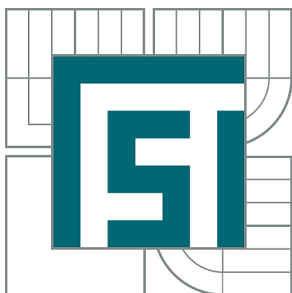


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VODÍKOVÁ PALIVA

HYDROGEN FUELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN UMLAUF

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV JÍCHA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Umlauf

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Vodíková paliva

v anglickém jazyce:

Hydrogen fuels

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Posouzení použitelnosti vodíkových paliv z hlediska konzervace energie z obnovitelných zdrojů.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování základní rešerše k problematice konzervace energie z obnovitelných zdrojů. Hlavním cílem práce bude posouzení vodíkových paliv získaných pomocí elektrické energie elektrolýzou vody.

Seznam odborné literatury:

- ŠVÁB, M. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice. ENVIROS, s.r.o., Česká energetická agentura, 2006
- LUŤCHA, J. Špičkovací elektrárna s ukládáním větrné energie do stlačeného vzduchu v kaverně a modifikovanou plynovou turbinou s generátorem. Brno, 20. 2. 2007
- Kolektiv: Obnovitelné zdroje energie, FCC Public, Praha 2001
- F.G. Shinskey, Energy conservation Trough Control, Academic Press, London, 1978

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 31.10.2013

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je vytvoření základní rešerše k problematice konzervace energie z obnovitelných zdrojů. Hlavním cílem práce je posouzení vodíkových paliv získaných pomocí elektrické energie elektrolýzou vody. V úvodní části je práce zaměřena na výrobu energie z obnovitelných zdrojů a možnosti její akumulace. V další části jsou popsány způsoby výroby vodíku a využití vodíku jako paliva pro spalovací motory. Pozornost je věnována jednotlivým konstrukčním uspořádáním spalovacích motorů na vodík. V závěrečné části práce jsou porovnány spalovací motory, spalující různá paliva z hlediska emisí. Taktéž jsou porovnány náklady na ujetý kilometr osobního automobilu při použití různých paliv. V poslední kapitole je proveden orientační výpočet výroby vodíku elektrolýzou vody z energie získané z fotovoltaické elektrárny.

Klíčová slova

vodík, větrná energie, vodní energie, sluneční energie, geotermální energie, energie z biomasy, energie přílivu a odlivu oceánů, akumulace energie, supravodivé indukční akumulátory, mechanické setrvačníky, přečerpávací vodní elektrárny, tlakovzdušné akumulární elektrárny, výroba vodíku, elektrolýza, parní reforming, spalovací motor, emise, zemní plyn, LPG, CNG,

Abstract

Paper presents a basic review and comparison of energy-conservation made of renewable sources. Principal question of paper concerns evaluation of hydrogen-use made of electrolysis of water. First part of the thesis focuses on the production of energy from renewable sources and the possibility of energy-accumulation. The next section describes methods of hydrogen production and utilization of hydrogen as a fuel for combustion engines. Attention is paid to various aspects dealing with construction of combustion engines using hydrogen. Final part of the study presents comparison between combustion engines using known sorts of fuels as to their pollution and emission-level. Next comparison deals with economic cost per kilometer, when different sort of fuels are taken into account. Conclusion concerns approximate calculation of the production of hydrogen from water by electrolysis using photovoltaic power plants.

Key words

hydrogen, wind energy, hydropower, solar energy, geothermal energy, energy from biomass, ocean energy, energy storage, superconducting inductive accumulators, mechanical flywheels, pumped storage plant, compressed air storage plants, hydrogen production, electrolysis, steam reforming, combustion engine, emissions, natural gas, LPG, CNG,

Bibliografická citace

UMLAUF, M. *Vodíková paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování bakalářské práce, a že jsem tuto práci vypracoval samostatně a zároveň uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. května 2014

.....
Martin Umlauf

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Jaroslavu Jíchovi, CSc. za poskytnuté konzultace a odbornou pomoc při zpracování bakalářské práce. Děkuji také svým rodičům za podporu během celého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk	11
Seznam použitých symbolů	12
Úvod	13
1 Přehled energií z obnovitelných zdrojů	14
1.1 Vodní energie	15
1.2 Sluneční energie	15
1.3 Větrná energie	17
1.4 Geotermální energie	19
1.5 Energie získaná spalováním biomasy	20
1.6 Energie přílivu a odlivu oceánů.....	21
1.7 Energie získaná pomocí piezoelektrického jevu	22
2 Možnosti akumulace energie z obnovitelných zdrojů	23
2.1 Akumulace elektrické energie – akumulátorové baterie	24
2.2 Supravodivé indukční akumulátory	25
2.3 Mechanické setrvačníky	25
2.4 Přečerpávací vodní elektrárny	26
2.5 Akumulace stlačeného vzduchu v kaverně	27
3 Výroba vodíku	29
3.1 Výroba vodíku parním reformingem.....	29
3.2 Výroba vodíku elektrolýzou	30
3.3 Termochemická výroba vodíku.....	32
4 Využití vodíku jako paliva pro spalovací motory	34
4.1 Hlavní vlastnosti vodíku s ohledem na spalování ve spalovacím motoru.....	34
4.2 Hlavní vlastnosti vodíku s ohledem na skladování v palivových nádržích.....	36
5 Porovnání spalovacích motorů pro spalování vodíku (HICE)	38
5.1 Systémy vstřikování paliva	38
5.1.1 HICE s nepřímým vstřikováním	39
5.1.2 HICE s přímým vstřikováním	39
5.1.3 HICE s přeplňováním.....	40
5.1.4 L-H ₂ ICE na kapalný vodík.....	40
5.2 Systémy zapalování směsi.....	41
6 Porovnání parametrů spalovacích motorů z hlediska emisí	42
6.1 Emise vznikající při spalování benzínu nebo nafty	43
6.2 Emise vznikající při spalování LPG	43
6.3 Emise vznikající při spalování CNG	44
6.4 Emise vznikající při spalování vodíku	45

7 Posouzení vodíku jako paliva	46
7.1 Porovnání paliv podle nákladů na ujetý kilometr.....	46
7.2 Reálné ceny vodíku v roce 2014	47
8 Výroba vodíku elektrolýzou vody elektrickou energií z fotovoltaické elektrárny	49
8.1 FVE Kutnohorsko	49
Závěr.....	52
Seznam použitých zdrojů.....	53

Seznam použitých zkratk

Symbol	Význam
CNG	Stlačený zemní plyn
DPH	Daň z přidané hodnoty
E85	Směs ethanolu a benzínu
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HC	Nespálené uhlovodíky
HICE	Vodíkový spalovací motor
L-H ₂ ICE	Vodíkový spalovací motor na kapalné palivo
LPG	Zkapalněný ropný plyn
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PČ	Pevné částice

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
P	instalovaný výkon	kW
m_{H_2}	hmotnost vodíku	kg
S_{H_2O}	spotřeba vody	l
V_{H_2}	objem vodíku	m^3
V_{H_2O}	objem vody	l
W_{celk}	celková elektrická energie	kWh
W_{ef}	efektivní elektrická energie	kWh
W_z	elektrická energie dodávaná do sítě	kWh
ρ_{H_2}	hustota vodíku	$kg\ m^{-3}$

Ostatní zde neuvedené symboly jsou průběžně vysvětlovány v textu bakalářské práce.

Úvod

Obnovitelné zdroje energie (OZE) procházejí v současné době v ČR i ve světě velkým rozvojem. Vlivem technického pokroku vznikají dostupné technologie, které mají minimální provozní náklady a jsou vhodné pro masové nasazení. Příkladem mohou být fotovoltaické panely, které byly dříve považovány za nedostupnou technologii, a nyní je to v ČR nejrozšířenější způsob výroby elektrické energie z obnovitelného zdroje.

Ve většině vyspělých států existuje trvalý tlak na kvalitní životní prostředí a stabilní energetiku. Tyto dva protichůdné požadavky kladou vysoké nároky na vytvoření správného energetického mixu. Konvenční způsoby výroby elektrické energie jsou založeny na spotřebě fosilních paliv, které mají řadu nevýhod. Příkladem jsou uhelné elektrárny v Evropě. Těžba uhlí je nákladnou záležitostí, která má velký dopad na životní prostředí ve svém okolí. Nezanedbatelné jsou také náklady na revitalizaci území postižených těžbou. Používání jaderných elektráren s sebou nese velké riziko v případě havárie. Škody na postiženém území a lidském zdraví jsou tak vysoké, že jsou ve své podstatě nepojistitelné a nikdo, ani samotné státy, nemohou zajistit nápravu v plném rozsahu. Tímto se stávají jaderné a uhelné elektrárny nevýhodným zdrojem jak z hlediska ekologického, tak i ekonomického. Trend výroby energie v moderní energetice vede k rozvoji tzv. chytrých sítí (smart grids) a decentralizaci výroby i spotřeby. Menší lokální zdroje jsou schopny pružně reagovat na aktuální spotřebu energie. V menším územním celku se dá také mnohem lépe předvídat spotřeba energie a usnadňuje se problém s regulací OZE.

Dalším argumentem pro využívání OZE je rozvoj technologií pro akumulaci energie. Ať už jsou to akumulátorové baterie o velkých kapacitách, kaverny na akumulaci stlačeného vzduchu, nebo výroba vodíku, který je dále využíván ve vodíkovém hospodářství.

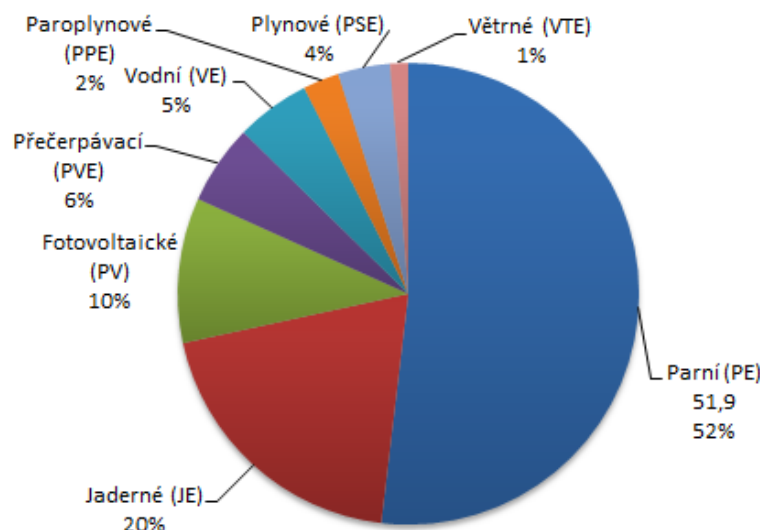
Vytvoření vodíkového hospodářství, které by zajistilo efektivní využívání energie z OZE je velkou nadějí budoucí energetiky. Využití vodíku má také velký potenciál v dopravě. Vodík má totiž výhodné vlastnosti jako akumulátor energie i jako palivo. Vodík se dá spalovat v upravených konvenčních spalovacích motorech, nebo se dá využít jako zdroj energie v palivovém článku.

V práci je provedena základní rešerše problematiky obnovitelných zdrojů energie a konzervace energie. Důraz je kladen na akumulaci energie ve formě vodíku. Je provedena podrobná rešerše způsobů výroby vodíku. Dále je v práci popsána možnost využití vodíku jako paliva pro spalovací motory. Pozornost je věnována i jednotlivým konstrukčním uspořádáním spalovacích motorů na vodík. Využití vodíku jako paliva je posouzeno z hlediska produkovaných emisí a ekonomiky. Na závěr je proveden orientační výpočet výroby vodíku elektrolýzou vody pomocí elektrické energie z fotovoltaické elektrárny.

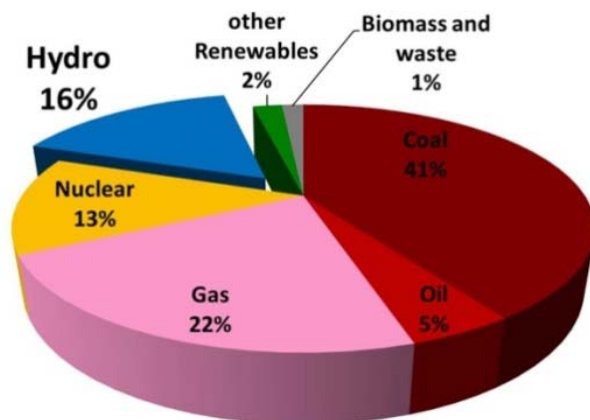
1 Přehled energií z obnovitelných zdrojů

V dnešní době stále více ovlivňují náš každodenní život důsledky klimatických změn, rostoucí závislost na fosilních palivech a rostoucí ceny energií. Do popředí se proto oprávněně dostává technologie výroby energie z OZE. Základem všech obnovitelných zdrojů je energie získaná primárně z jaderných přeměn v nitru Slunce. Přírodní procesy dále přemění část sluneční energie na jiné obnovitelné formy energie, jako je vítr, vodní energie, geotermální energie, energii přílivu a odlivu oceánů, nebo biomasu. Výhodou OZE jsou zejména nulové emise skleníkových plynů, bezodpadový provoz a vysoká bezpečnost. Nevýhodou je závislost na přírodních podmínkách např. slunečním svitu, větru apod. S touto závislostí je spojená technologická náročnost regulace výroby energie v reálném provozu. OZE díky svému decentralizovanému charakteru mají příznivý vliv na zaměstnanost a regionální rozvoj.

Podíl jednotlivých zdrojů elektrické energie v energetickém mixu České republiky za rok 2012 je znázorněn na Obr. 1. Celosvětové srovnání energetických zdrojů za rok 2012 je provedeno na Obr. 2.



Obr. 1 Podíly zdrojů energie v ČR v roce 2012 [1]



Pozn.:
Hydro – vodní
Nuclear – jaderné
Gas – plynové
Oil – ropné
Coal – uhelné
Biomass and waste – biomasa a odpad
Other renewables – jiné obnovitelné zdroje

Source: IEA 2012, Data from 2010

Obr. 2 Podíly zdrojů energie ve světě v roce 2012 [2]

1.1 Vodní energie

Vodní energetika je jedním z nejstarších způsobů jak získávat energii. První vodní kola se začala používat již ve starověku, kde fungovala jako zdroj mechanického rotačního pohybu. Horizontální vodní kola se používala pro pohon mlýnů nebo bucharů v kovárnách.

V současnosti získáváme energii z vody pomocí vodní turbíny, která je spojena s generátorem elektrického proudu. Generátor elektrického proudu přeměňuje mechanickou energii na elektrickou energii, poté se elektrická energie transformuje a odvádí pomocí elektrických vodičů do míst spotřeby.

Vodní elektrárny rozdělujeme podle prostorového uspořádání na:

- jezové elektrárny – využívají vzdouvacího zařízení na jezu
- přehradové elektrárny – využívají vzdouvacího zařízení v hrázi
- derivační elektrárny – odvádějí vodu přivaděčem z vodního koryta na turbínu
- přečerpávací elektrárny – využívají dvou propojených nádrží v rozdílné výšce k akumulaci elektrické energie.

Podle výkonu rozdělujeme vodní elektrárny na:

- drobné vodní elektrárny do 0,2 MW
- malé elektrárny do 2 MW
- střední elektrárny do 20 MW
- velké elektrárny nad 20 MW

V závislosti na velikosti průtoku a spádu se používají turbíny:

- Peltonova turbína – Používá se pro vysoký spád - od několika stovek metrů po 1800 m a malý průtok vody.
- Francisova turbína – Používá se především pro střední a větší průtoky, spád: 70 – 700 m. Obvyklé použití je u přečerpávacích elektráren.
- Kaplanova turbína – Používá se především pro velké průtoky, spád: od několika metrů do 70 m. Obvyklé použití je na malých jezových elektrárnách, nebo přehradních elektrárnách [3].

Hlavní výhodou vodních elektráren je to, že neznečišťují ovzduší, nedevastují krajinu těžbou a dopravou paliv a při své činnosti neprodukují žádný odpad. Další výhodou je dlouhá životnost a nenáročná obsluha zařízení. Vodní nádrže se také využívají k zadržování velkého množství vody, z toho vyplývající regulace vodních toků a ochrana před záplavami.

Hlavní nevýhoda je závislost na přírodních poměrech, to ovlivňuje náklady na stavbu a výkonnost elektrárny. Stavbou velkého vodního díla je ovlivněn ekosystém a ráz krajiny kolem daného místa [4].

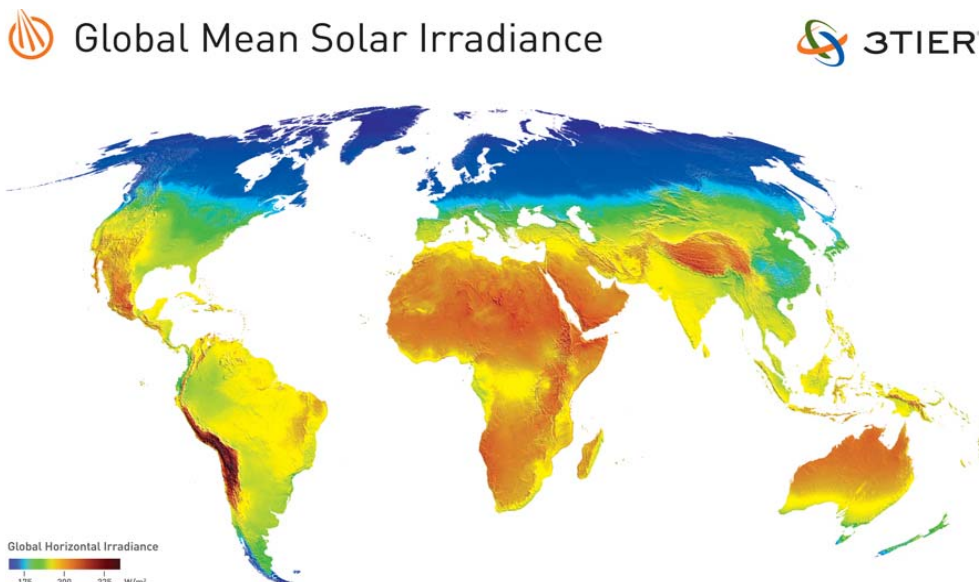
1.2 Sluneční energie

Slunce jako zdroj energie pro naši planetu je staré 4 miliardy let a je nezbytné pro život na Zemi. Bez sluneční energie by nikdy nevznikla fosilní paliva, jako je např. uhlí, ropa, zemní plyn.

