termo_4_kapaliny_skupenstvi_soubory/image056.png
- [12] Prvky [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>
- [13] Deuterium [online]. Praha: ČEZ, 1999 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/deuterium.html>
- [14] Tritium. ČEZ [online]. Praha, 1999 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/tritium.html>
- [15] *Vodík* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://energouzrouti.cz/wiki/vodik#pouzitiVodiku>
- [16] Vodík a jeho využití. EnviWeb [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/95892>
- [17] Řešení využití a spotřeby vodíku. TUV SÜD [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie/spotreba-vodiku>
- [18] *Hydrogenace a dehydrogenace* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://canov.jergym.cz/barva/r/hy.html>

- [19] ČERMÁK, Ladislav. Vodíková plnicí stanice na Barrandově už je otevřena. *Novinky.cz* [online]. 2023, 10.3.2023 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/vodikova-plnici-stanice-na-barrandove-uz-je-otevrena-10356>
- [20] CCU [online]. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-ccs-how-does-it-work>
- [21] Šedý, modrý, zelený aneb Není vodík jako vodík [online]. 2021 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/119182>
- [22] *Vodík a zmírňování klimatické změny (mitigace)* [online]. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk#Vod%C3%ADk_a_zm%C3%ADrn%C4%9Bn%C3%AD_klimatick%C3%A9_zm%C4%9Bny_\(mitigace\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk#Vod%C3%ADk_a_zm%C3%ADrn%C4%9Bn%C3%AD_klimatick%C3%A9_zm%C4%9Bny_(mitigace))
- [23] *Využití vodíkových technologií v energetice* [online]. 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologii-v-energetice-228>
- [24] *Výroba vodíku elektrolýzou vody* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.hydro-race.eu/V%C3%BDroba-vod%C3%ADku-elektrol%C3%BDzou-vody>
- [25] Carmo, Marcelo ; Fritz, David L. ; Mergel, Jürgen ; Stolten, Detlef ; OXFORD: Elsevier Ltd International journal of hydrogen energy, 2013, Vol.38 (12), p.4901-4934
- [26] Princip jednotlivých technologií elektrolýzy vody. In: *All for Power* [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://allforpower.cz/images/Mjg5OXgweDA=/centrum-rez_01.jpg
- [27] Schmidt, O. ; Gambhir, A. ; Staffell, I. ; Hawkes, A. ; Nelson, J. ; Few, S. ; OXFORD: Elsevier Ltd International journal of hydrogen energy, 2017, Vol.42 (52), p.30470-30492
- [28] BOUDELLAL, Méziane. *Power-to-gas: renewable hydrogen economy*. Berlin: De Gruyter, 2018, xiii, 211 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-3-11-055881-4.
- [29] *Akumulace energie přeměnou elektřiny na plyn* [online]. 2017 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3088/3072>
- [30] Půlpán, P. *Návrh metalizační linky*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2021. 94 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
- [31] *Fluidizace* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/fluidizace-fluidisace>
- [32] *What is Hydrogen Storage and How does it work?* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-hydrogen-storage#HowDoesitWorkisitStored>
- [33] *Chemical Hydrogen Storage Materials* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/chemical-hydrogen-storage-materials>
- [34] Hydrogen Storage. In: *Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/default/files/styles/full_article_width/public/fcto_storage_tree_chart2.png?itok=bbg2lBYZ
- [35] KRUCK, Olaf, Fritz CROTOGINO, Ruth PRELICZ a Tobias RUDOLPH. Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen. *HyUnder* [online]. 14.8.2013, 93 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.1_Overview-of-all-known-underground-storage-technologies.pdf
- [36] *H2 in the underground: Are salt caverns the future of hydrogen storage?* [online]. ENGIE, 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://innovation.engie.com/en/news/news/did-you-know-/hydrogen-underground-storage-salt-caverns/25906>
- [37] *Zásobníky plynu v České republice* [online]. OEnergetice.cz, 2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zasobniky-plynu-v-cr>