Slunce je ze tří čtvrtin tvořeno vodíkem, který se za teploty okolo 14 000 000 °C a tlaku 20.10¹⁰ MPa slučuje na jádra hélia termonukleární reakcí. Při této reakci se uvolňuje 3,8.10²⁶ J energie každou sekundu. Na zemský povrch dopadá sluneční energie ve formě viditelného světla (60%), dlouhovlnného záření, krátkovlnného ultrafialového a rentgenového

záření. Na hranici zemské atmosféry dopadá sluneční energie o intenzitě 1367 W/m^2 . Tento údaj se nazývá solární konstanta a používá se pro heliotechnické výpočty [5].

Využití sluneční energie závisí na geografickém umístění, na roční době a aktuálních povětrnostních podmínkách. S tím souvisí nerovnoměrnost výroby elektrické energie nebo tepla, vlivem nestálého slunečního svitu. V klimatických podmínkách České republiky je nutné solární energii vhodně kombinovat s jinými zdroji na výrobu tepla nebo elektřiny, ať už obnovitelnými nebo neobnovitelnými. To potvrzuje i Obr. 3, který znázorňuje intenzitu dopadajícího slunečního záření na naši planetu.

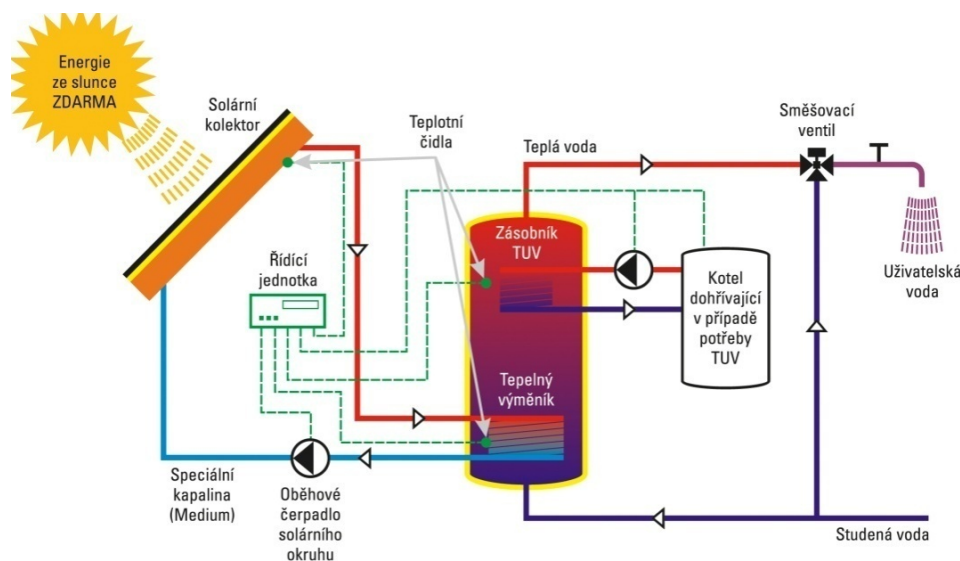


Obr. 3 Intenzita slunečního záření na povrchu Země [6]

Energii ze slunečního záření můžeme využít dvěma způsoby:

Přeměnou na teplo pohlcováním záření tmavým povrchem.

Tato přeměna je realizována pomocí solárních kolektorů a systému tepelných výměníků. Nejčastější použití tohoto způsobu najdeme při vytápění zahradních skleníků, ohřevu užitkové vody, vytápění budov, u slunečních vaříčů a dalších zařízení. Na Obr. 4 je znázorněno schéma ohřevu teplé užitkové vody pomocí solárních kolektorů [7].

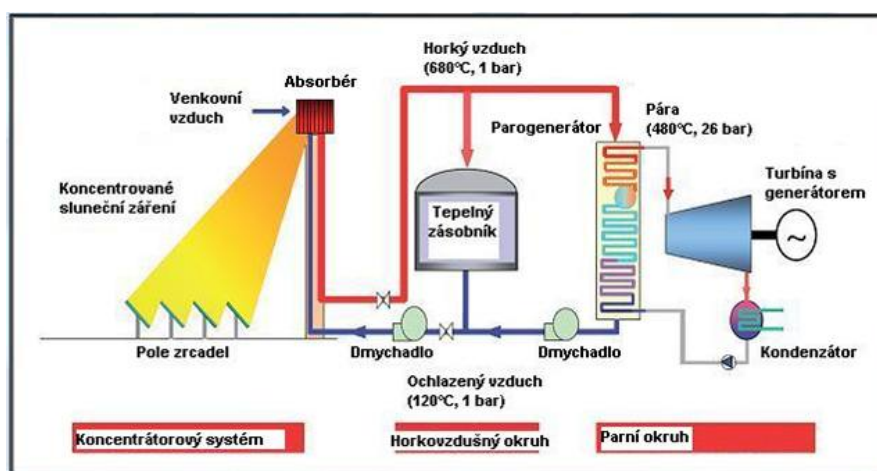


Obr. 4 Schéma ohřevu teplé užitkové vody pomocí solárních kolektorů [8]

Přímou nebo nepřímou přeměnou na elektrickou energii.

Ve fotovoltaických článcích probíhá přímá přeměna na elektrickou energii, ve formě stejnosměrného elektrického proudu. Energetická účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii je u současných průmyslově vyráběných křemíkových fotovoltaických článků 14 až 17 %. V současné době je solární energie vyrobená z fotovoltaických článků dražší než energie z fosilních paliv nebo jaderných elektráren.

V ohniskových tepelných slunečních elektrárnách probíhá nepřímá výroba elektrické energie. Sluneční paprsky se pomocí systému zrcadel soustředí do jednoho ohniska, kde se ohřívá pracovní kapalina (termo-olej). Pracovní kapalina putuje do výměníku tepla, kde se vyrobí pára. Pára pohání parní turbínu a ve vazbě s generátorem elektrického proudu vyrábí elektrický proud. Zjednodušené schéma tepelné elektrárny je znázorněno na Obr. 5. Největší elektrárna tohoto typu se nachází v Mohavské poušti v Kalifornii [9].

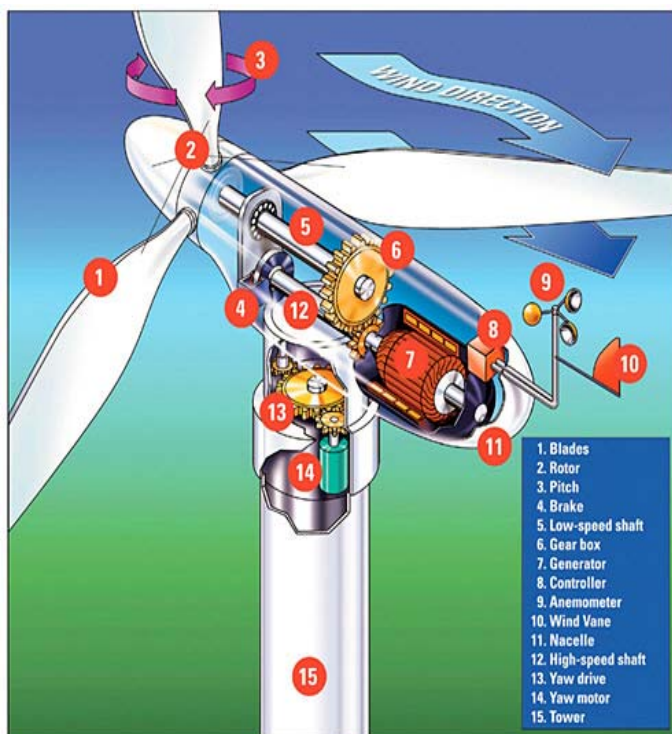


Obr. 5 Zjednodušené technologické schéma tepelné solární elektrárny [10]

1.3 Větrná energie

Vítr je horizontální proudění vzduchu. Vzniká v atmosféře na základě rozdílu atmosférických tlaků jako důsledek nerovnoměrného ohřívání zemského povrchu. Teplý vzduch stoupá vzhůru a klesá jeho tlak, na jeho místo se tlačí vzduch studený a jeho tlak roste. Dále pak zemská rotace způsobuje stáčení větrných proudů [11].

Větrná turbína umístěná na stožáru (tubusu) větrné elektrárny je roztáčena působením aerodynamických sil. Ty působí na listy rotoru a vytváří se tak mechanický rotační pohyb. Ve strojovně elektrárny se pomocí převodovky, zvýší rychlost rotace od rotoru a generátor elektrického proudu vyrábí elektrickou energii. Aby byla efektivně využita rychlost větru, celá gondola větrné elektrárny se natáčí kolmo k proudění. Zároveň je třeba zajistit rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení generátoru el. proudu. Protože se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztahové síly s druhou mocninou rychlosti větru a s třetí mocninou energie vyprodukovanou generátorem [11]. Pro názornost je umístěno schéma na Obr. 6.



Pozn.:

Wind direction – směr větru

Blades - lopatky

Pitch - natočení

Brake - brzda

Low-speed shaft – nízkootáčková hřídel

Gear box - převodovka

Contoler - řídicí jednotka

Wind vane - směřovka

Nacelle - gondola

High-speed shaft – vysoko otáčková hřídel

Yaw drive - pohon pro boční natočení

Yaw motor - motor pro boční točení

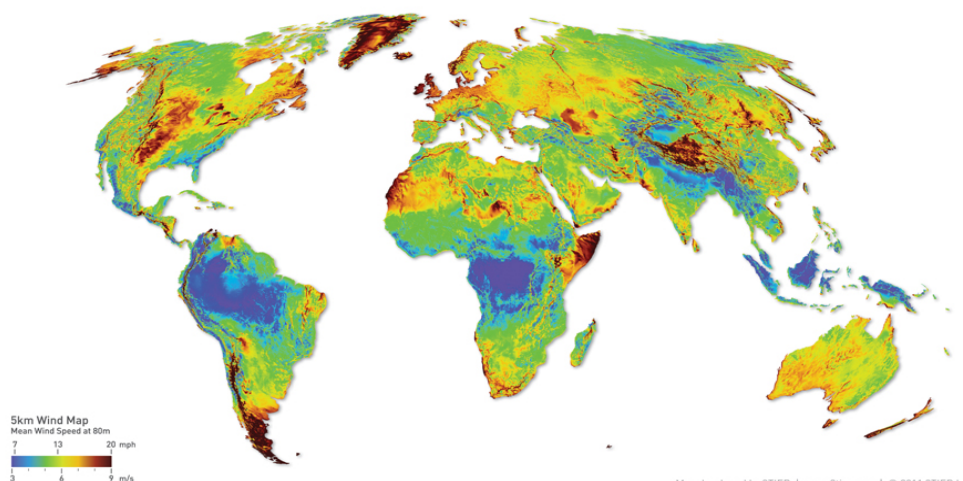
Tower - stožár (tubus)

Obr. 6 Schéma větrné elektrárny [12]

Moderní větrné elektrárny jsou konstruovány tak, aby byly minimalizovány zvukové emise. K regulaci otáček se používají stavitelné listy rotoru, u kterých je věnována značná pozornost na snížení jejich hmotnosti. Strojovny větrných elektráren jsou osazeny asynchronními generátory bez převodovky. Díky těmto úpravám se daří snížit hladinu hluku ve vzdálenosti 500 m od stožáru větrné elektrárny o výkonu 2 MW na 40 dB. Pro efektivní provoz větrné elektrárny musí být vhodně zvoleno místo, kde je průměrná rychlost větru za rok alespoň 4,8 m/s nebo více. Energeticky využitelná rychlost větru je v rozsahu od 5 m/s do 25 m/s. Efektivnost dále závisí na aktuálních povětrnostních podmínkách. Z Obr. 7 vyplývá, že nejvhodnější místa na stavbu větrných elektráren jsou při pobřeží oceánů, v sedlech nebo průsmycích horských masivů, nebo na rozsáhlých rovinách [11].



Global Mean Wind Speed at 80m



Obr. 7 Rychlost větru ve výšce 80m nad povrchem země [13]

Větrné elektrárny jsou šetrné vůči životnímu prostředí, nezatěžují okolí odpady, nezabírají velké plochy zemědělské půdy a nezpůsobují žádné emise. Nevýhodou větrných elektráren je hluchost, a změna rázu okolní krajiny.

1.4 Geotermální energie

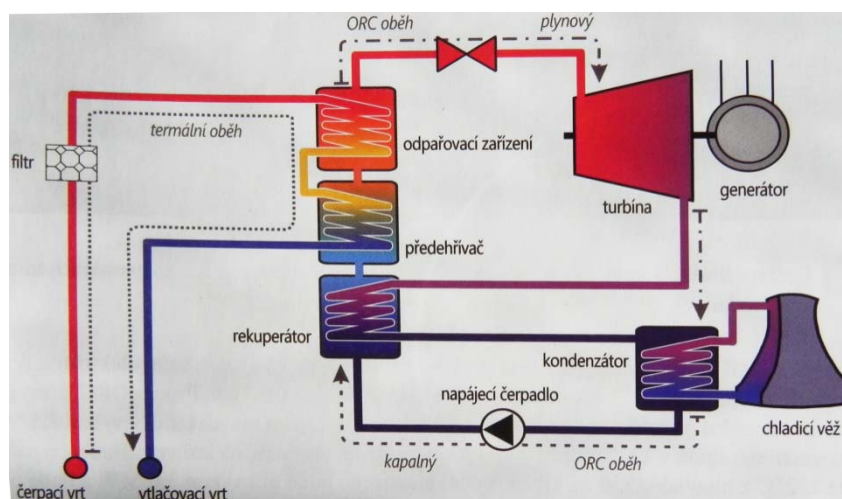
Geotermální energií je teplo získávané z nitra Země. Využívá se přímo ve formě tepla v teplárnách, nebo se používá pro výrobu elektrické energie v geotermálních elektrárnách. Z nitra Země je uvolňován v kontinentální zemské kůře směrem k povrchu tepelný tok o průměrné hodnotě 57 mW/m^2 . Celkový geotermální výkon Země je přes $4 \cdot 10^{13} \text{ W}$ (40 000 GW), což je zhruba 4x více než současná celosvětová potřeba energie [14].

Za geotermální energetický zdroj, lze považovat místo s tepelnou energií, kterou můžeme prakticky využít, při přiměřených nákladech. Zdroje s nejvyšším potenciálem se nacházejí především na hranicích litosférických desek. Na těchto místech můžeme většinou pozorovat projevy geotermální aktivity např. horké prameny, výdechy kouře a páry, gejzíry [14].

Zdroje geotermální energie můžeme rozdělit na dvě skupiny:

Mokré zdroje energie – Hydro-geotermální systémy

Geotermální vody jsou přírodní podzemní vody, které se nacházejí v zemských dutinách a zemských zvodnělých vrstvách. Jsou zahřáté zemským teplem natolik, že jejich teplota po výstupu na zemský povrch je vyšší než průměrná roční teplota vzduchu v dané lokalitě. Pro přímé energetické využití jsou vhodné vody o teplotách od $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro výrobu elektrické energie se využívají vysokopotenciální zdroje o teplotě nad $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ viz. Obr. 8. Voda se ve většině případů získává hlubinnými vrtly [15].



Obr. 8 Výroba elektrické energie z geotermální energie [29]

Suché zdroje energie – Energie teplých suchých hornin

Teplo suchých hornin (každých 100 m do hloubky stoupá teplota průměrně o $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) se využívá za pomoci trubkových kolektorů osazených do suchých vrtů, nebo injektáží povrchové vody a jejího zpětného čerpání systémem dvou a více vrtů. Využívá se systém HDR (Hot Dry Rock = horká suchá skála) [15].

Výroba geotermální energie je nezávislá na klimatických podmínkách, nedochází k vysoké produkci emisí. Za nevýhodu lze považovat nejistotu v geologických podmínkách při

nákladných zkušebních vrtech. Do budoucna má vysoký potenciál pro uplatnění jako obnovitelný zdroj energie.

1.5 Energie získaná spalováním biomasy

Biomasa je biologicky rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků ze zemědělství, lesnictví a souvisejících průmyslových odvětví, dále zemědělské produkty cíleně pěstované pro energetické účely a také biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu. K nejčastěji používaným druhům biomasy patří dřevo a dřevní odpad, sláma obilovin a olejnin, bioplyn, kapalná biopaliva a energetické rostliny pěstované pro energetické účely. Správně pěstovaná rostlinná biomasa zlepšuje ekologii krajiny a umožňuje efektivní využití půdy. Významné jsou i sociální aspekty, jako jsou například nové pracovní příležitosti [14].

Využívání rostlinné biomasy pro energetické účely nezvyšuje obsah oxidu uhličitého, protože množství CO_2 uvolněné do ovzduší spalováním je přibližně stejné jako to, které je vázáno do rostlin v průběhu růstu fotosyntetickými procesy. Proces spalování a fotosyntézy probíhá podle stechiometrické rovnice:

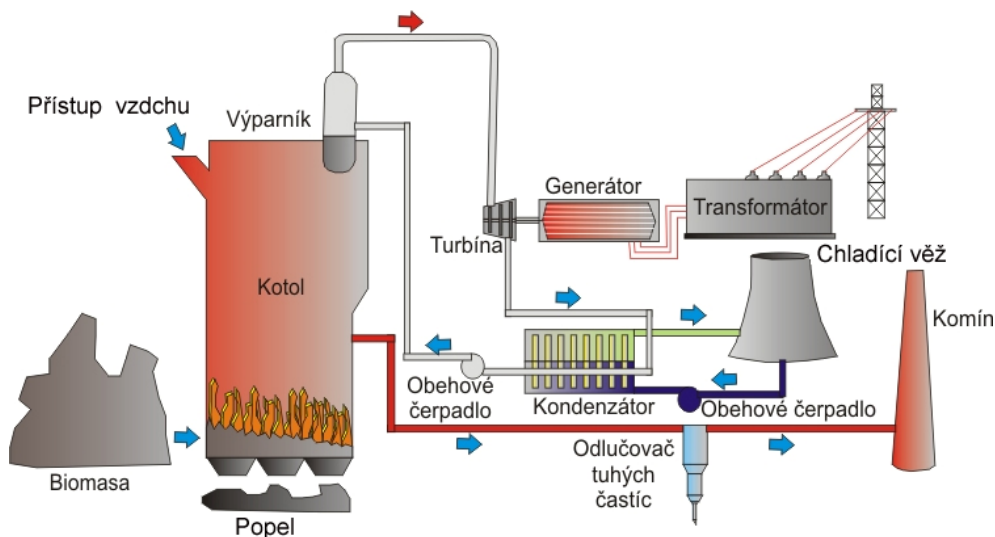


Při spalování biomasy nevznikají žádné těžké kovy, vzniká pouze malý podíl oxidu siřičitého, v porovnání se spalováním uhlí nebo ropy. Popílek, který zůstane po spalování, může být použit jako hnojivo [16].

Biomasa se zpracovává několika technologiemi v závislosti na tom, jaké chceme mít výstupní palivo a jaké bude jeho využití. Nejjednodušší způsob využití biomasy je spalování v podobě dřevěných polen, stěpky a nebo pelet viz. Obr. 9. Kvalita spalování se hodnotí zejména podle vlhkosti a výhřevnosti biomasy. Se stoupající vlhkostí klesá výhřevnost a naopak. Proto pro proces spalování jsou nejvhodnější paliva s co nejnižší vlhkostí. Složitějšími procesy můžeme z biomasy také získat kapalně výstupní palivo, které dále použijeme jako palivo ve vozidlech (bionafta). Jestliže se vlhkost biomasy pohybuje od 0 – 40% jedná se o suché procesy. O mokré procesy se jedná, jestliže vlhkost je 40% a více. Tab. 1 nám dává základní přehled technologií využití biomasy [17].

Typ přeměny	Technologie	Výstupní produkt	Využití
Termochemické přeměny – suchý proces	spalování	teplo	vytápění, výroba el. energie
	zplyňování	plyn	vytápění, výroba el. energie
	pyrolýza	olej, plyn, dehet	palivo vozidel, chem. prům, vytápění, výroba el. energie
Chemické přeměny v kapalném prostředí	zkapalňování	olej	palivo vozidel
	esterifikace	bionafta	palivo vozidel
Biochemické přeměny – mokrá proces	anaerobní fermentace	bioplyn	vytápění, výroba el. energie
	alkoholová fermentace	ethanol	palivo vozidel
	kompostování	hnojivo	hnojivo
Mechanické přeměny	lisování	olej	palivo vozidel
	mechanická úprava	štěpka, pelety, brikety	vytápění, výroba el. energie

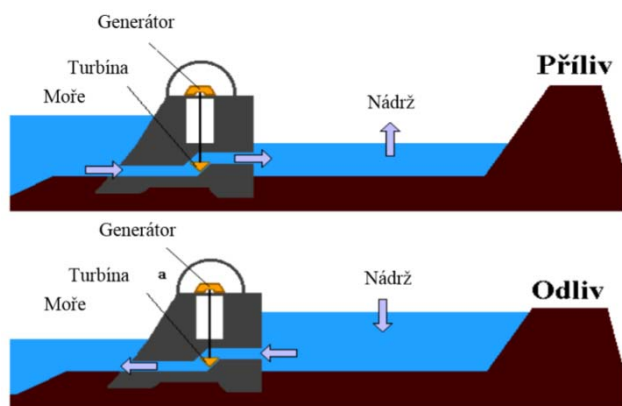
Tab. 1 Přehled technologií zpracování biomasy [17]



Obr. 9 Elektrárna spalující biomasu [34]

1.6 Energie přílivu a odlivu oceánů

Příliv a odliv je důsledkem působení přitažlivých - slapových sil Měsíce a Slunce a rotací Země kolem vlastní osy. Nejvyšší známý vodní příliv je u Nového Skotska v USA a to o celých 20 m. Rozdíl hladin nemusí být vždy pravidelný. Přílivové elektrárny využívají velký rozdíl hladin mezi přílivem a odlivem. S oceánem je skrze trubky s reverzními turbínami spojena nádrž, která se s přílivem a odlivem vyprazdňuje nebo napouští. Princip přílivové elektrárny je zobrazen na následujícím obrázku [18].



Obr. 10 Princip přílivové elektrárny [19]

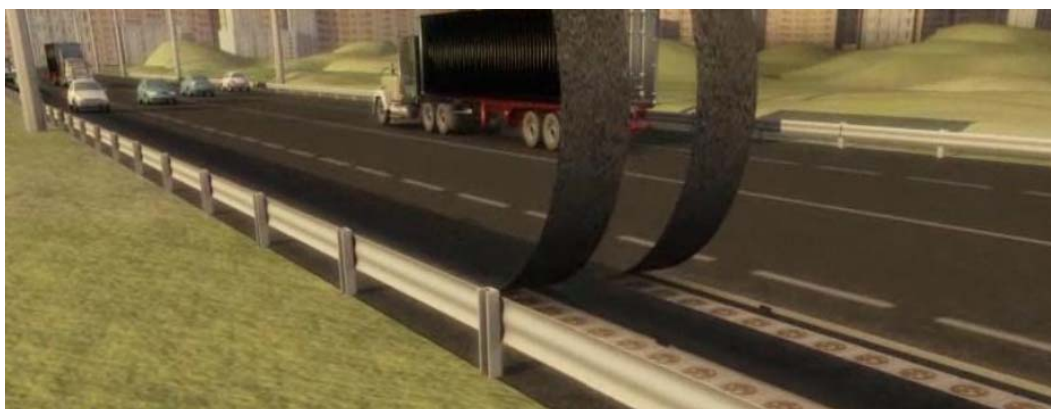
Za nejstarší přílivovou elektrárnu z roku 1913 je považována anglická Dee Hydro Station v Cheshire o výkonu 635 kW. První moderní přílivová elektrárna zahájila provoz až v roce 1966. Jde o francouzskou přílivovou elektrárnu v Bretani, v ústí řeky La Rance s výškou přílivu 8,4 m. Přílivová voda pro turbíny je navíc posilována i přítokem řeky. Výkon elektrárny je 240 MW [18].

Energie je v oceánu obsažená i v jiných formách např. energie mořských proudů, nebo energie mořského příboje. Odhaduje se, že energie, kterou vyvinou vlny ve všech světových oceánech, dosahuje hodnoty 342 miliard MJ. Tato energie je však obtížně dosažitelná.

1.7 Energie získaná pomocí piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci. Piezoelektrické materiály se skládají z krystalů, které jsou středově nesymetrické. Nejpoužívanější materiály pro výrobu krystalů jsou křemen a LiNbO_3 . Jedná se o sekundární zdroj, tedy zdroj, který využívá energii vzniklou při procesech, které nebyly primárně určeny k jejímu vzniku [25].

Nejznámější příkladem aplikace piezoelektrického jevu je úsek dálnice v Izraeli, který je znázorněn na Obr. 11. Pět centimetrů pod asfaltovým povrchem dálnice jsou uloženy piezoelektrické generátory, které využívají deformaci vozovky, vzniklých při projíždění vozidel. Desetimetrový úsek dálnice je schopný vygenerovat 2 kW energie za hodinu, které se buď ukládají v akumulátorech, nebo jsou zapojeny do distribuční sítě [25].

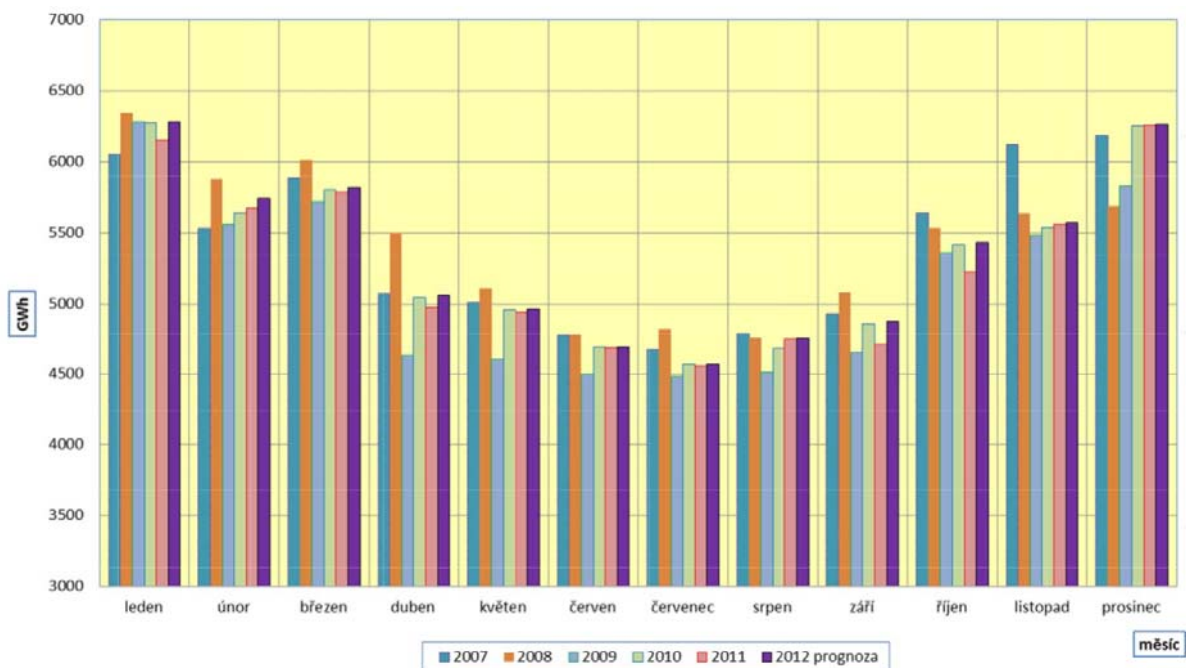


Obr. 11 Uložení piezoelektrických generátorů v silnici [25]

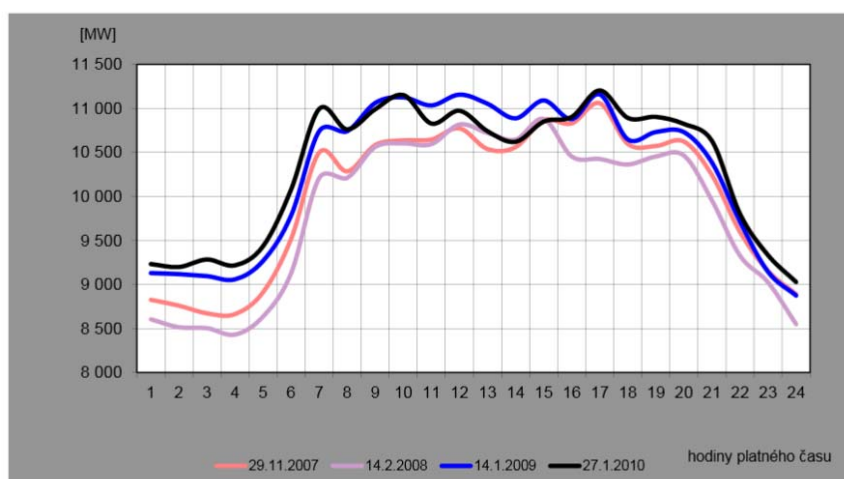
Další způsob využití piezoelektrických generátorů byl testován ve stanici metra v Tokiu. Zde bylo jako zdroj deformací pro piezo generátory využito lidské chůze. Systém generátorů byl uložen pod podlahou na ploše 25 m^2 a pod podložkami mezi turnikety na ploše 90 cm^2 . Při této konfiguraci a vysokém počtu lidí bylo možné vygenerovat 1 400 kWh energie denně, která byla využita pro napájení informačních panelů a vstupních bran [25].

2 Možnosti akumulace energie z obnovitelných zdrojů

Spotřeba elektrické energie se výrazně mění v průběhu dne viz. Obr. 13. Je závislá na ročním období viz. Obr. 12 a počasí. V zimních měsících je odběr elektřiny největší, červenci je nejmenší. V průběhu dne je nejnižší odběr elektřiny mezi 5 – 6 hodinou ráno a nejvyšší mezi 18 – 20 hodinou večer. Se spotřebou elektrické energie úzce souvisí její cena. Nejdražší je elektřina v době, kdy je po ní nejvyšší poptávka.



Obr. 12 Měsíční spotřeba elektrické energie [33]



Obr. 13 Denní diagram spotřeby ve dnech ročního maxima [32]

Produkce energie z některých obnovitelných zdrojů, především slunečních nebo větrných elektráren, se odvíjí od aktuálních povětrnostních podmínek a je obtížně regulovatelná. Problém je výroba většího množství energie, než je její aktuální spotřeba. To vede ke značným ztrátám a maření energie.

Řešením tohoto problému je uchování nebo-li akumulace energie. Elektrická energie z obnovitelných zdrojů v malém množství se dá akumulovat v olověných, nebo

jiných akumulátorových bateriích. Další možnosti se nabízejí v akumulaci elektrické energie ve formě stlačeného vzduchu v kavernách, ve výrobě vodíku pomocí elektrolýzy, nebo roztáčením mechanického setrvačníku. Stále ve stádiu vývoje se nacházejí supravodivé indukční akumulátory.

Problému akumulace energie se nevyhneme ani u neobnovitelných zdrojů energie, kterými jsou např. jaderné elektrárny, které najíždí na plný výkon několik týdnů, nebo uhelné elektrárny, které se také regulují poměrně pomalu. V České republice se řeší akumulace části přebytečné elektrické energie z jaderných elektráren pomocí přečerpávacích akumulačních vodních nádrží.

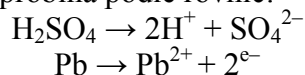
Způsoby akumulace se liší především těmito parametry:

- oblasti výkonů, při kterých jednotlivé akumulační systémy pracují
- celkovou účinností
- dobou, po kterou jsou schopny udržet akumulovanou energii s přijatelnými ztrátami
- životností [20]

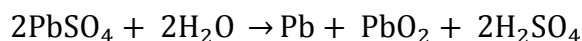
2.1 Akumulace elektrické energie – akumulátorové baterie

Akumulátorové baterie akumulují energii ve formě chemické energie. Jejich výhodou je dobře zvládnutá technologie výroby, operativní použití kdekoliv, možnost mnohonásobného opětovného nabíjení a relativně nízká cena. Nevýhodou je samovybíjení a citlivost na hluboké vybíjení, při kterém nastávají nevratné změny na elektrodách s následkem snižování kapacity akumulátoru [20].

Vybitý akumulátor se nabíjí tak, že elektrická energie se změní na chemickou energii a reakční produkty se převedou elektrickým proudem z jiného zdroje na původní reaktanty. V olověném akumulátoru se elektrolyt kyseliny sírové rozkládá na kladné vodíkové ionty a záporné síranové ionty. Tato reakce probíhá podle rovnic:



Při nabíjení probíhá tato chemická reakce:



Při vybíjení se akumulovaná chemická energie mění na elektrickou energii dodávanou do elektrického obvodu, do kterého je akumulátor zapojen. Probíhá stejná chemická reakce jako při nabíjení, ale v opačném směru. Záporná elektroda je katodou během vybíjení a anodou během nabíjení [20].

Pro technické účely se běžně využívají akumulátory o napětí 1,1 až 2 V sestavené sériově do baterií. Většina akumulátorů je schopna opětovného nabití ve stovkách až tisících cyklů. Například v automobilové baterii o napětí $U = 12$ V je sériově zapojeno šest takových článků. Olověné akumulátory slouží jako staniční (záložní zdroje proudu), trakční (pohony vozíků, trolejbusů, elektromobilů), startovací (spouštění spalovacích motorů) [20].

Dalšími typy akumulátorů jsou alkalické akumulátory. Např. Ni-MH, Li-ion a Li-pol, Ni-Cd, Ni-Zn, Ni-Fe Ag-Zn atd. Nevýhoda těchto akumulátorů oproti olověným je, že jsou dražší, mají menší účinnost. Výhodou je naopak dlouhá životnost, rychlé nabíjení, dobrá mechanická odolnost.

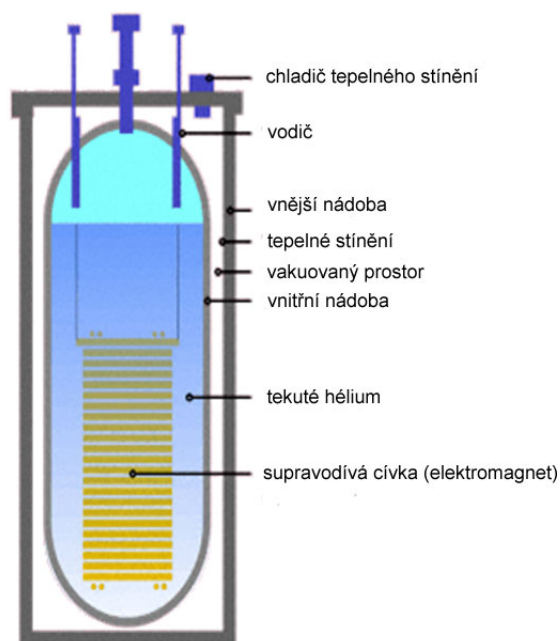
2.2 Supravodivé indukční akumulátory

Supravodivost je stav, při kterém v látkách prakticky zcela vymizí elektrický odpor. Supravodivost objevil v roce 1911 nizozemský fyzik Kammerlingh Onnes, který ve

rtuťové smyčce vymražené v kapalném heliu ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) indukoval elektrický proud. Ten v ní obíhal po vypnutí induktoru několik týdnů bez přerušení. Díky supravodivosti je možné elektrický proud přenášet a uskladňovat s účinností nad 95%. Supravodivost je dnes možné vyvolat v řadě kovů, slitin nebo ve speciální keramice už při teplotách kapalného vodíku ($-251\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo dusíku ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) [21].

Supravodivé akumulátory UPS (Uninterruptible Power Supplies) Obr. 14 slouží řadě průmyslovým podnikům a důležitým počítačovým serverům i sítím, které obsahují supravodivou cívku v kapalném heliu nabíjenou přes usměrňovač. Cirkulace proudu v ní se děje s minimální ztrátou a to 0,3 kWh za 24 hodin. Už na první hlubší pokles napětí sítě na začátku výpadku reaguje akumulátor během 0,2 mikrosekundy tím, že je schopen po překlenovací dobu dodávat uzlu tovární sítě výkon kolem 1 MW. SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) jsou větší supravodivé akumulátory, které při experimentech obstály milion cyklů nabití/vybití s účinností lepší než 95% [21].

V budoucnu by mohly energetické supravodivé akumulátory s kapacitou až 4 000 MW, nahradit přečerpávací akumulární elektrárny. Mají mít podobu prstence uloženého v podzemí, v němž je v kapalném heliu ponořena smyčka z tlustého měděného vodiče. Ztráty, včetně příkonu kriogenní stanice, by měly být menší než 1% [21]. Schéma supravodivého akumulátoru je na Obr. 14



Obr. 14 Schéma supravodivého akumulátoru [21]

2.3 Mechanické setrvačníky

Setrvačník je historicky prvním akumulátorem energie. Dříve se setrvačník využíval pro překonání mrtvé polohy mechanismu parních strojů, nebo k akumulaci energie roztočeného hrnčířského kruhu. Dnešní obvyklé využití setrvačníků je u pístových spalovacích motorů, kde vyrovnávají chod motoru [21].