-
- [38] Zemní plyn. In: ČEZ [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images/02/CR_Plynovod.gif
- [39] WEICHENHAIN, Uwe. *Hydrogen transportation The key to unlocking the clean hydrogen economy* [online]. ROLAND BERGER, 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://www.rolandberger.com/publication_pdf
- [40] Kawasaki Hydrogen Road: Paving the way for a hydrogen-based society. In: *Kawasaki Hydrogen Road* [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://global.kawasaki.com/en/hydrogen/assets/img/hr_img11.jpg
- [41] Liquid organic hydrogen carriers. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Schema-Energiespeicherung_ueber_chemischer_H2-Speicherung.png
- [42] What Is CHP?. *United States Enviromental Protection Agenda* [online]. 2022, 1.6.2022 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/chp/what-chp>
- [43] PORŠ, Zdeněk. Palivové články. ČEZ [online]. 2002 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [44] Jak fungují palivové články?. *Tzbinfo* [online]. 2018, 22.2.2018 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>
<https://www.solidsun.cz/prispevky/intenzita-slunecniho-zareni-v-ceske-republice-vyplati-se-vlastni-solarni-elektrarna-248.php>
- [46] *What Are The Colours Of Hydrogen And What Do They Mean?* [online]. In: . [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://proaccionaau.blob.core.windows.net/media/cm3hg1dy/hydrogen-colours-blog.png>
- [47] PEMFC - *FuelCellsWorks* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://img.fuelcellsworks.com/wp-content/uploads/2018/09/technology_pem.jpg
- [48] DMFC - *FuelCellsWorks* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://img.fuelcellsworks.com/wp-content/uploads/2018/09/technology_dmfc.jpg
- [49] AFC - *FuelCellsWorks* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://img.fuelcellsworks.com/wp-content/uploads/2018/09/technology_afc.jpg
- [50] Hydrogen. *IEA* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>
- [51] Advantages and Disadvantages of Platinum Metal. *ThePipingMart* [online]. 2022 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://blog.thepipingmart.com/metals/disadvantages-and-advantages-of-platinum-metal/>
- [52] Hydrogen storage. *PennState* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/726>
- [53] Hydrogen Production: Biomass Gasification. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>
- [54] Ammonia. *Mosaic* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.cropnutrition.com/resource-library/ammonia>
- [55] Amoniak (čpavek) [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/amoniak-cpavek>
- [56] Voda v přírodě. *Severomoravské vodovody a kanalizace Ostrava a.s.* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://smvak.cz/voda-v-prirode>
- [57] Uhlovodíky - základ organické chemie. *Maturitníotazky.cz* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.vysokeskoly.cz/maturitniotazky/chemie/uhlovodiky-zaklad-organicke-chemie>

-
- [58] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [59] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [60] Češi najedou autem nejčastěji 10.000 až 20.000 kilometrů ročně. *Deník.cz* [online]. 2013, 15.11.2013 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.denik.cz/z_domova/cesi-najedou-autem-nejcasteji-10-000-az-20-000-kilometru-rocne-20131114.html
- [61] Jaké parametry se udávají u kompresorů?. *Airconsult* [online]. 2016 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.airconsult.cz/clanky/blog/jake-parametry-se-udavaji-u-kompresoru>
- [62] High-Capacity and Efficiency Stirling Cycle Cryocooler. *Cryocooler.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://cryocooler.org/resources/Documents/C18/021.pdf>
- [63] Hydrogenační reakce. In: *Mettler Toledo* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://www.mt.com/cz/cs/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/Reaction_Analysis_Hydrogenation.html
- [64] Cena a grafy platiny. *Zlataky.cz* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://zlataky.cz/cena-platiny-a-grafy-platiny>
- [65] Fotovoltaické panely a zimní provoz. *Sunvexx.cz* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.sunvexx.cz/fotovoltaiicke-panely-a-zimni-provoz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
AFC	palivový článek s alkalickým elektrolytem	
DMFC	palivový článek pro přímou reakci methanolu	
MCFC	palivový článek s taveninou alkalických uhličitů	
PAFC	palivový článek s kyselinou fosforečnou	
PEM	elektrolýza s polymerním elektrolytem	
PEMFC	palivový článek s polymerní iontoměničovou membránou	
P2G	Power to Gas	
SOC	vysokoteplotní elektrolýza	
SOFC	palivový článek s pevným oxidickým elektrolytem	
A_{FV}	činná plocha instalovaných fotovoltaických panelů	m^2
E	elektrická energie ponížená o účinnosti	kWh
E_{celk}	celková vyrobená elektrická energie podle webu PGIS	kWh
E_{FV}	vyrobená elektrická energie podle výpočtu	kWh
H_{CH_4}	výhřevnost methanu	$J \cdot kg^{-1}$
H_{H_2}	výhřevnost vodíku	$J \cdot kg^{-1}$
H_T	měsíční dávka slunečního ozáření	$kWh \cdot m^{-2}$
M_{CH_4}	molární hmotnost methanu	$kg \cdot mol^{-1}$
m_{CH_4}	hmotnost methanu	kg
M_{H_2}	molární hmotnost vodíku	$kg \cdot mol^{-1}$
m_{H_2}	hmotnost vodíku	kg
n_{CH_4}	látkové množství methanu	mol
n_{H_2}	látkové množství vodíku	mol
p	srážka vlivem elektrických ztrát	%
n_{CH_4}	látkové množství methanu	mol
p_{CH_4}	tlak methanu	Pa
p_{H_2}	tlak vodíku	Pa
R_m	univerzální plynová konstanta	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
t	teplota	$^{\circ}C$
V_{CH_4}	objem methanu	m^3
V_{H_2}	objem vodíku	m^3
$\eta_{elektrolyzér}$	účinnost elektrolyzéru	%
η_{FV}	účinnost solárního panelu	%
$\eta_{kompresor}$	účinnost kompresoru	%
η_{methan}	účinnost metanizačního reaktoru	%