Setrvačník funguje na principu uchování kinetické energie. Pro kinetickou energii platí:

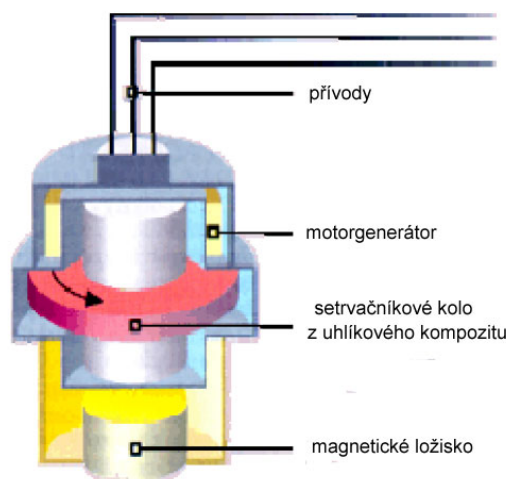
$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$$

Kde J je moment setrvačnosti,
 ω úhlová rychlost setrvačnicku.

Kinetickou energii získáme pomocí elektrického příkonu, kterým se roztáčí rotor. V tuto chvíli se setrvačnick chová jako „motor“. Při potřebě energie se motor bleskově přemění na generátor a je vytvářena energie. Setrvačnick dokáže odevzdat energii na úkor svých otáček zpožděním pouhých zlomků sekundy [21]. Schéma setrvačnicku je zobrazeno na Obr. 15.

Moderní setrvačnick se již nekonstruuje s použitím těžkých litinových kol, ale využívají mnohem lehčí kompozitní materiály. Moderní setrvačnick má čočkovitý tvar a je uložen ve vakuových, héliových, nebo magnetických ložiscích, které zaručují životnost vyšší než 10 let. Je schopen se otáčet až 10 000 ot/min a má energetickou účinnosti lepší než 80%. Setrvačnick překonávají po všech stránkách tradiční zálohovací akumulátory. V případě paralelního zapojení více setrvačnicků do baterií, je baterie setrvačnicků schopna krátkodobě vydat akumulovaný elektrický výkon až do několika MW [21].

Setrvačnickové zásobníky energie se používají v průmyslu pro překonání krátkodobého výpadku sítě, který může způsobit pohromu řídicím a počítačovým systémům ve výrobě. Setrvačnickový akumulátor 4. Generace od firmy Beacon Power, dokáže po dobu 15 minut dodávat výkon 25 kW, garantovaná životnost zařízení je 20 let nebo 100 000 vybíjecích cyklů [20].



Obr. 15 Setrvačnickový akumulátor [20]

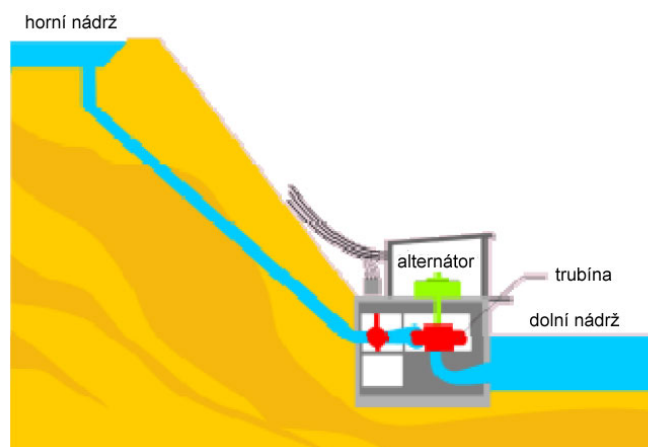
2.4 Přečerpávací vodní elektrárny

Pomocí přečerpávacích elektráren se nejjednodušší uchovávat velké množství energie. V minulosti byly budovány pro využití levného nočního proudu především z jaderných elektráren. V současnosti se dají využít i pro regulaci výkyvů energie v distribuční síti v důsledku provozu slunečních nebo větrných elektráren.

Každá přečerpávací vodní elektrárna má svou dolní a horní vodní nádrž propojenou potrubím, v němž jsou zařazeny vodní turbíny, které při reverzaci chodu pracují jako čerpadla viz. Obr. 16. Při přebytku elektrické energie v distribuční síti (např. v noci) čerpají čerpadla vodu z dolní nádrže do vysoko položené horní nádrže. Elektrická energie se tak mění na potenciální energii v horní nádrži. Tam je připravena, aby v případě potřeby zpětným průtokem poskytla vysoký výkon vodním turbínám, jejichž alternátory ji vracejí v podobě elektrické energie do sítě [21].

Dolní nádrž je obvykle zřízena za hrází průtočné vodní elektrárny na říčním toku a horní nádrž, se kterou je spojena několika tlakovými potrubími, je vybudována na některém blízkém vrcholu. Spády se pohybují od 100 do 500 m. Dolní nádrž může s výhodou sloužit i jako zásobník chladicí vody pro chladicí věže nedalekých tepelných nebo jaderných

elektráren. Ve vysokých horách je možné využít v roli nádrží i odlehlější vysokohorská jezera s velkým výškovým rozdílem, která se propojí tunelovými šachtami [21].



Obr. 16 Schéma přečerpávací vodní elektrárny [21]

Současné přečerpávací elektrárny mají účinnost až 75 %. Velmi levné noční kilowatthodiny se tímto způsobem promění v špičkové kWh, které jsou z energetického hlediska velmi výhodné. Plný výkon jsou některé moderní přečerpávací vodní elektrárny schopny dodávat už za 1,5 minuty po spuštění [21]. Přečerpávací vodní elektrárny jsou schopny uchovávat velké množství energie v řádu stovek megawat po neomezeně dlouhý čas. Problémem je obtížná volba vhodné lokality pro stavbu. Nevýhodou je velký zásah do krajiny při stavbě elektrárny a vysoká počáteční investice.

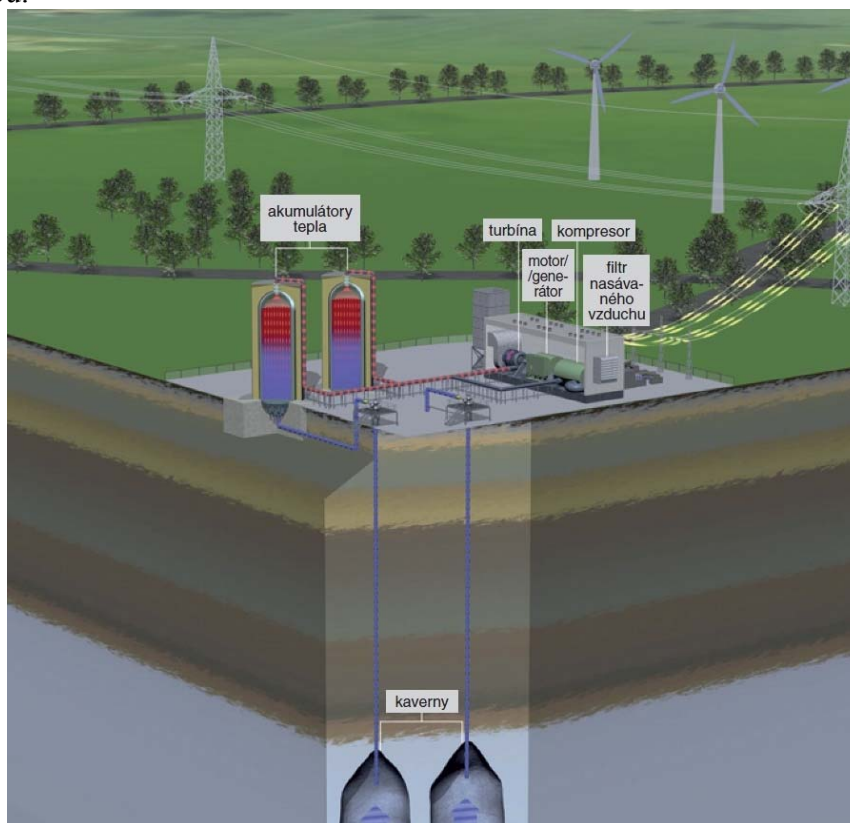
2.5 Akumulace stlačeného vzduchu v kaverně

Tlakovzdušné akumulární elektrárny procují na stejném principu jako přečerpávací vodní elektrárny. V době, kdy jsou přebytky elektrické energie v distribuční síti, nasávají elektricky poháněné kompresory okolní vzduch a stlačují ho na 7 – 10 MPa, následně je vzduch vháněn do utěsněných podzemních kaveren. Při nedostatku elektrické energie v distribuční síti se stlačený vzduch z podzemního zásobníku odebírá a přivádí se na turbíny, které pohánějí generátory vyrábějící elektrický proud. Kaverna může být realizována jako skalní dutina, solná jeskyně, nebo dutina ve vodonosné vrstvě. Účinnost celého systému se pohybuje okolo 50%. Nízká účinnost je způsobena zahříváním vzduchu při kompresi a opětovným ochlazováním na teplotu okolí, aby jej bylo možné skladovat v podzemí. Při dalším použití je nutné vzduch opět ohřát, protože při expanzi v turbíně se vzduch silně ochlazuje. Tento systém je realizován na akumulární elektrárně poblíž německého města Oldenburg. Do dvou solných jeskyní lze uložit 150 000 m³ stlačeného vzduchu, který může dodávat po dobu 3 hodin výkon 320 MW s účinností 42% [23].

Účinnost celého systému se dá zvýšit využitím tepla, které vzniklo při stlačování vzduchu kompresorem, v tepelném zásobníku. Uchované teplo se použije při odebírání vzduchu ze zásobníku stlačeného vzduchu na ohřátí vzduchu na teplotu potřebnou, před vstupem na turbíny generátorů. V tomto případě se účinnost pohybuje okolo 70%. Akumulační elektrárna této koncepce se buduje v Německu v rámci projektu ADELE. Tato elektrárna bude mít výkon 200 MW a akumulární kapacitu 1 GWh. Měla by dokázat nahradit výpadek produkce 40 větrných elektráren o výkonu 5 MW po dobu 5 hodin [23]. Schéma tlakovzdušné elektrárny je zobrazeno na Obr. 17.

Tlakovzdušné akumulární elektrárny nabývají na významu. S přibývajícím počtem solárních a větrných elektráren je nedostatek vyrovnávacích elektráren. Jsou schopny podobně

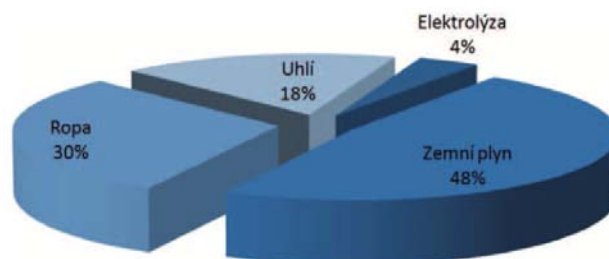
jako přečerpávací elektrárny, pružně reagovat na výkyvy v distribuční síti a neprodukují žádné emise CO₂. V případě vhodně zvoleného místa pro stavbu kaverny, jsou zajímavou alternativou k přečerpávacím elektrárnám, u kterých jsou dnes prakticky vyčerpané vhodné lokality pro stavbu.



Obr. 17 Model adiabatické tlakovzdušné elektrárny podle projektu ADELE [23]

3 Výroba vodíku

Dalším způsobem jak akumulovat energii je výroba vodíku. Zde je na místě si uvědomit, že vodík slouží pouze jako nosič energie. Protože se v přírodě volně nevyskytuje, je nutné ho vyrobit z jiného zdroje a přitom musíme počítat se ztrátami. Vodík lze vyrobit několika způsoby. V současné době je nejrozšířenější výroba vodíku z fosilních paliv viz. Obr. 18. Nejvíce vodíku se vyrábí parním reformingem zemního plynu. Další technologií je parciální oxidace ropných frakcí a poslední technologií využívající fosilní palivo je zplyňování uhlí. O vodíku se mluví jako o zdroji čisté energie. Samozřejmě platí, že vodík je tak čistý zdroj energie, jak čistá je jeho výroba. Proto je z ekologického hlediska nejvhodnější vodík vyrábět pomocí obnovitelných zdrojů energie. Příkladem využití obnovitelných zdrojů může být elektrolýza vody elektrinou získanou např. z větrné elektrárny nebo biologické procesy využívající biomasu.

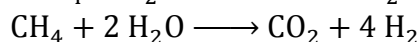
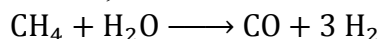


Obr. 18 Zastoupení primárních zdrojů ve výrobě vodíku [24]

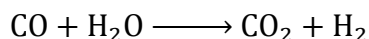
Oproti fosilním palivům má použití vodíku dvě hlavní výhody. Jednak je díky široké škále možností výroby prakticky nevyčerpatelný a navíc jeho spalováním (v ideálním případě) vzniká pouze vodní pára. V dalších kapitolách budou popsány způsoby výroby vodíku.

3.1 Výroba vodíku parním reformingem

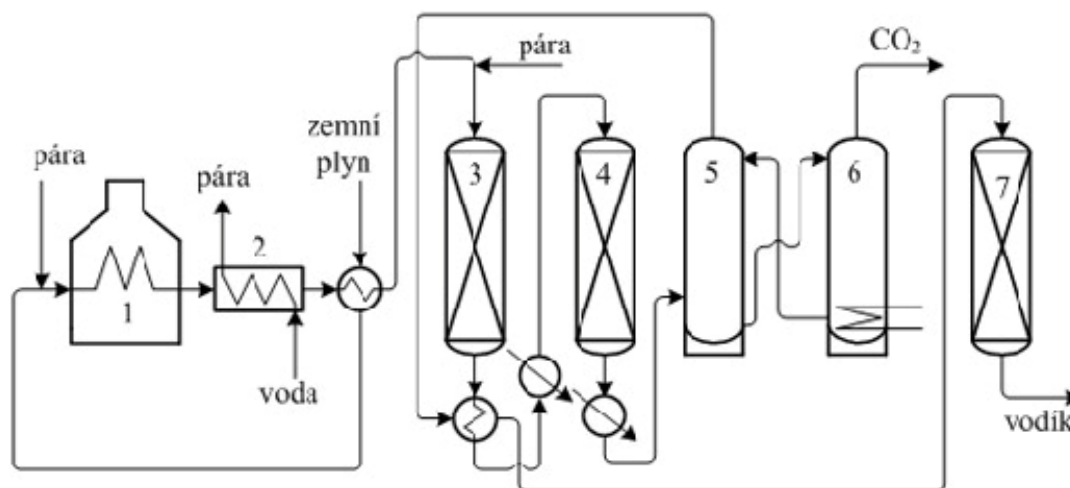
Nejčastější surovinou pro výrobu vodíku parním reformingem je zemní plyn, ale dají se využít i vedlejší produkty, které vnikají v rafinériích při štěpných procesech např. etan, propan nebo lehký benzín. Parní reforming se provádí v peci při teplotě 750 – 800 °C a tlaku 3 – 5 MPa v trubkách naplněných katalyzátorem na bázi oxidu nikelnatého. Metan reaguje s vodní párou za vzniku oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a vodíku.



Reakční produkty o teplotě cca 750 °C se vedou přes kotel na výrobu páry a výměník, kde se ochladí na cca 360 °C, do konvertorů, kde se CO reakcí s další vodní párou přemění na CO₂ a vznikne další vodík.



Oxid uhličitý získaný parním reformingem nebo parciální oxidací se buď vypouští do atmosféry nebo se po důkladném vyčištění zkapalňuje a někdy i převádí do tuhého stavu (suchý led) a používá se ke chlazení např. v potravinářském průmyslu [26]. Schéma parního reformingu je na Obr. 19.

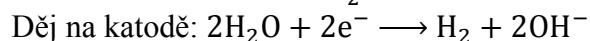
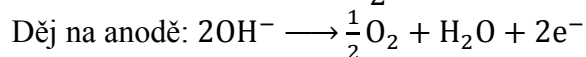
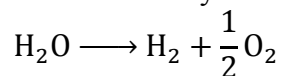


(1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO₂, 6 - desorbér CO₂, 7 - metanizér)
Obr. 19 Schéma parního reformování zemního plynu [26]

Parní reforming je nejčastější způsob výroby vodíku. Důvodem je vysoká efektivita procesu a nízké provozní a výrobní náklady.

3.2 Výroba vodíku elektrolýzou

Elektrolýza vody je proces, při kterém stejnosměrný proud během průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem podle reakce:



Stejnoseměrný elektrický proud prochází mezi dvěma oddělenými elektrodami (katodou, anodou) ponořenými v elektrolytu. Na anodě probíhá oxidace a vylučuje se kyslík. Na katodě probíhá redukce a vylučuje se vodík. Čistá voda je málo vodivá, proto se pro zvýšení vodivosti přidává elektrolyt.

Podle druhu elektrolytu používaného pro přenos elektrického proudu v procesu, dělíme elektrolýzu vody na 4 základní typy.

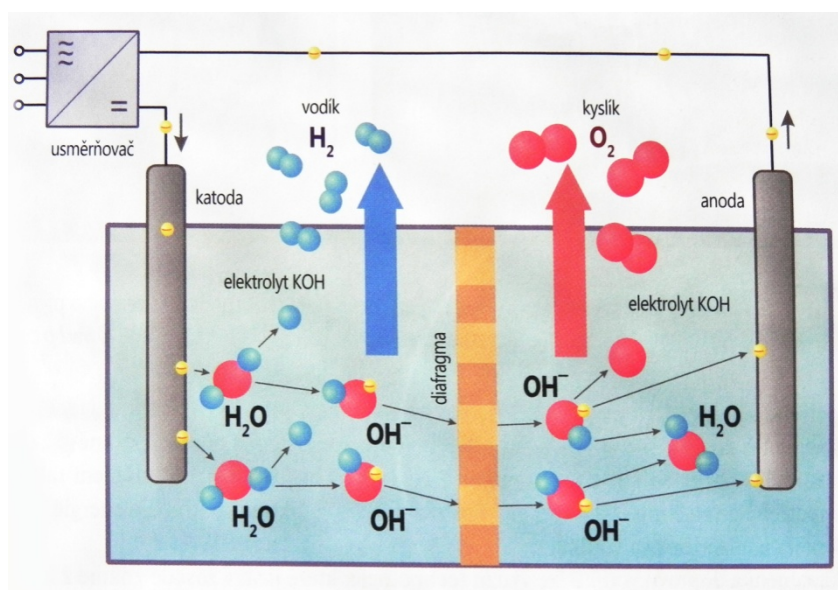
- Elektrolýza s alkalickým elektrolytem
- Elektrolýza s kyselinovým elektrolytem – zastaralý způsob, problémy s korozi
- Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou
- Parní elektrolýza využívající keramický elektrolyt

Výroba vodíku elektrolýzou je závislá na elektrické energii. Ekonomicky se vyplatí pouze tehdy, když máme zdroj levné elektrické energie. Proto je elektrolýzu vody vhodné použít v kombinaci s obnovitelným zdrojem energie.

Elektrolýza s alkalickým elektrolytem

Nejrozšířenější, a průmyslově ověřená, je alkalická elektrolýza, kde elektrolytem je obvykle hydroxid draselný. Jádrem zařízení na vodní elektrolýzu je katoda, anoda, elektrolyt a oddělovač viz. Obr. 20. Katoda musí být odolná vůči korozi a umístěná v elektrolytu s redukčním potenciálem. Musí být dobrý vodič elektrického proudu a musí být celistvá. Pro průběh elektrolýzy je zapotřebí zajistit pohyb hydroxidových iontů (OH⁻) z katody na anodu a

zároveň zabránit smíchání produkovaných plynů. K tomu se používá separátor (diafragma) [31].

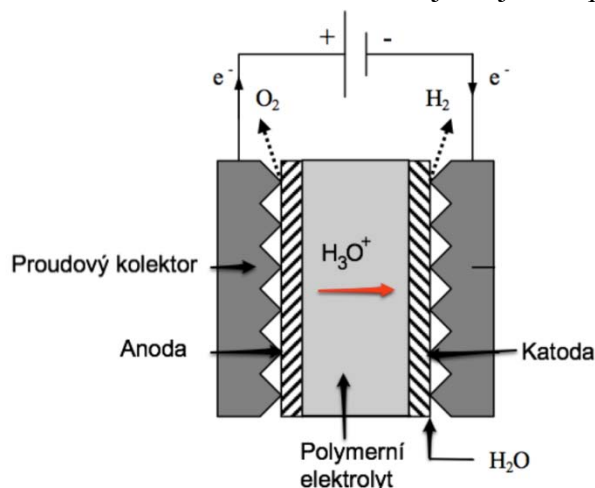


Obr. 20 Schéma elektrolýzy s alkalickým elektrolytem [29]

Voda se přivádí do cirkulujícího elektrolytu, z důvodu odvodu tepla z reakce a kontrole teploty procesu. Většina alkalických elektrolýzérů je konstruována tzv. zero gap designem (bez mezery), kde anoda i katoda jsou umístěny do bezprostřední blízkosti separátoru. Elektrody se umísťují blízko sebe z důvodu snížení ztrát v důsledku odporu elektrolytu. Elektrolýza probíhá za teploty kolem 80 °C a tlaku 1 – 30 bar [31].

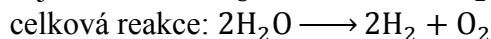
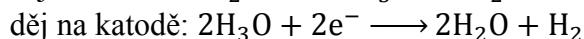
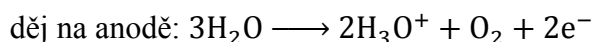
Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou

Elektrolýzér se skládá z katody a anody a polymerní membrány viz. Obr. 21. Elektrody se vyrábí z platiny nebo iridia. Polymerní membrána plní funkci elektrolytu a separátoru zároveň. Membrána má kyselý charakter, mřížkovou strukturu a je plynotěsná. Vyznačuje se velmi dobrou vodivostí protonů a špatnou vodivostí elektronů. Polymerní membrána tedy umožňuje tok protonů mezi elektrodami a zároveň zabráňuje stejnému pohybu elektronů [31].



Obr. 21 Schéma elektrolýzy s polymerní membránou [31]

Elektrolýza probíhá při teplotě kolem 80 °C a tlaku do 85 bar.

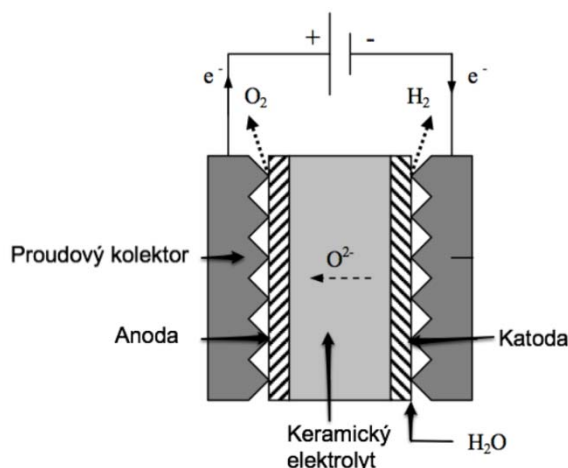


Kyslík je z anody odváděn v plynné formě. Protony vodíku procházejí přes protonově vodivou membránu na katodu a elektrony jsou na katodu přiváděny pomocí vnějšího okruhu. Na katodě dochází ke sloučení protonů a elektronů a vzniká tak plynný vodík [31].

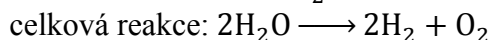
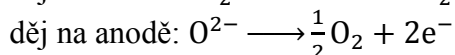
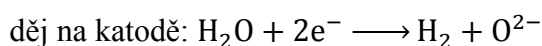
Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou vyžaduje vyšší proudovou hustotu, než elektrolýza s alkalickým elektrolytem, ale produkovaný vodík má vyšší čistotu. Nevýhodou oproti elektrolýze s alkalickým elektrolytem je vysoká cena elektrolyzérů, díky použitým drahým materiálům.

Parní elektrolýza využívající keramický elektrolyt

Parní elektrolýza probíhá za teploty 900 – 1000 °C, a voda je do procesu přiváděna jako pára. Elektrolyt je vyroben z pevného keramického materiálu, který vede kyslíkové ionty. Princip parní elektrolýzy je podobný jako u elektrolýzy využívající polymerní elektrolyt. Je zřejmý z Obr. 22. Přes pevný keramický elektrolyt mohou procházet kyslíkové ionty od katody k anodě, elektrony přes elektrolyt neprojdou. Elektrony se přemísťují vnějším obvodem. Keramický elektrolyt také zabraňuje promíchávání vznikajících plynů.



Obr. 22 Schéma parní elektrolýzy [31]



Vodní pára je přiváděna do komory u anody, kde reaguje s elektrony a rozpadne se na vodíkové a kyslíkové ionty. Po přechodu k anodě, kyslíkové ionty uvolňují elektrony, a tak vytvoří plynný kyslík [31].

Výhoda parní elektrolýzy spočívá ve snížené spotřebě elektrické energie, díky energii dodané pomocí tepla páry. Celková energetická náročnost je vyšší, než u jiných typů elektrolýzy, což je způsobeno ohřevem páry. Parní elektrolýza je výhodná pokud, máme levný zdroj tepla, např. geotermální energii na Islandu.

3.3 Termochemická výroba vodíku

Termochemická výroba vodíku se provádí dvěma způsoby: termickým rozkladem vody v aktivní zóně jaderného reaktoru nebo termochemickým rozkladem za pomoci sluneční energie.

Termický rozklad vody v aktivní zóně jaderného reaktoru - S-I cyklus

Sířičito-jódový termochemický cyklus byl vyvinut v General Atomics (San Diego, USA) v polovině 70. let 20. století. Jedná se o levný a účinný způsob výroby vodíku pomocí jaderné energie [27]. S-I cyklus je uzavřený cyklus, protože jód a oxid siřičitý se recyklují a opětovně používají, do reakce se dodává pouze voda. Teoreticky se tedy neprodukuje žádný odpad. V reálném provozu dochází ke ztrátám a je nutné jód i oxid siřičitý doplňovat. Při produkci vodíku probíhají tyto termochemické reakce:

1. $\text{I}_2 + \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HI} + \text{H}_2\text{SO}_4$ (120 °C)
2. $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ (800 – 1000 °C)
3. $2\text{HI} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2$ (300 – 450 °C)

V prvním kroku, který je znám jako Bunsenova reakce, reaguje vstupující voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny jodovodíkové a sírové. Jedná se o exotermickou reakci, kdy se z reakce odvádí teplo o teplotě 120 °C. Ve druhém kroku následuje endotermický rozklad -kyseliny sírové, který potřebuje nejvíce tepla (o teplotě, 800 – 1000 °C). Ve třetím kroku se rozkládá kyselina jodovodíková za produkce vodíku, která vyžaduje nižší teploty (450 °C). Účinnost celého výrobního cyklu vodíku se pohybuje v rozmezí 40 – 52%. Pokud zvýšíme teploty, při kterých probíhají reakce, zvýší se i účinnost cyklu [27].

Termochemický rozklad vody za pomoci sluneční energie

Termochemický rozklad vody je cyklická chemické reakce, skládající se ze dvou na sebe vzájemně navazujících reakcí. Teplo získáváme pomocí koncentrovaného slunečního záření podobně jako v ohniskové sluneční elektrárně.

1. $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$ (550 °C)
2. $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{FeCl}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ (400 °C)

V prvním kroku reaguje chlorid železnatý s vodní párou při cca 550 °C, přičemž vzniká oxid železnato-železitý a plynná směs chlorovodíku a vodíku. Tato směs (směs 6 HCl + H₂) je oddělována například zkapalněním HCl (teplota varu HCl je –84,9 °C, zatímco u vodíku je –252,9 °C). Tato reakce je endotermická. V druhém kroku reaguje oxid železnato - železitý s chlorovodíkem při teplotě cca 400 °C, přičemž vzniká výchozí látka – chlorid železnatý, vodní pára (vody je méně přesně o tolik, kolik se jí rozložilo na vodík a kyslík) a kyslík, který se z vodní páry odstraní po ochlazení směsi (na cca +90 °C). Tato reakce je mírně exotermická [28].

Vodík by byl uvedenou metodou získáván přibližně s 60 až 65% účinností. V porovnání s fotovoltaickými články na výrobu elektrické energie, které mají účinnost pouze 10 – 20%, nebo tepelnými slunečními elektrárnami s účinností 30%, je výroba vodíku termochemickým cyklem mnohem hospodárnější. Vybudování tohoto zařízení, má smysl v oblastech s nejvyšším slunečním zářením [28].

4 Využití vodíku jako paliva pro spalovací motory

S ohledem na neustále rostoucí spotřebu ropy a tím i její rostoucí cenu, je stále více aktuální nalezení vhodného alternativního paliva hlavně pro dopravní prostředky. Odhaduje se, že těžba ropy bude vrcholit přibližně v roce 2020 a v dalších letech bude trvale klesat. Další z motivací nalezení alternativního paliva je snaha vymanit se ze závislosti na dodávkách ropy z politicky nestabilních oblastí, protože konflikty v těchto zemích také zvyšují cenu ropy [28]. V současnosti jsou postupně zaváděna alternativní paliva, jako LPG (liquefied petroleum gas), CNG (compressed natural gas), Hythane (směs CNG a vodíku), E85 (směs ethanolu a benzínu) nebo bionafta, která jsou spalována v upravených konvenčních spalovacích motorech. K jejich přednostem, oproti benzínu nebo naftě, patří ekologičtější provoz nebo nižší cena. Nevýhoda těchto paliv spočívá v tom, že pochází z fosilních zdrojů a jsou cenově závislé na těžbě ropy. Tím pádem nemají tato paliva dostatečný potenciál do budoucna nahradit benzín nebo naftu. K dalším alternativním palivům patří elektrina nebo vodík. Vodík je nositelem energie, kterou můžeme využít buď spalováním směsi vzduchu a vodíku ve spalovacím motoru, nebo čistý vodík použít jako palivo pro palivový článek. Při použití obou možností v ideálním případě nevznikají žádné škodlivé emise. V této kapitole se budeme zabývat, spalováním kapalného nebo plynného vodíku ve spalovacích motorech.

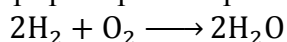
4.1 Hlavní vlastnosti vodíku s ohledem na spalování ve spalovacím motoru

Vodík je nejjednodušší, nejlehčí nejrozšířenějším prvkem vyskytujícím se v přírodě na Zemi i ve vesmíru. Má nejvyšší obsah energie na jednotku hmotnosti a je základním stavebním prvkem celého vesmíru. Vodík se na Zemi vyskytuje volný pouze výjimečně, nejčastěji je vázaný ve sloučeninách např. voda, zemní plyn. Chemický prvek vodík byl objeven v roce 1766 H. Cavendishem. V Tab. 2 jsou uvedeny důležité fyzikální vlastnosti s ohledem na spalování vodíku.

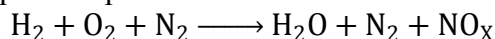
Vlastnost	Hodnota
Molární hmotnost	2,06 g/mol
Teplota varu	-252,8°C
Teplota tuhnutí	-259,2°C
Teplota samovznícení	585°C
Mez výbušnosti se vzduchem	4 – 75% obj.
Hustota kapalné fáze při -259,2°C a 0,1MPa	70,8 kg/m ³
Hustota plynné fáze při 20°C a 0,1MPa	0,089 kg/m ³
Výhřevnost kapalné fáze	120,1 MJ/kg
Výhřevnost plynné fáze	10,8 MJ/kg
Spalné teplo kapalné fáze	141,9 MJ/kg
Spalné teplo plynné fáze	12,8 MJ/m ³
Energie zážehu	0,02 MJ
Teplota plamene	2126 °C
Rychlost plamene	2,75 m/s

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti vodíku

Spalování vodíku v ideálním případě probíhá podle rovnice:



Do reakce vstupuje vodík s kyslíkem a vzniká vodní pára. Ve skutečnosti se v spalovacím motoru spaluje směs vodíku se vzduchem. Vzduch obsahuje 23,16% kyslíku, 75,51% dusíku a zbývající podíl tvoří vzácné plyny. Z toho vyplývá, že musíme v reakci spalování počítat i s dusíkem. Spalování tedy probíhá podle rovnice:



Z reakce vystupuje vodní pára, dusík a oxidy dusíku NO_x . Ideální stechiometrický poměr vzduchu a vodíku pro spalování ve spalovacím motoru je 34:1. Pro porovnání benzínový spalovací motor má ideální stechiometrický poměr vzduchu a benzínu 14,7:1. Při dodržení ideálního stechiometrického poměru má motor nejvyšší výkon, ale dochází zároveň k nejvyšší produkci emisí NO_x .

Nejdůležitější charakteristické vlastnosti vodíku pro spalovací motory jsou:

- široký rozsah hořlavosti
- nízká energie zážehu
- malá vzdálenost hašení
- vysoká rychlost plamene
- vysoká difuzivita
- nízká hustota [35]

Široký rozsah hořlavosti

Ve srovnání s jinými palivy má vodík širokou oblast hořlavosti (4 – 75% obj.). Pro srovnání benzín má hořlavost 1,4 – 7,6% obj. Díky tomu lze vodík spalovat v širokém rozmezí poměru vzduch/palivo a tedy i jako velmi chudou směs. Chudá směs je taková, ve které je poměr vzduchu a paliva větší než ideální stechiometrický poměr. Spalování chudé směsi umožňuje značnou úsporu paliva ve chvíli, kdy není požadován velký výkon. V neposlední řadě má poměr vzduchu a paliva vliv na teplotu spalovacího procesu a množství emisí NO_x [35].

Nízká energie zážehu

Vodík má energii zážehu 0,02 MJ. Pokud ji srovnáme s benzínem, tak vodík má energii zážehu o jeden řád menší (0,29 MJ). Díky tomu dochází k téměř okamžitému spalování i chudé směsi. Nízká energie zážehu má i své nevýhody. Nebezpečným jevem je předčasné zapálení směsi od rozžhavených částí motorů, například od výfukového ventilu, nebo od zbytkových palin. Může přitom také nastat tzv. zpětný zážeh přiváděného paliva [35].

Malá vzdálenost hašení

Vzdálenost hašení je vzdálenost od povrchu válce, při které dochází k uhašení plamene. Vodík má poměrně malou vzdálenost hašení (0,64 mm), oproti benzínu, který má vzdálenost hašení 2 mm. Z toho vyplývají komplikace s větším tepelným namáháním povrchu válce i pístu. Zvyšuje se také riziko zpětného zážehu do sacího potrubí [35].

Vysoká rychlost plamene

Rychlost šíření plamene při spalování vodíku je vyšší než u benzínu. Pokud je dodržen ideální stechiometrický poměr, tak se proces spalování se přibližuje k termodynamicky ideálnímu cyklu motoru a zvyšuje se termodynamická účinnost cyklu. Při spalování chudé směsi, se rychlost plamene snižuje [35].

Vysoká difuzivita

Vodík má velmi vysokou difuzivitu, která je způsobena malou velikostí molekul vodíku. Z toho plyne výhoda tvorby rovnoměrné směsi vodíku a vzduchu. V případě havárie dojde k rychlému rozptýlení vodíku do vzduchu. Naopak vysoká difuzivita vodíku způsobuje problém s vodíkovou křehkostí materiálu a oduhličením materiálu. Vodíková křehkost je způsobena pronikáním molekul vodíku do kovových materiálů. V případě oduhličení dochází ke ztrátě tvrdosti materiálu. Motory spalující vodík musí být vyrobeny z materiálů, které jsou odolné proti vysoké difuzivitě vodíku.

Nízká hustota

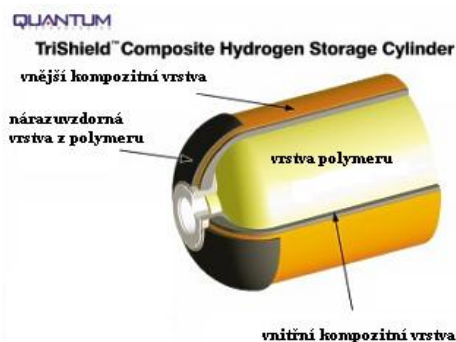
Nejvýznamnějším důsledkem nízké hustoty vodíku je, že bez větší komprese nebo konverze na kapalinu je obtížné skladovat větší množství vodíku. Nízká hustota vodíku vede k nízké energetické hustotě směsi vodíku se vzduchem, a to snižuje výkon motoru. Pro dosažení srovnatelného výkonu s benzínovým motorem, je potřeba zvětšit zdvihový objem motoru. Nízká hustota má za následek také zvýšení spotřeby vodíku oproti benzínu [35].

4.2 Hlavní vlastnosti vodíku s ohledem na skladování v palivových nádržích

Hlavními požadavky na systém skladování vodíku jsou bezpečnost, energetická efektivnost a cenová dostupnost. V současné době můžeme technologie na skladování vodíku rozdělit do třech skupin. Skladování plynného vodíku v tlakových nádržích stlačeného na tlak 35 – 70 MPa, skladování kapalného vodíku o teplotě $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, nebo uložení vodíku navázaného v chemických sloučeninách. Ve fázi výzkumu je ukládání vodíku navázaného v hydridech kovů, komplexních hydridech, nebo v nanostrukturách uhlíku.

Skladování plynného vodíku v tlakových lahvích

Jak už jsme si uvedli vodík, má velmi malou hustotu a ta komplikuje jeho skladování. Pro statické skladování se používají ocelové bezešvé lahve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli v objemech od 1 l do 50 l. V mobilních aplikacích se obvykle používá kompozitních tlakových nádob v objemech od 50 l do 300 l [37]. Provozní tlak v nádržích se pohybuje v rozmezí od 350 až 700 bar. Pro aplikaci v osobních autech automobilky uvádějí, že pro přijatelné rozměry palivové nádrže a dojezd kolem 500 km, musí být vodík v nádrži pod tlakem 700 barů.



Obr. 23 Kompozitní palivová nádrž na vodík [36]

Na Obr. 23 je kompozitní palivová nádrž na vodík. Vnitřní povrch kompozitní nádrže tvoří tenká vrstva kovu nebo speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu

kompozitu. Vnější vrstvy jsou z kompozitního materiálu a na kritických místech jsou opatřeny nárazuvzdornou vrstvou z polymeru.

Pro skladování vodíku ve vysokotlakých nádržích musíme jej nejprve stlačit na požadovaný tlak. Pro stlačování vodíku se používá zejména pístových kompresorů. Energie potřebná pro stlačení vodíku na 350 bar dosahuje přibližně 30% energie v palivu [36].

Skladování kapalného vodíku

Kapalný vodík má o 75% vyšší energetickou hustotu než plynný vodík stlačený na 700 barů. Kvůli své nízké teplotě varu musí být kapalný vodík skladován při teplotě $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů viz. Obr. 24. Při skladování dochází k odpařování vodíku vlivem přestupu tepla z okolí, přibližně 1 – 3% obsahu za den. Odpařený vodík musí být z nádrže odpouštěn pomocí regulačního ventilu, aby nedošlo k přetlaku.



Obr. 24 Nádrž pro skladování kapalného vodíku [36]

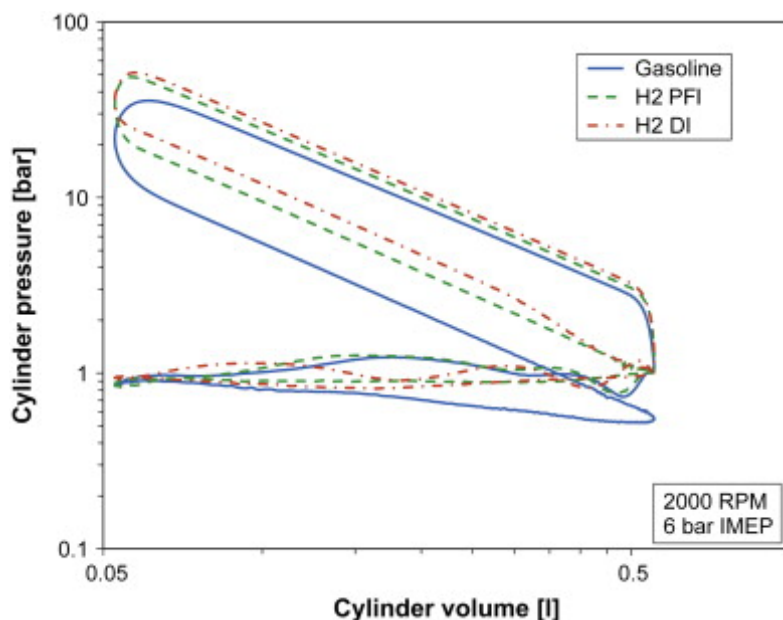
Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40% energie v palivu [36].

Skladování vodíku vázaného v hydridech kovů

Další způsob uchování vodíku je v pevné fázi ve formě hydridů. Hydridy vodíku na bázi např. Li, Ca, Mg, Na, jsou schopny v sobě absorbovat velké množství vodíku. Tyto hydridy jsou za běžných teplot stabilní a bezpečné. Při vyšších teplotách ($150 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) dochází k jejich rozpadu a uvolňuje se z nich vodík. V dnešní době se vývoj soustřeďuje na hydridy s nízkou teplotou rozpadu a se schopností uchovat v sobě velké množství vodíku.

5 Porovnání spalovacích motorů pro spalování vodíku (HICE)

Pro spalování vodíku se používají upravené stávající čtyřtákní zážehové pístové motory. Spalovací motor pracuje v kruhovém ději, který se popisuje Ottovým cyklem viz. Obr. 25. Pracovní oběh čtyřdobého spalovacího motoru se skládá ze 4 fází: sání, komprese, expanze, výfuk. Přičemž pouze při expanzi koná motor práci.



*Pozn.:
Cylinder pressure - tlak
Cylinder volume –objem
Gasoline – benzín
H2 PFI - přeplňovaný HICE
H2 DI – HICE s přímým
vstřikováním*

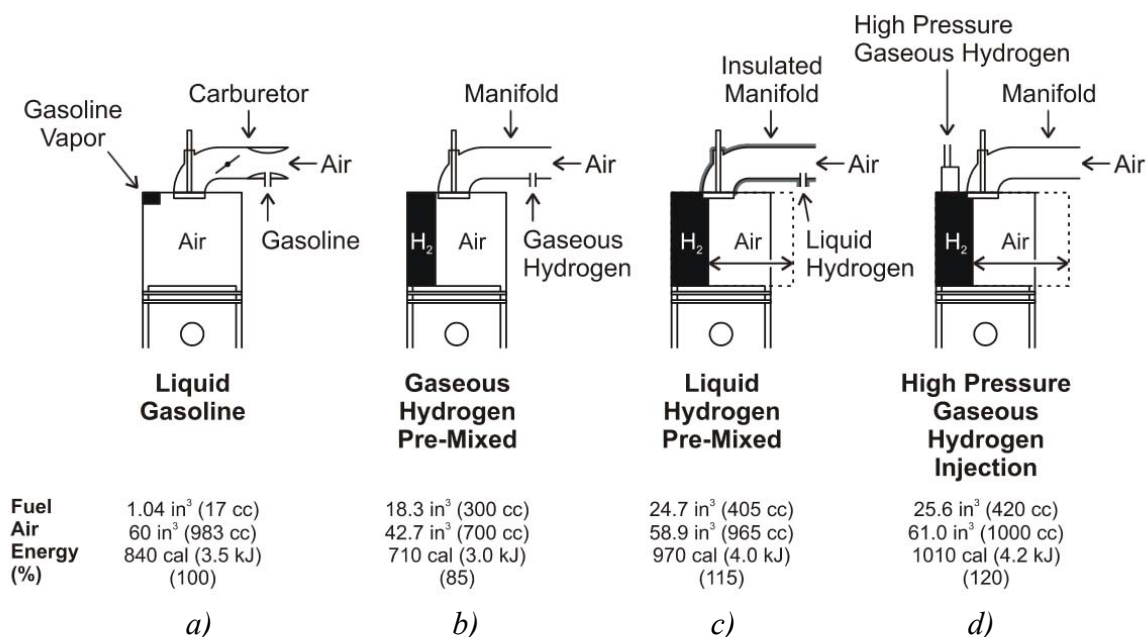
Obr. 25 P-V diagram spalovacích vodíkových motorů [38]

5.1 Systémy vstřikování paliva

V první fázi cyklu spalovacího motoru dochází k přípravě směsi a vstřikování paliva do válce. Podle konstrukce vstřikovacího systému můžeme rozdělit HICE na čtyři typy:

- s nepřímým vstřikováním,
- s přímým vstřikováním,
- s přeplňováním,
- na kapalný vodík.

Na Obr. 26 jsou znázorněny 3 typy HICE v porovnání s benzínovým karburátorovým motorem.



a) kapalný benzín b) HICE s přímým vstřikováním c) HICE na kapalný vodík
d) přeplňovaný HICE

Obr. 26 Typy vodíkových spalovacích motorů [37]

Pozn.:

gasoline Vapor – benzínové páry

Carburetor – karburátor

Air – vzduch

Gasoline – benzín

Liquid gasoline– kapalný benzín

Fuel – palivo

Manifold – potrubí

Gaseous hydrogen – plyný vodík

Insulated manifold - izolované potrubí

High pressure – vysoký tlak

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé typy vstřikovacích systémů.

5.1.1 HICE s nepřímým vstřikováním

Nejjednodušším a nejstarším systémem dodávání paliva do spalovacího motoru je prostřednictvím karburátoru nebo centrálního – jednobodového vstřikování případně vícebodového vstřikování. Palivová směs je tvořena v karburátoru případně v sacím potrubí v průběhu sací fáze cyklu motoru. Vstřikování vodíku probíhá pod nízkým tlakem, oproti jiným systémům vstřikování. Výhodou nepřímého vstřikování je možnost využití modifikovaného systému vstřikování paliva u stávajících benzínových motorů. Nevýhodou nepřímého vstřikování je větší náchylnost k předčasnému zapálení vodíkové směsi a také zpětnému zášlehu zapálené směsi do sacího potrubí. Nepřímé vstřikování není tak výkonné a účinné jako přímé vstřikování nebo systém s přeplňováním [37].

5.1.2 HICE s přímým vstřikováním

Dokonalejším systémem než centrální vstřikování, je přímé vstřikování. Ke vstřikování paliva dochází po uzavření sacího ventilu, při kompresním zdvihu pístu. Vstřikován je tedy pouze vodík, vzduch je nasáván sacím ventilem. Tímto se zamezí zpětnému zášlehu a

předčasněmu zapálení směsi. Z důvodu dostatečného promíchání směsi, je důležitá rychlost vstřikování. Doba pro vstřikování se pohybuje mezi 20 – 4 ms při

1000 – 5000 ot/min. Experimenty ukázaly, že pro kvalitní promíchání směsi je zapotřebí 10 ms. Jestliže je směs vstřikována pozdě nebo pomalu, dochází k nedostatečnému promíchání. Spalováním nehomogenní směsi je výrazně zvyšována produkce emisí NO_x . Motory s přímým vstřikováním vodíku mají asi o 15% vyšší účinnost jako obdobné benzinové motory [38].

5.1.3 HICE s přeplňováním

Účelem přeplňování spalovacích motorů je zvýšení množství vzduchu a tím i dodávky paliva do spalovacího prostoru za jednotku času. Je to osvědčený a dobře zvládnutý postup u konvenčních spalovacích motorů pro zvýšení výkonu a účinnosti při zachování stejného zdvihového objemu. U přeplňovaných vodíkových motorů se vodík vstřikuje do sacího kanálku. Vzduch se společně s vodíkem za použití turbodmychadla, které je poháněno horkými výfukovými plyny, a mezichladiče dopraví do spalovacího prostoru motoru. Vlivem komprese vzduchu v turbodmychadle má směs přivedená do válce vyšší teplotu. To vede k vysokým spalovacím teplotám, které způsobují zvýšenou produkci emisí NO_x . Z tohoto důvodu se používá mezichladič vzduchu. Dalším způsobem jak snížit emise NO_x je spalování chudší směsi. Jak je vidět z porovnání na Obr. 26 má palivo připravené tímto způsobem největší energii a s tím spojenou nejvyšší účinnost. Účinnost přeplňovaného vodíkového motoru se pohybuje kolem 39% [38].

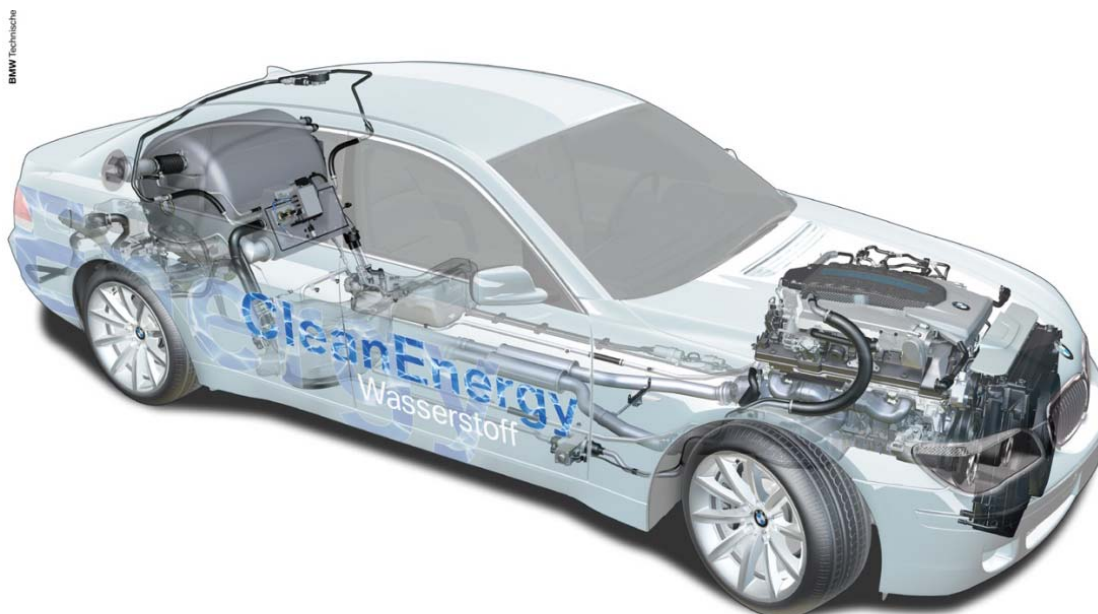
Čtyřválcový šestnáctiventilový přeplňovaný motor o objemu 2,3 l byl použit v automobilu Ford Focus, který byl představen v roce 2003. Automobil má jízdní dosah asi 240 km, maximální výkon 88 kW a zrychluje z 0-100 km/h za 12 s. Hmotnost vozu je 3350 kg.

5.1.4 L- H_2 ICE na kapalný vodík

L- H_2 ICE znamená, že pístový spalovací motor používá jako palivo kapalný vodík. Hlavní výhoda oproti plynnému vodíku je, že kapalný vodík má vyšší energetickou hustotu.

Kapalný vodík o teplotě $-253\text{ }^\circ\text{C}$ je veden z nádrže vakuově izolovaným potrubím, přes výměník tepla na kryogenní čerpadlo, kde se vodíku dodá tlak 3 – 6 barů a teplota stoupne na $-60\text{ }^\circ\text{C}$. Pod tímto tlakem je vodík nepřímě vstřikován do sacího potrubí. Použití kapalného vodíku má podobný efekt jako použití mezichladiče u přeplňovaných motorů (do válce se dostane více paliva). Díky nízkým teplotám paliva, je nižší i spalovací teplota. To umožňuje dosáhnout velmi dobrých výsledků emisí NO_x [38].

BMW vyvinulo 12 válcový motor o zdvihovém objemu 5,4 l a výkonu 260 HP, který je schopný spalovat jak benzin, tak kapalný vodík. Motor je osazen ve voze BMW Hydrogen 7 viz. Obr. 27. Vůz obsahuje nádrž na kapalný vodík o objemu 168 l, která pojme 8 kg vodíku. Vodík vystačí na ujetí 200 km. Dalších 500 km ujede tento vůz na benzin, který je uskladněn ve standardní 74 l nádrži [38].



Obr. 27 BMW Hydrogen 7 [39]

5.2 Systémy zapalování směsi

Ve třetí fázi cyklu spalovacího motoru dochází k zážehu směsi od svíčky. Vzhledem k dobré hořlavosti vodíkových směsí jsou většinou dostatečné zapalovací svíčky pro zážehové motory. Problém nastává při spalování velmi chudých směsí, kdy je zapotřebí více zápalné energie po delší čas. Důležité je také přesné načasování zážehu směsi z důvodu rychlého hoření vodíku.

Systémy zapalování můžeme rozdělit do tří skupin:

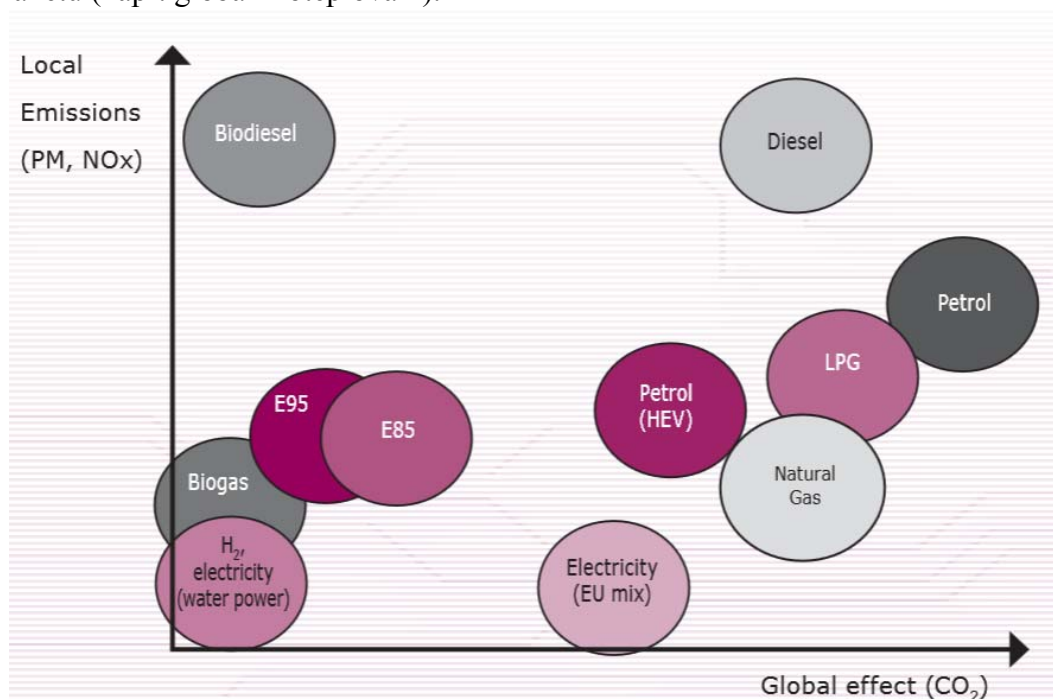
- konvenční zapalovací svíčky, případně použití několika konvenčních svíček na jeden válec
- speciální plazmové svíčky
- výšlehové zapalování

6 Porovnání parametrů spalovacích motorů z hlediska emisí

Z hlediska ekologie nás nejvíce zajímají emise skleníkových plynů. Skleníkové plyny přispívají ke globálnímu oteplování planety, které sebou přináší klimatické změny. Nejvíce skleníkových plynů vzniká při využívání fosilních paliv. Nejvýznamnější je oxid uhličitý (CO_2).

Používání fosilních paliv nese i zdravotní rizika. Např. oxidy dusíku (NO_x) a prachové částice (PČ) mají škodlivý vliv na dýchací cesty. Oxid uhelnatý (CO) blokuje schopnost hemoglobinu přenášet kyslík. Nespálené uhlovodíky (HC) a pevné částice jsou karcinogenními látkami, které mohou vyvolat rakovinu. Aromatické uhlovodíky vznikající při spalování fosilních paliv mají negativní vliv na reprodukční funkce u mužů.

Na Obr. 28 je znázornění zastoupení vlivu emisí různých paliv na bezprostřední okolí a na celou planetu (např. globální oteplování).



Pozn.: Local Emission – emise v blízkém okolí vozidla, Global effect – tvorba skleníkových plynů, globální oteplování

Petrol – benzín, Natural gas – CNG, Electricity – elektřina, Biogas – bioplyn

Obr. 28 Porovnání dostupných paliv pro provoz v motorových vozidlech z hlediska emisí [44]

Tab. 3 nám ukazuje vzrůstající trend produkce emisí CO_2 při spotřebovávání fosilních paliv v celosvětovém měřítku. Emise vznikající v dopravě tvoří asi 13% z celkového množství. Emise vznikající v energetice tvoří 26% z celkového množství [41].

Rok	1990	1997	2010	2020
Emise CO_2 [mld. t]	20,8	22,5	29,6	36,1

Tab. 3 Emise CO_2 podle prognózy Mezinárodní energetické agentury EIA

V následující kapitole budou popsány nejvýznamnější emisní složky vznikající ve spalovacích motorech využívající různá paliva.

6.1 Emise vznikající při spalování benzínu nebo nafty

V zemích Evropské unie stanovuje limitní hodnoty škodlivin ve výfukových exhalacích benzinových a naftových motorů pro motorová vozidla v závislosti hmotnosti škodliviny na ujeté vzdálenosti norma EURO. Norma stanovuje limity CO, HC, NO_x a pevných částic. Při spalování benzínu a nafty dále vzniká CO₂ a oxid siřičitý (SO₂). Každý nově vyrobený osobní automobil, nákladní automobil nebo autobus, který je uváděn na trh v Evropské unii od roku 1992 musí splňovat platnou emisní normu EURO. Z Tab. 4 je zřejmé, že hodnoty sledovaných emisí se neustále zpřisňují. Škodlivé látky jsou ve výfukových plynech objemově obsaženy přibližně jedním procentem.

Rok/norma		CO		NO _x		HC + NO _x		HC	PČ
		[g/km]		[g/km]		[g/km]		[g/km]	[g/km]
		benzín	nafta	benzín	nafta	benzín	nafta		
1992	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	0,70*	-	0,08**
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	-	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	-	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	-	0,23	0,10	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	-	0,17	0,10	0,005

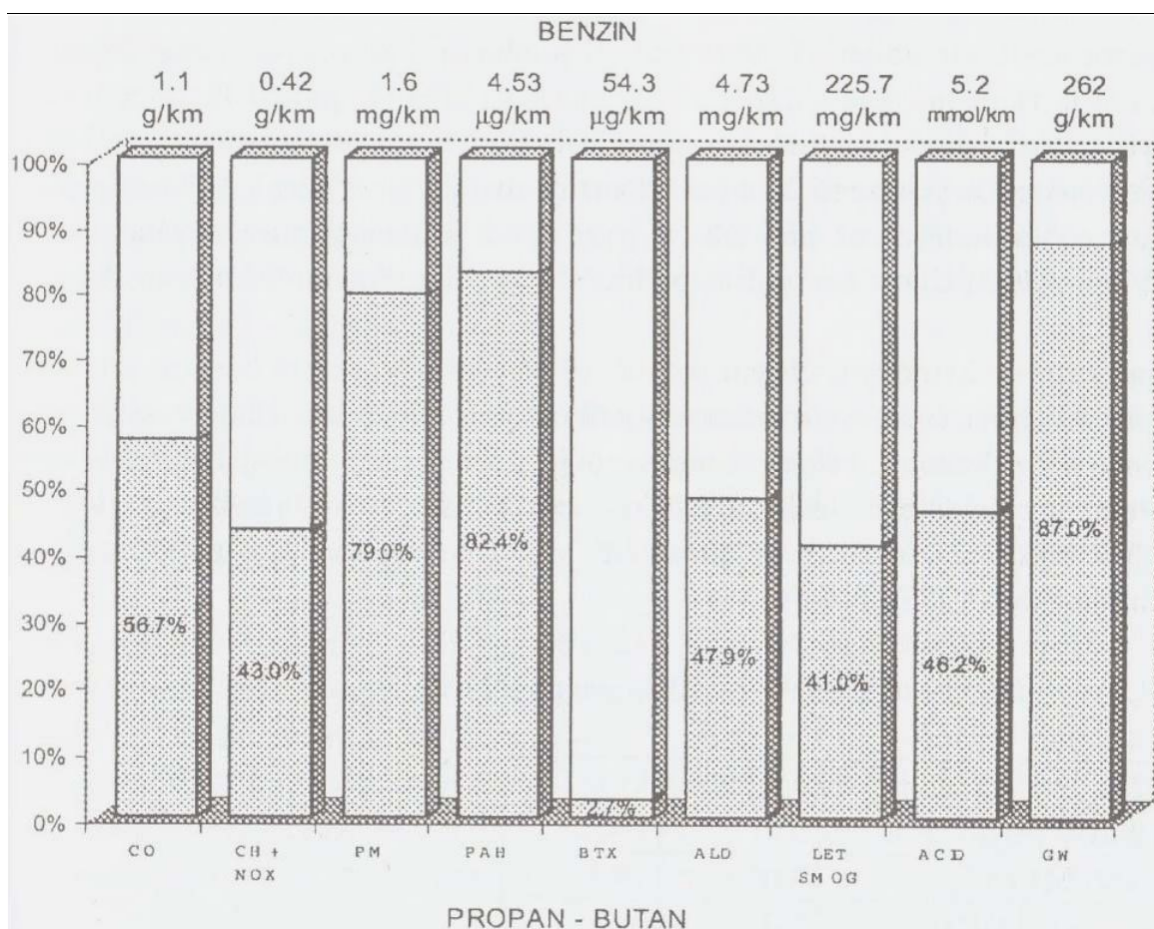
* 0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

** 0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

Tab. 4 Limitní hodnoty emisí pro osobní automobily podle normy EURO [40]

6.2 Emise vznikající při spalování LPG

Vozidla spalující LPG mají v porovnání s benzínem nebo naftou nižší emise ve výfukových plynech na ujetý kilometr. Oproti vozidlům s benzinovým motorem mají nižší emise NO_x, CO, aldehydů a polycyklických uhlovodíků. Oproti naftovým motorům je nižší produkce pevných prachových částic. Nevytváří se také kouř, saze a oxidy síry. Výrazně nižších hodnot emisí (cca. 40%) oproti benzinovým motorům je dosahováno u studených startů motorů při nízké okolní teplotě. Na Obr. 29 je procentuální porovnání emisí LPG a benzínu.

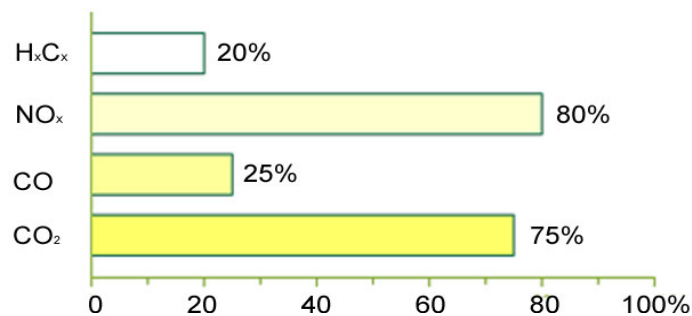


Pozn.: CO – oxid uhelnatý, CH+NO_x – uhlovodíky + oxidy dusíku, PM – pevné částice, PAH – polycyklické aromatické uhlovodíky, BTX- aromatické uhlovodíky skupiny benzenu, ALD – aldehydy, SMOG ACD – látky způsobující smog a kyselé deště, GW – látky způsobující globální oteplování

Obr. 29 Porovnání emisních vlastností automobilu provozovaného na LPG oproti benzínu (100%) [42]

6.3 Emise vznikající při spalování CNG

Taktéž motor spalující CNG má nižší hodnoty emisí než spalovací motor na benzín nebo naftu. U sledovaných emisí NO_x je snížení o 20% oproti benzínu. U emisí CO je výrazné snížení o 75% oproti benzínu. Produkce CO₂ je o více než 20% menší než u srovnatelného vozidla na benzín. Rovněž se dosahuje výrazného snížení produkce pevných částic a karcinogenních uhlovodíků. Kouřivost motorů na CNG je prakticky zanedbatelná. V porovnání s naftou spaliny CNG neobsahují žádné SO₂. Spalování CNG má menší vliv na skleníkový efekt než nafta nebo benzín. Procentuální porovnání sledovaných emisí CNG a benzínu je na Obr. 30.

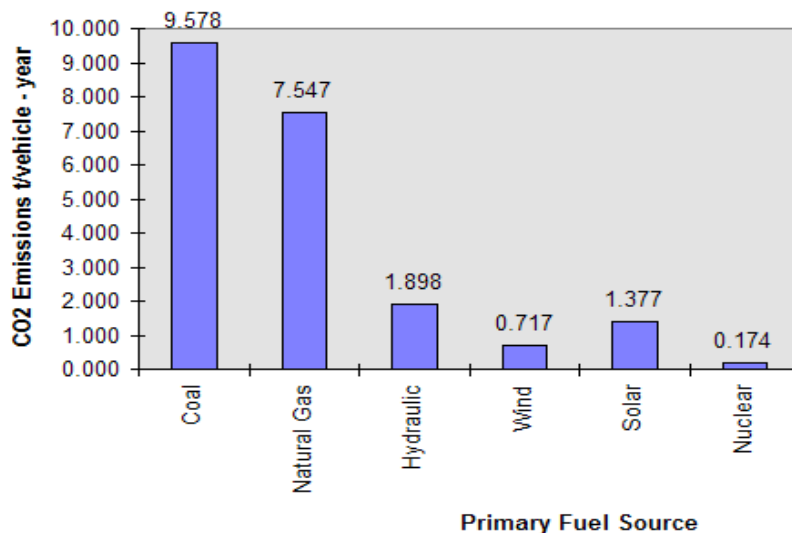


Obr. 30 Porovnání emisních vlastností automobilu provozovaného na CNG oproti benzínu (100%) [43]

6.4 Emise vznikající při spalování vodíku

Jediné měřitelné emise při spalování vodíku ve spalovacích motorech jsou emise NO_x. Emise NO_x vznikají vždy při vysokoteplotním spalování. V motorovém vozidle pracuje spalovací motor většinu času s nižším zatížením. Při nižším zatížení motor spaluje chudou směs (do motoru je vstřikováno málo vodíku). V důsledku spalování chudé směsi klesne teplota při spalovacím procesu a zároveň poklesne i produkce emisí NO_x. Při plném zatížení motoru se zvyšuje poměr vodíku v palivové směsi a tím pádem roste teplota spalování a je produkováno nejvyšší množství emisí NO_x.

Jak už bylo několikrát řečeno, vodík slouží pouze jako zásobárna energie a je nutno jej nějakým způsobem vyrobit. Proto je nutné do celkové bilance emisí vodíku zahrnout emise, které vzniknou při jeho výrobě z primárního zdroje. Z Obr. 31 je zřejmé, že nejvýhodnějším primárním zdrojem pro výrobu vodíku z hlediska produkce emisí CO₂ jsou obnovitelné zdroje energie nebo jaderná energetika.



Pozn.: CO₂ Emissions t/vehicle – year – emise CO₂ t/vozidlo za rok,
 Primary Fuel Source – primární zdroj energie, Coal – uhlí, Natural Gas – zemní plyn,
 Hydraulic – voda, Wind – vítr, Solar – slunce, Nuclear – jaderná energie

Obr. 31 Porovnání produkce emisí CO₂ vodíkovým automobilem při zohlednění primárního zdroje výroby vodíku [45]

7 Posouzení vodíku jako paliva

V Tuto kapitole budou porovnány ekonomické náklady na ujetý kilometr osobního automobilu, při použití různých paliv. Jako referenční palivo je použit benzín, který je porovnán s LPG, CNG a vodíkem.

7.1 Porovnání paliv podle nákladů na ujetý kilometr

Koncová cena paliva pro zákazníka na čerpací stanici se skládá z mnoha složek a je pohyblivá. Cena paliv je závislá na ceně výchozích surovin a energií, a také na daňové politice konkrétního státu.

Celkovou cenu každého paliva v ČR tvoří:

- Náklady na získání základní suroviny pro výrobu
- Náklady na výrobu paliva
- Náklady na distribuci
- Spotřební daň
- Daň z přidané hodnoty (DPH)

Cenu benzínu v ČR tvoří přibližně z 35% cena ropy, 10% rafinace a distribuce, 34% spotřební daň a 21% DPH. Tedy zhruba z 55% tvoří cenu benzínu nebo nafty daňové zatížení státu. Spotřební daň na benzín v ČR v roce 2014 je 12,84 Kč/l.

Cena LPG je zhruba o polovinu nižší než cena benzínu nebo nafty. Je to způsobeno zejména nízkou spotřební daní, která je v současnosti 2,15 Kč/l. Při použití LPG v automobilu je potřeba počítat se zvýšením spotřeby paliva oproti benzínu.

Cena CNG se udává v korunách za kilogram, protože se prodává v plynné formě. Pro jednoduché srovnání 1,4 kg CNG má objem 1 m³ a je ekvivalentem 1 l benzínu. Výše spotřební daně v ČR je nastavena dle zákona 261/2007 Sb. viz. Tab. 5.

Časové rozmezí	Cena
od 1.1.2012 do 31.12.2014	0,36 Kč/m ³
od 1.1.2015 do 31.12.2017	0,72 Kč/m ³
od 1.1.2018 do 31.12. 2019	1,44 Kč/m ³
od 1.1.2020	2,80 Kč/m ³

Tab. 5 Vývoj spotřební daně na CNG v ČR

Cena vodíku se taktéž udává v korunách za kilogram vodíku. Pro srovnání 1 kg vodíku je ekvivalentem 3,4 l benzínu. Cena vodíku je silně závislá na ceně vstupních energií a technologii výroby. Zároveň lze počítat s daňovými zvýhodněními oproti konvenčním palivům, díky menší produkci emisí.

V Tab. 6 jsou uvedeny ceny paliv a ceny za 1 km jízdy. Ceny benzínu, LPG a CNG jsou reálné ceny v ČR z dubna 2014. Orientační ceny vodíku jsou přebrány ze studie od Vodíkové iniciativy George Bushe z roku 2003 viz. [46], ceny jsou přepočítány podle kurzu 20 Kč za \$1.

Palivo	Zdroj energie - způsob výroby	Cena bez DPH, spotřební daně	Cena vč. DPH a spotř. daně	Kombinovaná spotřeba paliva na 100 km	Cena na 1 km jízdy bez DPH, spotřební daně	Cena na 1 km jízdy za vč. DPH
Benzín	-	17 Kč/l	36Kč/l	7 l	1,19 Kč/km	2,52 Kč
CNG	-	20 Kč/kg	26Kč/kg	3,5 kg	0,7 Kč/km	0,91 Kč
LPG	-	13,2 Kč/l	19Kč/l	9 l	1,18 Kč/km	1,71 Kč
H ₂	větrná elektrárna, rychlost větru min. 7m/s – elektrolýza vody	60Kč/kg	-	1 kg	0,6 Kč/km	-
H ₂	fotovoltaická elektrárna s 10% účinností – elektrolýza vody	190Kč/kg	-	1 kg	1,9 Kč/km	-
H ₂	biomasa - zplyňování	38 Kč/kg	-	1 kg	0,38 Kč/km	-
H ₂	Parní reforming zemního plynu	60 Kč/kg	-	1 kg	0,6 Kč/km	-
H ₂	Jaderná elektrárna – elektrolýza / termochemický rozklad vody	50 Kč/kg	-	1 kg	0,5 Kč/km	-

Tab. 6 Náklady na ujetý kilometr osobního automobilu při použití různých paliv

Podle Tab. 6 se jeví nejvýhodnější použití vodíku vyrobeného pomocí zplyňování biomasy a dále vodíku vyrobeného pomocí termochemického rozkladu vody v jaderné elektrárně. Výroba vodíku pomocí elektrolýzy a větrných elektráren umístěných ve vhodných lokalitách by mohla být také konkurenceschopná.

Ve srovnání ceny za 1 km jízdy je cena 1 km jízdy osobního automobilu využívajícího vodík ve většině případů jen nepatrně nižší než cena 1km jízdy automobilu spalujícího CNG. Výjimku tvoří vodík vyrobený elektrolýzou z elektřiny pocházející z FVE, kdy je vysoká cena daná nízkou účinností fotovoltaických článků a vysokých pořizovacích nákladů. Nejlevněji ujedeme 1km s vodíkem vyrobeným z biomasy.

7.2 Reálné ceny vodíku v roce 2014

Reálná cena vodíku na čerpacích stanicích je závislá na ceně vstupních energií v energetickém mixu a surovin, kterých je použito pro výrobu vodíku. Cena energií a surovin pro výrobu vodíku se liší stát od státu v závislosti na přírodních podmínkách a ekonomické situaci.

Reálné ceny vodíku v Kalifornii v USA se pohybují v rozmezí mezi \$3 a \$15 za barel. Tzn. při kurzu 20 Kč za \$1 vychází cena 60 – 300 Kč za 1 kg vodíku [47].

V Norsku se prodává vodík na čerpacích stanicích za 90 NOK za 1kg vodíku. Tzn. při kurzu 3,3 Kč za 1 NOK, vychází cena na 299 Kč za 1 kg vodíku. V Norsku se vyrábí vodík elektrolýzou vody pomocí elektřiny vyrobené ve vodních elektrárnách.

V Německu stojí 1 kg vodíku 9,5 € tzn. při kurzu 27 Kč za 1 € vychází cena 260 Kč/kg vodíku.

Na jediné vodíkové čerpací stanici v ČR v Neratovicích je cena 120 Kč za 1 kg vodíku. V tomto případě je vodík vyráběn parním reformingem zemního plynu.

Současným cílem společností budujících sítě vodíkových čerpacích stanic je, aby cena za 100 km jízdy osobním automobilem na vodík stála stejně jako 100 km jízdy osobním automobilem na benzín. To potvrzují ceny z Německa a Norska, kde jsou nejrozvinutější sítě vodíkových čerpacích stanic v Evropě. V současné době jsou tyto ceny uměle vytvořené a neodpovídají skutečným výrobním cenám, protože v Německu ani v Norsku se nevyužívá kapacita vybudovaných vodíkových čerpacích stanic na 100% a jejich provoz je silně neekonomický. Zatím se výrobní cena 1 kg vodíku se pohybuje v rozmezí 60-70 € za kilogram. Dá se předpokládat, že při větším rozšíření vozidel využívající k pohonu vodík, dojde ke snížení výrobních nákladů. Koncová cena bude klesat vlivem použití výhodnějších energetických zdrojů a konkurence mezi dodavateli vodíku.

8 Výroba vodíku elektrolýzou vody elektrickou energií z fotovoltaické elektrárny (FVE)

V České republice jsou nejrozšířenějším obnovitelným zdrojem FVE. A to především díky štědré dotační politice státu. Nevýhodou FVE je to, že vyrábí elektrickou energii pouze v době slunečního svitu přes den. V době kdy je energie nejdražší a je jí potřeba nejvíce FVE žádnou energii nevyrábí. Akumulace energie ve formě vodíku vyrobeného elektrolýzou a zpětná výroba elektrické energie pomocí palivového článku by mohla být dobrou alternativou jak zefektivnit provoz FVE. Vodík vyrobený v době, kdy je v rozvodné síti velké množství energie a FVE musí být odpojovány z důvodu udržení stability v rozvodné síti, by mohl sloužit i jako palivo pro automobily. V následující kapitole bude proveden orientační výpočet výroby vodíku elektrolýzou vody při použití elektrické energie z FVE.

8.1 FVE Kutnohorsko

Jako příklad středně velké FVE, která by mohla být umístěná např. na střeše výrobního haly, byla vybrána elektrárna o špičkovém výkonu necelých 100 kW.

Fotovoltaická elektrárna Kutnohorsko

Instalovaný výkon: $P = 99,36 \text{ kWp}$

Vyrobena energie za rok 2013: $W_{\text{celk}} = 106\,525 \text{ kWh}$

Plocha: 800 m^2

Jako elektrolyzátor byl vybrán typ HySTAT-10-10 od firmy Hydrogenics především pro svůj velký dynamický rozsah a dostatečný výkon potřebný k maximální produkci vodíku.

Elektrolyzátor HySTAT-10-10

Jmenovitá kapacita	10 Nm ³ /h
Dynamický rozsah kapacity	25 – 100%
Výstupní tlak	10 barg
Čistota vodíku	99,9%
Výkon potřebný k maximální produkci vodíku	100 kW
Spotřeba energie na 1m ³ H ₂	5,4 kWh
Spotřeba vody na 1Nm ³ H ₂	1,5 – 2 l
Napětí	3x400V ± 3%
Frekvence	50 Hz ± 3%
Elektrolyt	H ₂ O + 30% KOH
Množství elektrolytu	220 l
Pracovní teplota	od -20°C do +40°C
Rozměry (D x Š x V)	6,10m x 2,44m x 2,90m

Tab. 7 Provozní charakteristiky elektrolyzátoru HySTAT-10-10 [49]

Výroba vodíku probíhá v dynamickém rozsahu elektrolyzátoru 25 – 100% z toho vyplývá, že FVE musí dosáhnout minimálního výkonu 25 kW pro zahájení výroby vodíku. Pro zjištění kolik procent energie za rok vyrobí elektrárna s vyšším výkonem než 25 kW, musíme sestavit tabulku relativní četnosti Tab. 8. Tato tabulka nám udává na kolik procent je využívána instalovaná kapacita elektrárny během slunečního dne v jednotlivých měsících. Z důvodu obtížné dohledatelnosti těchto dat, bylo použito dat z [48] v tabulce 6.9.

	0 – 20%	20 – 40%	40 – 60%	60 – 80%	Nad 80%
Leden	60,1	30,7	2,9	3,2	3,1
Únor	58,7	27,3	4,5	3,4	6,2
Březen	37,3	40,5	9,1	4,2	8,9
Duben	20,1	26,2	11,7	12,9	29,2
Květen	25,7	38,0	10,2	8,6	17,4
Červen	28,9	40,1	10,3	7,0	13,7
Červenec	25,7	31,7	11,9	11,5	19,2
Srpen	22,7	33,9	11,4	11,0	20,9
Září	21,8	36,1	11,8	11,7	18,5
Říjen	38,5	43,6	6,2	5,7	5,9
Listopad	45,3	33,2	5,1	9,0	7,4
Prosinec	58,7	27,3	4,5	3,4	6,2

Tab. 8 Relativní četnost výroby z FVE za délku slunečního dne [48]

Tab. 9 nám udává, kolik % energie bylo vyrobeno v jednotlivých měsících z celkové roční výroby elektrárny.

Období	Vyrobená energie	% podíl z celkové vyrobené energie za rok
Leden 2013	2 359,50 kWh	2,2
Únor 2013	3 680,10 kWh	3,5
Březen 2013	9 123,0 kWh	8,6
Duben 2013	10 234,50 kWh	9,6
Květen 2013	12 241,00 kWh	11,5
Červen 2013	13 505,40 kWh	12,7
Červenec 2013	17 163,10 kWh	16,1
Srpen 2013	14 848,40 kWh	13,9
Září 2013	8 939,50 kWh	8,4
Říjen 2013	8 529,60 kWh	8,0
Listopad 2013	2 904,60 kWh	2,7
Prosinec 2013	2 996,60 kWh	2,8
Celkem	106 525,80 kWh	

Tab. 9 Měsíční statistika vyrobené energie FVE Kutnohorsko [50]

Váženým průměrem relativní četnosti 0 – 20% výroby FVE z Tab. 8 a % podílu celkové vyrobené energie za rok z Tab. 9 nám vyjde, že zhruba 7% tj. 7 255 kWh vyrobené elektrické energie nelze použít pro výrobu vodíku z důvodu nedostatečného výkonu FVE. (Elektrolyzátor není v provozu, protože není dosaženo minimálního výkonu 25 kW.) Tato energie by mohla být dodávána do rozvodné sítě.

Elektrická energie, kterou můžeme použít na výrobu vodíku je tedy:

$$W_{\text{ef}} = W_{\text{celk}} - W_z = 106\,525\text{kWh} - 7\,255\text{kWh} = 99\,270\text{kWh}$$

Objem vodíku vyrobeného elektrolyzérem za rok:

$$V_{\text{H}_2} = \frac{W_{\text{ef}}}{\text{spotřeba energie na } 1\text{m}^3 \text{ H}_2} = \frac{99\,270\text{kWh}}{5,4\text{kWh}} = 18\,383\text{ Nm}^3 \text{ H}_2$$

Hmotnost vyrobeného vodíku za rok:

$$m_{\text{H}_2} = \rho_{\text{H}_2} \cdot V_{\text{H}_2} = 0,089 \text{ kgm}^{-3} \cdot 18\,383 \text{ Nm}^3 = 1\,636 \text{ kg H}_2$$

Maximální spotřeba vody za rok:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2} \cdot S_{\text{H}_2\text{O}} = 18\,383 \text{ Nm}^3 \cdot 2 \text{ l} = 36\,766 \text{ l H}_2\text{O}$$

Pokud by se 7% energie z FVE Kutnohorsko, které nelze použít na výrobu vodíku, dodávalo do distribuční sítě, a zbylých 93% by se použilo na výrobu vodíku, vyrobilo by se zhruba 1 636 kg vodíku a spotřebovalo by se 36 766 l vody.

Při ročním nájezdu osobního automobilu 19 000 km a spotřebě 1,04 kg H₂ / 100 km by vyrobený vodík vystačil pro 8 automobilů na 1 rok provozu.

Pro úplnost musíme dodat, že před použitím vodíku jako paliva pro automobily je potřeba vodík buď stlačit na tlak 700 barů, nebo ho podchladit na -250 °C. Tato energie není ve výpočtu uvažována a musela by se dodávat z jiného zdroje. Pro získání přesnějších výsledků produkce vodíku by bylo nutné provést přesné měření relativní četnosti využití výkonu FVE.

Pokud využijeme údajů uvedených v Tab. 6 zjistíme, že náklady na provoz osobního automobilu s tímto způsobem vyrobeným palivem jsou 1,9 Kč/km. Dá se předpokládat, že takto vyrobené palivo nebude zatíženo spotřební daní, díky tomu, že při výrobě a spotřebě nevznikají prakticky žádné emise. Tím pádem se stává levnější alternativou oproti benzínu nebo naftě. Pro přesnější ekonomickou analýzu využitelnosti takto koncipované energetické soustavy je potřeba znát zejména, vstupní náklady na elektrárnu a elektrolyzátor, provozní náklady elektrolyzátoru, provozní náklady na skladovací nádrže a stlačování vodíku, životnost jednotlivých částí a pořizovací a provozní náklady vozidel.

Závěr

V práci byla provedena základní rešerše problematiky obnovitelných zdrojů energie a konzervace energie. Důraz byl kladen na posouzení vodíkového paliva získaného elektrolýzou vody. Přestože je v současné době vývoj pohonů automobilů zaměřen na oblast palivových článků, využívajících jako zdroj energie vodík, bylo v práci popsáno využití vodíku jako paliva pro spalovací motory. Pozornost byla věnována jednotlivým konstrukčním uspořádáním spalovacích motorů na vodík. Vodíkový spalovací motor byl porovnán s motory spalujícími konvenční paliva z hlediska emisí. Podařilo se teoreticky prokázat, že pokud se použije na výrobu vodíku obnovitelný zdroj energie, vzniká při výrobě a dalším použití vodíku velmi malé množství emisí nebo nevznikají emise žádné. Dále se podařilo prokázat, že vodík jako palivo pro automobily je ekonomicky konkurenceschopným palivem. Náklady osobního automobilu se pohybují v závislosti na zvolené technologii výroby vodíku od 0,38 Kč/km do 1,9 Kč/km. Na příkladu středně velké FVE o výkonu 100 kWp, byla demonstrována aplikace výroby vodíku pomocí elektrolýzy vody. Při provedení orientačního výpočtu vyšlo, že za použití elektrolyzéru HySTAT-10-10 je možné vyrobit 1 636 kg H₂ za rok. Takové množství vodíku by stačilo při ročním nájezdu 19 000 km na provoz 8 osobních automobilů při spotřebě paliva 1,04 kg H₂ na 100 km.

Vodík v kombinaci s použitím obnovitelných zdrojů energie představuje unikátní bezemisní technologii. Vodík v ní plní funkci paliva nebo akumulátoru. Hlavní uplatnění vodíkových technologií bude v blízké budoucnosti v energetice a dopravě. V současné době prochází velmi rychlým vývojem technologie palivových článků, využívající jako zdroj energie vodík. Vývoji palivových článků, které by mohly sloužit pro pohon automobilů, nebo jako záložní zdroj elektrické energie, se věnují vědecké týmy z celého světa. Velkou výzvou pro další vývoj vodíkové technologie, zvláště pro automobilový průmysl, je vyvinutí bezpečného způsobu skladování většího množství vodíku v přijatelném objemu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Energetický mix ČR. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. 2013 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/energeticky-mix-cr/485>
- [2] The global status of Hydropower. *Hydro Equipment Association* [online]. 2013 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.thehea.org/hydropower/facts-figures/>
- [3] HAVLÍK, Aleš. Využití vodní energie. In: *Využití vodní energie* [online]. 2007 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Vyuziti_vodni_energie.pdf
- [4] MUSIL, Petr. *Globální energetický problém a hospodářská politika - se zaměřením na obnovitelné zdroje* [online]. 2009 [cit. 2014-02-24]. ISBN 978-80-7400-112-3. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=uCjJ2SGJTDUC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
- [5] Životodárné Slunce. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k12.htm>
- [6] Global mean solar irradiance. *3tier* [online]. 2011 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tier_solar_irradiance.jpg
- [7] Životodárné Slunce. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. *Solární kolektory* [online]. 2006 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/kap2.htm>
- [8] Proč solární panely?. *ArtProfi* [online]. 2014 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.artprofi.cz/sortiment/solar-2>
- [9] Životodárné Slunce. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. *Odeillo a spol.* [online]. 2006, č. 1 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k23.htm>
- [10] NEJEDLÝ, Petr. První solární věž v Německu. *Nejedly.blog.idnes.cz* [online]. 2010 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/c/148194/Prvni-solarni-vez-v-Nemecku.html>
- [11] Fungování větrných elektráren. *Skupina ČEZ, výroba elektřiny* [online]. 2012 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/obnovitelne-zdroje/vitr/flash-model-jak-funguje-vetrna-elektřarna.html>
- [12] Wind turbines. *Alternative energy news* [online]. 2009 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/>
- [13] Global mean wind speed at 80m. *3tier* [online]. 2011 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tier_5km_global_wind_speed.jpg
- [14] *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. 2007 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>
- [15] Geotermální energie. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů* [online]. 2007 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/geoterm.htm>
- [16] Energie z biomasy. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů* [online]. 2007 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/biomasa.htm>
- [17] BAŽANT, Zdeněk. *Využití biomasy v energetice*. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58204. Bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně.
- [18] Energie přílivu a příboje oceánů. *Alternativní zdroje energie* [online]. 2013 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.alternativni-zdroje.cz/energie-prilivu-priboje.htm>
- [19] STRÁNSKÝ, JAROSLAV. *ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE*. Brno, 211. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=37642. Bakalářská práce. Ústav energetického inženýrství FSI VUT Brno.

- [20] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULA. Akumulace elektrické energie. *Elektro: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011, roč. 2011, č. 2 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869
- [21] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. *Encyklopedie-energetiky* [online]. 1999 [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [22] Flywheel Energy Storage System. *Beacom Power* [online]. 2013 [cit. 2014-02-27]. Dostupné z: http://www.mytopschool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C011/21/StockageEnergie/files/Documents/FESS_Tech_Data_Sheet.pdf
- [23] KUBEŠ, Karel. Adiabatická tlakovzdušná akumulární elektrárna. *Elektro* [online]. 2011, roč. 2011, č. 6 [cit. 2014-02-27]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43684.pdf>
- [24] DOUCEK, JANÍK, TENKRÁT a DLOUHÝ. VYUŽITÍ VODÍKU K REGULACI VÝKONU OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE. *CHEMAGAZÍN* [online]. 2010, č. 3 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/CHXX_3_cl1.pdf
- [25] PASOTREK, Lukáš. *Využití energie piezoelektrického jevu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2274/Piezoelektricky%20dej.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.
- [26] Výroba vodíku parním reformováním. *Petroleum.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [27] SMOLOVÁ, Markéta a Petr DLOUHÝ. Výroba vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/408-vyroba-vodiku>
- [28] ŠVÁB, Michal. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice. In: *Česká energetická agentura* [online]. 2006 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>
- [29] LUŤCHA, Josef. Vodík - složka paliva spalovacích motorů. *Produkce vodíku elektrolýzou s větrnými elektrárnami*. 2013 [cit. 2014-03-04].
- [30] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada Publishing a.s., 2010. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [31] LAKVA, Petr. *Výroba vodíku z obnovitelného zdroje elektrické energie*. Brno, 2013. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64058. Bakalářská práce. Ústav procesního a ekologického inženýrství FSI VUT Brno.
- [32] Výkon. *ERÚ* [online]. 2010 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: http://eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2010/pdf/vykon.pdf
- [33] Roční příprava provozu na rok 2012. *ČEPS* [online]. 2011 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Dispecerske_rizeni/Priprava_provozu/Documents/RPP_2012.pdf
- [34] Elektrárny na biomasu. *Výroba elektrické energie* [online]. [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: <http://elektrarne.unas.cz/subory/biomasa.htm>
- [35] GILLINGHAM, Kenneth. *Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Prudent Intermediate Step or a Step in the Wrong Direction?* [online]. Stanford, 2007 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.yale.edu/gillingham/hydrogenICE.pdf>. Akademická práce.

- Stanford University Department of Management Science & Engineering Global Climate and Energy Project Precourt Institute for Energy Efficiency.
- [36] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Skladování vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/495-skladovani-vodiku-i>
- [37] Hydrogen use in internal combustion engines. In: *U.S. Department of energy: Energi efficiency and Renewable energy* [online]. 2001 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf
- [38] VERHELST, S., WALLNER, T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2009, roč. 35, č. 6, s. 490-527 [cit. 2014-03-18]. ISSN 03601285. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.08.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128509000422>
- [39] RAGONESI, Orazio. Systémy pro testy automobilů BMW na vodíkový pohon. *Nationals Instruments* [online]. 2007 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13685>
- [40] SAJDL, Jan. Emisní norma EURO. *Autolexikon.net* [online]. 2006 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://cs.autolexikon.net/articles/emisni-norma-euro/>
- [41] Global Greenhouse Gas Emissions Data. *EPA* [online]. 2008 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>
- [42] PROKOP, Miroslav. Přestavby motorových vozidel na LPG. *Alternativní energie*. 2000, č. 4. Dostupné z: <http://profipress.cz/archiv/alternativni-energie-042000/#page/10>
- [43] Ekologie. *CNG.CZ* [online]. 2013 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/ekologie/>
- [44] BIRATH, Kristina a Lina SJÖLIN. Clean vehicles and alternative fuels: Trends and visions. *NICHES*. 2007. Dostupné z: http://www.niches-transport.org/fileadmin/archive/Deliverables/14936_niche_clean_vehicle_web.pdf
- [45] Nuclear Power and Carbon Dioxide Free Automobiles. *Www.computare.org* [online]. 1999 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.computare.org/Support%20documents/Publications/CO2%20Free%20Cars.htm>
- [46] The Truth About Hydrogen. *Popular Mechanics* [online]. 2006 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.popularmechanics.com/science/energy/next-generation/4199381>
- [47] Hydrogen stations and prices for California. *AltFuelPrices.com* [online]. 2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.altfuelprices.com/stations/HY/California/>
- [48] ČERNÝ, Jaroslav. *HODNOCENÍ PROVOZU MALÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN S PŘIPOJENÍM DO SÍTĚ NN*. Brno, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26994. Diplomová práce. VUT Brno fakulta elektrotechnická, Ústav elektroenergetiky.
- [49] HySTAT HyDROGEN GENERATORS. *Hydrogenics* [online]. 2013 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/2-1-1-industrial-brochure_english.pdf?sfvrsn=2
- [50] Měsíční statistika FVE elektrárny Kutnohorsko. *Statistiky.sollaris.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://statistiky.sollaris.cz/view_months-1.php?elektrarna=121&rok=2013